ISSN 0287-5446

いすゞ技報

ISUZU TECHNICAL JOURNAL

131
DEC 2019

【特集】
新型ISUZU D-MAX

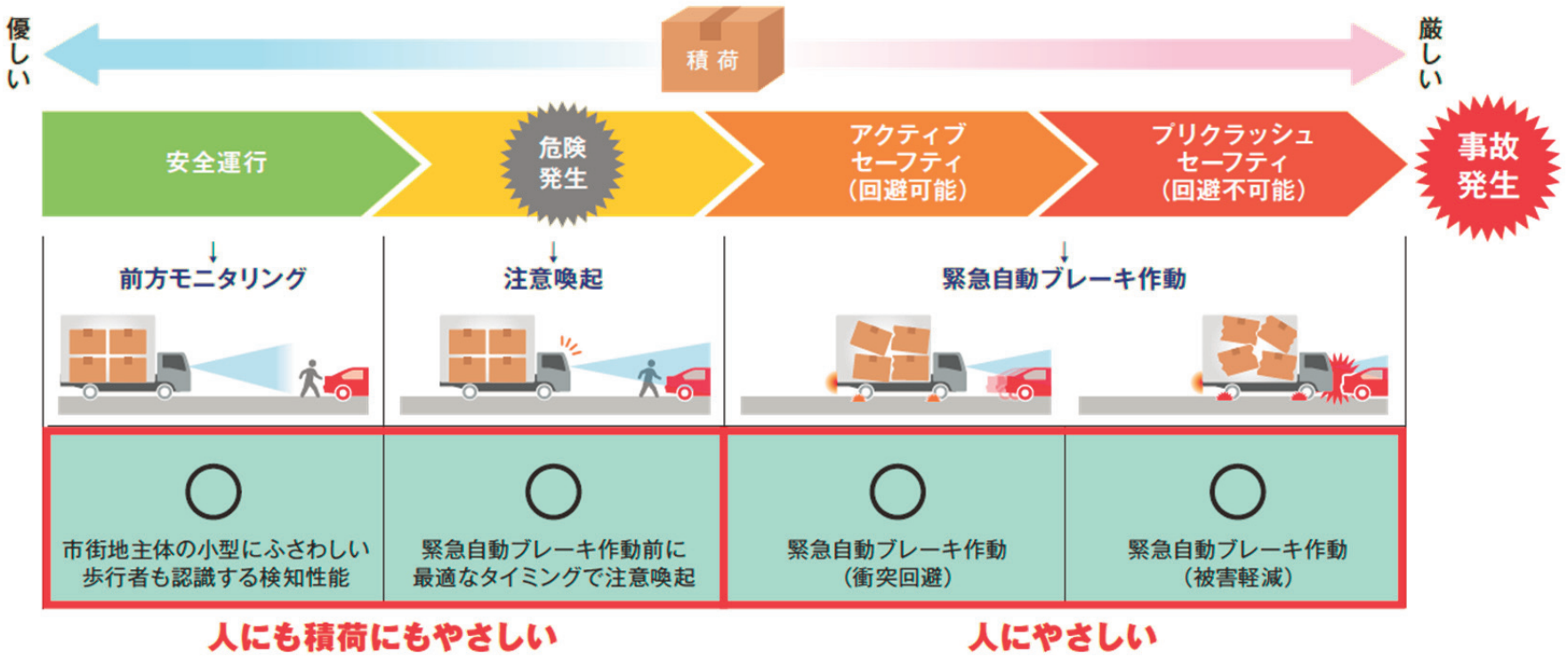
【小特集】
18型エルフの導入技術

エクステンドキャブ / Space Cab

クルーキャブ / Crew Cab

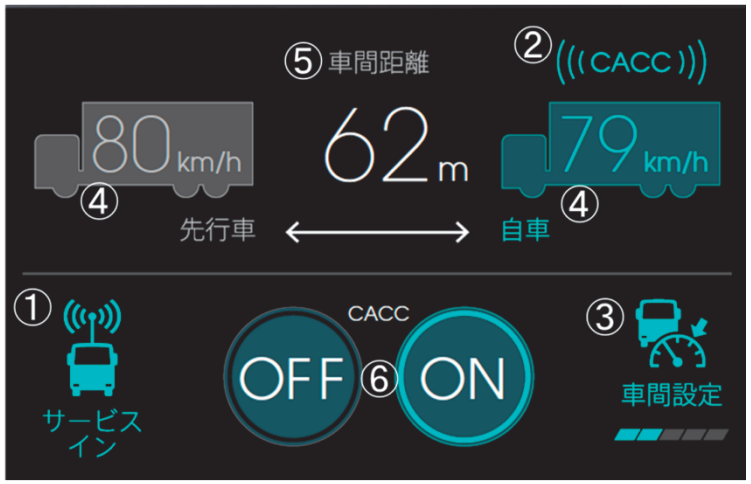
シングルキャブ / Regular Cab

新型ISUZU D-MAX
(新型ISUZU D-MAXの開発について)

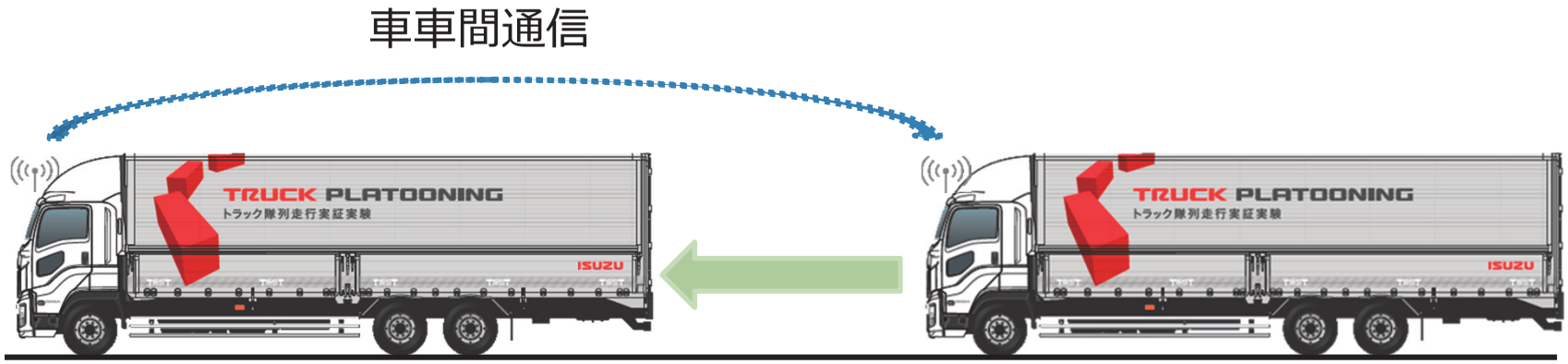


エルフ安全装置に関するコンセプト
（18型エルフのステレオカメラを使ったAEBS）

大型LNG トラック外観
（大型LNG トラック及びLNG 充填スタンド開発事業について）



CACC 実験用HMI（表示例）



ミリ波レーダ（車間距離センサ）

CACC の模式図

（CACCを用いたトラック隊列走行システムの紹介）

いすゞ技報　第131号 (2019)
目　　次

◇ 巻頭言

新型 ISUZU D-MAX 特集号に寄せて …… 加藤　祐三 …… 1

◇ 特集　新型ISUZU D-MAX

- 新型 ISUZU D-MAX の開発について …… 疋田　吾郎・牧　英明 …… 3
- 新型 ISUZU D-MAX の製品概要について …… 牧　英明・斎藤　千史・合田　一郎・平田　朗 …… 7
- 新型 ISUZU D-MAX のデザインについて …… 赤司　尚行・櫛田　雄一・大亀　康宏・苫米地　康久 …… 11
- 新型 ISUZU D-MAX の車体設計について …… 瀧田　茂生・Anupong Khumnun・Tarawit Pongsiripreeda Tossaporn Tassanabanchong・Chawalit Vithayasintana 神谷　浩一・新留　悠規・田島　一行・Jiradat Prasertsri Sittipol Susinvat・Suvichan Attawuttinun・Worapan Pongnapang Worawit Kuecharoensri・長江　寛之・加藤　知紀・遠藤　徹 …… 21
- 新型 ISUZU D-MAX のシャシについて …… 江崎　智大・井上　哲雄・原澤　哲也・Phapatsarrin Theerawichetkun Valun Tanasaewee・Marut Poothanissorn・遠藤　美幸 吉村　俊彦・Sutthirak Jantakram・大瀧　弘晃 渡邊　浩・Jenwit Suwintrakorn・小竹　亨・射羽　亮 …… 33
- 新型 ISUZU D-MAX の電子・電装・空調について …… 山田　尚・山口　俊光・鈴木　健太郎・沼田　浩二 曲澤　正樹・今野　桂太・栗田　辰浩・麦島　淳司 赤澤　啓介・和田　悠哉・角田　貴 Ekkachai Phenkhetwit・Nattapong Adiraketanasup …… 42
- 新型 ISUZU D-MAX 搭載 4JJ3 ディーゼルエンジンについて …… 齋藤　昴・三輪　純一・平野　秀一 上野　徹・古橋　匡規・梶山　昌宏 五百住　学・金巻　政治・松原　淳 Sankaraiah Velamuru・Patrick Lüben …… 50
- 新型 ISUZU D-MAX の駆動系について …… 渡邉　哲也・田口　剛次・篠崎　孝之・西村　伸之 野原　和彦・村上　明宏・青山　勝昭・石塚　裕也 高橋　秀夫・川村　高英・中村　英寛 笹川　健太・江原　秀和・岡田　正雄 …… 57
- 新型 ISUZU D-MAX の CAE について …… 松田　康・花岡　雄二・小田　明・程原　雅之 上野　大輔・菊地　正信・寺脇　一裕 石原　聡継・Kittipong Likhitmaskul Wasu Songmuang・Rungrattana Sowjaroensuk …… 65
- 新型 ISUZU D-MAX の車両性能試験について …… 後藤　昌彦・夏見　宏貴・小川　真也・柳　龍治 松本　哲士・加茂　元之・村上　俊介・宇多　純人 小出　高大・上野　真吾・南野　雄一・佃　洋喜 小武　拓矢・五嶋　亮祐・村永　健太・矢部　治貴 水島　昭博・渡邉　章・林　正裕 …… 72
- 新型 ISUZU D-MAX の生産技術について …… 永田　聡・山根　慎也・金子　司 小林　拓也・塩田　克博・吉田　啓行 …… 87

◇ 小特集　18型エルフの導入技術

- 18 型エルフのシャシについて …… 鈴木　隆元・矢野　健介・片桐　希 菅原　宏樹・岡部　哲治・徳武　将也 …… 99
- 18 型エルフのサスペンション・ステアリングについて …… 岩崎　哲弥・伊藤　淳史・加藤　恭平 …… 105
- 18 型エルフのステレオカメラを使った AEBS …… 池田　真悟・島　高志・本田　拓也 相馬　峻祐・東條　智一・伏江　俊祐 …… 109
- AEBS 学習工法の技術構築 …… 梁井　芳樹・佐藤　征則 …… 113

◇ 論文・報告

- CACC を用いたトラック隊列走行システムの紹介 …… 三島　康之・小西　正・井戸沼　秀之 岡本　幸司・岩城　祐輝 …… 118
- 産業用 StageV 排出ガス規制対応 6UZ1・6WG1 エンジン開発 …… 谷山　由和・曲尾　卓磨・襟川　和幸・高嶋　昭宏・角田　裕 板橋　佑介・後藤　真司・石井　光・中村　忠視・伊藤　聖悟 …… 123
- Study on the Quantitative Evaluation Method of SVOC in a Vehicle Cabin Using the Passive Method …… 達　晃一・内藤　敏幸・徳村　雅弘 星野　邦広・岩崎　貴普・神野　透人 臼井　信介・長尾　祥大 …… 129
- 車両軽量化へ向けたアルミニウム合金の応用 …… 八木　三哉・海老原　峻義 …… 137
- 新金型冷却構造による鋳造サイクルタイム短縮 …… 鎌田　光春・永井　航 …… 142
- 大型 LNG トラック及び LNG 充填スタンド開発事業について …… 後藤　康二・原　裕一・城田　和彦 …… 148
- Development and Validation of a Semi Two Site Kinetic Model for Severely Aged Cu-SSZ-13 SCR：Inclusion of Ammonium Nitrate Chemistry and High Temperature NH_3 Oxidation by NO_2 …… Chintan Desai …… 154
- Diesel Particulate Filter に堆積した Ash の構造解析 …… 米山　香澄・中村　圭介・大角　和生・石川　直也 …… 162
- 多品種混流対応型組立ラインの構築 …… 近岡　洋 …… 168

◇ 解説・講義

- 人とくるまのテクノロジー展 2019 への出展 …… 飯田　陽平 …… 174

◇ 社外発表（2018年1月～2018年12月） …… 177

◇ いすゞ歴史の一こま（No.29） …… 10

ISUZU Technical Journal No.131 (2019)

– CONTENTS –

◇ **Foreword** ..... Yuzo Kato 1

◇ **Special Edition for New ISUZU D-MAX**

- Development of New ISUZU D-MAX ..... Goro Hikita, Hideaki Maki 3
- Outline of New ISUZU D-MAX ..... Hideaki Maki, Ichiro Goda, Chifumi Saitou, Akira Hirata 7
- The Styling for New ISUZU D-MAX ..... Naoyuki Akashi, Yasuhiro Okame, Yuichi Kushida, Yasuhisa Tomabechi 11
- Body Design for New ISUZU D-MAX ..... Shigeo Takita, Tossaporn Tassanabanchong, Yuki Shintome, Sittipol Susinvat, Worawit Kuecharoensri, Toru Endo, Anupong Khumnun, Chawalit Vithayasintana, Kazuyuki Tashima, Suvichan Attawuttinun, Hiroyuki Nagae, Tarawit Pongsiripreeda, Koichi Kamiya, Jiradat Prasertsri, Worapan Pongnapang, Tomonori Kato 21
- Chassis of New ISUZU D-MAX ..... Tomohiro Ezaki, Phapatsarrin Theerawichetkun, Miyuki Endou, Hiroaki Ootaki, Tooru Kotake, Tetsuo Inoue, Valun Tanasaewee, Toshihiko Yoshimura, Hiroshi Watanabe, Ryou Ibane, Tetsuya Harasawa, Marut Poothanissorn, Sutthirak Jantakram, Jenwit Suwintrakorn 33
- Electronics Equipment, Electrical Equipment and HVAC for New ISUZU D-MAX ..... Hisashi Yamada, Kouji Numada, Tatsuhiro Kurita, Yuuya Wada, Nattapong Adiraketanasup, Toshimitsu Yamaguchi, Masaki Magarisawa, Junji Mugishima, Takashi Tsunoda, Kentarou Suzuki, Keita Konno, Keisuke Akazawa, Ekkachai Phenkhetwit 42
- Introduction of 4JJ3 Diesel Engine for New ISUZU D-MAX ..... Subaru Saito, Tooru Ueno, Manabu Iozumi, Sankaraiah Velamuru, Junichi Miwa, Masanori Furuhashi, Masaharu Kanemaki, Patrick Lüben, Shuuichi Hirano, Masahiro Kajiyama, Jun Matsubara 50
- Drivetrain Components for New ISUZU D-MAX ..... Tetsuya Watanabe, Nobuyuki Nishimura, Katsuaki Aoyama, Takahide Kawamura, Hidekazu Ehara, Gouji Taguchi, Kazuhiko Nohara, Yuuya Ishizuka, Yoshihiro Nakamura, Masao Okada, Takayuki Shinozaki, Akihiro Murakami, Hideo Takahashi, Kenta Sasagawa 57
- CAE for New ISUZU D-MAX ..... Yasushi Matsuda, Masayuki Hodohara, Kazuhiro Terawaki, Wasu Songmuang, Yuuji Hanaoka, Daisuke Ueno, Toshitsugu Ishihara, Rungrattana Sowjaroensuk, Akira Oda, Masanobu Kikuchi, Kittipong Likhitmaskul 65
- Vehicle Performance Test of New ISUZU D-MAX ..... Masahiko Gotou, Ryuuji Yanagi, Shunsuke Murakami, Shingo Ueno, Takuya Odake, Haruki Yabe, Masahiro Hayashi, Kouki Natsumi, Tetsushi Matsumoto, Sumito Uda, Yuuichi Nanno, Ryosuke Gotou, Akihiro Mizushima, Shinya Ogawa, Motoyuki Kamo, Takahiro Koide, Hiroki Tsukuda, Kenta Muranaga, Akira Watanabe 72
- Manufacturing Engineering of New ISUZU D-MAX ..... Satoru Nagata, Takuya Kobayashi, Shinya Yamane, Katsuhiro Shiota, Tsukasa Kaneko, Hiroyuki Yoshida 87

◇ **Special Edition for Introduced Technologies for MY 2018 ELF**

- The Chassis of MY '18 ELF ..... Takayuki Suzuki, Hiroki Sugawara, Kensuke Yano, Tetsuji Okabe, Nozomi Katagiri, Masaya Tokutake 99
- Suspension and Steering System of MY '18 ELF ..... Tetsuya Iwasaki, Kyouhei Kato, Atsushi Ito 105
- AEBS with Stereo Camera of MY '18 ELF ..... Shingo Ikeda, Shunsuke Souma, Takashi Shima, Tomokazu Toujou, Takuya Honda, Shunsuke Fushie 109
- Technical Construction of Learning Method of Advanced Emergency Braking System ..... Yoshiki Yanai, Masanori Satou 113

◇ **Technical Papers and Reports**

- Introduction of Cooperative Adaptive Cruise Control Truck Platooning System. ..... Yasuyuki Mishima, Kouji Okamoto, Tadashi Konishi, Yuuki Iwaki, Hideyuki Idonuma 118
- Development of Stage Ⅴ 6UZ1・6WG1 Engines for Industrial Purpose ..... Yoshikazu Taniyama, Akihiro Takashima, Shinji Gotou, Seigo Itou, Takuma Magario, Yutaka Kakuta, Hikaru Ishii, Kazuyuki Erikawa, Yuusuke Itabashi, Tadashi Nakamura 123
- Study on the Quantitative Evaluation Method of SVOC in a Vehicle Cabin Using the Passive Method ..... Kouichi Tatsu, Kunihiro Hoshino, Shinsuke Usui, Toshiyuki Naito, Takahiro Iwasaki, Akihiro Nagao, Masahiro Tokumura, Hideto Jinno 129
- Application of Aluminum Alloy for Commercial Vehicle Mass Reduction ..... Mitsuya Yagi, Takayoshi Ebihara 137
- Shortening Casting Cycle Time by New Mold Cooling Structure ..... Mitsuharu Kamada, Wataru Nagai 142
- Development of Heavy Duty LNG Truck and LNG Refueling Station ..... Koji Goto, Kazuhiko Shirota, Yuichi Hara 148
- Development and Validation of a Semi Two Site Kinetic Model for Severely Aged Cu-SSZ-13 SCR : Inclusion of Ammonium Nitrate Chemistry and High Temperature NH_3 Oxidation by NO_2 ..... Chintan Desai 154
- Structural Analysis of Ash Loaded in Diesel Particulate Filter ..... Kasumi Yoneyama, Kazuo Osumi, Keisuke Nakamura, Naoya Ishikawa 162
- Construction of Multi-mixed Production Assembly Line ..... Hiroshi Chikaoka 168

◇ **Explanation and Lecture**

- Automotive Engineering Exposition 2019 Hosted by JSAE ..... Youhei Iida 174

◇ **Publications and Speeches by ISUZU Engineers (2018)** 177

◇ **A Frame in ISUZU History (No.29)** 10

巻　頭　言

新型 ISUZU D-MAX 特集号に寄せて

開発部門 常務執行役員　加藤　祐三
Yuzo Kato

今回新型 D-MAX を特集するいすゞ技報の巻頭言を書かせていただけることを大変うれしく思っています。

巻頭言を書くにあたりまず初めに，この車の開発，生産，販売準備に関わった社内外のすべての関係の皆様に対し感謝申し上げます。

この技報が発行される頃には既に新型 D-MAX はタイの市場で発表・発売されていると思います。果たしてどのような評価で市場に受け入れられているか非常に楽しみです。

新型 D-MAX はいすゞの中核車種に成長したピックアップの新型車として会社の大きな期待を背負って開発をスタートしました。また CASE 時代の新型車として他社に先んじて投入されるこの車には大きな注目が集まるはずです。そのような期待に応えるべく新型 D-MAX には数多くの新機構が装着されています。また目標性能も非常に高く設定しました。

開発は決して順調とばかりは言えませんでしたが，目標をすべて達成し予定通り生産開始することができました。高い目標を達成させたのは，開発に携わった皆さんの知識，経験，熱意と努力に他なりません。皆さんが新しい D-MAX のあるべき姿を思い描き製品に反映することで新型 D-MAX は世に出ることができたのだと思います。

詳細は技報本文の説明に譲りますが，新型 D-MAX の内容に少し触れたいと思います。

新型 D-MAX のコンセプトは“ Efficient and Robust ”としました。

これは正にいすゞのピックアップに求められる特性を言い表している言葉だと思います。いすゞは耐久信頼性と燃費でお客様から高い評価をいただいて来ました。効率良く走り，安全で，更に頑丈でどんな場面でもきちんと働いてくれる車こそ理想のピックアップとしてお客様が求めるものだと思っています。

その理想を実現するためすべてを一新したと言っても過言ではないと思います。

それにはもちろん生産部門との協業が不可欠でした。操縦安定性向上のためのキーとなるナックルの大幅変更に対応する生産設備の新設，エンジントルクアップに対応する駆動系の見直し，ボディ剛性アップのための車組工程の変更等これまで手を付けていなかった部分についても刷新することができました。

エンジンは排気量の変更はないもののそれぞれアップデートを図っています。特に 3L については名前も 4JJ3 と改め最新の装置で高出力，低燃費，低騒音を実現しています。

デザインに関しても時代を画するようなデザインが実現できたと思っています。従前車はスタイルの良さで最後まで変わらぬ評価を受けてきましたが，新型もモデルライフを通じて美しいスタイルで販売に貢献できるものと信じています。

一部だけ紹介しましたが，この車のどの部分を取っても最適な設計でアップデートができています。是非本文をご覧いただきたいと思います。

こうしてでき上がった新型D-MAXは5 m走っただけで違いが分かるほど良い車に仕上がったと思っています。まだ乗っていない人にも是非乗って体感していただきたいと思います。

新型D-MAXは無事完成に漕ぎ着けましたが，開発プロセスの改善に関しては課題が沢山あります。モデルベース開発の更なる活用，試験車台数削減，効率的な評価方法の採用等により，益々増加する装備，複雑化する仕様に対応し，日程短縮，費用削減につなげていきたいと考えています。

いすゞピックアップは今回で7世代を数えることになります。D-MAXとしても3代目になります。初代D-MAXは従来のピックアップとは一線を画す流麗なスタイルと全く新しいプラットフォームで登場し，競合車へも影響を与えるエポックメーキングな車と評されました。2代目はBase車の商品力向上に加えLifestyle Vehicleとしての商品性を高めたことにより未だに競争力を維持しています。そして今回の3代目は従前車に対し更に大きなステップアップを果たすことができたと思っています。今後更なる改良により益々商品力を高め，4代目となる次のD-MAXにつなげていきたいと思います。

CASEと呼ばれる自動車業界の新たな潮流の中でピックアップも変わって行かなければなりません。そのための技術開発が不可欠ですが，お客様のニーズを見失うことなく高い信頼性の商品を提供していくことは今後もなんら変わらないでしょう。

皆さんと一緒に次に向けて頑張っていきましょう。

新型 ISUZU D-MAX の開発について

Development of New ISUZU D-MAX

正田　吾郎*　　牧　英明**
Goro Hikita　　Hideaki Maki

要　旨

いすゞ自動車は，D-MAX を 8 年ぶりにフルモデルチェンジし，タイ国内から順次販売を開始した。

本稿では，フルモデルチェンジに際し，お客様がピックアップに求める要望，従前車の強み･弱みを考え，どこをどのように変えたか，あるいは変えずに進化させたか，その考え方を中心に記載する。また，開発の進め方についても紹介する。

Abstract

Isuzu full-model changed D-MAX after 8 years and started the sales in Thailand.

This article introduces how we changed and improved based on consideration of customer's demand for pickup trucks, as well as the strength and weakness of the previous generation, and how we execute development.

1　はじめに

1974 年にマザー工場である泰国いすゞ自動車（以下「IMCT」と称す）でピックアップ・トラックの現地生産を開始以来，生産台数は 400 万台を越え，現在ではワールドワイドピックアップ・トラックとしてタイをはじめ，世界約 100 カ国以上に展開している。

ピックアップ・トラックは多種多様な使われ方をされるが，近年では乗用中心の使い方も増えており，5 人が乗れる 4 ドア・クルーキャブの台数が増加している。また，世界的に増加している SUV と同等の装備・快適性を求めるお客様も増えている。

ピックアップに求められる項目としては，何でも載せられる荷台，荷台スペース，積載量，けん引重量の大きさ，荷物を積んで悪路を走っても壊れない強度・耐久性，などがある。これは乗用車派生の SUV とは違う強みとして必ず守る必要がある。また，ピックアップの存在が身近な国は，「ピックアップとしてのスタイル」について，ある種の文法のような常識があり，この文法を踏み超えると「ピックアップらしくない」という評価をされることもある。

一方で，排出ガス規制，CO_2 低減，安全性の向上への要求も満足させねばならない。先進国では乗用車・SUV に遅れない装備・仕様の充実を求められるが，特に新興国などのワークホースでは価格が重視される。一つの車型としてカバーする仕様と価格のレンジは非常に広いといえる。

複数の車を使われるお客様も多く，ピックアップ競合車に限らず，乗用車，SUV，トラックまで，できるだけ多くの車を見渡しながら仕様を決定していった。

従前 D-MAX は燃費・耐久性・室内と荷台の広さ・スタイルで好評をいただいたが，一方でインテリアの質感，先進安全装備，インフォテインメントなど，8 年間の変化に対応できていない部分も出てきていた。D-MAX の良いところ，守るべきところは守りつつ，これから先の時代の変化にも可能な限り対応できる構成･構造を考えながら開発を行った（**図 1**）。

クルーキャブ／Crew Cab

エクステンドキャブ／Space Cab

シングルキャブ／Regular Cab

図 1　新型 ISUZU D-MAX

* LCV 商品企画・設計部　　**いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱

2　開発について

市場での使われ方，お客様の要望を聞くために，各地で市場調査を行った。販売店，整備会社はもとより，お客様に直接話を聞くため，荷積み・荷下ろしに立ち合い，市場，農場，牧場，警察，鉱山，配送会社などを訪問，同乗走行，あるいは自分達で運転も行うことで理解を深めた。

また，過去・現在にわたりいすゞの製品，トラック及びディーゼルエンジンなどを使っていただいた経験から，「いすゞ」なら壊れない，裏切らない，と期待していただいている声も多数聞いた。「物心ついた時に父が運転していたのはいすゞのピックアップだった」「親からも親戚からも，いすゞを買えば間違いないといわれた」「いすゞの D-MAX は燃費が良い」「いすゞを買っておけば価値が落ちない」など，嬉しい評価をいただく一方，最新の他社と比較され厳しい意見・要望をいただくことも多かった。これらすべての経験・情報が新型の開発の糧となっている。

コンセプトは“Efficient and Robust”で，燃費性能，安全性を高めつつ，多様な使用環境，さまざまな使い方に耐えうる車を目標に開発した（**図 2**）。

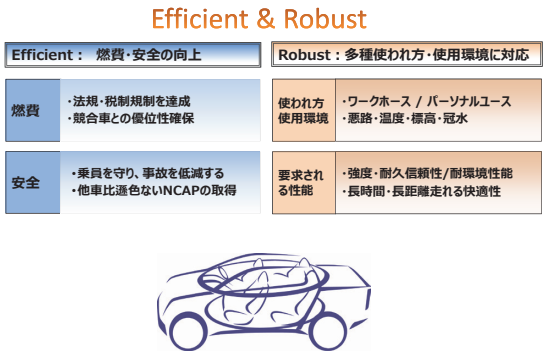


図 2　コンセプト

これらの作業を通じ，開発コンセプトは明確に定義することができたが，次にこれを具現化していく作業に十分な時間をかけた。

車両のサイズ・仕様・装備などは，すべて変更する理由を明確に定義し決定していった。フルモデルチェンジは開発期間も長く，携わるメンバも多いため，誤解ややり直しを避けるために重要な作業である。いかに CAD（Computer Aided Design）／CAE（computer-aided engineering）／IT（Information Technology）化が進んでも，的確なメンバを集め，議論を繰り返し，十分な検証を行った上で決めていくことは変わらない。

車型については，従前車同様キャブ 3 タイプ，2 種類の車高の展開とした。車高の低いローライドは割合としては徐々に減少傾向ではあるが，車両価格，荷物の積み下ろしのしやすさから，しっかり荷物を運べる車としてお客様から選ばれている。近年では都市部のスーパー・デパートなどの立体駐車場の上層階まで配送するお客様も増え，高さ制限のある駐車場に入れて，かつ荷室の高さが確保できる，床下が低いローライド車が選ばれることもある。

やはり割合としては少ないが，バンボディ，冷凍・冷蔵バン，荷台にタイヤハウスのないフラットなトレイなどを架装するお客様もおられ，荷台無しのキャブシャシ仕様を一部地域で設定している。

エンジンは，従前車で新たに設定し燃費のよさで好評をいただいている RZ4E と，坂道が多く，標高の高い地域，あるいはオフロード走行，けん引など，高出力を望まれるお客様に応え，定評のあった 4JJ1 を改良した 4JJ3 の 2 機種とした。

従前車で荷台の広さ，室内の広さは好評をいただいていたことと，燃費を悪化させる空気抵抗を増加させないため，重量増加を防ぐために，車両の大きさはほぼ変えていない。車幅は道路環境から考え必要最低限の拡大にとどめた。車高も上げていない。この制約の中で，荷台の広さ，室内の広さ，乗り降りのしやすさ，使い勝手などを改善すべく，ミリ単位での調整を行った。

デザインセンターからは，パッケージが同じでは外観が従前車と同じに見えてしまう，もっと変えてくれと切望されたが，1）各寸法の理由，2）各部にサイズ制約のあるピックアップとしての「機能美」が重要であること，これを外すとお客様には必ず見抜かれてしまうこと，の認識を共有することで，厳しい制約の中で結果的にうまく変化・進化を表現してくれた。

いすゞ歴代ピックアップで重視してきた，フロア面の低さによる乗り降りのしやすさについては，今回も守っている。また，クルーキャブの後席の乗り降りを改善するためにピラーを前に出し，一部車型ではピラーに縦型グリップを装着した。歩行者保護対応のためにエンジンフードの高さを上げたが，ドライバからのフードの見切りの良さは確保している。

外観デザインについては，詳しくはデザイン詳細解説を参照いただきたいが，いくつか考え方を紹介する（**図 3**）。

図 3　外観デザイン

ピックアップの後姿はテールゲートを開閉する構造上，デザインの自由度が少ない部位である。テールゲートの高さを上げたことで，荷台への乗降性を実車で繰り返し評価した結果，バンパのステップ部を下げることを決め，これがスタイルの変化の一因ともなった。

ハイマウントストップランプもキャブルーフ後端とテールゲートとどちらにすべきか議論となったが，高い位置による後方からの視認性の良さ，外観上のアイデンティティになっていることから，キャブルーフ後端に決めた。

ハブベアリングの改良で，大きく出っ張っていたホイールキャップを低く・小型化することができ，シンプルかつ力強いアルミホイールのデザインに大きく貢献している。

運転環境については，ステアリング，シフトレバー，ペダル等の操作性を改善させた。ドライバが直接触るステアリングホイールとシフトレバーの形状については，運動性能実験部のエキスパートに多数のデザインモデルを触ってもらい，細部まで作りこんだ（**図 4**）。

欧州・豪州など，アジアに比べ体格の大きい方が多い市場から強い要望があったステアリングのテレスコピックを採用し，シートの大腿部のサポートについても改善することができた。

図 4　内装デザイン

インストルメントパネル（以下「インパネ」と略す）について，左右のカップホルダは見栄えが悪い，中央上部の物入れはいらない，との意見もあったが，従前車でもお客様が実際に活用されている例が多く，採用継続を決定し，操作性も改善した。

インパネ中央のディスプレイ及び，4x4 切換えスイッチは，コンソールを設定しない車型もあることから，手の届く位置に決めた。

フロアコンソールは，世界各地で激増したスマートフォン，ドリンクボトル・カップを持ち込むお客様の増加を考え，収納を重視して大型化した。

マニュアルミッションのシフトレバーは特に左右方向の位置決めを明確にし，操作性を改善した。

クルーキャブ後席シートについては，シート設計担当と実験部が図面に表現されない部分までくり返し形状を作りこみ，スペース制約の中で座り心地を改善することができた。

グレード展開については，従前車で 3 グレードであったが，廉価グレードでもパワーウインドウ・ドアロックなどの装備を求めるお客様が増加したこと，上級グレードでの装備増加，そしてスポーティグレードなどの展開対応を考え，今回 5 グレードを設定した。

安全性の向上も重要なテーマであり，前述のドライビングポジションの改良，視界の確保，ブレーキ性能の改良，衝突時の安全性など基本部分から始め，パッシブセーフティについても他社に遅れのないよう，また各仕向けの要望に合わせて採用を検討した。

日本とタイでの共同作業は先々代の開発から続いているが，今回のモデルチェンジでは，タイの中心メンバに日本に出張してもらい，早い段階から共同作業を行った。開発初期の構想段階から顔をつき合わせて作業できたことで，お互いの知識・経験をもとに有益な議論を繰り返し行うことができた。またデザイン，サプライヤとの打合せ，試作作業にも参加してもらい，初期から立ち上がりまで継続して担当するメンバを増やすことができ，今後も続く開発のための良い経験となったと考える。

法規と NCAP（New Car Assessment Program）により安全関係の確認項目は増加の一途である。従前車では試作車両での衝突試験を多数行ったが，今回は CAE の活用により実車試験を大幅に削減することができた。

空力性能の改善は燃費改善のための重要な課題であったが，床下風流れなど実車での評価が難しい部位，車高そしてキャブスタイルなどのバリエーション違いまで CAE で作りこんだことで，実車試験での工数を減らすことができた。

電子・電気装備とその機能の大幅な増加も新たな挑戦課題であった。各装置を並行して同時開発せざるを得ないことから，事前のベンチテストを繰り返すことで車両での不具合発生を抑え，更に問題解決には多くの関係者の知恵を集結しチームワークで取り組んだ。ただし，複数の不具合が重なることなどにより，試作車両の完成が遅れ，後工程の日程を守るために追加の費用がかさんだ場面があったことは反省点である。

今回のモデルチェンジで，ボディの結合構造を変更したこと，ハイテン材の増加，またシャシでは排出ガス後処理装置の部品増加など，生産工程に影響が及ぶ変更が増加した。生産部門には初期構想段階から参画

してもらい検討を進めた。

生産試作が始まってからは，現場はタイであり，朝・夕に連絡会議を設定するなど，タイと日本とで密に連絡をとりあって進める体制で対応した（**図 5**，**図 6**）。

3　おわりに

試作車が完成した時，試験が無事に完了した時，量産車がラインオフした時，発表会，販売店でのイベントなど，仕事の達成を実感する機会は各担当者にとってそれぞれ異なるものである。商品企画という立場からは，お客様に購入いただき，ナンバープレートが付き，実際に使われている姿を見る時が最も嬉しい瞬間である。厳しい指摘・要望も含めて，お客様からの話を伺う機会が待ち遠しい。

貴重な情報を提供していただいた，社内の他車型開発担当，社内各部門，海外各販売会社，各拠点の駐在者，関係各社，サプライヤ各位に厚くお礼を申しあげたい。

モデルチェンジのたびに考慮すべき項目は増え，一方で開発期間は短縮せねばならないのは，自動車製造業としての宿命といえるが，次のモデルチェンジでは今回以上に難しい課題が山積すると思われる。ツールや手段がいかに進歩したとしても，最後にお客様にお渡しするのが実物の製品である限り，現場現物が最重要であることを，次の世代にしっかりと引き継ぎ，今後も手を緩めることなく，改良に取り組んでいきたい。

図 5　New D-MAX 開発チーム（日本）

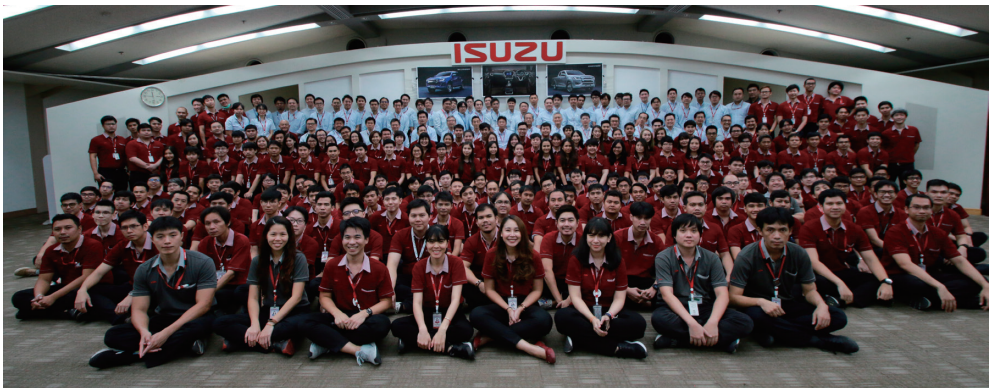


図 6　New D-MAX 開発チーム（タイ）

著　者

疋田　吾郎

牧　英明

新型 ISUZU D-MAX の製品概要について

Outline of New ISUZU D-MAX

牧　英明*　Hideaki Maki
斎藤　千史**　Chifumi Saitou
合田　一郎**　Ichiro Goda
平田　朗**　Akira Hirata

要　旨

ISUZU D-MAX は，世界 100 ヵ国以上の，多くのお客様に愛用され，また，高い評価をいただいている。今回，世界中のお客様の期待を超えた更なる進化を目指し，長年築き上げてきたピックアップ・トラック開発経験を活かして新規開発に取り組んだ。本稿では，新型 D-MAX の車両全体概要として，開発の狙い・車型展開・製品仕様／各種性能の特徴を紹介する。

Abstract

ISUZU D-MAX has been loved by our customers around the world in more than 100 countries with high reputation.

This time around, we have engaged in our new development to aim for further progress in order to exceed our customer's expectation around the world, by utilizing our long experience in the field of engineering pickup trucks.

In this writing, we will introduce, as overall vehicle outline of our new D-MAX, the objective of development, model deployment, product spec. in addition to the characteristics of various performances.

1　はじめに

ピックアップ・トラックは，個人ユース乗用車として使うことができると同時に，商用車としても使用できる貨客兼用車で，特にタイにおいて，幅広い支持を得ている。これまでに D-MAX は，タイ国内において，2019 年度モストポピュラーピックアップ，最優秀省燃費ピックアップ，ベストライフピックアップを受賞するなどトップブランドとしての地位を確立してきた。

今回，更にお客様の期待に応えるべく，すべてを一新するフルモデルチェンジを実施した。

2　開発の狙い

「ベースコンセプト」の「Efficient & Robust」を下位目標へと落とし込み，また，従前車における市場からの高評価を更に向上すべく，次の項目についての大幅改善を狙いとした。

① プラットフォーム及び，車体基本構造の見直しによる，軽量構造と強度･耐久性能･剛性アップの両立
② 燃費性能向上及び，CO_2 排出量の削減
③ 操縦安定性の改善，ブレーキ性能の向上及び，積極的な先進安全装置の採用による安全性の向上
④ 運転支援機能，情報表示機能，インフォテイメントなどの快適装備の充実

3　車型展開

市場要求に合致する展開車型を再設定，グレード展開は市場ニーズに合わせて設定し，一方で各コンポーネントの種類削減を図った。

具体的には，リヤボディ種類削減（レギュラーキャブをナローに統一），リヤアクスル幅を共通化し，アクスルケース種類削減を実施した（**表 1**）。

表 1　展開車型（タイ向け）

ENG	DRIVE	CAB グレード	REG		EXT			CREW			
			RBA	RBB	RBB	RBC	RBD	RBB	RBC	RBD	RBE
RZ4E 110kW/ 350Nm	4X2	MT	●	●	●	●	●	●	●	●	
	4X2HR	AT					●			●	
		MT				●	●		●	●	
4JJ3 140kW/ 450Nm	4X2	MT		●	●						
	4X2HR	AT								●	
		MT					●			●	
	4X4	AT									●
		MT		●			●			●	●

*いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱　　** LCV 商品企画・設計部

4　製品概要

4.1 パッケージ／諸元

車両の基本サイズは従前車から踏襲しつつ, 安全性, 居住性, 荷役性, 乗降性, スタイルの向上を目指し, 車両レイアウトを全面的に見直した。

【各キャブ共通の変更内容】

・ ホイールベースの拡大とカーゴサイド上面を高くすることで力強いスタイルに貢献
・ 運転席と助手席のカップルディスタンスを広げ室内の広さ感／高級感を向上

【クルーキャブ（図 1）】

・ B ピラーの下部を前方に移動し足抜けスペースを拡大することで乗降性を改善
・ スペースを有効活用し荷台長を拡大

【エクステンドキャブ（図 2）】

・ 室内スペースは従前車と同等を確保しつつキャブ後端を前方移動し荷室長を拡大

【レギュラーキャブ（図 3）】

・ キャブ後端を後方へ移動し, クルーキャブと同等の前席のスペースを確保
・ 荷台長も拡大

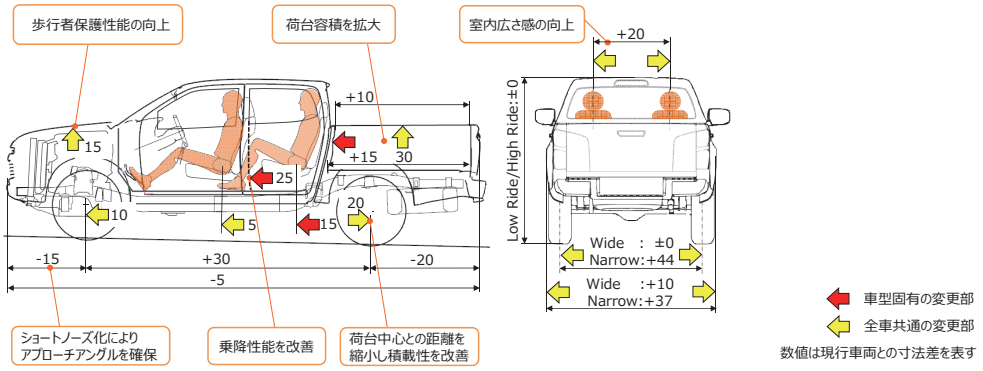


図 1　クルーキャブ パッケージ

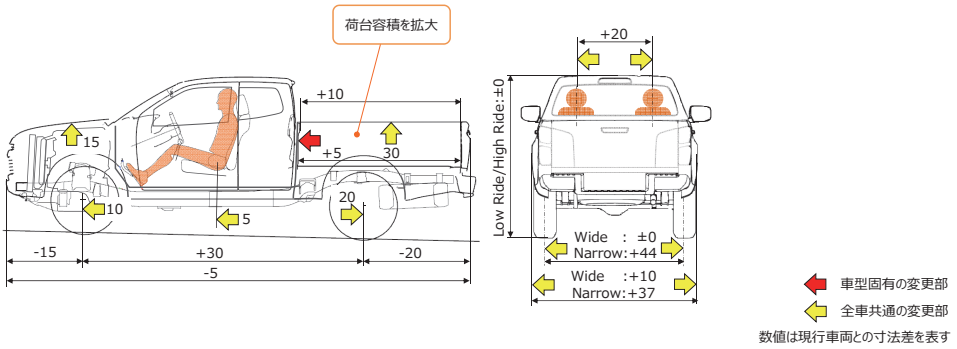


図 2　エクステンドキャブ パッケージ

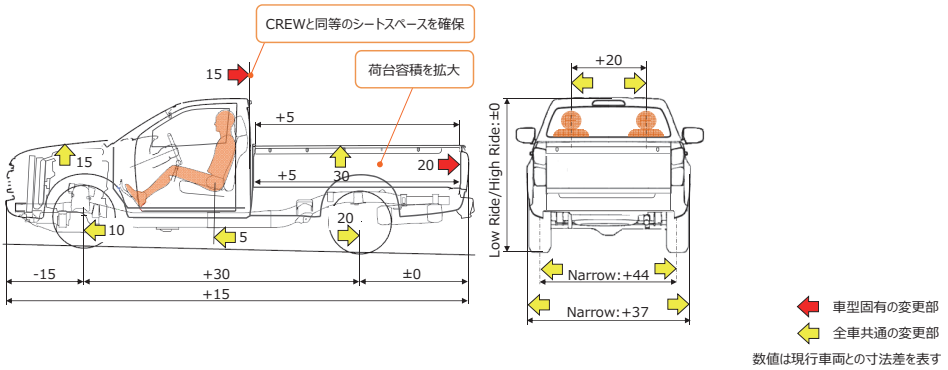


図 3　レギュラーキャブ パッケージ

4.2 プラットフォーム

次の改良を加えることで，衝突安全性能，操縦安定性能，乗り心地性能，NV（騒音・振動：Noise, Vibration）性能の向上と軽量化の両立を図った。

① フレームサイドメンバ断面の拡大及び，内側レインフォース配置の最適化を実施。また，フロントエクステンション先端部延長及び，クロスメンバ配置の適正化により剛性を大幅に高め，衝突安全性能を向上しつつ軽量化を実現。（従前車比　ねじり剛性 20 %，縦曲げ剛性 26 %向上）ボディマウントについてはシェアマウントを採用し，操縦安定性能，NV 性能の向上を図った。
② フロントアッパーリンクのハイマウント化及び，リヤリーフトレッドの拡大により，操縦安定性及び，乗り心地性能の改善を図るとともに，高強度リーフスプリングの採用による軽量化を実現。
③ ブレーキディスク大径化・幅拡大により，ブレーキ制動性能及び，フィーリングの向上を図った。
④ ステアリング切れ角拡大により，取り回し性の向上を図ると同時に，操舵力低減及び，ギヤ比変更により，操縦安定性の向上を図った。
⑤ マニュアルトランスミッションのシフト操作性の向上を図り，更にリバース操作にプルリング方式を採用した。オートマティックトランスミッションはシフト節度感改良及び，フリクション低減を図った。

4.3 各種性能

4.3.1 操縦安定性

ボディ剛性（曲げ・捩じり剛性 20 %アップ）及び，フレーム剛性向上，前後サスペンションの改良によりロール剛性を向上させ，操縦安定性及び，乗り心地の大幅改善を図った（**図 4**）。

4.3.2 振動騒音性能

企画段階より「いすゞ中央研究所」と協業し，バーチャルプロトモデル構築への取組みを実施した。TPA（伝達経路解析：Transfer Path Analysis）モデルを活用した企画 CAE（Computer Aided Engineering）により，車内音目標設定・全体最適化・ユニットごとの特性値割付けを実施することで CAE を駆使した振動騒音性能向上を行った。具体的には，ボディ剛性アップ，インシュレーションの最適化，エンジンの低騒音化などにより，クラストップレベルの静粛性を達成した。

4.3.3 動力性能

3 L エンジンの大幅改良実施，中低速を中心に全域トルクアップによる実用域の使い勝手の向上を狙った。

1.9 L については，噴射制御の見直しを実施，ファイナルギヤの変更と合わせて，発進性の改良を行った。

4.3.4 空力性能

開発初期段階より空力 CAE，1/4 スケールモデルでの風洞試験を実施し，ピックアップ・トラックの空力性能に大きく影響するルーフ後端形状等をスタイルの基本シルエットへ反映した。また，試作車による検証段階では，アンダカバー等の詳細形状の造り込みを，空力 CAE 及び，実車風洞試験で実施。結果，空気抵抗係数は従前車に対し 4 %向上，クラストップレベルの空力性能を達成した。

4.3.5 安全性能

各 NCAP（新車アセスメントプログラム：New Car Assessment Program）の最新プロトコルに対応すべく，ボディ・フレーム構造・拘束装置の見直しを行い，アクティブセーフティ装備を採用した。

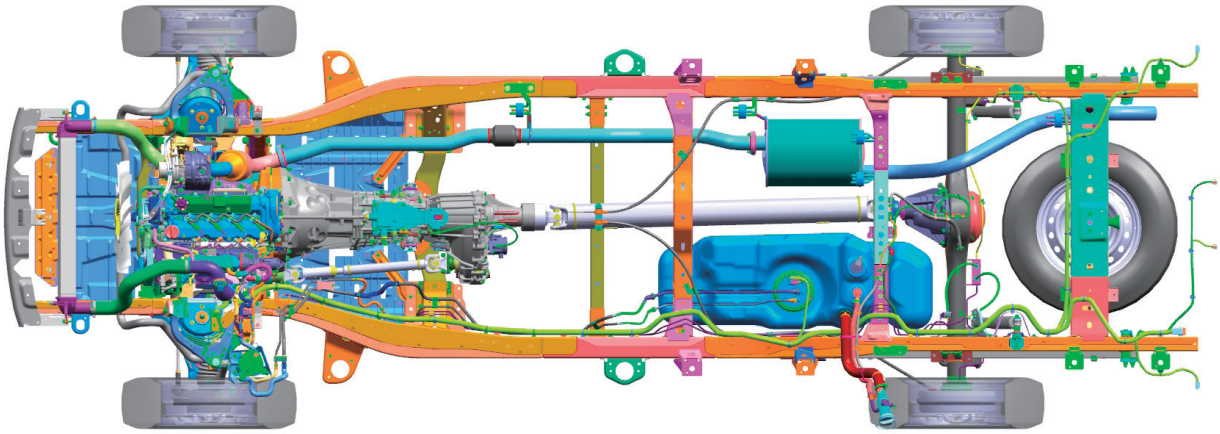


図 4　プラットフォーム

4.3.6 重量

性能向上及び，市場要求により仕様装備を追加することで重量が増加するが，それを抑制するために軽量化を行った。

ボディーパネルへの超ハイテン材の採用及び，ハイテン材の採用拡大を実施。また，床下骨格部材の断面最適化による板厚削減を実施した。フレームは構造・断面最適化を実施した。4x4 モデルは，アルミ 1 本プロペラシャフトを採用し，大幅な軽量化を実現した。

4.3.7 メンテナンス／整備性

メンテナンススケジュールの延長を行い，整備頻度，費用の削減を図った。

5 おわりに

新型 ISUZU D-MAX の開発を終え，すべての設計を一から見直し，何を守り，何を変えていくか，すべてはお客様のために考え尽くした結果を形にした。

お客様の満足が，我々開発陣の最大の喜びである。また，今後 10 年間に起こり得る大きな変革にも対応可能なポテンシャルを盛り込んでおり，ピックアップ新時代の世界基準となり得る車へと進化ができたと考える。

開発過程での多くの悩みも，生産部門，購買部門，営業部門，他，皆様のご協力を得て解決することができたことに，心より厚く感謝申し上げたい。

世界中のお客様の満足のために，これからも良い商品を開発していきたい。

著　者

牧　英明

斎藤　千史

合田　一郎

平田　朗

◇いすゞ歴史の一こま

KB型トラック総組立ライン

藤沢工場では 1972 年から，D-MAX の前身となる KB 型小型ボンネットトラックを生産し，日本では「ファスター」，米国では「シボレーLUV」として販売しました。

新型 ISUZU D-MAX のデザインについて

The Styling for New ISUZU D-MAX

赤司　尚行*
Naoyuki Akashi

櫛田　雄一*
Yuichi Kushida

大亀　康宏*
Yasuhiro Okame

苫米地　康久*
Yasuhisa Tomabechi

要　旨

いすゞの１トン積みピックアップトラックとしては7代目，ISUZU D-MAXとしては3代目の新型ISUZU D-MAX をデザインするというプロジェクトで，いすゞデザインセンターが特に留意したのは，次世代に継承するいすゞらしさ，つまり，燃費・安全性・居住性といった基本性能を踏まえた上で，デザイン自身は時代の進化を先取りした革新的なものにするという点である。

本稿では，新型 ISUZU D-MAX に込めたデザイナの思いとスタイリングの特徴をプロセスとともに紹介する。

Abstract

What kind of special attention Isuzu design center embraced when designing the new Isuzu D-MAX, that marks the 3rd Generation Isuzu D-MAX as well as the 7th Isuzu 1-ton Pickup truck, was to make the design itself be definitely ahead of the times and make it innovative based on Isuzu's unique qualities, such as good fuel consumption, safety or roominess, that is to be inherited by the next generations. In this article, we would like to introduce along with its process the characteristics of the styling and the deep feeling our designers have for the new Isuzu D-MAX.

1　はじめに

デザイン開発のスタートにあたり，デザインセンターでは，今回のプロジェクトの目標を「BEYOND THE PICKUP TRUCK- これまでのピックアップトラックの常識を超えたデザイン」と定めた。

デザイン開発は，当初これまでの ISUZU D-MAX（以下，「D-MAX」と略す）同様，ゼネラルモータース（以下，「GM」と略す）との協業作業で行われた。今回の GM デザインは前回よりもパワーアップして挑んで来たため，前半はこの GM と WIN-WIN になるように共通デザイン部分とユニークデザイン部分の骨格を決めることに重点を置いた。「これまでのモデルを超えるデザインにする」という認識は共有化されていたものの，四角いアメリカントラックを志向する GM デザインと流麗なピックアップトラックを考えていた我々いすゞとの整合は，非常に挑戦的な課題であった。残念ながら，デザインプロセス中盤に GM との協業が解消された。そこで我々は，残された少ない時間の中で，GM から学んだピックアップらしさをベースに，D-MAX としては初めて，いすゞに特化したデザインに集中することにした。

2　スタイリングコンセプト

プロジェクトの初期段階で，世界各地での市場調査を実施し，ピックアップトラックの使われ方の差，そしてデザイントレンドの調査を行った。また，D-MAX の最大市場であるタイ（**図 1**）と先進国市場の欧州（英国）にてユーザインタビューとクリニックを実施した（**図 2**）。

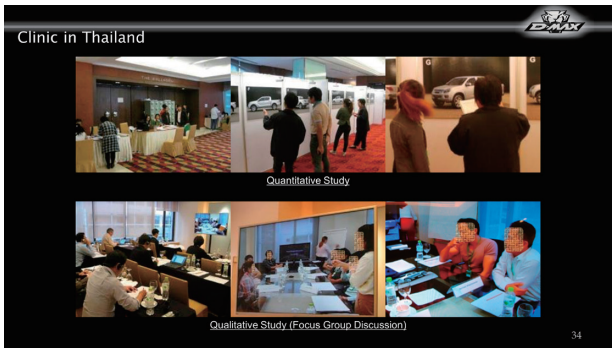


図 1　クリニック風景 - タイ

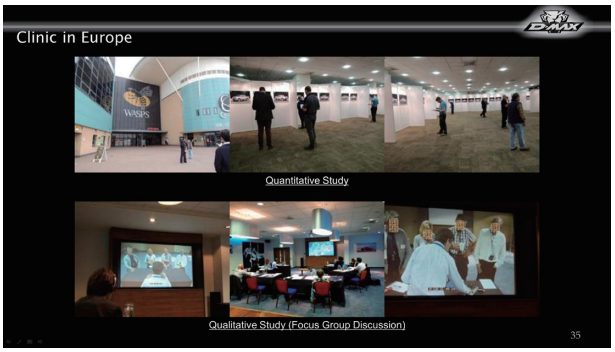


図 2　クリニック風景 - 欧州

*デザインセンター

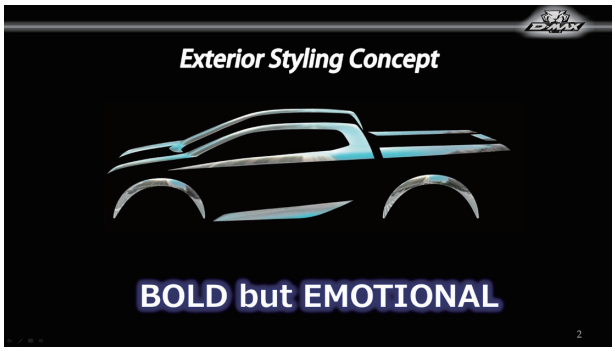


図 3　エクステリア コンセプト

図 4　インテリア コンセプト

これらの調査結果から，新型 D-MAX は「BOLD, EMOTIONAL, SMART」をキーワードにデザイン開発を推進することにした。

エクステリアは「BOLD but EMOTIONAL」をコンセプトに，力強さ・重厚感を持ちながら，同時に感情に訴える，スピード感あるデザインを目指した（**図 3**）。

インテリアのスタイリングコンセプトは「BOLD but SMART」とし，横基調による幅広感を強調し，そこにシャープなエッジとレイヤー感を加え，素材にとことんこだわることで，従来のピックアップトラックのインテリアを超えたラグジュアリーで快適な室内空間の両立に努めた（**図 4**）。

3　エクステリアデザイン

3.1　スケッチ～コンセプトデザイン

エクステリアデザインでは，お客様のライフスタイルにマッチし，存在感あるこだわりのギヤとしてのスタイルを実現すべく，アイデアスケッチを描き始めた。

初期アイデアスケッチのステージでは，時代の進化を先取りするスタイルを目指し，具体的なスタイリングテーマを幅広く模索した。特に，ピックアップトラックとしての力強さとは何か，エモーショナル感とは何かについて議論を繰り返し，次世代のスタイルとしてふさわしいフォルムとキャビンデザインの具現化を中心にスケッチを描いた（**図 5**）。

3.2　コンセプト決定

斬新なアイデアが盛り込まれた数多くのスケッチ群からポテンシャルを有する提案をベースに，数案のスケールモデルを製作し，スタイルコンセプトの可視化をトライした。

各コンセプト案をクリニックに供した結果，力強さは必要ながら，アメリカン・フルサイズピックアップのように角張った力強さではなく，「力強さと動きとエモーショナル感を合わせ持ったスタイルであることが必要」という仮説が検証され，スタイリングコンセプトを「BOLD but EMOTIONAL」と決定した。

最終的に，2 案の 3/8 スケールモデルを作製しスタイル確認のステージへと移行した（**図 6**）。

図 5　エクステリアスケッチ

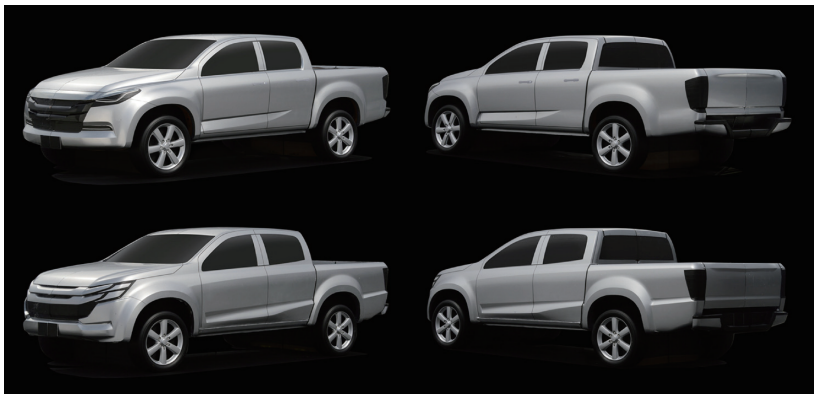


図 6　コンセプト決定用スケールモデル

3.3　タイプ選定～タイプ決定

コンセプト決定時に製作したスケールモデルをブラッシュアップし，よりコンセプトが分かりやすく伝わる形状を目指してタイプ選定案を作製した（**図 7**）。

このタイプ選定のステージから，モデルのスケールを 1/1 フルサイズとして製作し，クライテリアの充足率を上げるための調整も含め，1 案への絞込み作業を行った。

当初は GM との協業で決めた共通デザイン部分の骨格を踏まえつつ，いすゞユニーク部分のスタイル作り込みを行っていた。しかしながら，タイプ決定のタイミングで GM との協業が解消されたため，前途のタイプ選定案にマーケット要望と設計要望を反映したモデルをプレタイプ決定案（**図 8**）とし，改めてタイプ決定に向けて，よりいすゞらしいスタイルへとチューニングを重ねた。その結果，更なる飛躍のできるデザインへの挑戦と関係各部の協力のお陰で，無事タイプ決定モデルを完成することができた（**図 9**）。

図 7　タイプ選定用フルサイズクレイモデル

図 8　プレタイプ決定モデル

図 9　タイプ決定モデル

3.4　スタイル決定

社内外へのプレゼンテーション（図 10）結果を参考にスタイルの調整を行い，最終スタイルを決定した。

スタイル決定のタイミングで留意した点は，次世代としてのフォルムと佇まいである。有機的なイメージと機械的なイメージの融合，そして「躍動感・対比・立体感」と「強さ・重さ・速さ」といった表現を掛け合わせた形状を十分に吟味することで，新型 D-MAX シリーズにふさわしい斬新なスタイルへと昇華させた（図 11，図 12，図 13）。

図 10　プレゼンテーション風景

図 11　クルーキャブワイドハイライド　スタイル決定モデル

図 12　エクステンドキャブナローノーマルライド　スタイル決定モデル

図 13　レギュラーキャブノーマルライド　スタイル決定モデル

3.5 エクステリアデザインの特徴

エクステリアデザインにおいては，まず全体のシルエットで次世代感を表現することに重点を置いた。具体的には，ボディーを分厚く見せるデザインを基本とし，ジェット戦闘機のキャノピーをイメージしたポップアップキャビンをボディーに被せたようなフォルムを採用した。

従前車に対し，フロントのエンジンフードの高さと，リヤカーゴの高さを上げながら，キャビンの全高は下げることで，相対的にボディーが寸法以上に分厚く見える効果を狙っている。

加えて，エクステンドキャブとレギュラーキャブの使い勝手を維持しながら，クルーキャブの乗降性と快適性を向上するために，いすゞのピックアップトラックとしては初めて，クルーキャブ専用のフロントドアを設定することにした。これによりスタイルの自由度も増え，それぞれのキャブタイプを最適なバランスに仕上げることができた。

空力性能に関しては，前途の全高を下げたことに合わせ，解析と実車風洞試験での評価を反映し，最適形状のボディーと空力パーツを作り込むことで，空力特性（空気抵抗係数値）はクラスナンバー1 レベルを達成した。また，ワイドハイライドモデルではインテグレートリヤバンパを採用。カーゴサイドパネルとの段差を無くし一体感のある，おおらかでスタイリッシュな外観による新しさと空気抵抗の軽減を両立した（**図 14**）。

レギュラーキャブにおいても，リヤカーゴを高くすることで，厚みのあるサイドビューと仕事の相棒としての頑丈さを強調した。

顔周りに関しては，新型 D-MAX からいすゞの新ブランドキャラクタとして「ワールドクロスフロー」グリルを採用し，これまでの「6 ホールコンチネンタル」グリルを更に進化させ，アイデンティティの強調と，シャープで特徴的な表情とした（**図 15**）。

4x4 モデルでは，ルーフレールの設定のみならず，専用の 2 トーンカラーバンパとグリル，ホイール，ドアミラー，ドアハンドル，テールゲートハンドル，サイドステップ等に専用パーツ色を設定することで，力強い上級感の演出を行い，4x2 ハイライドモデルとの差別化を図った。

更にタイマーケット向け 4x4 モデルにおいては，Top of Top グレードとして V-CROSS 4x4 仕様をデザインした。この V-CROSS 4x4 のスタイリングコンセプトは「STRONG but INTEGRATED」である。フロントバンパクラッディング，オーバーフェンダ，リヤカーゴエクステンションといったパーツを付加し，ラギッドさを強調しながらボディーと一体感のあるアクセサリをまとったデザインに仕上げている（**図 16**）。

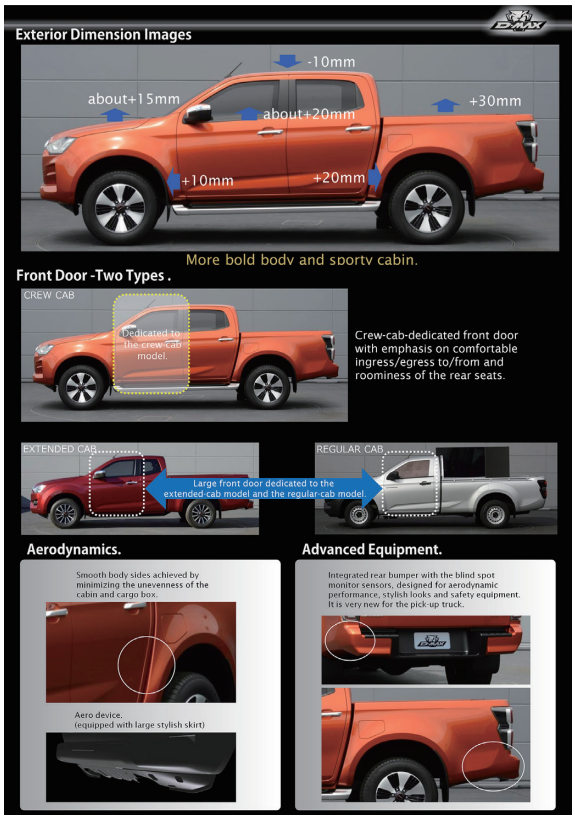


図 14　エクステリアデザインの特徴

図 15　いすゞ新ブランドキャラクタ

図 16　V-CROSS 4x4 仕様

4　インテリアデザイン

4.1　インテリアスタイリングコンセプト

インテリアデザインを検討するにあたり，インテリアスタイリングコンセプトを「BOLD but SMART」とし，ピックアップトラックらしい強さ，タフさの表現と，次世代ピックアップトラックとしての新しさを持ったインテリアを目指すこととした。そして，インテリアスタイルの狙いとして「Horizontal Theme」「Sharp edge」「Undulation」「Layer」をキーワードとした（**図 17**）。「Horizontal Theme」では，インテリア全体でのキャラクタラインの流れから，部品一つ一つまで，横基調を強調するデザインを採用することで，ワイド感／上級感とピックアップトラックらしいタフさを感じさせるデザインとした。また「Sharp edge」「Undulation」「Layer」では，ジェット戦闘機の翼のようなシャープな造形と，表情の変化する柔らかいサーフェースとの対比，そしてベース部／オーナメント部／アッパ部の 3 層にレイヤードされた部品構成と素材感の対比により，先進性を感じさせるデザインを狙っている。

4.2　スケッチ～コンセプトデザイン

インテリアデザイン開発の最初のステップとして，次世代ピックアップトラックのインテリアに求められるものについて議論を重ねた。ピックアップトラックらしい強さ，タフさを持ちながら，ワイドで広々としたスタイル，高重心で足元スペースの広いインストルメントパネル，大型ディスプレーオーディオの配置，幅広で高さのあるフロアコンソールレイアウトなどを考慮しつつ，数多くのアイデアスケッチを描きながら，さまざまなコンセプトデザインの検討を行った（**図 18**）。

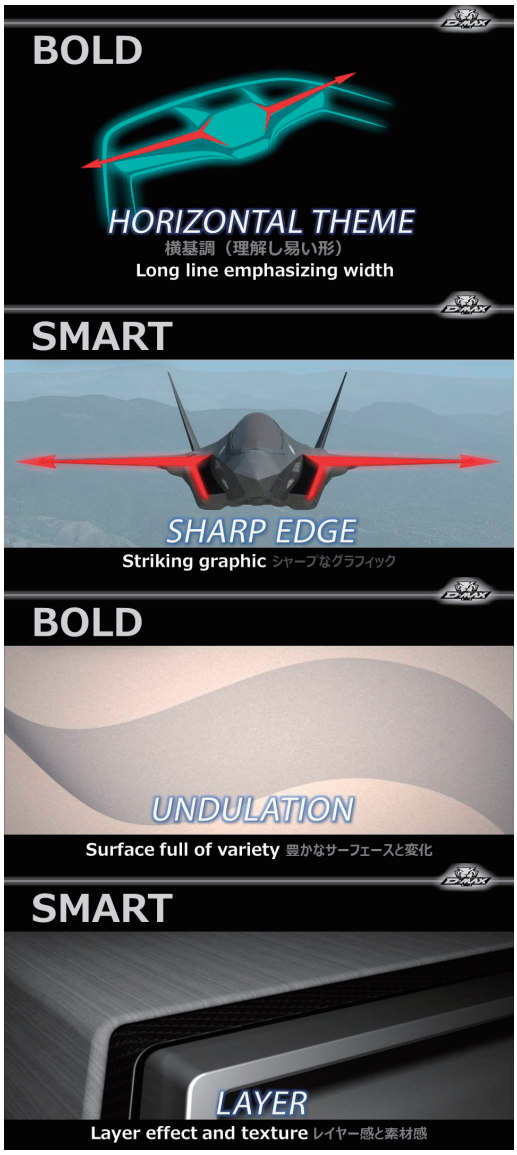


図 17　インテリアデザインの狙い

図 18　インテリアスケッチ

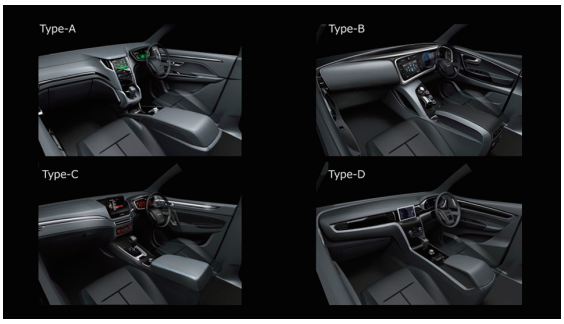


図 19　バーチャルコンセプトモデル

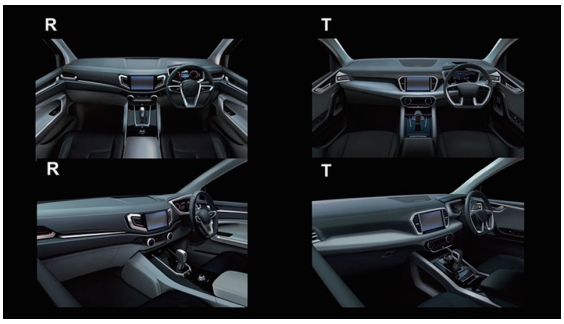


図 20　コンセプトクリニック案　R 案／T 案

図 21　1/2 スケールクレイモデル X 案／Y 案

図 22　タイプ選定 1/1 クレイモデル X 案／Y 案改

図 23　タイプ選定 1/1 クレイモデル HIGH-GRADE

図 24　タイプ選定 1/1 クレイモデル BASE-GRADE

4.3 コンセプト決定

数多くのスケッチの中から選ばれたコンセプトデザイン原案をベースに，コンピュータによるバーチャルコンセプトモデル 4 案を作成した（**図 19**）。

これらのコンセプトデザイン原案の中から，タフさとスマートさを持った 2 案の検討を更に進め，コンセプトデザイン案として R 案／T 案を選定した。

このコンセプトデザイン案について，メインマーケットであるタイと，自動車先進国である欧州（英国）にてデザインクリニックを実施した結果，評価が非常に高かったので「BOLD but SMART」をインテリアコンセプトとすることに決定した（**図 20**）。

4.4 タイプ選定

コンセプトデザイン案，R 案／T 案をベースに，より先進性を感じさせるスタイルにすべく検討をスタート。3D データによるバーチャルデザイン検討と合わせて，1/2 スケールクレイモデルによる造形検討も実施した（**図 21**）。しかし，その後のフルサイズクレイモデルによるタイプ選定モデル検討は難航した。 当初，新しさ，いすゞらしさが十分ではないとの判断から，修正，レビューを何度か繰り返した後，Y 案改モデル（**図 22**）をタイプ選定候補案として検討案を 1 案に絞った。その後，新しさ，キャラクタを強める改良を行ったモデル（**図 23**）を HIGH-GRADE 仕様のデザインタイプ選定モデルとした。

同時に今回のプロジェクトで，もう一つの特徴である BASE-GRADE 専用インテリアのデザインについても，共通化構想の見直しを含めたスタイル提案を行った。より幅広い商品バリエーション展開と，HIGH-GRADE 仕様の商品性向上に対応するため，BASE-GRADE 専用部品の範囲をインストルメントパネルアッパー部まで拡大し，より機能的で，コストを考えたスタイルを提案した。BASE-GRADE 仕様は，社内関係者，マーケットの評価も高くタイプ選定とした（**図 24**）。

4.5 タイプ決定

タイプ決定に向け，BASE-GRADE との部品共通化とデザインクライテリアの充足を目指し，デザインの更なるチューニングを行い，社内外関係者にプレゼンテーションを実施した。デザイン審議会にてタイプ決定案として承認はされたが，先進性，新しさについての更なる改良が宿題となった（**図 25**）。

そこで，先進性，新しさを表現するため，「造形の深化」，「横フローの強調」，「陰影を強調してより塊感のある造形」，「加飾を強調した重心の高さ」，「対比」，「レイヤー感」を考慮した修正を行い，関係者への再レビューを実施した結果，社内関係者及びマーケットのいずれにも非常に評判が良いモデルができ上がった。この時点で，ほぼ最終形に近いスタイルがまとまった（**図 26**）。

4.6 スタイル決定

タイプ決定モデルをベースにインテリア全体のスタイル洗練化を行い，更にクルーキャブ，エクステンドキャブ，レギュラーキャブの各キャブバリエーション展開，並びに BASE-GRADE～HIGH-GRADE までのグレードバリエーションに対応したさまざまなパーツのディティールまで，デザインの作り込みを行った。

結果，お客様に喜んでいただける，次世代ピックアップトラックにふさわしいインテリアデザインを提案することができたと確信している（**図 27**, **図 28**）。

4.7 インテリアデザインの特徴

Quality improvement & Usability design

従前車で好評であったユニバーサルデザイン手法によるインテリアデザインについては，フルモデルチェンジの時にしかできないことをメインに，使い勝手にフォーカスしたユーザビリティーデザインを提案した。

またインテリアの質感向上のため，ソフトマテリアル＋ステッチ仕様の採用，加飾仕様の見直し，手に触れる頻度の高い部品のレザー仕様の見直し等を行った。レイアウト改善点としては，乗員着座位置を片側10 mm 外側へ移動，合わせてシフトレバー，サイドブレーキとフロアコンソールのレイアウトを見直すことにより，コンソール上面の幅と高さを大幅に見直すことが可能となり，よりコックピット感ある上級クラスの見え方を作ることができた。収納では，従前車でも好評であったインストルメントパネルの収納コンセプトは継承した。また，カップホルダ／ボトルホルダを前席 6 箇所，後席 4 箇所設定し，前後ドアポケットには 1.5 L サイズのペットボトルも収納可能なデザインとした。フロアコンソールでは，スマートフォンの接続，充電のためのコネクタ，そしてその置き場所についても考慮したデザインになっている。

図 25　タイプ決定フルサイズクレイモデル

図 26　タイプ決定クレイモデル最終案

図 27　HIGH-GRADE インテリア最終仕様

図 28　BASE-GRADE インテリア最終仕様

ユーザインタビューでも要望の多かったクルーキャブ後席の居住性・快適性を改善するデザイン提案を行った結果，フロントドアパネルの専用化が採用になり，乗降性は改善され，開口部には十分な寸法が確保できるようになった。また従前車でも対応したセンタピラートリム下部えぐり形状，及びリヤドアトリム下部の足抜け形状も更に改善した。リヤシートバックの角度を見直すとともに，フロントシートレール幅，オフセット量を見直し，後席乗員の座り心地と足入れ性を改善。後席乗員用ベンチレーショングリル，USB コネクタの設定。ハイライドモデルには，A ピラーだけでなく，センタピラーにもグリップを設定した（**図 29**）。

5　カラー & マテリアルデザイン

3 代目新型 D-MAX に向けて，これまで各市場で認知され根付いた価値をモチーフに，先進技術・工法で再構築することにより，判りやすさと新しさが融合する「シナジー（伝統と革新の融合）」をデザインコンセプトとし，「機能（使いやすさ・ロングライフ）」，「環境（市場性・低負荷）」，「こだわり（精度・触感）」，これらに傾注し，内外カラーデザイン品質の向上を目指した。

5.1　エクステリアカラー

エクステリアカラー群のカラーポピュラリティ上の優位性と広範な市場投入に伴う多様なニーズを鑑み，コアカラーであるシルバーとブラックを刷新，材質感をアップデートし新世代モデルにふさわしい上質な存在感を表現。またキャラクタ訴求色としてオレンジを設定し，アクティブマインドなお客様に向け情熱的な力強さを訴求した（**図 30**）。

5.2　インテリアカラー

テーマは「Powerful & Essential」。本物志向でタフなチャレンジ精神を持つお客様のために，本質的で力強くち（緻）密な世界観を訴求する「ブラック」を基調とし，全車型へ展開。また一部上級仕様向けには「Mature experience & Quality life」をテーマに，経験豊かで成熟した価値観を持つお客様に向け，上質な素材感と作り込みによる華やかで趣味性豊かな世界観へと誘う「ダークブラウン」を配色。シート・ドアインサート・コンソールリッドに加えインストルメントパネル上部までインサート配色を拡大，基調色ブラックと相乗させインディビジュアル感を強調させている（**図 31**）。

図 29　インテリアデザインの特徴

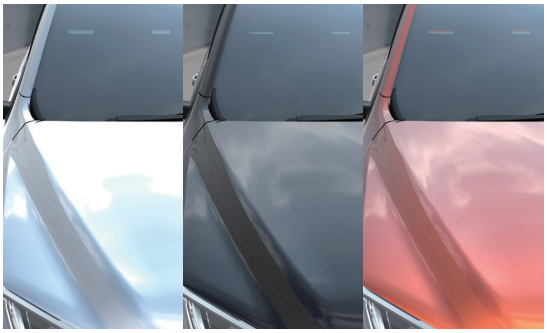


図 30　新色バーチャル検討例

図 31　上級仕様インテリアカラー配色

5.3 トリムマテリアル

絞柄開発において，「普遍性（流行に因らない柄感）」「自然な表情（革特有のシワ・毛穴・凹凸感等）」「質感向上（艶・ぎらつき・コントラスト・色の変化等の玉成）」に注力。また加飾材開発では，高性能，高機能のイメージにつながるブラック基調を背景に，機能部品の「アルミ調アクセント」と「高光沢ブラック」等の異なる材質感をハイコントラストで際立たせることで，緻密な造り込みを具現化した。他方，差異化を期待するお客様に向け，ピックアップトラックとしての堅牢性と成熟したライフスタイルを彷彿させるブラウンをインサートカラーとして設定した（**図 32**）。

図 32　トリム材サンプル構成例

5.4 シートマテリアル

シート材開発は，マーケットとお客様要望へのアドバンテージを高めるべく，タイ開発拠点との連携を円滑化させ相乗効果を高めている。

メイン材は，「Kinetic（動的な）」をキーワードにヒートエンボス工法を用いたダイナミックで立体感あるパターンにより，堅牢かつアクティブなイメージを打ち出し，バイオマス由来繊維（「プランペット®」[1)]）採用によりプロダクトライフサイクルへのサスティナビリティも高めている。ボルスター材は，乗降・乗車時の快適性を鑑み表面摩擦係数を最適化しつつ，摩擦変動を抑える組織設計に傾注し，平織り材ながらも手触り良い風合いを実現させている（**図 33**）。

注 [1)]「プランペット®」は帝人株式会社の登録商標

図 33　新シートマテリアル

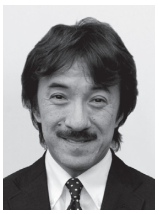
6　おわりに

本稿入稿日の 2019 年 10 月 11 日に新型 D-MAX はタイにて発表される。今から，お客様の反響が楽しみである。また，本誌第 121 号で予告した「新たないすゞピックアップトラックデザインの歴史」の一頁を本誌第 124 号で報告し，更なる一頁を本稿で報告できることを非常にうれしく思っている。

D-MAX の D は Diesel の D，Durability の D である。そしてこの 3 代目 D-MAX の D は Dream の D，Dream MAX としてデザインした。この新しいスタイルをまとった D-MAX がお客様の可能性を最大限に引き出し，ありとあらゆる夢とライフスタイルを叶えてくれること，そして我々デザイナの思いがお客様にダイレクトに伝わることを夢見て，本稿を結ぶことにする。

最後にデザイン開発に関わっていただいたすべての方に，感謝の意を表します。

著　者



赤司　尚行

櫛田　雄一

大亀　康宏

苫米地　康久

新型 ISUZU D-MAX の車体設計について

Body Design for New ISUZU D-MAX

瀧田　茂生* Shigeo Takita　Anupong Khumnun*　Tarawit Pongsiripreeda*　Tossaporn Tassanabanchong*
Chawalit Vithayasintana*　神谷　浩一* Koichi Kamiya　新留　悠規* Yuki Shintome　田島　一行* Kazuyuki Tashima
Jiradat Prasertsri*　Sittipol Susinvat*　Suvichan Attawuttinun*　Worapan Pongnapang*
Worawit Kuecharoensri*　長江　寛之** Hiroyuki Nagae　加藤　知紀** Tomonori Kato　遠藤　徹** Toru Endo

要　旨

今回新型 D-MAX の開発では，グローバルカーとして認知されたいすゞ D-MAX を更に進化させた。

今回の開発は，お客様の満足度向上及び他社の追従を許さぬ小型ピックアップトラック顧客満足度 No.1 を目指しフルモデルチェンジを行った。今回の開発では，ベース開発からいすゞテクニカルセンターオブアジア（ITA）のスタッフが参画することで，タイ市場及びグローバル市場で好評な D-MAX の性能向上と，市場ニーズをフルモデルチェンジに反映させた。

Abstract

In the development of the new D-MAX, we have further developed the Isuzu D-MAX, which is recognized as a global pick up. We have made a full model change with the aim of becoming No. 1 of customer satisfaction and step forward from other companies. In this new-generation pickup ITA (Isuzu Technical Center of Asis) staff has joinedfrom the base development stages in order to complete a new generation of pickup that reflect the improved performance of D-MAX, which is favorable in the Thai and the global market, and achieve the further demands in a full model change.

1　はじめに

世界中で活躍する D-MAX に対して新型 D-MAX の開発では次の点に留意し，より魅力ある商品にすべく設計を行った。

＊安全性の向上
＊静粛性の向上
＊居住性･ユーティリティの向上
＊スタイリングの向上

以下に詳細を紹介する。

2　設計の考え方

2.1 ボデー設計

ボデーの開発においては，衝突安全･耐久強度･NVH（騒音・振動・ハーシュネス：Noise, Vibration & Harshness）性能の高い市場要求に応えるべく，CAE（Computer Aided Engineering）を活用した最適構造設計を実施し，従前車同等の重量でクラストップレベルの性能を実現させた。

2.2 外装設計

外装部品の開発においては，開発当初から市場のトレンド，スタイル，ベンチマークでの商品力を重視し，衝突安全性能･空力性能･車内静粛性能･外観品質･防盗性の向上に取り込んだ。

開発の考えを CAE と実験の評価検証をすり合わせることで，従前車に対して性能，品質ともに満足できるレベルに仕上げた。

2.3 内装設計

内装部品の開発においては，居住性･ユーティリティの優位性は踏襲し，品質感の向上にプライオリティをおき，安全装備の充実，室内騒音の低減，すべての部品を新規設計し，結果として品質感と使いやすさの面でも世界各国に通じる品質レベルに仕上げた。

*いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱　　**車両設計第三部

2.4 衝突安全設計

交通事故死傷者削減は世界共通の課題である。NCAP（自動車アセスメント：New Car Assessment Program）では，先進安全評価の導入が進む一方，基本となる衝突安全評価も要求が高まり続けている。新型 D-MAX では世界各地域の NCAP トップレベルを目指して開発に取り組んだ。

新たな衝突評価対応及び歩行者保護の向上など，相反する要件を満たすことが求められた。この課題を効率よく解決するため，構想段階での MBD（モデルベース開発：Model Based Development）にいすゞ中央研究所と協業で取り組んだ。

まずマルチボディ解析プログラム MADYMO を用いて構成・特性最適化検討を行った（**図 1**）。これに基づき，シャシフレーム等に基本構成と強度特性を割り付けた。同様に乗員保護装置のレイアウトと装置特性に反映した。これにより，初期設計での高いポテンシャルを確保し，その後の CAE 及び実機評価段階での開発効率向上につながった。

結果として世界各地域の NCAP において，トップレベルの衝突安全性能を実現させた。

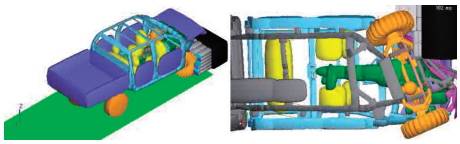


図 1　MADYMO 衝突解析

3　新型 D-MAX の改善点

2 章の設計の考え方に基づき改善を行った内容について，本章で詳細を説明する。

3.1 安全性向上

3.1.1 衝撃吸収ボデー性能最適化

衝突性能においては，従前車に対しロードパスの改善・最適化を目指し，MADYMO の活用による結果としてレインフォースの最適配置及び部材結合の強化によりボデー剛性を向上させた。大変形部位には，断面の拡大及び 980 MPa 級超ハイテン材の採用により，車体変形を抑制し乗員の生存空間確保と軽量化を図った（**図 2**）。

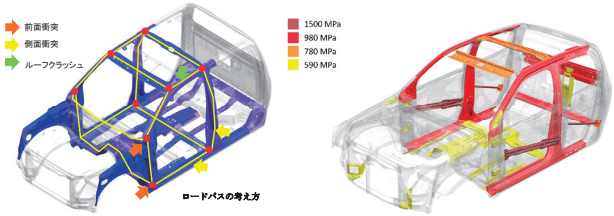


図 2　ボデー骨格

乗員開口の広いエクステンド車ではルーフクラッシュの強度が SAP（サイドアクセスパネル：Side Access Panel）にも要求される。そのために新型車では，ドアレインフォースにハイテン材の採用と形状の最適化を行うことで性能を満足させた（**図 3**）。

図 3　SAP ハイテン材採用

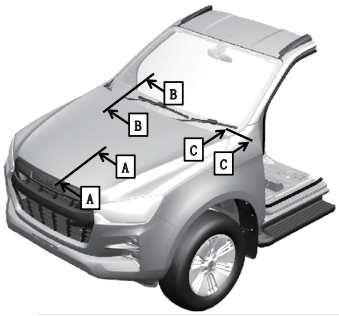
3.1.2 歩行者保護性能対応

① エンジンフード

歩行者頭部保護性能向上のため，エンジンフード先端からストライカ及びフードアウタからストライカレインフォースまでの距離を伸ばし，頭部傷害値を低減させた（**図 4**）。

② ワイパシステム

歩行者頭部保護性能向上のため，頭部が直接ワイパピボットに当たらないように，ワイパピボットはエンジンフード内に設定した。また衝撃が高い部位を改善するために，樹脂カウルカバー形状を一部薄肉化する等設計をし，座屈させることでエネルギー吸収しやすい構造とした（**図 5**）。



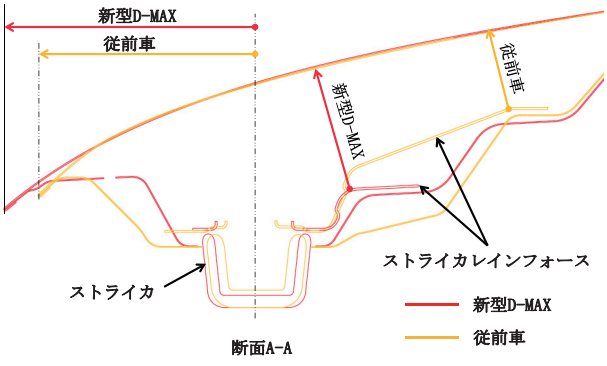


図 4　エンジンフード衝撃吸収エリア拡大

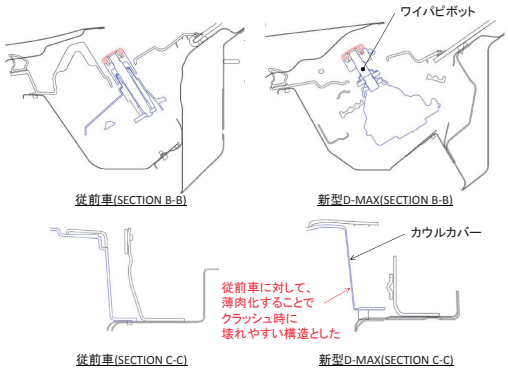


図 5　ワイパシステム断面

③　フロントバンパシステム

歩行者脚部保護性能向上のため，アッパ・ロアレッグのエネルギー吸収構造を最適化させた（**図 6**）。

従前車は欧州向けのみに歩行者保護（2014 年時点）を対応していたが，新型 D-MAX はすべての仕向地に歩行者保護（2020 年時点）を対応させた。

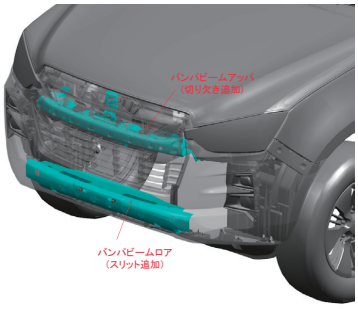


図 6　エネルギー吸収構造

3.1.3 安全装備

①　シートベルト

運転席と助手席については，従前車と同様にロードリミッタ付きプリテンショナシートベルトを採用し，従前車より低荷重のロードリミッタを採用することで乗員への傷害値を低減させた。

後席については，初期拘束性を高めるため，スルーアンカを乗員肩口（シートの後）に配置した。シートバックの物入れスペースを確保するため，リトラクタをピラーに配置した。ピックアップトラックとして初めてのレイアウトを採用した結果，拘束性の改善と物入れスペースの確保を両立させた（**図 7**）。

後席中央席のシートベルトを 2 点式シートベルトから 3 点式シートベルトに変更し，従前車より拘束性及び装着性を向上させた（**図 7**）。

シートベルトを片手装着でき，かつシートアレンジに追従できるよう後席外側のバックルは鉄板バックルを採用した。更に，シートベルト着用率向上のため，後席にもシートベルトリマインダを採用した。

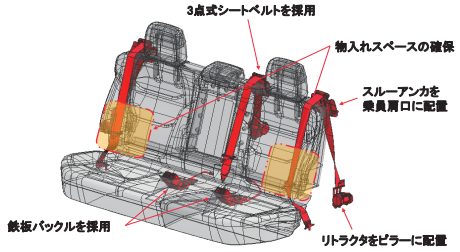


図 7　後席シートベルトレイアウト

②　ステアリングホイール

MID（マルチインフォメーションディスプレイ：Multi-Information Display）スイッチをコンビスイッチからステアリングホイールの操作スイッチに移動し，従前車より更なる利便性･安全性を確保した（**図 8**）。

軽量化とデザインの自由度向上ため，ステアリングホイールの芯金を 3 本から 2 本に変更した（**図 9**）。

操作性向上のために，握りやすいグリップ形状で操作しやすいスポーク形状にした。多くの試作品を作りながら，最適な形状を作り上げ，従前より操作性の良いステアリングホイールとさせた。また，革にもこだわり，質感と握り心地の良いものとした。

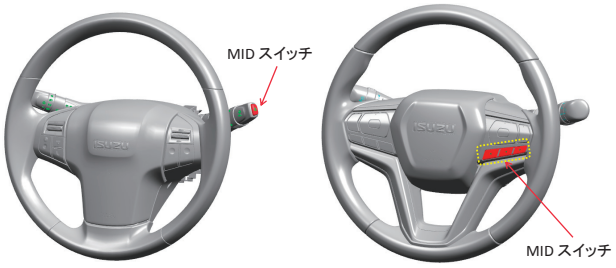


図 8　MID スイッチ

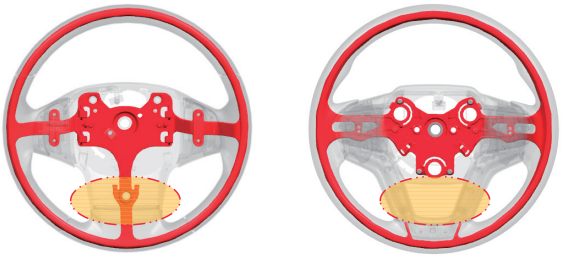


図 9　ステアリングホイール芯金

③　ティビアパッド

安全性向上のため，前席乗員の踵（かかと）部にティビアパッドを設定した（**図 10**）。これにより衝突時の乗員の踵（かかと）の動きを抑制し，下腿部（かたいぶ）傷害を低減させた。

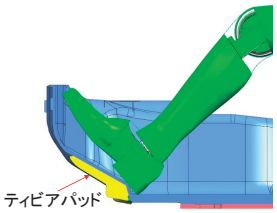


図 10　ティビアパッド

④　シートの安全装備

シートベルト着用の注意喚起のため，助手席座圧センサを標準で設定した（図 11）。これにより従前車以上に乗員への安全に対しての注意喚起を図り，ASEAN NCAP にも対応させた。

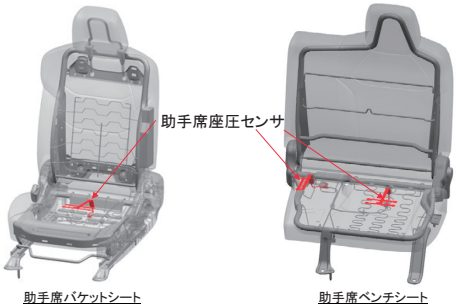


図 11　助手席座圧センサ

⑤　鞭打ち低減シート

従前車は欧州向けのみ採用していた鞭打ち低減シートを，仕向地，仕様に関わらず，採用した（図 12）。これにより，タイ向けシートにおいては従前車比 頚部（けいぶ）保護性能を向上させた。

図 12　鞭打ち低減シート

⑥　BSM システム

BSM（ブラインドスポットモニタリング：Blind Spot Monitoring）システムのために，リヤバンパの左右二箇所にミリ波レーダを設定した（図 13）。すべての仕様で樹脂材料を採用することで，レーダ性能を確保し，スタイリングをまとめ上げた。また後方から接近する車の警報は，ドアミラーに備えたインジケータの点灯でドライバに通知する（図 14）。通知に関しては，ユーザの使われ方を考慮し，光度・位置を最適化させた。

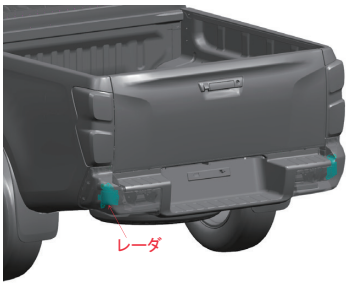


図 13　ミリ波レーダ

図 14　ドアミラーインジケータ

⑦　ワイパシステム

ハイグレード仕様は，ウォッシャノズルがワイパアームに設定されたウェットワイパを採用した（図 15）。走行時にウォッシャを噴射した際のウィンドシールドの一時的な悪化を低減させ，視界を良好にさせた。

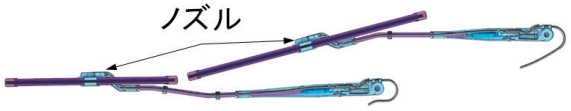


図 15　ウェットワイパ

⑧　駐車支援システム

従前車ではカメラのみの駐車支援システムであったが，新型車では後方の障害物を検出するクリアランスソナーをリヤバンパに 4 箇所を設定した（図 16）。意匠面のコントロールを行い，性能とスタイリングを両立させた。

図 16　クリアランスソナー

3.2　燃費向上

①　軽量化（ボデーパネル）

従前車に対して衝突安全性能・耐久強度の要求が高くなり，従前車のハイテン材（590 MPa 以上の高張力材）比率の場合，大幅な重量増加を伴うが，ハイテン材のエリア拡大，及び超ハイテン材（980 MPa 以上の高張力材）をボデーにいすゞで初めて採用することで，性能を達成しつつ，従前車同等の重量に抑えた（**図 17**）。

図 17　ボデーの軽量化

②　軽量化（ドアパネル）

従前車のフロントサイドドアインパクトビームは，パイプとブラケットをアセンブリした構造であったが，新型車では超ハイテン材を採用するにあたり，ホットスタンプ工法で一体成型することで，性能を満足し軽量化させた。更に，フロントサイドドアインパクトビームのレイアウトを見直し，アンチドラム，側突パッドを廃止させた（**図 18**）。

新型車のリヤサイドドア外板形状は従前車に対して厚みを持たせたスタイリングのため，従前車の直線形状のリヤサイドインパクトビームではサイドドア強度の要求を満足させることができない。ロール成形によるハイテン材をインパクトビームに採用し，ドア外板形状の曲面に合わせ，スタイリングと性能を満足させ，軽量化させた（**図 18**）。

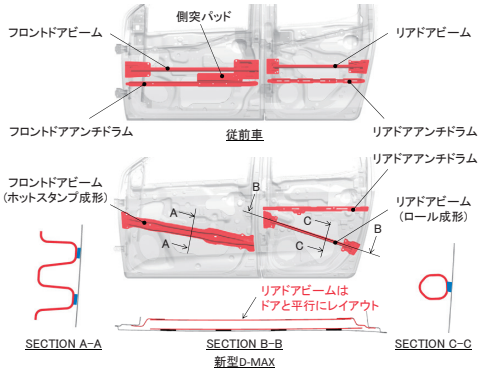


図 18　ドアサイドインパクトビーム

③　軽量化（外装部品）

ドアガラス周りに採用しているゴム製品を低比重化し形状最適化により強度剛性を確保した。また，従前車で設定していたゴム内の鉄芯を廃止し，軽量化させた（**図 19**）。

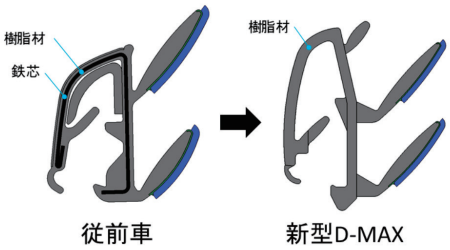


図 19　ドア廻りゴム製品の代表断面
（ウエストシールアウタ）

④　空力性能向上（外装部品）

フロントバンパ下にはエアダム，リヤタイヤ前にはスパッツを設定し，CAE と風洞実験を使った検証を通して最適な形状を反映させた（**図 20**）。

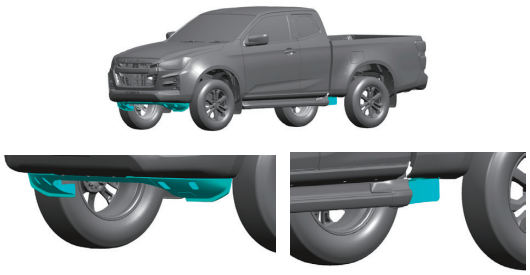


図 20　空力性能向上アイテム

3.3　居住性･ユーティリティ

3.3.1　後席乗降性向上

①　センタピラーグリップ

ハイライド仕様のセンタピラーにアシストグリップを設定した（**図 21**）。これにより従前車に対して後席乗員の乗降性を向上させた。

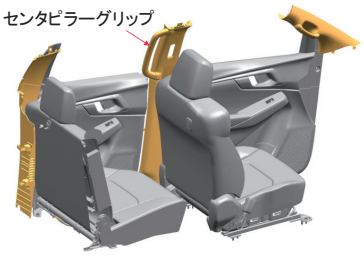


図 21　センタピラーグリップ

②　センタピラーパネル

センタピラーに超ハイテン材を採用することで，センタピラーの断面を小型化させ，従前車に対し後席乗員の足抜け性を向上させた（図 22）。

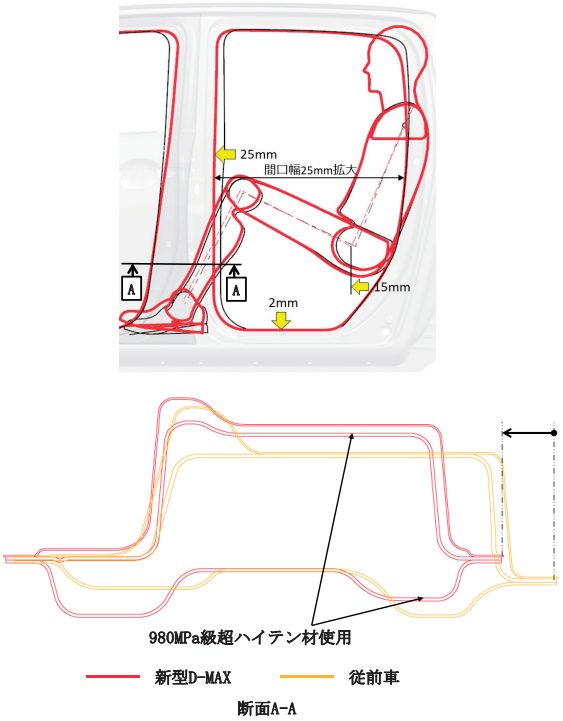


図 22　センタピラー断面 小型化

3.3.2 ユーティリティ向上

①　バニティミラー

サンバイザに設定しているバニティミラーにライト機能を追加し，使い勝手を向上させた（図 23）。

図 23　バニティミラーライト

②　インストルメントパネル

インストルメントパネルには従前車同様に中央上部にリッド付きトレイ，助手席側上部にユーティリティボックス，助手席側下部にグローブボックス，両側にドリンクホルダを設定した。

従前車のそれらは中央上部を除き，引き出し操作が必要であったが，すべてプッシュ操作の構造とすることで，使い勝手を向上させた（図 24）。

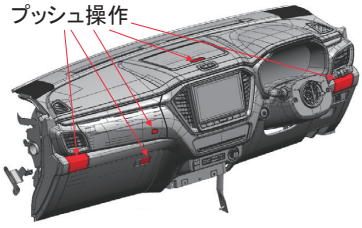


図 24　インストルメントパネル使い勝手向上

③　コンソールリッド

M/T シフト及びパーキングブレーキの操作性を確保しつつ，コンソールリッド前後長を伸ばすことで，アームレスト機能を向上させた（図 25）。

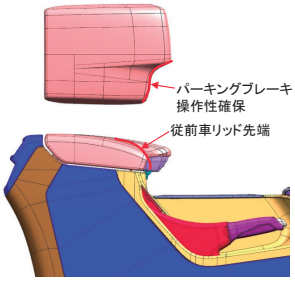


図 25　コンソールリッド

④　シート

フロントシートスライドレールの取付け位置を最適化することで，足入れスペース幅を拡げ，着座中心に足置き位置を設定することが可能になり，後席乗員のフロントシート下への足入れ性を向上させた（図 26）。

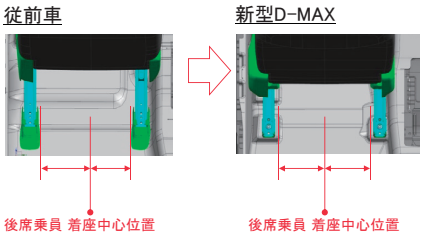


図 26　足入れ性向上

⑤　シート乗り心地性能

フロントシートのバックフレームバネ構造を MAT バネ構造とすることで，乗員の背面を面で支持するこ

とが可能となり，フィット性を向上させた。また，バックパッドの硬度分布を見直すことで，サポート性を向上させた。更に，クッションパッドには低反発ウレタンを採用し，振動吸収性を向上させた。これらにより，従前車に対して乗り心地性能を向上させた（図 27）。

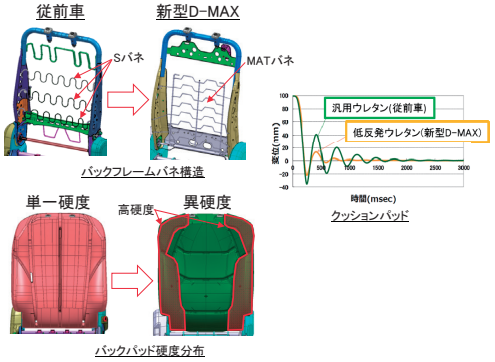


図 27　フロントシート乗り心地性能

⑥　ドアトリムポケット

ドアトリムポケットに収納できるペットボトルサイズが従前車は 0.5 L サイズだったのに対して，1.5 L サイズまで対応できる収納スペースを確保し，フロントドアトリムポケットにおいては前後方向で収納スペースを拡大し，使い勝手を向上させた（図 28）。

図 28　ドアトリムポケット収納スペース拡大

⑦　コンソールドリンクホルダ

タイ市場で多く使用されている大型のドリンクカップを従前車は 1 個のみ収納可能であったのに対して，シフト操作性を確保しつつ 2 個収納可能とさせた（図 29）。

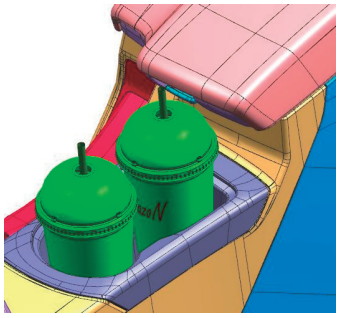


図 29　大型ドリンクカップ対応

⑧　後席用ドリンクホルダ

従前車は後席足元のフロアコンソールにドリンクホルダを設定していたが，後席乗員により近いリヤシート中央部のアームレストに移動し，使い勝手を向上させた（図 30）。

図 30　リヤシートドリンクホルダ

3.4　静粛性向上

①　発泡充填剤の採用

各ピラー内に発泡充填剤を採用したことで，サイドシルからの透過音を遮断し，車室内の静粛性を向上させた（図 31）。

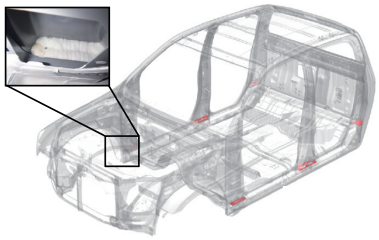


図 31　発泡充填剤採用部位

②　フロアカーペット

カーペット表皮層とインシュレータ層を同時成形カーペットを採用し，フロアパネルの形状に追従させることが可能となり，フロアパネルからの室内透過音に対しての吸音性を向上させた（図 32）。

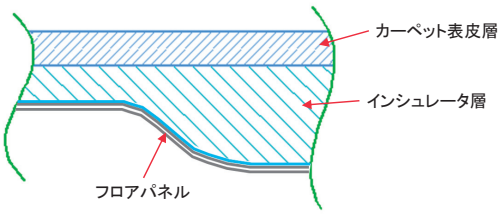


図 32　フロアカーペット断面

③　ダッシュインシュレータインナ

従前車に対して，ダッシュパネルに組み付いている部品とダッシュインシュレータインナとの合わせの最適化を図り，開発の初期段階から生産部門と協力し，生産性を損なわず，穴サイズの縮小化を行った。これ

により，ダッシュパネルからの室内透過音に対しての遮音性を向上させた（図 33）。

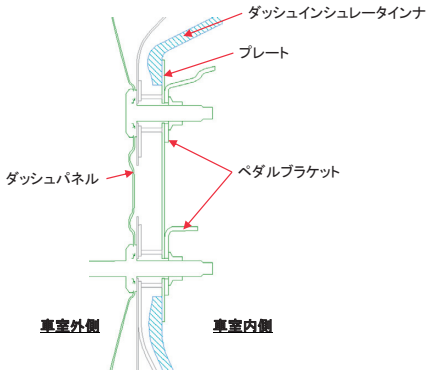


図 33　ダッシュインシュレータインナ断面

④　ステアリング振動性能

商品性向上のため，ステアリングコラムにテレスコピック機構が追加されたことにより，ステアリングコラムのモーメントが増加され，ステアリング振動性能が悪化する状況となった。改善として，ステアリングコラムが固定されているインストルメントパネルのクロスビームをボデーサイドへブラケットを介さず直接固定し，ダッシュパネルに対しては固定を追加することで，結合剛性を従前車に対して向上させた。これにより，従前車と同等のステアリング振動性能を確保した（図 34）。

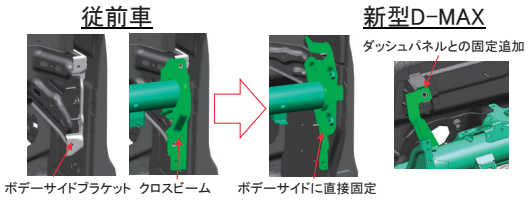


図 34　クロスビーム-ボデー結合

⑤　リヤドアインナの分割

リヤドアインナの分割ラインを室内側に変更することで完全塗装シーラ化し，ダストの侵入を防ぐことで，従前車に対して気密性を向上させた（図 35）。

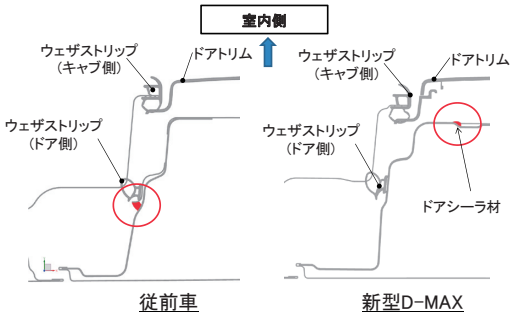


図 35　リヤドアインナ分割位置

⑥　ドアオープニング（フロントピラー部）

前方から流れてくる風が直接ドアオープニングに当たらないよう，フロントピラー部の外板面よりドアの先端が車両内側に入るよう段差を設定し，ドア吸出し音に対するポテンシャルを向上させた（図 36）。

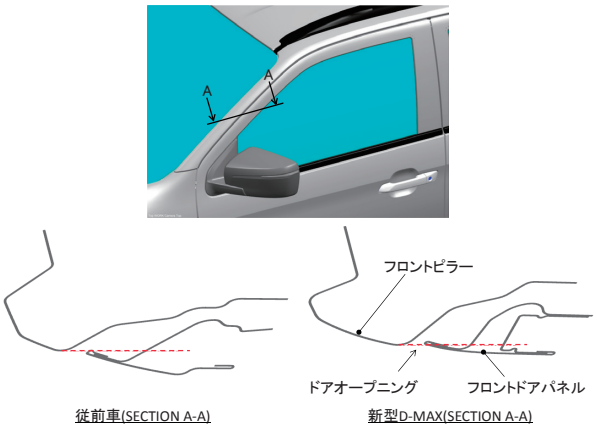


図 36　フロントピラー部 断面

⑦　ウェザーストリップ

ウェザーストリップのリップ形状はドアオープニングの中に収め，風が直接リップに当たらないようにすることでドア吸出し音に対するポテンシャルを向上させた（図 37）。

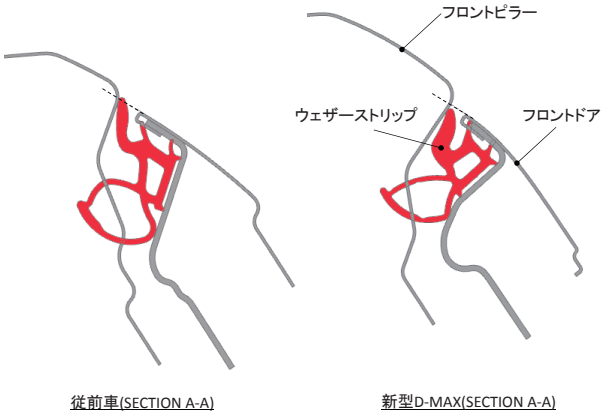


図 37　ウェザーストリップ断面

⑧　ジャミングシール

車両側面の風をスムーズに流すよう，ジャミングシールを設定し，センタピラーのフロントドア及びリヤドアのオープニング隙間を埋め，ドア吸出し音に対するポテンシャルを向上させた（図 38）。

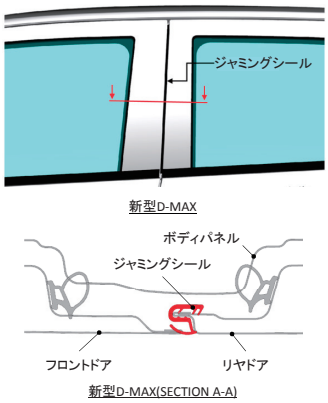


図 38　ジャミングシール断面

⑨　アウトレットバルブ

従前車でリヤピラーに設定していたアウトレットバルブを，バックパネルの中央部付近に設定し，車両側面の風の巻き込み音の進入を低減させたことで静粛性を向上させた（図 39）。

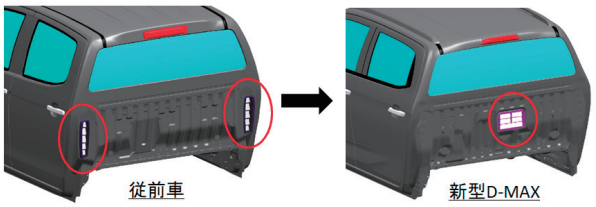


図 39　アウトレットバルブ位置

⑩　インナシール

従前車でのインナシール二分割構造は接続部からの漏れ音を防ぐことが十分ではないため，新型 D-MAX はインナシールを環状化し接続部からの漏れ音に対するポテンシャルを向上させた（図 40）。また，ドア側のシールと合わせ，完全二重シール構造とさせた。

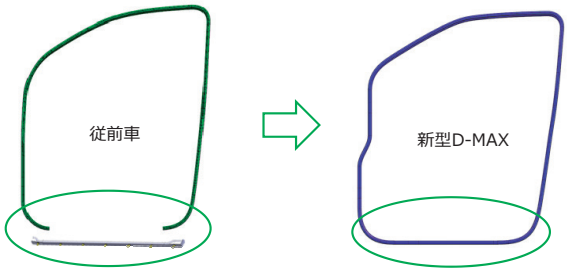


図 40　インナシール環状化

⑪　ドアウエスト部

センタピラー部の窓枠のインナパネル断面を拡大することでドアウエスト部の剛性を向上させた。これにより走行時のドアサッシュ部からの吸出し音を低減させ，静粛性を向上させた（図 41）。

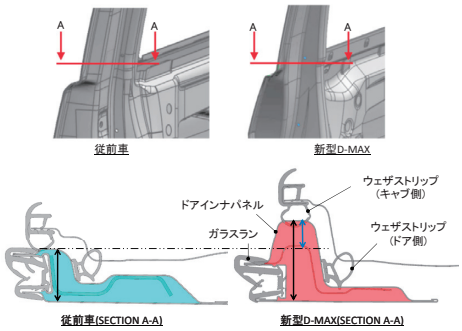


図 41　ドアサッシュ部断面

⑫　ドアウエストシール

ウエストシールインナ及びドアインナパネルの固定を隙間の無い構造に変更することで，ドアウエスト部からのダスト進入の低減，及び静粛性を向上させた（図 42）。

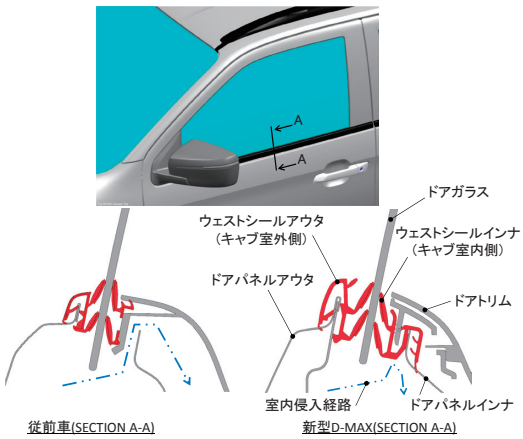


図 42　ドアウエストシール断面

⑬　フロアパネル

従前車に対し，NVH 性能を向上させるため，2 番キャブマウント部のフロアパネルとダッシュパネルの合わせ構造を変更することで，マウントからの上下入力に対し，動剛性を向上させた（図 43）。

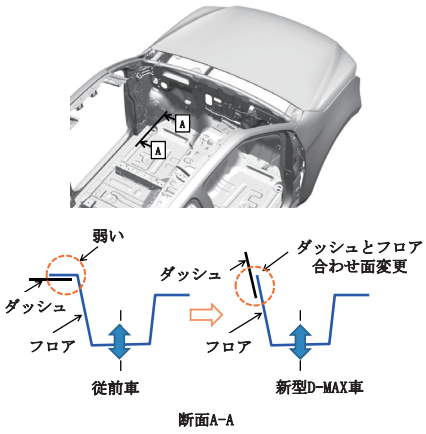


図 43　フロアパネル-ダッシュパネル合わせ断面

3.5 強度・耐久

① ボデー

新型 D-MAX は更なる市場拡大に向け，さまざまな路面を調査し，新たな耐久基準で開発を行った。ルーフのアセンブリ方法を変更し，ルーフヘッダとボデーサイドを先に結合することで，従前車ではできなかった閉断面内にスポット溶接ができ，超ハイテン材の採用と合わせ，従前車比 2 倍のルーフ強度を達成した（**図 44**）。

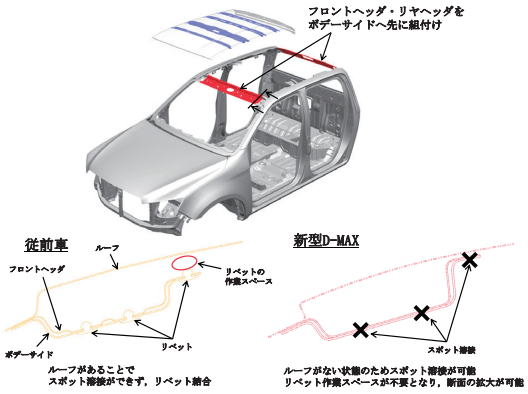


図 44　ルーフアセンブリ方法の変更

3.6 品質感向上

① パーキングブレーキブーツ

従前車のパーキングブレーキ可動部は，スリットを設定した板状のゴム材で覆っていたのに対し，新型車はレザー調表皮の縫製によるブーツを採用し，更にダブルステッチを設定することで質感を向上させた（**図 45**）。またパーキングブレーキ可動部の開口をブーツですべて覆うことで，スリット及び開口部からの物落ちを防ぐ構造となった。

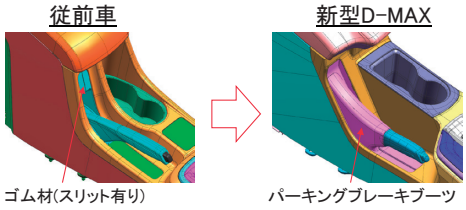


図 45　パーキングブレーキブーツ構造

② 上級グレード　ドアトリムプルボックス

従前車は，ドアトリムプルボックスの固定は，専用のブラケットを介してドアインナパネルに固定しており，取付けのスクリューを隠すための専用カバーが設定されていた。新型車ではプルボックスを直接ドアインナパネルに固定する構造を採用し，固定点はスイッチベゼル・アームレストでカバーすることでスクリューを隠すための専用カバーを廃止し，分割ラインを低減することで外観品質を向上させた（**図 46**）。

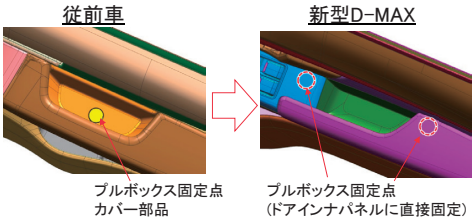


図 46　プルボックス固定部

③ 助手席エアバック

新型車ではシームレス助手席エアバックを採用し，分割ラインを廃止することで外観品質を向上させた（**図 47**）。

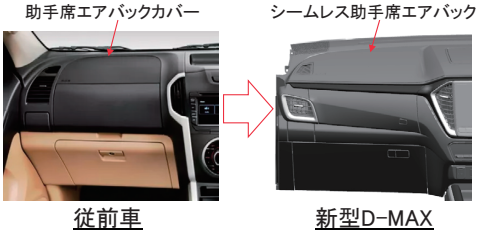


図 47　シームレスエアバック

④ ガラスラン

サイドドアガラス回り見栄え向上のためにドアガラス周りに見えるガラスランのゴム部を減らし，サイドからの外観を向上させた。ウエストシールをフロントからリヤに一直線につなげ，リヤに向かって持ち上げるスタイリングと合わせ，スポーティー感を向上させた（**図 48**）。

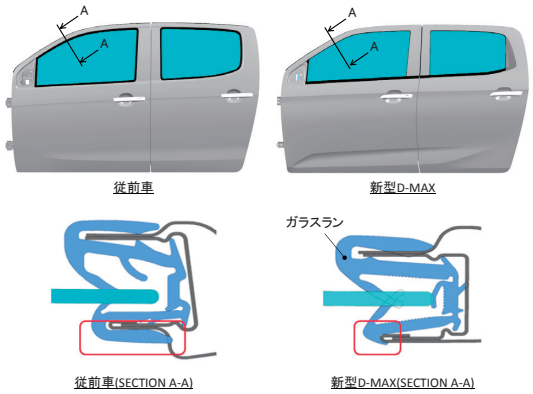


図 48　ガラスラン断面

⑤ インテグレートリヤバンパ

従前車のリヤバンパは，シャシフレームに固定する設計であり，独立したスタイリングであった。新型車では，リヤバンパをカーゴに固定する構造とし，一体感のあるスタイリッシュな外観を実現させた。また同時に，リヤバンパの重量を従前車の同仕様に対し軽量化させた（**図 49**）。

図 49　リヤバンパ構造

⑥　ワイパシステム

新型車では空力性能を考慮したデザインブレイドを採用することで，高速走行時に発生するワイパブレイドの浮きを低減させるとともに，ワイパモータに制御回路を持たせ，払拭速度の変更等を行い，払拭性能を向上させた（図 50）。

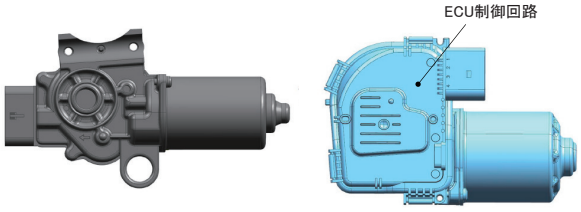


図 50　ワイパモータ

⑦　ウインドシールドガラス

赤外線カットガラスを採用することで太陽光の赤外線透過率のみを低減させた。良好な視界を確保したまま，じりじり感を低減させた。

オートライティング・レインセンサ仕様の車は，車内からの視界の確保，車外からの外観を向上させた（図 51）。

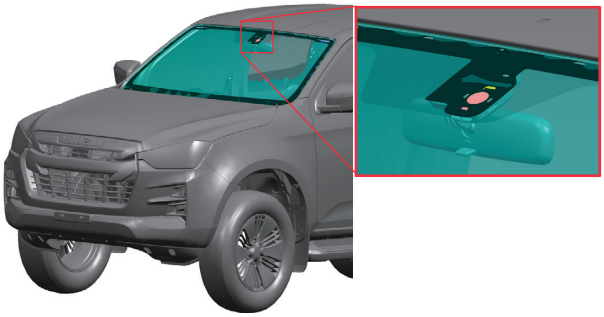


図 51　センサ付きウインドシールドガラス

3.7 防盗性向上

ロックシステムは従前車のロッドワイヤ仕様から，ロッドダイレクト仕様に変更することで，ロッドへアクセスされる解錠を防ぎ，防盗性を向上させた（図 52）。

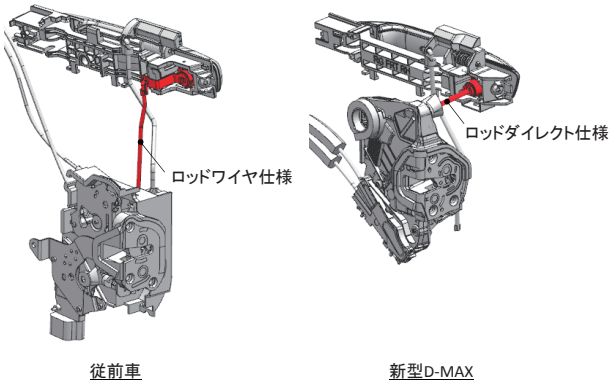


図 52　ロッドダイレクト構造

3.8 区別化

①　インストルメントパネル

ユーザの車両ニーズがパーソナルユースとワークホースユースとで二極化してきている市場背景に対応するべく，基本骨格となる構造部材及び下側の意匠部品を全グレードで共用化とし，中央部から上側の意匠部品及び機能部品を区別化することで，各ニーズに対応したインストルメントパネル構造を最適化させた（図 53）。

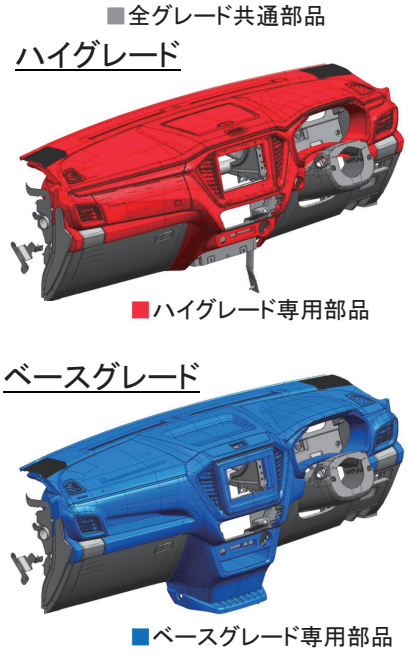


図 53　インストルメントパネル区別化

②　コンソールリヤベゼル

後席乗員の快適性向上を目的として，コンソールリヤベゼル上部に後席用のベンチレーショングリルをオプション設定した。またベンチレーション，物入れスペース，USB ソケットの組み合わせに対応するため，コンソールリヤベゼルのベースカバーは共用化し，上部

でそれらの区別化に対応できるように構造及び仕様を最適化させた（**図 54**）。

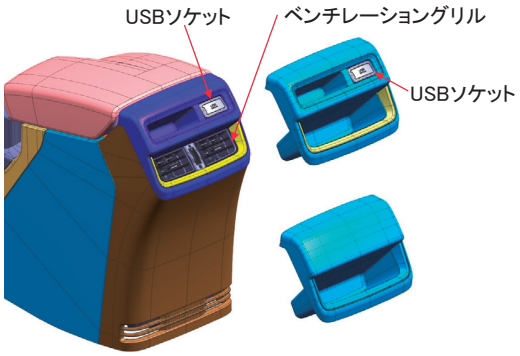


図 54　コンソールリヤベゼル

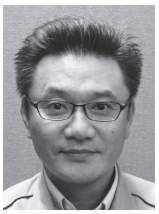
4　おわりに

以上紹介したように，世界中で好評を得ている従前車を凌ぐフルモデルチェンジを完成させた。今回は，ITA のスタッフが基本設計から参画し，研試ステージから量産ステージまで一貫した開発を行った。

今後市場からの更なる要望に対しても，ITA のスタッフが主体的に開発を推進し，魅力的な商品づくりができると考えている。

最後に，今回新型 D-MAX の開発にあたり，社内外の関係各位の皆さまのご協力，ご指導に，紙面を借りて心より感謝する次第である。

著　　者

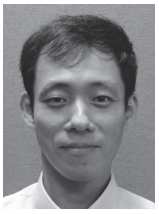

瀧田　茂生

Anupong Khumnun

Tarawit Pongsiripreeda

Tossaporn Tassanabanchong

Chawalit Vithayasintana


神谷　浩一

新留　悠規

田島　一行

Jiradat Prasertsri

Sittipol Susinvat

Suvichan Attawuttinun

Worapan Pongnapang

Worawit Kuecharoensri

長江　寛之

加藤　知紀

遠藤　徹

新型 ISUZU D-MAX のシャシについて

Chassis of New ISUZU D-MAX

江崎　智大*　井上　哲雄**　原澤　哲也**　Phapatsarrin Theerawichetkun *
Tomohiro Ezaki　Tetsuo Inoue　Tetsuya Harasawa
Valun Tanasaewee *　Marut Poothanissorn *　遠藤　美幸***　吉村　俊彦*
Miyuki Endou　Toshihiko Yoshimura
Sutthirak Jantakram *　大瀧　弘晃***　渡邊　浩***　Jenwit Suwintrakorn *
Hiroaki Ootaki　Hiroshi Watanabe
小竹　亨****　射羽　亮****
Tooru Kotake　Ryou Ibane

要　旨

ピックアップトラックは生産財としてのトラックに求められる性能と，消費財としての乗用ユースに求められる性能を併せ持つことが求められている。

新型 D-MAX のシャシにおいては，このような幅の広い指向に対し，生産活動に必要な耐久性と低燃費化，そして乗用ユースにも適応する快適な操安性と乗り心地を両立させる開発を行った。

本稿においては，各シャシ装置における開発概要について紹介する。

Abstract

Pickup trucks are required to have both the performance required for trucks as production goods and for passenger use as consumer goods.

With this wide range of orientations, the new D-MAX chassis will be developed with both the durability and low fuel consumption for production activities, as well as driving performance and ride comfort that can be adapted to passenger use.

This article introduces the development outline of each chassis device.

1　はじめに

これまで D-MAX は最大市場であるタイを中心に世界各国に展開してきており，好評をいただいている。今回新型 ISUZU D-MAX（以下,「新型 D-MAX」と略す）シャシ開発については，第一に必要とされる強度耐久性について，これまで得てきた信頼を引き続き維持させる。その上で快適性と経済性を向上させ，更に今後予想される環境と安全関連装置の増加も見据えた開発を行った。

以下の章にて各装置の開発概要を紹介する。

2　フレーム断面拡大による衝突性能向上

2.1 開発の狙い

新型D-MAXでは，2020年以降のEuroNCAP（ヨーロッパ新車アセスメントプログラム：The European New Car Assessment Programme）での五つ星獲得と，他社を上回る操縦安定性の達成を目指し，開発を行った。その達成に向け，新型 D-MAX のフレームは，次のコンセプトに基づき開発した。

① フレーム断面最適化よる衝突安全性能向上と軽量化の両立
② EuroNCAP 32 km/h POLE 側突に対応したフレーム構造
③ 剛性向上による操縦安定性向上

*いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱　**シャシ設計第二部　***車両設計第二部
****シャシ設計第一部

2.2 フレーム最適化よる前突系安全性能向上

車両の前突系安全性能向上のため，次の 3 項目を重点項目として開発を行った。

① 衝突エネルギー吸収量の向上
② EXTENSION 軸圧壊の安定化
③ キャブの変形につながるフレームの変形の抑制

フレーム先端部でのエネルギー吸収量を向上させるため，従前車同様の分割構造を採用し，エネルギー吸収させる部位と変形に耐える部位を明確に分けるとともに，分割前後で材質・板厚を変え変形モードのコントロールを行った。エネルギー吸収させる部位である EXTENSION は，周辺レイアウトとバンパとの取付け構造を見直すことで，断面の拡大と前方 57 mm の延長を行い，当部位によるエネルギー吸収量の向上を実現した（**図 1, 図 2**）。

また，安定的に高いエネルギー吸収をさせるには，EXTENSION を確実に軸圧壊させる必要がある。当該部位には，ファーストクロスメンバ（以下「1 st C/MBR」と称す）とキャブマウンティング用ブラケット（以下「BRKT；CAB MTG」と称す），No.1 の取付けが不可欠であり，軸圧壊を阻害する要素となる。その解決のため，1st C/MBR と BRKT；CAB MTG，No.1 の取付け位置を揃え，本部位を潰さない部位とし，更にクロスメンバとブラケットの取付け部剛性が同等となるよう形状を最適化すること，加えて変形させる部位には，圧壊の起点となるビード形状を適正に配置することで，縦折れモードを抑制し軸圧壊の安定化を実現させた（**図 3**）。

これにより，EXTENSION の軸圧壊の安定化を行うとともに，エネルギー吸収量を従前比で 17 %向上させることを達成した。

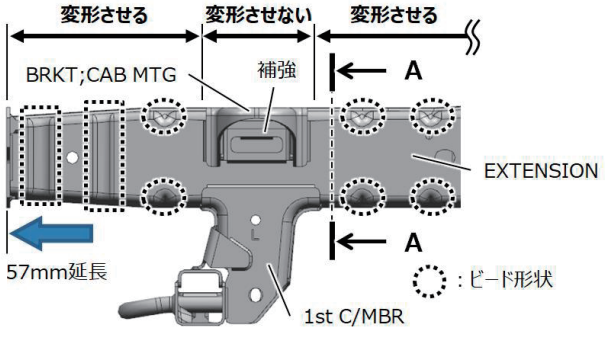


図 1　EXTENSION 詳細

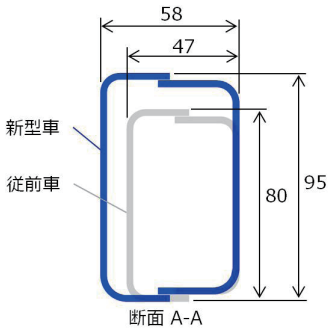


図 2　EXTENSION 断面比較

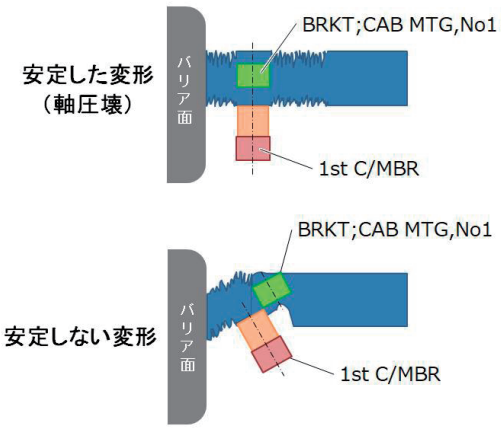


図 3　EXTENSION 変形モードの例

キャブ内生存空間の確保には，キャブ先端に当たる BRKT；CAB MTG，No.2 から前方で，フレームの変形を食い止め，フロントタイヤの車両内側への侵入を抑える必要がある（**図 4**）。そのためには，BRKT; CAB MTG，No.2 付近で変形が生じる前に，その前方でサイドメンバを折るといったモードコントロールが不可欠である。新型 D-MAX では，BRKT；CAB MTG，No.2 取付け部周辺のサイドメンバ断面を拡幅しつつ内部に補強を追加するとともに，前方と緩やかな曲線で繋ぐことで，フレーム先端でのエネルギー吸収が完了するまで耐える構造とした。更に，その後キャブ下のサイドメンバにエネルギーを伝えずに当該部位でエネルギー吸収をさせるために，補強の配置を最適化し，サイドメンバが狙いの位置で折れるモードを成立させた。このモードコントロールによりフロントタイヤのキャブ侵入を，BRKT;CAB MTG No.2 で抑え，乗員保護性能の向上に貢献した（**図 5**）。その結果，従前フレームに対して，衝突安全対策部品の削減を行い，約8 kgの軽量化と約10 %の部品点数削減をした。

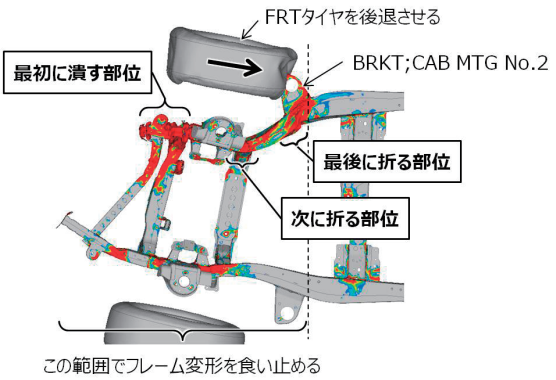


図 4　フレーム変形モード

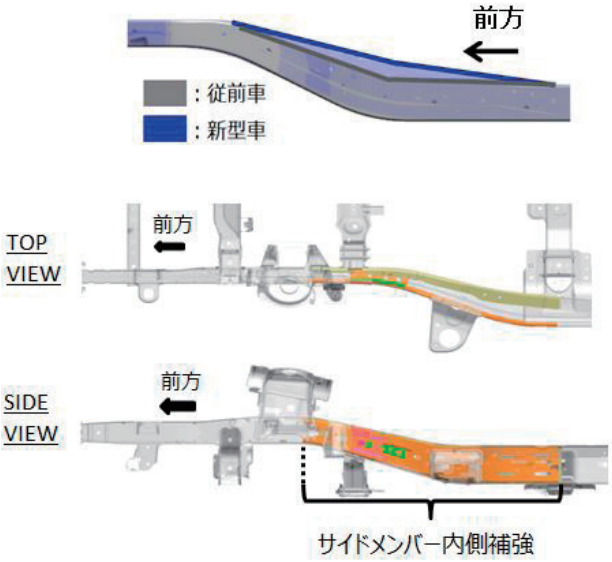


図 5　サイドメンバ形状及び内側補強

2.3 Euro NCAP 32 km/h POLE 側突対応

32 km/h 斜め POLE 側突は，いすゞとして初めての採用であり，衝突速度上昇と入力角度が斜め 15°となるなどから，フレームとして新たな対応が必要となる。

これまでの POLE 側突では，29 km/h で POLE が垂直に衝突するため，32 km/h 斜め衝突に対して衝突エネルギーが低く，特段の対応をせずともフレームの変形を抑えることができていた。それに対し 32 km/h 斜め POLE 側突では，衝突速度が上がることで衝突エネルギーも大きくなるため，POLE のキャブへの侵入を抑える対策が必要となる。新型 D-MAX では，入力点近傍にクロスメンバを追加することで，対応した。そのクロスメンバは，効率良く抗力を発揮させるために，断面を一様とすることで座屈を防ぐ構造とした（**図 6**）。

このようなフレームでの対応と，キャブ等での対応を合せて，ユーロ NCAP 32 km/h POLE 側突の目標値を満足させた。

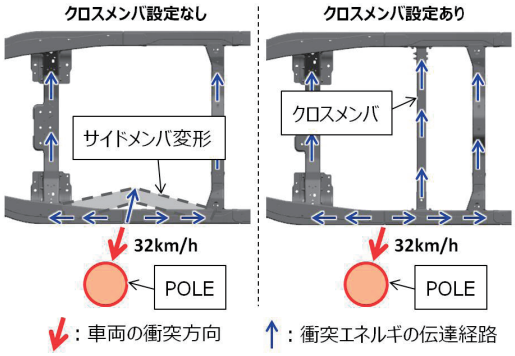


図 6　POLE 側突時の力の伝達

2.4 フレームの剛性向上

2.4.1 走行性能向上

新型 D-MAX の 4X4 は，車両のロール中心高さを上げることで車線変更性，ロール感の向上をねらった。その達成のため，フロントサスペンションのアッパリンク固定位置を高い位置とするハイマウント化の採用を行った。これに対しフレームは，車両上方に移動したアッパリンク取付け部の剛性確保が必要となり，サイドメンバ高さを上方に 35 mm 拡大する対応を行った。これにより，アッパリンク取り付け部のモーメントを減少させ，ショックアブソーバ用ブラケットを含めた部位の剛性確保を行い，前記走行性能の向上を達成させた（**図 7**）。

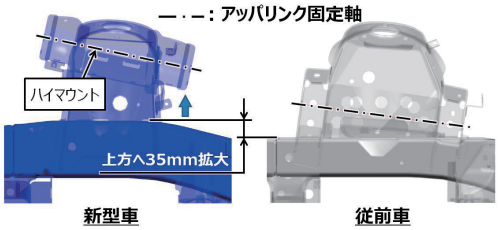


図 7　フロントサスペンション部のサイドメンバ比較

2.4.2 操縦安定性向上

車両の剛性感，フラット感の向上には，フレームのホイールベース間の縦曲げ剛性と捩じり剛性が寄与する。今回のフレーム開発では，プロト車による作り込みを早期に行い，剛性値目標を設定し，それに則った設計を行った。前記フレームの剛性を向上させるには，剛性寄与率の高いサイドメンバの断面高さを増やすことが有効である。フロア高さは従前車を維持する必要があるため，従前フレームで最下部となっているクロスメンバとの締結構造を見直し，車両下方向に最大 20 mm の断面拡大を可能とさせた（**図 8**）。その結果，縦曲げ剛性：34 %，捩じり剛性；23 %の向上を達成し，目標を満足させるとともに，操縦安定性の向上に貢献した。

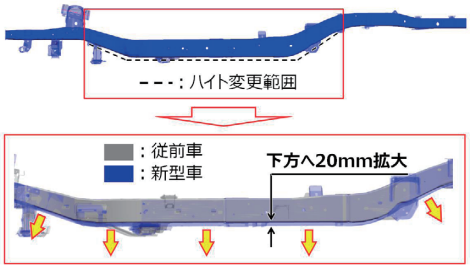


図 8　SIDE VIEW でのサイドメンバ比較

3　サスペンション

新型 D-MAX は市場より好評を得ている現行車両をベースに 4x2 車型と 4x4 車型それぞれの市場での使われ方の変遷に対応するよう，基本性能を向上しつつ，次のテーマをもって性能を改善する開発を行った。

「操縦安定性:ロール剛性向上」

3.1～3.3 節で開発概要を説明する。

3.1　基本性能の向上

最小回転半径の拡大要因となる変更点（4x2：タイヤトレッド及びホイールベースの拡大，4x4：ホイールベースの拡大）に対し，タイヤの切れ角を増大することで従前車に対し最小回転半径を良化させた。

アライメント調整方向の偏りの改善を狙い，サスペンションの取付け点検討時に車両状態での撓み量を考慮することで偏りを抑制させた（図 9）。

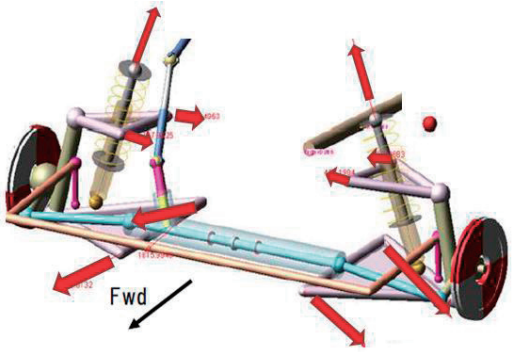


図 9　撓み量解析

3.2　4x2 車型のサスペンション

商用ユースの割合が多く，市場より高い信頼性を得ている現行車のサスペンションの基本構造を継承しつつ，商品の競争力の向上を狙い，フロント及びリヤのサスペンション開発を行った（図 10，図 11）。

図 10　4x2 フロントサスペンション

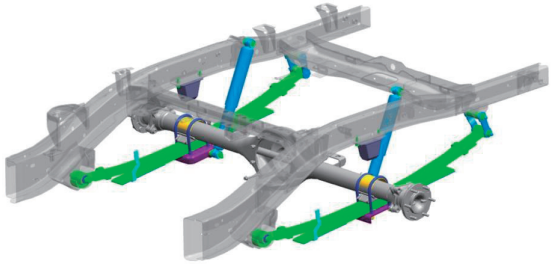


図 11　4x2 リヤサスペンション

① ロール剛性アップ

リヤサスペンションのリーフスプリングのトレッドを拡大することでロール剛性を向上させた。

② 原価低減及び軽量化による商品競争力の向上

- アッパリンクのパッチ廃止と形状最適化：16% 軽量化
- コイルの高強度材採用：最大 24 %軽量化
- 鍛造ナックルから鋳物ナックルへ変更
- 温間ストレスショットピーニングを施した材料採用によるリーフスプリング枚数削減（5 枚→3 枚）：11 %軽量化（ソフト仕様）

3.3　4x4 車型のサスペンション

パーソナルユースの割合が増えてきているため，現行車同等の積載性を確保しつつ，操縦安定性／乗り心地向上を狙い，フロント及びリヤのサスペンション開発を行った（図 12，図 13）。

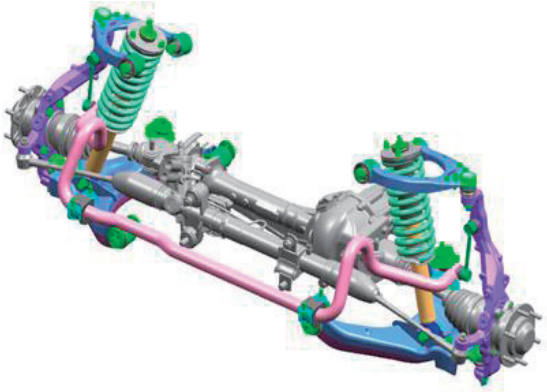


図 12　4x4 フロントサスペンション

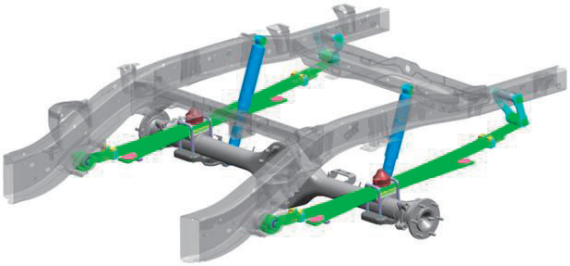


図 13　4x4 リヤサスペンション

① ハイマウントサスペンションジオメトリ

いすゞピックアップトラックとして初となるフロントハイマウントサスペンションジオメトリを採用。

アッパリンク配置を見直すことで，ロール角を低減，ヨー特性の安定性能を向上させた。更にバンプストローク時のトーアウト量を増加させることでアンダステア特性を強め，積車でのコーナリング時の挙動を安定化させた（図 14）。

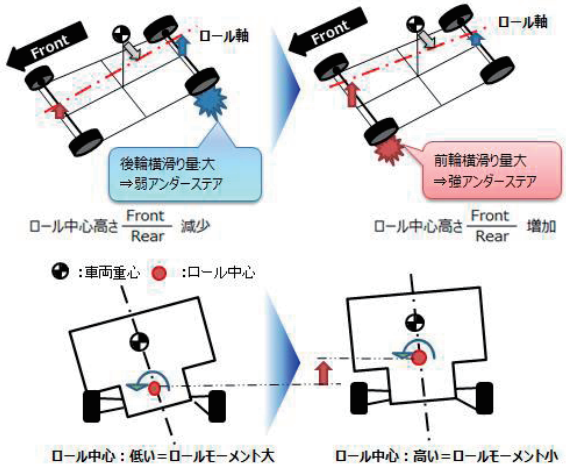


図 14　ロールセンタ高さ変更の影響

更に旋回時のロール中心（左右の荷重移動量にて決まる）位置を修正することで，車両挙動をジャッキアップモーション（車両重心浮き上がり）からジャッキダウンモーション（車両重心沈み込み）とした（図 15）。

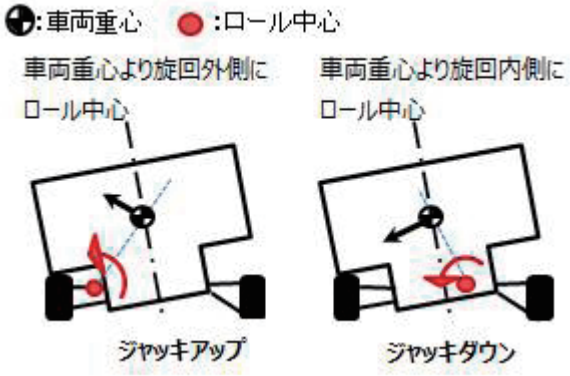


図 15　旋回時の車両挙動

② リーフスプリングの枚数削減

新規材料採用による枚数削減（総厚減少）によりバンプストロークを増加させ，乗り心地向上に寄与。更に取付け姿勢を変更することでステア特性をアンダステア方向に修正，操縦安定性の向上に寄与した（図 16）。

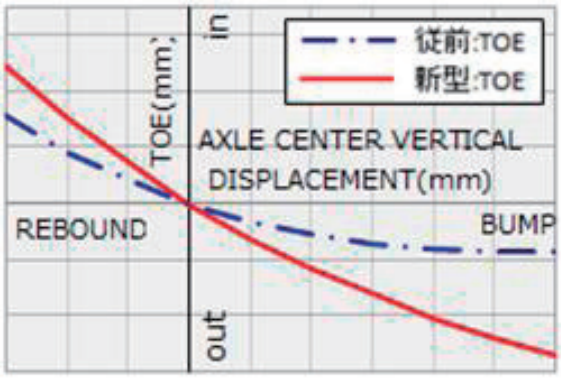


図 16　後軸のトー変化

③ 原価低減及び軽量化による商品競争力の向上

- 温間ストレスショットピーニングを施した材料採用によるリーフスプリング枚数削減（5 枚→ 3 枚）：最大 15 %軽量化
- アッパ＆ロアリンク小型化・形状最適化：24 %軽量化
- コイルの高応力材採用：最大 34 %軽量化
- スタビライザバーの型曲げ中空化の採用：最大 25 %軽量化（図 17）

図 17　型曲げ中空スタビライザ

4　取り回し／操作性を向上したステアリング

ステアリングシステムは従前型と同じラックアンドピニオン式を踏襲しているが，細部に渡り見直しを行い，性能を向上させている（**図 18**）。

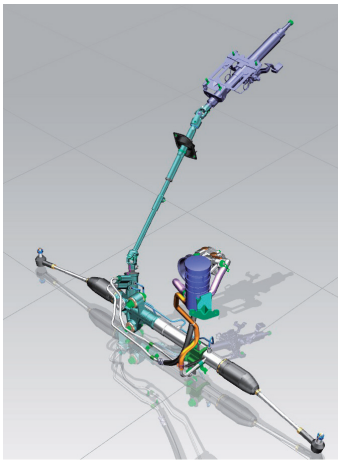


図 18　ステアリングシステム

ステアリングコラムは，新たにテレスコピック機能を追加し，より幅広いユーザが最適なドライビングポジションを取れるようにした。アルミハウジング及び中空シャフトを採用することで，機能は追加となるが重量の増加は抑えている。

ステアリングギヤボックスは，入出力特性のチューニング及びギヤレシオを変更することで，操舵力を低減して取り回しを改善するとともに，新型 D-MAX の軽快な操作性に貢献している。また，異径圧接ラックバーを採用し，軽量化も行った。

5　メンテナンスフリーとしたフロントハブベアリング

フロントハブベアリングは，作業性・信頼性の向上及びメンテナンスフリー化を考慮して，2.5 世代のハブユニットベアリングを採用した（**図 19**）。信頼性を向上させるために，アウターシールは主リップ＋補助リップ＋ダストリップ 2 枚のパックシールとし，更に外装シールも追加することで過酷な使用環境にも耐え得る仕様としているが，リップ仕様の最適化により，ベアリングのトータルフリクションは従前比低く抑えている。

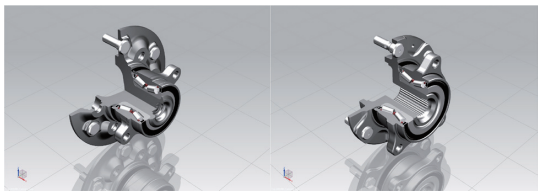


図 19　新型 D-MAX のハブユニットベアリング

6　強化したブレーキシステム

市場からの安全性への高揚・快適な操作性の要求に対応するとともに，ブレーキ操作時の NV（騒音・振動：Noise，Vibration）現象を抑制するため，ブレーキシステム設計として，ブレーキ容量の拡大と，ブレーキペダルフィールの向上を狙いとして，高速制動性，操作感の向上を図り，従前車比，より優れたブレーキシステムを開発した。

6.1　フロントブレーキ

ブレーキ容量向上として，フロントに新たに 17 インチサイズ（ロータ径 320 mm）のディスクブレーキ（**図 20**）を採用するとともに，15 インチ及び 16 インチサイズに関しても，ディスクの幅を従前車比 3 mm 拡大した。これにより，ディスクの熱容量が従前車比改善（**図 21**）され，制動時の熱による NV 現象に対してのポテンシャルが大幅に向上した。

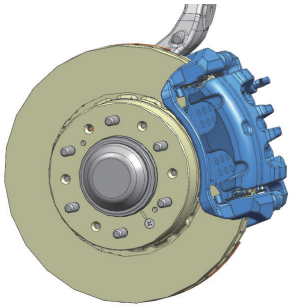


図 20　新 17 インチディスクブレーキ

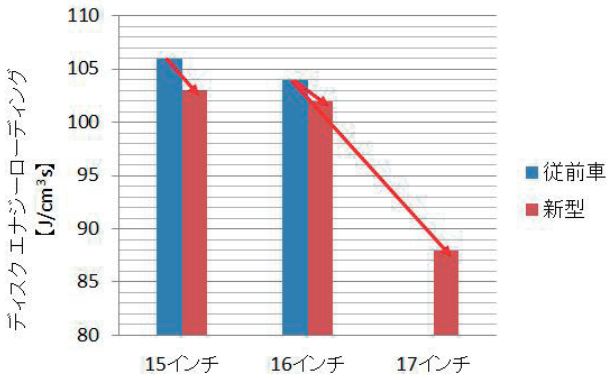


図 21　ディスク熱容量の改善

6.2　リヤブレーキ

フロントブレーキ同様に熱容量確保を目的に 14 インチサイズブレーキを廃止し，15 インチサイズブレーキに上位統合した。更に，効きとブレーキ鳴きの両立を目指した摩擦材を新規に開発し，ドラムブレーキの高い制動能力を維持しつつ，ブレーキ鳴きの抑制を実現した。

6.3 ブレーキコントロール

ブレーキペダルフィール向上を図るため，従前車同様にタイロッド式バキュームブースタを採用し，サーボ特性の最適なチューニングを目的に 2 段階サーボシステム（図 22）を導入した。これにより，ペダルストロークの低減を図るとともに，剛性感の高い，よりコントロールしやすいブレーキフィールを実現できた。

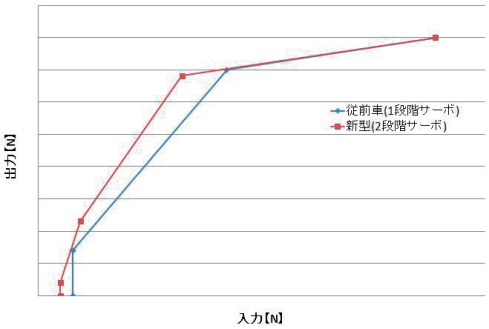


図 22　2 段階サーボシステム

マスタシリンダは従前車同様に小径ロングタイプにするとともに，ボトミング性能の改善のため，ストローク量を 5 mm 伸ばした。

これらの改善の結果，制動距離（図 23），ブレーキフィール評価である BFI（Brake Feel Index）[1]（図 24）においても従前車，他社車比トップクラスの優れた結果を実現できた。

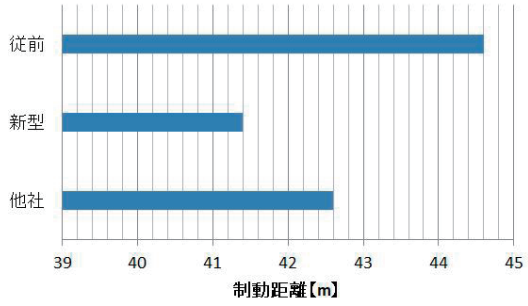


図 23　制動距離比較

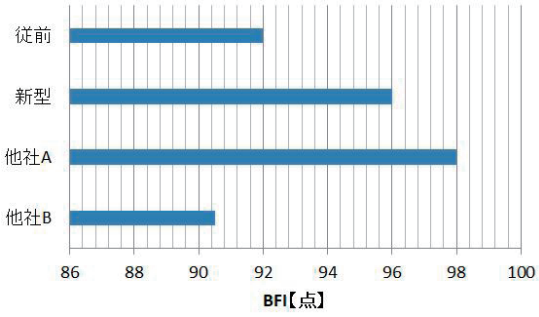


図 24　BFI 比較

注 [1] ブレーキフィールを 100 点満点で評価する GM の手法

7　フロント吸気化による吸気温度及び渡河性向上

1 次吸気ダクト（エアクリーナ前）は，従前型にてフェンダー内の吸気システムに対し，新型は車両前側の外気を吸い込ませる様フロント吸気化（図 25）することにより次の性能を向上させた。

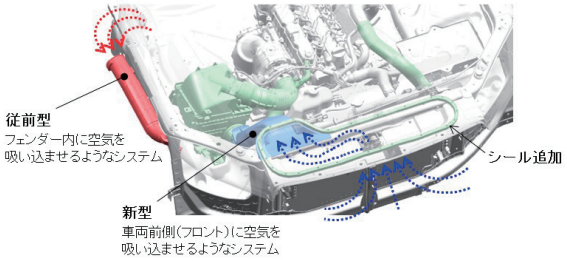


図 25　新型／従前型　吸気構造比較

① 吸気温度低減

従前型ではエンジンルーム内からの受熱により吸気温度が上昇してしまうため，シール部材による遮熱及び高負荷走行時は場合によりエンジン出力を絞りターボコンプレッサの温度上昇を抑えていた。新型車では 1 次ダクトの開口位置を車両前側に変更することにより，今まで遮熱のため設定していたシール部材を廃止し，更に吸気温度を約 17 %低減させた（図 26）。

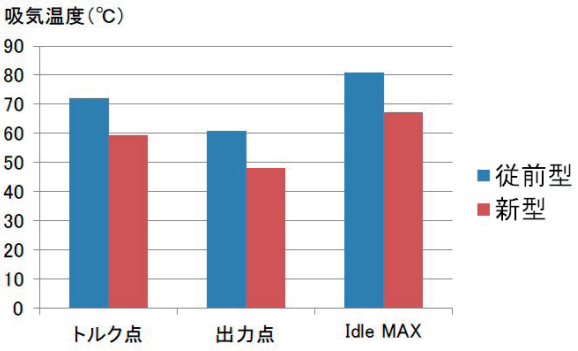


図 26　新型／従前型　吸気温度比較

② 吸気音低減

新型は 1 次ダクト開口を車両前側に向けて設置することにより，従前型比でドライバに聞こえる吸気音を低減させた。

③ 吸気抵抗低減

ダクトとエアクリーナの組み合わせ構造を最適化することにより，従前型比で吸気システム内の抵抗を低減させた。

④ 800 mm 冠水路走行対応

吸気システム内への水侵入を防止するため，1 次吸気ダクトの開口をラジエータアッパパネル上に設置し（800 mm 以上の位置），ダクト周辺の隙間を遮断

するように構造最適及びシール追加をすることにより，800 mm 冠水路走行を可能にした（図 27）。

図 27　800 mm 冠水路走行試験

8　冷却システム効率化による冷却／空力性能向上

新型車では熱交換器前のエアガイドをフルダクト化した（図 28）。これにより熱交換器前へのエンジン熱まわりこみ低減，熱交換器への通風向上（通気率向上）によりラジエータ／コンデンサの冷却効率を改善させた。またエアガイドの密閉性を上げたことによりラジエータグリル／バンパ開口にコアを通過しない余計な風が入らなくなり空力性能も向上させた（図 29）。

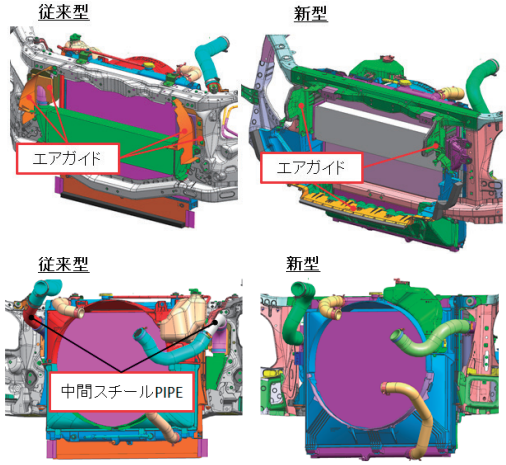


図 28　冷却装置レイアウト

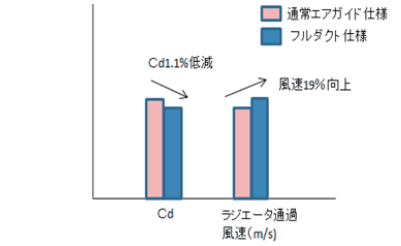


図 29　100 Km/h 走行　解析結果 [2)]

注 [2)] Cd とは空気抵抗係数のこと

8.1　ラジエータ

① フルエアダクトの採用により冷却効率を向上させラジエータコアを薄型化した。また新型ラジエータコア採用により内部通水抵抗同等のまま薄型化を実現した。

② ラジエータコアタイプは 2 種類を設定。従来型ではコア面積／仕上がりピッチで使い分けていた（コアタイプ 4 種類）が，新型ではコア厚さのみの使い分けとした。これにより生産コスト低減，ラジエータアセンブリの型部品共通化，開発（レイアウト検討／評価実験）工数低減を図った。

8.2　ATF オイルクーラ

従来型ではラジエータに内蔵して冷却のみの機能としていたが，新型では ATF（オートマチック・トランスミッション液：Automatic Transmission Fluid）早期昇温（オイルフリクション低減）を狙い，トランスミッションの横に移設した。

8.3　インタクーラ

従来型では設定していたインタクーラホースの中間スチールパイプ（図 28）を廃止しエンジンとインタクーラ間を直つなぎ化し経路短縮（CR（コスト削減：Cost Reduction））／NV 改善を図った。

9　排気システム軽量化による燃費への貢献

サイレンサは従来型同様「拡張＋共鳴タイプ」を採用し，内部構造の改良により，騒音減衰性能及び排気抵抗を保ちつつ小型・軽量化し，燃費向上に貢献した（図 30）。エンジンとの変位吸収装置としては従来型と同じ強度耐久性に定評のあるフレキシブルジョイントを採用し，構造を最適化することにより排気システムの耐久信頼性向上及び騒音低減を図った（図 31）。

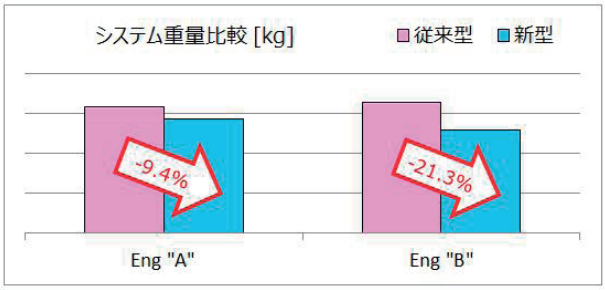


図 30　重量比較

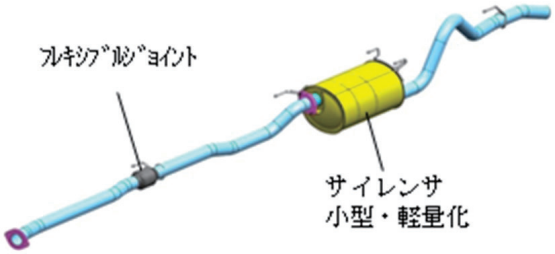


図 31　排気システム図

10　おわりに

新型 D-MAX 開発にあたってはタイ側エンジニアと日本側エンジニアでの協業により成し遂げた成果である。タイでは販売が開始したが，一つの通過点に過ぎなく，開発はこれで完了ではない。今後の市場環境変化をタイムリーにキャッチし，進化し続けるための開発に引き続き取り組んでいく所存である。

最後にシャシ開発にあたり，社内外問わず多くの関係者に多大なご支援をいただいたことについて感謝申し上げる次第である。

著　　者

江崎　智大

井上　哲雄

原澤　哲也

Phapatsarrin Theerawichetkun

Valun Tanasaewee

Marut Poothanissorn

遠藤　美幸

吉村　俊彦

Sutthirak Jantakram

大瀧　弘晃

渡邊　浩

Jenwit Suwintrakorn

小竹　亨

射羽　亮

新型 ISUZU D-MAX の電子・電装・空調について

Electronics Equipment, Electrical Equipment and HVAC for New ISUZU D-MAX

山田　尚*
Hisashi Yamada
山口　俊光**
Toshimitsu Yamaguchi
鈴木　健太郎**
Kentarou Suzuki
沼田　浩二**
Kouji Numada
曲澤　正樹**
Masaki Magarisawa
今野　桂太**
Keita Konno
栗田　辰浩**
Tatsuhiro Kurita
麦島　淳司*
Junji Mugishima
赤澤　啓介*
Keisuke Akazawa
和田　悠哉**
Yuuya Wada
角田　貴**
Takashi Tsunoda
Ekkachai Phenkhetwit *
Nattapong Adiraketanasup *

要　旨

新型 ISUZU D-MAX には，多くの新規電子制御装置を搭載した。本稿では，新規電子制御システムと電装品，及び空調システムの改良内容について説明する。

Abstract

New ISUZU D-MAX is equipped with many new electronic control systems. This article explains new electronic control systems and improvement contents of electrical equipment.

1　はじめに

D-MAX は，タイのみならず，世界中の方々にご愛用いただいている。近年，ピックアップトラック市場は，乗用ユースと商用ユースの二分化が常識化してきた。電子・電装装置は，それらの市場ニーズに応えるため，幅広いバリエーション構成に対応することが求められる。

また，開発キーワードの Efficient & Robust のもと，安全性の向上，多種使われ方，使用環境に対応させるべく開発を行った。電子制御システムにおいては，新 E/E（Electric/Electronic）アーキテクチャを採用し，CAN（Controller Area Network）バス負荷低減，効率的な装置 ECU（Electronic Control Unit）の統合を行った。そのほか装置においても，従前車の良いところは踏襲し，改善すべきところは改善し，高質でかつ低価格な商品を実現できた。ここでは，それら電子･電装装置の開発について紹介する。

2　通信，E/E アーキテクチャ

世の中のトレンドが劇的に変化していく中で，ピックアップトラックに搭載される技術と機能も進化が求められている。

新型 ISUZU D-MAX（以下，「新型 D-MAX」と略す）では機能向上のため多数の新型 ECU を採用しているが，更なる制御システムの増加も視野に，次世代の車両制御に対応するため，通信を含む E/E アーキテクチャを大幅に刷新した。

従来の CAN ネットワーク構成（**図 1**）に対して，低遅延の高性能な CGW（Central Gate Way）を採用し，本格的なドメインネットワークを構築した（**図 2**）。制御機能別にドメイン化することにより，通信量負荷の分散，他ドメインで発生した障害の拡散防止，OBD（On-Board Diagnosis）コネクタからの通信干渉の防止などを実現している。

また，新規システムの採用時にも，他システムへの影響を最小限にすることによって，システム拡張性の拡大に貢献している他，将来のサイバーセキュリティ対策等，コネクテッドビークルのアーキテクチャへの移行も容易化している。

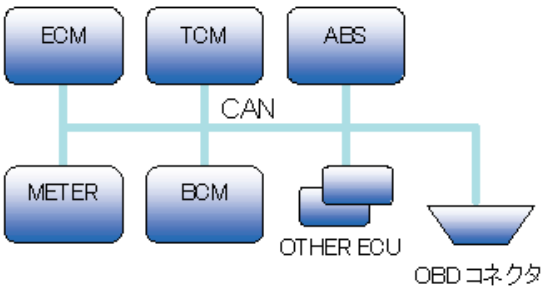


図 1　従前 D-MAX の CAN ネットワーク構成

*いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱　　**電装・制御開発部

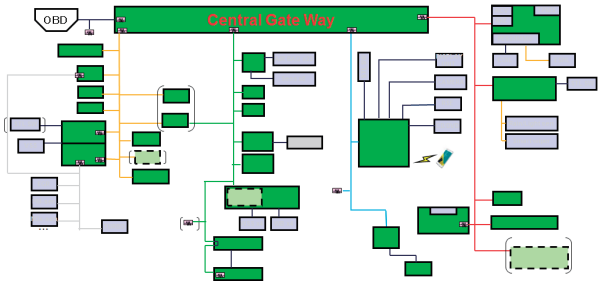


図 2　新型 D-MAX の CAN ネットワーク構成

E/E アーキテクチャとしてはボディ制御の機能集約を後述の WAM 及び BCM で実現し高密度化させた。車内外の灯火器系とドア制御機能を BCM に集中させ，回路の単純化と集積を行うことで，機能強化とコストパフォーマンスの両立を果たしている一方，多チャンネルの LIN（Local Interconnect Network）を採用することで，サテライト ECU や新センサ追加の余地も確保した。

その結果，幅広い車格を持つ D-MAX の車両機能，及び LED とハロゲンランプなどさまざまなバリエーションの灯火器系に対応が可能となっており，世界戦略車としての新型 D-MAX のニーズを下支えする E/E アーキテクチャとなっている。

3　WAM（Wireless　Access　Module）

従前車では，近接無線機能を有した，PESS（Passive Entry & Start System），RKE（Remote Keyless Entry），イモビライザ，TPMS（Tire Pressure Monitoring System）が搭載されていたが，各機能の ECU がそれぞれ単独で存在していた。

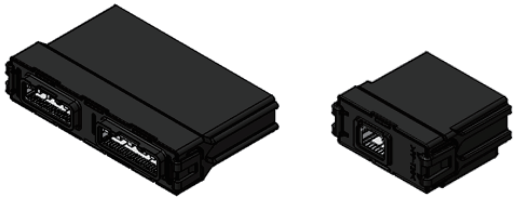
新型 D-MAX では，これらの機能の統合を実現した WAM を開発した（**図 3**）。

3.1，3.2 節でその特徴を紹介する。

図 3　統合　イメージ図

3.1　グレード

WAM は搭載機能の有無により，High／Mid／Lo の 3 つのグレードに分けられる（**図 4**）。車両要求に合わせて最適なグレードを選択できる。



(a) Hi グレード　　(b) Mid／Lo グレード

図 4　WAM のグレード

3.2　新機能の追加

従前の機能向上に加えて，次の 3 つの機能を今回新たに搭載し，商品性の向上を行った。

① ウォークアウェイロック機能：電子キーを所持して車両から離れると自動的にドアロックされる

② ウェルカムライト機能：電子キーを所持して車両に近づくとウェルカムライトとして室内灯が点灯する

③ リモートエンジンスタート：車両から離れた場所から，電子キー操作でエンジンを始動し，タイマー暖気あるいはあらかじめエアコンを設定しておけば空調が可能

4　BCM（Body　Control　Module）

従前車で採用されている BCM はキーレス及びドアロックが中心の機能であり，また，拡張性にも乏しく，キーレス機能が不要な低グレード車では採用しづらかった。また，ライトとワイパといった標準機能を取り込んでいないため，他社が採用しているような，それらを応用した利便機能が実現できていなかった。

新型 D-MAX では，キーレス機能を WAM に機能移管し，車両の標準機能であるライト，ワイパ，ドアロック機能に特化させ，標準機能の集約を果たした（**図 5**）。

4.1～4.4 節でその特徴を紹介する。

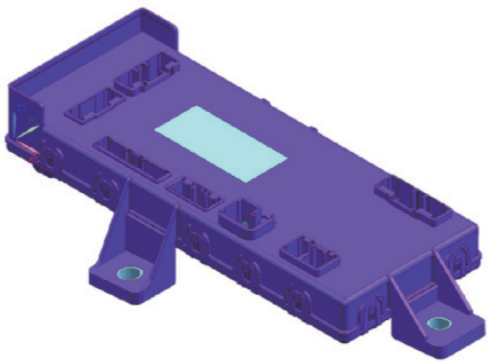


図 5　BCM 本体

4.1 新機能の追加

従前車のドアロック制御，インテリアライティング制御に加え，標準機能であるヘッドライトとフラッシャーを含むエクステリアライティング制御，ワイパ制御を統合した。それに伴い，次の 5 つの新機能を設定した。

① オートワイパ：雨滴センサにより降雨の始まり，雨量などを検出して，自動的にワイパの作動と速度調整を行う。

② オートライト：周囲の明るさを検出し，自動でヘッドライトとテールライトを点灯・消灯する。明るさの方向などを解析し，橋の下及びトンネルなどのシチュエーションでも最適な制御を行う。

③ Follow Me Home light：ライトスイッチの操作により，降車後にヘッドライトを点灯することで，ドライバの帰宅時に足元と周囲の視界をサポートする。一定時間後にライトは自動で消灯する。

④ Comfort flash：一度のターンスイッチ操作でターンライトを自動で 3 回点滅させ，車線変更時の運転操作をサポートする。

⑤ Head lamp battery saver：ヘッドランプの消し忘れによるバッテリ上がりを防止する。

4.2 カスタマイズ機能

ドアロック，ライティング，フラッシャー，ワイパ各機能の作動条件の設定は診断ツールでの変更のみならず，特にユーザよって好みが分かれる機能についてはメータでのカスタマイズ機能でのユーザによる変更が可能である（ハイグレードメータのみ）。

4.3 点検・整備性

従前車同様，CAN 通信による診断通信機能が搭載されており，ツールを使用したメンテナンスが可能である。さまざまな機能を集中させたことにより細やかな診断が可能で，よりメンテナンス性を向上させている。

4.4 拡張性

将来の機能拡張のため，汎用の出力端子と通信端子を備え，機能の追加に対してもハードウェアの変更をせずに対応できる設計となっている。

5 メータ

5.1 メータ仕様

従前車同様，標準グレード（**図 6(a)**）と上級グレード（**図 6(b)**）の 2 種類のメータを設定した。

(a) 標準グレード　　(b) 上級グレード

図 6　メータのグレード

5.2 外観デザイン

上級グレード仕様のメータは，アナログ式の左右メータ間に 4.2 インチカラー TFT（薄膜トランジスタ：Thin-Film Transistor）MID（Multi-Information Display）を配置したレイアウトを採用した。メータ外周に発光リングを設け，類似デザインのメータとの差別化を図った。

MID は長辺を横置きとし，ディスプレイ開口面と周辺のインジケータ表示面を一体化したフラット構造（**図 7**）を採用することで，大型ディスプレイ並みの視認性と高機能感を達成した。

また，標準グレードメータにおいては，従来は単色であった液晶を多色化し，見栄えと視認性の向上を図った。

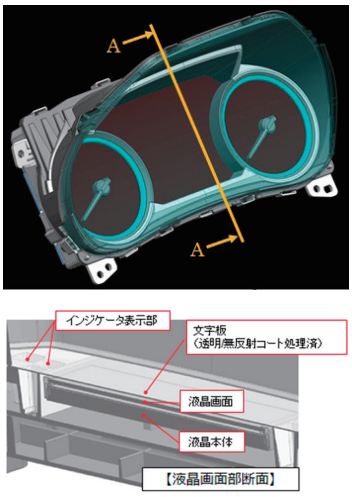


図 7　High メータ MID フラット構造（断面 A 矢視）

5.3 機能

安全及び便利機能の詳細設定（**図 8**）を MID 上で設定可能とし，ユーザの利便性を向上させた（最大 7 ユニット 30 項目）。

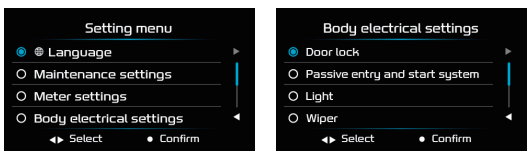
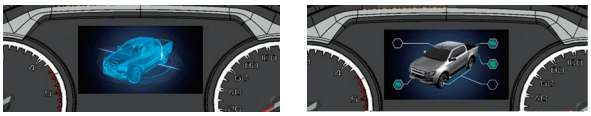


図 8　ユーザ設定画面例

インジケータ及び，ウォーニングランプ光源用 LED 素子の故障診断機能の追加により，イグニッション ON 時の点灯目視チェックの重要度を軽減した。

後席用シートベルトリマインダ機能を設定し，シートベルトの装着及び脱着時の状態をドライバに知らせる。走行時にシートベルトを外した場合，警報ブザーが吹鳴する（UN 法規準拠）。

ソナー及びレーダ装着車両においては，起動アニメーション（**図 9(a)**）後にシステムチェック演出が行われ，安全装備が機能していることをユーザに視覚的（**図 9(b)**）に認知させることができる。



(a) 起動アニメーション　(b) システムチェック結果

図 9　システムチェックの画像演出

6　アイドリングストップシステム

6.1 狙い

エンジン自動停止条件の見直しにより，CO_2 税制への対応と実燃費向上を両立したシステムを開発した。また，マルチインフォメーションへシステム状態を通知する機能を追加し，利便性の向上を図った。

6.2 CO_2 税制への対応

NEDC（新欧州ドライビングサイクル：New European Driving Cycles）モードの早期タイミングでアイドリングストップさせることを目的として，早期にバッテリ充電量を検知するロジックを追加した。バッテリ充電量に応じて，アイドリングストップを許可／禁止する制御を行い，CO_2 税制対応とバッテリ保護の両立を実現した。

6.3 アイドリングストップ機能の向上

エンジン自動停止の禁止条件を緩和し，アイドリングストップの頻度を増加させ，実燃費を向上させた。これにより，車両電源系への負荷が大きくなるため，バッテリ状態の監視機能を高めた。

更に，システムがバッテリ充電量の低下及びエアコン停止による車内快適性の低下などを検知すると，エンジンを自動で始動させる機能を追加した。

6.4 アイドリングストップシステム状態通知機能

アイドリングストップシステム使用の促進を目的として，マルチインフォメーションへアイコンを表示する機能を新たに設定した。エンジンが自動停止しなかった場合にドライバへ自動停止しなかった理由またはアイドリングストップさせるための操作を通知する（**図 10**）。また，エンジンが自動始動した場合も同様に始動した理由または注意喚起を通知する（**図 11**）。

(a) バッテリによる禁止　(b) ブレーキペダルの踏力不足時

図 10　アイドリングストップしない理由を通知するアイコン

図 11　ドア開けによるメッセージ

7　SRS コントロールユニット

機能安全（ISO26262）に対応するため，SRS（補助拘束装置：Supplemental Restraint System）コントロールユニットを新規に開発した。SRS コントロールユニットはサイドクラッシュ感度向上のために，新たに配置されたフロア加速度センサの入力にも対応している。また新規機能として助手席エアバッグの作動・非作動の切り替えを可能としている（**図 12**）。

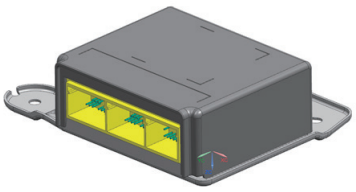


図 12　SRS コントロールユニット

7.1 機能安全対応

開発初期段階から意図しないエアバッグの展開に対する安全機構を構築し，機能安全要求の最高難易度 ASIL：D[1)] を達成した。

注 [1)] ASIL（自動車安全水準：Automotive Safety Integrity Level）には ISO26262 に基づいた A，B，C，D の 4 つの識別段階があり，D のランクが最も高い。

7.2 センシング性能の向上

車両が横滑りして電柱へ衝突するようなケースへの安全性向上を目的としてフロアへ加速度センサを配置した。

SRS コントロールユニットは既存センサとの組み合わせで展開判定性能の向上を実現し，エアバッグの早期展開による乗員保護に寄与している（**図 13**）。

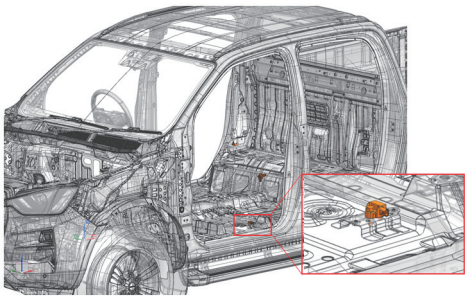


図 13　新規に配置したフロアの加速度センサ位置

7.3 助手席エアバッグカット機能

助手席へチャイルドシート搭載時の乗員安全向上のため，衝突時に助手席エアバッグを非作動とする制御を新規開発した。

乗員の意思で，助手席エアバッグの作動・非作動を選択するスイッチを追加しており，SRS コントロールユニットはスイッチ状態により，助手席エアバッグの展開･非展開を制御している。

8　ワイヤハーネス

新型 D-MAX では電装システムが増加し，ハーネスの回路数，重量が増え，かつ回路が複雑化したため，品質維持が課題であった。

また，搭載部品の増加により，配索スペースが制限されるため，回路と配策の効率化が必要になった。

これらの問題解決に向けて，次の 3 つの項目を実施した。

① 回路，配策の効率化
② 電線の細線化，軽量化
③ 電源ボックスの高密度化

8.1 回路，配策の効率化（ECU，電源ボックス最適配置）

これまで ECU と電源ボックスの配置は，設計者の経験と従前車のレイアウトを参考に決定してきたが，新型 D-MAX では Capital（独シーメンス社製）の Generative フローを活用し，部品配置の違いによる電線長，回路数をシミュレーションし，最適な配置を実現した（**図 14**）。

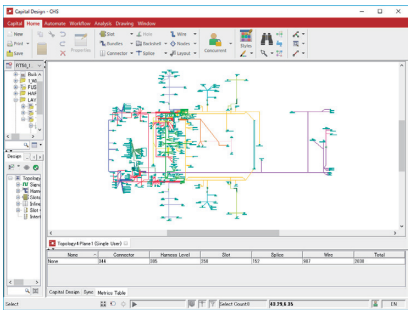


図 14　Capital トポロジー図

8.2 電線の細線化／軽量化

従来まで採用していなかった極細電線とアルミ電線を積極的に使用することにより，細線化及び軽量化を図った。

また，ヒューズの細分化と容量の最適化（従来まで採用していなかった低容量ヒューズの使用）を実施することにより電源回路の細線化を行った。

8.3 電源ボックス（ヒューズ & リレーボックスとジャンクションブロック）の高密度化と軽量化 BFT の設定

電源ボックスに搭載する部品（リレーとヒューズ等）を従来から採用している部品から小型化し高密度化を行った。

室内に配置される電源ボックス（ジャンクションブロック）は，従来の電線とバスバータイプから基板タイプへ変更し，同時に基板リレーを採用することにより，高密度化，軽量化を実現した。

また，バッテリ直付けの BFT（Battery Fuse Terminal）を採用することにより，電源回路の安全性を向上させた（**図 15**）。

大容量ヒューズを BFT へ移設することにより，電源ボックスの更なる高密度化，軽量化を可能にした。

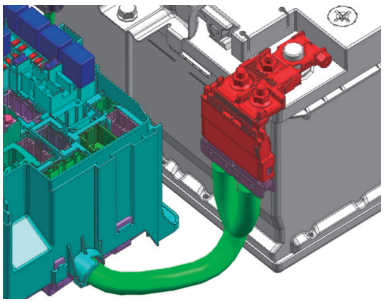


図 15　BFT（Battery Fuse Terminal）

9　スイッチ

車両と運転者のインターフェースとして重要な役割を持つ操作系のスイッチにおいては，従前車及び

小中大型トラックの開発で蓄積してきたゾーニングコンセプトに基づき，かつ基本レイアウトは従前車を踏襲した配置とした。

また内装品質の向上，新規装置の追加のニーズを満足させるため，個々のスイッチを見直し，すべての操作系スイッチを新規開発した。

9.1 ステアリングスイッチ

左側にインフォテーメント，右側にクルーズ関連とする基本配置は現行を踏襲しつつ，ナビゲーション，CarPlay／Android Auto の音声認識操作を可能にすべく，音声認識ボタンを追加した。

メータ MID の機能増加に伴い，MID の操作スイッチを本スイッチへ移設した。

それぞれ，インフォテーメント／メータ MID と合わせて開発することにより直感的に操作できる操作モードとした。同時に，操作感の品質向上のため　ショートストロークタイプとした（**図 16**）。

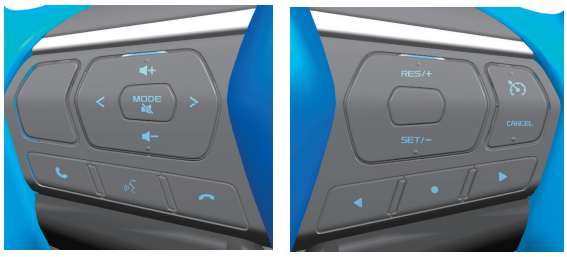


図 16　ステアリングスイッチ

9.2 インパネスイッチ

操作感の品質向上を狙いショートストロークタイプのスイッチへ変更した。多くのスイッチで構造を共通化することで原価低減にも貢献した（**図 17**）。

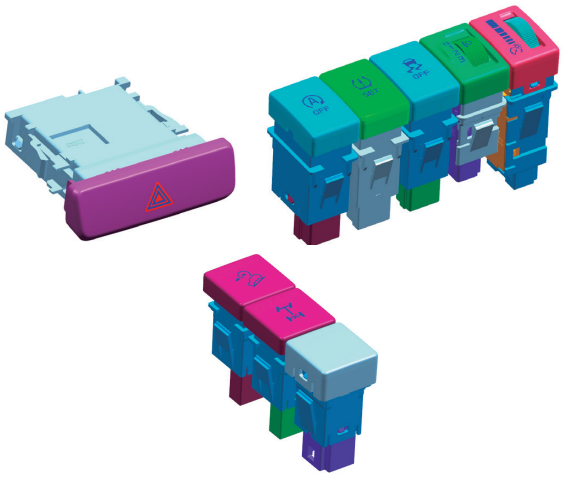


図 17　インパネスイッチ

9.3 そのほか

内装品質の向上を狙い，パワーウインド操作ノブのオーナメント追加，4x4 スイッチはシルバーリング，ピアノブラックの塗装部品を追加することで，高級感を演出した（**図 18**）。

図 18　パワーウインドスイッチ／4x4 スイッチ

10　IVI（In-Vehicle Infotainment）

新型 D-MAX は，ナビ付きの High モデル，ディスプレイオーディオの Mid モデル，フラッシュサーフェースの CD オーディオ，1DIN CD オーディオの 4 グレードを設定（**図 19**）。High と Mid は Apple CarPlay（**図 20**）[2]／Google Android Auto（**図 21**）[3]／MirrorLink[4]／ Miracast[5] を使用しスマートフォンと車載機の連携を強化した。

これにより普段使い慣れたスマートフォンのアプリ（各連携で承認されたアプリに限る）を車載機側でも使用でき，エンターテイメント性の充実を図ることが可能となった。特に CarPlay に関しては今までの USB ケーブルを使用した接続だけでは無く，Wi-Fi を使用してワイヤレスに接続できるワイヤレス CarPlay をタイで初めて投入した。

スマートフォンとの連携を強化していく中で，ディスプレイ，HMI に対してもスマートフォンライクな仕様が最適と考え高精細 WXGA ディスプレイ，静電タッチパネル，音声認識（High のみ）を設定した。画面サイズに関しては，近年他社 OEM，アフター品（車種専用形状），ともに大画面化を進めており，従前車のナビ 8 インチ，ディスプレイオーディオ 7 インチに対して 9 インチ，7 インチを採用，ディスプレイとセンタユニットを別体にすることでナビ，ディスプレイオーディオの内機に影響されずディスプレイサイズを選択できる仕組みを採用し更なる商品性向上を図った（**図 22**）。

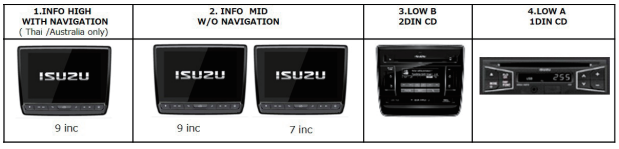


図 19　オーディオモデルラインナップ

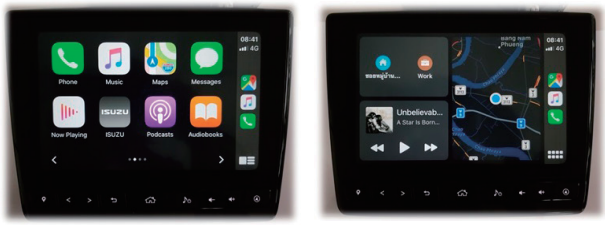


図 20　Apple CarPlay

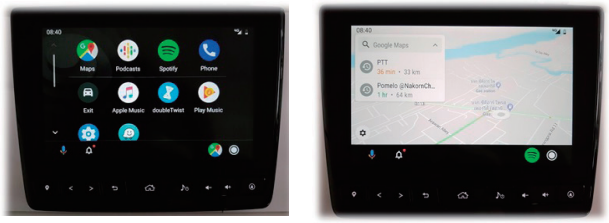


図 21　Android Auto

図 22　ディスプレイ配置

本開発における大きな課題は次の①～④である。

① CarPlay／Android Auto の認証取得
② ハンズフリーの音声品質の向上＆内蔵音声の認識率の目品到達（High のみ）
③ High モデルとメータ MID への連携表示
④ EOL（End Of Line）を使用した品番統合の 4 項目が上がる

①はいすゞ開発として初めての取り組みとなる，製品の反応速度に関して求められる品質が今までの車載機が求めるレベルより高く目標をクリアするためにトライ＆エラーを繰り返し行った。

②は別体のアレイマイクを導入，マイクレイアウト最適化を行い現行比で音声品質のポテンシャル UP を行った。また評価に関しても実走評価条件の見直し（窓開け走行評価を追加），実車シミュレーションシステムの導入（定量評価設備を用いたチューニングによる音声品質の向上）し指向性，周波数等のパラメータを最適にすることができハンズフリー，音声認識ともに目標品質をクリアすることができた。

③は CAN を使用して文字情報を送る方式をとったが，部品間での通信不良が無いように両部品サプライヤ殿に協力いただき試験を繰り返し実施し品質作り込みを行った。

④はハード品番を統合化し EOL の書き込みにより仕様を分ける方式を取り入れたが，仕様を分けるための書き込むデータの選別，工場側での書き込み作業を商品企画，生産部門と整合しながら作り込みを行い 22 品番から 6 品番に削減を可能にした。今回上げた 4 項目以外の機能に関してもハード，ソフト面で現行機種からそれぞれポテンシャル Up を図り全体的に底上げを実施した。

注 [2] CarPlay は Apple の登録商標です。
注 [3] Android Auto は Google の登録商標です。
注 [4] MirrorLink は CAR CONNECTIVITY CONSORTIUM によって策定された規格。
注 [5] Miracast は，Wi-Fi Alliance によって策定された規格

11　空調装置

11.1　狙い

従前車の冷房性能を維持しつつ，更なる快適性向上と省動力化を図るべくシステム開発を行った。

仕様バリエーションは，タイ仕向けに従前設定のあった廉価クーラ及び，オートクーラを廃止し，新たに他仕向けと同様に上級グレードにオートエアコンを設定し，温度調整代の拡大を可能にした（**図 23**）。

また，環境対応として今後要求が高まると予測される新冷媒システムについては，現行冷媒システムと極力部品の共通化を図り，今後の展開拡大が容易に行えるよう配慮した。

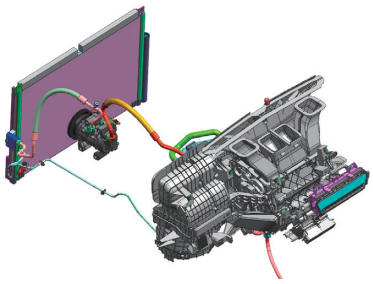


図 23　空調システム全体

11.2　空調部品の開発

11.2.1 コンデンサ＆コンプレッサ

コンデンサはサブクール式を踏襲した。その上で冷却性能を向上するため，面積を従前比約 10％拡大及び，バンパ内にエアガイドを設定することで，システム圧力を約 5 ％低減した。

同時にコンプレッサは，マニュアルシステムにベーンロータリー式 80 cc，オートシステムに斜板式 110 cc と小型化を図り，コンデンサ冷却向上効果と合わせて，

消費動力を従前比約 30％低減した。

11.2.2 室内ユニット

室内ユニットはセミセンタ型を踏襲することで，RHD（右ハンドル：Right Hand Drive）／LHD（左ハンドル：Left Hand Drive）のエアコン配管接続位置を共通化し，エアコン配管の品番数の半減を図った。

また快適性向上のため，次の 3 つの機能を追加した。

① 暖房時に窓からの冷気を遮断することで暖房感を向上させるため，両側のベンチレーションから温風が出る機能を追加（標準）した。

② 後席乗員の冷暖房感向上のためリヤベンチレーション吹出し（オプション）及び，リヤヒータ吹出し（オプション）を設定した。

③ オートエアコンには運転席，助手席の乗員各々の好みで設定温度を選択できる左右独立温度調整機能を採用し，より上級グレードに対応した。

更に車室内の空気質向上のため，全仕向地に防塵フィルタをオプション設定し，タイ向けには PM2.5 対応フィルタを標準設定した。

11.2.3 コントロールパネル

マニュアルコントロールパネルは，操作性とコストの両立のため従前同様の 3 ダイヤル＋ケーブル駆動方式を採用した（**図 24**）。

一方オートエアコンはデザインを一新し，従前のダイヤル式から，大型液晶ディスプレイ表示付きのトグルスイッチ式に変更した。すべてのスイッチを上下両方向からの操作可能な構造とし，上質なデザインと操作性向上の両立を実現した（**図 25**）。

図 24　マニュアル

図 25　オート

12　おわりに

ここまで，新型 D-MAX 電子・電装装置及び空調部品の概要について紹介してきた。今後，急速に進化，変革を遂げて行くと考えられる自動車において，電子・電装装置は，更なる改善と新技術開発は必要不可欠である。

今後も日泰の電子・電装開発技術者が協力し，更なる高みを目指して開発を進めていきたい。

最後に，今回新型 D-MAX の開発に際し，多大なるご支援，ご協力いただいた社内・外のすべての皆様に紙面をお借りして感謝の意を申し上げます。

著　　者

山田　尚

山口　俊光

鈴木　健太郎

沼田　浩二

曲澤　正樹

今野　桂太

栗田　辰浩

麦島　淳司

赤澤　啓介

和田　悠哉

角田　貴

Ekkachai Phenkhetwit

Nattapong Adiraketanasup

新型 ISUZU D-MAX 搭載 4JJ3 ディーゼルエンジンについて

Introduction of 4JJ3 Diesel Engine for New ISUZU D-MAX

齋藤　昴*　Subaru Saito
三輪　純一**　Junichi Miwa
平野　秀一**　Shuuichi Hirano
上野　徹**　Tooru Ueno
古橋　匡規***　Masanori Furuhashi
梶山　昌宏***　Masahiro Kajiyama
五百住　学****　Manabu Iozumi
金巻　政治****　Masaharu Kanemaki
松原　淳****　Jun Matsubara
Sankaraiah Velamuru⁂****
Patrick Lüben⁂****

要　旨

いすゞ自動車は新型 D-MAX 搭載用 4JJ3 ディーゼルエンジンの開発を行った。このエンジンは D-MAX に搭載以降ご好評をいただき実績を積んだエンジンをベースにエンジン本体とエンジン制御の改良を行ったものである。

本稿では，出力・燃費向上・NV 改良・将来展開を見据えたモジュール開発及び高次排出ガス規制対応の可能な次世代 ECM 開発を行うための採用技術の概要について紹介する。

Abstract

Isuzu Motors has developed 4JJ3 diesel engine for use with the new D-MAX. This engine has been improved on the engine hardware and engine control based on the engine that has been installed since the D-MAX and well-received.

In this article, we introduce the summary of the adopting technology for output performance, fuel efficiency, and NV improvement, developing the next generation ECM that can meet the higher exhaust emission regulations, and the module development with an eye to future development.

1　はじめに

D-MAX の販売当初よりタイを初めとする世界各国で好評の 4J シリーズのディーゼルエンジンを新型 ISUZU D-MAX（以下，「新型 D-MAX」と略す）（**図 1**）に搭載するに当たっては，従前の 4JJ1 ディーゼルエンジン（以下，「4JJ1 エンジン」と略す）の基本骨格をベースとし，従来のメリットをそのままに，エンジン本体のデバイス改良，更にそれらの統合制御改良による排出ガス性能，出力性能，燃費性能の向上，静粛性／音質の改良を行った。

エンジン性能改良に加え，将来展開を見据えたモジュールエンジンの開発，及び高次排出ガス規制対応の可能な次世代 ECM（Engine Control Module）を開発しモデルベース開発に対応した。

本稿では新規開発した 4JJ3 ディーゼルエンジン（以下，「4JJ3 エンジン」と略す）のタイ向け Euro4 の技術概要について紹介する。

2　開発の狙い

新型 D-MAX 搭載 4JJ3 エンジンは諸規制適合と商品力の確保を目指し，次の項目に注力した。

① 排出ガス規制対応
② 高出力・トルク化
③ 低燃費
④ 静粛性／音質の改善
⑤ 高信頼性
⑥ 新 ECM 開発
⑦ モジュール設計による低コスト化

図 1　ピックアップトラック 新型 D-MAX

* PT 商品企画・設計第二部　　** エンジン実験第二部　　*** PT 電子制御開発部
**** エンジン装置設計部　　⁂**** いすゞモータースジャーマニー GmbH

3　主要諸元

4JJ3 エンジンの従前エンジンとの主要諸元比較を**表 1** に示す。従来は燃料性状の違いから排出ガス法規ごとに出力トルク及び圧縮比の仕様分けが必要であったが，4JJ3 エンジンではデバイスの改良をすることで共通化が可能となった。

更にターボチャージャ，噴射系装置など高機能部品についても共通化を実施した。

排出ガス後処理システムと EGR（排気再循環：Exhaust Gas Recirculation）システムについては従来同様，さまざまな排出ガス規制法規に応じた仕様分けとした。

4　エンジン概要

図 2 にタイ向け 4JJ3 エンジンの外観，**図 3** にその性能曲線を示す。従前比全域で出力トルクの向上を達成した。

図 2　4JJ3 エンジンの外観図

4.1　モジュールエンジンの開発

従来の開発は排出ガス規制法規の高次化に伴いエンジンの見直しを行ってきたが，4JJ3 エンジンの開発では生涯の開発工数を削減すべく，将来展開を見据えたモジュールエンジンの開発に取り組んだ。

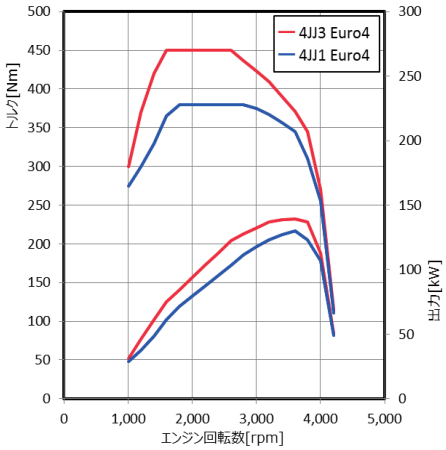


図 3　4JJ3 エンジンの性能曲線

レイアウトの観点では，各国仕向け毎の排出ガス規制法規及び商品ニーズから求められるデバイスを整理し，その上で各デバイスが機能を満足しつつ仕様分けの発生が最小減となるよう各デバイスを配置した。

性能の観点では，MBD（モデルベース開発：Model Based Development）を活用することで各国の環境条件，排出ガス規制によらず共通の燃焼室／過給機／噴射系システムで開発の狙いとする高出力トルク化・低燃費の改善が達成できることを設計段階で確認した。

耐久性の観点では，従来は粗悪燃料地域において仕様分けが必要であったが，仕様分けが不要となるよう粗悪燃料への耐久性を高めた。

排出ガス性能の観点では，EGR システム・排出ガス後処理システムを変更することでさまざまな排出ガス規制法規に対応できるものを目指した。

この最小限のデバイスの組分けにより，将来の各国展開に対応可能なモジュールエンジンが実現可能となった。また，開発の効率化だけでなく，高機能部品の共通化により低コスト化にも貢献した。

4.2　基本性能向上

信頼性のある D-MAX 搭載 4JJ1 エンジンをベースに，4JJ3 エンジンでは市場のお客様の声に応えるべ

表 1　主要諸元

	従前				新型
排気ガスレベル	Euro2	Euro3	Euro4	Euro5	Euro2～6
エンジン型式	4JJ1				4JJ3
種類、シリンダ数、配置	ディーゼル4サイクル、直列4気筒、縦置き				ディーゼル4サイクル、直列4気筒、縦置き
総排気量 [cm^3]	2,999				2,999
ボアxストローク [mm]	φ95x104.9				φ95x104.9
最高出力 [kW]	120	130			140
最大トルク [Nm]	380			430	450
圧縮比 [-]	17.3		16.3		16.3(遮熱コート付き)
過給形式	VGS				直動式電動アクチュエータ/高効率VGS
燃料噴射型式	コモンレール				コモンレール
噴射圧力 [Mpa]	180			200	250
後処理方式	LESS	DOC		DPD	各排ガス法規に合わせ仕様を選択
EGR形式	HOT-HP	COOLED-HP			

く，排出ガス性能，出力性能，燃費性能の向上，静粛性／音質の改良を行った。

また，世界各国へグローバルに展開することを狙い，使用環境と各国法規を踏まえた共通の基本性能を作り込んだ。

熱効率の向上と排出性能の改善を両立すべく，燃焼室形状の最適化を図り新型燃焼室（**図 4**）を採用した。圧縮比は，最高燃焼圧力を抑えながら従前エンジン以上の出力特性を実現しつつ，かつ実用域における熱効率と排出性能の観点から最適となる，16.3 を選択した。

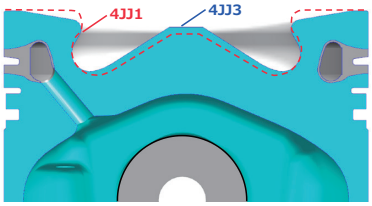


図 4　燃焼室形状

噴射系においてはインジェクタノズル噴孔仕様最適化に加え，燃料噴射システム改良による微少多段噴射化･噴射インターバル短縮･高圧噴射化を行った。噴射タイミングの適正化を行うことで燃焼音の発生を抑制しつつ燃費･排出ガス性能とのバランスを図った。

なお，ピストン頂面にはアルマイト遮熱処理を施すことで冷却損失を低減させた。

ターボチャージャにおいては，高速・高負荷領域までを幅広くカバーするワイドレンジ対応の VGS ターボチャージャ（可変翼ターボチャージャシステム：Variable Geometry Turbocharger System）を採用し，低回転時の耐ターボサージ性を確保しつつ，燃費性能･排出ガス性能の両立を図った。

動力性能としては，全域のトルクアップを実施。トルク特性を 1600 rpm～2600 rpm までのフラットトルクとし扱いやすい出力性能を実現しつつ，低回転域のトルク向上も同時に行った。高地においても従前比全域で大幅なトルクアップを行いどのようなシチュエーションにおいても高い動力性能を実現した。

4.3　耐久信頼性

4JJ3 エンジンの耐久信頼性においては，次の①～③の着目点に注目し，従来から好評を得ている耐久性以上となるように慎重に検討･評価･対応を行った。

①低回転トルクアップ，②出力アップ，③燃費低減

① 低回転トルクアップ

低回転トルクアップが，エンジン耐久性へ影響する項目は，摺動面，冷却性能，角速度変動の主に 3 項目あげられる。

摺動面は，供給油圧が低いこと及びオイルジェット量とピストン摺動時のオイル飛沫が少なく，摺動面の油膜形成が難しい。そこで，低回転の摺動面に着目した専用耐久試験を作成し，従前と比較評価を行い，対応した。

冷却性能は，主に供給油圧が低いことによるピストン冷却用オイルジェット量の減少と冷却水量不足による各部沸騰と温度上昇があげられる。そこで，各部水流量と各部オイル流量を踏まえて，冷却性能検討と冷却性能評価を行い，確認を実施した。

角速度変動は，補機ベルトのスリップとクランクねじり応力の増加が懸念される。そこで，ベルトスリップ率評価，クランクシャフトの応力＆ねじり測定，ダンパの最適化を行い，確認対応を実施した。

② 出力アップ

出力アップがエンジン耐久性へ影響する項目は，「運動系ストレス増加」と「熱ストレス増加」の主に 2 つあげられる。

運動系ストレス増加については，単位時間当たりの仕事量増加により，機械的ストレス増加が考えられる。そこで，CAE（Computer Aided Engineering）計算，クランク応力評価，ピストン＆ヘッド耐久性評価を行い，対応した。

熱ストレスの増加については，出力アップに伴う単位時間あたりの燃料流量増加に伴い，冷却不足による温度上昇と熱振幅増加が考えられる。そこで，ピストン温度，排気温度を含む各部温度測定と熱繰り返し評価，CAE によるひずみ計算を実施し，評価対応した。

③ 燃費低減

4JJ3 エンジンにおいては，市場からの更なる燃費低減要求に応えるべく，フリクション低減アイテムとして，DLC（ダイヤモンド状炭素：Diamond-Like Carbon）ピストンピン，低フリクションチェーンシステム，低張力ピストンリングを採用，冷却損失低減アイテムとして，遮熱ピストン（アルマイトコート）を採用している。

DLC ピストンピンにおいては，境界潤滑状態において，剥離と欠損，異常摩耗等が耐久性として懸念される。そこで，各種摩耗試験を実施し，評価確認を行った。

低フリクションチェーンシステムについては耐久性懸念点として，面圧アップによる摩耗増加とディーゼル特有のオイル劣化環境下に対する摩耗量の増加がある。そこで，各種摩耗試験を実施し，摩耗量を計測し，市場性を吟味し評価対応を行った。

低張力ピストンリングについては，低張力による挙動悪化に起因する初期 LOC（潤滑油消費：Lubrication Oil Consumption）悪化とオイル落とし

改善の面圧アップによる摩耗も含め，LOC 悪化が懸念される。

そこで，従来エンジンとの初期 LOC 比較と挙動比較，各種摩耗試験を実施し，評価対応を行った。

遮熱ピストン（アルマイトコート）については，アルマイトコート剥がれるまたはき（亀）裂が懸念される。そこで，アルマイトコート範囲（**図 5**）を慎重に検討決定したことに始まり，ピストン温度，熱繰り返し試験を実施し，評価確認を行った。

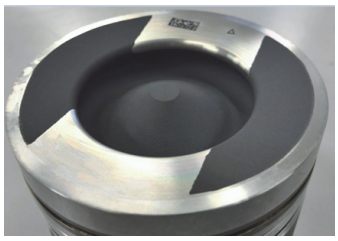


図 5　遮熱ピストン

4.4 静粛性

今回のフルモデルチェンジでは，開発テーマの一つである車室内での快適性の向上を図るため，積極的な車内騒音の改善に注力した開発を行った。4JJ3 エンジンは，次の①～③の改良を行うことで，クラストップレベルの静粛性と，高音質化を実現し，車室内空間の快適化に資することができた。

① エンジン制御の最適化（高出力化・排出ガス・燃費性能など，エンジン騒音と相反するものとの両立）によるパートロード領域での燃焼音の改善
② アイドル A ギヤのダブルシザースギヤ化（**図 6**）によるギヤ系騒音の低減
③ 近接遮蔽による放射系騒音の低減

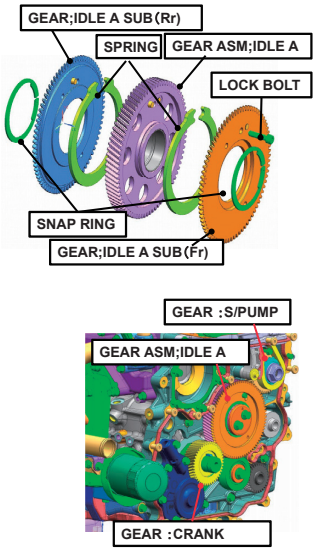


図 6　アイドル A ギヤのダブルシザース化

図 7 及び**図 8** に，タイ市場向け Euro4 仕様でのエンジン単体騒音レベルを，4JJ3 エンジンと従前 4JJ1 エンジンで比較したものを示す。

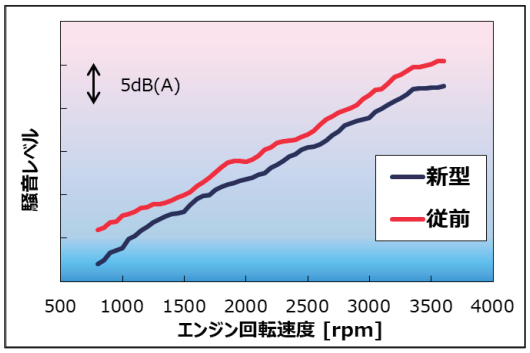


図 7　エンジン単体騒音レベル;加速運転時

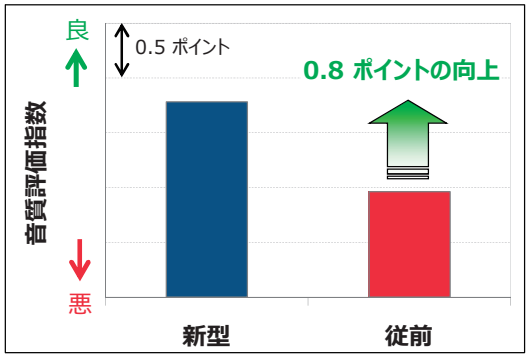


図 8　音質評価指数;アイドル運転時

4.5 MBD の適用

従来の開発は実機で試作品を評価し，目標性能に達成できなければ再設計・評価を繰返し目標値に到達する「到達型」プロセスで開発を行っていた。この手法は部品試作・評価に多くの時間が必要であった。しかし，高次排出ガス規制法規対応･低燃費対応など，年々システムが高機能化･大規模化しているため，開発工数の増大が懸念されている。

そこで 4JJ3 エンジン開発では「先見型」の開発を採用した。この手法では企画段階から MBD を適用し，バーチャルエンジンで部品評価を実施するため，試作期間を短縮できる。実際に企画段階でシミュレーションを多用することで，高出力トルク化･燃費改善の改善をしつつさまざまな排出ガス規制法規に対応可能なモジュールエンジンの開発見通しを設計初期段階で立てることができた。これにより実機検証を減らせるだけでなく，開発の手戻りの抑制ができ，開発工数の削減につながった。

更にレイアウトにおいても，今回から CAD 研での生産部門による組み付け性評価を導入した。これにより，生産要件を試作段階から取り入れることでき，設計変更を減らすことができた。

5　要素技術

これまで述べてきた項目に貢献する主要な要素技術について，本章で紹介する。

5.1 ECM

4JJ3 エンジン用 ECM 開発では，今回開発した ECM をいすゞディーゼルエンジンの次世代 ECM とすべくハードウェア，ソフトウェアともフルモデルチェンジを伴う新規開発を行った。狙いとしては，Euro6d 排出ガス規制法規まで対応可能な内製制御を搭載した高機能 ECM を開発し今後のいすゞの基幹 ECM とすることを目指した。

開発方針は，従来の排出ガス規制法規ごとに新規開発するコスト高，リソース大のやり方を改め，ハードウェア，ソフトウェアとも設定したターゲットを満足する高機能版を開発し，低機能版はそこから不要な機能を剥ぎ取ることで対応することを方針とした。

ソフトウェア開発では，将来の拡張性も考慮し，制御機能をモジュール化することで要求仕様ごとにモジュール単位で抜き差し可能な構造に全面的に変更した。これにより今後の変更に対する開発工数を大幅に低減することが可能となった。また，制御機能のレベルアップについては，従来のマップ制御から一部モデルベースト制御化へ改良するとともに，既存の内製制御と業界レベルを徹底的に調査し，その結果をもとに不足している機能を追加することによって “state-of-the-art” 水準にまで向上させた。

開発プロセスでは，MBD を取り入れ “要件定義書→制御モデル→MILS（Model In the Loop Simulation）検証” のフローを実践して，ソフトウェア開発の効率化と品質向上を図るとともに制御モデルをアウトプットするようになったためプラントモデルと接続してのバーチャル開発環境が構築可能となり，トータルなエンジン開発の効率化に寄与した（**図 9**）。

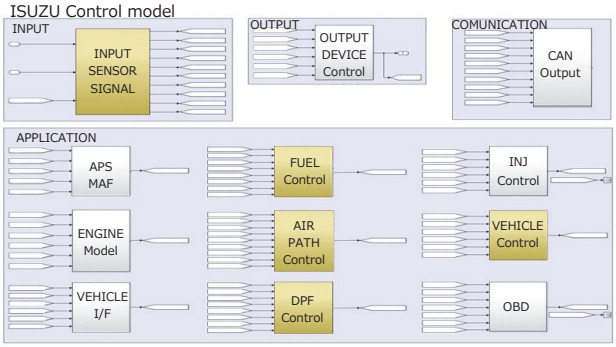


図 9　ソフトウェア制御モデル

今回投入した主な新機能は次の通り。

① スーパーバイザ機能
② トルクフロー
③ DPD（ディーゼル微粒子除去装置：Diesel Particulate Defuser）モデルベースト再生制御
④ LNT（NOx トラップ触媒：Lean NOx Trap）制御
⑤ EGR モデルベースト制御改良
⑥ ダイアグ通信 USD（Unified Diagnostic Services）化
⑦ セキュリティアルゴリズム変更
⑧ 予防整備機能
⑨ ISO-26262 対応（ASIL-B）

ハードウェア開発では，ECM の単体コストを考慮し Euro5 以上の高機能版と Euro4 以下の低機能版の 2 種類の同時に開発したが，低機能版は高機能版からの部品剥ぎ取りで対応可能なモジュール設計とすることで短期間に 2 種類の ECM を開発できた（**表 2**）。

また，高機能版は，今後ますます複雑化することが予測される中で今後 7～8 年競争力を確保できる性能を有したマイコンを搭載することにより Euro6d まで対応可能なポテンシャルを持った設計とした。

表 2　次世代 ECM ハードウェア性能 [1)]

		高機能版	低機能版
排ガス対応		Euro5/6	Euro2/4
電源電圧		12V	
CPU処理能力		2CPU マルチコア化	1CPU マルチコア化
メモリ容量	ROM	6.5MB(Total) (2.6倍)	2.5MB (1.25倍)
	RAM	624kB(Total) (3倍)	240kB (2.5倍)
コネクターピン数		200pin (33pin増)	200pin (79pin増)
ISO 26262対応		診断機能有り	←

( ) : 従前比

注 1) CPU（中央処理装置：Central Processing Unit）

5.2 過給システム

本エンジンは，従前エンジンに対する低速エンジントルクアップ･出力アップ要求への対応に加え，さまざまな排出ガス規制帯でエンジンハードウエア共通化するモジュール化構想への対応が必要となった。上記要求を満足するため，ワイドレンジに高過給可能なターボを選定した。

従前仕様に対しコンプレッサ・タービン翼車，VGS アセンブリそれぞれベース効率アップを図り，更にタービン軸スラストベアリングをラジアルベアリングと一体式とすることでフリクションロスを低減させた単段 VGS ターボチャージャを採用した（**図 10**）。

図 10　ターボチャージャ外観モデル

モジュラー化構想に対応するため，タービン容量は最も排出ガス流量の多い低ユーロ排圧にて最低限のサイズとし，可能な限り小容量化することで平地･高地環境での低速トルク向上と排出ガスモード燃費向上を狙った設計とした。

コンプレッサは高地を含めた実用領域で最も性能を出せるようサプライヤ標準設計に対し最適化を行い，低速過給圧アップに伴い懸念されるターボサージに対するマージンを確保しつつ，出力点でのターボ回転マージンを確保し，ワイドレンジ化に対応した。

これらの設計検討により出力アップ要求を満足させつつ，従前比低速･実用領域の過給性能を向上させた。

また，VG ノズル制御アクチュエータを電制モータ式とすることで，従前の負圧式に対し過給圧レスポンスと過給圧の制御性を向上させた。

従前エンジンとの高地 2500 m トルクカーブ実機評価結果比較を図 11 に示す。従前エンジンに対し，タービン性能の改良･容量最適化したことでエンジン回転全域にて過給圧アップが可能となり，高地低速トルクを大幅に改善されることを確認した。

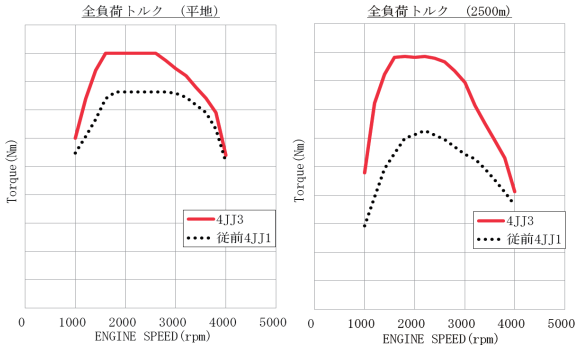


図 11　エンジントルク & 過給圧（平地・高地）

また，前述の如く低速・実用領域の過給性能向上により，従前ターボに対し，NEDC（新欧州ドライビングサイクル：New European Driving Cycles）モードでは 0.4 %，WLTC（世界統一試験サイクル：Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle）モードでは 0.6 %，タイ市場実用燃費モードでは 0.8 % 程燃費が改善されることを確認した。

5.3　燃料噴射システム

本噴射系システムは 4JJ3 エンジンの開発コンセプトであるモジュール化を適用し，燃焼解析をはじめとしたシミュレーション解析を用いて，さまざまな排出ガス規制法規に対応可能な仕様選定を行った。

出力性能向上と排出ガス規制への適合を両立するため，最大燃料噴射圧 250 MPa の超高圧コモンレールシステムを採用した。従前機種に対して燃料噴射圧の大幅アップによる噴霧微粒化及び噴射期間短縮により燃焼改善を図った。燃焼解析と実機評価によるフィードバックを行い，インジェクタノズル噴孔仕様の最適化を行った（図 12）。

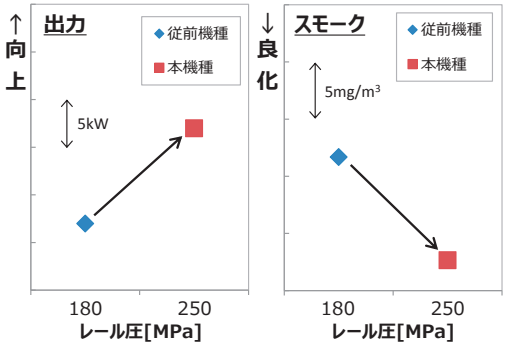


図 12　高噴射圧化の効果

インジェクタノズルニードルの圧力制御バルブを 3 way 切替え仕様へ変更し，燃料リーク量を低減することで，サプライポンプの燃料圧送量の最適化を図った。サプライポンプ内の高圧ポンプ駆動仕様をカムとローラによる転がり構造へ変更することで平均駆動トルクを低減し，燃費向上に貢献している（図 13）。

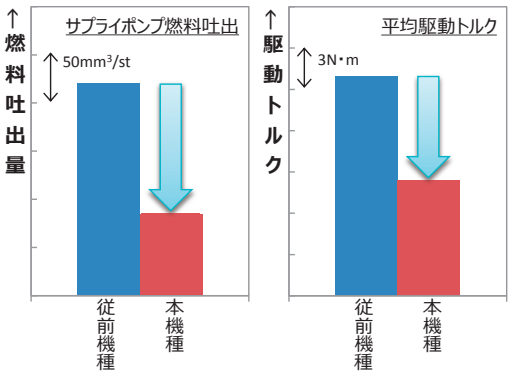


図 13　駆動トルク低減効果

また，インジェクタ内部のコマンドピストンを廃止し可動部を削減することで，ニードルの応答性を改善し，燃料噴射精度の向上を図った。高精度化した微小燃料噴射を用いた多段噴射により，性能と騒音のバランス最適化に寄与している。

今後，市販燃料への配合比率増加が予想されるバイオ燃料に対しては，燃料流路の亜鉛鍍金処理を廃止することでノズル噴孔内へのデポジット生成を抑制し，ロバスト性を向上させている。

5.4 排出ガス後処理システム

4JJ3 エンジン用排出ガス後処理システムのコンセプトとして，新興国から先進国までのさまざまな排出ガス規制対応及び幅広い市場展開を見越して，エンジン側の大規模変更無く搭載が可能なパッケージングにすることを目指す設計とした。

今回の Euro4 規制向けには，従前 4JJ1 エンジン用と同じく DOC（ディーゼル酸化触媒：Diesel Oxidation Catalyst）を採用するシステムとした（**図 14**）。

排出ガス後処理コンバータはターボ直下の近接位置に搭載をしている。コンバータとターボとの締結には V-band を採用することで，従前用コンバータのフランジ締結構造よりも近接位置に触媒を配置することができ，熱容量低減の観点からも触媒昇温には有利となり，また整備性の向上もできた。コンバータ形状は CAE 解析を用いて排出ガス流路形状の最適化を行ったことにより，圧損の低減と触媒全体へより均一な排出ガス導入が行え，触媒の有効利用（浄化効率改善）が図れた。

更に DOC の触媒コートには浄化性能／耐久性能を向上させた最新コートを採用することで，従前 4JJ1 用 DOC 比で触媒容量／貴金属使用量を低減させつつ，排出ガス規制法規を達成することができた。

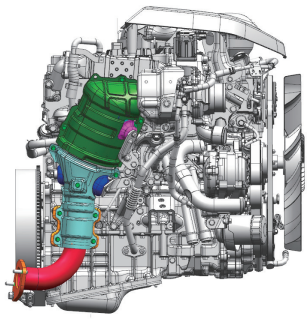


図 14　Euro4 向け排出ガス後処理システム

6　おわりに

D-MAX に搭載以降ご好評をいただき世界各地で市場実績をつんできた 4JJ1 エンジンを改良し，動力性能，環境性能，燃費性能，そして近年求められている静粛性／音質を両立させたエンジンとして 4JJ3 エンジンを仕上げ，新型 D-MAX に搭載することができた。

しかしながら今後とも，お客様のご要望に応えるべく，更なる改良に努める所存である。

最後に本エンジン開発にあたり，多大なるご支援をいただきました社内外関係者各位に対し，この場を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

(1) 渡邉秀次ほか；いすゞ新型 D-MAX 搭載 4JK1/4JJ1-TC 型ディーゼルエンジンについて，いすゞ技報 No124（2012），p.49-55
(2) 市川一尋ほか；小型商用車用ダウンサイジングディーゼルエンジン開発，いすゞ技報 No128（2016），p.174-179
(3) 齋藤晴輝ほか：音質メトリックスマッピングによるディーゼルエンジン音の改善の試み，自動車技術会論文集，Vol.43，No.6（2012），p.1313-1319

著　者

齋藤　昂

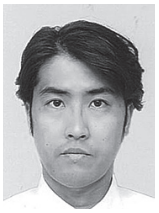
三輪　純一

平野　秀一

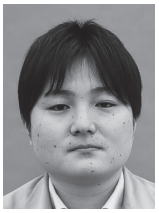
上野　徹

古橋　匡規

梶山　昌宏


五百住　学

金巻　政治


松原　淳

Sankaraiah Velamuru

Patrick Lüben

新型 ISUZU D-MAX の駆動系について

Drivetrain Components for New ISUZU D-MAX

渡邉　哲也*
Tetsuya Watanabe
田口　剛次*
Gouji Taguchi
篠崎　孝之*
Takayuki Shinozaki
西村　伸之*
Nobuyuki Nishimura
野原　和彦*
Kazuhiko Nohara
村上　明宏*
Akihiro Murakami
青山　勝昭*
Katsuaki Aoyama
石塚　裕也*
Yuuya Ishizuka
高橋　秀夫*
Hideo Takahashi
川村　高英*
Takahide Kawamura
中村　英寛*
Yoshihiro Nakamura
笹川　健太*
Kenta Sasagawa
江原　秀和*
Hidekazu Ehara
岡田　正雄*
Masao Okada

要　旨

新型 ISUZU D-MAX に搭載される駆動系装置（トランスミッション，トランスファ，クラッチ，プロペラシャフト，ファイナルギヤ）の開発項目について，概要を紹介する。

Abstract

About the drivetrain (transmission, clutch, transfer, propeller shaft, final gear) installed in new ISUZU D-MAX, this paper introduces outline of technical items.

1　はじめに

新型 ISUZU D-MAX（以下,「新型 D-MAX」と略す）の駆動系は，これまでの信頼性のある装置を継承しつつ，更なる商品力アップをお客様に届けるべく，3 つのコンセプトを基に開発を行った。

① 操作性クラストップレベル
② 静粛性クラストップレベル
③ 従前車の市場品質課題の一掃

出力アップに対応するべく各装置随所に強化を施しているが，同時に燃費改善アイテム及び軽量化アイテムを多数採用し，信頼性の確保だけでなく，環境性能改善との両立を行った。

また，発進装置の減衰特性に改良を加え，これまで以上に静粛性の磨き上げを行った。

更に，変速・切換えの時間短縮，シフト誤操作防止，操作フィーリング改善，発進性及び悪路走破性の向上など，お客様の使い勝手と安心感といった感性に訴えるアイテムを各装置積極的に採用し，駆動系の存在感を示すとともに，商品力アップに貢献した。

以下にその詳細を紹介する。

2　クラッチシステム

2.1 開発の狙い

クラッチ本体としては，トランスミッション歯打ち音の更なる低減と 450 Nm を発生する新型 4JJ3 エンジンに対する強度の確保を，またコントロール系としては軽量化と発進性能の向上を狙いとし，開発を行った。

2.2 クラッチディスク

新型 D-MAX のクラッチは，16MY で採用したクラッチディスク，カバーをベースに，次の 3 項目の改良を加えたものである。

① 低負荷領域ねじり角度の拡大

16MY D-MAX 用クラッチディスクは，従前となる 12MY 用に比べねじり角度を拡大し，主に緩加速及び登坂時のトランスミッション歯打ち音の低減を狙ったものであった。

新型 D-MAX では，それをベースにダンパを大型化することで，特に負側の低負荷領域ねじり角度を拡大した。これにより渋滞路など，低速走行中の加減速におけるトランスミッション歯打ち音を抑制し，車内音の低減に貢献した（**図 1**, **図 2**）。

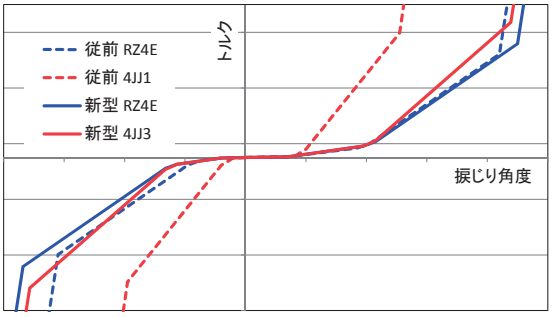


図 1　クラッチディスクねじり特性

*駆動商品企画・設計部

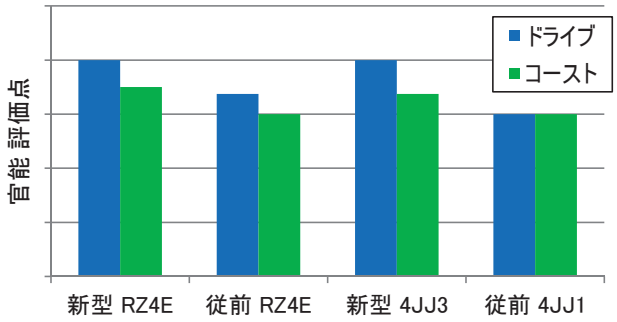


図 2　低負荷走行 T/M 歯打ち音（車内）評価結果

② 高耐熱フェーシングの採用

図 1 に示したねじり特性の実現にあたり，新規に開発した高耐熱フェーシングを採用した。つまり，ダンパの大型化によるフェーシング摩擦面積減少を補うためである。フェーシングを大径化することは不可能であった。摩擦面積は従前品に比べておよそ 10 % 減っているが，耐久試験における摩耗量は従前品の 70 % 程度であり，同等以上の耐摩耗性を有している。

③ 4JJ3　クラッチペダル操作力

トルク倍率を確保するためクラッチカバーのセット荷重を増やすが，クラッチペダルの操作力は基準に収める必要がある。クラッチカバーのレリーズ荷重特性を調整し，トルク倍率と操作力の両立を達成した。

2.3 クラッチマスターシリンダ

シリンダボディの材質をこれまでのアルミダイキャストから，D-MAX としては初めて，ナイロン樹脂に変更した。これにより従前比 30 % の軽量化を達成した。また，4JJ3 エンジン用には，同じく D-MAX としては初となるストロークセンサを採用した。従来はクラッチペダル上に取付けられたスイッチにより特定のペダルストロークでエンジン制御の切り替えを行っていた。新型 D-MAX ではこのストロークセンサを利用することでクラッチの係合度合いに応じたリニアなエンジン制御が可能となり，発進性能の向上を実現した（**図 3**）。

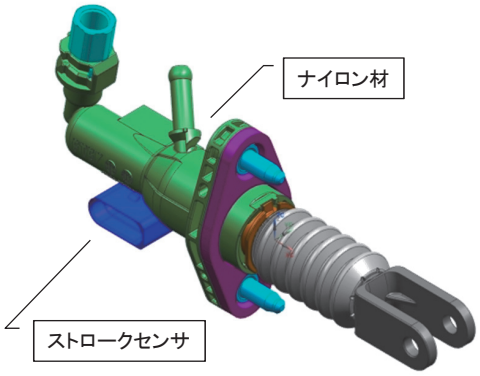


図 3　クラッチマスターシリンダ

2.4 オリフィスバルブ及び周辺配管類

ペダル横放しのようなドライバが意図しない急なペダル作動時にクラッチの係合を遅らせ，駆動系をショック入力から保護するため，オリフィスバルブを採用している。新型 D-MAX では，ボディ材質をナイロン樹脂に変更し 90 % 以上の軽量化を達成した。また，大幅な原価低減も可能となった。更にオリフィスの軽量化に伴い，それを固定するブラケットの小型化も可能となり，また周辺配管部品の接続方法の見直しを行ったことと併せ，車両全体の軽量化にも貢献している。従来のオリフィスの構造はいわゆるクローズタイプであり常時オリフィスが機能する。このため通常のクラッチ操作においてもペダルの戻りが遅くなるという副次作用があった。新型 D-MAX のオリフィスはオープンタイプであり，急なペダル操作時のみ機能する。これにより操作フィーリングとショック入力の両立を達成した。

3　マニュアルトランスミッション

3.1 開発の狙い

16MY に新規投入した MVL マニュアルトランスミッション（以下,「M/T」と称す）をベースに，エンジントルクアップへの対応と，操作フィーリングの更なる改善を行った。

3.2 トルクアップ対応

フルモデルチェンジに伴って出力アップするエンジンに適応するため，M/T（**図 4, 表 1**）の強化を行った。

軸径アップ及び歯車諸元の見直しとともに，歯面ピッチングがネックとなっていた歯車に対し，歯面の初期なじみ効果と油膜保持効果を狙ったリン酸マンガン処理を追加した。皮膜条件選定のため複数仕様の実機トライを行い，耐ピッチング性に優れる条件を採用した（**図 5**）。

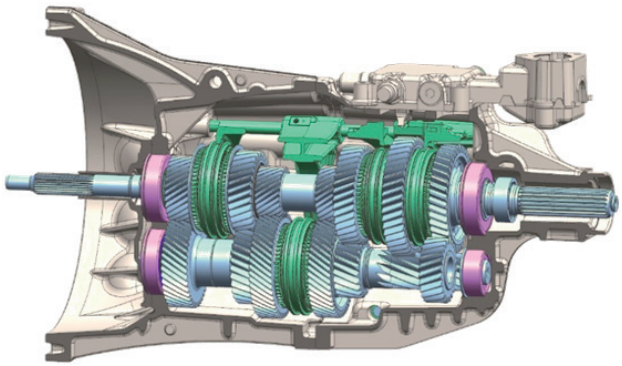


図 4　MVL マニュアルトランスミッション

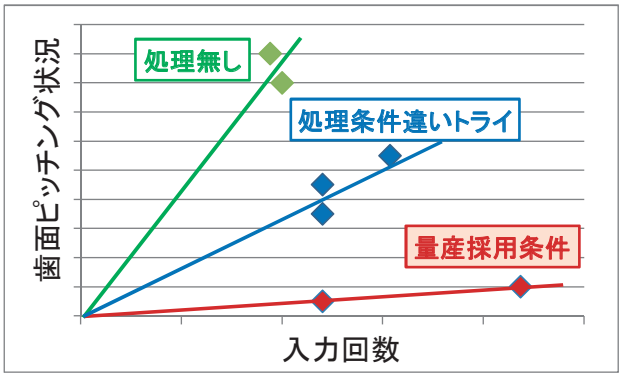


図 5　処理条件と寿命向上効果

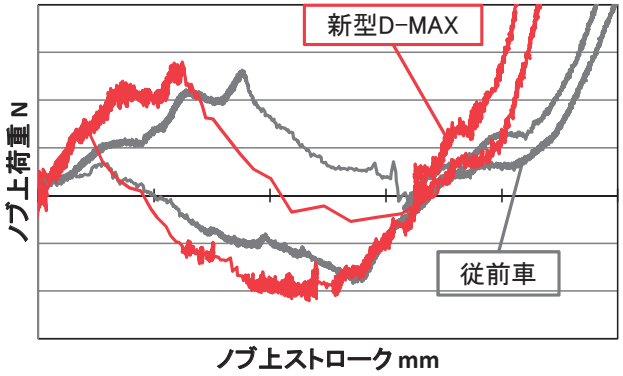


図 6　シフト特性

表 1　主要諸元

		MVL6Y	MVL6S
許容入力トルク [Nm]		400	450
軸間距離 [mm]		86	
ギア段数		6	
ギア比	1st	4.942	
	2nd	2.686	2.452
	3rd	1.527	1.428
	4th	1.000	
	5th	0.749	
	6th	0.634	
	Rev.	4.597	
オーバーオールレシオ		7.79	
重量(WET) [kg]		56	59

3.3　コントロール系

M/T 車での操作フィーリングは燃費･動力性能と同様に重要な要素である。今回の新型 D-MAX では操作フィーリング向上を目的にコントロール系部品について，次の 4 項目の仕様変更を行った。

① シフト特性
② セレクト特性
③ プルリング式チェンジレバーの採用
④ チェンジレバー剛性向上

このほかにも非対称ドク歯採用による 2 段入りの改善を行っており，従前に対して操作フィーリングが大幅に向上できた。

3.3.1　シフト特性

M/T 内部のディテント構造を変更し，乗り越し荷重位置をニュートラル側に移動させ，また吸い込み荷重を上げた（**図 6**）。これによってニュートラルポジション及びシフトポジションが明確となった。

3.3.2　セレクト特性

シフト特性と同じく M/T 内部のディテント構造を変更し，ニュートラルからの荷重の立ち上がりを向上させた（**図 7**）。これによりニュートラルポジションが明確となった。

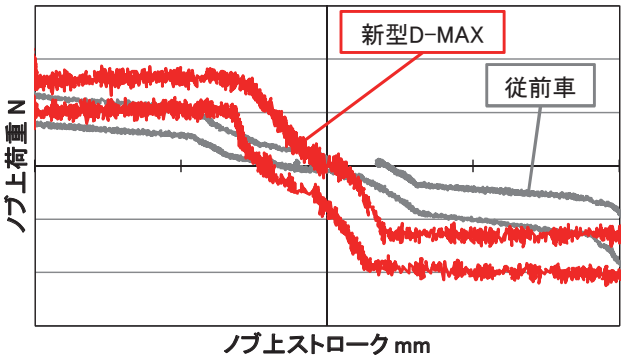


図 7　セレクト特性

3.3.3　プルリング式チェンジレバーの採用

新型 D-MAX では M/T 用チェンジレバーのリバース誤操作防止機構としてプルリング式を採用した。従前はリバースセレクトの際に大きなバネ反力を発生させることで誤操作を防止する構造となっている。しかし，この構造では，ドライバの感じ方によって操作力の大小がさまざまで，操作フィーリングとの両立が難しい。これに対して，プルリング式は機械的なロック機構を設けてあるため（**図 8**），操作力を小さくでき，また確実に誤操作防止できるので操作フィーリングとの両立が可能となった。

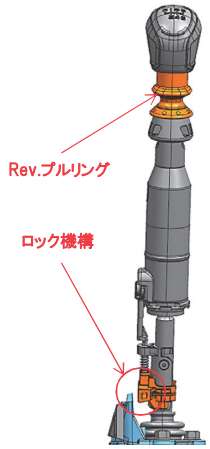


図 8　プルリング式チェンジレバー

3.3.4　チェンジレバー剛性向上

従前に対して，ダンパ特性及び軸径アップなどの変更を行い，チェンジレバー剛性を低荷重側では低剛性にし，高荷重側では高剛性とすることを狙った（**図 9**）。

これにより，チェンジレバーへの振動入力に対する減衰効果を維持しながらもシフト操作時には高い剛性になる構造とした。

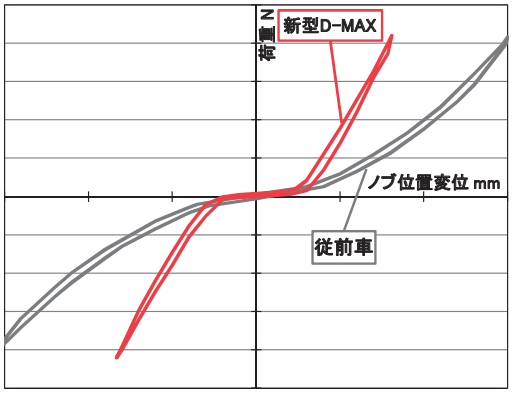


図 9　チェンジレバー剛性比較

3.4　グロメット

従前の M/T 用グロメットではアッパーとロアの各グロメットがチェンジレバーに装着される構造になっている。新型 D-MAX では，アッパーのみチェンジレバーに装着する構造とし，同時に蛇腹形状を最適化したことでドライバの手元に伝わるグロメット反力の大きさが最小限となり，操作フィーリング向上へつなげた。もう一方のロアを M/T 本体側へ装着することで新設のプルリング式ロック機構を室内に置き，水掛かり，ほこり及び異物の噛み込みを防ぐ構造とした（**図 10**）。

これにより，グロメットは従来からの 2 重構造を継続しつつ，操作フィーリングと静粛性，プルリング機構への防水性･防塵性を成立させた。

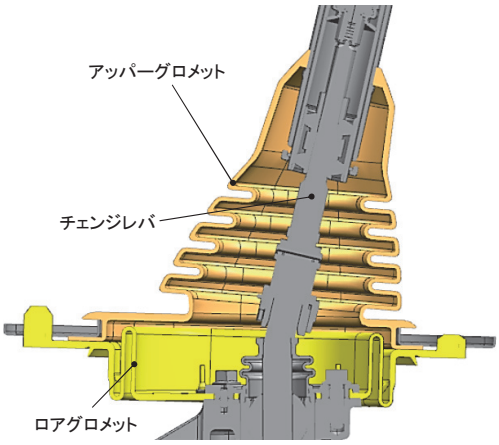


図 10　グロメット

4　オートマチックトランスミッション

4.1　開発の狙い

従前 16MY で新規採用したアイシン･エィ･ダブリュ製 6 速オートマチックトランスミッション（以下「6A/T」と称す）を継続採用しつつ，次の 3 項目に対して開発を行い，商品力向上を図った。

① RZ4E 用ロックアップダンパ広角化(減衰性能向上)
② 4JJ3 変速時間短縮（変速品質向上）
③ ATF ウォーマ･クーラ採用（燃費向上）

4.2　6A/T 仕様

表 2　6A/T 仕様一覧

6A/T(AWR6B45)		
許容入力トルク[Nm]		450
ギヤ比	1st	3.600
	2nd	2.090
	3rd	1.488
	4th	1.000
	5th	0.687
	6th	0.580
	Rev	3.732
オーバーオールレシオ		6.21
重量 [kg]		83

4.3　ロックアップダンパ減衰性能向上

RZ4E 用トルクコンバータについては，従前車に対し約 45 % 広角となる低剛性タイプのロックアップダンパを新規採用した（**図 11**）。減衰性能が向上したことにより，従前車ではこもり音等が発生してしまう領域でもロックアップが可能になり，燃費向上を達成した。

また，この変更に合わせてトルクコンバータ本体も小型・軽量化仕様に変更することで，約 3.6 kg の軽量化を達成した。

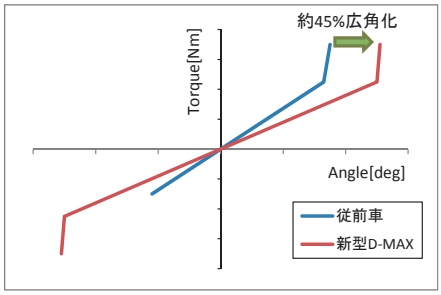


図 11　ロックアップダンパ特性比較

4.4 変速時間短縮

4JJ3 においては，エンジンとのトルク協調制御を見直し，変速時における A/T 側から要求するトルク制限量を更に増やした。そして，従前車同等のシフトショックレベルを維持しつつ，変速に必要な時間を大幅に低減させた（図 12）。

これによりキビキビとした変速感を達成した。

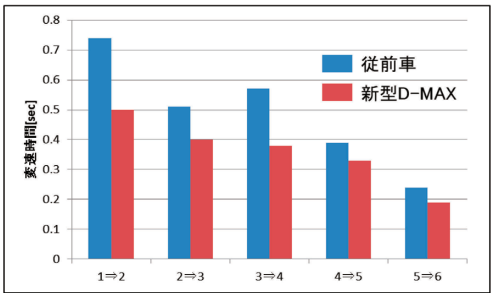


図 12　変速時間比較（アクセル開度 40 %）

4.5 ATF ウォーマ・クーラ採用

従前車ではラジエータ内部に配置していた ATF クーラをエンジン冷却回路に組み込むことで，冷却だけでなく ATF の早期昇温を可能にする ATF ウォーマ・クーラを新規採用した。ATF 早期昇温によるフリクション低減効果により燃費向上を達成した。

また，ATF 早期昇温の効果を最大限利用するために，配管を新規で設計し，ATF ウォーマ・クーラは 6A/T 近傍に設置した（図 13）。

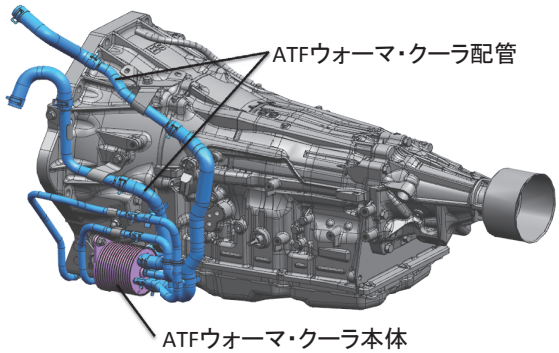


図 13　ATF ウォーマ・クーラ配管

5　トランスファ

5.1 開発の狙い

4 輪駆動車のトランスファ（以下「T/F」と称す）は，従前車において実績のある T150 T/F をベースに，次の 3 項目の開発を行った。

① トルクアップ対応
② T/F アクチュエータ新規開発
③ コントローラ新規開発

5.2 システム構成

4 輪駆動の切り替えシステムは，T/F（T/F アクチュエータ含む），フロントアクスルの接続切り替えを行うアクスルモータ，それらをコントロールする TCCM (Transfer Case Control Module) で構成される（図 14）。

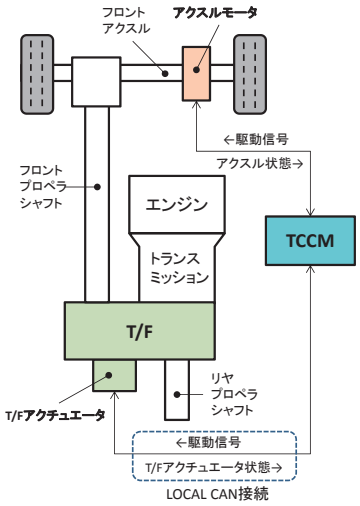


図 14　システム構成図

5.3 トルクアップ対応

新 T/F では，リヤアウトプット軸の径を太くすることによりエンジンのトルクアップに必要な強度を確保した。変更した軸は T/M で実績のある径とし，周辺部位の構成も踏襲することで，T/F 構成部品の変更を最小限に抑え，信頼性の確保と投資抑制を行った（図 15）。

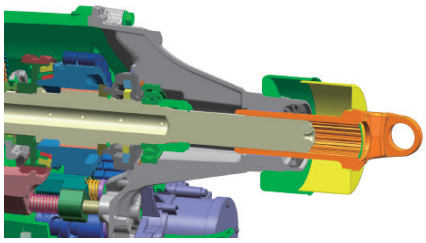


図 15　リヤアウトプット

5.4 T/F アクチュエータ

① 切り替え時間短縮

高効率のブラシレスモータの採用及び，T/F アクチュエータ内部の減速機構の見直しにより，従前同等のサイズ・重量を維持したまま，T/F 切り替え時間の短縮を実現することで，ユーザビリティの向上を図った。

② ロバスト性向上

T/F アクチュエータの出力角度検出に非接触式の磁気角度センサを新たに採用した。また，モータについても，機械的接点のないブラシレスモータを新たに採用し，接点の摩耗及び損傷に対するロバスト性の向上を図った。

③ フェイルセーフ機能の追加

T/F アクチュエータに自己故障診断を追加することで，故障内容に応じた適切なフェイルセーフが可能となり，万一の故障時のドライバの安全性を確保した。また，故障内容の明確化により整備性の向上も図った。

5.5 コントローラ

① 市場リプログラミング対応

サービスツールとの通信方式を UDS（Unified Diagnostic Services[1]）仕様に改め，いすゞ固有のセキュリティーアルゴリズムを使用した市場リプログラミングに対応した。いすゞサービスツールである IDSS（ISUZU Diagnostic Service System）を使用することより，ソフトの更新が必要になった場合 ECU（Electronic Control Unit）を交換することなく更新が可能となった。

注 [1] ISO 14229-1 で定められた車載 ECU 用の診断通信プロトコル。

② 機能安全対応

TCCM は車両の機能安全規格である ISO26262 に準拠して開発した。

従前車のハザード分析を行った結果，機能不全が発生した時の最大 ASIL（自動車用安全度水準：Automotive Safety Integrity Levels）が B と判定されたことを受け，機能安全要求を導出し，その実現のために規格に準拠したプロセスに沿い開発を行った。

最終プロセスにおいて機能安全アセスメントを実施し機能不全に対する安全担保を確実にした。

6 プロペラシャフト

6.1 開発の狙い

高出力エンジン対応及びトーイング市場での耐久性・ロバスト性向上を図るべく，新サイズのリヤプロペラシャフトを設定した。また 4 輪駆動車についてはアルミ材を適用することで軽量化を図った（**図 16**）。

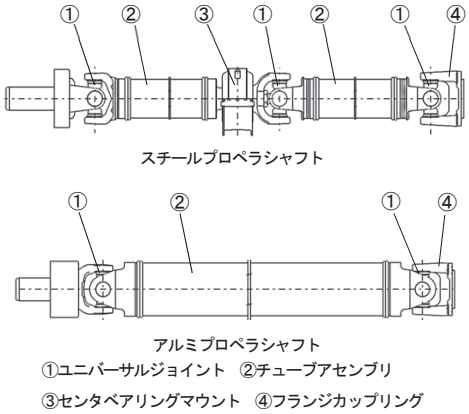


図 16 リヤプロペラシャフト

6.2 スチールプロペラシャフト

従前に対しチューブサイズのアップ及び各部の強化を行い強度･耐久性を向上させたプロペラシャフトを開発した。

6.2.1 ユニバーサルジョイント

ニードルベアリングに樹脂製のスラストワッシャを採用しプレロードをかけてガタをなくした。これによりベアリングの大幅な耐久性向上を行うことができ，トルクアップしたエンジンに対してジョイント部分のサイズアップ･重量増加を防ぐことができた。

また最も回転半径が大きいジョイント部分のサイズを維持できたことで車両レイアウトへの影響を抑えた。

6.2.2 センタベアリングマウント

走行中のアクスル動き量が大きいオーバースラングサスの車両に対し，センタベアリングを支えるマウントラバーの構造を変更してばね特性を 2 段階にすることで NV 性能を維持したままプロペラシャフトの動きを制限する機能を強化した（**図 17**）。

通常走行時は柔らかいばね特性でプロペラシャフトの振動を吸収する一方，急発進時及び段差乗り越えなどでアクスルが大きく動く時には硬いばね特性でプロペラシャフトの動きを制限して部品干渉を防ぐ構造とした。

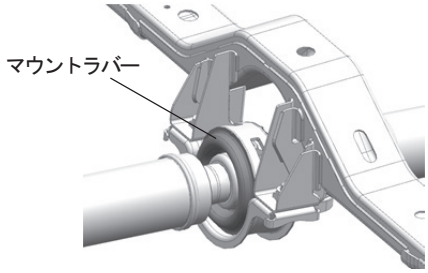


図 17　センタベアリングマウント

6.2.3　フランジカップリング

ボルト締結の PCD（Pitch Circle Diameter）及びボルトサイズをアップし，許容伝達トルクを向上させるとともに 6.3 節のアルミプロペラシャフトのチューブ径拡大に対して車両組み付け時の作業性を確保した。

6.3　アルミプロペラシャフト

プロペラレイアウト上，危険回転数に余裕のある 4 輪駆動車に対しては前述のスチールプロペラシャフトのチューブ材をアルミとし，2 ジョイント化を図ることで重量を低減した。

6.3.1　アルミチューブ

チューブアセンブリを A6000 系のアルミ材にすることで軽量化を図った。

材料置換による純粋な軽量化効果に加え，チューブ径を約 40 % 拡大することで強度を確保しつつ肉厚を低減して軽量化を行った。更にアルミ化とチューブ径拡大の効果として危険回転数を向上させることができたため，中央のジョイント及びセンタベアリング周辺部品を削減することが可能となり，全体として約 5 kg の軽量化を実現した。

また耐食性の高い A6000 系を採用したことで防錆が不要となり，チューブ部分の塗装を廃止することが可能となった。

6.3.2　ペーパダンパ

アルミチューブ採用にあたり，チューブ径拡大とセンタベアリング廃止によってチューブの表面積が大きく増加した。これによる放射音を抑制するため，チューブ内に挿入されているペーパダンパを見直して制振性を向上させた。

7　ファイナル

7.1　開発の狙い

新規 4JJ3 エンジンの採用に伴い，リヤファイナルの強度・耐久性の更なる向上を狙い大幅な変更を行った（図 18）。

また，新型 D-MAX のコンセプトであるタフさを実現するため 4 輪駆動車にデフロックを採用し，従前車両に対し悪路走破性を大きく向上させた。

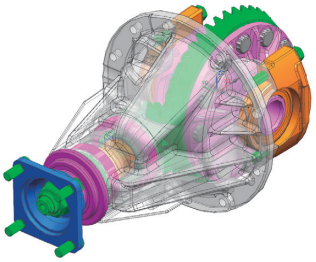


図 18　リヤファイナルドライブ

7.2　リヤファイナル

7.2.1　リヤファイナル強化

昨今のエンジンのダウンサイジング及びトランスミッションの多段化などによりファイナルへの入力が増加しているなかで，ファイナルとして更なる強度・耐久性と信頼性の向上が求められている。

また，フリクション低減による効率化は車両としての CO_2 排出量削減のための重要な課題である。

これらの要求と課題をクリアするために開発から 30 年以上が経過した従前のリヤファイナルを大幅に見直した（表 3）。

主な変更点であるピニオン軸周りの強化により高速レシオの最弱部位をアウトプット側とすることで静破壊強度が大きく向上した。

また，ピニオン軸の変更とキャリアの形状見直しによりファイナルギヤの高い支持剛性を図り，ギヤの寿命向上と効率化を実現した。

表 3　主要変更項目と目的

		強度 耐久性	効率 向上	信頼性 向上
ファイナル ピニオン	軸径UP	○	○	○
	軸長短縮			○
	スプライン サイズUP	○		○
ファイナル ギヤ	バックコーン 形状変更	○		○
	FIXネジ サイズ変更			○
コラプシブルスペーサ サイズUP				○
ピニオンベアリング サイズUP ＆ 急こう配化		○	○	○
キャリア 形状見直し		○	○	○
リングギアボルト サイズUP				○
オイルシール サイズUP ＆形状見直し				○
フランジカップリング PCD拡大 ＆ ボルトサイズUP				○

7.2.2　デフロック

既存の多板式 LSD（Limited Slip Differential）ではフリクションが燃費に影響を与えることから採用が困難となってきた。

16MY D-MAX からブレーキ制御により LSD 効果を得られるデバイスを CO_2 基準の厳しい国向けに採用している。

しかし，タイムラグ及びブレーキ発熱による駆動力と使用時間の制限があり，使用環境によっては駆動力が不足する場面があった。

これに対してデフロックは，瞬時に最大限の駆動力が発揮でき，悪路での脱出性・走行安定性が大幅に向上した（**図 19**）。

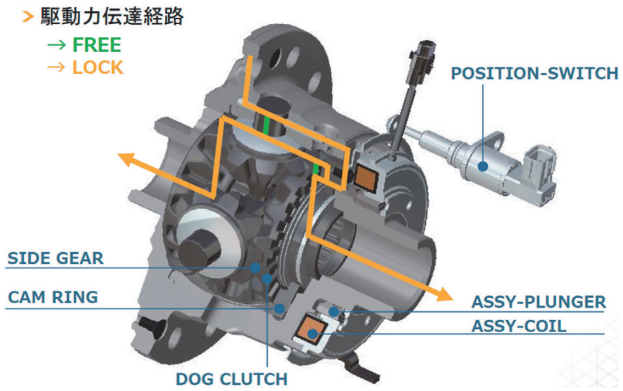


図 19　デフロック構造図

ロック機構はソレノイドにより作動し専用のコントローラにより制御している（**表 4**）。

機能性安全の観点から，ロック状況を検知するためのポジションスイッチを採用した。

表 4　DIFF LOCK 作動条件

	4X4
動作モード	4Lのみ
ON可能車速	8Km/ｈ以下
OFF車速	30Km/ｈ以上
ABS&ECS	D/LOCK ONで解除

8　おわりに

今回の駆動系装置開発において，これまでお客様から得て来た信頼を維持しつつ，フルモデルチェンジにふさわしい商品力アップに貢献出来たと自負している。

お客様の声を聞くことが楽しみであると伴に，更なる優れた商品の開発に向けて努力を継続する所存である。

最後に，これまでの開発にあたり多大なるご協力をいただいた社内外の関係各位に，本誌を借りて深く感謝の意を表する次第である。

著　　者

渡邉　哲也

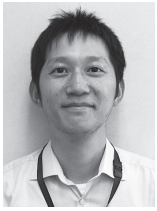
田口　剛次

篠崎　孝之

西村　伸之

野原　和彦

村上　明宏


青山　勝昭

石塚　裕也

高橋　秀夫

川村　高英

中村　英寛

笹川　健太

江原　秀和

岡田　正雄

新型 ISUZU D-MAX の CAE について

CAE for New ISUZU D-MAX

松田　康*　Yasushi Matsuda
花岡　雄二*　Yuuji Hanaoka
小田　明*　Akira Oda
程原　雅之*　Masayuki Hodohara
上野　大輔*　Daisuke Ueno
菊地　正信*　Masanobu Kikuchi
寺脇　一裕*　Kazuhiro Terawaki
石原　聡継*　Toshitsugu Ishihara
Kittipong Likhitmaskul**
Wasu Songmuang**
Rungrattana Sowjaroensuk**

要　旨

新型 D-MAX は，世界戦略車として各国で求められる環境性能，安全性能に適合させ，次世代ピックアップトラックとしてデザインを一新した。その新車デザインは，デジタル開発手法を駆使し，タイと日本の開発拠点で共同開発された。CAE も両開発拠点がタイアップし，コンピュータによるバーチャル評価により車両品質の向上に努めた。本報では，新型 D-MAX の開発に適用された CAE 技術の一部を紹介する。

Abstract

ISUZU New D-MAX has been fully design renewed as worldwide strategic pick-up truck in accordance with environmental and safety requirements in the market. The new design was developed with digital technology in associate with ISUZU R&D center in Thailand and Japan. CAE also has strong tie and improved the quality of D-MAX by means of virtually computed evaluation for the vehicle performance. Some of advanced CAE technologies applied to ISUZU New D-MAX development are presented in this paper.

1　はじめに

CAE（Computer Aided Engineering）を用いたデジタル開発は，実機を製作し評価する前に，コンピュータシミュレーションを実施し，性能の事前検討と車両の改良を行い，高い品質，開発期間の短縮，費用削減を実現するものである。

今回，新型 D-MAX を開発するにあたっては，タイと日本が共同で CAE を実施した。両者間で共通の三次元 CAD データをベースに，CAE に必要な情報はコラボレーションツールによって共有化され，CAE 技術は手順書化されて開発が進められた。

新型 D-MAX では，約 300 項目に及ぶ性能について CAE が行われ，市場のさまざまな要求に答えられる高い品質と商品性のあるピックアップトラックを開発することができた。

2　空力 CAE

新型 D-MAX の開発では，環境負荷を少なくする（燃費向上・CO_2 排出量の改善）ために CdA（Cd：空気抵抗係数× A：車両の前面投影面積＝車両走行時の空気抵抗）の低減が重要課題の一つとなった。

新型 D-MAX には，広範なモデルラインナップがあり，開発早期から，CdA の低減のために，空力 CAE によりさまざまな車型・エクステリア形状をはじめさまざまな部位の検討・評価を実施した（**図 1**）。

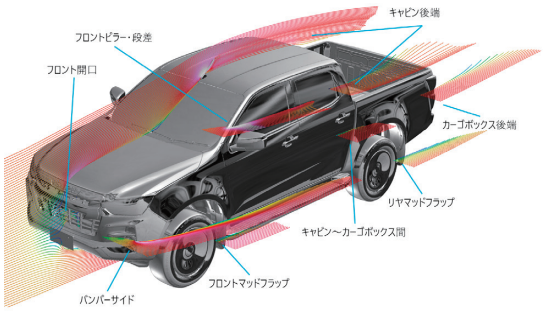


図 1　エクステリア周りの空力 CAE の検討部位例

* CAE デジタル開発推進部　　**いすゞテクニカルセンターオブアジア㈱

空力 CAE での検討時には，車両の注目部位の形状をパラメータ化しモーフィング（ある形状から別のイメージへ滑らかに変化させる技術）による CAE モデルの形状変更，更に，最適化解析の適用による空力 CAE の効率アップを試みた。例えば，ピックアップトラックは荷台を持った構造のため，Cd の改良のためにはキャビン後端からの流れをうまく制御することが重要であるが，キャビン後端形状についてもモーフィングを活用し検討した（**図 2**）。

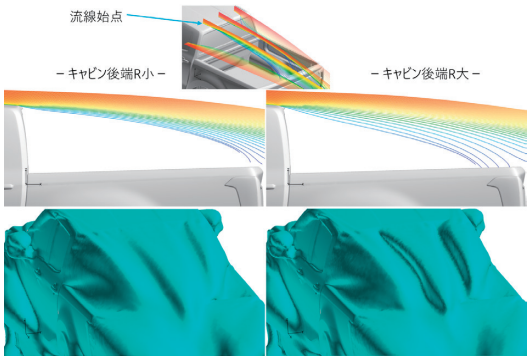


図 2　キャビン後端形状による流れ場の比較
（上段：流線，下段：総圧係数 0 等値面）

更に，エクステリア形状だけではなく，エンジンルームへの冷却風の取り込み開口形状・経路（前面開口～熱交換器間のエアガイド）の検討により CdA の改善と冷却性能の向上を実現した。また，床下の流れの改善（バンパ下・フロントタイヤ前のエアガイド，TM（Transmission）下アンダカバーなど，**図 3**）についても検討し，CdA の改善を図ることができた。

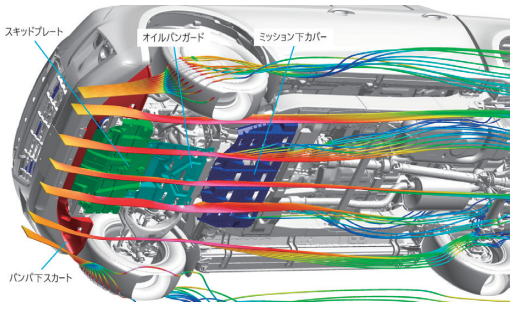


図 3　床下流れの空力 CAE の検討例

3　冷却･熱害 CAE

エンジンルーム内の熱環境は排出ガス規制の強化等により年々厳しい状況になっており，冷却･熱害評価の検討段階における重要度が上がってきている。

新型 D-MAX の初期段階では，1 次元解析ツールを用いてレイアウト・熱交換器サイズ検討を十分に行い，そのあとの 3 次元詳細検討に移行した。

3 次元詳細検討に移行したあとには空力性能の向上と同時に熱交換器の冷却性能を満たさなければ，駆動力の低下を招き，商品性が低下してしまうため，お互いに連携し合って解析を行った。

エンジンルーム内の熱の巻き返し防止を強化するため新設されたエアガイドがあらゆる走行条件において機能するため，解析において十分な効果が得られることを確認した。

燃費及び排出ガス規制などに影響を与える吸気温度に関しても，従前車より吸気口レイアウトが変更になるため十分な検討を行った（**図 4**）。

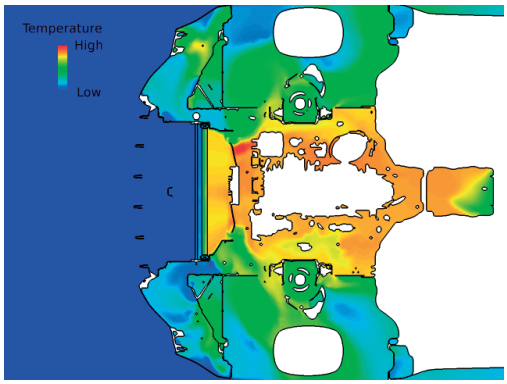


図 4　エンジンルーム内温度分布（登坂走行時）

4　冠水路 CAE

冠水路走行において，吸気口への水侵入におけるエンジン故障と各パーツの水撃における強度耐久性が重要である。新型 D-MAX では検討段階において冠水路解析を行い，これらの評価を行った（**図 5**）。

解析検討は試験同様に水深と侵入速度を変更し，さまざまな条件下で問題がないことを確認した。

吸気口レイアウトにおいては，水侵入が起こらないことを確認しながら，その他要件と調整し検討を行った。また，水撃が厳しいパーツにおいては衝撃解析ソフトと連成解析を行うことで強度耐久性を評価した。

これまでは試作車が完成後，試験を行うまで評価できない項目の一つであったが，新型 D-MAX では検討段階より評価が行え，手戻り削減につながった。

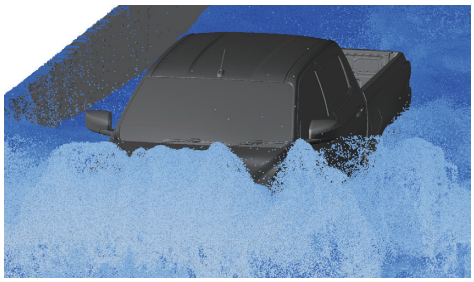


図 5　冠水路走行解析

5　衝突安全 CAE

Euro NCAP（ヨーロッパ新車アセスメントプログラム：European New Car Assessment Programme）に代表される車の安全性を評価する自動車アセスメントと法規制による自動車安全への要求は，欧米だけでなく新興国市場を含めた世界各地で年々高まっている。こうした要求に対し，さまざまなバリエーションを有するピックアップトラックを効率良く開発する上で，CAE は必要不可欠な手法であり，新型 D-MAX においても，CAE を活用して衝突安全性の高い商品開発を行ったので，その事例を紹介する。

5.1　前面衝突

衝突安全性能のポテンシャルが高い車両を開発するには，開発初期の企画段階で装置ごとに適切な目標特性を設定することが必要である。そこで，新型 D-MAX の開発では前面衝突性能を検討するに当たり，3 次元バネマスモデルを使用した CAE 手法を開発初期段階に導入した。3 次元バネマスモデルは，FEM（有限要素法：Finite Element Method）に比べ計算速度が圧倒的に早く，制約の少ない企画段階でのパラメータスタディには最適であり，この手法を導入したことで，形状を具現化する前段階の成立性の検証を効率良く行うことができた。

前面衝突に対応するフレーム構造を具現化する検討では，フレームの一部を切り出した部分モデルを使った FEM の非線形解析を用い，3 次元バネマスモデルで導き出した構造特性と，安定した軸圧潰モードを，フルラップ衝突・オフセット衝突どちらでも両立するロバスト性の高い構造を詳細に造り込んだ。このようなフロントローディングのプロセスを採用することで，後工程の負荷は大幅に軽減し，手戻りの少ない開発を行うことができた（**図 6**）。

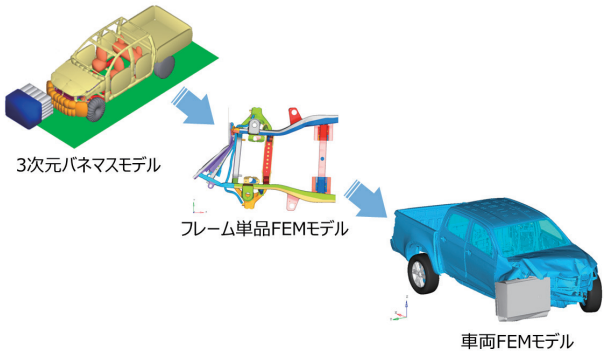


図 6　前面衝突

5.2　歩行者保護

歩行者頭部保護性能は，エンジンフード全域での頭部傷害値を評価するが，ピックアップトラックにはバリエーションとして車高違いも存在するため，評価箇所が仕様ごとに異なり，膨大な数の評価が必要となる。そこで，歩行者頭部保護 CAE では開発効率を向上するための自動化プロセスを適用し，車高違いにも対応するエンジンフードを新規開発した（**図 7**）。

歩行者脚部保護性能は，最新の脚部インパクタ（FLEX-PLI）による新試験法に対応するため，CAE を用いてバンパビームの構造最適化を行い，頭部保護同様に車高の違いにも対応し，試験条件が異なる歩行者腰部保護性能とも両立するバンパビームを新規開発した（**図 8**）。

図 7　歩行者頭部保護

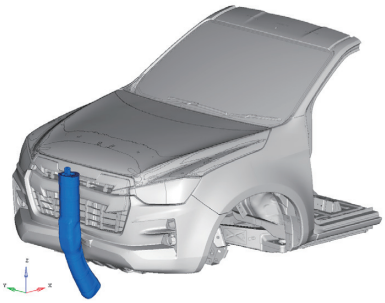


図 8　歩行者脚部保護

5.3　キャブ準静的強度

新型 D-MAX のクルーキャブでは，後席のショルダアンカを，3 座席すべてバックパネルに配置する新規構造を採用し，シートベルトアンカレッジ強度性能に対してバックパネルに高い強度が要求された。この問題に対し，開発初期の成立性の検証から CAE を活用した造り込みを行い，要求性能を満たす新構造のバックパネルを開発した。また，スポット溶接の破断を従来よりも高精度で予測可能な手法を適用したことで，構造上の問題点を早期解決し，開発効率向上につながった（**図 9**）。

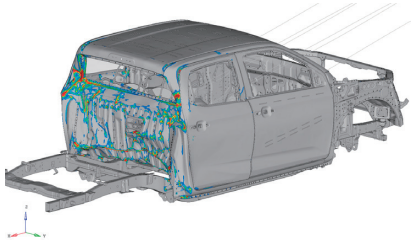


図 9　シートベルトアンカレッジ強度

ルーフ強度性能では従前車以上の高い強度が要求され，今回の新型 D-MAX の開発では，主要骨格部に高強度のリンフォースメント類を効率良く配置する検討を，CAE を用いて行った。その結果，ルーフ強度は従前車に対し約 2 倍の抗力となり，車両横転時の安全性が大幅に向上したキャブを新規開発することができた（**図 10**）。

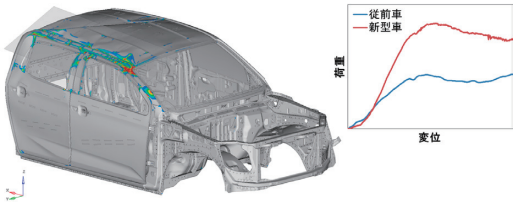


図 10　ルーフ強度

6　操縦安定性 CAE

新型 D-MAX でハイライド仕様新サスペンションの設定により，ナックル形状とサスリンクブッシュの特性は新規設計する必要がある。そこで，Adams/Isuzu（機構解析ソフト Adams を独自にカスタマイズした Isuzu 車専用ツール）のサスペンション基礎特性解析を用いて，特性目標を達成するためにナックル剛性とブッシュ特性の基礎特性への寄与度を解析し，最適な組み合わせを導き出した。

6.1　最適化の目標

横剛性（両輪逆相入力），前後剛性（両輪接地点入力からホイールセンタ入力へ換算），横力コンプライアンスステア（両輪同相入力），アライニングトルクステア（右輪入力時の右輪ステア角）といった操縦安定性と乗り心地に緊密なつながりのある 4 つの特性とした。

6.2　寄与度解析

6.2.1　モデル

解析モデルはハイライド仕様フロントサスペンションとフレームの一部から構成されており，そのうちのナックル，フレームは弾性体とした。実車試験の固定用治具の剛性はバネ要素で模擬。このモデルをベンチ試験用可動テーブル上に置き，基礎特性の解析を行った（**図 11**）。

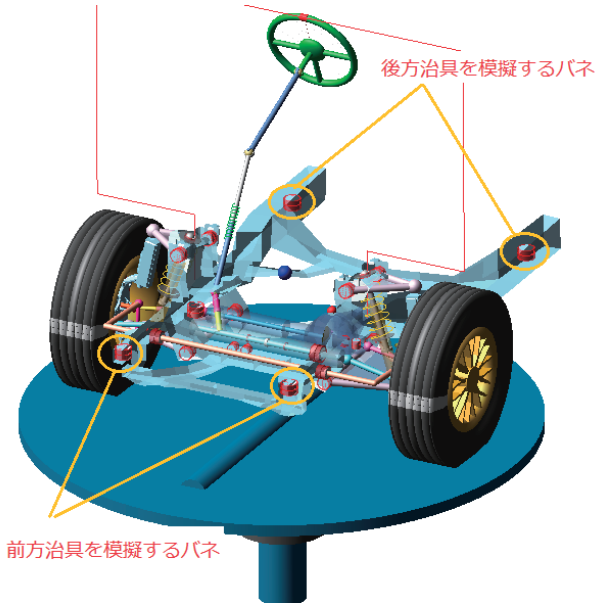


図 11　解析モデル

6.2.2　解析

次の 3 項目のサスペンション基礎特性を実施した。

① 横力剛性試験：両輪の接地点に逆相入力し，横剛性，横力コンプライアンスステアを求める。
② 前後力剛性試験：両輪の接地点に前後方向に入力し，前後剛性を求める。
③ アライニングトルク剛性試験：右輪接地点の通る垂直軸まわりに回転トルクを入れ，右輪のステア角を求める。

6.2.3　設計変数

① アッパ・リンクブッシュのバネ特性
② ロア・リンクブッシュのバネ特性
③ ラックマウントブッシュのバネ特性
④ ナックル剛性

6.2.4　結果

各設計変数の最適化目標への寄与度は**図 12～15** に示す。

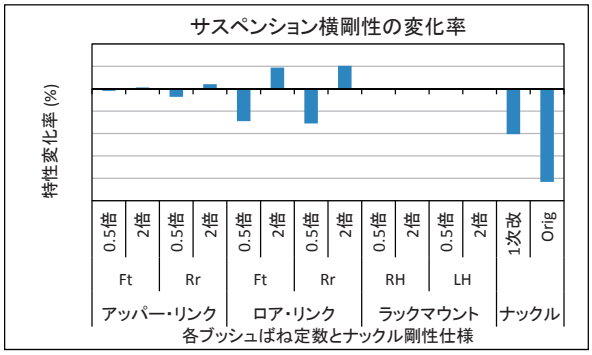


図 12　サスペンション横剛性の変化率 [1)]

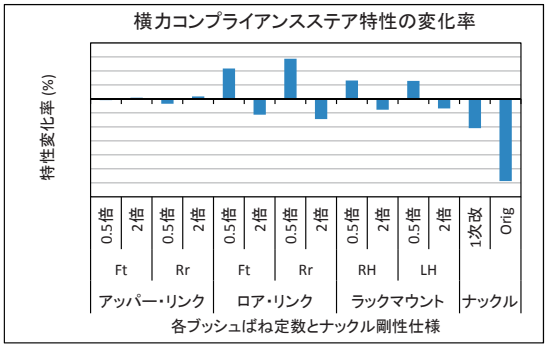


図 13　横力コンプライアンスステア特性の変化率

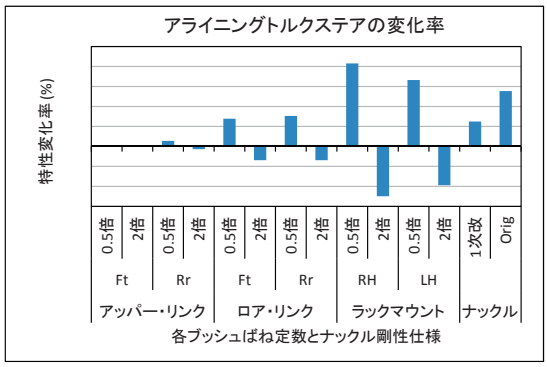


図 14　サスペンション前後剛性の変化率

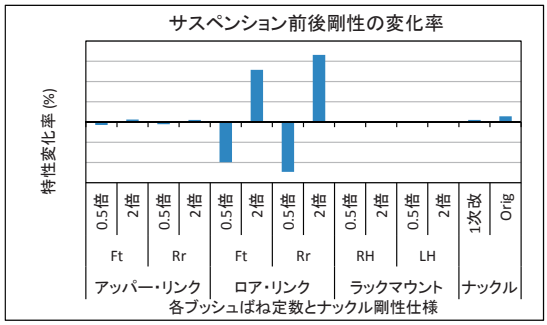


図 15　アライニングトルクステアの変化率

注 [1)] Ft:前方，Rr:後方，RH:右側，LH:左側

6.2.5 結論

① アッパブッシュ：寄与度が小さかった。

② ロアブッシュ：ばね定数を下げた条件では，横力コンプライアンスステアが増加傾向であり，逆に前後剛性は減少傾向であった。
一方，ばね定数を上げた条件では，横力コンプライアンスステアが減少傾向であり，逆に前後剛性は増加傾向であった。

③ ラックマウント：ばね定数下げた条件では，アライニングトルクステアと横力コンプライアンスステアが増加傾向であった。

④ ナックルの剛性：前後剛性以外，寄与度が高かった。

これらの 4 点を踏まえ，ブッシュ剛性とナックル剛性をバランスよく取った組み合わせを新型 D-MAX の新規ハイライド仕様の設計案とした。

7　耐久強度 CAE

7.1　悪路高速耐久

新型 D-MAX が走行する国々ではタフな走行耐久性能が要求される。CAE にて悪路路面を走行した際の時系列の入力を算出し，その入力を使用してキャブ，カーゴを加振し累積被害度から耐久寿命の予測までを行い，検討評価を行った。CAE の結果にて，耐久性能が低い箇所については構造の変更とスポット溶接の追加などの変更を行い，十分な耐久性能を試作組立前に確保した。

その結果，実車による悪路高速耐久試験において効果が確認され，耐久性の高いカーゴ，キャブを開発することができた（**図 16**）。

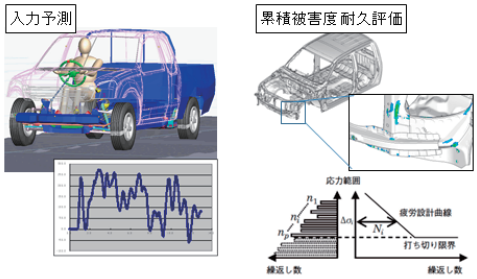


図 16　悪路高速耐久

7.2　エンジンフード開閉耐久

新型 D-MAX のエンジンフードは従前に対しデザイン面で大型化する一方，歩行者保護の面で剛性を下げる必要があり，開閉耐久性能とは相反する制約が課題であった。

中でも，特に閉方向オーバストローク干渉が懸念されたため，開閉耐久試験を CAE で再現し造り込みを行った。その結果，バッファーラバー位置，パネルの形状，溶接位置の検討を行い変位量と発生応力を基準以下に抑え，エンジンフードに要求される性能を両立することができた（**図 17**）。

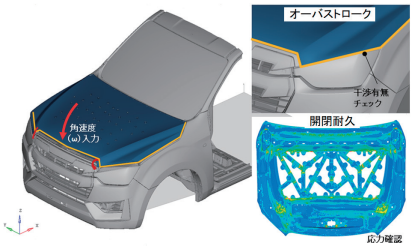


図 17　エンジンフード開閉耐久

7.3 エンドゲート開閉耐久

ピックアップトラックのカーゴ後部にあるエンドゲートはユーザの使い方・頻度を考慮した開閉耐久性能が求められている。従来の CAE では静的な入力条件であったため，新型 D-MAX では実験と同様の動的な入力条件に手法を見直し，精度の向上を図ったモデルで造り込みを行った（図 18）。

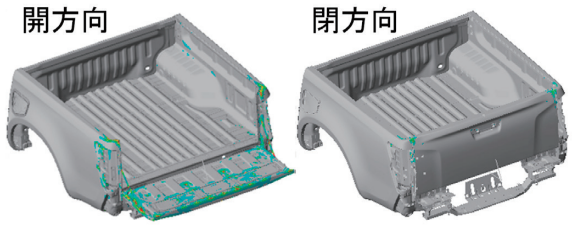


図 18　エンドゲート開閉耐久

7.4 排気系耐久強度

排気管についても各種条件での耐久強度の確認を行った。ラバーマウントによって吊るされた構造であることから振動による変形モードが，大きく応力に影響するため，CAE モデルの重量，マウントのバネ特性，減衰等の設定を細かく行った。急発進，悪路走行，アイドルレーシング条件の解析を行い，最適なマウント特性を選択することで，各走行条件での応力目標を満足することができた（図 19）。

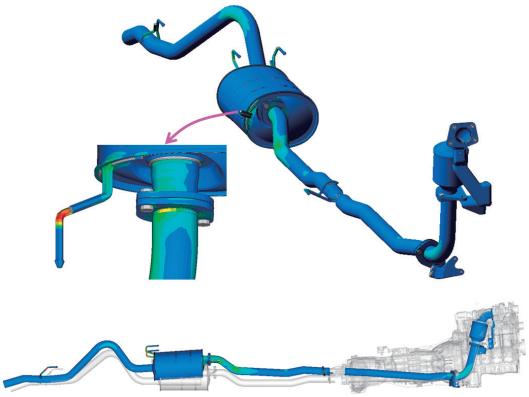


図 19　排気管 悪路走行時 応力分布と変形モード

8　振動･騒音 CAE

8.1 キャブマウント部 取付点動剛性

ピックアップトラックに対する振動騒音性能について，市場の要求品質は年々高まっている。

新型 D-MAX の開発においても，競合他車に対しての優位性を目標とし，振動及び車室内のこもり音の更なる低減を目指した。キャブマウント部からの振動伝達による車室内への音を低減すべく，キャブマウント部の取付け点での動剛性について目標値を設定し，関係部署と協業し，設計初期段階から CAE にて検討評価を行った。

CAE での検討により，取付け点における板組による剛性と周辺部品との結合部の剛性を向上させることにより，各マウントにおいて動剛性の目標値を満足することができた（図 20）。

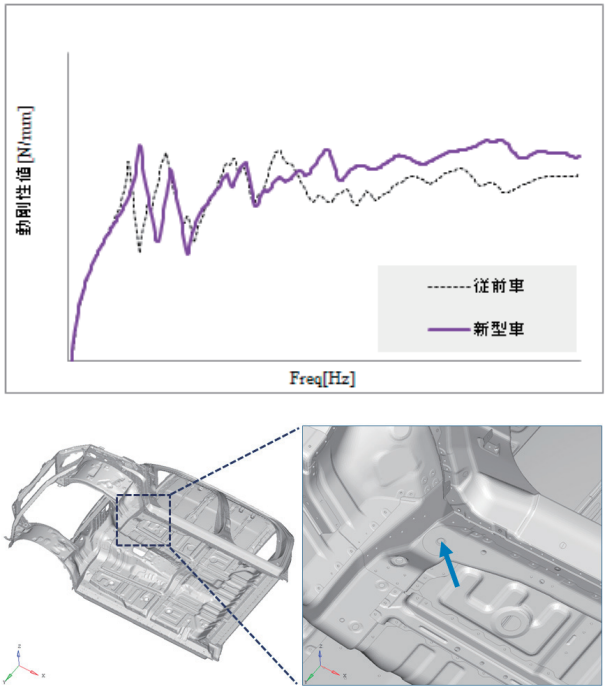


図 20　キャブマウント部 取付点動剛性

8.2 燃料タンク固体伝播音

車両走行条件によっては燃料の揺動によりさまざまな現象が発生するが，本報では急制動時の振動伝ぱ（播）から固体伝播音のレベルを従前車と比較した。まず，本固体伝搬音を評価する急制動時の減速度条件を燃料タンクに与え，粒子法による燃料の挙動（スロッシング）解析を行った。

次に，そこから求めたタンクに加わる圧力変動を構造解析モデルへ入力として加え，乗員に伝わる経路であるキャブマウント No.3（最も乗員の耳に近いキャブマウント）の加速度レベルを評価指標とした。

その結果，新型 D-MAX は，従前車と比較して，加速度が同等以下のレベルであることが確認でき，実車でも本固体伝搬音レベルは従前車以下となった（図 21～24）。

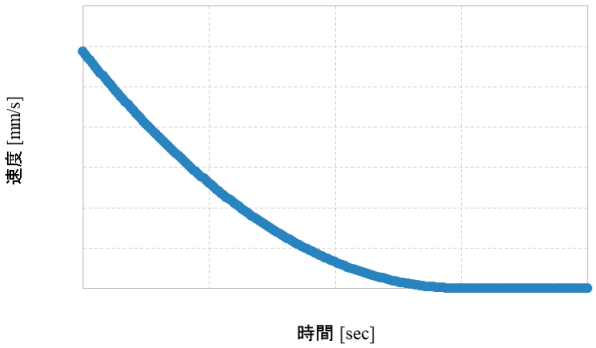


図 21　減速度波形

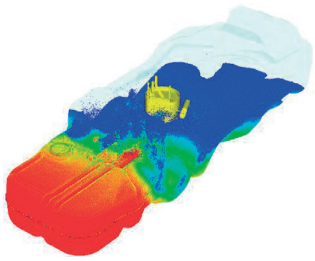


図 22　燃料タンク スロッシング解析

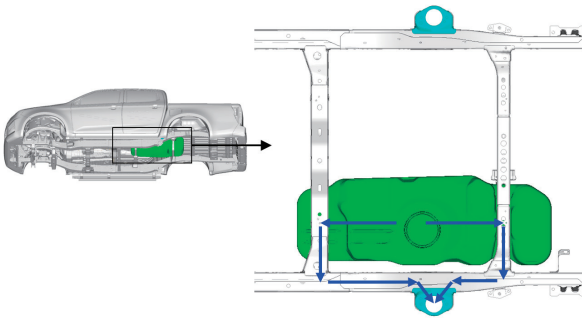


図 23　構造解析（荷重伝達経路）

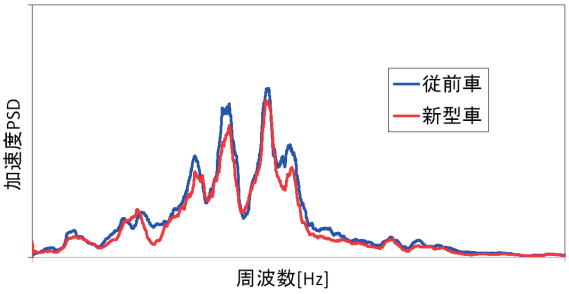


図 24　No.3 キャブマウント発生加速度（PSD）

9　おわりに

新型 D-MAX 開発に活用された解析技術の一部を紹介した。ピックアップトラックに要求される従来性能に加え，安全性と燃費，排出ガス規制等の環境性能の要求は年々高いものとなっており，今後も CAE はその市場ニーズに答えられる技術をもってピックアップトラックの開発に臨む所存である。それがよい車造り，お客様の利益につながるものと確信している。

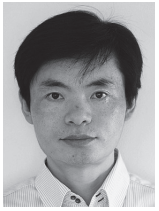
最後に，CAE 業務に携わっていただいたすべての関係各位に心から謝意を表し，本稿の結びとする。

著　者

松田　康

花岡　雄二

小田　明


程原　雅之

上野　大輔

菊地　正信

寺脇　一裕

石原　聡継

Kittipong Likhitmaskul

Wasu Songmuang

Rungrattana Sowjaroensuk

新型 ISUZU D-MAX の車両性能試験について

Vehicle Performance Test of New ISUZU D-MAX

後藤　昌彦* Masahiko Gotou
夏見　宏貴* Kouki Natsumi
小川　真也* Shinya Ogawa
柳　龍治* Ryuuji Yanagi
松本　哲士* Tetsushi Matsumoto
加茂　元之* Motoyuki Kamo
村上　俊介* Shunsuke Murakami
宇多　純人* Sumito Uda
小出　高大* Takahiro Koide
上野　真吾* Shingo Ueno
南野　雄一* Yuuichi Nanno
佃　洋喜* Hiroki Tsukuda
小武　拓矢** Takuya Odake
五嶋　亮祐** Ryosuke Gotou
村永　健太** Kenta Muranaga
矢部　治貴** Haruki Yabe
水島　昭博*** Akihiro Mizushima
渡邉　章*** Akira Watanabe
林　正裕*** Masahiro Hayashi

要　旨

新型 D-MAX は，世界市場での高い信頼性と実績，及びシェアを持つ従前型ピックアップトラックの後継車として，“Efficient：燃費・安全の向上”，“Robust：多種使われ方・使用環境に対応”をベースコンセプトに開発された。

これらの実現に向け，商品性／経済性／安全性／信頼性／環境性能の高い目標性能／品質を設定。それを達成するために，評価･改良を実施してきた。

本稿では，新型 D-MAX の車両性能試験の実施内容と，その達成状況について紹介する。

Abstract

New ISUZU D-MAX is a successor of the previous pickup truck with high reliability and performance, and share in the world market. As the succeeding vehicle, the base concepts were “Efficient : Improvement of fuel economy and safety performance” and “Robust : Compatible with various usages and usage environments”.

To achieve these targets, we set high performance and quality target of merchantability/economic efficiency/safety/reliability/environmental performance and we have carried out evaluation and improvement of new pickup truck.

We explain here how performance tests were carried out to achieve the strategy of product development and what achievements were made.

1　まえがき

新型 ISUZU D-MAX（以下,「新型 D-MAX」と略す）では, 燃費･安全の高い競争力を維持するとともに, 多種多様な使われ方・使用環境に対応した強度・耐久信頼性, 耐環境性能を確保することをコンセプトに, 商品開発を進めてきた。

特に, NCAP（New Car Assessment Program）新プロトコルに対応し，高い要求性能を達成すべく先進安全装備を採用するとともに, 燃費･スタイル･インテリア質感・操縦安定性・室内騒音を重点向上させ，8 年ぶりのフルモデルチェンジとして商品力の刷新を図っている。

本稿では, これらの性能, 強度･耐久信頼性について, タイ向けでの評価詳細を報告する。

2　燃費･動力性能

D-MAX が市場において多くのお客様に受入れられている魅力の一つとして, 優れた燃費性能と, 常にトップレベルを確保し続けた動力性能がある。

新型 D-MAX に関してもベンチマーク・性能トレンドの予測を行い, 他を凌駕する性能を目標とした。

動力の源であるエンジンは，4JJ1 ディーゼルエンジンから 4JJ3 で 450 Nm にトルクアップし，動力性能が大幅に向上した（**図 1**）。また，RZ4E エンジンはエンジン制御の見直しにより，発進加速性能を向上させた。

*車両審査実験第一部　　**車両審査実験第二部　　***㈱ワーカム北海道

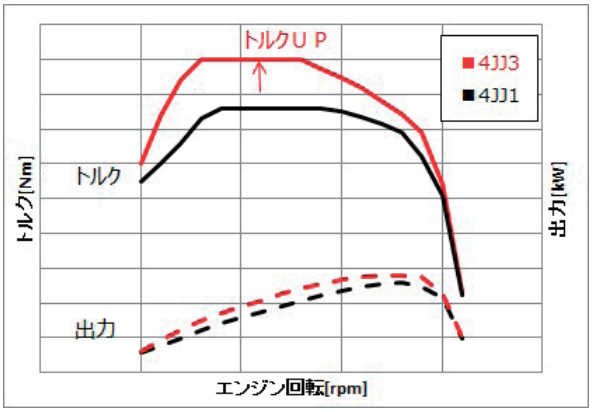


図 1　4JJ1 vs 4JJ3 出力特性

2.1 燃費性能

D-MAX の燃費目標は，従前車に対し空気抵抗と転がり抵抗に大別される走行抵抗の改良を実施した。

空気抵抗は，空力特性をスタイル検討時から解析・実験検証を繰返し，他社に劣らない性能を確保した（**3 章**）。更に，タイヤ単体の低転がり化により転がり抵抗を低減した。その他にも，熱交換器前のエアガイドとエアーコンプレッサの改善，アイドリングストップ等による燃費の改良を行った。

これらの改良により，新型 D-MAX の燃費性能を従前車に比べ大幅に向上させることに成功。競合他社に対しても低燃費を実現し，ピックアップ市場におけるトップランナとなる燃費性能を確保した（**図 2**）。

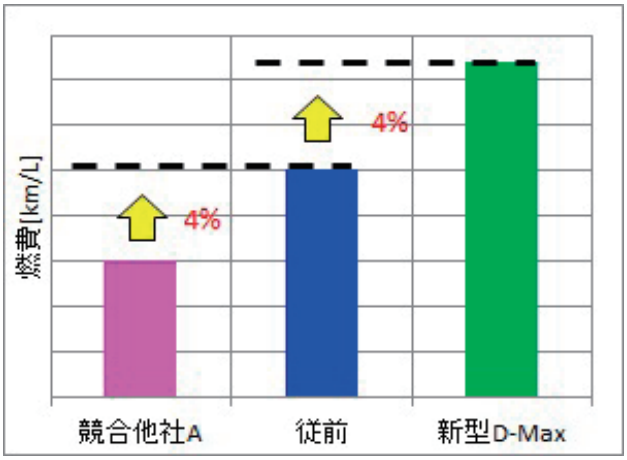


図 2　燃費性能

2.2　動力性能

市場の使われ方から，発進時に力強い加速が得られるように作り込みを行った。特に小排気量の RZ4E エンジンは，従前車よりも優れた加速を実現するため，開発終盤まで制御系主体に改良を実施した。

排出スモークを抑えながらも加速性能改良を実現するため，エンジン制御のソフトを見直した。結果として，**図 3** のように車速の立ち上がりを大幅改善することに成功した。

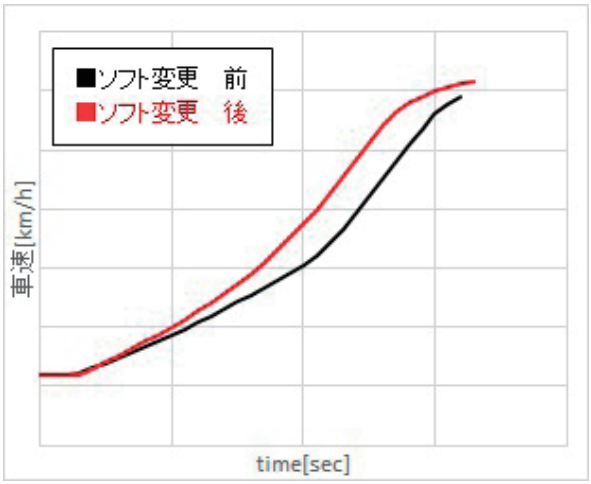


図 3　加速性能

3　空力性能

新型 D-MAX の空力開発は，従前車と競合他社の車両のベンチマークを行い，現状を知るところから始まった。そこで得られた結果を基に，新型 D-MAX の空力目標値を決定した。

空力開発はスピーディーかつ効率良く行うために，CFD（計算流体力学：Computational Fluid Dynamics）と風洞試験を交互に段階を追いながら実施した。

初めに模型風洞でクレイモデルを使い，外観の基本骨格形状を決定（**図 4**）。その結果を落とし込んだ実車を使用して，冷却と空力性能の最適化を狙ったフロント開口部，各空力デバイスのチューニングなどを行い，最終形状を決定した（**図 5，6**）。

その結果，フロントバンパ下のスカートとトランスミッション下のカバー等の床下の空力改善アイテムを追加することで，新型 D-MAX は従前車に対し CdA[1] で 4% の向上を図ることに成功した（**図 7**）。

注 [1] 空気抵抗係数 Cd と前方投影面積 A の積

図 4　模型風洞試験

図 5　冷却プロト車

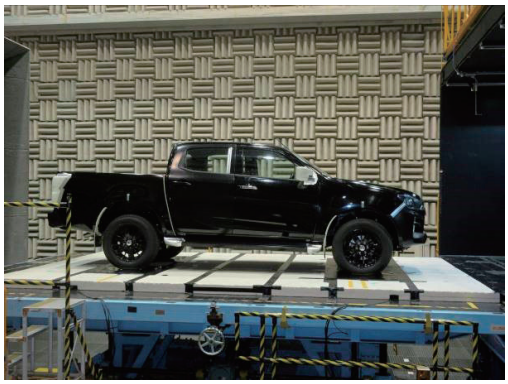


図 6　鉄道総研 風洞技術センター風洞試験

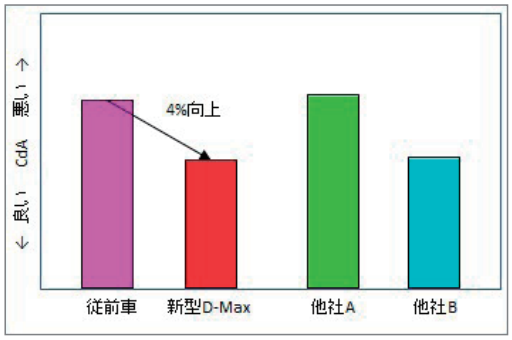


図 7　CdA 値ベンチマーク結果

4　振動騒音性能

車両の振動騒音開発では，年々高まってくる市場の要求性能と競合他社車両に対する優位性確保，及び燃費と排出ガス，ドライバビリティといったトレードオフ性能との高いレベルでの両立を狙いとした。

開発の目玉である高速走行騒音については，よりチャレンジングな目標性能を掲げ，目標を達成するために開発初期段階から車体形状とドアの配置について風流れを念頭においた設計を行えるよう，逐次実験データのフィードバックを行った。また，車体パネルの複雑な組み合わせに対応し，徹底したシール施工を行った。カーペット等の吸遮音材の最適化についても単品性能だけでなく，実車で徹底的な検証試験を行うことにより，狙いの性能を確保することができた。

新開発の 3 L エンジンについては，エンジン騒音の格段な向上を狙うとともに，低速トルク向上に伴う駆動系と車両入力の増加への対応として，駆動系ねじり振動系の最適チューニング，放射音対策，効果的な車体補強及び吸遮音材配置を施すことにより，目標性能を確保することができた。

その結果，新型 D-MAX では，これまでにない次世代の快適な車両を供出することができた。

ここにいくつかの改善事例を紹介する。

4.1　高速走行騒音性能の開発

従前車から A ピラーに対するドア位置を見直し，形状を最適化したミラー，徹底して効果検証したフロアカーペットとルーフインシュレータを配置し，更にパネル細部にわたる徹底したシーリングとキャブマウントなどの振動入力点の補強を行った。

その結果，競合車に対し大きな優位性確保と従前車両に対する大幅な向上を達成できた。

図 8 に競合車，従前車との高速走行時車内騒音の結果を示す。

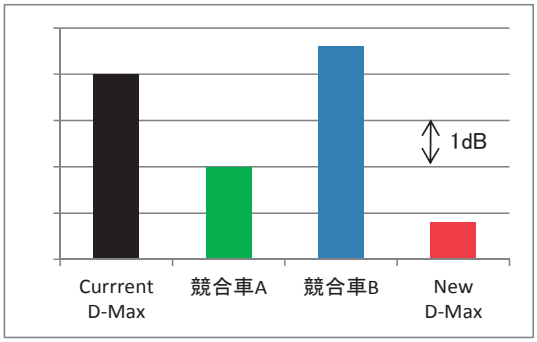


図 8　高速走行時車内騒音

4.2 キャブ作りこみと加速時車内騒音

従前車から課題となっていた車内エンジン音を低減させるため，車内エンジン音がキャブマウントを経由して車内に伝わってくる中周波数領域と，空気を経由して車内に透過してくる高周波数領域に分類し，それぞれに対して改良を行った。

まず，中周波数領域に対してはキャブ剛性を従前車と比べ大幅に向上させることで車内音の静粛化を狙った。そのため，キャブマウント取付け点の動剛性，各パネルの動剛性等，キャブ各部の特性値と車内音との関係性を徹底的に調査し，それら特性値を CAE (Computer-Aided Engineering) 解析上の目品に落とし込み，解析でのキャブの事前作りこみを綿密に行った。

一例として，**図 9**, **図 10** に CAE 解析で 2 番キャブマウント取付け点剛性の作りこみを行った例を示す。作りこみにより，キャブマウント取付け点周辺部の変形量が大幅に低減された。

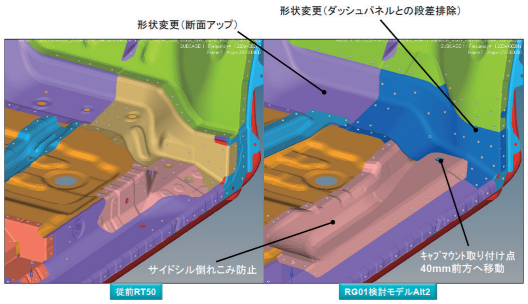


図 9　2 番キャブマウント取付け点構造比較改良

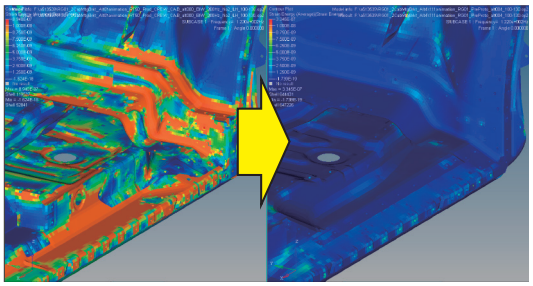


図 10　2 番キャブマウント取付け点加振時の変形量比較（改良前⇒後）

高周波数領域に関しては吸遮音材の最適化が重要となるため，中周波数領域と同様に吸遮音材の特性値と車内音の関係性を調査，その結果をもとにサプライヤに特性値としてクライテリアを与えて，狙い通りの吸遮音材を作り上げた。

図 11 に加速時の車内音比較結果を示す。これら作りこみの結果，加速時車内エンジン音を従前車に比べ大幅に低減させることができた。

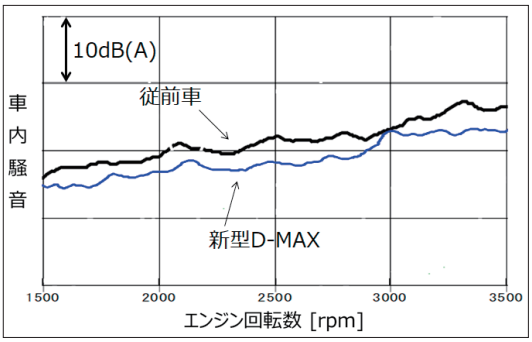


図 11　加速時車内音比較

4.3 駆動系騒音

新開発の 3 L エンジンでは低速トルクアップが開発の目玉であるが，背反性能としてエンジントルク変動の増大により，駆動系ねじり共振が励起され，MT (Manual Transmission) 内部のギヤの歯打ち音増大が懸念された。そこで事前に対応策を検討し，エンジンのフライホイールのイナーシャ UP で入力を低減するとともに，これに合わせたクラッチねじり特性の最適化を行った。

図 12 にトランスミッション（以下「T／M」と称す）回転変動量のクラッチねじり特性の適合前後の結果を示す。

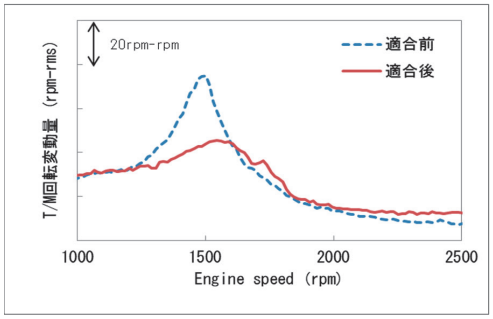


図 12　3rd 加速時の T／M 回転変動量の比較

また，低ギヤ段での緩加速時の歯打ち音に対してもクラッチねじり特性の低ばね領域を追加・チューニングして見直し，ポテンシャルを向上させた。

図 13 1st 緩加速時 T／M 近接音の適合前後の結果を示す。

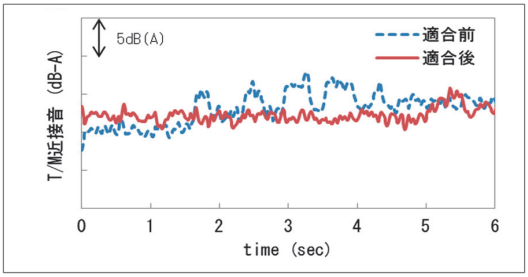


図 13　1st 緩加速時 T／M 近接音の適合前後の比較

これらにより，駆動系 NV（騒音・振動：Noise, Vibration）性能とエンジンのパフォーマンス向上を両立できた。

5　操縦安定性，乗り心地性能

貨客兼用であるピックアップトラックの近年のトレンドにおいては，従来通りの積載性は確保しながらも，パッセンジャーカーとしての乗り味がより重要視されている。特に 4 × 4 系車型（含 Hi-Lander）においては，この傾向が顕著である。

新型 D-MAX では，好評を得ている従前車の基本思想（操縦安定性：リニアで高い安定感，乗り心地：しなやかな乗り心地）を踏襲しながら，トレンドを考慮してキャビン，フレーム，サスペンション，ステアリングの各部を新規開発した。開発にあたっては，次の点を主要な改良テーマとした。

- 操縦安定性：ロール感の向上
- 乗り心地性能：
  - ・突き上げの少ない，フラットな乗り心地
  - ・振動の少ない，剛性感の高い乗り心地

本章では，これらの開発概要を説明する。

5.1　操縦安定性

一般的な乗用車に比べて車両重量が重く，重心高も高いピックアップトラックは，ロール感が劣りやすい。しかし近年はこのロール感の改善が進んでおり，ロール感と相関の高いロール角（ロール角が小さくなると，ロール感も向上する）のトレンドからも，その一端が見える（**図 14**）。

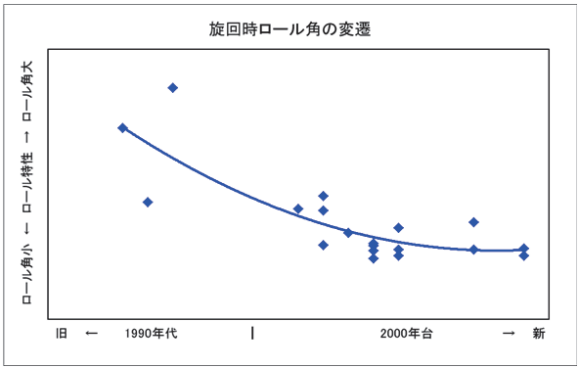


図 14　旋回時ロール角に見られるトレンド

そこで，次の①②をロール感向上のためのポイントとして開発した。

① ロール角の低減
② ロールモードの改善（4 × 4 系車型）

①に関しては，フロントサスペンションジオメトリの見直しを行い，ロールセンタ高さを最適化した（4×4 系車型）。加えて，フロントサスペンション，リヤサスペンションともに，ロール剛性を向上させた。特にリヤサスペンションに関しては，リヤリーフスプリングトレッドの拡大を図ることで，ロール剛性を向上させた。この結果，新型 D-MAX は従前車と比べロール角を低減し，他車に比較しても良好なレベルを達成した（**図 15**）。②に関しては，旋回中のロールセンタ位置を旋回中心方向に横移動させることで，旋回時に車体が沈みこむロールモード（ジャッキダウンモーション）を実現した。この結果，比較的重心高の高い 4 × 4 系車型にあっても，ドライバは旋回時に路面に吸い付くような感覚を得るようになり，ロール感の向上に貢献している。

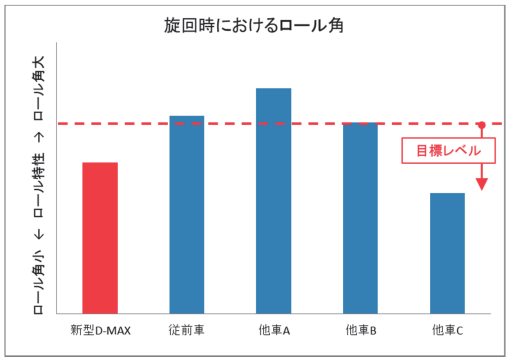
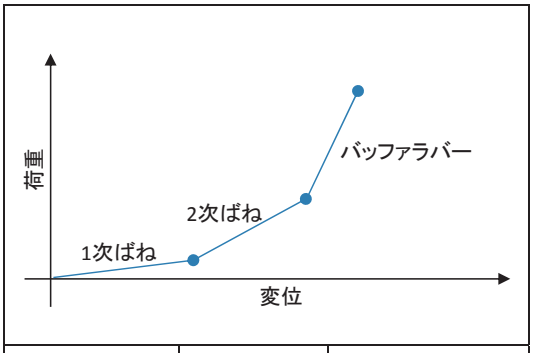


図 15　旋回時におけるロール角

5.2　乗り心地

新型 D-MAX をはじめとする一般的なピックアップトラックのリヤサスペンションは，貨客兼用の観点から，一つのサスペンションが分担する荷重に応じた複数のばね特性を有し，荷重に応じてばね定数が変化する（**図 16**）。突き上げの一因は，このリヤばね特性の非線形性にある。路面入力などによって一定以上の荷重が発生，ばね定数が高い側へと変化すると，それまでに比べてサスペンション変位が急激に減少する。この結果，乗員位置の変位が急激に増大し，突き上げを感じるのである。新型 D-MAX では，この突き上げを減少させるため，リヤサスペンションのバンプストロークを拡大した。バンプストロークを拡大することで，それぞれのばねが分担する荷重域を広く設定できるため，突き上げが減少する。また，リヤショックアブソーバの取付け角度を見直して，減衰の効率も向上させた。これらの結果として，新型 D-MAX は乗員位置の変位が少ない，フラットな乗り心地を実現した（**図 17**）。

また，新型 D-MAX ではキャビンとフレームといった車体の新規開発によって，剛性を向上させた。キャビンをフレームに結合するマウントラバーの特性も見直すことで，振動の少ない，剛性感の高い乗り心地を実現した（**図 18**）。



1 次ばね	2 次ばね	バッファラバー
軽積載	積載	更なる大荷重
低 ←	ばね定数	→ 高

図 16　リヤサスペンションのばね特性

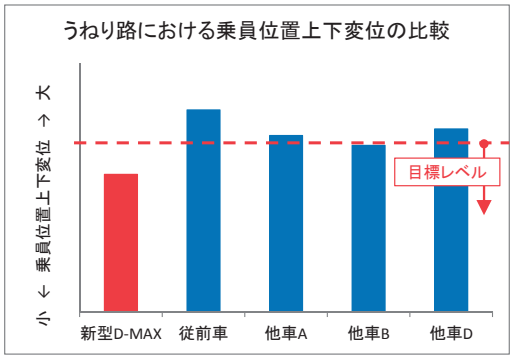


図 17　同一路面入力に対する，乗員位置上下変位

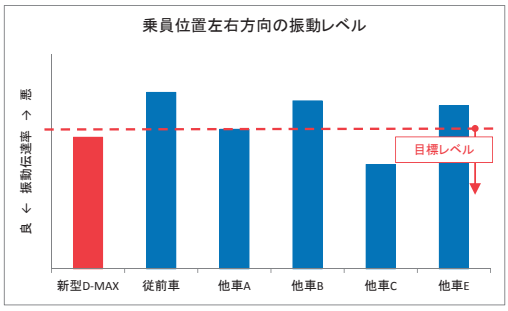


図 18　乗員位置左右方向の振動レベル

6　ブレーキ性能

新型 D-MAX のブレーキは，より安全性の向上を狙い，フロントブレーキを大型化し，新たな ABS (Antilock Brake System) ユニットを採用し，各種電子制御関連も機能の強化を図った。

6.1　ブレーキフェード性能

新型D-MAXはフロントブレーキサイズをΦ 300 mmからΦ 320 mmへ大型化した。ブレーキの大型化により冷却性が大幅に向上，ブレーキフェード性能の良化した上，摩擦材寿命の向上にもつながった（図 19）。

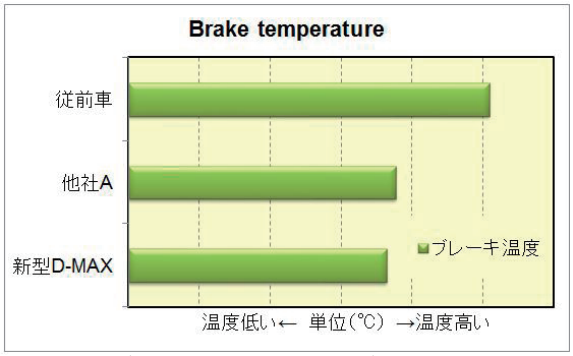


図 19　ブレーキ熱害試験時 ブレーキ温度比較

6.2　ABS 性能

ABS 開発においては，新たに採用した新世代 ABS ユニットにより，いかなる路面においても 4 輪独立制御が可能となり，タイヤと路面の摩擦を最大限利用する制御が実現した。その結果，従前車／他社よりも制動距離を大幅に短縮することに成功した（図 20）。

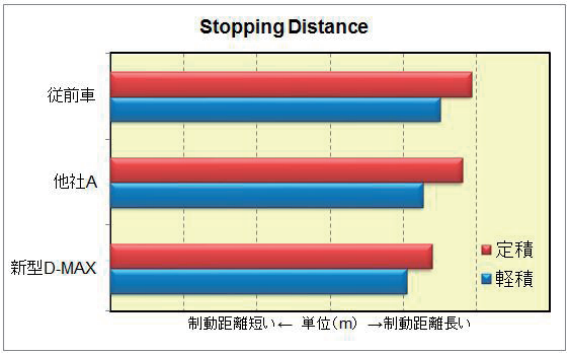


図 20　100km/h からの制動距離比較

6.3　TCS 性能

従前車より採用している TCS (Traction Contorol System) 制御については市場での使用状況を考慮し，これまで以上に悪路での使用環境に適合した TCS 制御を目指し開発した。滑りやすい路面での発進性，安定性は従前車同様に確保しつつ，砂利路，泥濘路など走行抵抗が大きな路面でも，安全かつ容易に走行できるようチューニングを実施した（図 21）。

図 21　TCS 悪路走破性試験 砂利登坂路

6.4 ESS

新型 D-MAX は急ブレーキによる後続車の衝突回避を促すために，いすゞピックアップトラックとしては初めて ESS（Emergency Stop Signal）を採用した。ESS は 60 km/h 以上から急減速した場合及び ABS が作動していると間に，ハザードランプを早く点滅させて周囲と後続車へ注意を促す機能である（**図 22**）。ブレーキペダルを放すか，車両減速度から急ブレーキではないと判断されたときにシステムは解除される。

図 22　ESS 試験 急減速評価

6.5 HSA 性能

従前車より採用している HSA（Hill Start Assist）制御ついては，ドライバアシスト性向上のため，作動する坂路勾配を従前車より下げ，より低い勾配でもアシストするように改良した。また，低勾配での発進時は引っかかり感を極力抑えかつ，高勾配の坂路ではずり下がりの無い制御となるようバランスをとるチューニングを実施した。

7　居住性･乗降性

近年におけるピックアップトラックの乗用車志向の高まりにより，従前 D-MAX では車両を拡大し，居住性･乗降性の向上を重点に置いて開発を行った。

新型 D-MAX はキャビンのサイズを拡大することなく，レイアウトと形状の見直しにより従前 D-MAX で培った居住性・乗降性を更に高め，より乗用車的な快適性を有した車とすることを目標として開発を行ってきた。

更に，アジア圏を中心にし，世界各国に展開する D-MAX は，さまざまな体格のユーザに使われるため，より多くの人に受入れられる車とすることを視野に入れ，改良を行った。

7.1 居住性

多くのユーザが最適な運転姿勢に合わせることができるようにするため，新型 D-MAX は運転席の調整機能を充実させた。ステアリングホイールには上下のチルト調節に加えて，前後に 40 mm 動くテレスコピック機能を追加し，ドライバシートにはハイトコントロールの可動域を従前車に対し更に 15 mm 拡大，更にシートクッションチルト機能を追加している。

後部座席においては，従前 D-MAX にて既に他社比トップクラスの空間を有しており，新型 D-MAX においてもその優位性が確保されている。

新型 D-MAX は居住性を更に高めるため，シートのトルソーアングルは踏襲しながら，シートバック上部の形状を見直し，より開放的な姿勢で座ることができるように配慮した（**図 23**）。

また，足を伸ばして座った状態でも自然に前席シート下に足が収まるようシートレールの配置を最適化している。

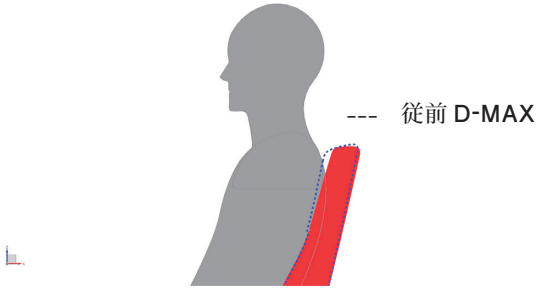


図 23　シートバック新旧比較

7.2 乗降性

後部座席乗員が足を通過させるスペースを拡大させることは従前 D-MAX の課題であり，新型 D-MAX は B ピラー下部の形状を見直した。これにより従前 D-MAX に比べ後部座席への乗降，特に降車動作がスムーズに行えるようになった（**図 24**）。

図 24　大柄男性 降車

また，ピックアップトラックは車高が高く，特に小柄なユーザにとっては車室内によじ登るような動作となるが，新型 D-MAX は B ピラー後部にアシストグリップを追加し，乗車時に上半身を支えやすい構造とした。このアシストグリップは約 330 mm と大型なサイズに加え，地上から約 1300 mm と低い位置から設定することで使い勝手の向上を図った（**図 25**）。これにより多くのユーザにとって手が届きやすく，サイドステップとの組み合わせによって乗降しやすい車に仕上がっている。

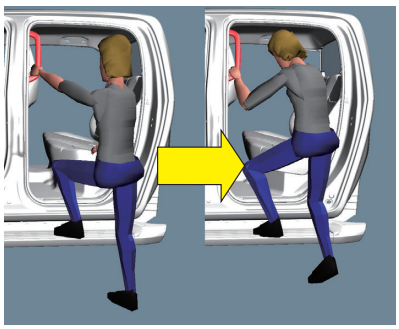


図 25　小柄女性 乗車

8　駆動系の性能（MT 操作性改良）

新型 D-MAX では，駆動系分野において MT の操作性改良が目玉として挙げられた。

特に次の 3 項目の改善により，操作フィーリングは従前車に比べて大幅アップを果たした。

① MBD（モデルベース開発：Model Based Development）を活用したデテント機構のチューニング
② 変速レバーの Pull 式化
③ フィーリングの物理量化

本章ではこの 3 点について説明をする。

8.1　MBD を活用したデテント機構のチューニング

デテント機構が決める特性は，シフト操作時に手が感じる力である。本プロジェクト立ち上がり当初より，実機計測構成に合わせてシミュレーションモデルを作成し，デテント機構のつくり込みを進めた。具体的には**図 26** のように実機の一部のみを単体で作製した。トランスミッション構成部品の一部の単品性能を計測し，シミュレーションモデルも計測した実物に合うように構成し，コリレーションをとった。部品単一状態から Detent 部の特性データ取得を積み重ねることで，最終的に MT アセンブリとしての特性を作り上げていった。本活動の成果として，LCV（小型商用車：Light Commercial Vehicle）系で採用されているダイレクトタイプの変速レバーが，シミュレーション上でつくり込みが可能となった。

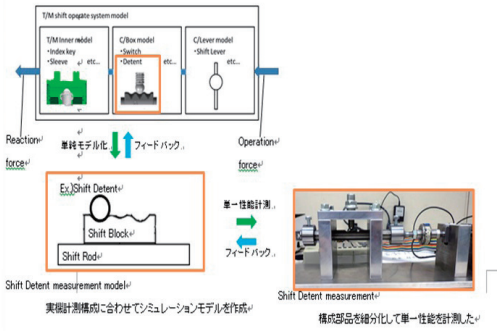


図 26　Shift Detent のチューニング

8.2　変速レバーの Pull 式化

従前車ではバックギヤへ操作する際，バックギヤ側へ操作荷重を大きくすることで誤操作防止を図っていたが，新型 D-MAX では Pull 式変速レバーを初採用した（**図 27**）。

黄色丸が Pull Ring

図 27　Pull 式変速レバー

これによりドライバの意図しないシフトミスを減らすことに大きく寄与するとともに，各ギヤ段操作の荷重が一定になり，操作性に均一感を与え，操作性は格段に改良された。

8.3　フィーリングの物理量化

従来シフト操作の評価はフィーリングに頼っていたが，今回専用計測器を導入し人の感性を物理量化することにトライした（**図 28**）。

フィーリングを物理量として把握可能にしたことで，フィーリングの大幅向上に貢献した。

図 28　シフト操作の専用計測器

8.4 overview

構成部品を，デテント機構をはじめシフトブロック・シフトロッドなどに細分化して単一性能を計測し，実評価からシミュレーション化の流れに初めて本格的に挑戦し，各部の改良を進めた。フィーリングと物理量の紐づけを行い当初目的としていた節度感・剛性感アップを達成し操作性の大幅な改良と技術力向上を実現した。

9 電装品の性能

9.1 HILS による ECU 制御（Auto Cruise／Speed Limiter Device）のキャリブレーション適合検討

最近，車両開発期間の短縮を目的に HILS（Hardware In the Loop Simulation）を活用した評価を推進している（**図 29**）。

制御の仕様変更と新型エンジン追加等で車両挙動に関わるキャリブレーションを見直す必要がある場合は，HILS を活用し，実車による試験回数を減らす活動を積極的に行っている。

図 29　HILS の構成

9.2 HILS の特徴

HILS は車両モデルと ECU（電子制御装置：Electronic Control Unit）を統合させることで，実車相当の挙動が再現できる。実車評価前に実車相当の評価が可能となるため，開発の初期段階で制御仕様の改善が早期に見込める。空車／積車状態，エンジン，トランスミッション，ファイナル条件等の設定を容易に変更でき，テストコースでは実施困難な道路環境も模擬できるため，車種車型の仕様違いの隅々まで考慮に入れたチューニングを短期間で検討することが可能となった。

9.3 フルモデルチェンジに伴うチューニングの実施

フルモデルチェンジに伴い，オートクルーズ及びスピードリミッター装置の制御仕様も変更されることになり，キャリブレーションの再適合が必要となった。また，従前より走行フィーリングを改善するため，各ギヤ段でチューニングのやり直しをする方針とした。

これらを短期間で実行するためには，実車評価前に HILS でキャリブレーション検討をすることが有効的だ。

現在，HILS による評価法では，実車評価 1 回で OK が見込めるレベルを目指しており，クルーズとスピードリミッター装置もこれに近いレベルを有している。HILS でチューニングしたキャリブレーションを用いて実車評価を実施した結果，再チューニング無しで評価 OK の結果を得られた。また，ギヤ段ごとにチューニングを検討した結果，ギクシャクしやすい低車速，及び低ギヤ段でも安定した車速を維持できる性能を実現した。

10 先進安全性能

後側方レーダ

新型 D-MAX では，リヤバンパに後側方レーダを内蔵し，BSM[1)]（Blind Spot Monitoring）と RCTA[2)]（Rear Cross Traffic Alert）の 2 機能を新規に搭載した（**図 30**）。

注 [1)] 走行時，後方から接近する車両等を検知するとドアミラー内の LED を点灯しドライバに警告するシステム

注 [2)] 後退時，接近する車両等を検知するとドライバに音で警告するシステム

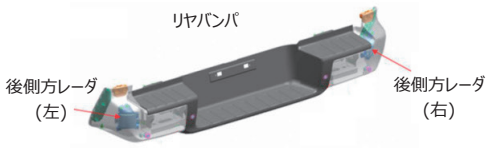


図 30　後側方レーダのレイアウト

レーダは対象物が小型であるほど検知が難しいため，BSM では原付を正しく検知できるように調整した（**図 31**）。

図 31　BSM 原付検知試験の様子

また，BSM･RCTA ともに，対象物の速度が速い場合は，より早くドライバへ警告するようにタイミングを可変としている（図 32）。

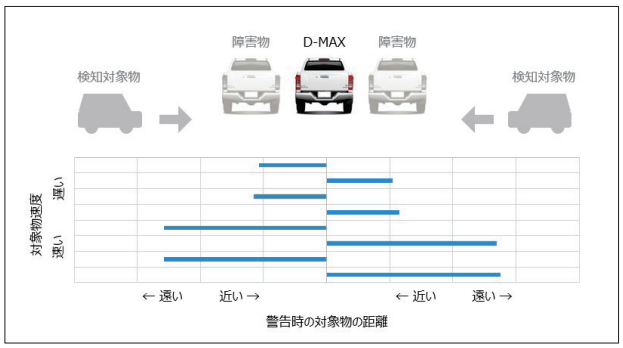


図 32　RCTA 警告タイミングの確認

小型物体の検知のためにレーダの感度を高くすると，背反として誤検知のリスクが高まる。このため欧州実路にてデータ収集し，必要なタイミングでは確実に警告し，かつ不必要な警告は極力発生しないよう調整を実施した。

D-MAX は豪雨・洪水の頻発する地域でも多く使用されるため，一定時間レーダが水中にさらされても性能に影響しないことを確認している（図 33）。

図 33　水浸入確認試験の様子

11　衝突安全性能

11.1 衝突安全性能開発

新型 D-MAX は，より安全な車をお客様へ提供するために，世界各国 NCAP に対して，トップレベルの衝突安全性能を目指し，開発に取り組んだ。

そのために，新たに導入された衝突評価を含め，よりさまざまな衝突に対する車両開発を効率良く進めていく必要があり，フロントローディングを実践し，開発プロセスの改善を行った。

構想段階で MBD に取り組むことで，装置ごとの目標特性を決め，設計段階での作り込みを実施。これにより，これまでの設計段階では，従前車をベースにした改造車（以下「プレプロト車」と称す）を作製することで性能の作り込みを実施していたが，新型 D-MAX の開発では，プレプロト車の作製が不要となった。加えて，フロントローディングの実践により，設計段階で高い衝突安全性能のポテンシャルを確保することができ，実機評価の試験車台数･工数等の削減にもつながった。

11.2 車体衝突性能

新型 D-MAX は，各国 NCAP で採用されているさまざまなバリヤ衝突試験を実施し，高い衝突安全性能を得ることができた（図 34，35，36，37）。

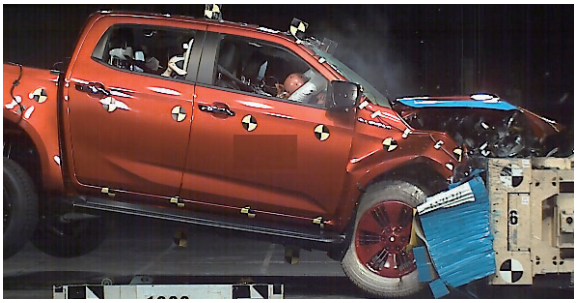


図 34　オフセット前面衝突試験

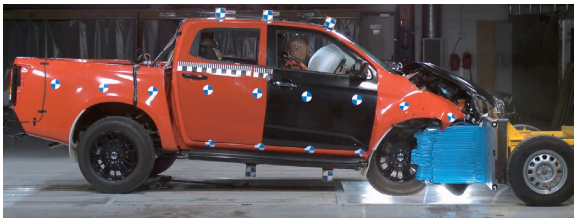


図 35　オフセット前面衝突試験（Car to Car）

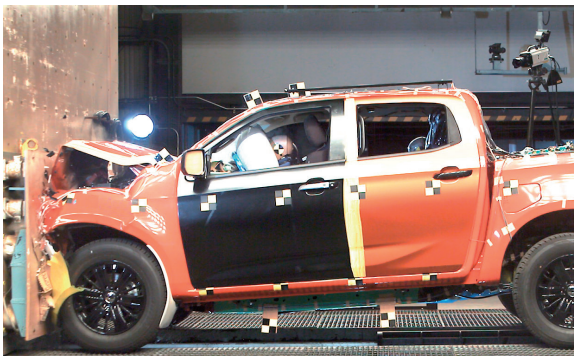
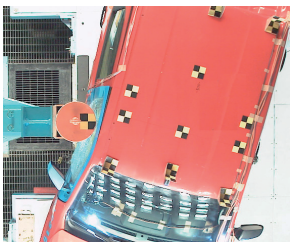


図 36　フルラップ前面衝突試験



ポール側面衝突（左）／側面衝突試験（右）
図 37　側面衝突試験

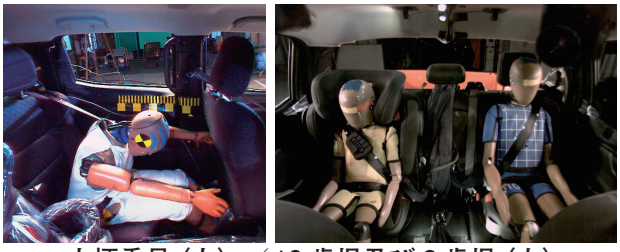
11.3 クルーキャブ後席の乗員保護性能

乗員の初期拘束性を高めるために，スルーアンカを乗員肩口に配置する新規レイアウト（従来はピラー上）を採用した。

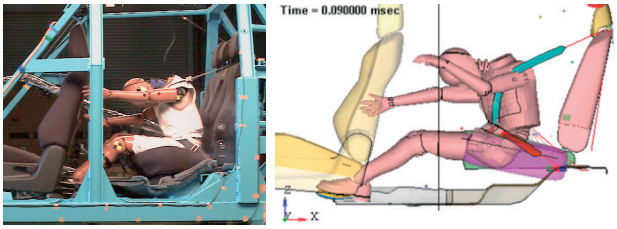
新規レイアウトは，構想段階で「マルチボディ解析プログラム MADYMO」を用いて，乗員の衝撃を緩和するためのシートベルトのレイアウトとロードリミッタ等の特性を検討した上で，スレッド試験（実車模擬台上試験）を実施し，仕様を決定した。

その結果，後席の乗員保護性能の向上を図れた。

また，NCAP 評価のオフセット衝突試験（子供乗員（10 歳児，6 歳児））とフルラップ衝突試験（小柄乗員）において，高い衝突安全性能を得ることができた（図 38，39）。



小柄乗員（左）／10 歳児及び 6 歳児（右）
図 38　後席乗員保護性能バリヤ試験



実車模擬台上試験（左）／MADYMO（右）
図 39　小柄乗員保護性能開発

11.4 SRS センサ性能

新型 D-MAX は，従前車と同様のフロントサテライトセンサ，サイドサテライトセンサ（リヤピラー）及びサイドプレッシャセンサ（ドア内部）を採用した。加えて，従前車に対してサイドサテライトセンサを新たに追加（前席下側に配置）し，衝突検知性能の向上を図った。

また，これによりリアルワールドでの事故を想定したさまざまな衝突形態において，エアバッグの作動／不作動の判断を可能とした。

これらの性能は，さまざまな形態のバリヤ試験・アビューズ試験・イミュニティ試験を実施・検証することで実現した（図 40）。

図 40　SRS センサ バリヤ試験一例

11.5 歩行者保護性能

歩行者保護性能は，歩行者への衝撃を緩和する構造が必要である。エンジンフードの張り剛性等の相反する強度性能を確保しつつ，車両パッケージに影響を与えない車両前部の限られたスペースの範囲内で，衝撃吸収構造を実現させなくてはならない。

新型 D-MAX は，NCAP で実施される歩行者頭部・大腿部・下脚部保護試験に対する開発に取り組み，CAE をベースに，エンジンフードとバンパビーム等の構造を検討・改良した結果，高い歩行者保護性能を実現できた（図 41）。

頭部保護（左）／大腿部保護（中）／下脚部保護（右）
図 41　歩行者保護性能試験

12　強度・耐久信頼性

12.1 キャブボディ

キャブボディへの耐久性能の要求は，走行ルートと積載条件，走行スピードなど使用状況によりさまざまである。新型 D-MAX は，キャブボディの耐久信頼性向上のため，市場調査結果より新たに設定した耐久性目標で開発評価を実施した。

12.1.1 キャブボディ耐久性目標検討

従前車を用いた市場調査で，走行条件と積載条件などの違いによるキャブボディへのストレスの変化を測定した（図 42）。測定結果と車両の使われ方などから，従来の耐久性目標と比較検討を行い，新たな耐久性目標を設定することができた。

図 42　市場調査

12.1.2 ベンチ振動耐久試験

ベンチ振動耐久試験は，新たな耐久性目標に適合するよう条件の見直しを行った。従来のベンチ振動耐久試験と異なり，新たな耐久性目標でのキャブボディへのダメージと等価となるよう加振サイクルを変更した。

ベンチ振動耐久試験は，実車入力を再現可能な 4 軸振動試験機を用いて実施した（**図 43**）。変更した試験条件にて耐久を実施し，高い耐久信頼性を有するキャブボディであることを確認できた。

図 43　4 軸振動試験機

12.2シャシ

12.2.1 排気系システム振動耐久性評価のフロントローディング

従来の評価手法では，CAE バーチャル評価が終了して数か月経過後，試作車完成時期と同時に車両及びベンチ試験を実施していた。新型 D-MAX ではプレプロト車を作製して評価することで，更なるフロントローディングを実現した。

12.2.2 CAE バーチャル評価

CAE バーチャル評価は，エンジン振動及び路面入力による振動を CAE 上で再現させるものであり，試作品作製前に応力を把握することで机上での強度評価を実現させ，試作品の品質向上につなげた（**図 44**）。

ただし，排気系の実車両状態での振動は非常に複雑であるため，CAE に加えて実車での入応力測定を実施し，CAE と実車との相関を取ることで評価精度を確保している。

今回，早期に精度の高い評価を実現するため，後述するプレプロト車を活用した強度評価を実施した。

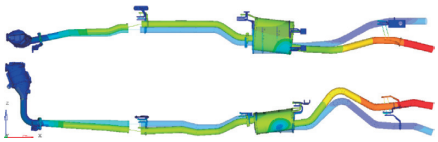


図 44　排気系システム強度解析

12.2.3 プレプロト車を活用した強度評価

プレプロト車に CAE 評価で造り込んだ新規排気系システム（排気管試作品）を搭載し，実車入応力測定を実施した（**図 45**）。本手法により，開発初期段階でのストレス把握が可能となった。また，車両入力を用いたベンチ振動耐久の早期実施も可能となり，フロントローディングに貢献した。

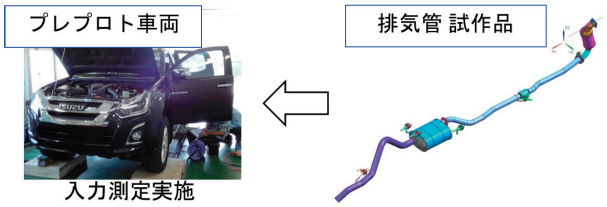


図 45　プレプロト車両を活用した入力測定イメージ

その後，試作車両での実車評価及びベンチ評価も実施したが問題は発生せず，プレプロト車を活用した評価手法は信頼性の高い手法であることが確認できた。

12.3実車耐久

新型 D-MAX では，耐久信頼性を確保するため市場サービス情報及びお客様から回収した膨大な車両データを調査・分析した。この結果を基に，**12.3.1～12.3.3 項**の耐久信頼性評価条件へ落とし込み，お客様に満足していただける耐久性向上の作り込みを実施し，要求性能を満たすことができた。

12.3.1 悪路耐久試験

新設計のボディとシャシ部品全般の耐久信頼性を確保するため，タイ国市場の使われ方を反映させた悪路の実車耐久試験を実施した（**図 46，47**）。ベルジアン路（路面入力）と長波形路（ねじり入力）を主体とした大変位入力を中心に，旋回･制動･発進などの操作入力，オフロード等の環境入力，タイ現地固有のストレス等を加えた試験を実施し，従前車と比べ大幅に耐久信頼性が向上した。

ベルジアン路（左）／クロスカントリー路（右）
図 46　悪路系耐久試験

図 47　現地架装の再現

12.3.2 エンジン・駆動系耐久試験

これまでより高出力／高トルクを実現させた新 4J エンジンを含むパワートレイン全体の耐久信頼性を確保するため，高速走行に駆動系入力を加えた高速駆動系耐久試験を実施した（**図 48**）。試験は市場データからエンジン負荷率・走行パターン等の条件を見直し，適正な目標基準を設定した。また，走行時の各種エンジンデータをモニタし，結果をフィードバックすることで，早期に耐久信頼性の確保ができた。

図 48　高速周回路

12.3.3 現地実路走行試験

テストコースと台上試験で車両の作りこみを行ったあと，タイ現地実路環境下でパワートレインを中心とした車両全体の信頼性確認を行った（**図 49**）。

走行は，タイのお客様の車速とエンジン負荷のうち，最もシビアなコンディションであると判断される条件を再現した。

これによりお客様の使用域でも，信頼性が確保されていることを確認した。

図 49　現地実路走行試験

12.4 防錆性能

防錆性能の評価は大きく (1) 図面段階での評価，(2) 実車を用いた代表特性試験段階での評価，(3) 実車コロージョン試験段階での評価に分けられる。これらの基本的な考え方は，基本構造を全仕向地と同じとし，腐食環境の厳しい仕向地には，付加防錆剤の追加で対応している。基本構造は先行するタイ向けで作りこんだ。

(1)　図面段階での評価

新型 D-MAX では市場要望，他車動向より防錆目標年数を延長している。延長した期間は，錆に厳しい融雪剤散布地域 (欧州，ロシア) では塗装，メッキ等の表面処理で防錆する期間を終え，母材が腐食し始める期間にあたる。母材腐食がはじまると，ボディのような薄板部品は早期に穴あき至るため，各部品の腐食速度 (腐食ストレス) 把握が必要である。

これを達成するために，錆に厳しい地域から長期使用の中古車を購入し，分解調査を実施した。調査で得られた結果をもとに，開発初期段階から，目標を満足する防錆仕様の作りこみを行った。

(2)　車を用いた代表特性試験段階での評価

ボディ／フレームは，腐食ストレスの厳しい袋部内面に電着塗料を付き回らせることが重要である。図面段階での評価を行ったあと，量産車を作成するタイ工場の塗装ラインを流れたボディ／フレームで検証した。一部目標達成困難な部位もあったが，材料開発，塗装技術，設計との協力により，目標を達成した。

(3)　実車コロージョン試験段階

最終確認として，実車コロージョン試験を行い，防錆性能が狙いどおりであることを確認した (**図 50**)。

図 50　実車コロージョン試験

13　環境適合性能

13.1 熱地性能

熱地（冷却・エアコン・熱害）性能はモデルベース開発を実施し，各国での使われ方（車両重量）及び厳しい環境条件（気温，標高，登坂勾配など）にも対応できるハードの設定をバーチャルにて実施。環境シャシダイナモメータを活用し，高度化する排出ガス規制に伴うエンジン制御ソフトの最適化とともに，ハードの実機検証を行った（**図 51**）。最終的には，メイン市場となるタイとヨーロッパ実環境下での走りこみを経て，信頼性も確保した。より高いレベルで市場からの要求を満足する商品となっていることを確認した。

図 51　熱地実路走行評価

13.2 寒地性能

低温環境におけるエンジンの始動性と運転性能について，実環境を想定し，環境シャシダイナモメータを活用し，エンジン制御の作り込みを行った。

また，車室内の快適性について，欧州の低温地域を想定した環境を台上で模擬し，ヒータ性能とデフロスター試験を実施した。従前モデルに対し，ヒータユニットの風量アップ及び風量分配を最適化し，乗員の快適性を向上させている。これら低温環境における性能は，ヨーロッパでの実路を走り込み，信頼性を確保してきた（**図 52**）。

図 52　寒地実路走行評価

13.3 高地性能

新型 D-MAX では，南米などに代表される高地市場におけるお客様の使い方を考慮し，エンジンの燃焼に必要な空気が薄い低圧状態でも十分な動力性能を確保するため，大型環境シャシダイナモをフルに活用（**図 53**）し，低圧環境での性能の作りこみを実施した。過酷な環境条件であっても，エンジン性能を最大限発揮し，高地市場のお客様にも使い勝手の良い商品を提供することが可能になった。

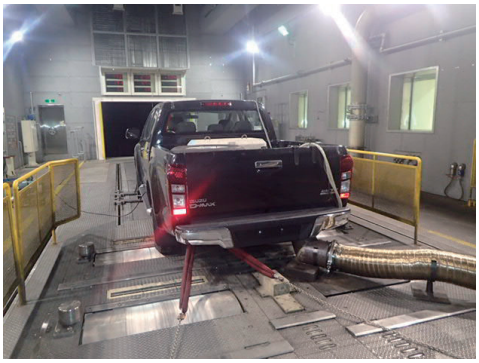


図 53　大型環境シャシダイナモ試験

13.4 その他の環境適合性

新型 D-MAX の開発において，その他環境適合性評価についてはお客様の使われ方を配慮し評価・検証を行った。

13.4.1 渡渉性能

大雨の際の排水機能が不足しているタイ国内は，2011 年秋の大洪水に象徴されるように道路が冠水してしまうことが多く，渡渉性能が重要視される。4×4 あるいは 4 × 2 HR など車高の高い車が洪水に強いと評価されるので，お客様の期待は高い。

新型 D-MAX では水深 800 mm（従前 600 mm）への対応，LCV 初であるフロントインテークの採用と渡渉性能への影響が大きな変更点がある。

開発初期段階から作りこみを行い，これらの変更を満足する性能を確保した（**図 54**）。

図 54　冠水路走行試験

13.4.2 雨天時吸気水浸入性能

フロントインテーク化した吸気システムに対し，タイ雨季に発生する降雨時も問題なく走行できるよう，疑似的に降雨を発生する装置を使用し，検証した（図 55）。

図 55　雨天時吸気水浸入評価

14　あとがき

今回，新型 D-MAX の開発における代表的な性能試験について紹介してきたが，これ以外にも紹介しきれなかった数多くの試験によって鍛え上げられ，性能，品質は保証されている。

これらの膨大な量の試験を通して，新型 D-MAX が世界中のお客様に満足していただける商品に仕上がったと確信している。

今後も，市場での評価，お客様のご意見・ご要望を受けて，D-MAX を更によい商品にするよう磨きをかけ，育て上げていく所存である。

最後に，開発にあたってワーカム北海道株式会社をはじめとする開発関係者の多大な尽力があったことに謝意を表する。

著　　者

後藤　昌彦

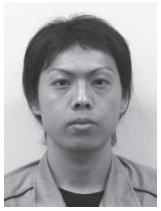
夏見　宏貴

小川　真也

小武　拓矢

五嶋　亮祐

村永　健太


柳　龍治

松本　哲士

加茂　元之

矢部　治貴

水島　昭博

渡邉　章

村上　俊介

宇多　純人

小出　高大

林　正裕

上野　真吾

南野　雄一

佃　洋喜

新型 ISUZU D-MAX の生産技術について

Manufacturing Engineering of New ISUZU D-MAX

永田　聡*
Satoru Nagata
山根　慎也*
Shinya Yamane
金子　司*
Tsukasa Kaneko
小林　拓也*
Takuya Kobayashi
塩田　克博*
Katsuhiro Shiota
吉田　啓行*
Hiroyuki Yoshida

要　旨

タイ事業体を取り巻く環境，タイでの人件費高騰と工場展開エリア不足，品質改善への取り組みに対し今後の競争力強化と合わせ次世代車両として最適な生産工法が求められる。

今回新型 D-MAX のモデルチェンジを契機とした各生産工程の課題を解説し生産技術としての対応を紹介する。

Abstract

In response to the environment surrounding the Thai business and soaring labor costs in Thailand, the shortage of factory areas, and quality improvement initiatives, Along with strengthening competitiveness in the future, an optimal production method for the next generation vehicle is required.

This time, we will explain each production process issue triggered by the new model change and introduce the correspondence as Manufacturing Engineering.

1　まえがき

新型 ISUZU D-MAX（以下，「新型 D-MAX」と略す）はモデルライフを通して通用する燃費・安全・NV（Noise Vibration）・R&H（Ride & Handling）のポテンシャル確保を目指し，車体骨格部材の結合強化による強度・剛性アップ，フレームサイドメンバの断面拡大及び先進安全装備の採用等が導入されている。これらへ対応すべく工法・設備を準備し立ち上げることとした。

1.1　次世代車両に対応した生産工法

車体ではいすゞで初となる 980 MPa 級の超ハイテン材のプレスと溶接に対応するための準備をフロントローディング段階から実施。車両としては欧州・豪州向けに先進安全装備が設定され検査方法を一から確立した。

1.2　品質改善への取り組み

新型 D-MAX では耐久・信頼性の向上の一環で防錆性能の目標品質が引き上げられ，既存の設備を最大限活用して品質を改良していく必要が有り，「従前車品質の解析→対策案の立案→実行」と Step を踏み目標品質を確保した。

2　プレス（超高張力鋼板部品内製生産への取り組み）

2.1　はじめに

車体軽量化による燃費向上及び衝突安全性能向上のため，ボデー骨格部品の薄板化，高剛性化の要求は年々高まっている。この相反する要求に応えるために鋼板材料の高強度化が進んでいる。新型 D-MAX では**図 1** に示す部位に 980 MPa 級高張力鋼板（以下，「超ハイテン材」と称す）が新規採用され，内製生産として B ピラーレインフォースに取り組むこととした。これまでに内製部品で採用された高張力鋼板は，590 MPa 級ハイテン材までであり，超ハイテン材を生産するにあたっては事前に種々の課題を解決していく必要があった。本章では量産化に向けた一連の取り組みについて紹介する。

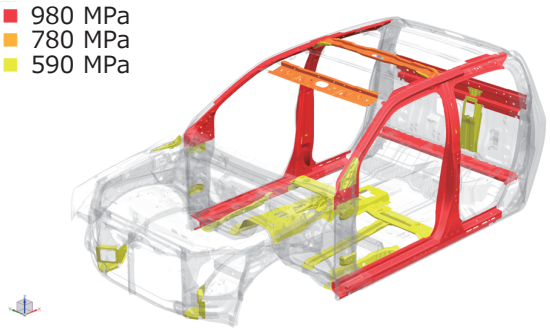


図 1　新型 D-MAX 超ハイテン材採用部位

*泰国いすゞ自動車㈱

2.2 内製生産への課題

鋼板材料は，その強度が高くなるにつれて降伏点が上昇し延性が低下する。一般的に利用される 270 MPa 級軟鋼板と比較し，超ハイテン材では降伏点強度が 4 倍となることでスプリングバックによる寸法精度が , 延性は 1/3 となることで成形性がそれぞれ悪化し，製品形状を作り出すことが難しくなる（**図 2**）。また，材料強度が高くなることにより金型構造，接触面の摩耗及び欠損，加工時の成形力の増大など生産性についても課題が発生する。

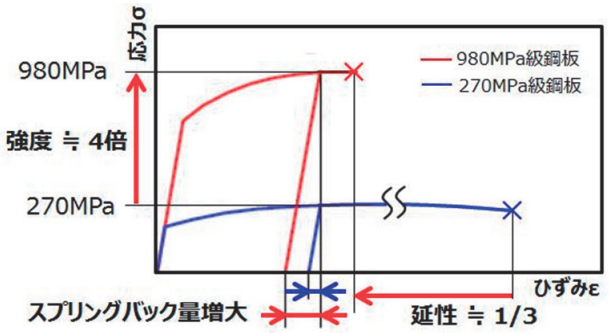


図 2　応力ひずみ線図比較

新型 D-MAX の開発開始に際してフロントローディング活動を通じた製品形状作りこみと量産金型仕様決定のために，超ハイテン用の①成形性評価標準，②設備制約を反映した工法計画，③金型耐久性検証の 3 つの課題について検討を行った。

2.2.1 CAE による成形性評価標準

プレス部品の成形性評価には CAE（Computer Aided Engineering）ツールとして板成形シミュレーションソフトが活用されている。今回新たに超ハイテン用の評価指標を整備するために，JFE スチール（株）様保有のラボ試験型及び従前車型の金型を用いた試験を実施した。供試材は 270～980 MPa 級の材料を準備し，材料強度と成形条件の違いによる影響を確認した。本結果を基に CAE 用超ハイテン評価標準を策定した（**図 3**, **図 4**）。

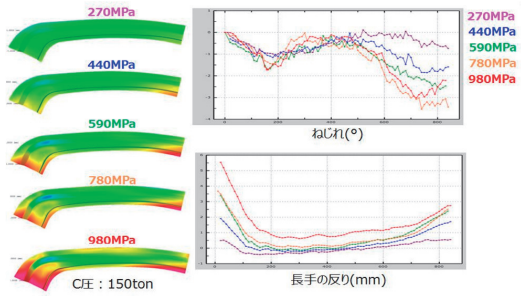


図 3　材料強度別寸法精度変化の例

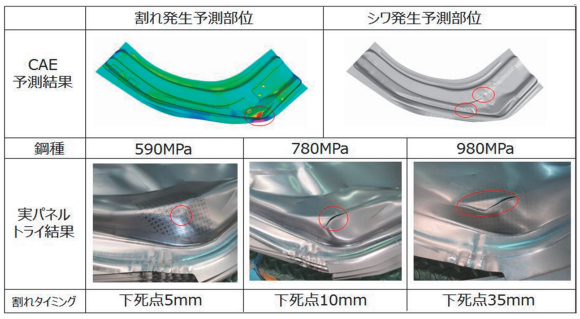


図 4　従前型（440 MPa 級）での成形性確認結果

2.2.2 工法計画

他社調査結果より多くの超ハイテン部品は 5 工程以上の金型を組み合わせて生産していることを確認している。一方で，内製生産を予定するプレスラインの設備制約上，金型は最大 4 工程での工程設計を行う必要があり，それを前提とし図面玉成を開始した。B ピラーレインフォースの工程設計事例を紹介する。

複雑な製品形状を得るために，鋼板に張力を付与しながら上下型にて全体形状出しを行うドロー成形を初工程，張力付与のための押さえ面の縁切りを第二工程，寸法精度矯正であるリストライクを第三工程，穴あけ及び再度の縁切りを第四工程とした。このとき，寸法精度不良への対策としてウエスト部上側の小曲率部位の引張応力緩和を狙い，圧縮応力を発生させるための形状を設定した（**図 5**）。

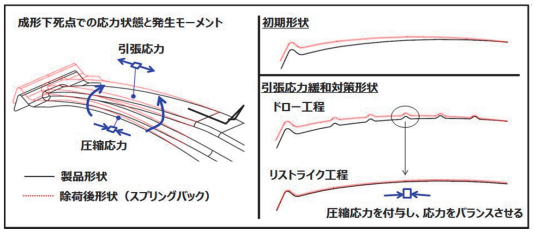


図 5　小曲率部の残留応力とバランス方法

2.2.3 金型耐久性の検証

材料強度が高くなることにより，金型表面には加工時に発生する高面圧によってかじりが発生する。一般的にハイテン材向け金型には合金工具鋼を焼入れの上，更に表面に硬化コーティングを施工するなど，かじり対策を施して耐久性を上げる。超ハイテン金型に最適なコーティング方法を検証するための耐久試験を実施した（**図 6**）。今回は低温での施工が可能な PVD（物理蒸着：Physical Vapor Deposition）と高温処理が必要だが高硬度が得られる VC（バナジウムカーバイド）処理を比較した。結果，硬度は劣るが工具の変形影響の少ない PVD コーティングの採用を決定した。

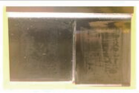
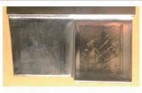
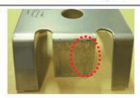
No.	1	2	3
表面処理	工具焼き入れのまま	PVDコーティング	VC処理
硬度（Hv）	700（HRC60）	2,800～3,200	3,200～3,800
金型（曲げ刃）			
パネル			
かじり	250枚でかじり発生	発生なし	発生なし

図 6　100,000 ショット耐久試験結果

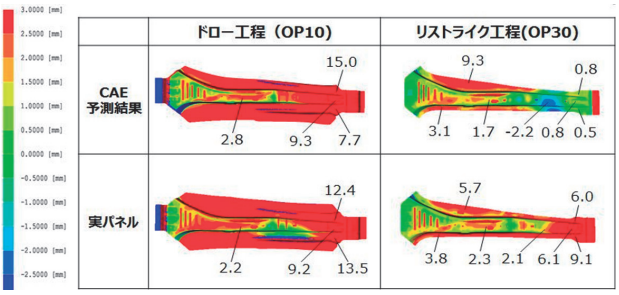


図 8　初回トライアウトでの寸法精度確認結果

2.3　金型製作段階

2.3.1　成形性の確認結果

CAE での図面作りこみ結果を開発試作車製作段階で確認するために，B ピラーレインフォースの試作型の製作を生産で担当した。**図 7** に実型での成形性確認結果を示す。CAE 検討段階から懸念があった A 部に割れ，B 及び C 部にしわが発生した。A 部割れの対策は製品形状の壁角度を変更し，B 部車両下側天板部しわの対策は先行押さえ機構をドロー型に追加して金型での対策とした。C 部フランジ面しわも余肉形状変更，流入抑制のためのドロービード形状を金型のしわ押さえ面に追加して工法での対策とした。

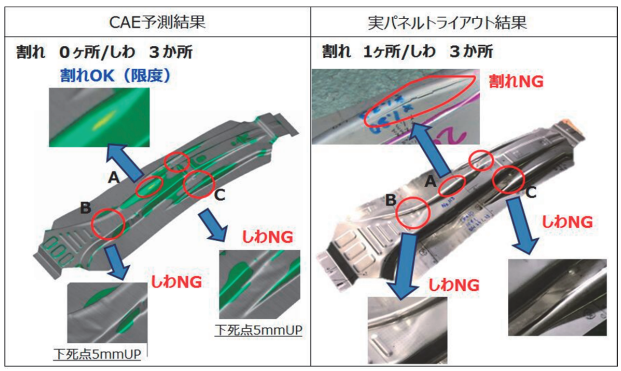


図 7　初回トライアウトでの成形性確認結果

2.3.2　寸法精度の確認結果

スプリングバックの測定結果を**図 8** に示す。試作型では応力緩和形状の効果を検証することに特化し，ドロー工程ではそのほかのスプリングバック対策は織込まずに金型を製作した。結果，ドロー工程では車両上側で最大 13.5 mm のスプリングバックが発生した。この後，リストライク工程にて応力緩和形状をつぶした結果，CAE では 1 mm 以内に収まるとの予想に対し，実パネルでは先端に最大 9.1 mm のスプリングバックとなった。

CAE と比較して実型での効果が少ないのは，実型では応力緩和形状が CAE のようにきれいにつぶせていないことが原因であった。本結果より，寸法精度不良対策はドロー形状にてスプリングバックを相殺する量を金型へ見込んで製作することとし，応力緩和形状はドロー工程からリストライク工程間での材料強度変動による寸法精度変化の対策とした。これらの検討確認結果を踏まえ量産型を製作した。

2.4　おわりに

今回内製部品としては初となる 980 MPa 級超ハイテン材部品の量産化に取り組んだ。結果として金型製作以降の寸法精度向上に対しトライ＆エラーにて多くの修正工数を費やすこととなったが，量産開始までに車両組立上必要な品質を達成することができた。今後は成形工程での成形性及び寸法精度確保のため更なる CAE 予測精度の向上，工程間変形を考慮した工程レイアウトの最適化に取り組む次第である。

最後に，本取り組みを進めるにあたり多大なるご協力をいただいた JFE スチール（株）様，（株）湘南ユニテック様，Thai International Die Making Co., Ltd 様，並びに関係各部の皆様に深くお礼申し上げます。

3　車体（メインボデーアセンブリ工法）

3.1　はじめに

新型 D-MAX では，従前車を超える安全性能を求められ，ボデーとしては骨格構造が変更された。本変更により M/B ASM（メインボデーアセンブリ）工法の刷新が必要になった。

3.2　従前車から新型車への構造変更

従前車 M/B ASM は，U/B ASM（アンダボデーアセンブリ），B/S ASM（ボデーサイドアセンブリ），RR OTR ASM（リヤアウタアセンブリ），ROOF ASM（ルーフアセンブリ）で構成されている（**図 9**）。

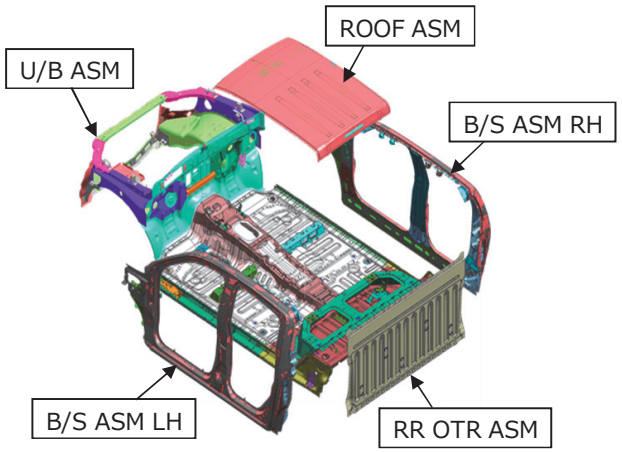


図 9　従前車 M/B ASM

新型車 M/B ASM は，ボデー骨格強化に伴い骨格を構成する部品同士を抵抗溶接により接合する構造になっている（**図 10**）。まず，U/B ASM，B/S ASM，RR OTR ASM，ROOF FRT HDR（ルーフフロントヘッダ），ROOF RR HDR（ルーフリヤヘッダ）を接合し（**図 11**），それに ROOF ASM を接合する構造（**図 12**）である。

この構造変更に伴い M/B ASM を 2 段階で接合する必要があり，接合工程を 2 工程に分割しなければならなくなった。

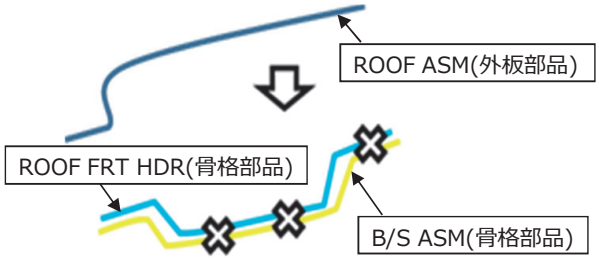


図 10　新型車接合構造（抵抗溶接接合）

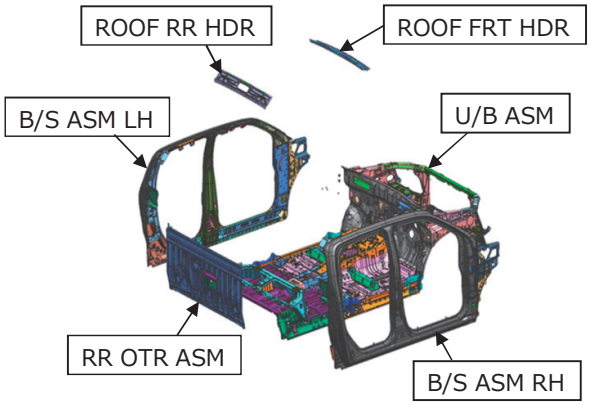


図 11　新型車 M/B ASM-1

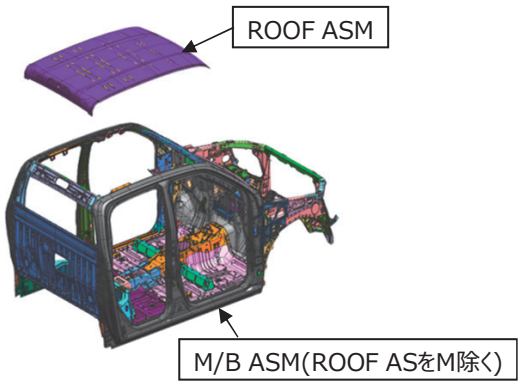


図 12　新型車 M/B ASM-2

3.3 M/B ASM 工法刷新

従前車では M/B ASM ラインの仮付け治具にセッタ方式（スライド治具）を採用していた（**図 13**）。構造上セッタ方式の仮付け治具は大きくなるため 2 つのデメリットがあった。

1) ロボットガンがアプローチできない溶接打点があるため，ダミーガン方式（ガンを治具内に埋め込む）による溶接を行っていた。この場合，人による溶接チップの研磨作業が必要になるため，自動ラインに定期的に人が入ることになり，生産性と安全性が低かった。
2) 骨格を構成する部品同士の接合部が袋構造になり，抵抗溶接接合ができない箇所があった。そのため，自動ラインから搬出後に人がリベット締結作業をボデーの中で行う必要があり，安全性が低かった。

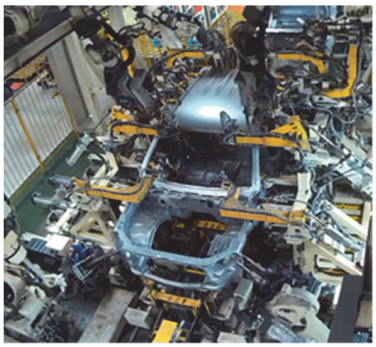


図 13　従前車仮付け治具（セッタ方式）

新型車では M/B の構造が変わったため，M/B ラインの仮付け工程を 2 工程に分割した。また，新型車では重厚なセッタ方式から簡素なロボットハンド方式に変更し，従前車におけるデメリットへの対策を行った。

1)　セッタ方式で必要だったスライド機構を廃止できたことで，ロボットガンですべての溶接打点へアプローチできるようになり，ダミーガンを全廃できた（**図 14**）。これにより，溶接チップの研磨作業を自動化し，従前車の生産ラインに対し生産性と安全性を向上できた。
2)　構造変更により袋構造を廃止できたことで，リベット締結をロボットガンによる抵抗溶接接合に置き換えることができ，人によるボデー内での作業を削減し安全性を向上できた。

また，リベットを廃止できたことで材料コストを削減できた。

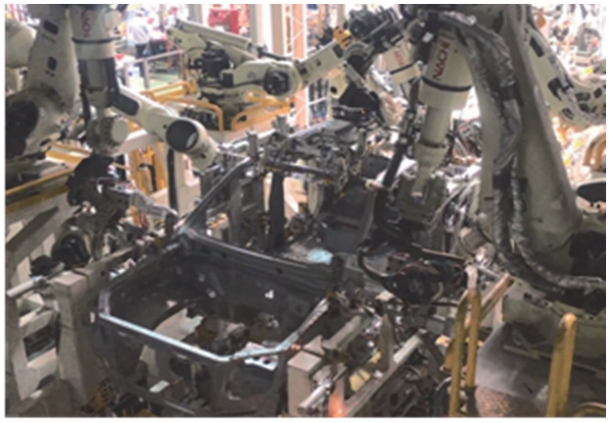


図 14　新型車仮付け治具
（ロボットハンド方式）

3.4　次期フルモデルチェンジに向けて

デザイン性と設計構造上，フルモデルチェンジの際に新旧型車間で仮付け治具の受け・クランプを共通化することは難しい。そのため，従前車で採用されたセッタ方式では，フルモデルチェンジの際に仮付け治具を流用使用するには大掛かりな改造が必要になる。そこで，車体工場ではフルモデルチェンジの際，新規エリアに新規ラインを展開する方策が一般的であった。

しかし，新型車 M/B ラインの仮付け治具をロボットハンド化したことで，ロボットハンドの付け替えにより次期フルモデルチェンジへの対応ができる見込みである。また，この新たな生産工法に取り組んだことで，新型車と次期車においてハンド切り替え方式による混流生産をできる可能性もある。

3.5　おわりに

新型車におけるボデーの構造変更を実現する ASM 工法及び生産ラインを構築することができた。

また次世代フルモデルチェンジを見据えた生産ラインを構築することができた。

4　フレーム（フレームひずみ抑制工法）

4.1　新型 D-MAX　サイドメンバ断面の拡大

図 15 に新型 D-MAX のフレームデザインを示した。新型 D-MAX のサイドメンバは，衝突安全性能向上と操縦安定性能向上を目的に従前車と比べ幅 +11 mm，高さ +15 mm 拡大された。サイドメンバの面積が増えたことで，取付け部品同士の合わせ面も大きく取られるようになった。これにより，溶接長さは従前車より 20 % 増加した（**図 16**）。

溶接量が従前車より増えたことで，組立時に発生するひずみを抑制する必要があった。ここでは従前車にてひずみによる不具合を改善させるため，ひずみ抑制を考慮し導入した新工法を中心に紹介する。

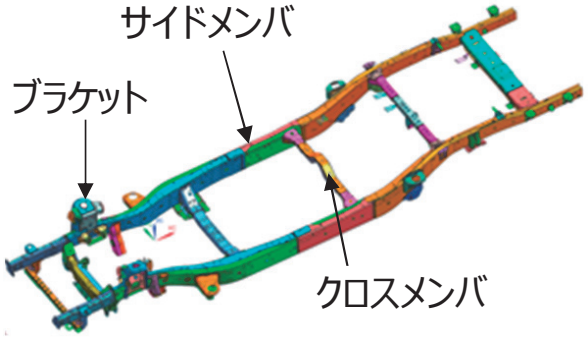


図 15　新型 D-MAX フレームデザイン

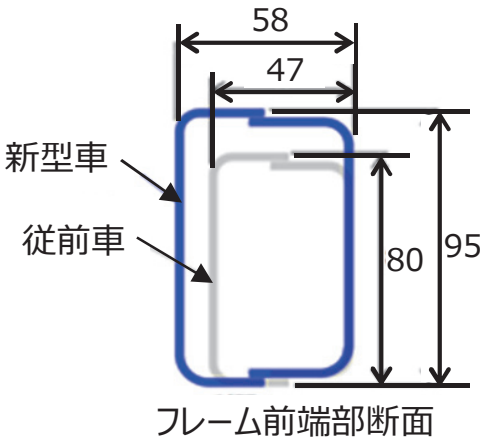


図 16　サイドメンバ サイズ比較

4.2　従前車の工法と問題点

4.2.1　従前車の工法

従前車では最初にサイドメンバにブラケットを溶接し取付ける（**図 17**）。この時の特徴として，取付けるブラケットは本溶接にて取付けられる。これにより，サブ組立て部品としていったんは完成した形となる。

図 17　従前車ブラケット取付け図

次に左右のサイドメンバをつなぎ合わせるため，クロスメンバを本溶接にて取付ける（図 18）。

これでモジュール部品として完成した形になる。

図 18　従前車クロスメンバ取付け図

4.2.2　従前車での問題点

① サイドメンバの溶接ひずみ

サイドメンバにブラケットを溶接する際，本溶接にて取付けているためひずみが発生していた。このひずみにより，各ブラケットの位置精度を安定させることが難しく課題であった（図 19）。

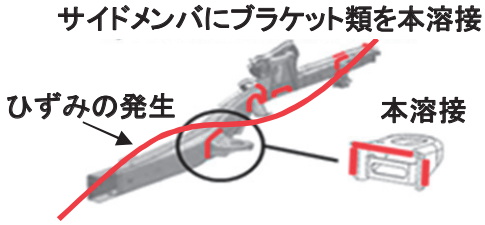


図 19　サイドメンバひずみイメージ

② モジュール組み幅の精度不具合

ひずみを持ったサイドメンバにクロスメンバを取付けても各部品精度が悪いため，フレーム組み幅を安定させることが困難であった（図 20）。

従前車のモジュール組み立てラインでも，ロボットによる本溶接工程を採用していた。しかし，サイドメンバのひずみにより溶接位置が変わることで発生する狙いずれ及び溶接外観不良といった修正箇所の削減が課題であった。特にサイドメンバ端部にあるブラケットの位置変化は大きく，治具調整による対策改善にも限界があった。そのため，修正工程での溶接の修正とオフラインでの油圧ジャッキによる組み幅精度矯正等を実施し出荷していた。

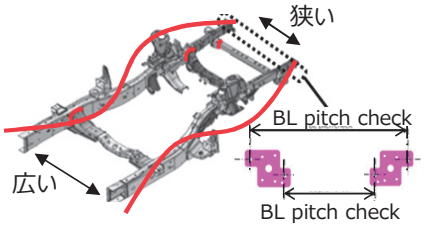


図 20　従前車モジュール品質イメージ

4.3　新型車の工法と改善点

4.3.1　新型車の工法

従前車同様，初工程でサイドメンバにブラケットを取付ける（図 21）。

サイドメンバへの熱ひずみを考慮し溶接長 10 mm の仮溶接までに留めた。そのため，サブ組立て部品としては完成形状ではなく暫定形状となる。品質を最優先にした工順として取り入れた。

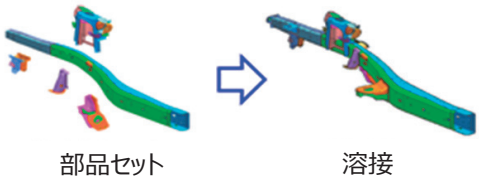


図 21　新型 D-MAX サブ組立

次のクロスメンバを取付ける工程にて，ブラケットとクロスメンバへ本溶接を実施する。

フロントモジュールに関しては，全溶接箇所を 3 工程に振り分けて溶接を実施している。

こうして,モジュール部品として完成させる（図 22）。

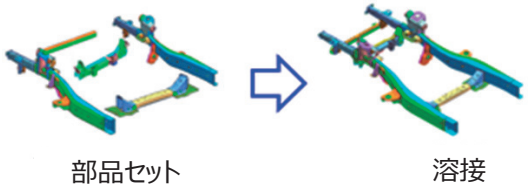


図 22　新型 D-MAX モジュール組立

4.3.2　新型車の改善点

① サイドメンバへの溶接ひずみ対策

従前車のようにサブ工程で本溶接を実施してしまうとひずみが発生し，この品質変化が後工程にて狙いずれ及び外観不良といった不具合の原因となる。そのため新工法では本溶接まで実施しない。

ブラケット取付け時は溶接長 10 mm の仮溶接を導入した。これにより，サイドメンバの熱量を削減しひずみを抑制した。仮溶接のため暫定形状とはなるが，各部品の位置は保証できているため問題はない（図 23）。

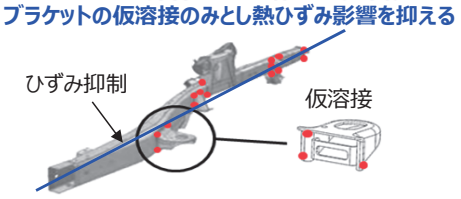


図 23　新型 D-MAX 仮溶接によるひずみ抑制

② モジュール組み幅精度対策

モジュール組立ては，熱ひずみを抑えられたサイドメンバに対しクロスメンバを同一工程にて本溶接を実施する。また，同時にブラケットへの本溶接も実施する。この時，サイドメンバに熱ひずみが発生してもクロスメンバがあるためフレーム組幅を保つことができる。溶接による熱ひずみは発生しようとするが，クロスメンバで熱ひずみを最小限に抑えることができるため，従前車で発生していた組み幅の悪化を最小限に抑えることを計った（図 24）。

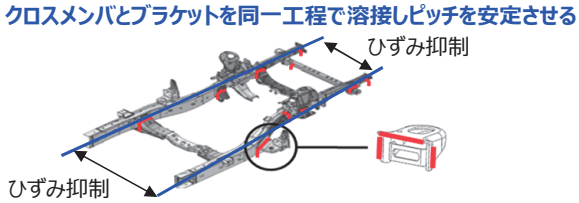


図 24　新工法での本溶接部位

4.4　品質玉成（フレーム精度）

新型 D-MAX にて新しい工法に変更したことより，モジュールの組み幅修正を必要とするフレーム修正率を大幅に下げることに成功した（図 25）。

従前車での修正率は 18 % あったが，新型車では 4 % に留めており修正率は 1/4 に削減することができた。

これは安定した品質でフレームを生産することが可能になったといえる。今回導入した新工法は，ロボット化されたラインに適した工法であるともいえる。

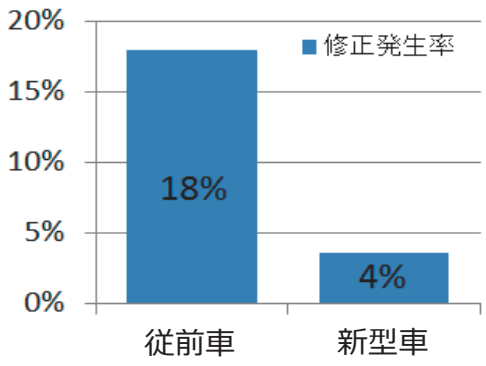


図 25　フレーム組み幅修正発生率

4.5　おわりに

設計玉成時から従前車含め過去 2 世代分の品質不具合発生ポイントを抑え，合わせ構造と組立て順を改善し図面へ反映してきた。結果，設備調整及び品質作り込みを計画通りに遂行でき，車両への不具合も最小限に留めることができた。

今後は新型 D-MAX 立上げで新たに発生した問題点を振り返り，改めて標準と確認項目を見直して次期モデルへとつなげていきたい。

5　塗装（フレーム塗装 泡ポケット対策）

5.1　はじめに

イギリス市場から回収した従前 D-MAX（10 年使用）の分解腐食調査によれば，フレームの錆が内部のエアポケットを起点として発生しているケースが多いことが分かった。このフレームに発生しているエアポケットは，当フレーム塗装ラインの量産開始当初から発生していることが報告されていた。その特徴は凸部に発生するものとは異なり泡が付着したような特異な形状をしており（以下「泡ポケット」と称す），通常のエアポケットに対する対策では解決を図れず，これまで効果的な改善策を見出すことができなかった。新型 D-MAX では，この泡ポケットの発生をゼロにするため，塗装工法の大幅な改善を試みたので紹介する。

5.2　泡ポケットの現状把握

5.2.1　泡ポケットとは

泡ポケットはフレームのインサイド（袋内）に直径 1～10 mm 程度の円状の電着塗装が成膜していない部分ができる現象であり，泡を転写したような特異な形状が特徴である（図 26）。

図 26　泡ポケット

5.2.2　泡ポケットの発生部位

通常のエアポケットの場合，**図 27** のように凸形状部に溜まったエアが抜けずに電着塗膜が未着となる現象であり，発生場所はある程度は予測ができる。

しかし，泡ポケットの場合はフレームのモジュール A，B，C 及びクロスメンバ全般にランダムに発生する（**図 28**）。

下流工程の制約上，車両状態とは反転方向で塗装されているので，この泡ポケット部は車両状態では下面になる。そのため水が溜まる部位が塗装不成膜ということになり，当然錆性能に対しては不利になる。

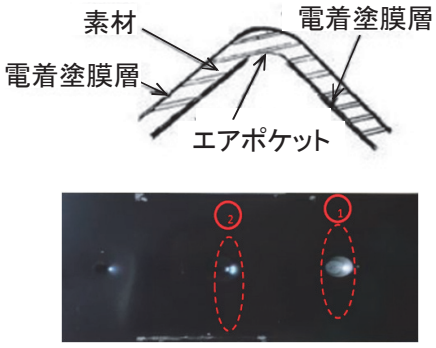


図 27 エアポケット

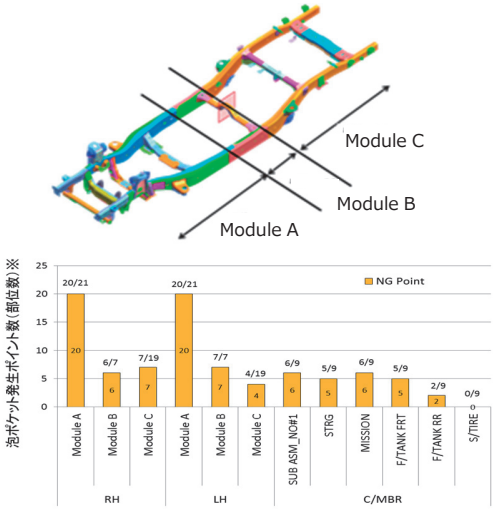


図 28　泡ポケット発生部位と発生数

5.2.3　泡ポケットが機能に与える影響

新型 D-MAX では穴あき錆，機能安全の保障期間が従来の 10 年から 12 年に延長される。また錆環境が非常に厳しいとされているロシアに展開されるということからも防錆性能を向上させなければならない。

泡ポケット部には電着塗装が成膜していないか非常に薄い状態であるため，この部位を起点に錆が進行し著しい機能低下に陥る懸念があり，対策は必須である。

5.3　泡ポケットの発生原因

5.3.1　脱脂不良によるクレータ

フレームの脱脂時に内部の脱脂が不十分で防錆油が残存し，その部分の化成処理，電着塗装がはじいてクレータ状の欠陥になったと推定した（**図 29**）。

泡ポケット部が油分によるクレータである場合，化成皮膜も形成されないと考えられる。それを確認するために，泡ポケット部に付着している物質の分析を行った。その結果，リンと亜鉛のピークが確認され，そのことから脱脂は十分になされており，化成皮膜は十分に形成していると判断した（**図 30**）。

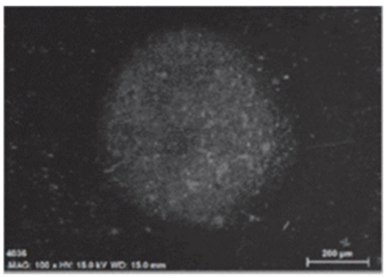


図 29　泡ポケット部の顕微鏡写真（× 512）

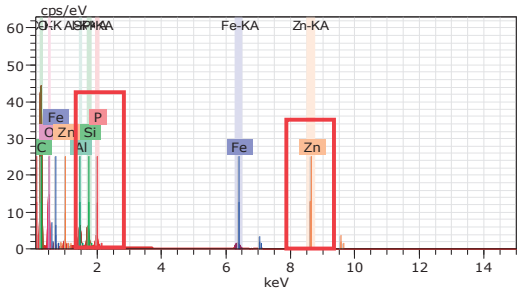


図 30　泡ポケット部の分析結果

5.3.2　発生泡のフレーム内部への巻き込み

フレームが電着槽に入出槽する際に槽内に大量の泡が発生する。電着塗料は化成処理薬剤などと比較すると樹脂分などを含むために粘度が高い。

そのため泡が発生しやすく，発生した泡がずっと液面に残存している（**図 31**）。

図 31　電着槽に残存する泡

泡ポケットの形状から考察すると，これらの泡がフレーム内部に巻き込まれ「泡跡」として残ったものと推定，対策を検討することとした。

5.4 泡ポケットの対策検討

5.4.1 泡ポケット対策の方向性

泡ポケットの発生をなくすためには，①泡の発生を抑制する，②発生した泡を消す，③巻き込んだ泡を塗膜が形成される前に排出する ことが必要である。

5.4.2 泡の発生抑制

泡の発生は入出槽時に巻き込むエアによるものであるので，入出槽時のスピードを遅くすることにより発生を抑えられないかと考え，入出槽のスピードを変更し確認を行った。しかし効果としては小さく，大幅に泡ポケットを減少させることはできなかった。

5.4.3 泡を消す

発生した泡を消す方法として，塗料に消泡剤を添加する方法がある。現状の塗料も少量添加されているが，添加量を増やしていくと塗料の凝集などの 2 次的な不具合となるため，容易に増やすことができない。

また，そのほかの消泡の方法として超音波を使用した方法がある（**図 32**）。しかし，ピンポイント部分の消泡であり，槽全体の消泡となると経験がなく，今回は検討から除外した。

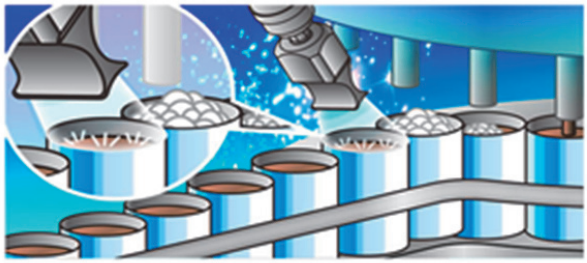


図 32　超音波による消泡

5.4.4 泡の排出

1) エア抜き穴の追加

エアポケットの対策と同様にエアの抜け穴を追加した。しかし巻き込まれた泡の位置がランダムであり，必ず同じ位置に発生する訳ではなく大幅な効果が得られなかった。また，構造的･強度的に穴を設定できる部位も限定される。

2) フレーム遥動角度の変更

巻き込まれた泡を抜くためにフレームの遥動角度の見直しを試みた。電着塗装時の槽内でのフレームの揺動はフロント 5 度，リヤ 7 度で設定していたものをフロント / リヤともに 7 度とした（**図 33**）。しかしこの対策でも大幅な効果が得られず（**図 34**），内部に巻き込まれた泡がほとんど動いていないことが分かった。

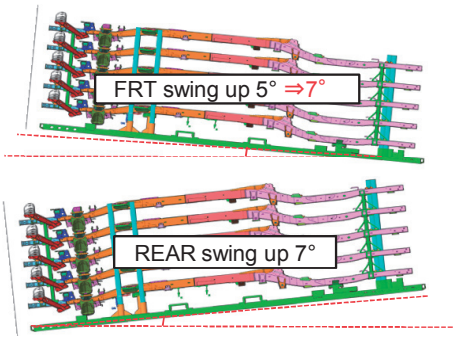


図 33　フレームの遥動角度

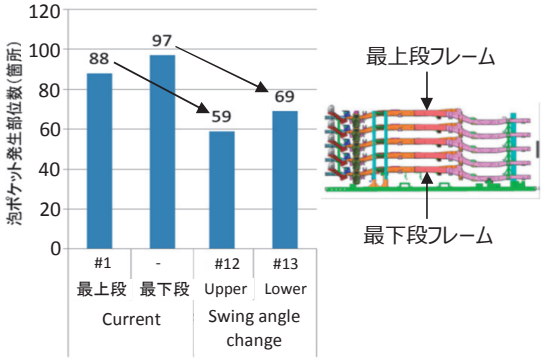


図 34　フレーム遥動角度変更による効果

巻き込まれた泡は内部断面上のアッパー側の表面に付着する。フレームの遥動により塗料は動くが，泡は表面張力が高く，また液体の流速は表面付近では遅くなるため泡に十分な力が加わらず泡が除去されない。

3) 流速のアップ

泡を除去するためには槽内の流速を上げなければならないと考えられるが，発生箇所が閉断面内であるので，撹拌ライザーの噴出圧力を上げたとしても内部の流速アップは期待できない。閉断面内の流速を上げるためには，やはりフレーム自体を大きく動かしてやる必要がある。そこで塗装中にフレームをいったん槽外に出して，その際の液が排出される力を利用して強制的に内部の泡を排出する。そして再度電着槽に入槽させて 1 回目にできた泡ポケット部に対して電着塗膜を成膜させるという方法である（電着槽への入出槽を 2 回行うので，以下「ダブルディッピング」と称す）。

このダブルディッピングで塗装を行い，効果を確認したところ，大幅に泡ポケットが減少することが分かった（**図 35**）。

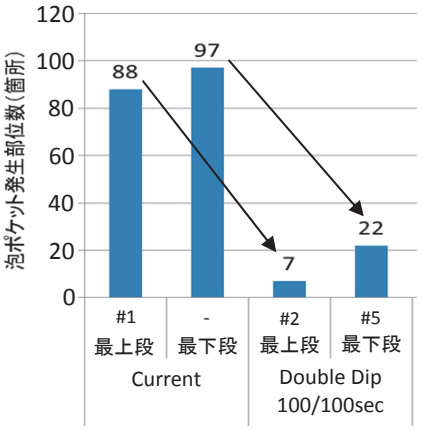


図 35　ダブルディッピングの効果

この検討結果により効果の見られた①フレームの遥動角度変更，②ダブルディッピングを組み合わせて織り込むこととした。エア抜き穴に関しては，効果が高かった部位に限定して追加することとした。

5.5　今後の課題

ダブルディッピングを行ったフレームの特徴としては「泡ポケット跡」が残る。2 回目のディッピング時に成膜していない泡ポケットの上から再度電着が成膜したものである（**図 36**）。この中には成膜はしているが，膜厚としては基準を満たしていないものがあり，通常膜厚の塗膜と比較すると錆びやすくなる。

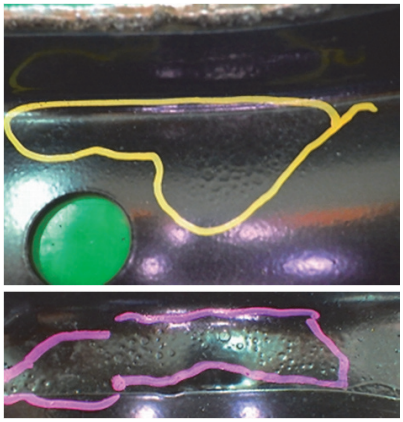


図 36　対策後の泡ポケット

新型 D-MAX のフレームを使用して最終確認を行ったところ，このような泡ポケット跡が少量残存していた。

特にモジュール A に残ったものについては，錆環境のシビアな欧州仕様に限りワックスを塗布することで対策することとした。従前モデルでは同部位（モジュール A）の付き回り性が悪かったが，新型 D-MAX では膜厚は確保することができた。

当該設備ではダブルディッピングを行ってもタクトタイムに制約があり，泡ポケット部に対して十分な成膜時間を確保することが難しく，このような泡ポケット跡をすべてなくすことは困難である。

今後，将来計画で設備のリニューアルを検討する際には，今回の問題点に留意して対策を織り込んでいかなければならない。

5.6　おわりに

今回の対策検討に当たり，泡ポケット部の成分分析及びエアポケットのシミュレーショントライアルにご協力いただいた THAI PARKERIZING 様並びに TOA-Shinto 様に深くお礼申し上げます。

6　総組立（新エレキアーキテクチャーへの対応）

6.1　はじめに

時代に合わせて最新の電子制御技術を取り入れるべく新型 D-MAX では，ほぼすべての車載 ECU（電子制御ユニット：Electronic Control Unit ）が一新され，それに合わせて生産設備もリニューアルする必要があった。更に新たな機能の追加と既存機能の電子制御化により，搭載される ECU が倍以上に増加することとなった（**図 37**）。

このため，プロジェクト立ち上げ当初から ECU に対する工場作業の工数増加，設備投資の増加，更に車両の複雑化による生産ラインでのトラブル発生と品質保証の確立に関して，生産側では懸念していた。今後ますます拡大する車両の電子制御化に対応してくべく，今回「フロントローディング」と「生産準備」の活動に取り組んだ。

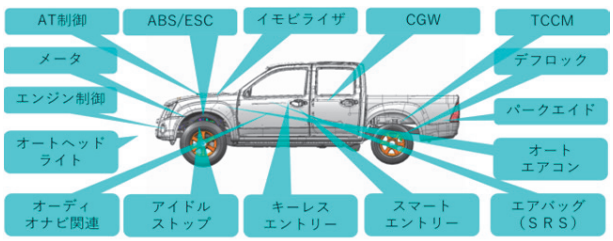


図 37　車両 ECU 制御対象概要

6.2　フロントローディング活動

倍増する車両の電子制御化に対応するためには，業務効率の向上は不可欠だった。自部署だけでなく，いすゞ全体として二度手間作業の排除と業務の標準化を進めながら，必要十分な品質保証を実現するため，関連部署と協力して「開発行為への参画」と「資料標準化推進」の活動を行った。

6.2.1　開発行為への参画

これまでの ECU 関連の生産設備準備では，開発からの情報提示を受けてから設備準備を開始し，車両のシステムが工場関係の機能に対応できた時点（通常ライン流し直前）で実 ECU の動作を確認していた。このため，生産側の確認が車両開発ほぼ完了のタイミングとなり，品質と量産性にかかわる車両側の修正が日程的に難しいことが度々発生していた。

この問題を解消するため，工場での問題及び改善項目，品質保証上必要な機能などを開発段階から車両仕様に盛り込む活動に取り組んだ。

実施に当たり，まず本活動が“良い車づくり”を目標としていることを関連部署で意識を共有した。その上で品質管理部署にも参画を促し，品質保証上，工場視点で必要な項目を盛り込んだ開発資料をシステムごとにとりまとめた。その後，ライン流し前に車両の修正が可能な日程を開発と調整し，各電子制御システムのベンチ評価に参画。開発行為の二度手間を避けつつ，車両仕様に生産要望が反映可能になるよう関連部署で業務スケジュールを調整した。

開発遅れなどで日程がずれ込むシステムもあったが，最終的には車両品質保証に必要な内容を関連部署で共有し，車両仕様に工場で生産・品質保証するために必要な機能を開発段階から車両仕様に盛り込むことに成功した。

6.2.2　資料標準化推進

電子制御の内容は技術的にかなり高度なものが多い。その上，開発情報として提示される製品仕様書も記載内容と形式に開発担当者ごとに差があるため，生産側で読解するにはかなりハードルが高い資料になっていた。

今回の新型 D-MAX では，開発側で進めていた ECU 通信内容の標準化の動きに沿う形で，今までばらばらだった工場で実施する各 ECU の通信内容・実施項目とその手順，そして製品仕様書の共通化にフロントローディング活動を通じて取り組んだ。

具体的には各開発担当と車両制御仕様を検討する中で，ある開発担当者のアイデアを他の開発担当者に展開し，全体で良いアイデアを共有しつつ最終的にまとめる製品仕様書の記載内容 / フォーマットなどを一つずつ合わせながら進めていった。

開発行為への参画含めフロントローディング活動では，最新技術の話とそれを実車に応用した場合の影響を開発部署と協議しながら進めた。 実現には開発側と生産側の見解の相違を埋めるため，システムごとに数回～十数回の会議と検証が必要だった。

最終的には本活動により一部の特殊なもの以外，多くの部分（概算 70 %）の実施内容を共通化することができた。

6.3　生産準備活動

ECU の刷新と大幅な増加を受けサーバからライン設備まで，すべての関連生産設備ソフトは刷新を余儀なくされた。これを逆にチャンスととらえ，今後の更なる車両電子制御化に対応していけるよう，**6.3.1～6.3.3 項**のような内容を盛り込みつつ生産システムを開発 / 導入した。

6.3.1　ECU 関連工場作業時間短縮

当初から ECU の増加と制御内容の高度化により，工場で実施する各ユニットへのデータ書き込み時間の大幅な増加が予想された。このため計画当初の段階では設備，作業工程の追加が必要な状態であった（単純計算で倍増なら 2 倍の設備が必要）。

この件に対して，前述のフロントローディング活動を通じ通信データから無駄部分を排除して ECU に書き込む方法を開発と生産でいっしょに考案した。これにより，理論上は既存と比較して 10 倍以上の速さでデータの書き込みが可能な方法を確立した。

更に既存設備で実施している内容を再分析・検討し，無駄な作業指示と設備上の不要な待ち時間を削除することで，1 つの ECU 当たりの設備所要時間を最大半分以下に短縮できた。

これらの取り組みにより，最終的に設備･作業工程を追加せずに新型 D-MAX への ECU データ書き込み / 検査設備を実現できた。

6.3.2　設備ソフト準備 MH 圧縮

ECU の増加を受け準備すべき設備ソフトも増加。これに伴う準備 MH（Man-Hour）の不足も懸念材料であった。

この問題に対しても，フロントローディング活動を通じて工場実施内容の共通化を推進し，まず ECU ごとの実施内容を共通化した。そして共通化を最大限に有効活用できるよう，従前生産設備で確立していたソフトの共通化に加え，ECU ごとに設定していた設備パラメータまで含めて流用可能な生産設備ソフトの作成に取り組んだ（**図 38**）。これにより 1 つの ECU 用に作成したソフト・設備パラメータまで流用して別 ECU の設備も作成可能となり，設備準備期間の大幅な圧縮に成功した。最終的に 60 % 程度のパラメータを共通で使用可能となり，予想 MH を下回る形で設備を準備することができた。

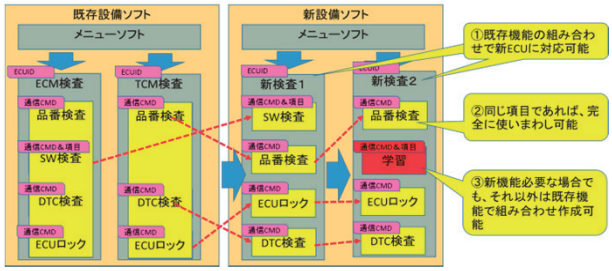


図 38　設備ソフト構成概念図

6.3.3　技術の現地化と継承

従前設備導入当初はライン設備ソフトのほぼすべてを日本支援者が作成 / 準備をしていた。その後，設備のポカヨケ機能などを現地スタッフにて準備してもらうなど，技術の現地化と継承を進めていた。今回更なる促進のため，ほぼすべての SRS（Supplemental Restraint System）のトレーサビリティ用端末に関して現地スタッフ主体で準備実施した。具体的にはベースとなるソフトを日本支援者が作成したあと，各工程に合わせたチューニングを現地スタッフが実施。いすゞタイ工場のすべての端末に関して導入から動作確認まで現地スタッフが対応した。現時点で新型 D-MAX・従前車含め SRS トレーサビリティデータの記録が問題なく行えるようになっている。これにより，今後泰国いすゞ自動車側で工程の変更などがあった場合でも，日本からの支援なしでも任意に SRS 関連部品の工程変更，設備改造可能なよう，技術の現地化・継承を実現できた。

6.4　今後の展開

今後の更なる車両制御技術の高度化を支えるためには，開発 / 生産技術 / 品質管理など部署を超えた活動が重要になってくると予想している。

また，電子制御に関する知識だけでなく車両そのものに関する知識がなければ，実際に制御された時の車両動作を具体的に理解できず，品質保証可能な工法を検討することができない。車両に対する幅広い知識の必要性と，ますます高度化する最新義技術に対応するため，生産技術担当として持たねばならないスキルも高度化していくことを痛感した。

直近の対応としては，今回開発したシステムをベースに，輸出車両と KD（Knock Down）工場用の ECU データの書き込み，検査ツールなどを開発していく予定である。この業務を通じて，これからのいすゞを支えていくであろう，現地スタッフへの技術継承と現地化（ECU 通信ソフトのスキルなど）を更に推進していきたい。

7　あとがき

ここまで生産技術の取り組み概要を紹介した。車体の新構造対応及び車両の安全装備検査対応等の各生産工程の課題を確実に対処したことが，新型 D-MAX を予定通り市場へ供給できたことにつながっている。また，新型 D-MAX ではいすゞ初となるサムロン工場・ゲートウェイ工場の 2 工場での同時立上げに取り組んだ。特にゲートウェイ工場は 3 ヶ月の短期間で新旧切替という厳しい条件の中で各生産工程が業務を工夫し，量産開始直前に起きた問題も生産部門一丸となって解決したことでこの難課題に対処することができた。

最後に新型 D-MAX の開発・生産準備・立上げ，そしてこの執筆にご協力いただいた多くの関係者の皆様に深く感謝致します。

著　　者

永田　聡

山根　慎也

金子　司

小林　拓也

塩田　克博

吉田　啓行

18 型エルフのシャシについて

The Chassis of MY '18 ELF

鈴木　隆元*
Takayuki Suzuki
矢野　健介*
Kensuke Yano
片桐　希*
Nozomi Katagiri
菅原　宏樹*
Hiroki Sugawara
岡部　哲治*
Tetsuji Okabe
徳武　将也*
Masaya Tokutake

要　旨

新 18 型エルフは，平成 28 年排出ガス規制に適合させるため，尿素 SCR 排出ガス浄化システムを国内向けエルフとして初めて搭載した。尿素水タンク等の新たな装置の搭載を可能としつつ，トラックとしての基本性能と架装性を満足させるため，シャシ部品の大幅な見直しを実施した。更には，車両重量の増加を抑制し，積載量を確保するために，GVW5 t 未満車専用シャシを開発するなど，大幅な軽量化を実現させた。

本稿では，これに関わるシャシ部品の開発概要を紹介する。

Abstract

In order to comply with the exhaust emission regulation in 2016, the new 18-model ELF is equipped with the urea SCR exhaust system for the first time as an ELF for domestic use. While enabling the installation of new equipment such as a urea water tank, the chassis components have been extensively reviewed to satisfy the basic performance and body installation of the truck. Furthermore, the special chassis for vehicles under GVW5 t has been developed, which has realized a significant weight reduction.

This paper introduces the development outline of chassis parts related to this.

1　はじめに

近年，先進安全装置の装着及び排出ガス規制等の対応法規が厳しくなる中，シャシに搭載する装置が増加し続けている。そのため，架装物を含めたレイアウトの成立と軽量化が，シャシ部品に対して強く要求されている。その要求に答えるため，今回のシャシ部品開発は，次の 4 つのシャシ部品を開発するとともに，車両レイアウトの大幅な見直しを行った。

- GVW（車両総重量：Gross Vehicle Weight）5 t 未満専用軽量フレーム
- 燃料タンク：省スペース化
- 尿素水タンク：最適容量化
- RUPD（後方車両突入防止装置：Rear Underrun Protection Device）：高強度材採用による軽量化

このようなフルモデルチェンジ並みの開発に対し，18 型エルフでは，新たな開発手法の導入及び市場情報の緻（ち）密な分析による必要スペックの検討などを行い，シャシ部品の開発を行った。

2　フレーム

2.1 開発の狙い

排出ガス規制対応による重量増リカバリのため，GVW5 t 未満車専用に新フレームを開発，更にフロントサスペンションと一体開発することで大幅な軽量化を狙った。**図 1** に新旧のフレーム展開を示す。従前車のフレームは GVW6.5 t までカバーしていたが，5 t 未満に限定し，更に GVW3.5 t でクラス最軽量を狙った開発を行った。

GVW5 t 未満車専用新フレームの開発は次の 4 つのコンセプトに基づき行った。

〔安全性〕　・市場から高く評価されている信頼耐久性の維持向上。
　　・衝突安全性の維持。
〔軽量化〕　調達性 / 生産性を鑑みながら高張力鋼板と閉断面構造を採用することで軽量化。
〔操縦安定性〕　新フレームと新サスペンションを一体開発することにより，操縦安定性の向上。
〔架装性〕　従前車同等以上の架装性を確保。

*シャシ設計第二部

以下にその開発内容を説明する。

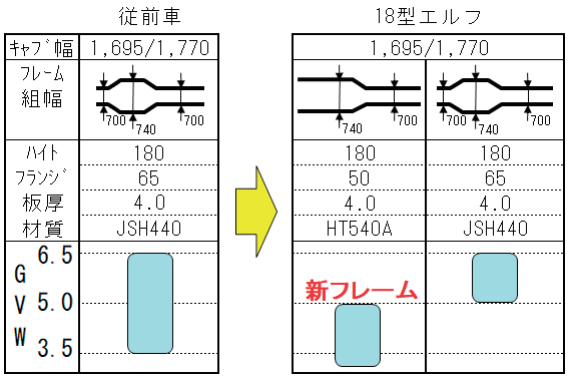


図 1　従前車と 18 型エルフのフレーム種類比較

2.2 軽量化と操縦安定性の両立

前周りの剛性が操縦安定性に大きく寄与するため，前周りに閉断面構造を採用し，軽量化と前周り剛性の確保を実現させた。新フロントサスペンションと一体開発することで（サス変更詳細は別頁“18 型エルフのサスペンション”を参照），サスペンションからの上下入力をサイドメンバのせん断中心に合わせ，操縦安定性を向上させた（**図 2**）。

更に，操縦安定性への寄与度が低い後周りについては，サイドメンバに 540 MPa 級高張力鋼板採用することで信頼耐久性を維持しつつフランジ巾を縮小した。これらにより，フレーム重量として 30 kg の軽量化を達成しつつ，操縦安定性向上を実現した。

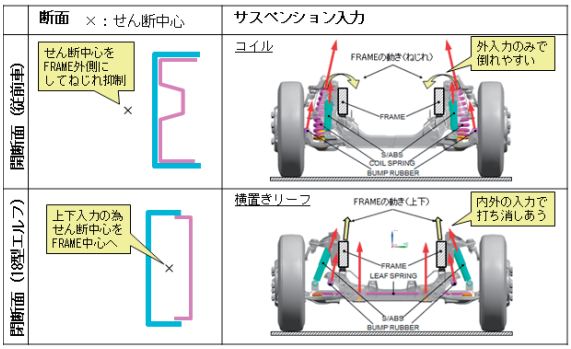


図 2　補強構造変更

2.3 衝突安全性能

衝突安全性能については，エネルギーを吸収させる部位と変形させない部位，及び変形モードをコントロールする部位を明確にし，それぞれの部位が最適となるような断面とするため，分割構造を採用した。変形させる区間が長いと圧壊せず横折れになり衝撃吸収率が低くなるが，短いとサイドメンバの負荷が増え，2nd クロスメンバ以降が変形しやすいことを考慮し，2nd クロスメンバ前で分割することとした。

1st～2nd クロスメンバ間をエネルギー吸収部位とし，メインのサイドメンバに対し材質を 780 MPa 級とし板厚を薄くし，ノッチ形状を入れることで確実に圧壊する位置を作った。更に，下側のみ先端延長することで上面から縦折れしていた変形モードに対し，下面側に荷重を伝えることで縦折れを抑制した。

従前車は一体構造であったため，変形させない部位に追加の補強が必要であったが，新フレームでは分割構造を採用することにより前周りの変形をコントロールし，相対的に 2nd クロスメンバより後側の剛性強度を持たせ補強を少なくすることで，軽量化と衝突安全性の維持を両立させた（**図 3，4**）。

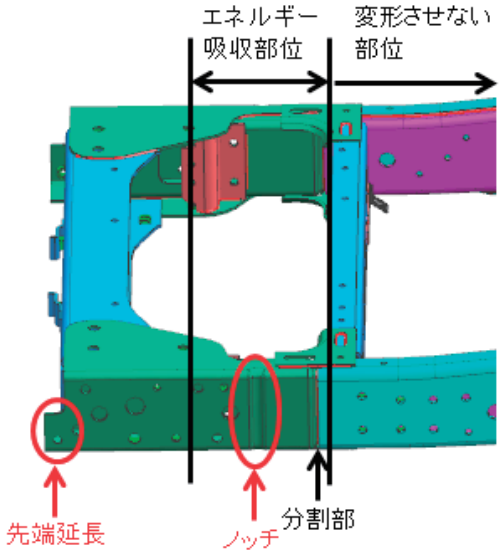


図 3　分割構造

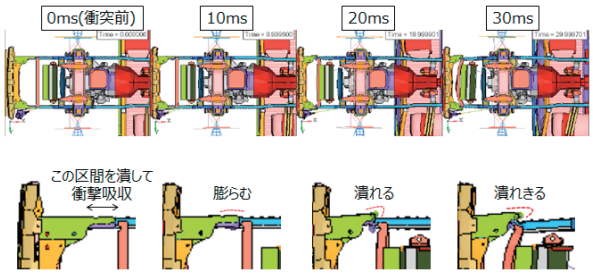


図 4　衝突変形モード

2.4 架装の搭載性維持向上

架装性（U-BOLT 設置）の改善と，配線・配管の配策性改善を狙い，3rd クロスメンバのサイドメンバ取付け部の統一を行った。これまで，3rd クロスメンバは，トランスミッション，MT/AMT の違い，FW（flywheel）/PTO（Power Take-off）の有無によるトランスミッションマウント位置違いに対して，クロスメンバ位置を変えることで対応してきた。

新フレームでは，前周りを閉断面化することで，捩り剛性に対する 3rd クロスメンバの寄与率を下げ，クロスメンバの小型化を実現させた。更にトランスミッションマウントの位置違いに対して，クロスメンバを弓型にし，前後反転で使用するとともに，マウント組付け部を別体ブラケット溶接構造とすることでマウント位置違いを吸収する構造とした。

これにより，クロスメンバのサイドメンバへの接合部を統一，最小化を行い，U-BOLT 設置スペースの確保，更には配線配管の配策パターンの共通化を可能とした（**図 5**）。

閉断面構造採用により，フレーム内側スペースに配線配管が配策され，従前車と同等の架装性を確保する必要があるため，補強部品を凹形状とすることにより配策スペースを設けた。

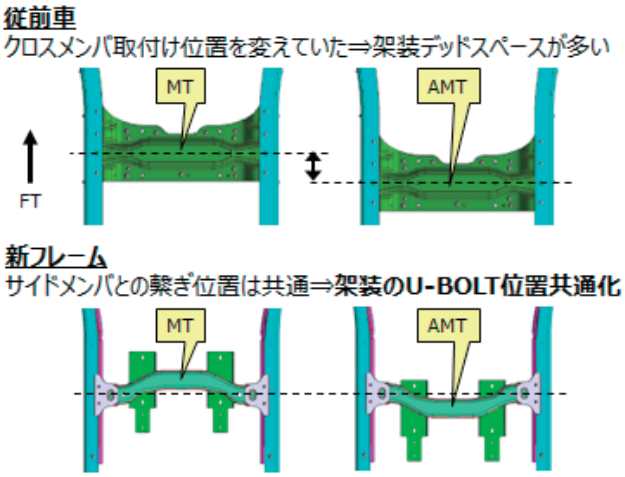


図 5　架装性

2.5　動的解析

異常振動の一つに，フレーム曲げ共振を介してキャブが振動する現象がある。この異常振動を収めるためには，フレーム曲げ剛性を上げる必要があるが，従前車では実車走行試験のみで造り込みを行っていた。新フレーム開発では，異常振動有無を実車走行試験実施前に評価するため，フレーム周波数応答解析を用い（**図 6**），実車走行で異常振動が発生する周波数を導き出すことで，動的縦曲げ剛性の目標値を決定した。更に，異常振動が発生する際はフレーム中央部が大きく変位するモードになっていることも分かった。

これにより，剛性向上に着目すべき部位と剛性目標値が明確になり，剛性の過不足による構造見直しが不要となる新しい開発手法を取り入れることができた。

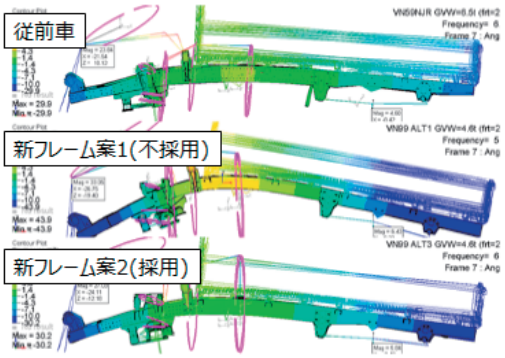


図 6　動的解析

2.6　モジュールホールの継承

シャシ部品及び架装取り付けブラケット類の標準化，架装工事の簡素化を目的とし，モジュールホールを 07 型エルフ / フォワードより採用した。今回，新フレームにおいても同様のモジュールホールを採用することで，従前車及び他車型との部品の共通化を可能とした。

3　燃料タンクについて

18 型エルフでは，平成 28 年排出ガス規制対応により尿素 SCR（選択的触媒還元：Selective Catalytic Reduction）システムを採用したため，フレーム外側に尿素水タンクが追加され燃料タンクの設置可能なスペースが大幅に減少した。また，保安基準第 15 条への，国際連合規則「車両火災の防止に関する協定規則（第 34 号）」適用により，燃料タンクを新作し対応した。

3.1　燃料タンク設置スペース減少について

商用車の特性上，さまざまな架装への対応が必要であり，特に短いホイールベースの車両は，架装との間の限られたスペースを限界まで使用して燃料タンクを設定していた（**図 7**）。18 型エルフからは，尿素水タンクの設定が必要となったため，同じスペースに，尿素水タンクと燃料タンクを設定する必要が生じた（**図 8**）。

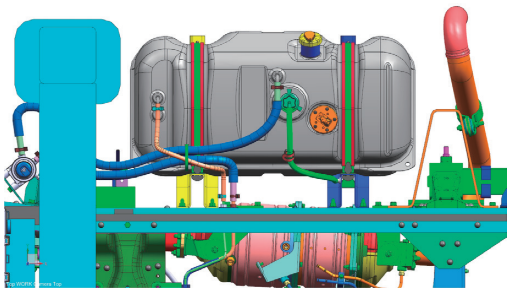


図 7　従前車の燃料タンク周りレイアウト

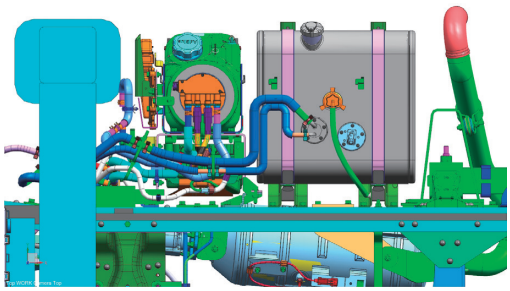
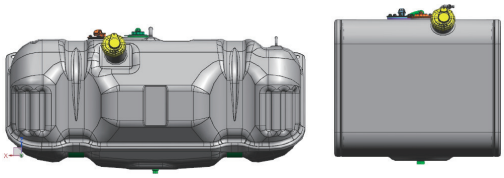


図 8　18 型エルフの燃料タンク周りレイアウト

3.2 燃料タンク構造の変更について

従来型の燃料タンクは，上下 2 分割されたタンクボディをシーム溶接で接合する「モナカ型」を採用していたが，前述の通り，設置スペースが減少したため形状変更の必要が生じた。モナカ型燃料タンクは，プレス型による成形のため形状変更が容易ではなく別のプレス型が必要となることに加え，車型ごとに燃料タンクの設置スペースの大きさが異なることから，燃料タンクの構造を，プレス型が不要で燃料タンク全長の変更が容易な「巻き型」に変更した（図 9）。



＜モナカ型＞　　＜巻き型＞

図 9　燃料タンク構造について

巻き型燃料タンクの設計にあたっては，尿素水タンク設定により燃料容量が失われるため，限られたスペースで最大限の容量を確保すべく，タンク断面の拡大を行った。また，一部の燃料タンクにおいては，燃料タンク前後面のエンドプレートの溶接方式をシーム溶接からアーク溶接に変え反転させ，元々デッドスペースだったエンドプレートの内側の容積分の燃料を使えるようにした（図 10）。

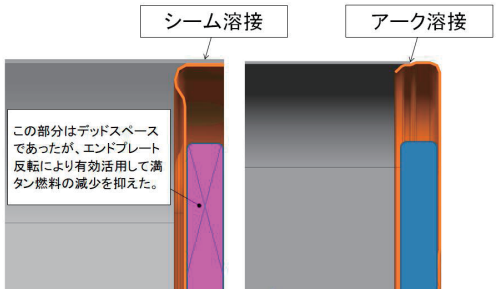
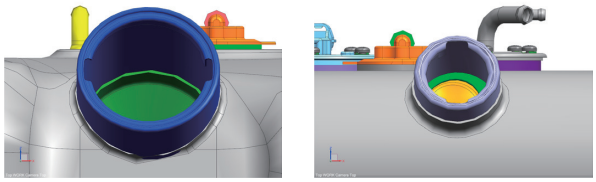


図 10　エンドプレート反転の効果について

3.3 保安基準第 15 条改訂対応について

保安基準第 15 条への，国際連合規則「車両火災の防止に関する協定規則（第 34 号）」適用に対し，燃料キャップ付け忘れ時に過剰な燃料漏れを防ぐ設計機能が求められた。これまでも欧州法規対象国の燃料タンクには給油フィラー内部にフラップを設定することで法規対応していたが，欧州法規対象国向けの燃料タンクは大口径のフィラーのみの設定であったため，国内向けとして，小口径フィラー用のフラップ開発を行った（図 11）。



＜大径フィラー＞　　＜小径フィラー＞

図 11　燃料タンクフィラーの種類について

フラップ開発にあたり，小径フィラーのフラップは，ねじりコイルバネによる開閉機構を採用した（図 12）。これは，大径フィラー用のフラップは薄板バネを用い開閉する構造（図 13）を用いていたのに対し，小径フィラーはフラップ設定可能スペースが少なく，開閉部の曲げ半径を大きく取ることができないこと，更にフィラーをタンクボディにアーク溶接する際の熱影響による強度耐久性の課題があったためである。

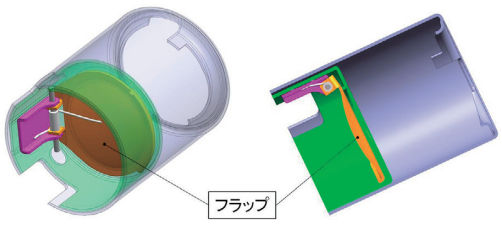


図 12　小径フィラー用フラップ

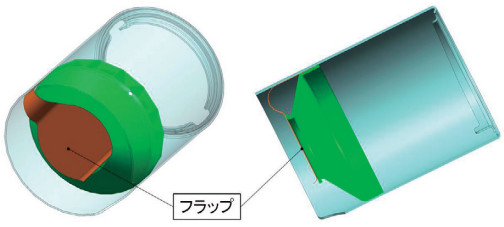


図 13　大径フィラー用フラップ

また，新作した小径フラップの開閉のためのヒンジは給油ガンの側面となるようにした。これは，給油時に給油ガンからの加重が直接ヒンジ部に加わらないように考慮したためである（**図 14**）。

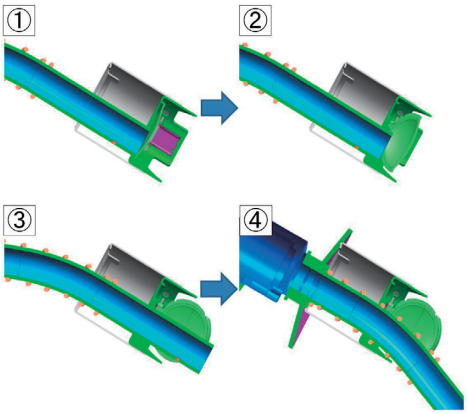


図 14　新フラップの給油ガン挿入軌跡

4　尿素水タンク

18 型エルフでは新しく尿素 SCR システムを導入させるため，架装性と利便性への影響を最小とするよう尿素水タンクを開発した。

タンク材質には，既に尿素 SCR システムを採用済みであるいすゞギガ･フォワードと同様に，限られたスペースでの容量確保と軽量化を狙い，成形自由度の高い樹脂製（高密度ポリエチレン）を引き続き採用した。

タンク容量は，大型化すると重量増と架装性が低くなる一方，小型化すると尿素水補充頻度が増え利便性が低くなるという背反関係にある。18 型エルフではいすゞ独自の MIMAMORI システムを活用し，車型・架装別に航続距離及びエンジン負荷などの使われ方を分析・分類し，タンク容量を決定した。車両レイアウトの厳しいショートホイールベース車型及び，架装性を重視したい特装架装車型については小型の 10 L を，航続距離が長く車両レイアウトに余裕のあるロングホイールベース車型には大型の 14 L の 2 種類のタンクを設定することで，架装性と利便性を両立させた。

タンク固定方法は，非 SCR システム搭載車との組立作業工数平準化を狙い，尿素供給ユニット（サプライモジュール，ドージングコントロールユニット）とタンクを一体化し，アッセンブリ搭載できるブラケット構成とした。またタンクを搭載するタンクブラケットと，車両レイアウト違いを吸収するスペーサーブラケットの組み合わせとすることで，さまざまな車両レイアウトに対応させながら部品種類数の増加を抑えた。更には一体化により尿素水タンク占有スペースが最小化でき，架装性向上にも貢献した（**図 15**）。

図 15　尿素水タンク

車両へのタンク搭載位置は，給水の利便性を考慮し燃料タンクと同一側とした（一部車型を除く）。また塵芥車架装等で要望のある排気管出口の車両側方向きに対応するタンクレイアウトも用意し，商品性向上を図っている。

5　RUPD 本体の超高張力鋼板（980 MPa）採用

5.1　概要

18 型エルフの GVW7 t 車両では，万が一乗用車が後方から追突した際にトラックの下に潜り込む重大事故を防止する RUPD が搭載されている。この本体の材質として，いすゞの国内小型トラックで初となる超高張力鋼板（980 MPa）を採用した。

RUPD 性能は欧州法規の UN-R58.02 を基準にした国内法規の保安基準第 18 条の 2 に適合させている。

従前の GVW7 t 車両の RUPD 本体においては，GVW5 t 用 RUPD 本体で採用している 490 MPa の中空角材に，L 字補強を追加する仕様としている（**図 16**）。これにより 5 t 用 RUPD 本体と基本断面の共通化を可能としているが，重量とコストの面では最適設計ができているとはいえない。これを解決するために超高張力鋼板を採用することで薄肉化と L 字補強の廃止を実施し，従前と比較して最大で約 5 kg の軽量化と大幅なコストダウンを実現した。

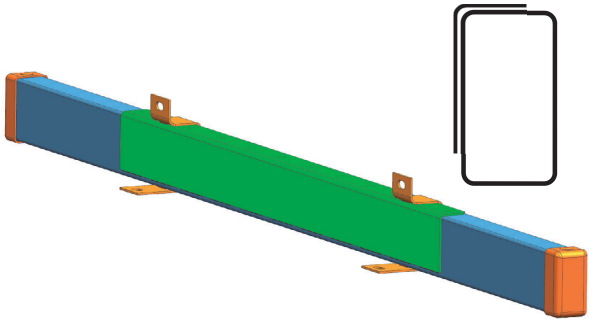


図 16　従前の 7 t 用 RUPD

5.2 鋼材採用

超高張力鋼板採用にあたり，遅れ破壊耐性確認と溶接品質確保の二つの課題がある。

超高張力鋼板は，引張強度が 1000 MPa 付近から遅れ破壊が発生する懸念がある。今回 980 MPa 鋼材を RUPD 本体に採用するにあたり，二段階に分けて遅れ破壊の検証を行った。

第一段階としてテストピースで遅れ破壊の発生条件の洗い出しを目的に水素チャージ試験を実施した。

第二段階として RUPD 本体に 980 MPa 鋼材を採用しても遅れ破壊について問題ないことを確認する目的で実機での遅れ破壊促進試験を行った。

次に，溶接品質についても確認を行った。試作品を作成して 980 MPa 鋼材を溶接した場合の溶接状態を確認し，溶接割れなどの溶接不良の発生がないことを検証した。この結果より，超高張力鋼板の溶接仕様を決定した。

5.3 設計検討

RUPD 本体の構造としては，コの字に成型した鋼材の内側に対となるコの字鋼材を重ね合わせた単純なモナカ構造とし，この内部に補強としてコの字の鋼材をブラケット固定部付近に追加した（**図 17**）。単純なコの字鋼材のみの組み合わせで RUPD 本体を構成することにより，高強度鋼での成型の難易度を低減することに成功し，超高張力鋼板での RUPD を実現した。

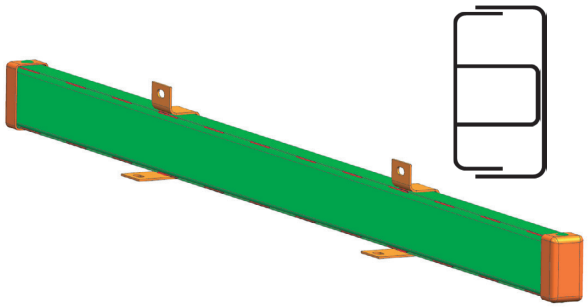


図 17　18 型エルフの 7 t 用 RUPD

また，RUPD は車両後方から目視されやすい位置に設置しているため，従前の RUPD では L 字補強の溶接部に溶接スラグが発生するため，見栄え改善の課題があった。そこで，今回の構造変更により L 字補強を廃止することで後方から目視できる溶接部分を削減した。

RUPD の固定方法は，他の GVW の RUPD 仕様と車両組み付け構造を共通化する目的で従前と同一の RUPD ブラケットによる固定とした。このことで変更部位を RUPD 本体のみとし，最小の変更部品で対応した。

本章で述べた検討結果をもとに，RUPD 本体の材質に超高張力鋼板を採用可能と判断し，軽量化とコストダウンを実現した。

6　おわりに

今回のような開発を行うことで，18 型エルフのシャシは，高いレベルで商品性及び架装性といったお客様の期待に応えられるものとなったと確信している。

多くのシャシ部品開発を短期間で行った，今回の 18 型エルフの開発を完遂できたのは，評価部署，生産部門関係者並びに協力企業の方々の協力の賜物であり，この場を借りて御礼申し上げます。

著　者

鈴木　隆元

矢野　健介

片桐　希

菅原　宏樹

岡部　哲治

徳武　将也

18 型エルフのサスペンション・ステアリングについて

Suspension and Steering System of MY '18 ELF

岩崎　哲弥*
Tetsuya Iwasaki

伊藤　淳史*
Atsushi Ito

加藤　恭平*
Kyouhei Kato

要　旨

いすゞ 18 型エルフの機構装置は更なる快適性･安全性･経済性の向上を目的として，新型式のサスペンション及びステアリングの開発を行った。

本稿において，それらの特徴と技術概要を紹介する。

Abstract

The MY '18 ELF's Suspension and Steering was developed with the purpose of improving comfort as well as technology of safety and economy.

This article provides an overview of these features and technologies.

1　はじめに

18 型エルフのサスペンション及びステアリングは，お客様から信頼と好評をいただいている従前車の基本性能を基に，

- 多様化するドライバに受け入れられる性能
- GVW5.0 t 未満の車型に対し燃費及び積載量に大きく影響する軽量化
- 経済性向上のための徹底した部品削減／構造変更

などを行い，次世代トラックにふさわしい最適な装置として開発を行った。

以下にその概要を紹介する。

2　サスペンション

GVW（車両総重量：Gross Vehicle Weight）5.0 t 未満，積載量 2.0 t 以下をターゲットに，最適化設計を行った。

2.1　フロントサスペンション

従来型で定評があり高い信頼性と耐久性を実証したダブルウィッシュボーン式インデペンデントサスペンションを継承しつつ，車型・架装の展開に制約を設け構造最適化とサスペンションクロスメンバ及びサスペンションリンクに高強度材料を採用することで 20 kg の軽量化及び構成部品点数 10 % 削減での低コスト化を図った（**図 1**）。また，トラックに乗り慣れていないドライバでも思い通りに運転できる操縦安定性，フラットな乗り心地を狙い開発を行った。

(1)　スプリング形式

スプリング形式は，フレームの軽量化も可能となるよう，トランスバースリーフスプリング式を採用。従来のコイルスプリング式は，スプリング，ショックアブソーバ，バンプラバーがすべてフレーム外側に配置されており，フレームへの入力はねじり入力となるため補強が必要となり重量増加の要因となる。一方，トランスバースリーフスプリング式は，スプリングはフレーム内側，ショックアブソーバ，バンプラバーはフレーム外側からの入力となり，内外で入力を分割することでフレームへの入力は縦曲げ入力とすることで追加補強が不要となり，フレームの軽量化を実現した（**図 2**）。

また，トランスバースリーフスプリングによるスタビライザ効果により，ソフト感を確保しつつ高いロール剛性を確保した（**図 3**）。

図 1　フロントサスペンション

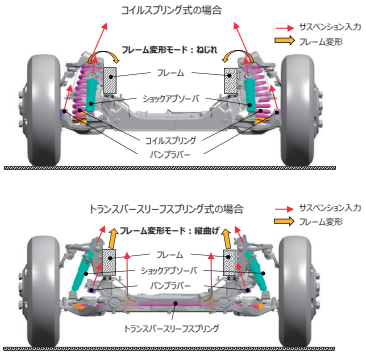


図 2　スプリング形式によるフレーム変形モードの違い

*車両設計第二部

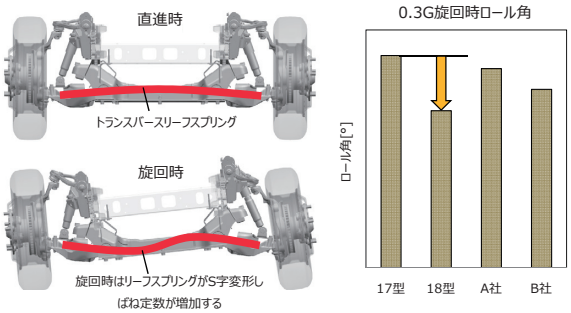


図 3　トランスバースリーフスプリングのスタビライザ効果

(2)　ジオメトリ

サスペンションリンクの配置を見直し，フラットな乗り心地を実現させた。

- アンチダイブジオメトリの適正化によるピッチング及びノーズダイブ低減（**図 4**）
- アクスルステア特性をバンプ後方変位化し，突起乗り越し時のタイヤ入力を減らすことでハーシュネスショック低減（**図 5**）

操縦安定性については，キャスタ角を増加させ，直進安定性を向上させた。

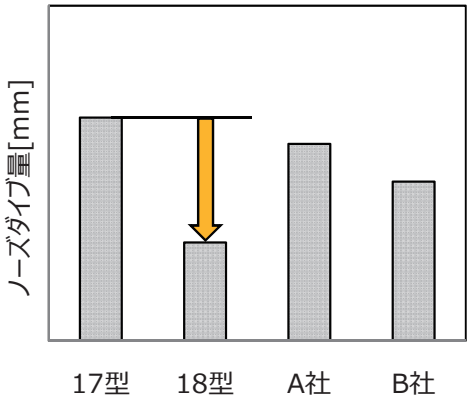


図 4　0.3 G[1] 制動時のノーズダイブ量

注 [1] 頻度の高い 0.3 G での比較，G は重力加速度（1 G=9.8 m/s^2）

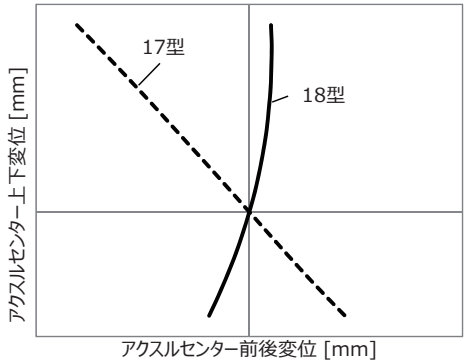


図 5　アクスルステア特性

(3)　サスペンションリンク

アッパーリンクにおいては，フルクラムピンを使用した車両取付け構造から，ボルトナット締結への構造変更及び形状最適化により 7.2 kg の軽量化を達成した。

ロワリンクにおいては，形状最適化及び高強度高靭性材料の採用により 3.8 kg の軽量化を達成した（**図 6**）。

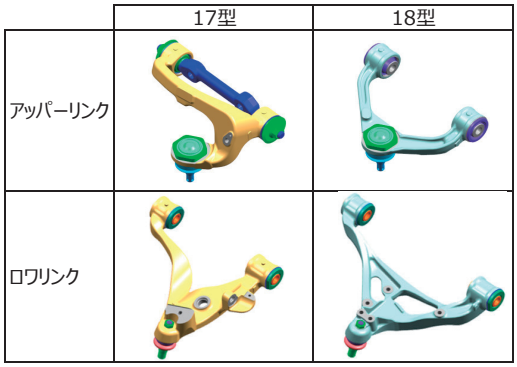


図 6　サスペンションリンク形状

サスペンションアライメント調整機構はシム方式からカム方式に変更し，構造の簡素化と調整作業の改善を図った（**図 7**）。

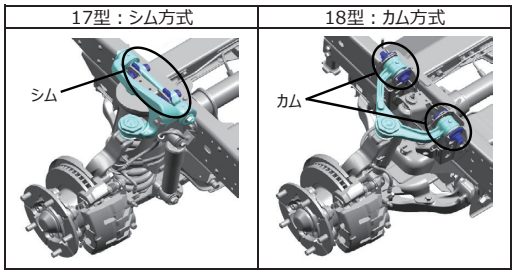


図 7　アライメント調整機構

(4)　ショックアブソーバ

フラットで快適な乗り心地を実現するため，ショックアブソーバの配置を見直し減衰効率を向上させた。また，効率向上により減衰力を低く設定することが可能となり，ピストンサイズの小径化による軽量化，コストダウンを実施した（**図 8**）。

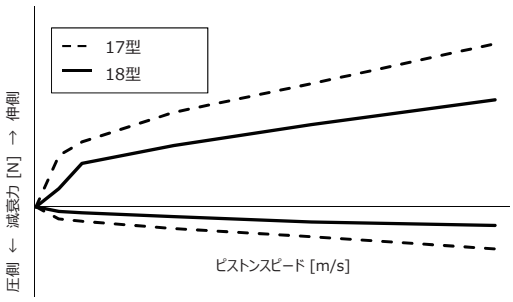


図 8　ショックアブソーバ減衰力

2.2 リヤサスペンション

従来より実績のある縦置きリーフスプリング式を踏襲した。フラットロー車及びシングルタイヤ車においては，リーフスプリングスパンを 1200 mm から 1100 mm に短縮し，更にテーパリーフスプリング化によりリーフ枚数を低減し，フラットロー車で 10 kg，シングルタイヤ車で 25 kg の軽量化を達成した（**図 9**）。

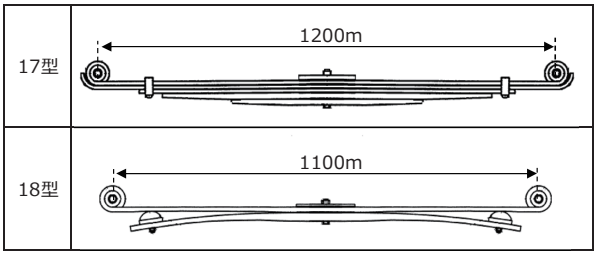


図 9　リヤリーフスプリング形状

また，アンダースラング車型においては，ブッシュとシャックルプレートとの間に適切な隙間を設け，ブッシュのねじり方向ばね定数を低減し突き上げ感を減少させ乗り心地の改良を行った（**図 10**）。

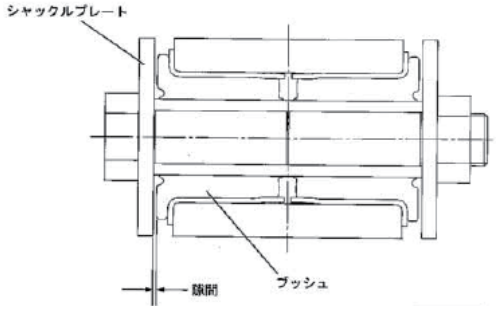


図 10　乗り心地改良ブッシュ

3　ステアリング

18 型エルフのステアリングはサスペンション同様，ターゲットは GVW5.0 t 未満，積載量 2.0 t 以下とし，従来型よりダブルウィッシュボーン式インデペンデントサスペンションで採用され実績あるラックアンドピニオンタイプのステアリングシステムをベースに，小回り性の改善，操作性向上，軽量化を狙いタイヤ切れ角とオーバーオールギヤレシオ，ステアリング入出力特性，取付け構造を変更した（**図 11**）。

タイヤ切れ角は，ステアリングユニットのラックストロークを拡大することで増加させ，最小回転半径を縮小した。更に，オーバーオールギヤレシオを 17 型以前のエルフより小さくし，乗用車ライクな操作性と小回り性にすることで，普通免許で運転できる GVW 5.0 t 未満車の多様なドライバに対応できるようにした。

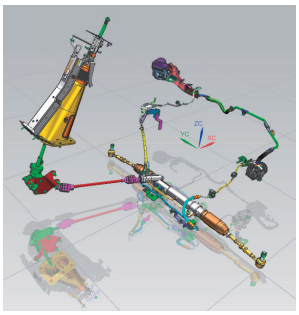


図 11　ステアリングシステム

3.1 パワーステアリングポンプ

パワーステアリングポンプは，4JZ1 エンジンに合わせたレイアウトに変更し，燃費低減効果のある 17 型エルフと同仕様の実績ある可変容量ポンプを採用した（**図 12**）。

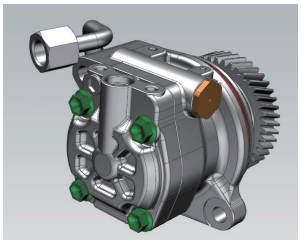


図 12　パワーステアリングポンプ

3.2 ステアリングユニット

ステアリングユニットは，17 型エルフのステアリング入出力特性に対して，アシスト開始までの入力トルクを増加させることで，取り回し時の操舵力は変えず直進時の操作性を向上させた（**図 13**）。また，トランスバースリーフスプリングレイアウトに対応し，軽量化と組立性の両立を図るため，マウント形状を変更した（**図 14**）。マウントの固定は，2 つ穴プレートとボルト 2 本を一体化させたプレートスタッドに変更することで，部品点数の削減及び組立性の向上を図った（**図 15**）。

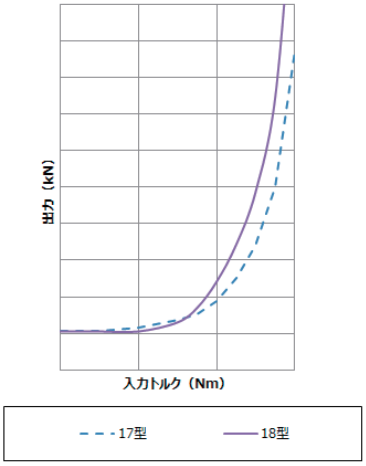
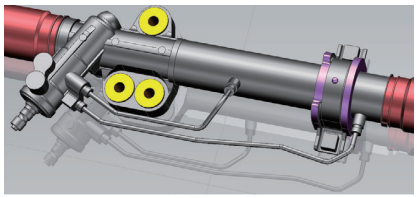


図 13　ステアリング入出力特性



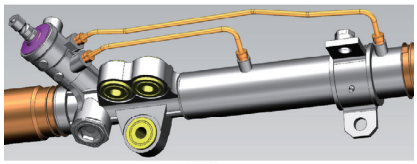


図 14　ステアリングユニット

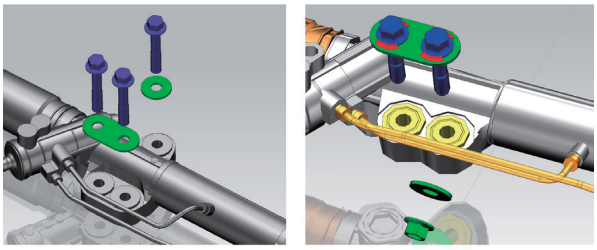


図 15　プレートスタッド

3.3　ステアリングマウントブラケット

ステアリングマウントブラケットは，軽量化と組立性の両立を図るため，ステアリングユニットのマウント締結を一部サスペンションクロスメンバに設けた。これにより操舵入力に対し取り付け部からのモーメントアームを低減することができ，ステアリングマウントブラケットの軽量化につなげることができた。

また，ステアリングマウントブラケットの締結本数を削減させ，スタッドボルトを設けることで，作業工数の削減を実現した。更にステアリングマウントブラケットは強度解析により，構造／形状最適化を行うことで，従来のステアリング剛性を維持しつつ軽量化につなげることができた（**図 16**）。

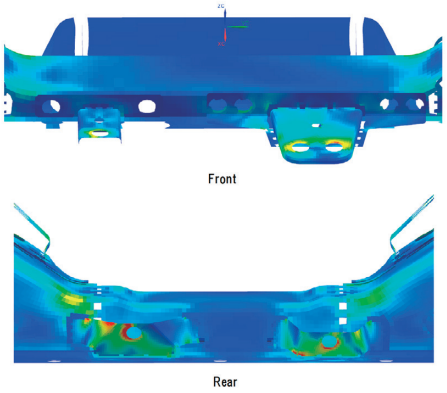


図 16　ステアリングマウントブラケット解析結果

3.4　反転ギヤブラケット

17 型以前のエルフではキャブ違いによるフレームのフロントオーバーハング仕様差に対して，ジョイントの角速度変動を考慮し反転ギヤブラケット形状を変更していたが，18 型エルフではジョイント角速度変動の見直しを行い，反転ギヤブラケット及び取付け構造をキャブ仕様に関係なく共通化した。また，軽量クロージングフレームの GVW に合わせたステアリング入力による強度解析を実施し，軽量化を図った（**図 17**）。

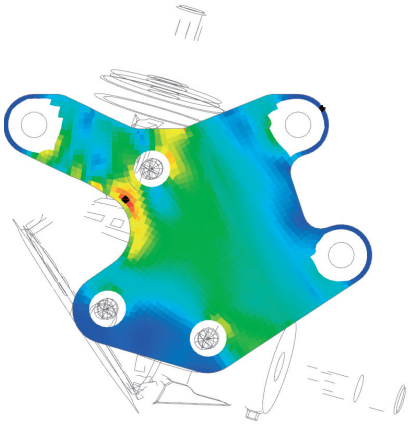


図 17　反転ギヤブラケット解析結果

4　おわりに

以上，18 型エルフにおけるサスペンション及びステアリングの概要を紹介した。

今回のモデルチェンジにあたり，従来に増して品質の造り込みを行い，信頼性の追求を成しえた結果，あらゆるお客様の信頼に応えることができたと自負している。

これは，御協力いただいたサプライヤ殿，開発・生産・購買，関係各位のおかげであり，この場をお借りしてお礼申し上げる次第です。

今後も企業理念である

『「運ぶ」を支え，信頼されるパートナーとして豊かな暮らし創りに貢献します。』

を目標に研究開発を推進する所存です。

著　者

岩崎　哲弥

伊藤　淳史

加藤　恭平

18 型エルフのステレオカメラを使った AEBS

AEBS with Stereo Camera of MY '18 ELF

池田　真悟*
Shingo Ikeda
島　高志*
Takashi Shima
本田　拓也*
Takuya Honda
相馬　峻祐**
Shunsuke Souma
東條　智一*
Tomokazu Toujou
伏江　俊祐*
Shunsuke Fushie

要　旨

18 年モデルのエルフには，商用車で初となるステレオカメラ方式による AEBS 機能を搭載した。

本稿では，ステレオカメラ方式による AEBS 開発概要を紹介する。

Abstract

The 18-year-model-ELF is equipped with AEBS function using a stereo camera system, which is the first in a commercial vehicle.

The outline of AEBS development of the stereo camera is explained.

1　はじめに

昭和 20 年代後半から 40 年代半ばころまで車社会化の急速な進展に対し，交通安全施設が不足していたことに加え，車両の安全性を確保するための技術が未発達であったことなどから，道路交通事故の死者数が著しく増加していた。そこで，交通安全対策の総合的かつ計画的な推進を図るため，交通安全対策基本法が昭和 45 年に制定され，平成 28 年 3 月には，平成 28 年度～平成 32 年度の 5 年間の行動目標が，第 10 次交通安全基本計画として作成された。

その中で，世界一の道路交通を実現するため，24 時間以内の交通事故死者数を 2,500 人以下とすることを目標に掲げた。そして，新たな視点として交通事故が起きにくい環境を作るため，主に保安基準の拡充・強化が施策の方針であり，重視すべき事項として先端技術の活用推進がうた(謳)われている。具体的には，AEBS（衝突被害軽減ブレーキ：Advanced Emergency Braking System）等，市場化された技術の義務化も含まれている。

2019 年現在，大型トラックの AEBS は既に義務化され商品化が進んでいるものの，小型トラックでは義務化されていないが，更なる安全性向上のため小型トラックに最適な AEBS を商品化した。

18 型エルフでは，事故分析及び他社ベンチマークを行い，市街地走行の多い小型トラックに最適な AEBS を追求し，ステレオカメラを採用した。ここでは，ステレオカメラを採用するまでの開発経緯を紹介する。

2　小型トラックに最適な AEBS 開発

2.1 開発の狙い

小型トラックに最適な AEBS システムを検討するにあたり，まずはトラックの事故実態分析を行った。

図 1 に，大型トラックと小型トラックの事故形態のまとめを示す。この図から，小型トラックは，大型トラックとは異なり，歩行者・自転車との事故が多いことがわかった。また，平均車速も 38 km/h と大型トラックの 70 km/h よりも低く，主に市街地を走行していることがわかった。

大型トラックの AEBS は，大きな相対速度で直線的に衝突する事故に確実に反応できるよう，遠方からの認識開始と遠くからブレーキを作動するシステムが必要である。一方，小型トラックの AEBS は，比較的小さな相対速度で多様な衝突形態に対して確実に衝突を判定できる認識システムが必要とされることがわかった。

これらの客観的事実をもとに，歩行者・自転車との事故被害軽減を重視し，衝突形態の特性を考慮した AEBS の開発に着手した。

*AS システム開発部　　**車両審査実験第一部

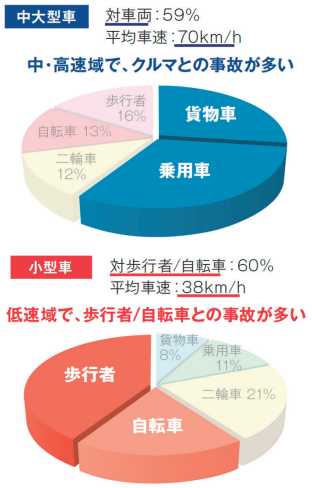


図 1　大型車・小型車事故率
（ITARDA[1] データによる　いすゞ事故分析）

注 [1]　ITARDA（交通事故総合分析センター：Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis）

2.2　システムの採用検討

小型トラックの AEBS の開発にあたり，最先端の AEBS を搭載した市販乗用車両のベンチマークを実施した。

ベンチマーク車両は，5 台 4 方式を選んだ。

① A 社　単眼カメラ＋ミリ波レーダ
② B 社　単眼カメラ＋ミリ波レーダ
③ C 社　ステレオカメラ
④ D 社　ステレオカメラ＋ミリ波レーダ
⑤ E 社　単眼カメラ

ベンチマーク内容は，テストコース内での対車両と歩行者に対する EuroNCAP[2] 相当の衝突回避試験（**表 1**）と，当時夜間の衝突試験は実施されていなかったが，夜間の認識性能を確認するために，自車配光のみ（外部照明なし）の同条件での衝突試験を実施した。

また，車両ごとに市街地走行確認 350 km 主要国道と高速道路走行確認 3100 km の 3450 km/ 台の実路走行試験を実施し不要な警報と自動ブレーキの作動の確認も行った。

テストコースでのベンチマーク試験により，衝突回避性能（検知の早さ及び正確性）は次のような結果となった。

昼間 EuroNCAP 相当試験

④　＝　③　＞＞　①　＞　②　＞＞　⑤

夜間 EuroNCAP 相当試験

④　＝　③　＞＞　①　＝　②　＞＞＞　⑤

ステレオカメラを搭載した車両が非常に高い衝突回避性能を示し，特に夜間の性能差は著しく歩行者の検知に優れていた。

実路での走行確認は次のような結果はとなった。

④　＝　③　＞＞　①　＝　②　＞＞＞　⑤

ステレオカメラを採用する車両に関しては不要な警報と自動ブレーキは確認されず優れた性能を持つことが確認された。（試験結果一部抜粋は**表 2** 参照）

更に，単眼カメラ＋ミリ波レーダ採用の認識プロト車両とステレオカメラ採用の認識プロト車両を仕立て，テストコースと実路での認識性能試験を行った。その結果，前方の障害物を直接立体視により，自車両と位置関係のラップ量を含め正確に認識できることが分かり，ステレオカメラの採用を決定した。

表 1　EuroNCAP 試験シナリオ

試験シナリオ	自車両	前方車両/歩行者
CCRs	10～50km/hで一定速走行	前方車両が停車状態
CCRm	30～70km/hで一定速走行	前方車両が低速走行
CCRb	50km/hで一定速走行	前方車両が減速
CVFA	10～60km/hで一定速走行	遠い側の路側から歩行者（大人）が走って横断
CVNA	10～60km/hで一定速走行	近い側の路側から歩行者（大人）が歩いて横断
CVNC	10～60km/hで一定速走行	駐車車両の陰から歩行者（子供）が飛び出し

※最新の EuroNCAP シナリオでは，次のとおり名称が変わっているが試験方法は変わっていない。

CVFA　→　CPFA-50
CVNA75 %　→　CPNA-75
CVNA25 %　→　CPNA-25
CVNC　→　CPNA-50

表 2　ベンチマーク試験結果（一部抜粋）

車両		A	C
システム		ミリ波レーダ 単眼カメラ	ミリ波レーダ ステレオカメラ
試験シナリオ	試験速度（km/h）	○：衝突回避 △：被害軽減 ×：作動せず	
CCRs	10	○	○
	20	○	○
	30	○	○
	40	△	○
	50	△	○
CVNA	10	×	×
	20	△	○
	30	○	○
	40	△	○
	50	△	○
	60	△	△

車両		D	E
システム		ステレオカメラ	単眼カメラ
試験シナリオ	試験速度（km/h）	○：衝突回避 △：被害軽減 ×：作動せず	
CCRs	10	○	○
	20	○	○
	30	○	○
	40	○	○
	50	○	○
CVNA	10	×	×
	20	△	△
	30	○	△
	40	○	△
	50	○	△
	60	△	×

注 [2]　EuroNCAP（ヨーロッパ新車アセスメントプログラム：The European New Car Assessment Programme）

2.3 搭載検討

18 型エルフで開発する AEBS に搭載するデバイスはステレオカメラで決定となったが，ステレオカメラの搭載位置に課題があった。通常カメラは**図 2** 上段に示すとおり，天井付近に搭載するのが一般である。しかし，乗用車のようにフロントウィンドウ上部にステレオカメラを設置すると，ボンネットのないエルフの場合，直前の子供のような背の低い歩行者の認識が難しい，という課題がある。

これを解決するには，ステレオカメラをインストルメントパネル（以下「インパネ」と略す）の上に設置すればよい。**図 2** 下段に示すとおり，インパネの上に設置することで，より車に接近している子供でも検知することが可能となる。

なお，子供の身長は EuroNCAP で規定されている 115 cm で検討を行った。この数値は総務省統計局発行「日本の統計 2017」の小学 1 年生女児身長データと同等である。

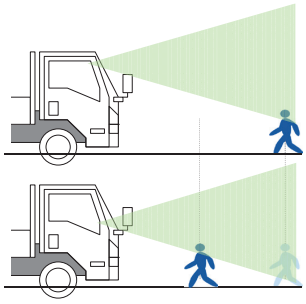


図 2　ステレオカメラ設置位置による検知範囲

単純にステレオカメラの設置位置をインパネにすると，今度はステレオカメラの検知範囲にエルフのワイパがあることがわかった（**図 3** 参照）。

そこで，ワイパ設計の専門部署の協力を得て，18 型エルフではワイパの停止位置を更に下げることで，限界までステレオカメラの設置位置を低くする対応を行った。

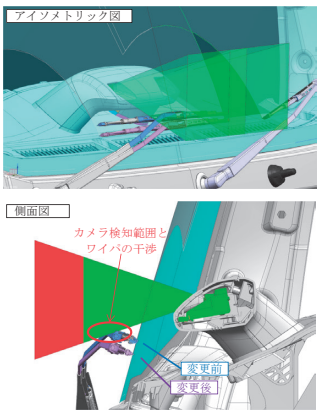


図 3　ワイパとステレオカメラ検知範囲

2.4 AEBS 制御タイミング検討

ステレオカメラの搭載位置が決定したため，次はいよいよ制御タイミングの検討である。AEBS 開発の目的は事故の低減であるため，事故分析結果から対応したいシーン（例えば自車の速度及び相手車両の速度，歩行者速度等。これらをユースケースと呼ぶ）の抽出を行う。ユースケースが決まれば自動ブレーキの性能から，制御すべきタイミングは物理量のため一意に狙いを決めることが可能となる。

加えて，商用車固有の課題として，不要な作動でお客様の大切な荷物に損傷を与えないことも挙げられる。エルフの安全装置開発時に掲げたコンセプトを**図 4** に示す。

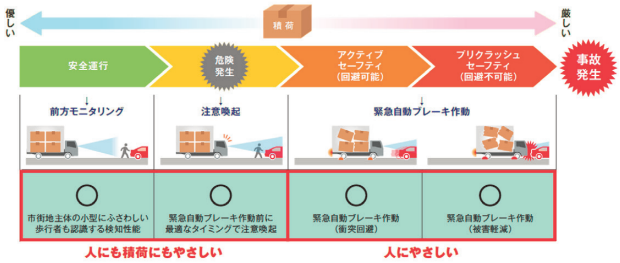


図 4　エルフ安全装置に関するコンセプト

しかしながら，単に衝突回避できるタイミングで制御タイミングを設定してしまうと，ドライバの意図しないタイミングで制御してしまう懸念がある。通常，ドライバは周囲状況に気づいていれば AEBS が制御する前に操舵及び制動で回避行動を取るため，通常ドライバが回避行動する予測タイミングよりも前に AEBS を制御させてはならない。

一般にドライバが回避行動を取るタイミングは制動に関しては，相対速度に依存し，操舵に関しては前方障害物とのラップ率に依存することがわかっている（**図 5** 参照）。なお，ラップ率とは，自車と前方にいる障害物がどの程度オーバーラップしているかを数値化したものであり，**図 6** にイメージを示す。

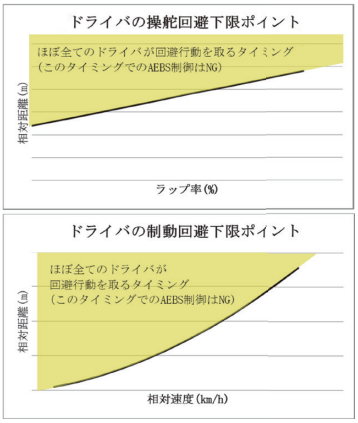


図 5　ドライバの回避行動下限ポイント

図 6　ラップ率概念

3　小型トラックに最適な AEBS 検証

次に，検討した AEBS 制御タイミングで実際の道路環境で誤作動・不要作動がないかの検証を行った。特に，歩行者の行動は同じ道路を走行する自動車に対して予測不能であるため，歩行者に対して誤作動・不要作動がないかを専門の実験部が徹底的に検証を行った。

歩行者が圧倒的に多い繁華街を何度も走行し，複数のドライバによって，AEBS の警報タイミングが適切か，自動ブレーキの誤作動がないかを検証した。

方法としては，意図的に AEBS の警報を早めに発報する仕様にして，繁華街を走行し，ドライバのフィーリング検証を行った。繁華街を走行した様子を**図 7** に示す。**図 7** はステレオカメラが障害物だと認識した対象物に枠を表示させる仕組みとなっている。

図 7　繁華街走行データ

実際に繁華街を走行する中で，警報のタイミングがドライバのフィーリングに合っているか確認し，NG となった作動シーン及び警報がやや早いシーンについて改善を行った。

このような走行を何度も繰り返すことで，制御タイミングを成熟していった。なお，ブレーキに関しては誤作動することも作動することもなく，最初から適切であると判断した。

この検討により，車両に対しては，ドライバの回避行動（操舵・制動による回避高度）を妨げることなく早めに警報を行い，歩行者に対しては適切に警報を行って緊急時に自動ブレーキが作動する仕様とすることができた。

4　おわりに

今回エルフにステレオカメラを搭載した AEBS を開発したが，本文で述べているとおり，商用車にステレオカメラを搭載したのは初であった。乗用車とはキャビンの形状も車両の使われ方も全く異なるため，難易度の高い開発であった。

本開発を完遂できたのは，開発関係者全員が「エルフに乗車してくださるお客様に実際の道路環境で役に立つ安全装置を使っていただく」という気持ちで一丸となって開発したからに他ならない。

その結果，実際の道路環境で歩行者及び自転車を検知できる AEBS を商品化することができた。

最後に，18 型エルフのステレオカメラを使った AEBS 開発に携わった協力企業の方々，社内関係部署の方々には心から感謝の意を表し本稿の結びとしたい。

著　者

池田　真悟

島　高志

本田　拓也

相馬　峻祐

東條　智一

伏江　俊祐

AEBS 学習工法の技術構築

Technical Construction of Learning Method of Advanced Emergency Braking System

梁井　芳樹*
Yoshiki Yanai

佐藤　征則*
Masanori Satou

要　旨

欧州法規及び国内向け商品力向上のため，エルフに初めて AEBS（先進緊急ブレーキシステム）機能が搭載された。既に，フォワード及びギガはこの機能を有した車両を販売していたが，ミリ波レーダと単眼カメラの組み合わせによる物体認識をしているのに対し，エルフでは，新たにステレオカメラによるシステムが採用されることになった。

車検ラインで実施するステレオカメラの初期学習において，従前よりも高い学習精度が要求されるため，それを満足しうる設備の検討及び導入を推進した。

Abstract

For product competitiveness improvement of the domestic market and European regulations, the first time AEBS (Advanced Emergency Braking System) function to ELF is mounted.

FORWARD and GIGA had already sold vehicles with this function. While these vehicles recognize objects using a combination of millimeter-wave radar and a monocular camera, ELF uses a compound eye camera.

The initial learning of the compound eye camera on the vehicle inspection line requires high accuracy, so we studied the equipment to achieve this.

1　はじめに

今回，搭載されることとなった「AEBS」とは，Advanced Emergency Braking System（先進緊急ブレーキシステム）の略であり自動衝突被害軽減ブレーキ（以下，「自動ブレーキ」と略す）義務化の目的は，交通事故またはそれに付随する被害を軽減することであり，自動車が前方の障害物と衝突するのを避ける，または衝突速度を下げるために自動的に作動する仕組みである。

自動ブレーキシステムには，ミリ波レーダとカメラを使ったもの，ステレオカメラにより 3 次元で前方を視覚できるものがあり，フォワード及びギガでは既に，ミリ波レーダ＋カメラ方式が採用されているが，エルフでは，ステレオカメラ方式が採用されることになった。

2　要求仕様

エルフで採用されたステレオカメラによるシステムはフォワード等で採用された単眼カメラシステム同様，車検ラインで初期学習を実施する必要がある。

設計要件として当初提示された内容は，車載 AEBS カメラ（**図 1** ★マーク部）の正面 4500 mm のカメラレンズ位置で，学習ターゲットの規定位置を（**図 1** ●マーク部）± 5 mm の精度で設置することであったが，車両を ± 5 mm の位置に停止することは不可能であるため，次の方法とした。

1)　CAB 内の AEBS カメラ位置を計測
2)　学習用ターゲットと車載カメラの位置関係を車両前後方向 TL（以下 TL と略す）・車両左右方向 BL（以下 BL と略す）・車両上下方向 WL（以下 WL と略す）の三次元座標でフィードバックする
3)　要求精度は，それぞれ ± 5 mm 以内（**図 1** 参照）

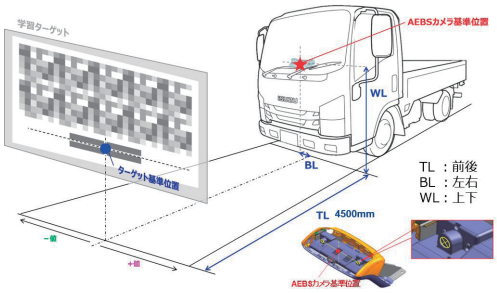


図 1　要求仕様と考え方

ただし，装置全体の測定誤差の検証については，ターゲット板からの車両位置を ± 5 mm という要求精度が著しく厳しいため，設備検討と並行して要求精度の緩和を開発側に依頼した。開発及びサプライヤでの検証結果により，要求精度は次の値に決まった。

TL 方向；20 mm，BL 方向；10 mm，WL 方向；なし

*車両技術部

3　対策立案

他社情報を収集した所，乗用車では，モノコック構造のため，車両タイヤの位置さえ決まれば，AEBS カメラの位置は交差上，装置要件の範囲に入るため，特にターゲットとシャシカメラの位置を測定はしてないことがわかった。

しかし，エルフでは，フレーム構造のため，タイヤから CAB 内の車載カメラ位置のずれが大きく，何らかの方法で，カメラの位置を補正する必要がある。

これらに対応する設備として，次の 2 案の工法を検討した。

案①　CAB の位置を測定

外部から CAB の位置を測定し，CAB から AEBS カメラまでの距離は設計値を使用してステレオカメラの位置を測定する

< メリット >

センサ及びカメラで位置を直接測定することが可能

< デメリット >

CAB 内の部品バラツキ及び組付けバラツキはすべて誤差要因

案②　AEBS カメラのレンズ部をフロントガラスの外側から測定する

< メリット >

CAB 内のバラツキは考慮不要

< デメリット >

フロントガラスが介在するため，測定可否及び精度の検証が必要

これらのメリット，デメリットを考慮しながら検討を進めることとした。

これら 2 案の検討を進めるにあたり，机上検討と部内のラボにて，実地検証を行った。

3.1　CAB を測定しステレオカメラ位置を測定

CAB から AEBS カメラまでの全部品の合計交差を検証したところ，5 mm を超えることがわかり，採用できないことがわかった（**図 2** 参照）。

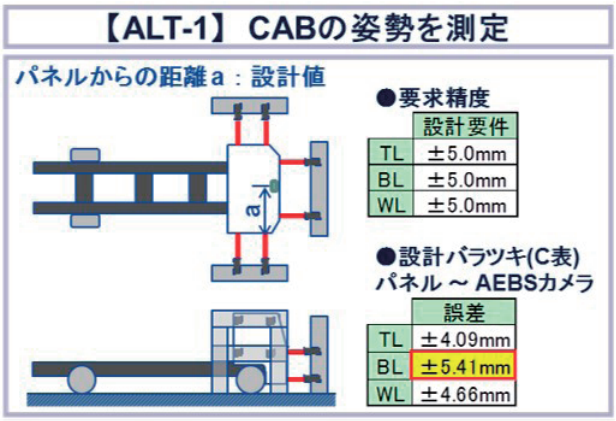


図 2　測定方法　案 1（採用不可）

3.2　AEBS 車載カメラを測定

デモ機を借用し，フロントガラスの外側から AEBS カメラのレンズ位置が直接測定可能か検証を行った（**図 3**）。

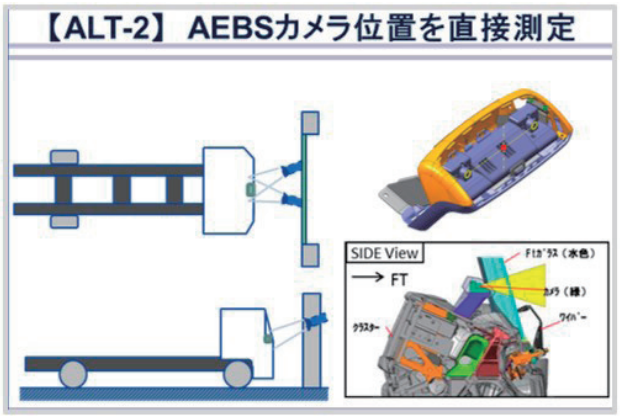


図 3　測定方法　案 2

本測定方法として，次の 2 つの案を部内のラボにて実際にセンサのデモ機を用いてトライを実施した。

3.2.1　変位センサと単眼カメラの併用

変位センサで TL 方向の距離を測定し，測定用カメラで BL･WL 方向の位置を測定する案。ともにガラス越しでの測定は可能だが，変位センサはレンズ部を検出できず，カメラカバーまでの距離を測定した。

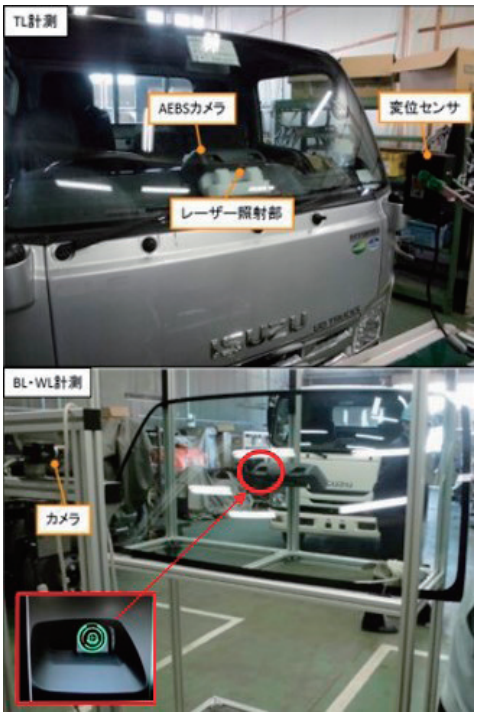


図 4　変位センサ・カメラでの測定

カメラによる測定値 BL/WL は ± 3 mm 程度の誤差であったが，レーザセンサではカメラレンズがガラスのため，変位センサではレーザ光が反射せず測定できないことが判明した（**図 4**）。

3.2.2　ステレオカメラによる測定

ステレオカメラで TL･BL･WL 方向の位置を測定する案は，ガラス越しでの計測は可能であったが，このタイミングでは，測定は自動ではなく，手動で測定位置を確認して実施した。

（※レンズ部を自動検出するには専用ソフトが必要）

図 5　ステレオカメラでの測定

BL/WL 誤差は ± 2 mm 以下だが，TL 誤差は最大 6 mm となり，TL 値の誤差は AEBS カメラの前にあるフロントガラスによる屈折等も測定に影響を及ぼすことが懸念される（**図 5**）。

この検証結果より，AEBS カメラレンズ部を自動判定し，直接測定できるステレオカメラ案で推進することとし，ガラスの影響を更に精度よくはかるためのトライ用システムを製作した。

4　対策の検証

更にステレオカメラによる測定を検証するにあたり専用測定治具，及び計測システムを製作していただき，車種別×ガラス 4 枚にて測定を実施して検証を補強することとした（**図 6**）。

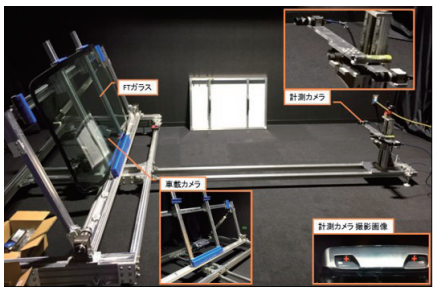


図 6　ステレオカメラでの測定

ガラス無しの状態で得られた測定結果をゼロとし，横軸に測定誤差（単位；mm），縦軸に頻度を表す。上から TL･BL･WL 方向の順となっている（**図 7, 8, 9**）。

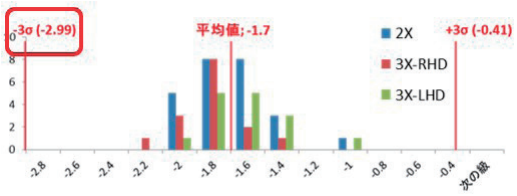


図 7　ステレオカメラでの測定（TL 方向）

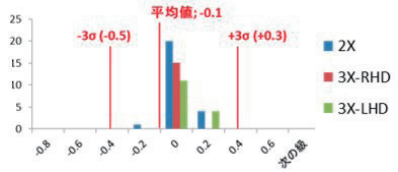


図 8　ステレオカメラでの測定（BL 方向）

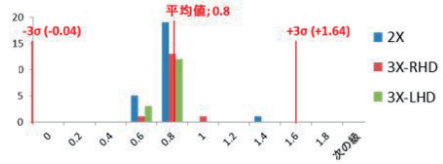


図 9　ステレオカメラでの測定（WL 方向）

これらの測定では，TL 方向が最もバラついているが，バラツキを考慮した測定誤差は -2.99 mm であり，要求精度を満足している。よって，ステレオカメラを用いた計測設備を量産ラインに導入することとした。

5　実生産システムの作り込み

検証結果より，実際の生産システムを製作し，実機と実車でのトライを進めることとした。本装置の設備概要を図 10，設備の動作フローを図 11 に示す。

生試車両にて，FT ガラスレスのトライ車両を設定し，実車でのガラス有無影響を検証した。

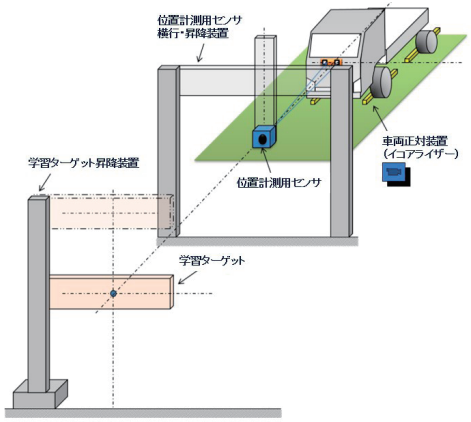


図 10　AEBS 計測／学習装置　概要

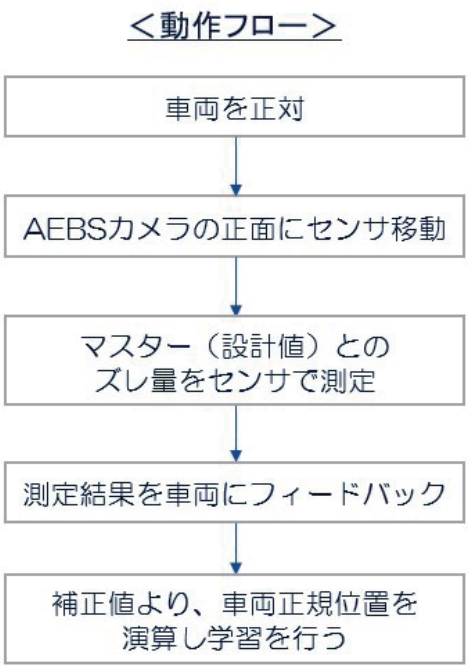


図 11　AEBS 計測／学習フロー

6　装置全体の測定誤差の検証

本装置には，カメラ単体での測定精度以外に可動部もあり，装置各部の繰返し精度の確認を実施し，設備全体での測定精度の確認を行った（図 12，13）。

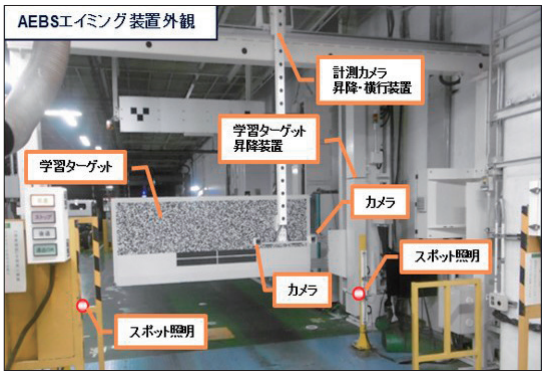


図 12　ステレオカメラでの測定

図 13　ステレオカメラでの測定

ラボでのガラス単体による影響確認の次段階として，設置した測定装置においても，実車でのガラス有無の測定を実施した（図 14）。

図 14　実車両に対しガラス有無での測定

実車においても，おおよそテストピースでの検証結果と同じ傾向であることを確認した（**図 15，16，17**）。

・ ガラス仮付け状態での測定結果

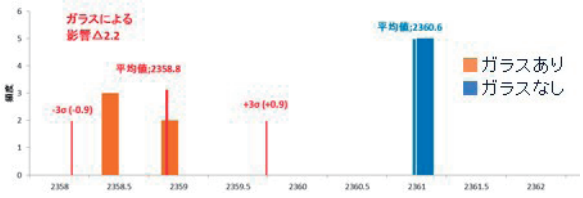


図 15　測定結果（TL 方向）

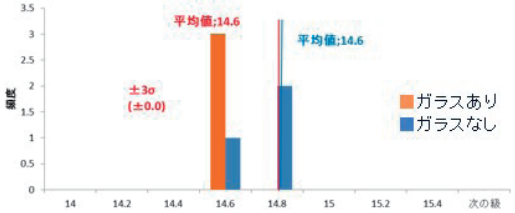


図 16　測定結果（BL 方向）

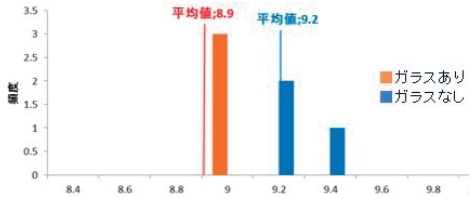


図 17　測定結果（WL 方向）

更に，次の装置本体の精度を測定した。

① ステレオカメラ昇降装置 設置精度
② ステレオカメラ昇降装置 停止精度
③ ステレオカメラ 測定精度
④ 学習ターゲット昇降装置 設置精度
⑤ 学習ターゲット昇降装置 停止精度
⑥ イコアライザ 正対精度

要求精度はあくまでも，チャート板から AEBS カメラまでの距離に対するものである。そこで，ほかに誤差の要因となるものをすべて列挙し，測量器を用いて検証した（**図 11**）。事前検証の結果も含め，バラツキとカタヨリを算出した。

これらの結果よりバラツキ・カタヨリを考慮した最大の測定誤差は次の値となり，**2 章**で記した要求精度を満足する設備であることを確認できた。

1) TL 方向；16.0 mm
2) BL 方向；5.6 mm
3) WL 方向；18.5 mm

また，実車での生試評価についても不具合は発生せず問題はなかった。

7　おわりに

ステレオカメラにて測定物を測るという設備は，我々にとって初めての経験であり，ステレオカメラという計測器自体が，実際に 100 のモノを 100 と測れているのか，また，測定物の前にあるガラスの屈折等の影響など，想定しづらいデータが多く，ステップを踏みながら検証を行い，経験を積みながら設備の玉成を行った。今後も，安全装置関連は増えていくと思われ，今回の経験を生かして，設備検討をしていきたい。

著　者

梁井　芳樹

佐藤　征則

論文・報告

CACC を用いたトラック隊列走行システムの紹介

Introduction of Cooperative Adaptive Cruise Control Truck Platooning System.

三島　康之*　小西　正*　井戸沼　秀之*　岡本　幸司*　岩城　祐輝*
Yasuyuki Mishima　Tadashi Konishi　Hideyuki Idonuma　Kouji Okamoto　Yuuki Iwaki

要　旨

日本政府の Society5.0 実現に向けたロードマップ等に基づき，経済産業省及び国土交通省が主体で高速道路におけるトラック隊列走行の実現に向けた実証実験が行われている。実証実験の目的は，隊列走行システムの技術検証，並びに隊列走行を行った場合の社会受容性の評価である。今回，CACC を用いた後続車有人隊列走行システムの実証実験に供試した車両の紹介とベース技術の一つである CACC の機能とその効果について述べる。

Abstract

Based on the roadmap of the Japanese government, METI and MLIT have been carrying out demonstration experiments for the practical use of truck platooning on highway. The purpose of the experiment is the technical verification of the system and the evaluation of social acceptability of truck platooning. We introduce the prototype truck that we developed, and explain one of the base technologies, CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control), and its effects.

1　はじめに

欧州のトラック隊列走行プロジェクト「ENSEMBLE」に代表されるように，世界各地でトラック隊列走行のプロジェクトが実施されている。トラック隊列走行の狙いは，各国共通で隊列走行による燃費向上（CO_2 削減）である。

一方，日本国内では深刻なトラック運転者不足，運転者の労働環境改善の手段としてトラック隊列走行が期待されている。

2　隊列走行の取り組み

日本の取り組みは，政府が示した「未来投資戦略 2017」及び「官民 ITS（高度道路交通システム：Intelligent Transport System）構想・ロードマップ 2017」(**図 1**）に示されている。高速道路でのトラック隊列走行を早ければ 2022 年度に商業化することを目指し，2020 年度に高速道路（新東名高速の一部）で後続車無人の隊列走行を実現するために技術開発と実証実験を推進し，合わせて制度整備も進められている。

また，**図 1** の工程表では，後続車無人隊列システム[1)]に先立ち 2021 年度までにより現実的な後続車有人隊列システムの商業化を目指し，2017 年度から CACC（協調型車間維持システム：Cooperative Adaptive Cruise Control）の公道実証実験を開始することとされている。

これを受け，国内大型トラックメーカ 4 社が実証実験に参加，世界初のマルチブランドでの CACC の実証実験を実施している。

実証実験の目的は，隊列走行システムの技術的な検証と，トラックが隊列で走行することの印象や他交通への影響等，社会受容性の評価である。

技術検証は大型メーカ 4 社，社会受容性はコンサルタント会社が主体で実施している。

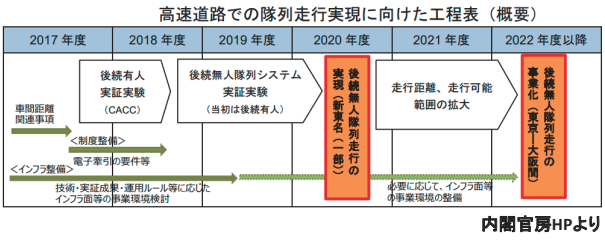


図 1　官民 ITS 構想・ロードマップ 2017

後続車有人隊列の実証実験は 2017 年度において，テストコースの実験と北関東自動車道及び新東名高速道路の公道で実施された。

また，2018 年度はテストコースでの実験のほか，上信越自動車道と新東名高速道路の公道を延べ

* AS システム開発部

2500 ㎞走行し，各種条件での技術検証及び，アンケートとヒアリングによる社会受容性の評価を実施した。

注[1] 後続車無人隊列システム

先頭車（けん引車）にドライバが乗車し，後続車（被けん引車）は無人で走行する電子けん引システム。けん引車の制御情報を車車間通信で被けん引車に送信し制御するシステム。

3　トラック隊列走行システムの概要

トラック隊列走行システムに必要な基本機能は，車両の前後方向の車間維持制御機能と，横方向の車線維持機能[2]があり，本稿では車間維持制御のシステムについて述べる。

車間維持制御は車車間通信を用いた CACC 制御システムにより実現される。このシステムは先行車との安全な車間距離と車間時間を一定に保つ ACC（Adaptive Cruise Control）に，車車間通信で取得した先行車両の情報をフィードフォワード項として制御に加えることで，先行車の動きに対する応答性が向上し，車間距離，車間時間の変動を抑えた追従走行が可能となる（**図 2**）。

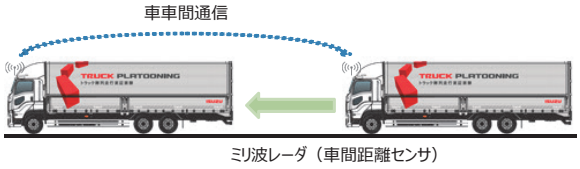


図 2　CACC の模式図

注[2] 車線維持機能

カメラセンサを用いて白線を検知して車線内での走行を維持できるようステアリングを制御する機能。

3.1　ベース車両

後続車有人隊列走行の実証実験に参画するにあたり，ベース車両として量産型のいすゞ GIGA（CYL77）を選定し，試験に必要な装置，機能を組み込んだ（**図 3**）。

図 3　いすゞ CACC 隊列走行試験車の外観

3.2　CACC 制御システム構成

隊列走行実験車には，量産車に搭載されている先進安全装置 VAT[3] のレーダ，カメラ等に加え，車車間通信を行うための通信機と通信アンテナ，自車位置を測位するための GPS アンテナ，CACC の ON/OFF 及び制御状態を表示するための HMI モニタ，CACC 制御装置等を追加した。

図 4 に制御システムのハードウェア構成の概略を記す。各要素の機能については次項で解説する。

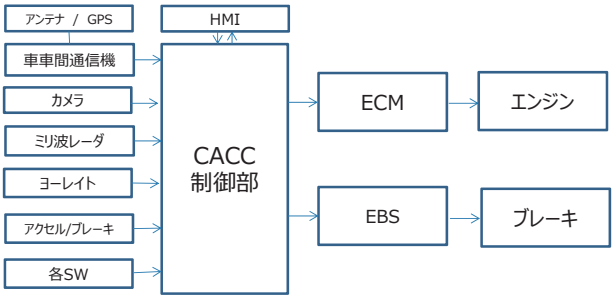


図 4　CACC 制御システムの構成

注[3] VAT（Advanced View Assist Technology）
いすゞ GIGA 搭載の先進視覚サポート技術

3.3　車車間通信

隊列走行用の車車間通信は 760 MHz の周波数帯を使用した ITS-CONNECT に準拠した通信機を搭載した。メッセージデータには車両の位置情報，速度，加速度，操作情報，ABS などの作動状態などが含まれる。

通信情報には，他車両の詳細な制御データ等を含めることができるため，車車間通信を利用したさまざまなシステムへの応用が期待されている。

なお，実験車両では通信アンテナを左サイドミラーのステー部に装着した。

3.4　HMI モニタ（Human Machine Interface）

隊列走行実験車には，自動車基準調和国際フォーラム（WP29）[(1)] の運転支援システムの HMI に対するガイドラインにしたがいシステムの作動状態をドライバが理解できるように配慮して，10 インチタッチパネル液晶モニタ上に CACC の ON/OFF 操作スイッチ及び制御状態をアイコンと数値情報を用いて表示する仕様にした（**図 5**）。

隊列走行システムでは，ACC と CACC の状態では制御性能が異なるため，ドライバが現在の状態を把握することが重要である。このため先行車が通信機を搭載した車両であるか否かのサービスイン情報表示と，

通信を利用した CACC の状態になっているかをアイコン表示する仕様とした。

CACC 用 HMI の表示項目

① サービスイン表示　：車車間通信対象車両の有無
② CACC/ACC 表示　：現在の制御モード
③ 車間設定表示　：車間距離の設定状態
④ 車速表示　：自車速と先行車から受信した車速
⑤ 車間距離表示　：先行車との車間距離
⑥ CACC ON_OFF 状態：CACC の ON/OFF 操作スイッチ

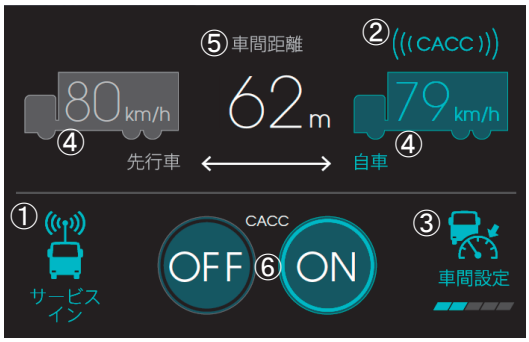


図 5　CACC 実験用 HMI（表示例）

3.5 隊列走行車両の外観デザイン

公道走行において周辺ドライバから隊列走行であること，実証実験中であることが認識できるように，大型 4 社共通のデカールを車体にプリントした。デカールのデザインは弊社デザインセンターが担当した。背面には隊列走行特有の長い全長（車間時間 1.6 秒の 4 台隊列で先頭の車両から最後尾の車両までの距離が 160 m）を表示して，周辺車両及び追い越しする車両に対して注意を促すようにした（**図 6**）。

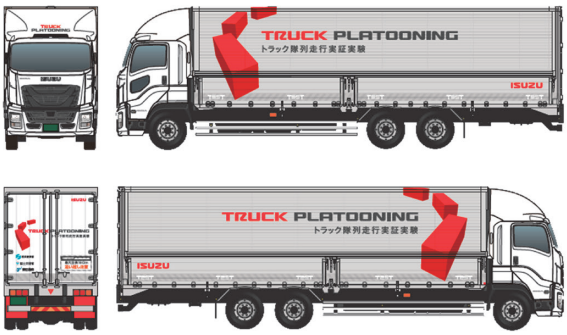


図 6　隊列走行試験車のデザイン

更に，隊列走行車両の一体感を表現するため，LED ランプを荷台下部の車体側面の左右に 8 ヶ所と後部 2 ヶ所に設置し CACC 走行中に点灯させた（**図 3**）。

3.6 CACC 隊列走行システムの機能と制御解説

CACC 制御システムは，隊列走行を行うために先行車を判定する「先行車特定」と車車間通信で得られた先行車データを車間制御に使用するための「加速度制御補正量の計算」の 2 つの機能を従来の ACC システムに新たに追加した。

3.6.1 先行車特定

CACC 制御を行うには自車線上の先行車を特定し，その車両の通信データを利用することが必要である。通信機は，自車の周辺車両すべての通信データを取得してしまうため，周辺車両から自車の先行車を特定するロジックが必要となる。

本システムでの先行車の特定方法は，自車の位置情報（緯度・経度情報）と周辺車両から車車間通信で受信した位置情報に加え，同一方向に進んでいる前方の車両を選別し自車までの相対距離を算出する。先行車の通信情報は車両 ID で管理されており，位置情報及び車速，加速度のデータが含まれる。この情報から自車との相対距離を求めることができる。一方，VAT システムはカメラとミリ波レーダを用いて先行車までの相対距離を計測する（**図 7**）。

車車間通信で受信した位置情報と VAT システムで特定した先行車の位置情報を比較選定し 1 台を CACC 先行車として特定している。

更に，トンネル内など，GPS が機能しない環境では，車車間通信で受信した車速から計算した相対速度と，VAT システムで検知した先行車の相対速度を比較し，先行車を特定している。

CACC 隊列走行中は，一般車両が割り込んだ場合と VAT システムが先行車を検出できなくなった場合を考慮し，先行車からの受信データと VAT システムのデータとを比較監視し，CACC 隊列走行を継続するかどうかの判断を常時行う仕様とした。また，このようなシチュエーションが発生した場合は，速やかに ACC 制御に移行する仕様とした。

図 7　先行車特定の模式図

3.6.2 加速度制御補正量の計算

ミリ波レーダとカメラセンサの検知情報をもとに，VAT システムの ACC 制御演算部で算出した要求加速度と車車間通信経由で取得した先行車の加速度から，加速度制御補正演算部で加速度補正量を計算し加算している（**図 8**）。

実証実験では最大 4 台の大型トラックによる隊列走行を行う。各車両が設定された車間距離を維持した走行が求められたため，先行車の加速度情報をフィードフォワード情報として組み込むことで遅延の少ない制御を実現した。

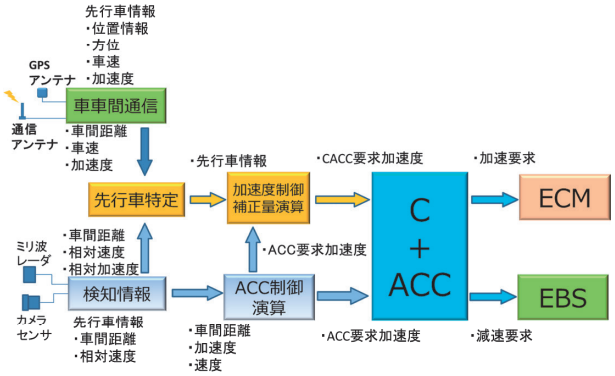


図 8　CACC 制御ブロック概略図

4　CACC の効果

これまで述べてきたように CACC は，車車間通信により先行車の状態を自車両の制御に利用することで，応答性（先行車が減速してから，自車両が減速するまで）の向上を狙っている。ここでは CACC の効果を検証する。

実験は，先行車と後続車の 2 台の大型トラックで行い，先行車がドライバのブレーキ操作で減速した時の後続車の挙動を ACC システムと CACC システムで比較した（**図 9**）。

図 9　走行方法

4.1　実験条件

・積載状態　　空車
・車間時間　　1.6 秒
・先行車減速度　-0.1 G [4],-0.2 G
・先行車車速　　80 km/h から 50 km/h まで減速

注 [4] G
重力加速度を表し，1 G は 9.8 m/s^2

4.2　実験結果

例として，先行車が -0.2 G で減速した時の後続車の減速度（**図 10**），車間距離（**図 11**）のグラフを示す。

なお，解析する上でノイズの影響を排除するため，減速開始の判定しきい値を -0.2 m/s^2 とした。

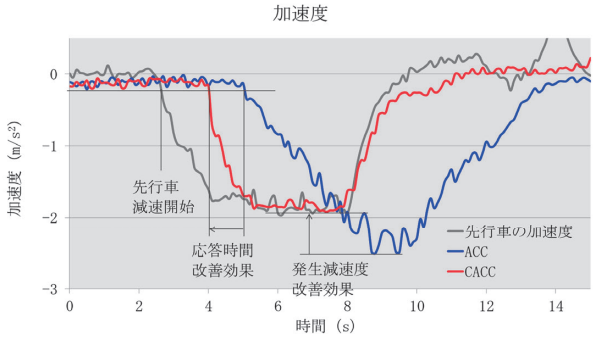


図 10　後続車の加速度グラフ（-0.2G）

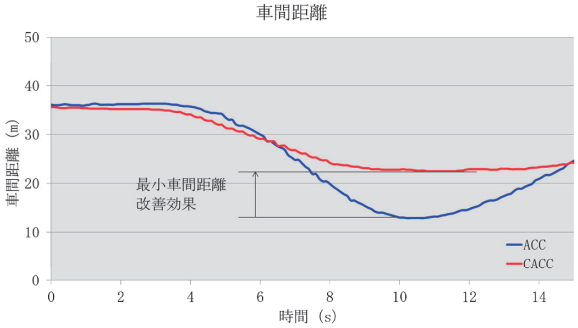


図 11　後続車の車間距離グラフ（-0.2G）

図 10 で先行車の減速開始から後続車の減速開始までの応答時間を比較すると，CACC の方が約 1 秒応答が早く，最大減速度も約 0.60 m/s^2 小さくなっていることがわかった。

また，**図 11** で先行車との車間距離を比較すると，CACC の方が車間距離の変動が小さく，最小車間距離も約 10 m 長く（車間距離が縮まらない）なっており車間距離維持性能が向上していることがわかった。

図 12，**13**，**14** は ACC と CACC の制御応答性を比較したグラフで，先行車の減速度が -0.1 G，-0.2 G のものを示す。

図 12 は先行車が減速してから，後続の車両が減速するまでの応答遅れ時間を示した。

CACC は ACC と比較して約 40 % 応答が早くなっている。

図 13 は最大減速度の比較である。CACC は ACC と比較して約 25 % 最大減速度が小さくなっている。

図 14 は最小車間距離の比較であるが，CACC は ACC と比較して約 75% 最小車間距離が長くなり車間距離が維持されている。

このように，CACC 制御システムは，制御の応答が早まり，その結果，制御量（加速度変化量）そのものが低減され，車間変動量が小さく最小車間距離も長くなり，車間維持性能が向上していることがわかる。

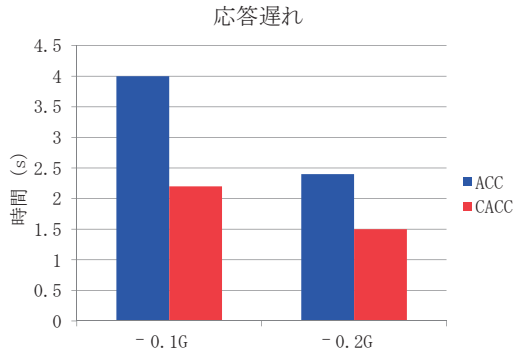


図 12　ACC-CACC 応答遅れの比較

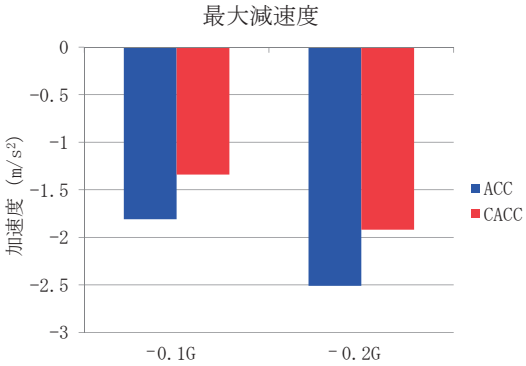


図 13　ACC-CACC 最大減速度の比較

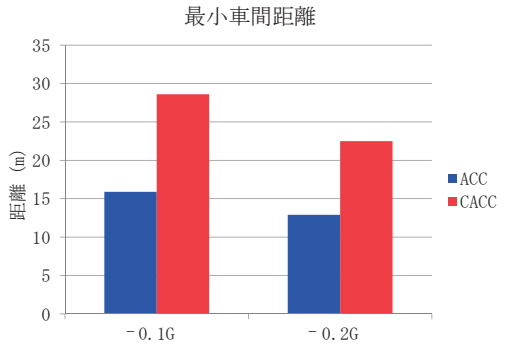


図 14　ACC-CACC 最小車間距離の比較

後続車有人隊列走行システムの基本機能の一つである CACC システムの効果を確認した。車車間通信を用いて先行車の情報を利用することにより，既存の ACC システムに対する優位性を確認できた。

5　おわりに

2018 年度までの後続車有人隊列走行の実証試験に供試した車両について述べた。

制御の基本となる CACC は，一般的な ACC と比較して，応答性が改善され，特に，先行車が減速した時の車間維持性能が大幅に向上した。これは，隊列走行での車間距離を短縮できる可能性を示しており，隊列走行による燃費改善が期待できるものと推測する。

また，事業者ドライバの方に CACC の機能を体験していただいた結果，安全性及び安心感が向上しているとのコメントが多かったことを付け加えておく。

今回報告した CACC は，隊列走行の基本となる仕様であるが，今後，車車間通信内容の追加，改良をした発展型も考えられている。

2019 年度以降も有人隊列の実証試験が予定されており今後も参加予定である。

参考文献

(1)　官民 ITS 構想･ロードマップ 2017
(2)　UNECE/WP29/ITS Informal Group：Guidelines on establishing requirements for high-priority warning signals with GRE comments to WP.29-150-22
(3)　経済産業省 製造産業局：高速道路におけるトラックの隊列走行の実証実験の現状と今後の展望, 自動車技術, Vol.73, No.1（2019）, p.88-93

著　者

三島　康之

小西　正

井戸沼　秀之

岡本　幸司

岩城　祐輝

論文・報告

産業用StageV排出ガス規制対応6UZ1・6WG1エンジン開発

Development of StageV 6UZ1·6WG1 Engines for Industrial Purpose

谷山　由和*　曲尾　卓磨*　襟川　和幸*　高嶋　昭宏*　角田　裕**
Yoshikazu Taniyama　Takuma Magario　Kazuyuki Erikawa　Akihiro Takashima　Yutaka Kakuta
板橋　佑介**　後藤　真司**　石井　光**　中村　忠視***　伊藤　聖悟***
Yuusuke Itabashi　Shinji Gotou　Hikaru Ishii　Tadashi Nakamura　Seigo Itou

要　旨

近年，産業用エンジンにおいても排出ガス規制の強化が世界各国で進められている。欧州において世界に先だってStageV排出ガス規制が2019年1月から施行された。各社ではその規制に準拠すべく，エンジン開発が進められた。

本報告では，StageV排出ガス規制に対応した産業用エンジンのラインナップの中から9.8 L及び15.7 Lの排気量の6UZ1·6WG1の開発経緯と採用技術について紹介する。

従前の規制より更に厳しくなった粒子状物質（PM）の規制に対応すると同時に，従来機と同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保した。また，市場でのメンテナンス期間の延長を目指した開発を行い，利便性を向上することに成功した。

Abstract

In recent years, stricter emission regulations have been enforced in the world for industrial engines. The most advanced regulations came into January 2019 in Europe, which are called as EU StageV. Each company developed own engines in order to comply with the regulations.

This report introduces the development history and technology of 6UZ1 and 6WG1 of 9.8 L and 15.7 L displacement from the lineup of industrial engines that comply with StageV emission regulations.

We have developed products that have longer maintenance interval to use in the market while ensuring the same level of performance, reliability, and durability as conventional engines while complying with the regulations on particulate matters that have become even stricter than previous regulations.

1　まえがき

燃焼エネルギーを効率良く動力変換できるディーゼル機関はさまざまな産業用機械に搭載され，世界中で活躍している。いすゞ自動車では2.2 L～15.7 Lの幅広いラインナップを揃え，多種多様な産業用ならではの要求に対応したエンジンを開発し，商品化している。

産業用6UZ1·6WG1は商用車用として開発されたエンジンをベースに産業用途に適合するために改良を行っており，従来機と同等以上の低燃費・高信頼性・高耐久性を維持しながら，各排出ガス規制に準拠する仕様を開発してきた。今回の欧州StageV排出ガス規制ではPM（粒子状物質：Particulate Matter）の重量規制の強化に加え，それらのPN（粒子数：Particulate Number）も規制され，それらの対応を主眼に置き，開発を行った。

前述の2つのエンジンは排出ガス規制対応では従来機の後処理装置SCR（選択的触媒還元：Selective Catalytic Reduction）システムにDPD（ディーゼル微粒子除去装置：Diesel Particulate Defuser）を追加採用し，排出ガス規制値に適合させることに成功した。その開発と並行し，各種定期メンテナンス部品の改良を行い，メンテナンスインターバルの延長に成功した。

図1·図2に6UZ1及び6WG1の外観を示す。

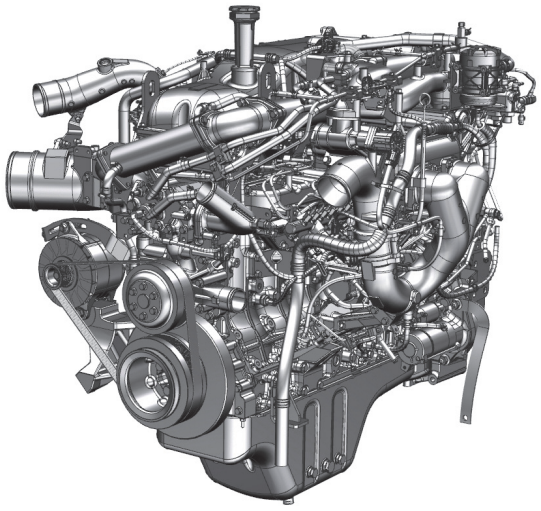


図1　6UZ1外観図

*産業エンジン開発部　**エンジン実験第一部　***エンジン実験第二部

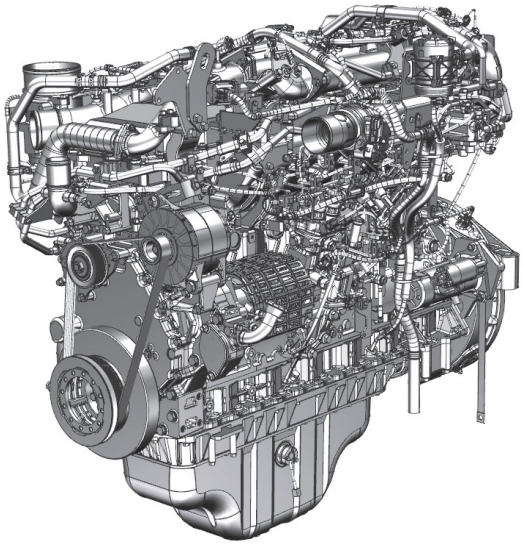


図 2　6WG1 外観図

2　産業エンジンの排出ガス規制

産業エンジンにおいては 1995 年のアメリカ合衆国のカリフォルニア州で初めて排出ガス規制が施行されてから，各国に排出ガス規制が広がり，強化が進められてきた。**図 3** に主要な先進国（米国･EU･日本）の排出ガス規制動向を示す。

図からもわかるように今回の EU の StageV 排出ガス規制は欧米及び日本と比較しても厳しく，PM は従来規制に対して 20 % 低減が要求されるとともに，PN という新たな規制要求が加えられている。**図 4** に欧州の各規制段階の NOx（窒化酸化物）と PM の排出規制値の推移を示す。

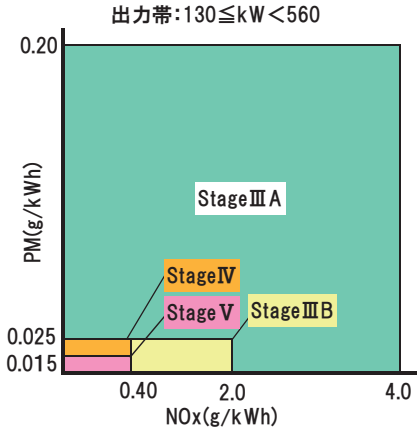


図 4　欧州排出ガス NOx と PM の規制値推移

3　開発の狙い

これまで市場より高い評価を得ているエンジン性能，耐久性信頼性を維持しつつ，最新の排出ガス規制への適合を目的として開発を行った。

3.1　エンジン性能

多種多様な産業用機械を扱う OEM（Original Equipment Manufacturer）の要求に対応するため，複数の出力バリエーションを設定した。**表 1** に StageV 対応の設定出力を示す。

表 1　エンジン出力バリエーション

エンジン	定格出力	主要用途
6UZ1	270 kW / 2000 min^{-1}	油圧ショベル･一般動力
6WG1	382 kW / 1800 min^{-1}	油圧ショベル･一般動力
	348 kW / 1800 min^{-1}	油圧ショベル
	296 kW / 1800 min^{-1}	油圧ショベル

排出規制物質:NOx(g/kWh)･NOx+HC(g/kWh)･PM(g/kWh)･PN(粒子数)

	出力帯	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
EU	130≦kW＜560	NOx+HC4.0/ PM0.2		NOx2.0/PM0.025									NOx 0.40/ PM 0.015/ PN 1×10^{12}	
	75≦kW＜130	NOx+HC4.0/ PM0.3			NOx3.3/PM0.025			NOx0.40/PM0.025						
	56≦kW＜75	NOx+HC4.7/ PM0.4												
米国	130≦kW＜560	NOx+HC4.0/ PM0.20		NOx2.0/PM0.02										
	75≦kW＜130	NOx+HC4.0/ PM0.34			NOx3.4/PM0.02				NOx0.40/PM0.02					
	56≦kW＜75	Nox+HC4.7/ PM0.40												
日本	130≦kW＜560	NOx3.60/PM0.17			NOx2.00/PM0.02									
	75≦kW＜130	NOx3.6/PM0.20				NOx3.30/PM0.02			NOx0.40/PM0.02					
	56≦kW＜75	NOx4.00/PM0.25				NOx3.30/PM0.02								

図 3　排出ガス規制動向

3.2 耐久信頼性

産業用として過酷な環境での使用に実績のある従来の 6UZ1･6WG1 の基本構造･機能部品を踏襲しつつ，ベースである商用車向けで確立された評価方法に合わせて，産業用独自の使われ方を評価し，耐久信頼性を確保した。

3.3 低公害化

StageV の排出ガス規制への適合に伴い，環境バラツキ及び劣化を考慮した開発目標を設定して従来機と同様に高いロバスト性を確保した排出ガスの適合を行った。

3.4 市場メンテナンスへの配慮

市場での利便性を考慮し，メンテナンスインターバルの延長を行った。後処理装置の DPD は商用車用でも実績のある多孔質 SiC（シリコンカーバイド）基材を採用し，再生インターバル及び蓄積する灰分洗浄のインターバル長期化に成功した。他にも補機ベルトを従来の V 型から多段リブを有するベルトを採用し，交換インターバルを延長した。更にフィルターレスのオイルセパレータを採用し，メンテナンスレスを実現した。これらにより，エンドユーザのメンテナンス回数を低減し，より環境に配慮したエコなエンジンを開発した。

4 エンジンの概要

StageV 対応 6UZ1・6WG1 の主要諸元を**表 2** に示す。

表 2 主要諸元

エンジン形式	6UZ1	6WG1
気筒数	6	6
ボア×ストローク(mm)	120.0×145.0	147.0 x 154.0
排気量(L)	9.8	15.7
代表定格出力(kW/min^{-1})	270/2000	382/1800
代表トルク(Nm/min^{-1})	1650/1300	2250/1300
燃焼室形状	DI	
燃料噴射装置	コモンレール式	
過給方式	インタークーラ付き ターボチャージャ	
圧縮比	16.2	16.5
後処理装置	DOC+DPD+SCR	

4.1 出力性能

StageV 対応の 6UZ1･ 6WG1 の代表出力性能を**図 5** に示す。ターボチャージャの改良をおこない，従来から中･低速トルクを 6UZ1:約 10.5 %，6WG1:約 10 % 増大させ，広い回転域で高トルクを発揮するエンジンとした。これにより，搭載可能な産業用機械バリエーションの新規拡大を狙った。

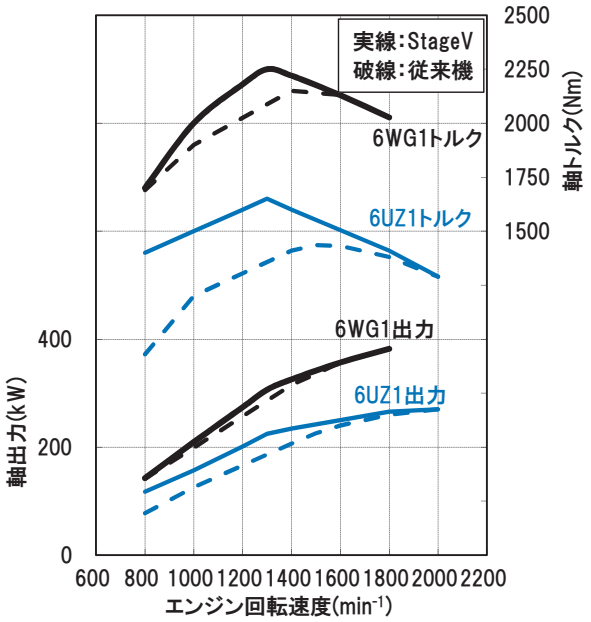


図 5 代表出力性能

4.2 燃費･過渡性能

実機実用上を考え，定格燃費のみならず，中間出力の燃費も改善する適合を行った。同時に機械の作業性向上させるため，過渡での動力性能も確認しながら，改善を行った。

4.3 排出ガス性能

StageV 規制の対応にあたり，PM の排出低減のため，従来の SCR システムをベースに DPD を追加した。DPD は複数ある DOC（ディーゼル酸化触媒：Diesel Oxidation Catalyst）の一部を置き換えることで，外観構造への変更をなくした。これにより，従来機同等の搭載性を確保すると同時に投資を極力圧縮してコストアップを抑制することができた。低排気量の 6UZ1 は従来機より部品点数の削減を狙い，高排気量の 6WG1 の構造から SCR 触媒の数量を減らすことで最適化を計ったがその構造は今回も踏襲した 。**図 6** に 6WG1 の後処理装置の外観を示す。

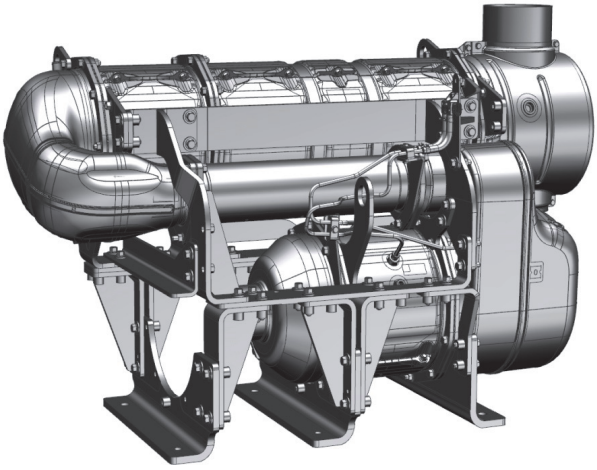


図 6　後処理装置外観

DPD は従来の StageⅢB 規制対応で蓄積した DPD 開発技術を元に開発を行い，商用車用でも採用実績のある PM 溜め込み容量が高い非対称セルを有する SiC 基材を採用し，商用車向けの開発で培った SiC 基材の DPD 開発技術を付け加えることで高い信頼性を確保した。

SCR は DPD の負荷を極力下げるために NOx 浄化性能の向上を狙い，従来機の鉄系触媒から銅系触媒に変更することでエンジンからの PM 排出を抑える排出ガスの適合を可能にした。

これらの技術採用により，PM の溜め込み量を増やすとともに排出を抑えることで PM の再生間隔をできる限り長くすることに成功した。

図 7 に排出ガス規制値達成のための変遷を示す。

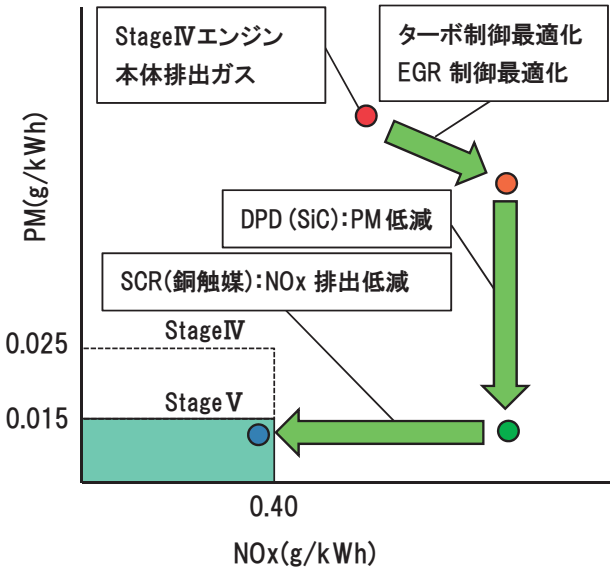


図 7　排出ガス規制達成フロー

4.4　各種オプション

OEM の要求に対応するため，従来の StageⅣ規制で展開していたオプションを StageⅤにも水平展開した上で，更なる拡販を狙い，新規オプションとして多段リブ形状のベルトの採用及びそれに対応した大容量 ACG（交流発電機：Alternating-Current Generator）も設定を行った。

図 8 にオプション例を示す。補機ベルトは各種補機負荷設定から 9 段のリブ構造を有するベルトを採用した。対応する補機として既存で持ち合わせる ACG の中から，近年の産業用でも発展している電制化・制御高度化に対応すべく，定格発電容量が 90 A を有する大容量の ACG を採用した。

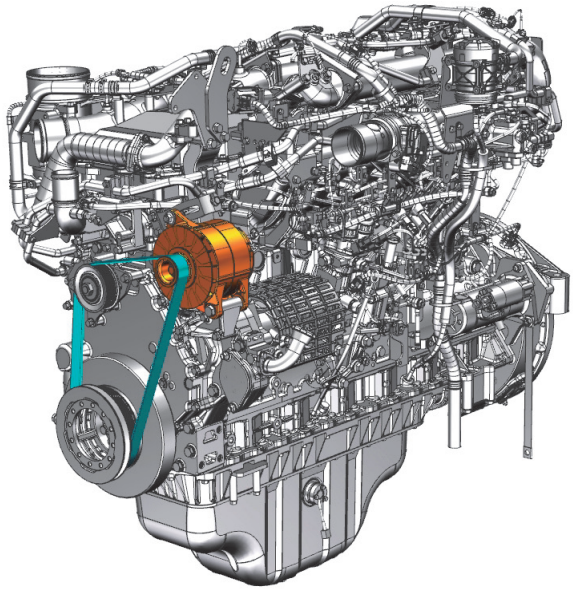


図 8　オプション例

5　要素技術

StageⅤ排出ガス規制を達成するために，次の要素技術を採用した。

5.1　燃焼最適化

後処理システムを強化したことにより，エンジンの燃焼制御の適合を最適化し，排出ガスの抑制及び燃費を改善した。クローズド PCV（Positive Crankcase Ventilation）システムを採用し，ベンチレーションから排出される PM を燃焼させることでシステムとしてトータルでの PM 排出を抑制した。

5.1.1　燃料噴射システム

環境負荷の低減に配慮し，エンジン単体でも高い排出ガス性能に実績のある従来機のコモンレール式噴射システムを踏襲した。**図 9** にコモンレール式噴射システムの概要を示す。

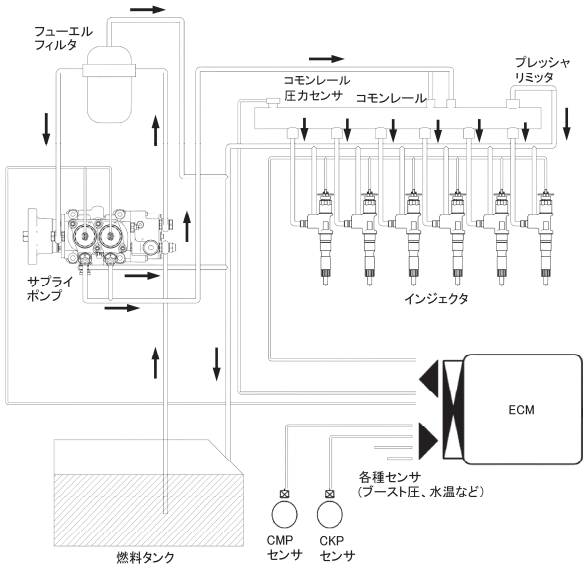


図 9　コモンレール式噴射システム

5.1.2　クローズド PCV システム

環境負荷を考慮し，ブローバイガスを吸気に戻し，大気開放させないシステムとした。オイルセパレータを設置し，オイルミストを捕捉してオイルパンに戻すことでオイル消費を低減させた。オイルセパレータはフィルターレスとし，メンテナンスレスを実現した。**図 10** にクローズド PCV システムの概要を示す。

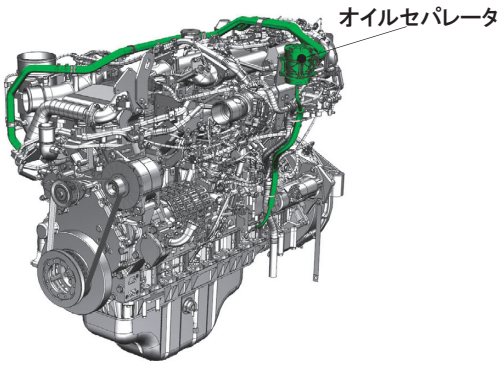


図 10　クローズド PCV システム概要

5.1.3　EGR システム

従来の採用していた EGR（排気再循環：Exhaust Gas Recirculation）システムに対して，更に高精度の排出ガス適合を実現するために，EGR バルブを小型化し，分解能を細分化した。

5.1.4　可変ターボチャージャ

従来と同様に制御の最適化を目的に可変ターボチャージャを採用した。従来型に対して，商用車で開発した高効率の翼車形状を採用し，中・低速トルクの改善及び性能向上を図った。

5.1.5　燃料噴射ポンプ

従来の 6UZ1・6WG1 に採用していた燃料噴射ポンプに対して，オイル潤滑部から燃料圧送部へのオイル侵入を防ぐためにプランジャ部にオイルシールを追加した（**図 11**）。これによりエンジンのオイル消費量を低減させた（**図 12**）。

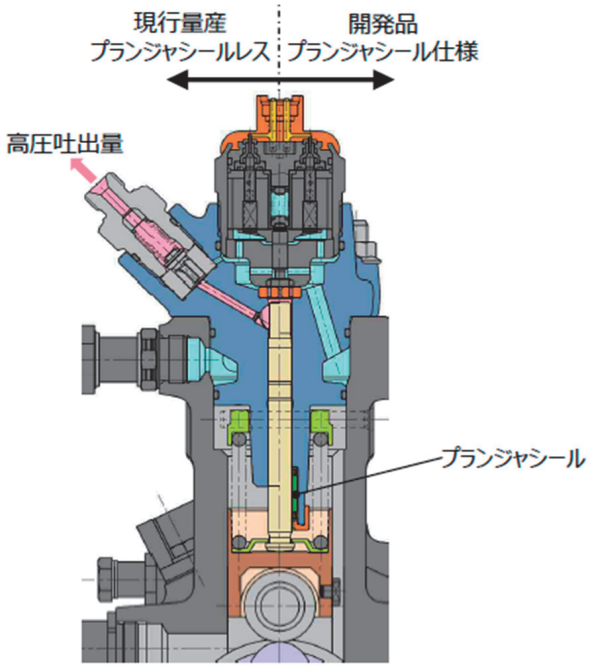


図 11　燃料噴射ポンプ概要

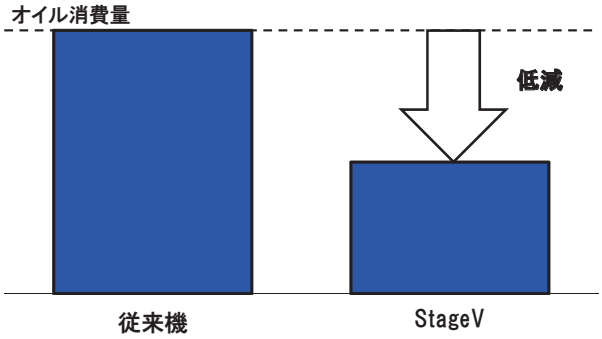


図 12　オイル消費量低減効果

5.2　後処理システム

これまでの開発では各排出ガス規制に対し，エンジン自体の規制物質の排出低減をする改良とともに後処

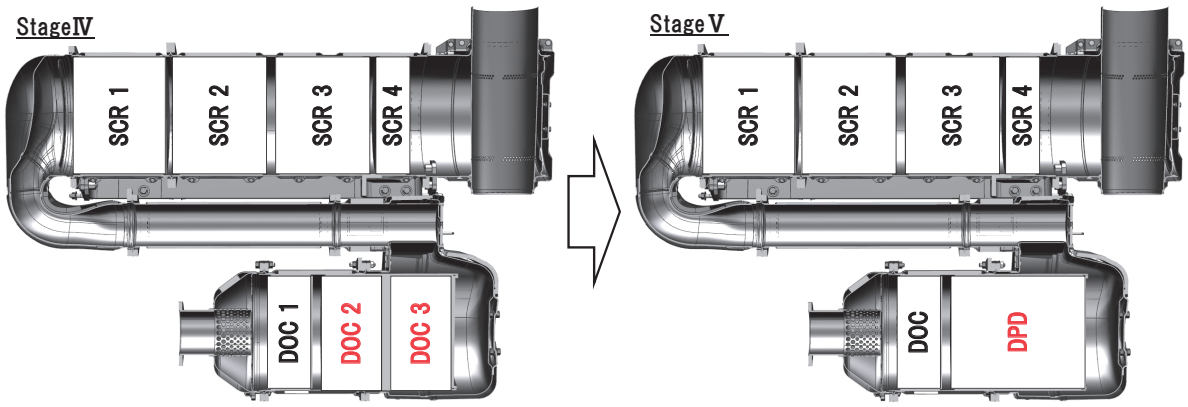


図 13　後処理システム構造

理システムを規制の変化に対応させて開発してきた。例えば，StageⅢB 規制対応では**図 4** からもわかるように NOx よりも PM 規制の強化率が高く，DPD を採用した。次の StageⅣ規制対応では NOx 規制が大幅に強化されたが，単純に SCR を追加すると高コストとなってしまうため，DOC と SCR の組み合わせの後処理システムを採用した。

本 StageⅤ規制対応の開発では新たな PN 規制に対応するべく，後処理システムに PM 低減させる機能として DPD を追加した。**4.3 節**で説明した通り，搭載性を確保するために後処理システムは従来 StageⅣ規制対応のものをベースに複数ある DOC を DPD に置き換えることで外観構造への変更を少なくした。**図 13** に後処理システムの構造図の変化を示す。

DPD は PM 及び灰分の高い溜め込み量を狙い，入口の気孔サイズをできる限り大きく確保した非対称セル構造を有し，再生中の長時間の高温になる排出ガスに耐えることができるように熱容量が大きい SiC 基材を採用した。

SCR は従来の鉄触媒から銅触媒のものに変更することで NOx 浄化率を向上させた。これにより，エンジン本体からの PM 排出を抑制し，DPD への PM 堆積負荷を軽減した。

それら DPD 触媒と SCR 触媒の変更及びエンジンの制御適合により，使い勝手の良さを考えた再生インターバル長期化を達成した。

6　あとがき

排出ガス規制の PM 規制値の強化と PN 規制に対応した上で，従来同等以上の性能・信頼耐久性の確保が求められる中，過去の開発経験を使い，商用車エンジン開発で培った技術の水平展開をすることで，高いメンテナンス性という付加価値も付けたエンジン開発ができた。

最後に StageⅤ規制対応 6UZ1・6WG1 のエンジン開発にあたり，多大なるご協力をいただいた協力企業の皆様，及び社内の関係各位に対し，紙面を借りて深く感謝の意を表する。

著　　者

谷山　由和

曲尾　卓磨

襟川　和幸

高嶋　昭宏

角田　裕

板橋　佑介

後藤　真司

石井　光

中村　忠視

伊藤　聖悟

論文・報告

Study on the Quantitative Evaluation Method of SVOC in a Vehicle Cabin Using the Passive Method

達　晃一*
Kouichi Tatsu
内藤　敏幸**
Toshiyuki Naito
徳村　雅弘***
Masahiro Tokumura
星野　邦広****
Kunihiro Hoshino
岩崎　貴普*****
Takahiro Iwasaki
神野　透人*****
Hideto Jinno
臼井　信介*****
Shinsuke Usui
長尾　祥大*****
Akihiro Nagao

Abstract

In order to lower vehicle interior VOC concentration, Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA) is announced self-imposed control of vehicle interior VOC concentration. Although high boiling point substances, such as phthalate ester, are contained in the substances for self-imposed control, these quantity boiling point substances are difficult to measure with sufficient accuracy in the collection by the conventional tube (Tenax-TA). In this research, we studied the plate material suitable for adsorbing SVOC. Solvent extraction method was found to be suitable for desorption method of SVOC adsorbed on plate. Quartz plate was the best for SVOC adsorption performance on plate and desorption performance of SVOC adsorbed on plate. In the actual vehicle measurement, DOA and DEHP were able to detect more efficiently than conventional active sampling.

1　Introduction

In February 2005, operating from the viewpoint that the interior of the passenger compartment of an automobile is part of a person's living space and using the same approach concerning chemical substances in the air as that used for housing, the Japan Automobile Manufacturers Association announced a self-imposed goal of reducing the concentrations of volatile organic compounds (VOCs) in the passenger compartment of passenger cars[(1)]. The objective of this voluntary initiative is to reduce the concentrations of indoor VOCs while satisfying the vehicle interior concentration guidelines established for nine substances (formaldehyde, acetaldehyde, toluene, xylene, ethylbenzene, styrene, tetradecane, di-n-butylphthalate (DBP), and di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP)) by the Ministry of Health, Labor and Welfare for new vehicle models produced in 2007. *p*-Dichlorobenzene (*p*-DCB), diazinon, chlorpyrifos, and fenobucarb are substances peculiar to houses and are not used for parts in the passenger compartment of cars; thus, these compounds were not targeted. In March 2006, an additional announcement was made to start voluntary initiatives similar to those for passenger cars for new models of trucks and buses produced in 2008 or later.

In response to this effort, in April 2007, standard JASO M 902, "Automotive Parts : Interior Parts and Materials-Measurement Methods of Diffused Volatile Organic Compounds (VOC)[(2)], was issued by the VOCs Measurement Subcommittee of the Automobile Interior Part Public Interest Corporation of the Association of Automotive Engineers as a quantitative method for evaluating VOCs released from the parts of automobile interiors. Furthermore, the standard JASO Z125, "Automobile : Car, Indoor Volatile Organic Compound Measurement Methods, was issued in 2009 as a quantitative evaluation method for VOCs in passenger compartments. These measurement methods include some of the semi-volatile organic compounds (SVOCs); however, in all cases, the main target is the measurement of VOCs. The measurement methods are summarized in Table 1. As a method for the quantitative evaluation of SVOCs from parts, standard ISO 12219-6, Method for the Determination of the Emissions of Semi-Volatile Organic Compounds from Vehicle Interior Parts and Materials at Higher Temperature : Small Chamber Method[(3)], has been issued. This method involves quantitative evaluation based on heating and desorbing SVOCs adsorbed onto the inner wall of the sample chamber; the procedure is the same as that stipulated in standard JIS A 1904, Determination of

*車両審査実験第二部　**㈱いすゞ中央研究所　***静岡県立大学　****日本カノマックス㈱
*****ジーエルサイエンス㈱　******名城大学　*******㈱カネカテクノリサーチ　********エスペック㈱

the Emission of Semi-Volatile Organic Compounds (SVOC) by Building Products : Micro Chamber Method[4]. SVOCs have poor collection efficiency in active sampling; in addition, the toxicity route of SVOCs suggests that transdermal exposure assessments are warranted.

Table 1 Measuring methods of reference standard

Type	Target	Reference standard	Apparatus
Vehicle	VOCs	JASO Z125 ISO 12219-1	
Material	VOCs	JASO M902 ISO 12219-2 ISO 12219-3	Bag Bag Small chamber
	Odor	ISO 12219-7	
Components	VOCs	VDA276 ISO 12219-4 ISO 12219-5	Small chamber Static
	SVOC	ISO 12219-6	Small chamber

Although the SVOCs emitted from automobile parts are quantitatively evaluated using the aforementioned approaches, because only active sampling methods have been developed for evaluating SVOCs in passenger compartments, establishing a passive method is necessary. In this research, we investigated the materials properties (i.e., the SVOC adsorption-desorption properties) of plates used for the passive method (referred to as the "plate method" hereafter to distinguish it from the general passive method) and evaluated the amount of SVOCs transferred once adsorbed to identify the optimum method for storage, etc. We evaluated the desorption from the plates with a recovery rate by dropping a reagent onto plates made of different materials (glass, quartz, and stainless steel, with silane and polydimethylsiloxane (PDMS) treatments) and then heating for desorption. As a result, we found that the recovery rate is low for stainless steel. Assessing the adsorptivity requires reproducing the actual SVOC emission from parts inside the vehicle compartment in real space. Therefore, the recovery rate was evaluated using parts of the SVOC inclusion that had already been confirmed. Accordingly, the largest amount was adsorbed onto the plate made of quartz. In addition, the collected components will clearly desorb (migrate) from the plate to the storage container, etc. when the collected plates are left untouched. Thus, if the analysis of SVOCs immediately after collection is impossible, then the total amount of SVOCs collected can be evaluated by covering the collecting surface with a quartz plate made of the same material as the collecting plate to suppress migration, followed by quantification of both plates. Furthermore, we measured the air components in the passenger compartment and assessed their practicality by comparing the results with those obtained via conventional active sampling. Research work flow is shown in **Figure 1.**

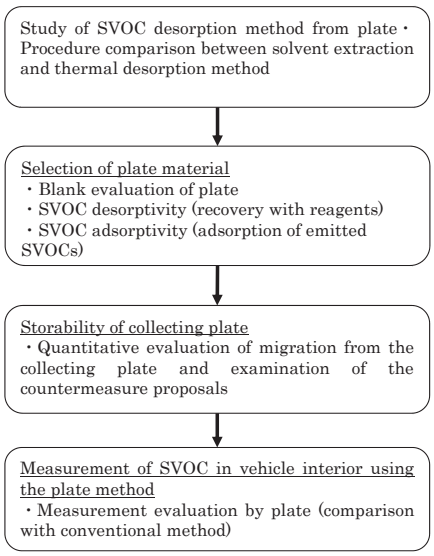


Figure 1 Research work flow

2 Experimental method

2.1 Selection of plate materials

2.1.1 Study of the SVOC desorption method

Two methods for desorbing the SVOC components adsorbed onto the plates were investigated : desorption using a solvent and desorption by heating.

In the solvent extraction method, 1 μL of a mixed standard reagent (each containing 1 μg/μL of 2-ethyl-1-hexanol[2E1H], dodecamethylcyclohexasiloxane[D6], dibutylhydroxytoluene [BHT], hexadecane [C16], diethyl phthalate [DEP], tributylphosphate [TBP], dibutyladipate [DBA], tris(2-chloroethyl)phosphate [TCEP], dibutylphthalate [DBP], eicosane [C20], dioctyladipate [DOA], triphenyl phosphate [TPP], and bis(2-ethylhexyl)phthalate [DEHP]) was added dropwise to a glass plate, which was subsequently dried for 5 min. From a test tube containing 1 mL of ethanol, 300 μL was dropped onto the glass plate; the surface of the plate was then wiped with washed-and-dried glass wool. The glass wool was placed in a

test tube and subjected to ultrasonic extraction for 15 min; the SVOC in the extract was subsequently quantitatively analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). One of the plates is shown in **Figure 2.**

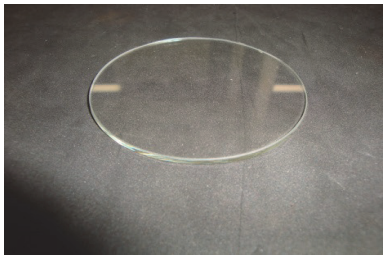
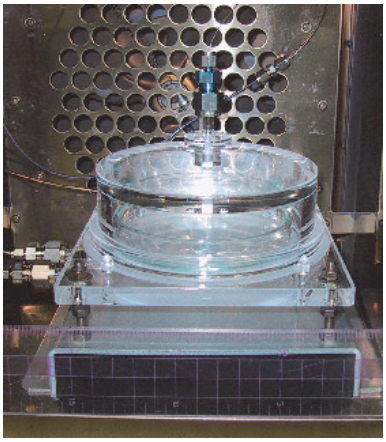


Figure 2　Glass plate (φ80 mm×2 mm)

In the thermal desorption method, 1 μL of the mixed standard reagent was dropped onto a glass plate, which was allowed to dry for 5 min; the temperature was then increased from 30 to 250°C using a generated-gas concentrating and sampling device (MSTD 258). The desorbed gas was collected in Tenax-TA adsorbent resin (**Figure 3**) and quantitatively analyzed by GC-MS. The analytical conditions are shown in **Table 2.**



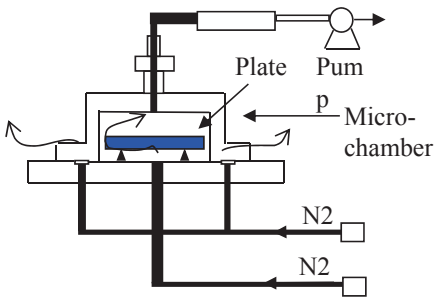


Figure 3　Outline of Micro-chamber

Table 2　Test conditions on GC-MS

Micro Chamber	GL Science MSTD258M-B
Chamber : Quartz	φ104 x H 30(254.7 mL)
Sampling flow rate:	
[Sampling]50 mL/min(Rim 80 mL/min, Center 20mL/min)	
[Stand-by]30 mL/min(Rim 30 mL/min, Center 20 mL/min)	
TenaxTA Sampling Flow Rate: 50 mL/min	
Sampling time	: 40 min
Pre.Purge	: 0.1 min(STD), 3 min(Plate and Materials)
Transfer Temp.	: 270 ℃
Oven Temp.	: 30 ℃→11 min →250 ℃(hold 29 min)
Thermal Desorption	Gerstel TDS
Tube Purge	: 1.0 min
Desorb Temp.	: 270 ℃
Desorb Time	: 10 min
Desorb Flow	: 10 mL/min
Split Vent Flow	: 100 mL/min
Split	: 1/10
He	: 1 mL/min
Cryo Focus	: Cryo -150 ℃, Cryo Heat Temp. 270 ℃
GC-MS	Agilent 5975C
Interface Temp.	: 280 ℃
Ion Source Temp.	: 200 ℃
Ion	: 70 eV
EM	: 0.8kV
Scan	: *m/z*35～450
Solvent Delay	: 3 min
Column	: Inert Cap-5MS/Sil 0.25 mm x 30 m df=0.25 μg,40℃(5 min) -280℃(8 min),10 ℃ /min

2.1.2　Blank evaluation of plates

For quantitative evaluation, the components desorbed from the plates were captured. The plate materials used in the blank test of the single plate were glass, quartz glass, and stainless steel; a silane treatment and a PDMS treatment were applied as surface treatments, providing five kinds of plates (φ80 mm × 2 mm). The procedure included cleaning each plate in ethanol, aging each plate at 250°C for 30 min, and then subjecting each plate to the SVOC desorption method described in section **2.1.1.** **Figure 4** shows the appearance of a PDMS and a stainless steel plate.

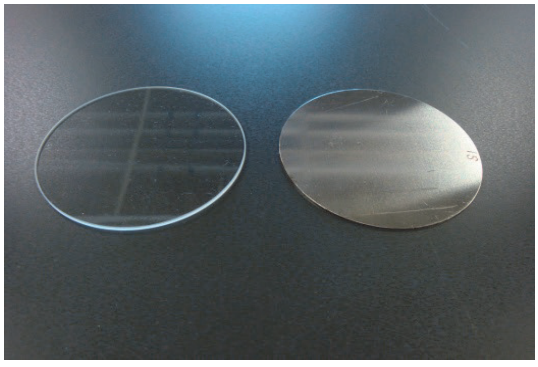


Figure 4　SUS and PDMS Plate (φ80 mm×2 mm)

2.1.3 Evaluation of SVOC desorptivity from plates

To each plate, 1 μL of the mixed standard reagent described in section 2.1.1 was added dropwise; after the plates were allowed to dry for 5 min, evaluation was conducted using the SVOC desorption method described in section 2.1.1.

2.1.4 Evaluation of SVOC adsorptivity on plates

To evaluate the SVOC adsorption performance of the plates, we used our previously developed method for releasing the materials.

A floor mat (50 mm × 50 mm) made of polyvinyl chloride (PVC) was used as an SVOC emission source, the heating temperature of the chamber was 65°C, and the emission time was 1 h. The evaluation method using a microchamber is shown in Figure 5. The amounts of SVOCs adsorbed onto the plate were evaluated using the SVOC desorption method described in section 2.1.1.

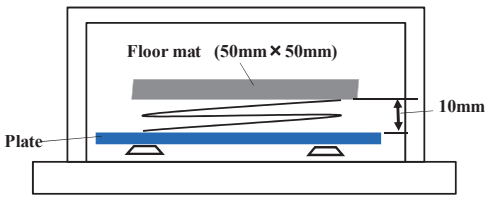


Figure 5 Evaluation method of SVOCs adsorption amount on each plate using parts

2.2 Storability of collecting plates

Previous research[5] has already confirmed that SVOC components transfer from the collecting plates to the storage container, etc. Thus, in the present work, the upper and lower surfaces of the collecting plate were sandwiched between plates of the same material and subjected to a surface treatment. The plates were allowed to stand for three days at 40°C and 40% relative humidity and were quantitatively evaluated with the collecting plate to check storability. The plate selected in section 2.1.4 was used for the evaluation.

2.3 Measurement of SVOCs in vehicle interiors by the plate method

In this study, SVOC measurement conditions in the passenger compartment were set assuming summer season when SVOC emissions increased. In the past research[6], the evaluation is carried out under the condition that the vehicle is left outdoors. Since the temperature and humidity conditions depend on the weather conditions at that time, it is impossible to evaluate by fixing the temperature and humidity. Under such test conditions, quantitative comparison of results is difficult. Therefore, in this study, we decided the conditions so that the measurement results can be compared quantitatively.

For SVOC measurements in the interior of a vehicle, two evaluation scenarios were performed: one case where a new light truck was installed in an environmental test room with controllable solar radiation and temperature (infrared lamp) and another case of outdoor exposure. We investigated these two cases to check whether the SVOC components could be similarly detected under temperature-controlled conditions in the environmental test room and under outdoor conditions. The detailed conditions are shown in Figure 6. The test conditions for measuring VOCs in the passenger compartment were individually selected with reference to temperatures measured outdoors because standard JASO Z 125[7] has not yet been introduced. The temperature shown in the figure is the temperature set inside the cabin. The temperature and relative humidity in the test chamber were constant at 23°C and 50%, respectively. The conditions for collecting Tenax were 100 mL/min × 100 min = 10 L. By contrast, the plate was installed in the passenger compartment on the precondition of an opened door. Table 3 shows the setting conditions. The plate in the environmental test room was evaluated together with the collecting effect (generally used in evaluating condensed components) in the case of cooling the plate. The cooling device used for the evaluation is shown in Figure 7. We preliminarily confirmed that the surface temperature could be controlled to 20-25°C when the passenger compartment temperature was 65°C; however, because the dew point at 65°C and 20% relative humidity is approximately 32°C, the temperature of the cooling device was set to 40°C to prevent condensation. The collection position was the exposed part of the human body in the vicinity of the face, which is the most exposed part. Outline of vehicle test is shown in Figure 8.

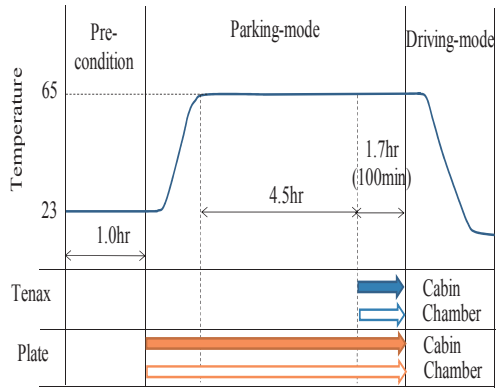


Figure 6 Evaluation schedule on SVOC emitted from vehicle interior

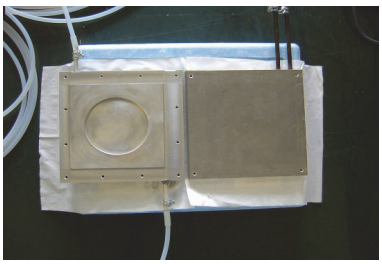
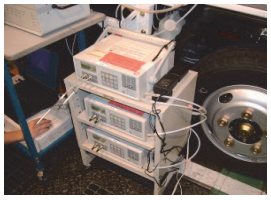


Figure 7 Outline of cooling unit

Table 3 Evaluation conditions on SVOC into vehicle interior

Index	condition	Sampling point	Flow rate (mL/min)	Sampling volume(L)
Vehicle type	Light truck	-	-	-
chamber	Tenax	Driver's Face	100	10
	Plate/Cooling Unit(40°C)		-	-
Out door	Tenax		100	10
	Plate		-	-

(a)Chamber test



(b)Sampling pump for Tenax

(c)Outdoor test

(d)Plate was set in cabin

Figure 8 Outline of vehicle test

3 Results and Discussion

3.1 Results of selection of plate material

3.1.1 Results of our study of the SVOC desorption method

A comparison of the recovery rates by thermal desorption and solvent extraction is shown in Figure 9. These results show that the recovery ratio by solvent extraction of 2E1H, D6, BHT, DEP, and C16 was found to be as low as 40%. Consequently, we presumed that the components that disappeared easily dissipated during the procedure after the reagent was dropped onto the plates. In addition, the recovery ratio of the thermal desorption was greater than that of the solvent extraction for the other components. The low recovery ratio of the solvent extraction is likely due to the solvent wiping process, etc. However, the authors of a previous paper[8] reported that not only the solvent type but also the extraction temperature is related to the recovery rate; thus, room for further improving the recovery rate in future investigations exists. In the present study, we decided to use the thermal desorption method for desorbing SVOCs collected on the plates.

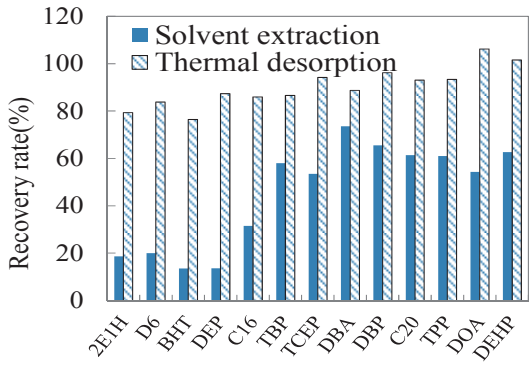


Figure 9 Compare of recovery rate between solvent extraction and thermal desorption

3.1.2 Blank evaluation results of plates

The measurement results for the plate blank are shown in Figure 10. Hexamethylcyclotrisiloxane(D3) and octamethylcyclotetrasiloxane (D4) were detected from the PDMS-treated plate. The corresponding amounts of SVOCs obtained from the other plates were less than 1 ng. Therefore, we decided to exclude the PDMS-treated plate from the experiments conducted in the remainder of this study.

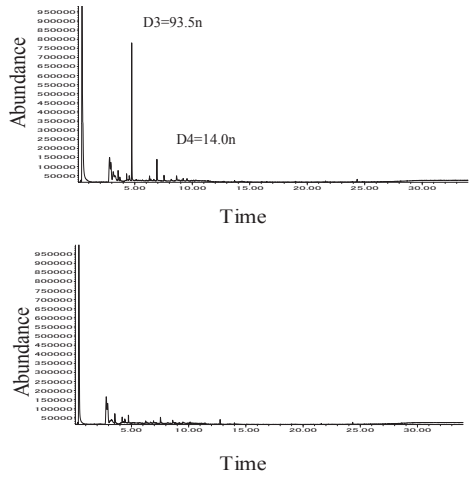


Figure 10　Chromatograph of plate blank (upper: PDMS lower: Glass)

3.1.3　Evaluation of SVOC desorption ability using plates

The recovery rates of SVOC components from various plates are shown in **Figure 11**. These results indicate that the recovery rate of certain components (e.g., DEHP) from the stainless steel plate was low, suggesting that stainless steel is not a suitable material for collecting plates. The poor recovery rate from stainless steel is likely associated with the oxidative decomposition of DEHP on its surface. The recovery rate from the other plates was good (approximately 80% or greater).

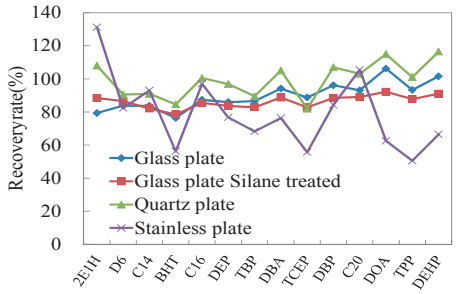


Figure 11　Result of comparing recovery rate of each plates

3.1.4　Evaluation of SVOC adsorption ability on plate

The results of our evaluation of the adsorption efficiency of DEHP emitted from the parts on each plate are shown in **Figure 12**. From these results, we found that the quartz plate exhibited the highest adsorptivity among the investigated plates. Shinohara et al.[9] have reported that the degree of adsorption varies with the adsorbent. This variation is speculatively attributed to differences in the surface area, electric charge, and functional groups among adsorbents. In this case, the efficiency is assumed to be enhanced by the interaction between the hydroxyl groups on the quartz glass surface and carbonyl groups of the phthalic acid ester. Given the results presented in section **3.1.3**, we decided to use quartz plates in our study, which enables the efficient evaluation of SVOCs.

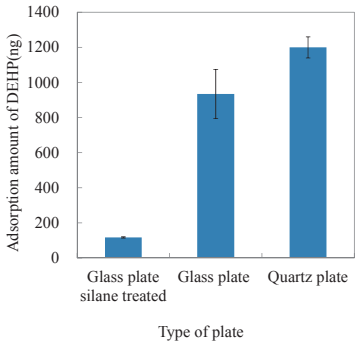


Figure 12　Adsorption amount of DEHP.

3.2　Storability of collecting plates

The results of our evaluation of storability, where DEHP emitted from parts was adsorbed onto the plates, are shown in **Figure 13**. These results show that approximately 57% of the DEHP emitted from the parts was adsorbed onto the chamber wall. Furthermore, the amount transferred from the collecting plate was trapped in the storage plate and the total amount was the same as that before storage (DEHP amount before storage : 2601 ng). For storing the collecting plate, a sandwich method of shielding the upper and lower surfaces of the collecting plate with a quartz plate was applied.

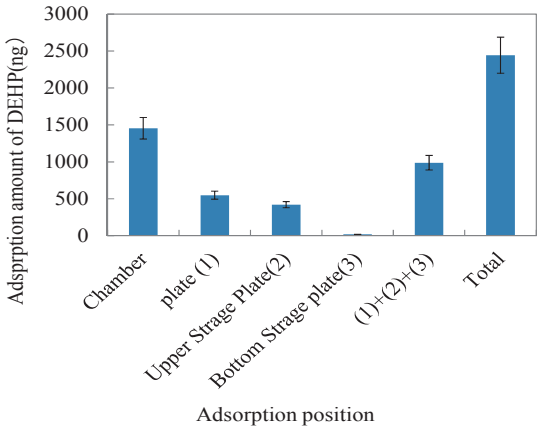


Figure 13　Adsorption amount of DEHP

3.3 Measurement of SVOCs in the interior of a vehicle by the plate method

The results of SVOC determination in the interior of a vehicle are shown in **Figure 14.** 2E1H and BHT were more efficiently captured by active sampling using Tenax than with the plate method. However, for DOA and DEHP, the efficiency of the plate method was good. The results for DBP were dispersed because of its low concentration.

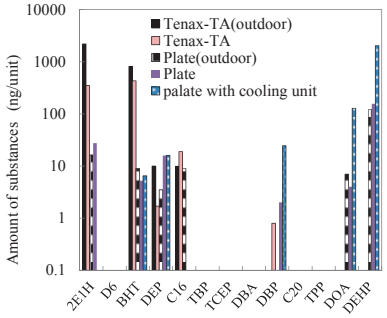


Figure 14 Quantitative results of SVOC into vehicle interior

The ability to efficiently collect the components by the passive method can be said to be easy to adhere to the skin etc. That is why components such as DEHP are regarded as a problem concerning absorption toxicity (dermal toxicity) of the skin.

Furthermore, DBP, DOA, and DEHP could be more efficiently collected in a device equipped with a cooling unit, which likely facilitated condensation because of the temperature difference. The results obtained via outdoor and environmental-test-room active sampling and those obtained with plates were similar. The results show that an environmental test room equipped with an infrared lamp can reproduce outdoor storage conditions. The temperature and humidity during the outdoor test are shown in **Figure 15.**

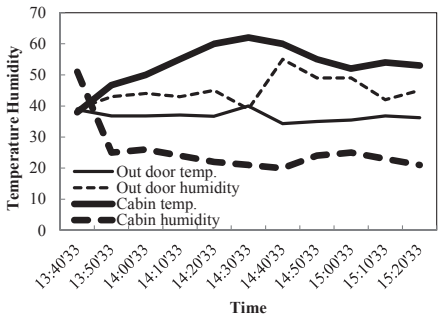


Figure 15 Temperature and humidity in the Cabin

The influence of humidity in each method will be described. Active sampling using Tenax has been reported [10] to be less sensitive to humidity. On the other hand, regarding the plate method, the efficiency may differ depending on the components to be collected. In other words, in the case of a hydrophilic component, the efficiency is considered to be improved when the humidity is high. In order to reduce the influence of humidity, it is important to prevent dew condensation from occurring on the plate surface, so the plate may be stored at the evaluation temperature before being used for evaluation.

Next, the influence of ultraviolet rays will be described. Although it is reported [11] that general VOC is a cause to generate photochemical oxidant by sunlight, there is no actual measurement case in the passenger compartment. Also, since ozone is required for this reaction, it is considered that ozone is hardly generated because short wavelength ultraviolet rays are cut when sunlight passes through the glass. I think that it is better to distinguish properly using active sampling and plate method by the route of toxicity of the target ingredient (inhalation, transdermal).

4. Conclusion

(1) Thermal desorption was found to be a suitable method for desorbing SVOCs adsorbed onto the plate.

(2) Among the investigated plates, the quartz plate exhibited the best desorption ability of an SVOC reagent dropped onto the plate and the best adsorption ability of DEHP released from the automobile parts.

(3) By sandwiching the collecting surface of the plate after collection with a quartz plate, we could assess the total amount of trapped SVOCs by quantitatively analyzing the sandwiched plate at the same time as the collecting plate.

(4) SVOCs in the interior of a vehicle were quantitatively evaluated using a quartz plate. The results showed that evaluation could be conducted more efficiently than with active sampling.

(5) SVOCs emitted from the vehicle interior were evaluated using a quartz plate. The results confirmed that the assessment is more efficient than that with conventional active sampling. In particular, DEHP could not be detected by active sampling but was detected by the plate method.

On the basis of the aforementioned results, we examined the procedure using quartz plates to evaluate SVOCs. Although some components were difficult to evaluate because of their low concentration, we successfully evaluated components such as DOA and DEHP, which are difficult to evaluate by conventional methods. We believe that this method can be used for evaluating transdermal exposure to DEHP because the passive method does not use a pump and readily enables long-term evaluation.

In addition, in order to evaluate the occupant's exposure, it is necessary to carry out the measurement according to the riding time of the occupant using this method.

Acknowledgment

We express our heartfelt gratitude to Mr. Takashi Sone of Espect Corporation, Professor Shinichi Tanabe of Waseda University, Professor Shinsuke Kato of the University of Tokyo, Institute of Industrial Science, Professor Naohide Shinohara of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, and all of our other research collaborators for their advice and instruction.

References

(1) Japan Automobile Manufacturers Association (2005) : Voluntary Initiatives for VOC Reduction in the Cabin, JAMA Report, No. 98
(2) JASO M 902(2007) : Automotive parts-Interior Parts and Materials-Measurement Methods of Diffused Volatile Organic Compounds (VOC)
(3) ISO 12219-6(2017) : Method for the determination of the emissions of semi-volatile organic compounds from vehicle interior parts and materials at higher temperature - Small chamber method
(4) JIS A1904(2015) : Determination of the Emission of Semi Volatile Organic Compounds (SVOC) by Building Products Micro Chamber Method
(5) Hiroshi Seto, Ikue Saito, Aya Onuki(2001) : Movement of Phthalic Acid Esters from the Surface of Materials to the Stuck Adsorbent, Earozoru Kenkyu, 16 (4), p.305-310
(6) Marion, J.F.,Brent,D.K.(2003) : Measurement of volatile organic compounds inside automobiles, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology,13, p.31-41
(7) JASO Z 125(2009) : Road Vehicles-Interior-Measurement Methods of Diffused Volatile Organic Compounds (VOC)
(8) Akiko Tanabe, Shigeru Suzuki, Yoshifumi Hanada (1999) : Evaluation of an Ultrasonic Extraction Method Compared with the Soxhlet Extraction Method for the Determination of Polyaromatic Hydrocarbons and n-Alkanes in Airborne Particular Matter, Bunseki Kagaku, 48 (10), p. 939-944
(9) Naohide Shinohara(2013) : Evaluation of Transdermal Exposure to Phthalate Esters - Establishment and Application of Skin Penetration Test Method - Annual Report of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Annual Report of Research Results
(10) M.Takekuma, Sadaaki Miyake, Mariko Takano and Rie Ishii(2016) : Studies on the method for measuring indoor air pollution, Report of Saitama Inst. of Public Health,Vol.50
(11) Y.Fukusaki(2014) : Status of the Atmospheric Levels of Volatile Organic Compounds in City of Yokohama,Journal of the JIME,49,(6),p.794-799

著　者

達　晃一

内藤　敏幸

徳村　雅弘

星野　邦広

岩崎　貴普

神野　透人

臼井　信介

長尾　祥大

論文・報告

車両軽量化へ向けたアルミニウム合金の応用

Application of Aluminum Alloy for Commercial Vehicle Mass Reduction

八木　三哉*　Mitsuya Yagi
海老原　峻義*　Takayoshi Ebihara

要　旨

アルミニウム合金の応用による車両軽量化の技術開発は，乗用車のみならず商用車においても極めて重要である。本稿では，いすゞ自動車でのアルミニウム合金製部品の量産化事例，開発事例，及び基礎評価試験結果などを紹介する。また，今後採用を拡大するための技術的課題を述べる。

Abstract

Aluminum alloy application technology for vehicle mass reduction is extremely important at not only passenger vehicle but also commercial vehicle. This paper shows how aluminum alloy are applied for many kinds of Isuzu commercial vehicle actual parts, development examples, results of fundamental experiment and what future technical problems to solve are.

1　はじめに

地球温暖化防止の重要性が唱えられて久しい。昨今の世界で多発する異常気象を目の当たりにするにつけ，その深刻さをより身近に感じさせられる。当然ながら各産業界では，温室効果ガス排出量の低減に向け精力的な取組みがなされている。一方，自動車業界においては，CO_2 の大幅削減に向け EV（Electric Vehicle）化に代表されるようなパワートレインの抜本的な革新が進んでいる。併せて燃費向上を図るため，車両の軽量化開発も活発である。中でも多種類の材料を適材適所に配し，それらの接合技術などの要素技術開発も伴って軽量化を具現化するマルチマテリアル車体の量産化が，乗用車を中心に進んでいる[(1)]。この目指すべき方向性は，商用車においても同様である。現在鉄に代わる軽量化材料の中心はアルミ合金であり，本稿では，いすゞ自動車で量産化してきたアルミ製部品の紹介，及び開発事例，今後の課題などについて述べる。

2　軽量化とアルミ量産化事例

商用車においては，**1章**で述べた温暖化防止対応に併せて，規定の車両総重量の中で，お客様の運送物の積載重量をできる限り多く確保するためにも，軽量化のニーズは極めて高い[(2)]。構造設計の最適化と併せ，個々の部品ごとの軽量化の積み重ねが目標とする積載タイトルの確保につながる。

アルミニウムは板材をモデルにした場合，曲げ剛性（$E \cdot I$）[1)] を鋼板と等価とすると，鋼板比板厚を 1.44 倍にすることで 50 % の軽量化が可能となる[(2)]。また，成形工法も多様であることから，鉄系からの材料置換では金属材料の中で最も代表的な軽量化材料となっている。

注 [1)] E：ヤング率，I：断面二次モーメント

図 1～図 7 に従来のアルミ化量産事例を示す。**図 1** の FUPD（前方車両突入防止装置：Front Under-run Protection Device）と RUPD（後方車両突入防止装置：Rear Under-run Protection Device）は，フロントとリヤ側のアンダランプロテクションデバイスで，衝突時の乗用車の突入防止の法規に対応した強度を必要とする部品である。FUPD は，従前の鋼板溶接品に比べ約 30 % の軽量化が図れた。RUPD は，アルミ製バン架装車などへ装着する際の意匠性の目的もあり従前からアルミ製が多かったが，この法規制が今後強化されることから，高強度アルミ合金への材質変更を含めた強度向上策が必要となっている。

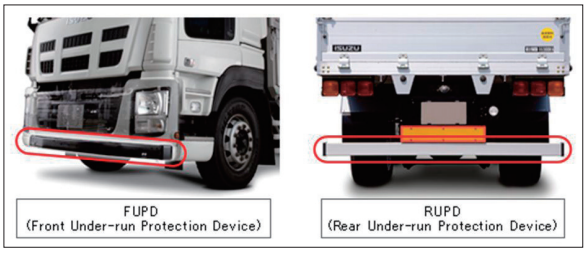


図 1　FUPD & RUPD

*車両審査実験第二部

図2～図3にエアサスペンションシステムに用いたアルミ部材を示す。許容軸重確保のためアルミ化により大幅な軽量化を図ったもので，エアサスビーム及びトルクロッドブラケットに溶湯鍛造品，トルクロッドに鍛造品を用いることで高負荷入力部位の耐久信頼性を満足できた。

図2　エアサスビーム

図3　トルクロッド & ブラケット

図4はブレーキ＆クラッチペダル･ブラケットで従前の10部品の鋼板溶接品を一体成形のダイカスト品に代替し，約40％の軽量化を達成した[(2)]。

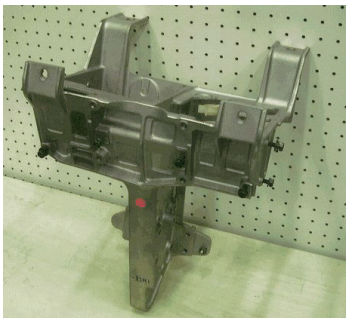


図4　ブレーキ & クラッチペダル･ブラケット

図5は燃料タンク，**図6**はエアタンク，**図7**はシートサスペンションである。アルミニウムは裸耐食性に優れていることから，これらの重要部品においても無塗装で使用した。また図にはないが，シャシクロスメンバ，プロペラシャフト，ラジエータファンガイド，オイルパン，トランスミッションケースなどが近年鉄系からアルミへ材料置換した主な量産化事例であり，各々30～50％程度の軽量化を達成した。**表1**にその一覧を工法別に示す。

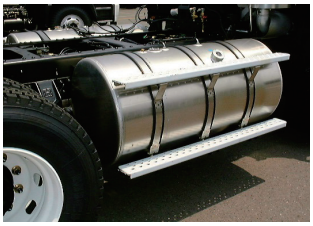


図5　燃料タンク

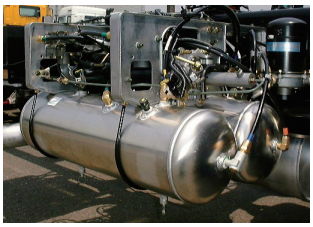


図6　エアタンク & ブラケット

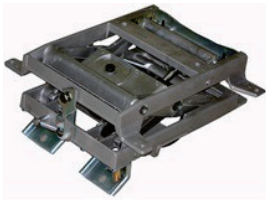


図7　シートサスペンション

表1　工法別量産化事例

工法	主な部品
板加工	燃料ﾀﾝｸ(A5083-O)，ｴｱﾀﾝｸ(A5083-O)
押出	FUPD(A7003-T5)，RUPD(A6061-T6)， ｼｬｼｸﾛｽﾒﾝﾊﾞｰ(A6061-T6)，ﾌﾟﾛﾍﾟﾗｼｬﾌﾄ(A6061-T6)， ﾗｼﾞｴｰﾀﾌｧﾝｶﾞｲﾄﾞ(A6063-T5)
鍛造	ﾄﾙｸﾛｯﾄﾞ(A6061-T6)
溶湯鍛造	ｴｱｻｽﾋﾞｰﾑ(AC4CH-T6)，ﾄﾙｸﾛｯﾄﾞﾌﾞﾗｹｯﾄ(AC4CH-T6)
鋳造	ｼｰﾄｻｽﾍﾟﾝｼｮﾝ(AC4C-T6)，ﾄﾗﾝｽﾐｯｼｮﾝｹｰｽ(AC4B-T6)
ダイカスト	BCﾍﾟﾀﾞﾙ & ｴｱﾀﾝｸﾌﾞﾗｹｯﾄ(ADC12)，ｵｲﾙﾊﾟﾝ(ADC12)

（　）内は材質

3　アルミ化開発事例

3.1　コネクティングロッド

エンジンのコネクティングロッドは，ピストンとクランクシャフトを連結する重要な強度部品である。これを軽量化することで往復慣性重量が低下し，周辺部品の軽量化，振動騒音の低減，及び回転軸部のフリクション低減による燃費向上が図れる。**表2**にプロト品を示す。当初は，すべてCFRP（炭素繊維強化プラスチック：Carbon Fiber Reinforced Plastics）製（**表2**のA）で試作したが，クランクとの連結大端部のハウジング剛性が不足しメタルベアリングの焼付が懸念された。そこで大端部にアルミ合金，ステム部にCFRP，ジョイント部に鋼材を用いた構造（**表2**のB）

にすることで耐久信頼性を満足することができた。かなり前の事例ではあるが，このころからマルチマテリアル化のアイデアが既に生まれていたといえる。

表 2　軽量コネクティングロッド外観

本体材質	鋼	A）CFRP	B）Al＋CFRP＋鋼
外観			
重量比	1	0.45	0.65
往復慣性重量比	1	0.40	0.35

3.2　シャシフレーム

図 8 にプロト品を示す。すべて A6061-T6 の押出し形材で造り，断面形状の最適化で目標の耐久信頼性と剛性を満足させた。中型トラックの例で 100 kg 以上の軽量化が得られた。当時米国では，トラクタヘッド用を中心にオールアルミ製シャシフレームが量産化[(2)] されていたが，鉄系部品の取付け部で異種金属接触腐食（以下，“電食”と称する）及びロングホイールベース車での捩り剛性の低下などの問題があり，ごく少量の生産量に留まっていた。アルミ化が盛んな欧州でもほとんど量産実績はなく，国内での量産化は，依然として厳しい。

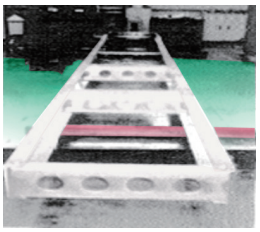


図 8　シャシフレーム

3.3　スペースフレームキャブ

生産台数が乗用車より少ないトラックのキャビンをアルミ化していく場合，モノコック構造でプレス成形のアルミパネルを大量に使用していくよりも，型投資の少ないアルミ押出し形材を駆使したスペースフレーム構造のほうが効率的である。その場合，溶接を使わずボルテッドで組み上げる工法も選択肢の一つとなる。

図 9 にボルテッドで組み上げたスペースフレームプロト車の CAD（Computer-Aided Design）図を示す。ここで重要なのは，各締結部の疲労強度特性と破壊がボルトではなく，アルミ母材で安定して生じることである。これにより CAE（Computer-Aided Engineering）でのキャビン耐久強度の作りこみが可能となる。アルミ部材をボルト締結すると，鋼材の締結に比べボルトが破壊しやすくなる。これはアルミのヤング率が鋼より低く，被締結体のばね定数が低下することから，同じ入力であってもボルトへの負荷応力が増大するためである。

図 9　スペースフレームキャブ

これを確認するため，テストピースによる締結部材の CTS（十字引張強度：Cross Tensile Strength）疲労試験を実施した。図 10 にその外観，図 11 にその結果を示す。破壊は，すべてアルミ母材であった。また試験中のボルト軸力の変化を図 12 に示す。試験開始時は初期なじみによる軸力低下が見られたが，その後はアルミ母材が破壊するまで軸力の低下は見られなかった。これは TSS（引張せん断強度：Tensile Shear Strength）疲労試験でも同様の結果であった。これらのデータを基に造り上げたスペースフレームキャブは，実機での耐久試験を満足した。

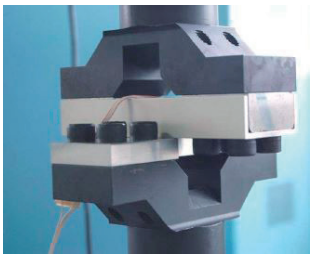


図 10　CTS 疲労試験外観

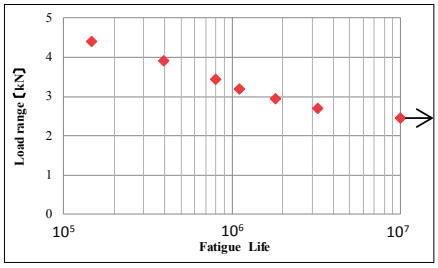


図 11　CTS 疲労試験結果（応力比 R=0.1）

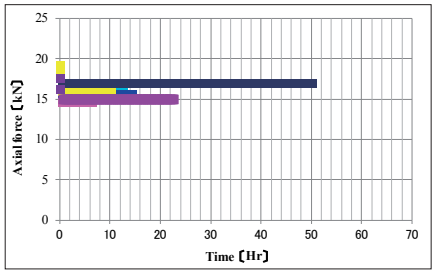


図 12　CTS 疲労試験中のボルト軸力の変化

参考に**図 13** に欧州で量産化されたアルミスペースフレームキャブの骨格部を示す[2]。アルミ押出し形材をすべて MIG（Metal Inert Gas Welding）溶接で組上げている。溶接時は全体を冶具で固定し，回転させながら施工している。溶接歪の低減に苦慮しているようで，用途限定の少量生産車であった。またバスの事例ではあるが，欧州ではアルミ押出し形材を入力の厳しさに応じた多種類のアルミ製ガセット（応力の分散を目的とした部品）を駆使し，ボルテッドで組上げるアルミ製バスが数十年前から量産化されている。この技術は，トラックにおいても応用可能な工法と考える。**図 14** にプロト車の外観の一部を示す。

図 13　欧州のスペースフレームキャブ[2]

図 14　ボルテッド組立車体

3.4 車体パネル

ピックアップトラックを例にとると，海外ではフォード F150 のオールアルミボディ[3] に代表されるようにアルミパネルの量産化が進んでいる。乗用車のアルミ化がエンジンフードから始まり，その後フェンダ，ドア，ルーフパネルなどへと拡大していったように，ピックアップトラックでもエンジンフードのアルミ化の優先度が高い。**図 15** にプロト品の外観を示す。接合工法として抵抗 SPOT 溶接，SPR（セルフピアスリベット：Self-Pierce Riveting），FSSW（摩擦攪拌点接合：Friction Stir Spot Welding）を検討したが，安定して高い接合強度が得られる SPR を採用した。**図 16** に 3 工法の強度試験結果と断面写真を示す。SPR を採用したプロト品はすべての性能試験，及び耐久試験の目標品質を満足した。

図 15　エンジンフード

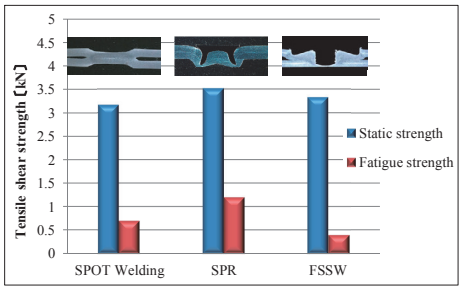


図 16　3 工法の TSS 強度比較
（厚さ 1.2 mm アルミ板 同士）

4　異材接合

商用車のパネル部材などで部分的にもアルミ化を検討していく場合，鋼板との異材接合工法をどう選択していくのかが重要な課題である。先の FSSW がアルミ板と鋼板の点接合用に乗用車で採用された事例はあるが[4]，接合条件が少々デリケートである。より安定した接合強度を確保するには，**図 17** のように接合ツール先端を鋼板部まで圧入させ，鋼板のアンカ効果を利用する手法[5] が有効と思われ，今後の実用化に期待したい。

図 17　アンカ効果を利用した FSSW 異材接合断面[5]

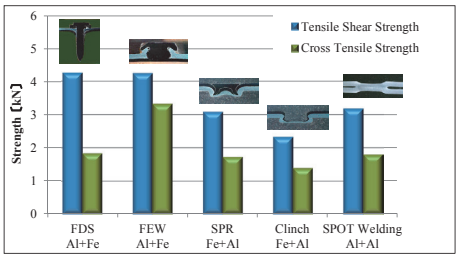


図 18　異材接合品の強度試験結果

図 18 にアルミ板（A6022-T4, 厚さ 1.2 mm）と軟鋼（JSC270D, 厚さ 0.8 mm）を各種接合工法で締結した強度試験結果と断面写真を示す。参考比較の SPOT 溶接は，厚さ 1.2 mm のアルミ板同士とした。図中の FDS（Flow Drill Screw），FEW（Friction Element Welding）は最近欧州の乗用車を中心に量産化された新しい技術である[6]。いずれの接合工法も各々の特徴を活かして乗用車のキャビンなどへの採用が拡大しており，商用車においても今後のアルミ化検討時の異材接合部では，締結構造，強度，生産性，コストの面から的確に選定していく必要がある。

5　アルミニウムへの期待

乗用車，商用車を問わず軽量化へ向けたアルミニウムの使用量が今後増えていくのは間違いないと思われる。そのスケールメリットを活かし，リサイクル材の有効活用を含めた素材コストの低減を強く要望したい。**3 章**で述べた開発事例が量産化できなかった最大の理由はコストであった。またアルミニウムは，超ハイテンに代表される鋼板に比べると新しい合金開発の例が少なく，用途開発及び接合技術などの要素技術開発に重心が置かれている感がある。今後鉄とアルミニウムの共存が更に進んでいくとすれば，必ず課題となる鋼板との電食に強いアルミ合金，あるいはアルミ側の新しい表面処理技術の開発に是非とも期待したい。鋼板側のめっき性能及びシーラ塗布に頼っていたのでは，使用環境が乗用車より厳しい商用車で今後アルミ応用の拡大を図るのは厳しい。また更なるアルミ合金の高強度化では，超ハイテンにおける遅れ破壊現象と同様，応力腐食割れに留意する必要があり，これを克服した高強度，高押出成形性，かつ高ヤング率合金の開発にも将来的に期待したい。

図 19 に基礎試験でアルミ母材に生じた電食の断面写真，**図 20** に同じく応力腐食割れの断面写真を示す。

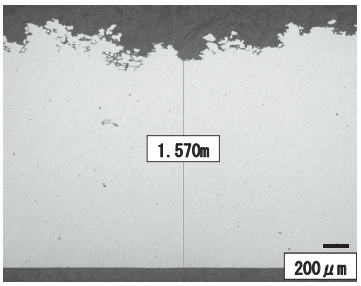


図 19　電食の断面（A6022 厚さ 2.0 mm）

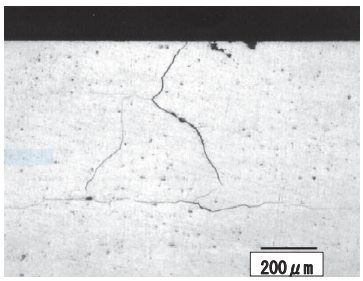


図 20　応力腐食割れの断面

6　おわりに

商用車は，乗用車のような高価格，高級モデルの車型展開が難しいこともあり，コストアップを伴うアルミニウムの大幅な採用車型の開発は厳しい状況にある。後付けの単体部品のアルミ化はほぼ完了した感はあるものの，キャビンへのアルミ板の採用実績がないなど，まだいわゆる鉄の使い切りの段階である。現状では，アルミニウムに換えて超ハイテンを選定する部品の事例もある。とは言え将来的に軽量化を更に加速させていくには，アルミニウムを効率よく使いこなしていくことが不可欠であり，超ハイテン及び樹脂材料などと共存させたマルチマテリアル化へ進まざるをえない。その際は，本文で述べた異材接合技術をいかに効率よく量産ラインへ展開していくか，また線膨張係数の違いによるアルミ側の歪，変形防止が大きな課題となる。永遠のテーマともいうべき車両の軽量化開発に対し，商用車構造の特徴を活かしたアルミ化の応用を探求すると伴に，従来以上に開発，生産部門が一体となって推進していく必要がある。

本稿は，自動車技術会誌 2018 年 Vol.72，No.11 に掲載した「商用車におけるアルミニウム合金の応用」の内容を一部変更して転載したものである。

参考文献

(1) 内藤純也ほか：マルチマテリアル化による自動車の軽量化への貢献を目指して，自動車技術，Vol.72,No.11（2018），p.17-22
(2) 八木三哉ほか：トラックにおけるアルミ，マグネの応用，自動車技術，Vol.55,No.4（2001），p.29-33
(3) Mark Keller ほか：FORD F150, PRESENTATION 8,（2015），p.364-367, ユーロカーボディ資料
(4) 玄道俊行ほか：鉄 - アルミニウムの摩擦点接合，自動車技術，Vol.61，No.4（2007），p.83-86
(5) 大橋良司：FSSW による異材接合，溶接学会誌，Vol.87,No.1（2018），p.31-32
(6) 小橋泰三ほか：一般的な異種金属接合法の種類と特徴，R&D 神戸製鋼技報，Vol.67，No.1（2018），p.98-103

著　者

八木　三哉

海老原　峻義

論文・報告

新金型冷却構造による鋳造サイクルタイム短縮

Shortening Casting Cycle Time by New Mold Cooling Structure

鎌田　光春*　　永井　航**
Mitsuharu Kamada　　Wataru Nagai

要　旨

ダイカストの生産性向上のためには鋳造サイクルタイムの短縮が重要である。これには鋳造工程内の凝固時間を短縮することが有効であるが，凝固時間を短縮すると金型冷却が追いつかず，金型内の溶融材料が凝固しきらないことでトラブルが発生してしまう。

本稿では，鋼と銅を拡散接合した材料を用いることで熱伝達を向上させた新構造の採用により，金型冷却を強化し，鋳造サイクルタイムの短縮を実施した事例及び，新構造の耐久性追跡調査の結果を紹介する。

Abstract

To improve the productivity of die-casting, shortening cycle time is important, and it is effective to shorten solidification process time. As a result of shortening solidification process time, mold becomes high temperature, because of the mold cooling were prevented, and sometimes occurs trouble because the molten material in the mold does not solidify.

In this paper, we introduce the case study that strengthens mold cooling and shortens casting cycle time by adopting a new mold cooling structure that improves heat transfer efficiency by using materials that are bonded steel and copper by diffusion welding, and the results of the durability survey of the new mold cooling structure.

1　はじめに

1.1 背景

ダイカストとは，高温で溶かした合金を高速･高圧で金型内に注入することにより，高精度な鋳物をハイサイクルで大量に生産することができる鋳造方式である。特にアルミニウム合金ダイカストは，薄肉・軽量で強度にも優れていることから，自動車用部品のケース類を中心として多く採用されている。いすゞ自動車においても，自社工場内にてエンジン及びトランスミッションのアルミニウム合金ダイカスト部品を生産しているが，競争力強化のために生産性向上が求められており，その有効な手段である鋳造サイクルタイムの短縮が課題となっている。

1.2 分流子の冷却強化

図 1 にダイカストにおける鋳造サイクルの概略を示す。鋳造サイクルタイムの短縮には，各工程の時間を短縮することが必要であるが，特に大きな割合を占める凝固時間を短縮することが有効な手段である。しかし凝固時間を短縮すると金型の冷却が追いつかず，金型内の溶けたアルミが凝固しきらないことでトラブルが発生してしまう。特に製品形状部に溶けたアルミを流し入れる道の役割をする湯口ランナーのビスケットと呼ばれる円筒形状部近傍は，製品部に比べアルミの肉厚が厚いため，凝固時間を短縮すると完全に凝固せず，製品取り出し時に破裂してしまうことがある（**図 2**）。ビスケットは製品取り出し時に取り出しロボットが保持する部分でもあることから，破裂するとロボットが保持できず鋳造工程が止まってしまう。対策として分流子（**図 3**）という金型構成部品の冷却能力強化が重要である。分流子は湯口ランナーとビスケットの形状を成型し冷却する機能を持つ。これまで分流子の冷却強化のために実施してきた冷却穴の拡大等の対策では効果が不十分であり，新たな対策が必要となった。

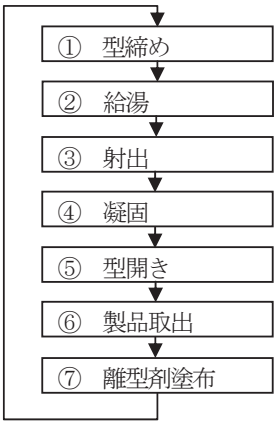


図 1　ダイカスト鋳造サイクルの概略

*要素技術部　　**車両審査実験第二部

図２　破裂した湯口ランナー

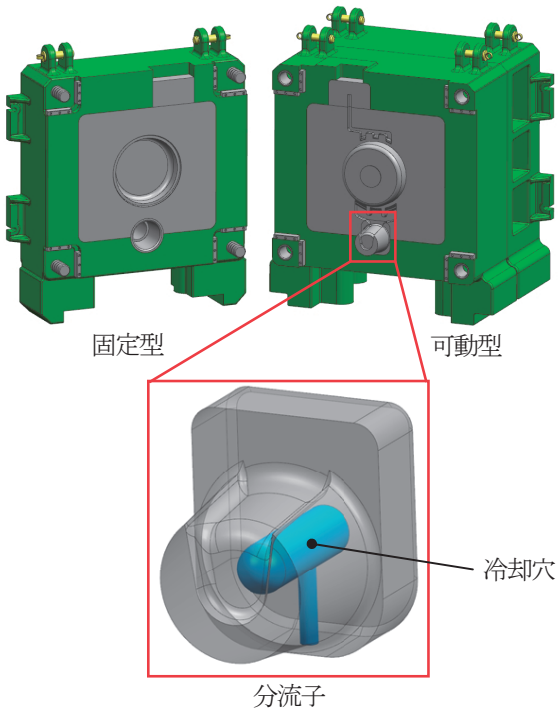


図３　ダイカスト金型構造概略図

2　鋳造サイクルタイムの短縮

2.1　銅分流子

分流子は内部にあけた冷却穴内に冷却水を流して熱交換を行うことで，湯口ランナーを冷却し凝固させている。これまで分流子の冷却強化の方策として，分流子の冷却穴の拡大，冷却水の流量増加のための配管チューブ径の拡大，冷却回路系統の単独化などを実施してきた。しかし更なる鋳造サイクルタイム短縮のために凝固時間を短縮していくと，湯口ランナーのビスケット近傍が完全に凝固しきらず，製品取り出し時に破裂してしまう。ビスケットが短い時間で凝固するためにはビスケット自体の体積を減らす方策も考えられるが，ビスケットの厚みは製品品質に大きく影響し，またビスケットは製品取り出し時に取り出しロボットが保持する部分でもあることから，厚さの変更は難しい。そのため金型構造による更なる冷却強化が求められる。

分流子の冷却強化の方策としては，冷却穴と湯口ランナー形状との肉厚を薄くして熱伝達を良くすることが有効だが，強度が確保できず破損してしまい，そこから水漏れしてしまうリスクがある。そこで分流子の鋼の肉厚を確保したまま内側に熱伝導の良い銅を接合し，そこに冷却穴を通すことで冷却強化を狙った“銅分流子”構造を採用した（**図４**）。鋼と銅の接合には拡散接合を用いており，これにより異種材料同士でも原子レベルでの接合が可能となり，強度を保ちつつ熱伝達に優れている。

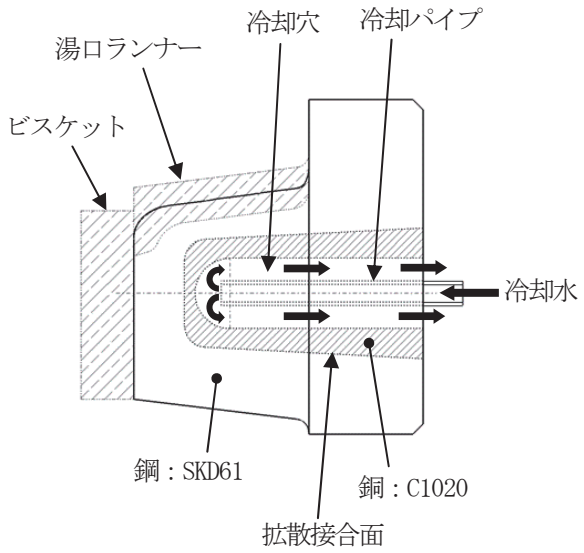


図４　銅分流子概要図 [1)]

注 [1)]　図中の材料記号は次の規格による。
JIS G 4404 “高速度工具鋼鋼材”
JIS H 2123 “形銅”

2.2 拡散接合

拡散接合とは，接合する材料同士を密着させ，真空中または不活性ガス中など制御された雰囲気中で加圧・加熱し，接合面に生じる原子の拡散を利用して接合する方法である。JIS では「部材を密着させ，母材の融点以下の温度条件で，塑性変形をできるだけ生じない程度に加圧して，接合面間に金属結合を実現して接合する方法。」[(1)] と定義されている。**図 5** に拡散接合の接合過程を示す。拡散接合は，溶接が困難な金属・異種金属及び異種材料同士の接合ができる，そして複雑な形状の接合ができるなどの特徴がある。

拡散接合には，材料同士を直接密着させる直接拡散接合（拡散接合）と，接合促進のために接合面間にインサート金属と呼ばれる金属を挟んで接合する場合とがある。インサート金属を挟む場合には，インサート金属が固相状態で接合する固相拡散接合と，インサート金属を溶融して接合する液相拡散接合とがある。今回使用した鋼と銅の接合には直接拡散接合を用いている。

拡散接合技術は，航空機産業及び自動車部品などさまざまな分野に使用されている [(3)]。金型の分野では，樹脂成型金型の冷却構造への採用実績があり，効果が確認されているが，高温･高圧の条件下で使用されるダイカスト金型への採用実績は少ない。これは接合部の強度保証が難しいためである。そのため銅分流子は，高温・高圧に繰り返し晒される金型表面には接合面を露出させず，構造内部にのみ拡散接合を用いることで，接合部からの破損リスクを回避している。

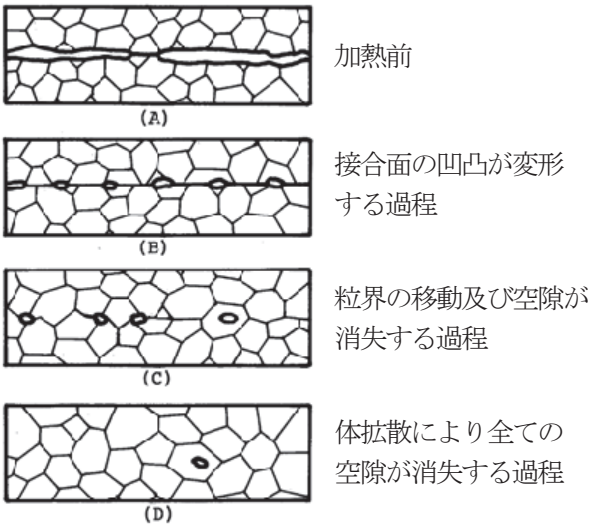


図 5　拡散接合の接合過程 [(2)]（大橋，1984）

2.3 CAE による効果の事前検証

銅分流子を実際に製作する前に，CAE による熱伝達解析にて冷却強化の効果を検証した。今回は定常解析にて従来の分流子と銅分流子の冷却能力の比較を実施した。定常解析とは，定常状態，すなわち時間が経ってもこれ以上変化しない最終的な状態を求める手法である。

解析は①従来の分流子，②冷却穴を拡大した従来の分流子，③銅分流子の 3 種類で実施した（**図 6**）。実際の分流子では溶けたアルミが接触するモデルの赤色面に 873 K の境界条件を付加し，冷却穴に水温 293 K の水を 5 L/min で流した時の定常状態を求めた。その結果，従来の分流子に比べ銅分流子の方が温度分布が低くなった（**図 7**）。また総奪熱量 (冷却穴表面から奪われる単位時間当たりの総熱量) は，銅分流子の方が従来の分流子と比べ約 34 %，冷却穴を拡大した従来の分流子と比べ約 7 % 多かった（**図 8**）。

解析の結果より，従来の分流子に比べ銅分流子の方が高い冷却効率を期待できることが確認できた。

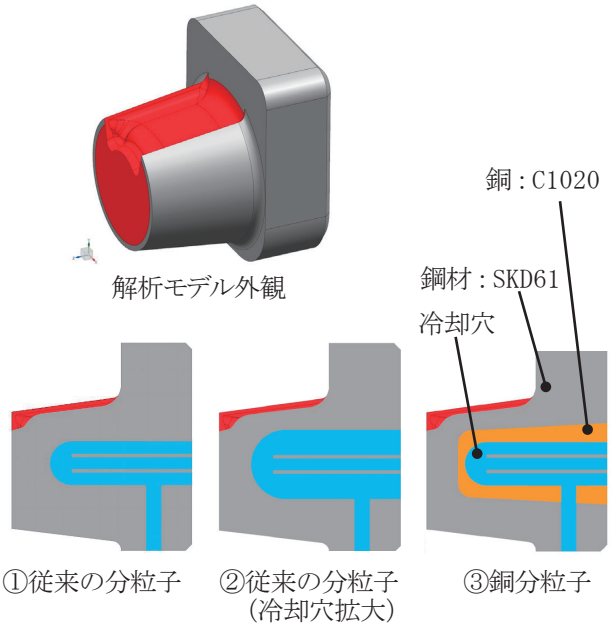


図 6　解析モデルの比較

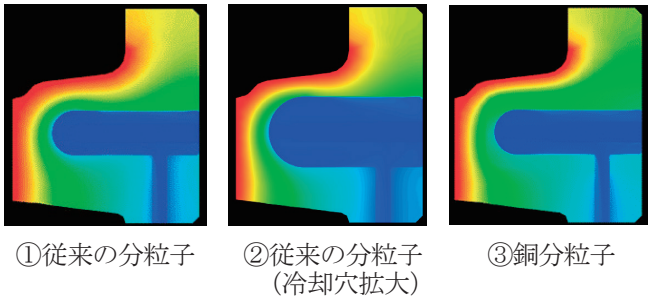


図 7　温度分布 CAE 結果の比較

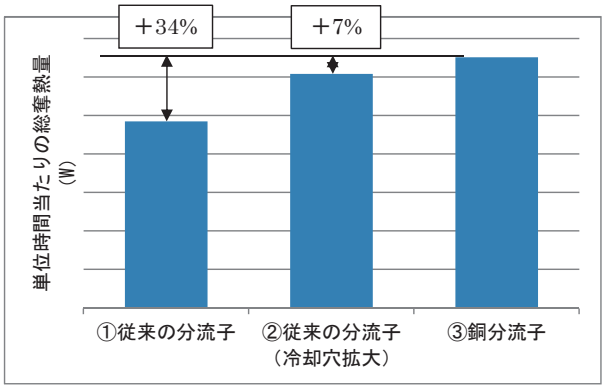


図 8　単位時間あたりの総奪熱量 CAE 結果の比較

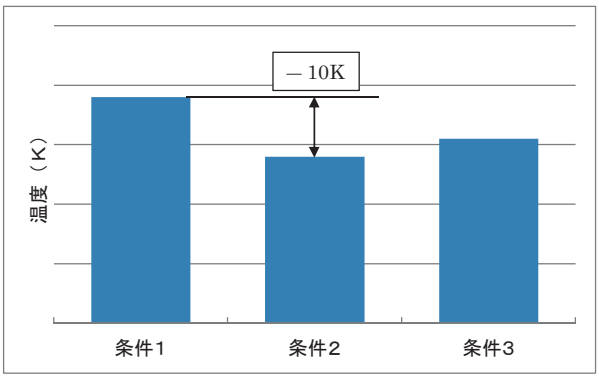


図 10　各条件時の湯口ランナー温度測定結果

2.4　実機での鋳造サイクルタイム短縮検証

CAE にて検証した構造で，比較的ハイサイクルで生産しており，稀にビスケットの破裂が発生している“製品 A”の金型用銅分流子を製作し，実機にて鋳造サイクルタイム短縮の検証を実施した。

表 1 に示す各条件で鋳造したときの湯口ランナーの温度を接触式温度計で測定した。測定ポイントは最も温度が高くなり破裂がおこりやすく，かつ接触温度計で測定可能なビスケット裏とした（**図 9**）。測定結果を**図 10** に示す。量産サイクルの場合，従来の分流子（条件 1）に比べ銅分流子（条件 2）の結果が，湯口ランナーの温度が 10 K 低くなった。また銅分流子を使用した場合，ビスケット破裂のリスクを考慮した限界サイクルタイムである量産サイクル -6 秒（条件 3）でも，従来の分流子で量産サイクルの場合（条件 1）よりも温度を低く保つことができた。

表 1　温度測定対象湯口ランナーの鋳造条件

	サイクルタイム	分流子種類
条件 1	量産サイクル	従来品
条件 2	量産サイクル	銅分流子
条件 3	量産サイクル -6 秒	銅分流子

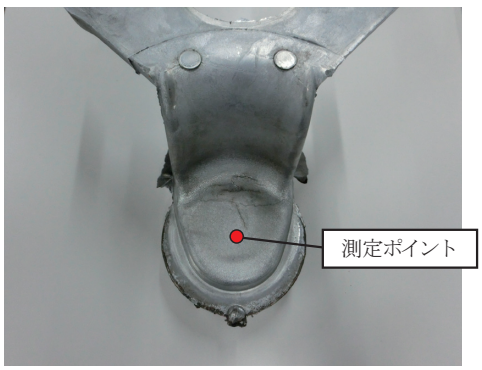


図 9　湯口ランナーの温度測定ポイント

検証結果より，銅分流子を使用することで冷却効率が向上し，製品 A の場合，凝固時間を 6 秒短縮しても問題なく鋳造可能なことが確認できた。

検証結果を受けて，量産中の“製品 A”と“製品 B”の金型用分流子を銅分流子に変更し，サイクルタイム短縮条件での製品品質が合格となった後，量産鋳造を開始した。

3　銅分流子の耐久性追跡調査

3.1　量産後の銅分流子劣化調査

銅分流子へ交換した後の製品 B の鋳造数が金型寿命の目安である 10 万ショットを超えたところで，銅分流子の劣化ぐあいを調査した。

まず金型から取り外した銅分流子を回収し，外観を確認した。アルミが直接当たる湯口ランナーの形状部を見ると，従来分流子の 10 万ショット鋳造後品と比べヒートクラックが少なく平滑な表面だった（**図 11**）。

図 11　約 10 万ショット後の銅分流子湯口ランナー部

次に銅分流子を**図 12** に示すように切断し観察した。TP2（**図 13**）を見ると冷却穴先端部から鋼と銅の拡散接合面までつながったき裂が認められた（き裂 1）。また拡散接合の界面から銅側に数 mm の部位に界面に沿ったき裂が認められた（き裂 2）。

次にき裂 1，き裂 2 の破面を取り出して観察した。いずれの破面も黒色に変色した部位が認められた（**図 14**）。SEM(走査型電子顕微鏡 : Scanning Electron Microscope) で観察を行うと，全体的に粒界破面（脆性破面）の様相を呈していた。代表的な拡大写真を**図 15** に示す。

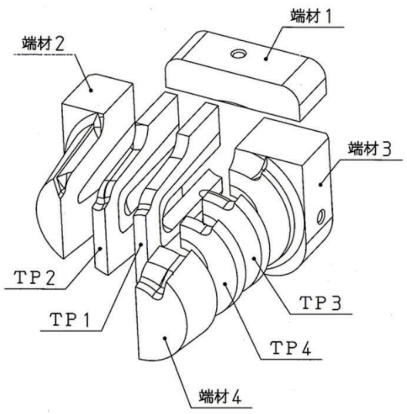


図 12　銅分流子の TP 切断配置

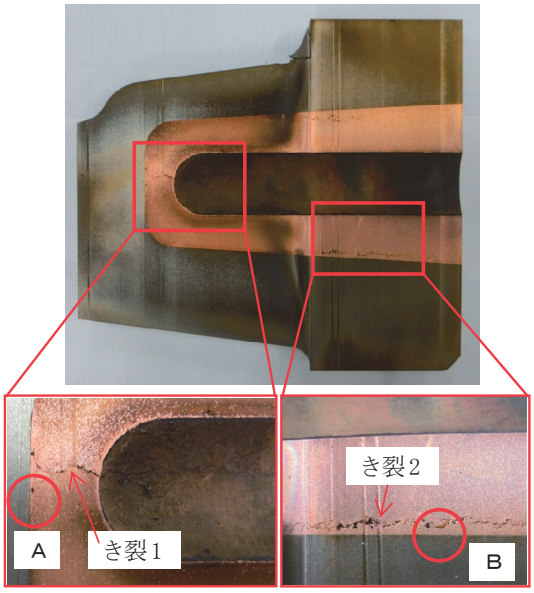


図 13　銅分流子切断 TP2

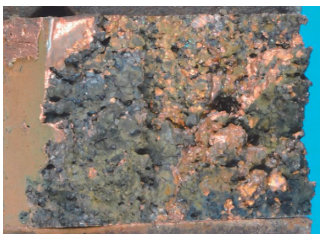


図 14　き裂 2 の破面

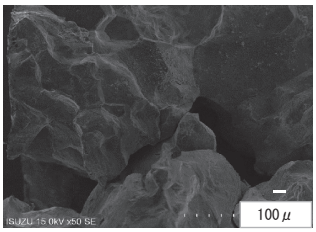


図 15　き裂 2 の破面
（SEM による拡大写真）

次にき裂 1，き裂 2 の近傍の拡散接合界面の様子を観察した。き裂 1 近傍の拡散接合界面（**図 13 : A 部**）を見ると，拡散接合界面の一部に隙間が認められた（**図 16**）。また銅及び鋼のいずれもき裂が認められた。鋼のき裂は複数の分岐を伴ったき裂の様相を呈していることから，冷却水による腐食の影響が考えられる（**図 17**）。

き裂 2 の近傍の拡散接合界面（**図 13 : B 部**）を見ると，拡散接合界面に隙間及び欠陥は認められなかった。また銅の内部は再結晶組織となっていた（**図 18**）。

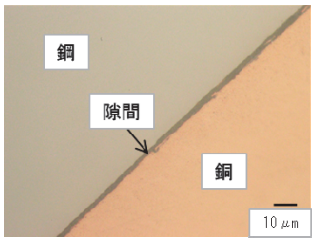


図 16　き裂 1 近傍の拡散接合界面
（図 13 : A 部拡大）

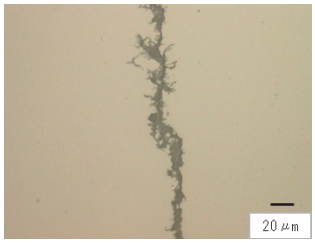


図 17　き裂 1 近傍の鋼のき裂拡大図
（図 13 : A 部拡大）

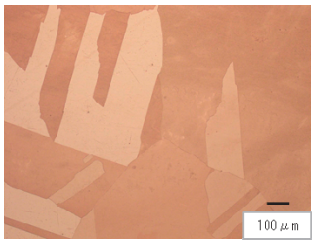


図 18　銅の内部組織（エッチング後）
（図 13 : B 部拡大）

3.2 考察

湯口ランナー形状部はヒートクラックが少なく平滑な表面であることから，量産中十分に冷えており極端な機能の低下は無いと考えられる。また破損による水漏れも無いことから，き裂及び一部の拡散接合界面隙間による機能への大きな影響はないものと判断できる。

(1)【銅のき裂について】

銅系材料では 600～800 K において急激な延性の低下（いわゆる中間温度脆化）を生じる場合が多く，ひずみ速度が小さいほど脆化は顕著となり，結晶粒径が大きくなるほど明瞭となる（菅野・伊藤，1988）[(4)]。また結晶粒成長や再結晶が生じたものには，結晶粒界での応力集中が大となって火割れ（焼鈍中に急激に割れが進行する現象）を起こしやすくなる（和泉，1979）[(5)]。

本銅材料は組織観察の結果から，部品製作時及びダイカスト鋳造時の高温環境下で再結晶化していると推測される。また銅分流子は熱膨張の特性が異なる鋼と銅の 2 種類の材料が接合されており，高温環境下では熱応力が生じる可能性がある。ダイカスト鋳造時にも銅分流子の温度分布の変化によって，熱応力の繰返し入力が発生していたと推測される。

これらのことから，部品製作時及びダイカスト鋳造時の熱の影響で，銅が脆化しやすい組織に変化しており，更に銅が脆化する温度帯で生じた熱応力の繰返し入力による，疲労破壊の粒界割れが発生したと推測される。

(2)【鋼のき裂について】

き裂部に腐食の様相が見られることから，銅のき裂から鋼まで冷却水が侵入したと推測され，腐食と高温環境下で生じる熱応力の繰返し入力より鋼にき裂が発生した可能性がある。

4　まとめ

(1) 従来分流子から銅分流子への置き換えにより，湯口ランナーの冷却効率が上がり，凝固時間短縮による鋳造サイクルタイムの短縮が達成できた
(2) 銅分流子は 10 万ショットまでは問題なく量産に使用可能なことが確認できた
(3) 10 万ショットまで量産に使用した銅分流子は，外観は従来品に比べ劣化が少なく良好な状態であるが，内部の銅にき裂が認められ，き裂は高温環境下による銅の脆化とダイカスト鋳造時における熱応力の繰返し入力によって発生したと推測される

5　今後の課題

今後の課題として，次の 2 項目を考えている。

(1) 製品 A 及び今後展開していく銅分流子についても追跡調査を実施し，データを蓄積・分析して改善につなげる
(2) 銅分流子の更なる冷却能力向上を目指し，鋼･銅･冷却穴の最適なバランスを見つける

6　おわりに

ダイカストでは，本稿にて取り上げた鋳造サイクルタイム短縮以外にも，製品品質向上･製品不良率低減･金型寿命向上など多くの課題にとって，金型冷却の最適化が重要なテーマとなっている。金型冷却の最適化を目指していくためには鋳造方案設計，金型設計，金型製作・保全など各担当部署が協力して取り組んでいく必要がある。今後も関係部署で協力してダイカスト生産性向上のための活動を続けていきたい。

最後に，本稿執筆にあたりご協力いただいた協力企業及び社内の関係者各位に感謝の意を表します。

本稿は参考文献 (1), (2), (4), (5) より一部を修正･要約し転載を行った。

参考文献

(1) 日本工業規格 JIS Z 3001-2：2018
(2) 大橋修：拡散溶接に関する基礎的研究，(1984)，p.2 **図 1-1**
(3) 界面接合研究委員会：日本における拡散接合の適用例，(1993)
(4) 菅野幹宏，伊藤吾朗：日本金属学会会報，第 27 巻，第 7 号，銅および銅合金の高温における延性低下とその改善，(1988)，p.532
(5) 和泉修：日本金属学会会報，第 18 巻，第 1 号，銅合金の中間温度脆性と粒界割れ，(1979)，p.16

著　者

鎌田　光春

永井　航

論文・報告

大型 LNG トラック及び LNG 充填スタンド開発事業について

Development of Heavy Duty LNG Truck and LNG Refueling Station

後藤　康二*　Koji Goto
原　裕一*　Yuichi Hara
城田　和彦**　Kazuhiko Shirota

要　旨

天然ガスは軽油と比べ単位発熱量あたりの CO_2 排出量が少ない低炭素燃料である。運輸部門の低炭素化を実現させるため走行距離が長く燃料消費量の多い大型トラックの燃料として天然ガスを利用することが効果的である。特に LNG はより多くの燃料が車両搭載可能であり 1,000 km 超の航続距離を確保でき燃料の経済性にも有利とされる。LNG 自動車の普及並びに低炭素化実現のため環境省補助事業「大型 LNG トラック及び最適燃料充填インフラの開発・実証事業」として大型 LNG トラックの開発と LNG 燃料充填スタンド建設並びに実証走行が行われた。

Abstract

Natural Gas emit less CO_2, compare to diesel fuel by unit calorific value. And using Natural Gas to Heavy-Duty truck which drives much more distance than passenger vehicle in transportation section decrease CO_2 more effectively. Especially LNG can mount more fuel to a vehicle so driving distance can elongate more than 1000 km, additionally have economic advantage. As a purpose to spread LNG vehicle and realizing low carbon transport we attend Ministry of Environment subsidy project『Heavy-Duty LNG truck and optimal design for refueling infrastructure』and developed Heavy-Duty LNG truck , construct LNG refueling stand and demonstrating driving was performed.

1　まえがき

輸送用燃料の安定的供給及び低炭素化の観点から石油代替燃料の利用拡大が重要視され，世界では天然ガスに加え電気及び水素など自動車用燃料が多様化する時代となっている。その中で天然ガス自動車は現在世界で最も普及している石油代替燃料自動車であり，その保有台数は 2,600 万台（2018 年度時点）以上に拡大し，今後アジアを中心に更なる伸びが予想されている。日本では東日本大震災以降，国土強靭化にも資する国の重要な政策の一つとして天然ガス自動車の普及が挙げられている。

いすゞ自動車は天然ガスを石油代替の重要な燃料の一つとして位置付け，1993 年に小型 CNG（圧縮天然ガス：Compressed Natural Gas）トラックを発売以来約 26 年にわたり技術開発・商品化に取り組んできた。2015 年末には都市間輸送の低炭素化への期待から圧縮天然ガス（CNG）を燃料とする大型 CNG トラックを市場投入し，東京 - 大阪間 550 km の都市間輸送で低炭素化を実現した。天然ガス自動車の普及課題には燃料一充填あたりの航続距離，燃料価格の低廉化及び燃料充填インフラ充実化があるとされており，これらの課題解決を考える中で大型 CNG トラックをベースとした LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）トラックの可能性を検討してきた。

LNG 燃料は気体の天然ガスをマイナス 162 ℃（大気圧条件下）に冷却し液化することで体積が約 1/600 となり燃料としての可搬性に優れる。海外から輸入された LNG を液体のまま燃料として利用することで航続距離延長及び経済性の普及課題に対応できる可能性がある。一方で超低温液体を扱う技術開発が必要であること，そして LNG 燃料充填インフラが日本に存在しないなどの課題もあり，民間の自主的事業取り組みだけでは技術開発･実証が進みにくい状況であった。

そこで国が取り組む「CO_2 排出削減強化誘導型技術開発・実証事業」における環境省補助事業「大型 LNG トラック及び最適燃料充填インフラの開発･実証事業」へ参画を行った。本事業にて大型 LNG トラックの開発及び LNG 燃料充填スタンドを建設した上，製作した車両を用いた実証走行試験を行い 2019 年 3 月に事業を完了させた。本稿では環境省事業の 3 年間の成果と今後について紹介する。

* NGV 企画・設計部　　**いすゞエンジニアリング㈱

2　本事業目標

本事業では次の①～④の目標を掲げ取り組んだ。

① 全体目標
- 高速走行を主体とした都市間輸送時に CO_2 性能としてディーゼル車両比 10 % 程度削減。かつ，長距離走行が可能な大型 LNG トラックの開発とともに最適な充填インフラを実用化する。
- 燃料充填時間：10 分程度

② 大型 LNG トラックの開発
- 1 回の充填で 1,000 km 以上走行可能な車両（車両総重量 25 t）を開発する。

③ LNG 燃料充填スタンドの建設
- 大型 LNG トラックに燃料充填が可能な LNG 燃料充填スタンドを建設するための技術開発を行う。実運行での車両への燃料充填を行い，インターフェースの適合性などを評価する。

④ 公道走行試験
- 国内初の運送事業者による大型 LNG トラックモニタ車の高速道主体の営業運行を実施し，環境性･信頼性等を評価する。

3　大型 LNG トラックの開発

ベース車は量産販売中の大型 CNG トラック「ギガ CNG」であり市場ニーズの高い低床 4 軸車を基に LNG 燃料システムを搭載した。ベース車の車両仕様届出諸元及び改造後の大型 LNG トラックの完成外観をそれぞれ**表 1**，**図 1** に示す。

表 1　ベース車の車両仕様届出諸元

車両型式	QFG-CYJ78B
駆動方式	8X4
エンジン型式	6UV1-TCN
最高出力	243 kW（330 PS）/1800 rpm
最大トルク	1390 N･m（142 kg･m）/1200-1400 rpm
ホイールベース	7335 mm
トランスミッション	AMT（9 段）
車両全長	11,950 mm
車両全高	3035 mm
車両全幅	2490 mm
車両重量	9710 kg
最大積載量	15000 kg
車両総重量	24820 kg
定員	2 名

図 1　大型 LNG トラック外観

3.1　設計検討

既存の CNG 車をもとに LNG 化を行うため次の①～⑧の設計検討を行った。

① 燃料システム検討方針

CNG 車を LNG 車にするために変更となるのは燃料貯蔵方法のみであり，減圧弁（レギュレータ）より下流は CNG 車のシステムをそのまま流用した。

② LNG システムの選択

現在世界市場で採用されている LNG システムの代表的な事例は次の 3 種類である。
- 飽和式
- 自己加圧式
- ポンプ加圧式

今回採用する方式は飽和式とした。飽和式は欧米の LNG 車に広く使われ構造もシンプルである。

③ 燃料配管系統

燃料システム検討の結果，既存の CNG 燃料配管系統に LNG 燃料系統を追加する形とした。

④ 航続距離検討

一充填当りの航続距離目標を 1,000 km 以上とした場合，CNG 車の航続距離は約 550 km であり LNG 化することにより約 2 倍の航続距離延長が期待できる。これは東京を起点とした場合，おおよそ北は北海道，南は九州まで到達できる距離である。

⑤ LNG タンク容量検討

1,000 km 以上航続可能な LNG タンク容量を検討した。ベースとなる大型 CNG 車の燃料消費率は都市間輸送でおおむね 3～4 km/m^3 であり 1,000 km 走行に必要な燃料量は 250～333 m^3 となる。LNG タンク 2 本を車両に搭載する場合，タンク 1 本あたりは気化ガスにて 166.5 m^3 を貯蔵できる LNG タンク容量にした。また LNG タンクの形状については車両レイアウトを考慮し架装へ影響のないものに決定した。

⑥　LNG タンクレイアウト検討

LNG タンクはホイールベース間に搭載された CNG タンクと置き換えることを検討した。リヤオーバハング部の CNG タンク 2 本は LNG 燃料補給の都合から残すこととした。タンク最低地上高の確保とリヤボディ架装との関係を考慮しタンク搭載位置を決定した（**図 2**）。

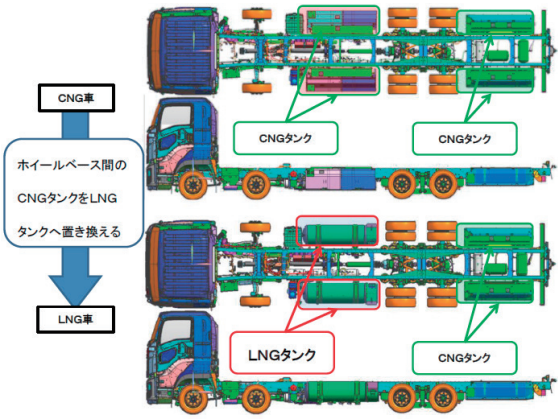


図 2　タンク搭載位置

⑦　燃料配管検討

燃料配管仕様･配管径･配管長さは LNG タンク搭載条件に従い車両レイアウトを適合させた。

⑧　温水配管検討

熱交換器（液体燃料を気化させる部品）へエンジン冷却水（温水）を供給する必要があるため，LNG タンク搭載条件を守りつつエンジン冷却性能・キャブヒータ性能並びに燃料気化性能を満足させた。

3.2　ベースの CNG 車に対する主な変更点

製作した車両は CNG 車に対し LNG 燃料装置を追加することに留め変更規模が最小となるよう設計した。またベースの CNG 車に対し架装性が変わらないよう検討した。現状 LNG 燃料充填スタンドが少なく LNG 燃料でスタンド間を走行できなかった場合を想定し，CNG タンク搭載し CNG 燃料でも走行できるようにした。当該車両のエンジンは既存大型 CNG トラックに対し変更はない。主要変更概要は次のとおりである。

- 車軸間の CNG 燃料容器を LNG 燃料容器に換装
- CNG 燃料充填口移設
- LNG 燃料配管新設
- LNG 燃料圧力レギュレータ追加
- LNG 燃料計追加
- LNG 用各種電気装置追加
- エンジン温水配管系統変更
- 車両配線変更
- LNG 関連各種電気装置追加

3.3　LNG 燃料供給システム

大型 LNG トラックの燃料供給システム概要を**図 3** に示す。

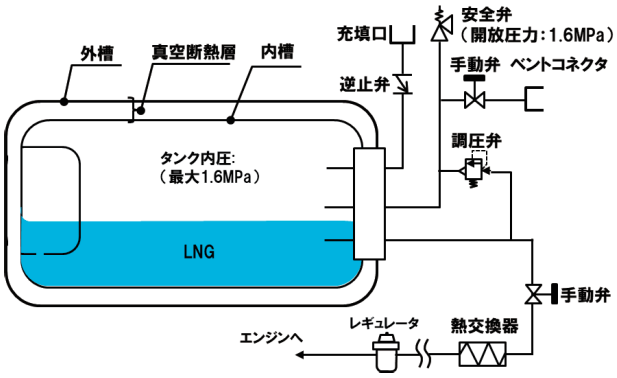


図 3　大型 LNG トラックの燃料供給システム概要

LNG 燃料の充填はスタンド側の充填ノズルを車両側の充填口に接続し LNG タンク内に充填される。タンク内圧力が高いと充填できないため，充填前にベントコネクタにスタンド側のベントノズルを接続しタンク内を減圧できるようベントコネクタを設定した。

LNG 燃料は超低温液体であり外部からの入熱を抑制するため二重殻の真空断熱構造を有する LNG タンク内で貯蔵される（**図 4**）。また外部からの入熱を受けた結果 LNG 燃料の液温上昇に伴いタンク内圧が上昇するが，タンク破損防止のために設定圧力（1.6 MPa）で放出する安全弁を設けている。

LNG 燃料の供給はタンク内から熱交換器までは液体で供給し，エンジン冷却水の熱を利用し熱交換器で気化させる。その後レギュレータで一定圧力に調整しエンジンに供給する。またタンク内の圧力が調圧弁の設定圧力以上の場合は，調圧弁が開弁しタンク内の上層部気体から優先的に供給される。

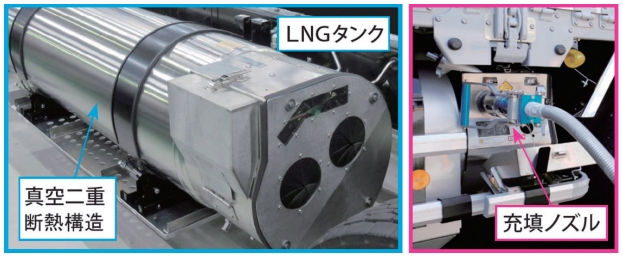


図 4　LNG タンク及び充填ノズル接続

3.4　UN-R110 規格と車両登録

車両へ搭載する LNG タンクは実績のある海外製品を導入した。実際の導入にあたっては本事業と同じ時期に天然ガス自動車用燃料容器則に国連規則（UN-R110）適合製品の使用を認める法改正（基準調和）が

なされたため，道路運送車両の保安基準並びに高圧ガス保安法に適した製品を導入することができた。

公道走行にあたり自動車検査登録を行い車検証と登録番号票の取得が必要となるが，LNG 車登録は運輸局においても初めての対応となることから当局との間で綿密に打ち合わせを実施したことで無事に登録することができた。

4　LNG 燃料充填スタンドの建設

本事業で建設された LNG 燃料充填スタンドは LNG 車のみならず CNG 車にも燃料充填が可能なスタンドである（**図 5**）。

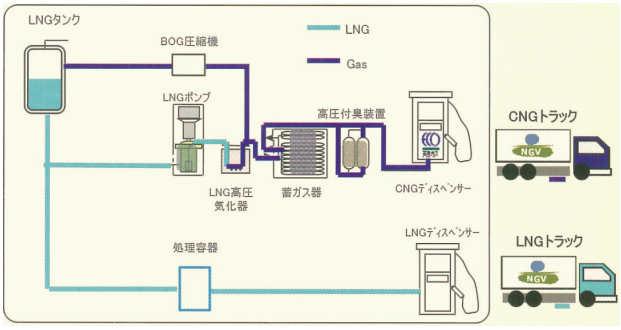


図 5　燃料充填スタンド　システム構成

平成 30 年 6 月に大阪南港地区に環境省事業として建設並びに運用が開始された日本で初めての商業用途の LNG 自動車用燃料充填スタンドである。また大阪南港地区のスタンド運用開始の約 3 か月後には京浜地区に LNG 燃料充填スタンドが民間事業者により建設･運用が行われている。

LNG 燃料充填スタンド建設においては CNG 用のディスペンサ（充填機）も設置され，給油空地への CNG ディスペンサ設置に関する技術基準緩和に基づき設置された。一方 LNG 関連機器とその他の施設等との間に離隔距離の確保が必要であり CNG と LNG に係る法令に違いがあるため，設置場所に関する課題及び認可取得は一つ一つ確実に対応を進めスタンドを完成させた（**図 6**）。

今後 LNG 燃料充填スタンドの普及を考えると，LNG トラックと同様に基準緩和の早期対応が求められる。

図 6　LNG 燃料充填スタンド

5　公道走行試験

大型 LNG トラックを運行いただく 2 社の運送事業者へは運行を開始した平成 30 年 6 月から翌 1 月までに得られた運行データの記録のほか，運行初期･中期･終了前に当該車両に関するヒアリングを行った。

本実証試験において 6 月の運行開始から 9 月の京浜地区の LNG 燃料充填スタンド開業までの間は大阪南港地区に開設された LNG 燃料充填スタンドを利用した大阪圏の中短距離走行による初期課題解決に向けた対応を評価実施し，また 9 月以降は東京 - 大阪間の運行にて長距離走行時の評価を行った。

① 経済性

燃料価格情報は運送事業者と燃料供給スタンド間の契約にて燃料価格を取り決められるため定量的な情報は得られていないが，既存ディーゼル車に対して削減効果が認められるとの回答が得られた。

② 車両走行性能

社内テストコースでの試験結果並びに運送事業者によるヒアリング結果，車両性能は既存大型 CNG トラックと同等であることを確認した。

③ 環境性能

排出ガス特性並びに騒音特性についても既存大型 CNG トラックと同等で，クリーンかつ低騒音であるとのヒアリング結果が得られた。

④　信頼性

既存大型 CNG 車と同じ車両をベースにして製作し，追加した LNG 関連装置についても海外において市場実績のある製品であり問題発生はなかった。

5.1 公道走行ルート

東京 - 大阪間の実証走行試験に関する 9 月～1 月末までの運行経路を示す（**図 7**）。

図 7　運行経路

・1 号車

東京 - 大阪間は名神高速自動車道，東名自動車道を主体とするルートのほか，経由する営業所の関係で国道 25 号（名阪国道）も利用するルートを使用した。2 日間で往復する運行形態で実施された。

・2 号車

東京 - 大阪間は，名神高速自動車道，東名自動車道を主体とするルートのほか，道路事情により中央道を利用する日もあった。1 号車同様に 2 日で往復する運行形態で実施された。

5.2 公道走行結果

実証走行試験では試験で得られた走行データを用いて解析した。9 月以降の長距離走行を主体とした運行では 32,000～44,000 km の走行が実施された。都市高速，自動車専用道路を含めた高速道路の使用割合は 94～95 % であった。LNG 燃料の CO_2・燃費性能・航続距離を求めるため，CNG 燃料を用いて走行した分を除いて計算を行っている。

①　CO_2・燃費性能

高速道路を主体にした長距離走行期間の LNG 燃料分の燃費は 4.37～4.84 km/kg であった。

それぞれの車両の燃費と CO_2 排出係数（LNG の CO_2 排出係数 2.7 kg-CO_2/kg，軽油の CO_2 排出係数 2.58 kg-CO_2/L）をもとに算出される 1 km あたりの CO_2 排出量を比較した結果，大型 LNG トラックは比較車両に対して 10～19 % の CO_2 削減効果が確認され，目標とした“10 % 程度以上の削減”を達成した。

比較対象に用いたディーゼル車は 1 社の運送事業者が東京 - 大阪間を同等ルートで走行した重量車燃費基準 5 % 削減達成車両である。

②　航続距離

燃費及び LNG 燃料タンク容量から算出される 1 充填あたりの航続距離は 1,135～1,258 km となり，目標である“1 充填で 1,000 km 以上の運行可能”を達成した。実際の走行距離履歴においても 1 充填で 1,042～1,158 km の走行が記録されており，実営業運行においても 1,000 km 以上の走行が可能であることが確認された。

③　燃料充填時間

LNG 燃料は燃料充填ディスペンサから差圧で車両の LNG タンクに充填される。LNG タンクがホットアップ（暖かい状態）している初期状態のみ充填に時間が掛かるが，一度クールダウンサイクルに入り定期的に燃料充填行われている状態では充填開始から終了まで約 260 kg（空から満タンまで相当）の LNG を 10 分以内で充填できた。これは LNG が液体燃料であることから軽油燃料並みの充填時間となった。

6　課題と今後の対応

①～③は大型 LNG トラックの実使用中に検出した主要課題であり，より魅力ある商品につなげるため今後も技術開発を行っていく。

①　LNG 燃料の重質化

大型 LNG トラックの走行中に ECU（エンジンコントロールユニット）が記憶しているデータをモニタリングしている中でノッキングを回避するためのエンジン点火タイミング制御の実行が認められた。これは LNG 成分中の沸点が低いメタンから優先的に気化・消費され，エタン，プロパン，ブタンなどの重質成分の比率が相対的に高まることによりノッキングしやすい燃料に変化したものと推定している。運行記録表から燃料タンク内の燃料使用量を推定した結果，片側タンクの燃料消費量が少なく長期間燃料が滞留していることが燃料重質化の要因とわかった。今回は燃料満充填後に途中で継ぎ足しせずに使い切る運行パターンで運用することで対応した。

② ボイルオフガス

LNG タンクは真空断熱 2 重構造になっているが少なからず配管・サポートからの熱伝導による入熱の影響を受け燃料温度上昇とともに気化が進む。この気化したガスをボイルオフガスといい，車両稼働中に燃料消費が行われている間はタンク内圧の上昇はない。ただし非稼働時には時間とともにタンク内圧が上昇し安全弁が作動するため非稼働時間は短い運用が望ましい。

③ 貯槽について

本事業では CNG に係る法令で建設した既存スタンドへ増設する形で建設しており LNG 貯槽は地上に設置した。新規に LNG スタンドを建設する場合は，LNG に係る法令（「一般高圧ガス保安規則の第 7 条の 2 第 1 項 4 号イ 貯槽は，地盤面下に埋設すること。」）によるため地下埋設が必要となる。海外で多数建設されている LNG スタンドを調査した所，安全面及び経済性の面で地下埋設していない場合があることがわかった。

また処理容器の容量を大きくした場合も貯槽と解釈され，同様に地下埋設となる可能性があった。

これはスタンドを普及させるための課題であると認識され，今後 LNG に係る法令が早い段階で改正されていくことが望まれる。

7 あとがき

大型 LNG トラックの公道走行による実証試験を行い次の目標を達成した。

① 長距離走行主体とした運行においてディーゼル車両比 10 % 程度以上の CO_2 排出削減を達成。
② 燃料 1 回充填あたり 1,000 km 以上の航続距離を達成。
③ 燃料充填時間はディーゼル車並み 10 分程度を達成。

その他，排出ガス・振動などは既存の大型 CNG 車と同等でクリーンかつ低振動と事業者より評価を受けた。

今後，実証走行で得られた結果を大型 LNG トラックの開発にフィードバックを行い，天然ガス自動車の更なる進化を目指し開発を進めていく所存である。

最後に「大型 LNG トラック及び最適燃料充填インフラの開発・実証事業」を推進するにあたり，協力企業及び社内の関係者各位に多大なるご協力をいただいたことに対し紙面をお借りして心から感謝の意を表する。

参考文献

(1) いすゞ自動車（株）：『大型 LNG トラックおよび最適燃料充填インフラの開発・実証事業』委託業務成果報告書：平成 30 年度 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業

著 者

後藤 康二

原 裕一

城田 和彦

論文・報告

Development and Validation of a Semi Two Site Kinetic Model for Severely Aged Cu-SSZ-13 SCR：Inclusion of Ammonium Nitrate Chemistry and High Temperature NH_3 Oxidation by NO_2

Chintan Desai *

Abstract

- SCR model for severely aged condition
- Ammonium Nitrate (AN) chemistry
- High temp NH_3 oxidation by NO_2 to NO

In this study, we present the development and validation of a one-dimensional numerical SCR model over Cu-SSZ-13 catalyst. The kinetic model was developed for severely aged catalyst based on the micro reactor data collected using ORNL SCR protocol. The operating condition for this data collection and model development were one aging condition, two space velocities and temperature range of 150−550°C. The protocol used for this work had argon as balance gas giving us important information about N_2 generation and assist in model calibration. Overall, the model consists of NH_3 adsorption/desorption, NH_3 oxidation by O_2 generating N_2, N_2O and NO, NH_3 oxidation by NO_2 generating NO, SCR reactions generating N_2 and N_2O, AN chemistry.

The developed model is a semi-single site model. Only NH_3 adsorption and desorption is developed using 2 sites, while all the SCR reactions are modeled using 1 site to adhere to the predominantly single site behavior after severe aging and also to keep the model simple. At low temperatures, effects of AN (ammonium nitrate) were observed and were modeled accordingly, 4 key reactions contributed to the AN chemistry such as AN generation, AN consumption by NO, AN decomposition to N_2O and AN decomposition to HNO_3 and NH_3. It was found that AN decomposition to HNO_3 and NH_3 was crucial in predicting the experimental behavior. These modeling efforts gave us some more insights for AN which will be important in the future for the low load operations where temperatures are around 170°C. At higher temperatures, NH_3 oxidation to NO was observed, its effect was pronounced and sharp at 500°C and 550°C, this behavior was captured by modeling NH_3 oxidation by O_2 generating NO and also NH_3 oxidation by NO_2 generating NO, the later reaction was important in predicting the experimental data in the presence of NO_2. This SCR model predicts the important trends from 150−550°C for severely aged catalyst. The developed model is validated with additional micro reactor data at different ANR (Ammonia to NOx ratio) and engine dynamometer testing. The final developed model has numerous applications such as future hardware selection, DEF (diesel exhaust fluid) dosing calibration, model based controls etc. Future works include the modeling of different aging conditions and poisoning effects such as sulfur.

1 Introduction

With the growing demand for diesel vehicles, there is an important task of controlling the emissions. The common pollutants are CO_2, CO, NO, NO_2, N_2O, soot and HC. The automotive industry has developed catalytic solutions to convert these pollutants into non-harmful gases. Converting NOx emissions is a challenging task for which selective catalytic reduction (SCR) catalyst is used. SCR is used worldwide in mobile and stationary application since long. Now, about a decade ago to meet the NOx regulations, the on road diesel industry are using SCR to convert NOx. SCR is different from other diesel catalyst because the reductant is introduced in the SCR as per the NOx quantity while in other catalyst the reductant are always present on the catalyst. Due to this reason, it is relatively difficult to calibrate and model the SCR. The reductant used for SCR is urea water solution (32.5 wt. %), which is dosed upstream of the SCR. The urea water solution converts to NH_3, which acts as a reductant to convert NOx. NH_3 reacts with NOx as per the following global reactions：

$$4NH_3 + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (1)$$
$$2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O \quad (2)$$
$$4NH_3 + 3NO_2 \rightarrow 3.5N_2 + 6H_2O \quad (3)$$

Reaction 1 (R1) is known as “standard SCR”, R2 is known as “Fast SCR” because it is generally 3-6 orders faster than R1 and R3 is known as

* Isuzu Technical Center of America, Inc.

"NO_2 SCR". NH_3 is not always consumed by NOx and O_2 to selectively generate N_2, but some undesirable reactions also occur, generating NO, N_2O etc. The global side reactions are as follows :

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O \quad (4)$$
$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O \quad (5)$$

Another regulated greenhouse gas, N_2O is generated by the SCR reactions as per the following global reactions :

$$2NH_3 + 2NO_2 \rightarrow N_2 + N_2O + 3H_2O \quad (6)$$
$$2NH_3 + 2NO + O_2 \rightarrow N_2 + N_2O + 3H_2O \quad (7)$$
$$2NH_3 + 2O_2 \rightarrow N_2O + 3H_2O \quad (8)$$

Many types of SCR catalyst are used in the industry and every type has some unique properties. Vanadia based SCR has a wide use in stationary application. Cu and Fe based SCR catalyst are used mainly for mobile applications. Fe-SCR has higher NOx conversion at high temperature compared to the low temperature regions so, they have been replaced by Cu-SCR for their high NOx conversion in low and high temperature regions and also they are stable to long exposures of water and temperature. There are many types of Cu SCR such as Cu-ZSM-5 which is medium pore size 10 membered ring, Cu-BEA which are 12-membered ring type zeolites while Cu-SAPO-34 and Cu-SSZ-13 are small pore 8 member ring.

Due to the relatively simple structure of Cu-SSZ-13, it is studied in detail to know the mechanistic nature of the reactions. Today, the most important reactions such as NH_3 adosorption/ desorption, NH_3 oxidation, standard SCR, fast SCR and NO_2 SCR are sufficient to capture the trends of SCR catalyst by a model. For Cu-SSZ-13, [18] has proved the presence of two distinct active sites for SCR reactions, the sites are Cu^{+2} directly attached to the repeating units (Z_2Cu) near the six membered ring and extra framework Cu^{+2} stabilized by -OH ligands (ZCuOH). There is migration of the Cu from one site to the other upon hydrothermal aging but the total quantity of the Cu remains the same. The site migration is represented by the following reaction :

$$ZCuOH + 2H \rightarrow Z_2Cu + H_2O \quad (9)$$

The development of a mathematical model of the SCR catalyst will help in simulating various engine operating conditions to see the NOx conversion. In particular, the engine calibration engineer can run a DOE of parameters such as engine out NOx, temperature and exhaust flow rate to understand the trend of NOx conversion with respect to engine out temperature and flow rate. These conditions can also be performed in the test cell but it will take time so, model can be used as a tool to run additional experimental conditions to gain more directional idea for the calibration. The model are faster than real time about 20 times, based on the type of solver and discretization one uses. This model can be used at all time during the development V cycle, in the beginning of the project it can be used for base engine calibration, during this activity the model fidelity should be reasonable to predict the NOx conversion trend. Then, as per the feedback from the calibration engineer, the model should be improved in the necessary areas. Thereafter, the aftertreatment calibration engineer can use the improved model and again based on the feedback the model should be again improved. Until the time the model reaches the end of the V cycle, the OBD team starts using it and by this time, the model will be a high fidelity model based on the feedbacks given during the V cycle. This explains the usage of model during the whole product development cycle.

The objective of this work is to develop a SCR catalyst model for full useful life aging condition. A single site model is developed because at this severe hydrothermal aging condition of 800°C 16h most of the high temperature sites have migrated to low temperature sites. The use of this model is per the usage explained in the above paragraph.

2 Experimental Methods

The experiments were performed on a commercial Cu-SSZ-13 catalyst. The monolith used for the core reactor experiments was a square cross-section with the following physical properties : 16.67 mm height, 178.105 mm length, 300 cells per square inch (nominal cpsi) and a wall thickness of 0.127 mm. The length of

the monolith used was similar to the full-scale SCR. However, the purpose of doing this was to account for any axial washcoat non-uniformities that might be present. The monolith sample was placed inside an insulated quartz tube, and feed gas of varying composition and temperature was passed through it. Three K-type thermocouples were utilized to track the inlet gas, mid-bed and outlet gas temperatures. In general, for most of the experiments, the difference between the three thermocouple readings was below 5°C. This confirmed the near-isothermal reactor operation. The only instance where noticeable gradients were observed was during the ramp-up and ramp-down sections of the test protocol, and these were accounted for in the reactor model. The inlet and outlet gas compositions were measured using a MKS 2030 FTIR Continuous Gas Analyzer. Additionally, a mass-spectrometer (Hiden Analytical HPR-20 MS QGA, referred to as MS) was used at the outlet, which enabled utilizing Argon as the balance gas, allowing for transient N_2 concentration measurements. This was very useful to confirm closure of nitrogen balance, and allowed for validation of the simulated chemical reactions.

Prior to reactor testing, the SCR sample was hydrothermally aged in the presence of 10% H_2O/air：800°C for 16-hours (ageing). The reactor testing consisted of three types of experiments：temperature programmed desorption (TPD), temperature programmed reaction (TPR) and isothermal reaction. The TPD experiments were specifically performed for characterizing NH_3 storage, while the isothermal and TPR experiments were utilized for isolating the remaining reactions. An internal SCR test protocol was developed for each of these experiments. This protocol included the following：

- NH_3 TPD experiments consisting of an isothermal portion at 150°C, 200°C, 300°C and 400°C, followed by a ramp-up to 550°C at a rate of 10°C/min. 0.2% O_2 was used for the TPD experiments, and this is discussed further in Section 4.1
- Isothermal experiments at seven temperatures between 250°C–550°C to sequentially characterize NH_3 storage, NH_3 oxidation, NO oxidation, NO (Standard) SCR and NO+NO_2 (Fast) SCR at an ANR of 1
- Isothermal experiments at five temperatures between 250°C–150°C for NO and NO+NO_2 SCR at an ANR of 1, followed by a transient ramp up to 550°C at 10°C/min
- Isothermal experiments at nine temperatures between 550°C–225°C for NO_2 SCR at an ANR of 1.33, followed by a transient ramp up to 550°C at 10°C/min. Pure NO_2-SCR conditions below 225°C were avoided to prevent NH_4NO_3 deposit buildup and plugging. These conditions represent unrealistic domains not encountered in real world applications
- Isothermal experiments at five temperatures between 250°C–150°C for NO and NO+NO_2 SCR at an ANR of 0.8 and 1.2, followed by a transient ramp up to 550°C at 10°C/min. These experiments were utilized for model validation

All the above experiments were repeated for a degreened and aged catalysts at two gas hourly space velocities (GHSV) at STP：30,000/h and 60,000/h. For all the degreened catalyst experiments, 4.5% H_2O and 5% CO_2 was used, representative of real diesel exhaust. However, it was observed that the quality of the N_2 readings from the MS was relatively poor when CO_2 was present in the feed gas. Ordinarily, N_2 at a mass-to-charge (m/e) ratio of 28 is relatively easy to measure with the MS. However, 5% CO_2 in the gas stream created a problem, as there was sizeable fragmentation from CO_2 to CO^+, which is picked up at m/e 28. At a typical electron filament energy of 70ev, the CO^+ from the CO_2 completely overwhelmed the small signal from N_2 at m/e 28. Since CO_2 had absolutely no influence over any of the experiments (this was confirmed in further independent experiments), it was not used in the aged catalyst experiments, to obtain a better quality N_2 trace.

Since multiple experiments were conducted for 2 different conditions (2 GHSVs and 1 hydrothermal ageing conditions), the following nomenclature is used in reporting the data and model prediction results throughout the paper：

A-30：aged catalyst at GHSV of 30,000/h
A-60：aged catalyst at GHSV of 60,000/h

Figure 1 shows the mole fraction concentrations of an isothermal experimental trace at 250°C for D-30, along with the corresponding nominal inlet concentrations.

Step	Mole Fraction Concentrations
NH_3 Storage	300 ppm NH_3, 0.2% O_2
NH_3 Oxidation	300 ppm NH_3, 10% O_2
NH_3 Inventory	300 ppm NO, 10% O_2
NO Oxidation	200 ppm NO, 100 ppm NO_2, 10% O_2
NO SCR	300 ppm NH_3, 300 ppm NO, 10% O_2
NO + NO_2 SCR	300 ppm NH_3, 150 ppm NO, 150 ppm NO_2, 10% O_2
NO_2-SCR	300 ppm NH_3, 225 ppm NO_2, 10% O_2

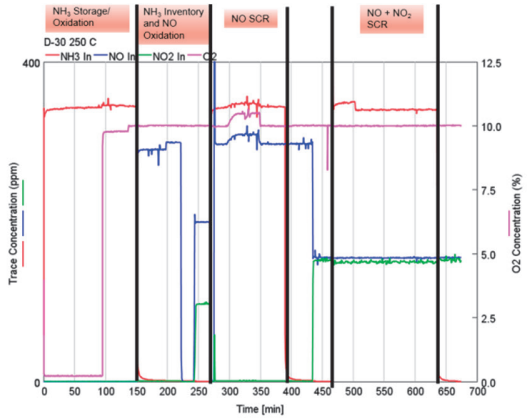


Figure 1 Isothermal experiment inlet mole fraction concentrations : D-30 at 250℃ ; 4.5% H_2O and 5% CO_2 used in all steps

3 Kinetic Modeling

3.1 Governing Equations

GT-Suite v2019 was used to develop the model. The details of the equations can be found in our previous literature[1]. The difference in the current model compared to our previous work is as follows :

1. Temperature dependent diffusivities for NH_3, NO, NO_2, N_2O and N_2
2. Axial discretization of 40 sub-volumes

3.2 Kinetic Model

The approach for developing the kinetic model relied on semi-global reactions to describe the surface chemistry. Eley-Rideal type kinetics were used, with reactions occurring between diffused gas-phase species and adsorbed NH_3[2]. As stated in the introduction section, it has been shown that two chemically distinct active sites exist for NH_3-SCR over Cu-SSZ-13[3]. In addition to the copper sites, additional Bronsted acid sites also exist, along with low temperature physisorbed ammonia sites[4]. The number of sites to include in the global kinetic model was decided based on analysis of data from the NH_3-TPD experiments. For the aged catalyst, only a single desorption peak was visible at ~300°C, and

Table 1 Reactions andrate expressions

No.	Reaction	Rate Expression
R1	$NH_3 + S1 \leftrightarrow NH_3(S1)$	$r_{1f} = k_{1,f} y_{NH_3} \theta_{S1} \Omega_1$ $r_{1b} = k_{1,b} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R2	$NH_3 + S2 \leftrightarrow NH_3(S2)$	$r_{2f} = k_{2,f} y_{NH_3} \theta_{S2} \Omega_2$ $r_{2b} = k_{2,b} \theta_{NH_3 S2} \Omega_2$
R3	$4NH_3(S1) + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O + 4S1$	$r_3 = k_3 y_{O_2}^{0.5} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R4	$4NH_3(S1) + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O + 4S1$	$r_4 = k_4 y_{O_2}^{0.5} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R5	$2NH_3(S1) + 2O_2 \rightarrow N_2O + 3H_2O + 2S1$	$r_5 = k_5 y_{O_2}^{0.5} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R6	$NO + 0.5O_2 \leftrightarrow NO_2$	$r_6 = k_6 (y_{NO} y_{O_2}^{0.5} - \frac{y_{NO_2}}{K_{eq}}) \Omega_1$
R7	$4NH_3(S1) + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O + 4S1$	$r_7 = k_7 y_{NO} y_{O_2}^{0.5} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R8	$2NH_3(S1) + 2NO + O_2 \rightarrow N_2 + N_2O + 3H_2O + 2S1$	$r_8 = k_8 y_{NO} y_{O_2}^{0.5} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R9	$2NH_3(S1) + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O + 2S1$	$r_9 = k_9 y_{NO} y_{NO_2} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R10	$2NH_3(S1) + 2NO_2 \rightarrow N_2 + NH_4NO_3(S1) + 3H_2O + S1$	$r_{10} = \frac{k_{10} y_{NO_2} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1}{(1 + K_{AN-S1} \theta_{NH_4NO_3 S1})}$
R11	$NH_4NO_3(S1) + NO \rightarrow NO_2 + N_2 + 2H_2O + S1$	$r_{11} = k_{11} y_{NO} \theta_{NH_4NO_3 S1} \Omega_1$
R12	$NH_4NO_3(S1) \rightarrow N_2O + 2H_2O + S1$	$r_{12} = k_{12} \theta_{NH_4NO_3 S1} \Omega_1$
R13	$NH_4NO_3(S1) \rightarrow NH_3 + HNO_3 + S1$	$r_{13} = k_{13} \theta_{NH_4NO_3 S2} \Omega_2$
R14	$2NH_3(S1) + 3NO_2 \rightarrow N_2 + 3NO + 3H_2O + 2S1$	$r_{14} = k_{14} y_{NO2} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R15	$8NH_3(S1) + 6NO_2 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O + 8S1$	$r_{15} = k_{15} y_{NO_2} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$
R16	$2NH_3(S1) + 2NO_2 \rightarrow N_2 + N_2O + 3H_2O + 2S1$	$r_{16} = k_{16} y_{NO_2} \theta_{NH_3 S1} \Omega_1$

the intensity of this peak decreased with adsorption temperature, as expected. Here NH_3 adsorption and desorption is modeled on two site, site 1 accounts for chemisorbed site and site 2 accounts for physisorbed site, and all the SCR reactions occur on site 1 because it is chemisorbed and it participates in SCR reactions unlike physisorbed sites where reactions don't occur dominantly. **Figure 2** shows the NH_3 TPD at 150°C, used for model calibration. NH_3 TPDs at 200°C and 300°C were also used to model the NH_3 adsorption and desorption phenomena.

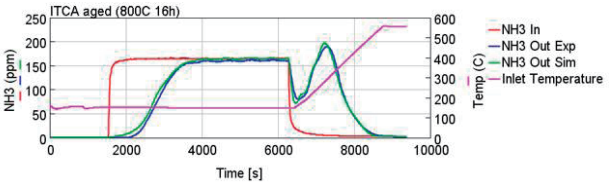


Figure 2 NH_3 TPD at 150℃ for aged condition

The overall reaction mechanism is shown in **Table 1**, where kf and kb refer to the forward and reverse rate constants respectively, described according to the Arrhenius equation (10). In equation (10), A and Ea refer to the frequency factor and apparent activation energy respectively, and T refers to the catalyst temperature. Species concentrations in the reaction rate were described in units of mol/m^3, and the overall reaction rate was described on a turnover number basis, in units of mol/m^3 reactors.

$$k = Ae^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (10)$$

A two-site modeling approach was used, with unactivated ammonia adsorption. In literature, NH_3 desorption models utilize differing approaches, including the constant activation energy (Langmuir) approach as well as coverage dependent activation energy (Temkin) approach[5]. In the present model, desorption from site S1 was modeled using the Temkin approach (R1-R2 in **Table 1**), while desorption from site S2 was modeled using the Langmuir approach (R3-R4 in **Table 1**). R3,4,5 are used to model NH_3 oxidation generating N_2, NO and N_2O respectively. It is observed that NH_3 oxidation has two different activation zones, low activation zone generating N_2 and high activation zone generating NO. R6 is the NO-NO_2 equilibrium reaction, R7,15,9 are the SCR reactions selectively generating N_2. R8,16 are SCR reactions generating non selective N_2O. R10,11,12,13 describe the AN (Ammonium Nitrate) chemistry, where R10 is the formation of AN, R11 is the titration of AN by NO to generate NO_2, R12 is the AN decomposition to N_2O when the temperature is higher than about. 170°C and R13 is the AN decomposition to NH_3 and HNO_3. Lastly, R14 explains the NH_3 oxidation by NO_2 to generate NO at high temperatures. The novel features of this SCR model is the inclusion of AN chemistry by R10,11,12,13 and NH_3 oxidation by NO_2 which is R14.

The calibration of the rate constants was done in a sequential manner, with specific isolated experimental data. The optimization algorithm used was primarily the well-known genetic algorithm NSGA-III[6], in combination with a gradient based Nelder-Mead Simplex method[7] once the optimal domain was identified.

4 Results and Discussions

4.1 NH_3 Adsorption/Desorption Reaction

For detailed explanation of the modeling NH_3 adsorption/desorption please refer our previous work [1]. The modeling approach adopted in this work is very similar to [1]. This work is only different from the previous work with respect to the aging condition, which is 800°C 16h. With this severe aging the SCR shows different behavior as will be explained later. We will start understanding out results in the following sequence：

1. NH_3 adsoprtion/desorption
2. NH_3 Oxidation
3. Standard SCR
4. Fast SCR
5. AN Chemistry

All of the shown results are the reactor results for 60K (1/h) standard space velocity. **Figure 3** shows the NH_3 adsorption characteristics with change in the adsorption temperature from 150°C, 200°C and 300°C.

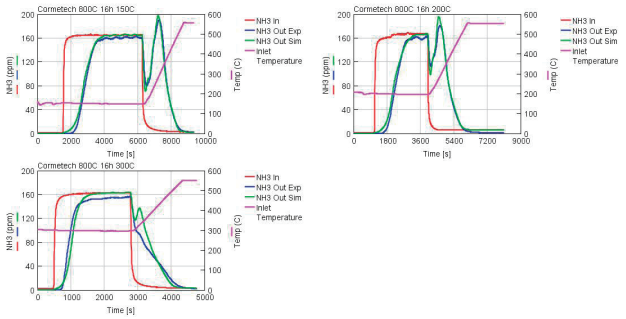


Figure 3 NH_3 TPD for 150,200 and 300℃

The results shown in **Figure 4** are the final model predictions after calibrating the kinetic parameters for NH_3 adsorption/desorption reactions. R1,2,3 and 4 from **Table 1** were used to calibrate. It is clear that the model is able to predict the NH_3 storage reasonably well. This is the most important part of model calibration as it will predict the amount of NH_3 available on the surface for reaction at any given temperature, NH_3 concentration and flow rate. Site density (Ω) and the coverage fraction of NH_3 both together govern the quantity of NH_3 on the surface for reaction. Once, the kinetic parameters are calibrated for NH_3 adsorption/desorption then we do not change them and proceed with calibration of remaining of the reactions.

The next step in calibration is the NH_3 oxidation reaction; here there are 3 main products which are N_2, NO and N_2O. **Figure 4** shows the model sufficiently predicts the trend of oxidation, it is seen that there are 2 slopes for NH_3 oxidation, first is from 250–400°C which is the region for N_2 generation and second is from 400–550°C which is the region for NO generation in majority and N_2O generation in less quantity. The model predicts the NO and N_2O generation very well. There are two O_2 concentrations used 0.2% and 10%, the reason is to calibrate the order of O_2 dependence in the NH_3 oxidation reaction. From literature, we know the value should be around 0.5 and the model calibrated value was 0.5366. Interesting part is that at high temperatures 500 and 550°C some amount of NO is generated and as per reaction 7 of **Table 1**, the generated NO will participate in the standard SCR reaction. Therefore, to account for this phenomenon we calibrated standard SCR reaction and NH_3 oxidation reaction together. In real world there will not be any scenarios where there is only O_2 and NH_3 in the system, there will always be NO and O_2 present together so, this approach will help in developing correct kinetics for the model.

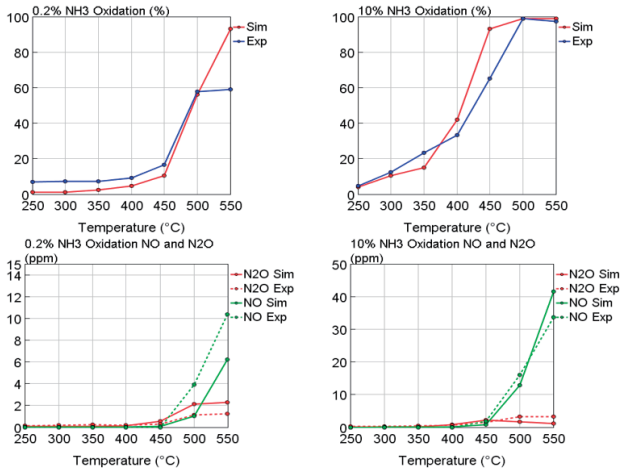


Figure 4 NH_3 Oxidation at 60K (1/h) SV

Figure 5 shows the results of the standard SCR reaction, the NH_3 conversion is well predicted because every SCR reaction consumes NH_3. The important temperature at 150°C and 175°C, the model capability of NH_3 prediction should be judged because the experimental conversion is not 100% so there is no issue of model overfitting the experimental data. Here, high temperature NO conversion and N_2O generation are not predicted well due to the interaction of NH_3 oxidation to generate NO. We did not try to tune the kinetic parameters of standard reaction to predict NO conversion rather we focused on achieving a reasonable prediction for all the four plots shown in **Figure 5**. Lastly, from the N_2 plot in **Figure 5** it should be clear that between 200°C and 400°C where standard SCR reaction selectively generates N_2, the model is predicting N_2 very well but at higher temperature the model struggles to capture the actual phenomena. With aging, there is a change in the individual active sites but the total number of sites remain the same. Here, in this work we assume that with aging all the sites have migrated to low temperature region hence, we are ignoring the fact that sites associated to high temperature region might have an effect on SCR reactions at high temperatures. It is proven that at high temperature there is formation of CuOx

clusters with severe hydrothermal aging (800°C 16h) and that results show some different trends for SCR reactions at high temperature regions.

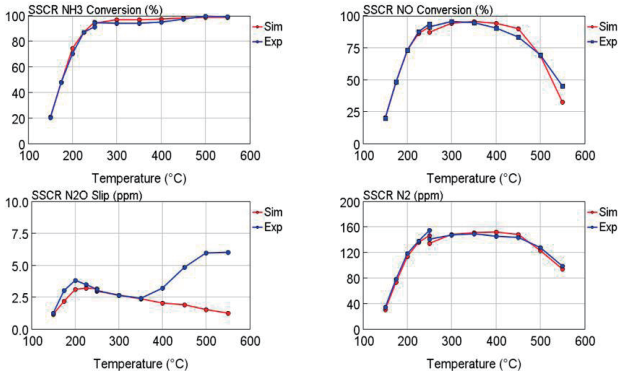


Figure 5　Standard SCR results for NH_3, NO, N_2O and N_2 predictions

Fast SCR reaction occurs in the presence of equimolar concentration of NO and NO_2 and the NH_3 to NOx ($NO+NO_2$) is one. This reaction makes it possible for the SCR to convert NOx at about 90% efficiency at 200°C. From **Figure 6** we can see that NH_3 prediction is reasonably well but the model is not able to predict NO at 350°C and 400°C. Fast SCR chemistry is complex because NO_2 is adsorbed on the surface as nitrates and then they participate in SCR reaction and in this model we are developing global kinetics so, the detailed reactions are not modeled to capture the exact effects. N_2O predictions are good as shown in the bottom left figure, the model is able to predict the high N_2O at low temperature, low N_2O at medium temperature and again high N_2O at high temperature.

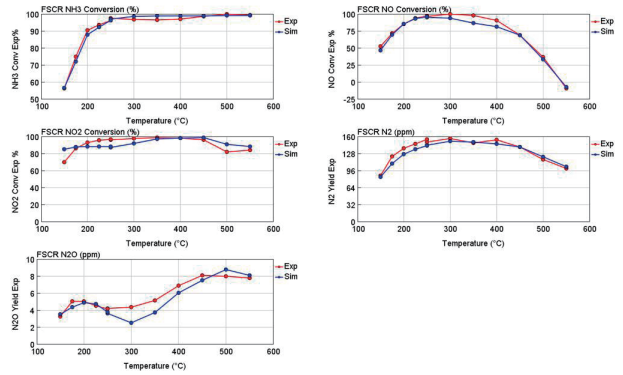


Figure 6　Fast SCR reactions for NH_3, NO, NO_2, N_2O and N_2 predictions

5　Conclusions

In this work, a detailed global surface reaction model was developed to describe the behavior of a well-characterized Cu-SSZ-13 catalyst for NH_3-SCR in a temperature range of 150°C–550°C for two space velocities (GHSV：30,000/h and 60,000/h at STP) and one hydrothermal ageing conditions (850°C for 16-hours). The reaction mechanism proposed was identified based on detailed understanding of the available experimental data, as well as conclusions from literature relating to the nature of active sites present on this SCR catalyst.

A large experimental protocol was used to calibrate the reaction kinetics under all operating conditions, and included stead-state, isothermal, TPR and TPD-type experiments. In general, the kinetic fitting of the parameters to these experiments was reasonably accurate. NH_3, NO_2, NO, N_2O and N_2 predictions justified the modeling approach of including the reactions only on S1, leading to reduced computational complexity. Furthermore, the steady-state SCR behavior was described successfully using the global reaction chemistry.

A complete global SCR model should serve to emphasize the range of validity required for a global model for its utilization in model-based control applications. The developed SCR model requires full-scale validation on an engine dynamometer. Along with the SCR model, ASC model was also developed and both the models were used for engine and aftertreatment calibration work.

References

(1) Daya, Rohil, Chintan Desai, and Bruce Vernham. “Development and Validation of a Two Site Kinetic Model for NH_3-SCR over Cu-SSZ-13. Part 1. Detailed Global Kinetics Development Based on Mechanistic Considerations.” Emission Control Science and Technology 4.3 (2018),p.143–171.

(2) Centeno, M.A., Carrizosa, I., Odriozola, J.A.: In situ DRIFTS study of the SCR reaction of NO with NH_3 in the presence of O_2 over lanthanide doped V_2O_5/Al_2O_3 catalysts. Appl. Catal. B Environ.19(1), p.67–73 (1998)

(3) Anggara, T., Paolucci, C., Schneider, W. F.: Sites and mechanisms for NOx transformations in Cu-SSZ-13. In Abstracts of Papers of the American Chemical Society (Vol.248). 1155 16th St, NW, Washington, DC 20036 Amer Chemical Soc, USA (2014)
(4) Olsson, L., Wijayanti, K., Leistner, K., Kumar, A., Joshi, S.Y., Kamasamudram, K., et al.: A multi-site kinetic model for NH_3-SCR over Cu/SSZ-13. Appl. Catal. B Environ. 174, p.212–224(2015)
(5) Watling, T.C., Tutuianu, M., Desai, M.R., Dai, J., Markatou, P., Johansson, A.: Development and validation of a Cu-Zeolite SCR catalyst model (No.2011-01-1299). SAE Technical Paper (2011)
(6) Deb, K., Jain, H.: An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. IEEE Trans. Evol. Comput. 18(4), p.577–601 (2014)
(7) Nelder, J.A., Mead, R.: A simplex method for function minimization. Comput. J. 7(4), p.308–313 (1965)

あとがき

最近，いすゞテクニカルセンターオブアメリカ Inc. 近くのミシガン州アナーバー市で年一度開催の後処理のモデルに特化した国際 Conference があり当社からもプレゼンテーションを行った。各社プレゼンテーションの中でも特筆すべきは，Cummins によるケミカル被毒モデル，継続的な劣化物理モデル及び JohnsonMatthey による US Ultra Low NOx 規制対応用後処理のモデルによる排出ガス試験試行結果などであった。質疑も含めた全体の印象は，今後より厳しくなる排出ガス規制は後処理の浄化率向上無くして対応できないが，リアルワールドでの後処理の劣化（＝浄化率の低下）を，実際にお客様が使われた際のバラツキ含めて開発過程で占える実力が必須と再認識した。

いすゞテクニカルセンターオブアメリカ Inc. は，いすゞ自動車やいすゞ中央研究所の皆さんとともに後処理モデルの改良改善も進めており，その一端を本技報で報告させていただいたがここに留まらず，更なる進化の努力を皆さんとともに続けます。

最後に昨年と同じ言葉となりますが「いすゞの中で役に立ついすゞテクニカルセンターオブアメリカ Inc. でありたい」と社員一同が一丸となって取り組んでいる様子が本報告で少しでも伝われば幸いです。

（深井　泰雄）

著　者

Chintan Desai

論文・報告

Diesel Particulate Filter に堆積した Ash の構造解析

Structural Analysis of Ash Loaded in Diesel Particulate Filter

米山　香澄*　Kasumi Yoneyama
中村　圭介*　Keisuke Nakamura
大角　和生*　Kazuo Osumi
石川　直也*　Naoya Ishikawa

要　旨

DPF へ堆積した PM 量は前後の圧力差によって推定される。しかしながら，DPF 再生で燃え残った Ash により圧力損失が変化するため，PM 堆積量の推定精度が低下する。本研究では，圧力損失に与える Ash 堆積の影響を把握するために実機 DPF における Ash の堆積分布の確認と各部の圧力損失測定を行い，Ash 層の SEM 画像解析による構造解析を行った。

Abstract

Ash accumulation in a DPF affects the pressure drop across the DPF and reduces the accuracy of determining the pressure drop caused by the particulate matter loading. It is therefore important to determine the effect of ash on the pressure drop. Herein, we used a used DPF that was installed in a vehicle to investigate the ash distribution within the DPF. In addition, ash samples with different thicknesses were collected from the DPF and the pressure drop was measured across each sample. Furthermore, using scanning electron microscopy, we analyzed the micro structures of the ash layer at several points.

1　はじめに

ディーゼルエンジンより排出される PM（粒子状物質：Particulate Matter）は，DPF（ディーゼル微粒子フィルタ：Diesel Particulate Filter）により捕集される。DPF に捕集された PM の量は DPF 前後差圧から推定され，DPF に一定量の PM が堆積した時，燃料を噴射し，DOC（酸化触媒：Diesel Oxidation Catalyst）における燃料の酸化反応熱を用いて DPF を昇温し，PM は燃焼除去される（強制再生）。この際，PM 中に含まれるエンジンオイル等由来の金属成分が，強制再生後に燃え残り，DPF 内に Ash として堆積する場合がある。Ash の堆積形態としては**図 1** に示すように Wall Ash と Plug Ash の二種類に大別される。強制再生が繰り返し起こると，DPF の壁に平行に堆積する Wall Ash から，Plug 状にセルを閉塞するように堆積する Plug Ash へ Ash の形態が変化することが知られている [(1)]。

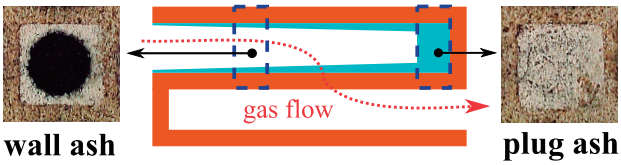


図 1　DPF における Ash 堆積形態

Wall / Plug Ash のガス透過性が異なるため，Ash の堆積形態によって PM 堆積時の DPF 前後差圧が変動する。したがって Ash の堆積により，DPF 前後差圧に基づく PM 堆積量の予測精度が低下する [(2)]。**図 2** のように，DPF 前後差圧が変動するため，Ash 堆積のない場合と異なる PM 堆積量で強制再生が行われる場合が想定される。したがって，DPF 前後差圧から PM 堆積量を推定するためには，Ash が DPF 前後差圧に及ぼす影響を見積もる必要がある。

Ash の DPF 前後差圧に及ぼす影響を見積もるためには，Plug Ash や Wall Ash のような形態だけでなく，**図 3** に示すような Wall Ash 層の構造を把握する必要があると考えられる [(3)]。Ash 層の構造とは，**図 4** に示す Ash 粒径，空隙率及び空隙径分布を指す。しかしながら，これまでの Ash に関する研究では，このような Ash 層の構造と差圧との関係について報告された例はない。

本研究では，市場走行車から回収した Ash が堆積した状態の DPF を対象とし，DPF 流れ方向の部位に対する差圧特性を調べた。更に Ash 層の気孔構造に関する解析を行い，DPF 再生方法が Ash 層構造に与える影響について考察を試みた。

*㈱いすゞ中央研究所

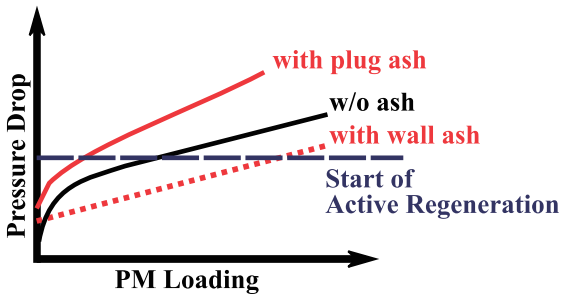


図 2　Wall Ash 及び Plug Ash の堆積が DPF 圧力損失に及ぼす影響の概念図

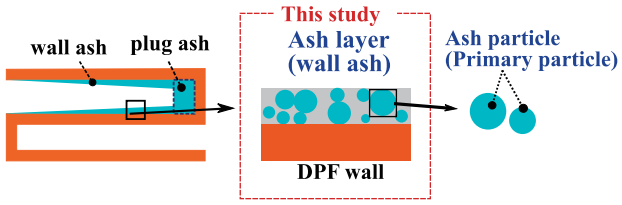


図 3　DPF 断面図と Ash 構造（Wall/ Plug Ash, Ash 層，Ash 粒子）

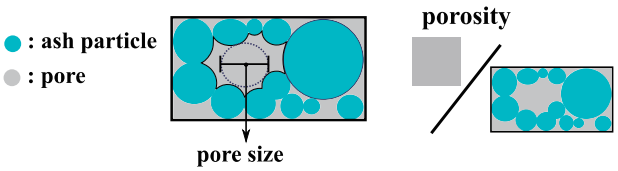


図 4　Ash 層の粒径，空隙率及び空隙径

2　実験手順

2.1　Ash 堆積 DPF 市場回収品の仕様

本研究では，市場を走行していた HD Truck（大型トラック：Heavy Duty Truck）に搭載された DPF を回収して用いた。供試 DPF の仕様を**表 1** に示す。供試 DPF は，洗浄による Ash 除去を約 20 万 km 及び 40 万 km 走行後に 2 回行っている。供試 DPF を搭載していた車両は一般道の走行が中心であり，平均車速は 30 km/h 程度であった。

表 1　HD Truck に搭載された DPF の仕様

Engine	Heavy duty (HD) diesel engine
Emission regulation	PNLT
DPF diameter (mm)	266.7 (10.5 inch)
DPF length (mm)	304.8 (12 inch)
DPF substrate	Cordierite (with PGM loading)
cell number (cpsi)	200
wall thickness (mm)	0.3048 (12 mil)
mileage (km)	550,000
DPF cleaning (km)	200,000 and 400,000
Average speed (km/h)	30

供試 DPF より採取した Ash 粉末の XRD（X 線回折：X-Ray Diffraction）分析を行った結果を**図 5** に示す。XRD 分析より本報告において用いた市場回収品 DPF に堆積した Ash の主成分は $CaSO_4$ であり，既報 [4] の Ash 含有成分と同様であった。

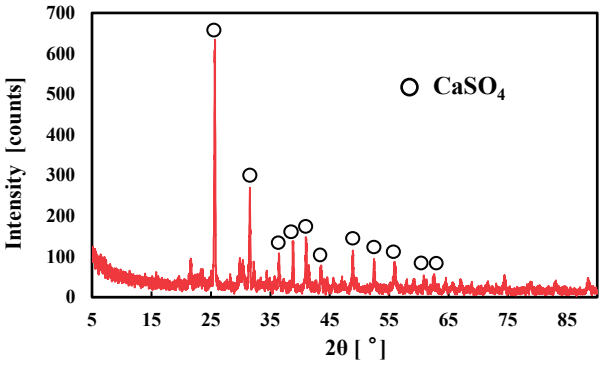


図 5　XRD による Ash の組成分析

供試 DPF を軸方向に分割し，分割後の各部の前端面のセルを光学顕微鏡で観察した。各所の観察結果及び DPF 前端面からの観察位置を**図 6** に示す。**図 6** より，上流から下流方向に進むに従って Wall Ash の厚さが増加し，前端面より 260 mm 下流の部分では Plug Ash を形成していることがわかる。

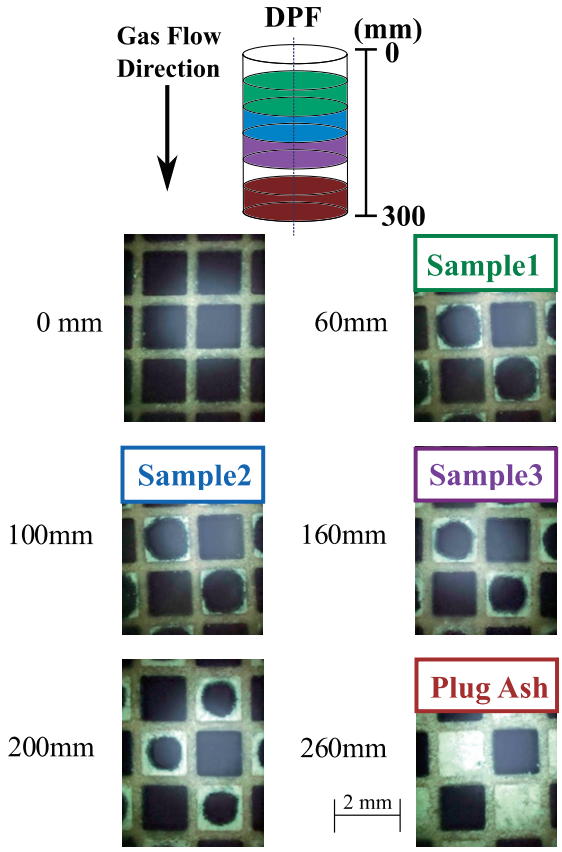


図 6　供試 DPF 各所における断面観察結果と観察位置

2.2 Wall Ash 層の厚さが異なる DPF 各所の前後差圧測定方法

DPF 前後差圧への影響が大きいと考えられる Wall Ash が堆積した部分の DPF 前後差圧の測定を行った。**図 6** に示す Wall Ash 形成が確認された上端面から 60, 100 及び 160 mm の箇所から Ash の堆積した部分を切り出し，DPF 前後差圧測定に供した。差圧測定用試料は，直径 30 mm × 長さ 40 mm の円柱状に DPF 片を切り出し，DPF と同様の Wall Through 構造となるように目封じを施して作製された。以後，各供試試料を上流側から Sample1, Sample2 及び Sample3 と称する。

差圧測定装置の概要図を**図 7** に示す。DPF 試料を装置の試料ホルダー部分に装着し，試料の上流側から窒素ガスを 20 ℃にて流通させ，流量 20～100 L/min の範囲における試料前後の差圧を測定した。流量計は，東京メータ製 QFS-400（最大レンジ 400 L/min），差圧センサは GE 製 UNIK 5000（測定精度 2.8 Pa）を使用した。

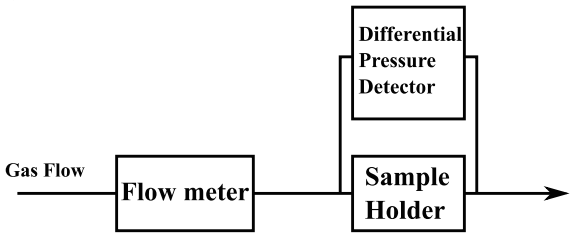


図 7　DPF 差圧測定装置の概要図

2.3 Ash 層の厚さの測定方法

DPF に堆積した Wall Ash 層の厚さは DPF 前後差圧に影響すると予測されるため，**2.2** で使用した試料における Wall Ash 層の厚さを測定した。試料に堆積した Ash 層の厚さを測定するため，試料の前端面 5 箇所，後端面 5 箇所，計 10 箇所のセルを光学顕微鏡で観察した。**図 8** は直径 30 mm，長さ 40 mm に切り出した試料と光学顕微鏡による観察箇所の模式図を示す。光学顕微鏡を用いた観察により，**図 9** のような画像が得られた。得られたセル断面の画像中，**図 9** で示すようなセルの角（Corner）及び辺（Side）各 4 箇所，合計 8 箇所の線分の長さを測定して，8 箇所の線分の長さの平均値をそのセルに堆積した Wall Ash 層の平均の厚さとした。

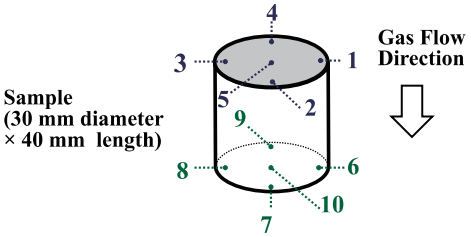


図 8　試料の前端面及び後端面における観察箇所

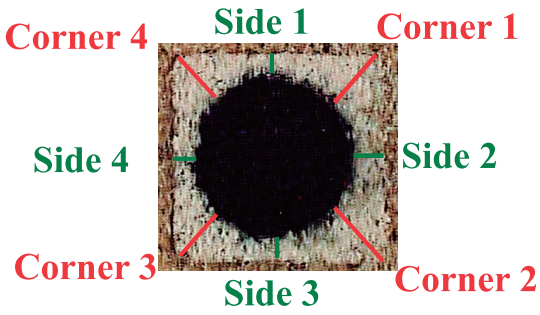


図 9　DPF セルにおける Ash 層厚さの測定箇所

2.4 Ash 層構造の解析方法

DPF はその構造から，Ash が堆積した DPF 壁をガスが通過するため，Ash 層の構造は DPF 前後差圧に影響すると考えられる。そこで Ash 層の粒径分布，空隙率，空隙径分布を算出し，各所の Ash 層の構造解析を行った。

既報[5]における Ash 層の構造解析では，Ash 層の空隙率導出過程において構成成分の密度を仮定している。更に，空隙径分布は導出できていない。ゆえに，DPF に堆積した状態での Ash 層構造は不明であった。

本研究では，SEM（走査型電子顕微鏡：Scanning Electron Microscope）を用いて DPF に堆積した Ash 層を撮影した SEM 画像を解析することにより，Ash 層の粒径分布，平均空隙率，及び空隙径分布の算出を試みた。

Ash 層構造解析用試料は，SEM 前後差圧測定用の試料（Sample1, 2, 及び 3）近傍及び最下流の Plug Ash 堆積部（Plug Ash と称する）から，**図 10** の左の図に示すようなセル断面を含む任意の部分をそれぞれ約 5 mm 角に切断することで作製された。Ash 層は非常に脆く，通常の研磨手法を用いた場合，物理的な力により構造が変化すると考えられる。そこで本研究では DPF + Ash 片の断面をイオンビーム（日立ハイテクノロジーズ製 IM-4000PLUS）を用いて研磨を行い，構造を破壊しない状態の Ash 層の SEM 像を測定した。**図 10** の左側，枠で強調させた DPF 壁と Ash の両方を含む箇所を SEM で観察した。**図 10** の右側に得られた SEM 像の一例を示す。

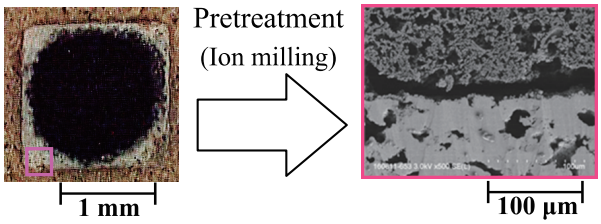


図 10　セル断面における SEM 観察位置と得られる SEM 像の一例

各試料に堆積した Ash 層の粒径分布，平均空隙率，及び空隙径分布は断面 SEM 画像の画像解析により導出した。画像解析は画像解析ソフト ImageJ[(6)] を使用した。

Ash 層の粒径分布は，SEM 像（10000 倍）における Ash 粒子を識別してランダムに色をつけた解析用画像を作成し，解析用画像において Ash 粒子の面積分率のヒストグラムを作成することで算出した。**図 11** には SEM 画像と解析した画像の一例を示す。Ash 層の平均空隙率は，**図 12** の左上に示す SEM 像（5000 倍）を，ImageJ により**図 12** の右上に示す 2 値化像に変換し，2 値化像における空隙部分の面積割合より算出した。ここで，2 値化像とは，濃淡のある画像の明るさ（輝度）に閾（しきい）値を設定し，閾値より明るい箇所と暗い箇所を白と黒の 2 色に塗り分けるよう変換した画像を指す。本研究では，撮影された SEM 像を目視しながら研磨面にある Ash 粒子と空隙を識別し，Ash と空隙の境界が SEM 像と同様になるよう，SEM 像毎に手動で輝度の閾値を決定し，Ash 粒子を黒，空隙を白で表すように変換処理を行った。断面 Ash 層の空隙径分布は，**図 12** 上部の平均空隙率算出時に使用した SEM 像の 2 値化像より，**図 12** 下部に示すように解析用画像における Ash 層空隙に内接する円の直径を空隙径と定義し，画像中の空隙径を横軸にヒストグラムを作成することで算出した。粒子と空隙の正確な境界が不明瞭なため，粒子径，空隙率及び空隙径算出の際，研磨面の奥と画像の境界部にある粒子及び空隙は解析対象から除外した。

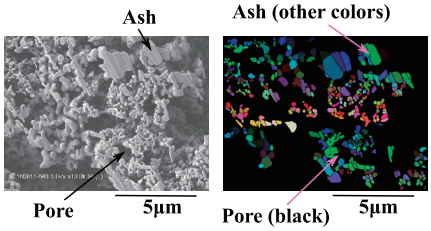


図 11　SEM 画像と粒径分布解析用画像

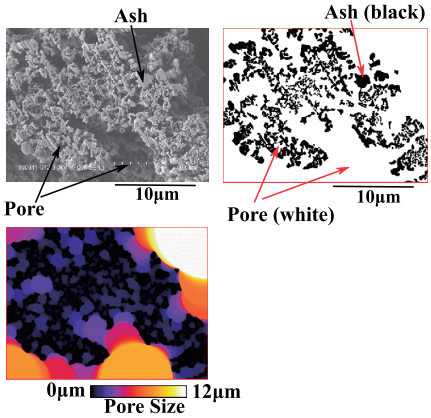


図 12　SEM 画像と平均空隙率算出用 2 値化像及び空隙径分布解析用画像

3　実験結果及び考察

3.1　Wall Ash 堆積試料の前後差圧測定結果

窒素ガス流量に対する各試料の前後差圧測定値の変化を**図 13** に示す。Ash 堆積のない試料と比較して，Wall Ash が堆積した試料の前後差圧は高く，差圧の値は Sample1，Sample2，Sample3 の順で高くなり，Ash 層厚さの大きい下流の試料ほど試料の前後差圧が高い傾向が見られた。

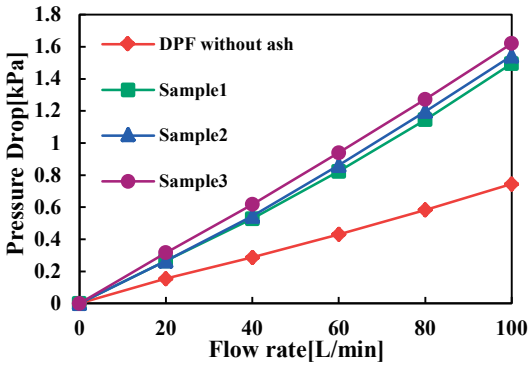


図 13　窒素ガス流通時における Ash の堆積していない DPF 及び Ash の堆積した DPF 試料の差圧

3.2　Wall Ash 層の厚さ測定結果

各試料の前端面 5 セル及び後端面 5 セルの計 10 セルそれぞれにおいて，セルあたり 8 箇所の Ash 層厚さを測定し，セルごとの Ash 層平均厚さを算出した。測定結果の一例として，Sample2 の各セルにおける Ash 層平均厚さ（前端面：**図 14**，後端面：**図 15**）を示す。エラーバーは各セル内の Wall Ash 層厚さのバラつきを示す。**図 14** に示すように，Ash の堆積が確認できず Ash 層の厚さが測定できなかった箇所が存在した（前端面セル 2 参照）。一方で，下流の Sample3 の後端面には，セル 5 箇所中 3 箇所に Plug Ash が堆積していた（**図 16** 参照）。

図 14 と **15** より，同一試料においては下流ほど Ash 層の厚さが大きくなる傾向があることがわかった。一方で，**図 14**, **15**, 及び **16** より，各セルの Ash 堆積状態は同一試料においても異なっており，Ash の堆積状態は不均一であることがわかった。

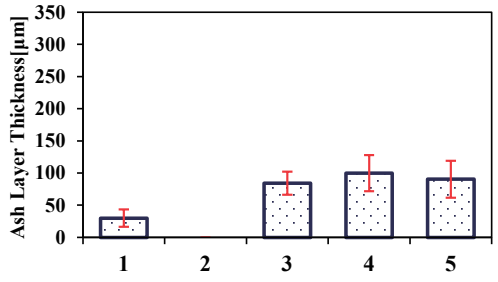


図 14　各セルにおける Ash 層平均厚さ（Sample2, 前端面）

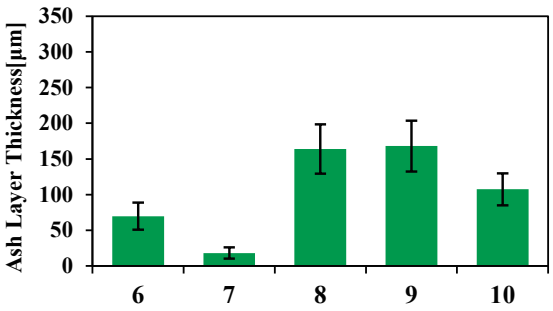


図 15　各セルにおける Ash 層平均厚さ
（Sample2, 後端面）

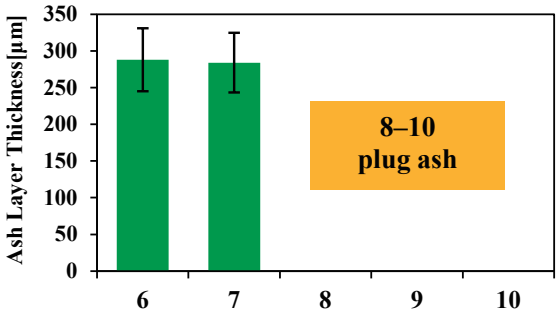


図 16　各セルにおける Ash 層平均厚さ
（Sample3, 後端面）

3.3 Ash 層構造解析結果

図 17 は，SEM 画像解析より得られた粒径分布及び空隙径分布の一例として，Sample1 の粒径分布と空隙径分布を示す。最大粒径及び空隙径には試料ごとにばらつきがあるものの，粒径及び空隙径分布の形状は試料によらず類似しており，粒径及び空隙径分布のピーク位置は**図 17** と比較して大きく変わらなかった。また，**表 2** は，SEM 画像解析で得られた各試料の Ash 層の構造（粒径の中央値，平均空隙率，空隙径の中央値）を示す。**表 2** より，Ash 層の粒径，空隙率及び空隙径はいずれも DPF 下流の試料ほど小さくなる傾向が確認された。

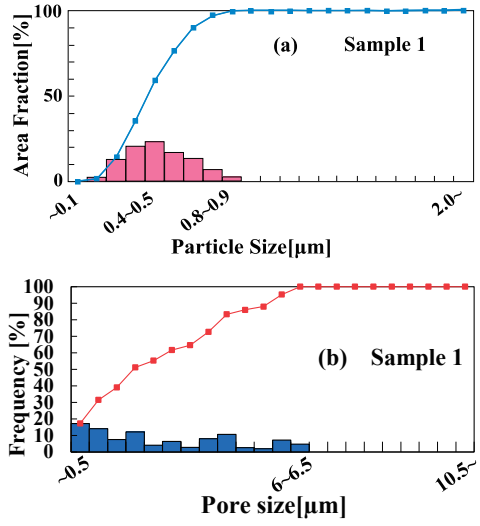


図 17　Sample1 の (a) 粒径分布と (b) 空隙径分布

表 2　各試料の粒径，空隙径及び空隙率

	*Particle Size (μm)	Porosity (%)	*Pore Size (μm)
Sample 1	0.48	74	1.9
Sample 2	0.45	75	2.1
Sample 3	0.36	70	1.4
Plug Ash	0.39	60	1.4

*: Median

3.4 市場回収 DPF の Ash 粒径

表 3 に，SEM 画像解析より得られた市場回収品に堆積した Ash 粒径と既報[(5),(7),(8)] の Ash 粒径の比較を示す。表に示すような Ash 加速堆積試験及び本研究と同様に HD truck を使用した実路走行試験により得られた既報の Ash 粒径と比較すると，本測定結果で得られた Ash 粒子径は，既報の Ash 一次粒子径と同程度であると考えられる。ただし，本研究では SEM 画像解析を用いて Ash 粒径を算出しているため，SEM の画像で確認できる範囲より大きな粒径（10 μm 以上）を持つ Ash 粒子は解析対象とされていない。そのため，凝集粒子については，粒子径の評価が行われていない。

表 3　既報との Ash 粒径比較

	Particle size	Ash loading process
SAE Technical Paper 2001-01-0190[(5)]	0.1– 0.5 μm (Primary)	Field (HD truck)
	–50μm (Agglomerates)	
SAE Technical Paper 2005-01-3716[(7)]	0.4 –1 μm (Primary)	Accelerated (HD truck)
	8–100 μm (Agglomerates)	
SAE Technical Paper 2006-01-0874[(8)]	About 1 μm	Accelerated (Burner)
This study*	**0.36 – 0.48 μm**	**Field (HD truck)**

*: calculated from SEM image analysis

また，二次元の構造情報に基づく解析であり，三次元的な構造情報は得られない。今後，複数の試料及び視野で Ash 層の SEM 観察及び構造解析を行い，Ash 粒径の取りうる値の範囲，凝集粒子の存在有無及び凝集粒子の存在程度を確認する必要がある。

3.5 DPF 内 Ash 空隙率の変化と DPF 再生方法

既報[9]では，Ash を含む PM 層が強制再生により DPF 下流へ輸送されると言われている。DPF の下流で PM 層の PM が燃焼し，除去されることにより，より密度の高い Plug Ash 層が形成すると考えられている。本研究で得られた DPF 各所の空隙率は，DPF 下流ほど小さくなっており，既報と同様の現象が起こっていると推測される。また，供試 DPF を搭載していた車両の平均車速等の履歴からも，供試 DPF は強制再生の影響を強く受けていたと考えられる。

4　おわりに

本研究では，市場回収された DPF を用いて，Ash 堆積時の DPF 前後差圧と Ash 層構造（粒径，空隙率及び空隙径）を調査し，次の(1)～(4)の結果を得た。

(1) Wall Ash のみが DPF に堆積しているとき，DPF の前後差圧は DPF 上流から下流にかけて増加していた。
(2) DPF のセルにおいて，Ash は不均一な堆積分布を持っていた。
(3) 本報告の手法（SEM 画像解析）を用いることにより，実際の Ash 層構造に基づいた構造情報を得ることができる。
(4) Ash の粒径，空隙率及び空隙径は，いずれも DPF の上流から下流にかけて小さくなっていた。

今後の課題として，Ash のサンプル数を増やして同様に構造解析を行い，搭載車両の車速及び DPF 再生頻度など DPF の使用状況と Ash 層構造から，Ash 堆積時の DPF 前後差圧をモデルにより予測することが挙げられる。

本文献は，自動車技術会論文集 49 巻 6 号に掲載された論文を加筆修正の上報告するものである。

参考文献

(1) T. Ishizawa et al.: Investigation into Ash Loading and Its Relationship to DPF Regeneration Methods, SAE Technical Paper, 2009-01-2882 (2009)
(2) A. Sappok, M. Santlago, T. Vlanna and V. Wang: Characteristics and Effects of Ash Accumulation on Diesel Particulate Filter Performance: Rapidly Aged and Field Aged Results, SAE Technical Paper, 2009-01-1086 (2009)
(3) Latella, B. A., L. Henkel, and E. G. Mehrtens: Permeability and high temperature strength of porous mullite-alumina ceramics for hot gas filtration, Journal of materials science, Vol.41, No.2 (2006), p.423-430
(4) A. Sappok et al.: Characteristics and Effects of Lubricant Additive Chemistry on Ash Properties Impacting Diesel Particulate Filter Service Life, SAE Technical Paper, 2010-01-1213 (2010)
(5) G. A. Merkel, W. A. Cutler and C. J. Warren: Thermal Durability of Wall-Flow Ceramic Diesel Particulate Filters, SAE Technical Paper, 2001-01-0190 (2001)
(6) Schneider, Caroline A., Wayne S. Rasband, and Kevin W. Eliceiri: NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature methods Vol. 9, No. 7(2012), p. 671-675
(7) J. A. McGeehan et al.: On The Road to 2010 Emissions: Field Test Results and Analysis with DPF-SCR System and Ultra Low Sulfur Diesel Fuel, SAE Technical Paper, 2005-01-3716 (2005)
(8) A. G. Konstandopoulos, D. Zarvalis, E. Kladopoulou and I. Dolios: A Multi-Reactor Assembly for Screening of Diesel Particulate Filters, SAE Technical Paper, 2006-01-0874 (2006)
(9) A. Sappok, Y. Wang, R. Wang, C. Kamp, et al.: Theoretical and Experimental Analysis of Ash Accumulation and Mobility in Ceramic Exhaust Particulate Filters and Potential for Improved Ash Management, SAE Technical Paper, 2014-01-1517 (2014)

著　者

米山　香澄

中村　圭介

大角　和生

石川　直也

論文・報告

多品種混流対応型組立ラインの構築

Construction of Multi-mixed Production Assembly Line

近岡　洋*
Hiroshi Chikaoka

要　旨

市場要求の変化，新規車型投入の短期化などが今後より加速することが見込まれ，生産車型の比率が刻々と変化する中で，車型ごとにラインを持つことは低負荷ラインを持つ，つまり無駄なラインを持つこととなりかねない。特にいすゞ自動車は商用車を製造している関係上，従前車型の生産が長く続くことがあり，生産ラインを簡単にたたむことができないため，低負荷ラインが残りがちである。そこで，今回は上記の問題を解決するための一つのモデルとして，多品種混流対応型トランスミッション組立ラインの構築に取り組んだので紹介を行う。

Abstract

Due to changes in market demand and short-term introduction of new models, the ratio of production models changes every day, but having a line for each car model has a low load line In other words, it may have a useless line. In particular, since Isuzu Motors manufactures commercial vehicles, production of conventional vehicles may continue for a long time, and the production line cannot be easily abolished, so low load lines tend to remain. Therefore, as a model to solve the above problems, we have been working on the construction of a transmission assembly line for multi-mixed and mixed flows.

1　はじめに

いすゞ自動車藤沢第 4 工場にはトランスミッション組立ラインとして，大きくわけて 6 ライン存在していた。いすゞ自動車では現在中期計画を掲げ，より効率の良い工場とするために，ラインの統廃合を行っており，トランスミッション組立ラインにおいても，6 ラインを 3 ラインに統合していく計画である（**表 1**）。

本稿では，① MUA/MVL/MVC 組立ラインと② MSB 組立ラインの統合した事例を紹介していく。

表 1　藤沢第 4 工場トランスミッション組立ライン

統合前		統合後
LCV	①MUA / MVL / MVC 組立	MUA / MVL / MVC / MSB 組立
LD	②MSB 組立	
MD	③MZZ / MYY 組立	MZZ / MYY / MZW 組立
	④MZW 組立	
HD	⑤MBJ / MLD / MA＊組立	大型 T/M 組立
	⑥MJT / MJX / MEB 組立	

2　車型別トランスミッション構造の紹介

今回混流する車型の構造及び工法に関して紹介する。

2.1　MUA の構造

① 構造　　：筒形構造（中間プレートあり）（**図 1**）
② 変速段数　　：5 SPEED
③ ギヤレシオ数　：4
④ 駆動形式　　：4 × 2，4 × 4
⑤ 工法

中間プレートに対してギヤ・シャフトサブ組品，変速機構組品を組付けていくことで一つのギヤサブ組品として構築し，直立させたトランスミッションケースに上から挿入組付け後リヤケースを組付ける。

その後，水平に姿勢変更したトランスミッションに，コントロールボックス，トランスミッション外装部品を組付ける。

完成したトランスミッションは，全数ファイナルテスト工程にて，外観，各種機能，シフト性，ギヤノイズ等の品質確認を実施し，合格品が出荷される。

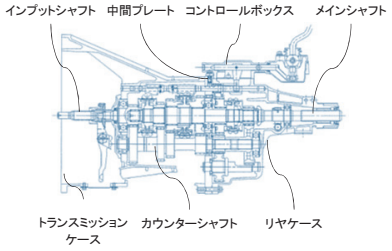


図 1　MUA（4 × 2 モデル）

* PT 技術部

2.2 MVL の構造

① 構造　　：筒形構造（中間プレートなし）（図 2）
② 変速段数　　：6 SPEED
③ ギヤレシオ数　：2
④ 駆動形式　　：4 × 2，4 × 4
⑤ 工法

ギヤ・シャフトサブ組品，変速機構サブ組品を冶具にて一体化させ，直立させたトランスミッションケースに上から挿入組付け後リヤケースを組付ける。その後，水平に姿勢変更したトランスミッションに，コントロールボックス，トランスミッション外装部品を組付ける。

完成したトランスミッションは，全数ファイナルテスト工程を経て出荷される。

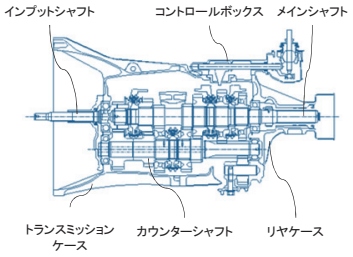


図 2　MVL（4 × 2 モデル）

2.3 MVC の構造

① 構造　　：筒形構造（中間プレートなし）（図 3）
② 変速段数　　：6 SPEED
③ ギヤレシオ数　：1
④ 駆動形式　　：4 × 2
⑤ 工法

MVL をベースとした LD（軽量:Light Duty）トラック向け車型である MVC はリヤケースを組付けるまで，MVL と同じ工法である。リヤケースを組付け後はセンタブレーキの組付けを行う。その後，水平に姿勢変更したトランスミッションに，ブレーキドラム，コントロールボックス及びトランスミッション外装部品の組付けを経て，全数ファイナルテスト工程を経て出荷される。

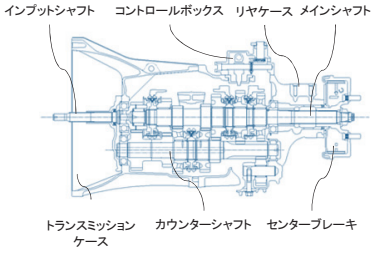


図 3　MVC

2.4 MSB の構造

① 構造　　：バスタブ構造（図 4）
② 変速段数　　：5 SPEED
③ ギヤレシオ数　：2
④ 駆動形式　　：4 × 2
⑤ 工法

水平に置かれた，バスタブのような形状をしたトランスミッションケースに対して，ギヤ･シャフトサブ組品，変速機構部品を各々組付けていき，コントロールボックスにて蓋をする。その後，前後にクラッチハウジング，リヤカバーを組付けた後，センタブレーキ用のフランジを組付け，全数ファイナルテスト工程を経て出荷される。

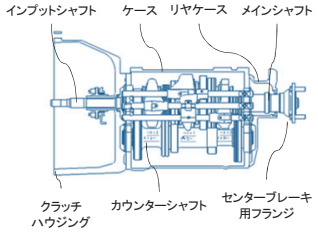


図 4　MSB

3　組立ラインの紹介

今回統合する組立ラインの概要を紹介する。

3.1 MUA/MVL/MVC 組立ライン

MVL/MVC の 2 車型は 2015 年に立上げを迎えた比較的新しいトランスミッションであり，当該トランスミッションの立上げ前には MUA 専用組立ラインが配置されていたが，立上げに合わせてラインの引き直しを行った。ラインを引き直すにあたっては，極力 MUA の専用設備の流用 / 転用を行うことで，イニシャルコストを抑えてのライン構築を行った。またこの際，MUA ラインレイアウトを見直すことで，占有面積を 3/4 に圧縮させることができた。

ラインを稼働すると立上げ後生産車型比率によっては，余剰工数があることが分かり，工程改善の課題が見えてきた。また，今後のモデルチェンジに伴って，生産ボリュームの増加が予想され，更なる生産能力増強が必要となっていた。

3.2　MSB 組立ライン

MSB 組立ラインは 2005 年に藤沢第 4 工場に構築されたラインである。

構築以降生産能力増強対応を一度行っており，生産能力としては，年間最大 2.5 万台作れるラインとして構築されていた。しかし，2010 年以降は状況が変わり低負荷な状態での運営となっていた。

この変化に伴い余剰工程が生じたため，工程改善が課題となっていた。また，新興国向けという素性から近年の急激な情勢変化の影響も受けやすく，生産ボリュームの月次変動が大きくなることが予想され，専用ラインでは人員ロスが発生し，管理費の増加等が懸念される。そのため，他ラインとの統合の必要があった。

4　構造と工数の比較

今回同一ラインで組立を行うトランスミッションの構造・工数を一覧表にしたものが，**表 2**，**図 5** となっている。

表 2　構造比較表

	構造	中間プレート	センタープレーキ	段数	レシオ数
MUA	筒形	有	無	5	4
MVL	筒形	無	無	6	2
MVC	筒形	無	有	6	1
MSB	バスタブ	無	有	5	2

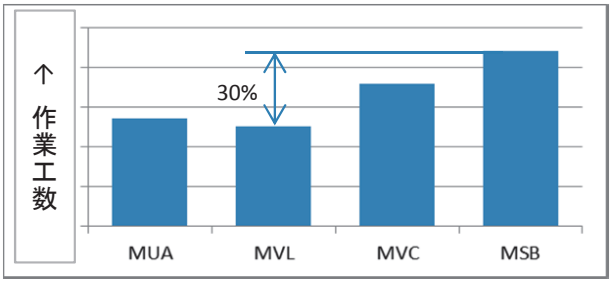


図 5　車型別代表工数比較表

図 5 から見て取れるとおり，工数が一番高い MSB に対して，一番低い MVL は 30 % ほど差がある。その他多数の外装部品の違い等を合わせると，仕様は 250 種以上に及び，それぞれで微妙な工数差が発生する。

図 6 には工程概略図を示すが，特にメインライン，ケースサブ工程において，構造・組立姿勢も異なることから大きな工数差（工数の数値は未表示）・工法の違いが発生していることが分かる。

図 7 には代表的な工法の違いの例である，ギヤサブ組品の搭載工程の実施している風景を示す。

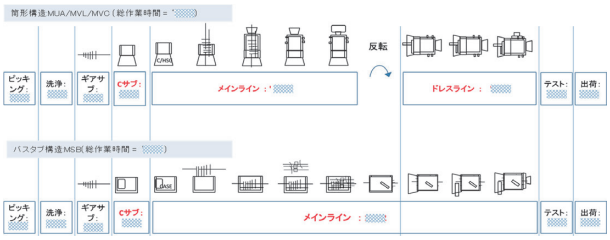
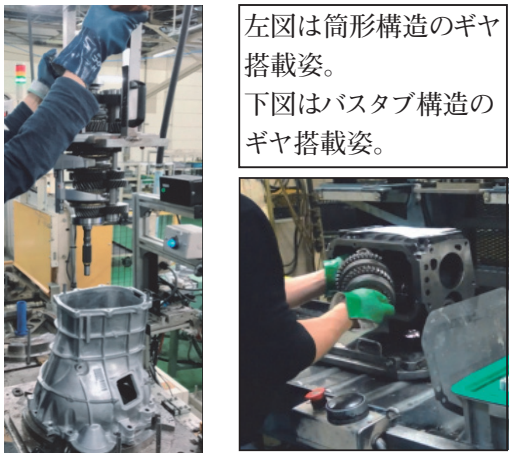


図 6　工程概略図



左図は筒形構造のギヤ搭載姿。
下図はバスタブ構造のギヤ搭載姿。

図 7　代表的な工法の違い（ギヤ搭載）

5　構造と工数差の吸収の方策

今回の混流組立ラインを構築するための大きな課題はこれまで紹介してきたとおり，構造と工数の違いをいかに吸収するかである。その方策として MSB 組立ラインにおいて発生してしまっている余剰工数を活かすことを軸に次の統合 3 案にて検討を行った。

ALT1：全行程統合
ALT2：メインライン / ケースサブ並流統合
ALT3：テストライン以降統合

【ALT1：全工程統合】

本案は基本的に一本のライン上でどの車型も実施するという案である。フローで表すと一本の線で書けるシンプルな構成となり，統合案としては理想である。

しかし，今回のように構造・工数が大きく違うワークを単純に共流してしまうと，特にメインラインに置いては工数の多い MSB 専用工程要員を増やさなければいけなくなってしまう。

また，工法が大きく異なるため，同一工程でも MSB を組立てる場所と，その他の車型を組立てる場所を別々に設けなければいけなくなり，ラインを長くせざるおえなくなってしまい，投資の増加等のロスが増えてしまう。

【ALT2：メインライン / ケースサブバイパス統合】
本案は特に工数差が大きなメインライン，ケースサブ工程を並流する案である。並流することで車型別の工数差及び工法の違いを吸収することができるが，フローが分かれることで，多少複雑となってしまいレイアウトの配置を工夫しなければ，離れ小島の工程が発生し人員のロスが懸念される。

【ALT3：テスト工程以降統合】
本案は生産ボリューム変動による影響の吸収を行いやすい，テスト工程以降を共流する案である。
テスト工程以降であれば，工数差と工法の違いも少ないため，統合ロスをミニマムに抑えることが容易である。また，設備に関してもテスト以前の工程ではそのまま流用が可能であるため，投資を抑えられることができる。しかし，本案ではテスト工程以前の構成は従前と同じであるため，統合メリット最大限享受することができない。

これら 3 案を投資含め比較検討を行った結果が**表 3** である。

表 3　検討案比較表

	ALT1	ALT2	ALT3
省人	▲3名	▲4名	▲3名
投資	大	中	小
削減面積	240m^2	240m^2	170m^2

このように今回の統合においては ALT2 が適切な混流形態であると判断し，採用を決定した。
図 8 に統合後の共流工程と並流工程の層別及びフローを示す。共流工程と並流工程を組み合わせることで，工数差・工法の違いを吸収し，更に共流→並流または並流→共流間に適切なバッファを設けることで，生産ボリューム比率の変動を吸収できるよう工夫した。

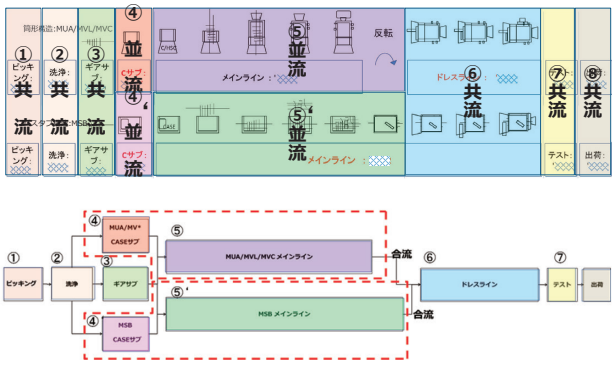


図 8　統合後工程フロー

これにより，大幅な改善ができたが，今後の課題として細かい工数差の吸収方法の確立が残っているので，IoT 等の活用（**7 章**にて紹介）により確立していきたい。

6　レイアウト

前項で決めた共流と並流の層別に基づき実レイアウトの構成を行った。稼働ラインの統合かつ，限られたレイアウト展開エリアという制約があったが，おおむね層別に従い配置することができた。また，部品棚を集約し，工程で使用する部品をキット化して供給する配膳方式を採用することで，統合によってライン内保管部品が増え工程が見え難くならないようにする，搬送のタッチ回数をトータルで減らす等の工夫を行った。並流とした工程においてもハード的に近接させることで，離れ小島となってしまう工程の発生による人員ロスを防ぎ，将来的には自動化を行う等で制約を解除し，共流化させる狙いの配置をすることができた（**図 9**）。

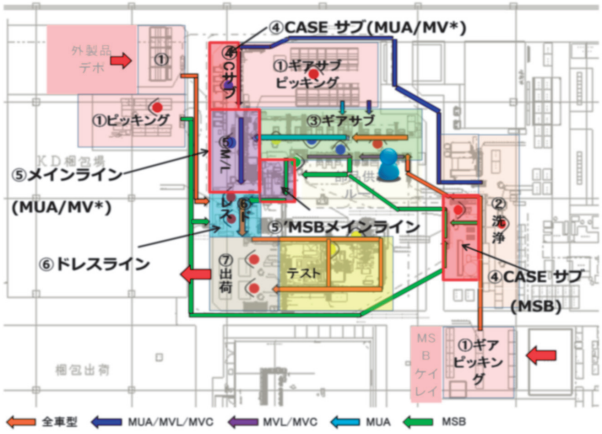


図 9　統合レイアウト

図 10 には統合前と統合後の一人当たり時間でき高の推移を示す。本統合計画においての，でき高向上目標は 14 % 向上であったが，統合時においては落ち込んだが，3 か月後には 17 % 向上を達成し目標を過達した。更にその後も緩やかではあるが，数値は向上しており，統合効果が確認できる。
また，専有面積においても，統合前の MSB 専用ラインが配置されていた面積分約 280 m^2 の削減を予定どおり達成することができた。

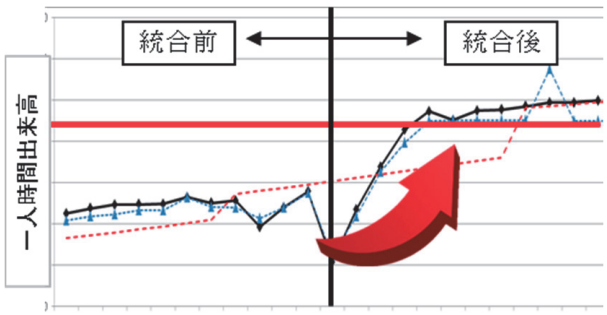


図 10　工数実績（一人時間でき高）推移

7　設備対応

組立ラインを統合するにあたり，サイクルタイムアップ対応，ラインスペースを拡大させないために設備台数の増加抑止，立上げを円滑に行うために習熟期間の短縮，不具合を流さないための品質保証の仕組みの構築といった課題があったが，その対応として導入した新規設備の一部を紹介する。

7.1　着々装置

いすゞで呼ばれている着々装置とは，装置に対して行う部材のセット（着）・取外し（脱）といった「着・脱着」作業の繰り返しのうち，「着・着」作業のみを人が行い，それ以外の作業を自動化することで生産性の向上を図る着々化という主に加工ラインの改善に活用されていた考え [(1)] を，組立ラインに反映するための装置のことである。

本装置は内製設計・内製組立を実現しており，基本設計をモジュール化しており，ギヤサブ組工程・変速機構サブ組工程，ケースサブ組工程等に約 25 台の着々装置の導入を行った。

ギヤサブ組工程の例では**図 11** に示すように，本装置を 4 台並べている。前述したように，本装置はモジュール化されており，全装置で圧入ヘッドを段取りすることで，同じ作業ができるように設計されている。つまり，万が一 1 台故障してしまった場合，これまではラインストップをして修理完了を待つしかなかったが，故障した装置のヘッドを流用することで，修理をしている間でも（もちろんサイクルは上がってしまうが）生産ができる仕組みとなっている。また，このように補完できる構造となっていることで，生産ボリュームの増減に合わせて設備の増減もこれまでの工程専用設計に対しては容易に行える。

本着々装置の導入を設備老台と合わせて行ったことにより，旧ギヤラインでは約 8 割を占めていた手作業を約 1 割程度まで削減しており，作業習熟時間の大幅な短縮を実現している。また，このモジュール設計により車型別段取りも簡易化されており，統合による設備増加の防止を行うことができた。

今後は設備間搬送と車型による段取りを自動化することで，完全自動組立ライン化を目指す。

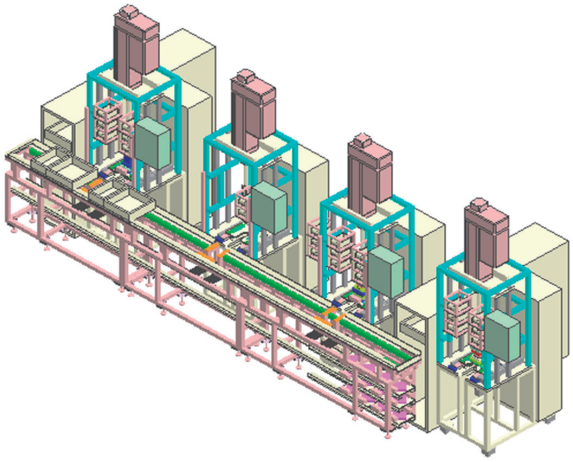


図 11　メインギヤサブ着々装置

7.2　ファイナルテスタ

従来マニュアルトランスミッションのファイナルテスト評価は，手動によるシフト評価を行っていたが，自動シフト評価を採用し検査員の負荷軽減，そして官能評価の数値化による定量評価を図っている。これにより，検査員が変わっても，より安定した品質保証ができるようにし，不具合を流さない仕組みを構築した（**図 12**）。

（詳細に関してはいすゞ技報 129 号“TM ファイナルテスタシフト操作力判定自動化”参照）

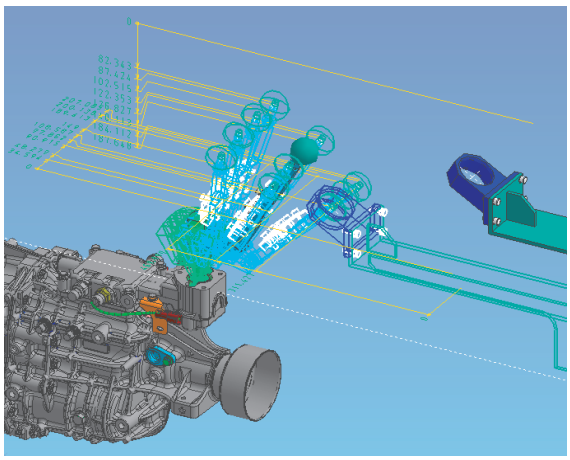


図 12　自動シフトチェンジ動作イメージ

7.3　IoT への取り組み

IoT（モノのインターネット：Internet of Things）技術の活用を本ラインで行っているので紹介する。まず，今回新たに導入した着々装置をメインとした装置にはイーサネットユニットの導入を必須とし，ローカルサーバへのつなぎ込みを行った。

ローカルサーバは，これまで締付マルチナットランナに使用していた，締付データサーバを拡張して使用した。

装置の主要部は電動化させることで，車型対応（自動段取り化）及び，データ取得の容易化を図っており，各工程においての圧入力，圧入距離，締付トルクといった品質データと画像検査結果である画像データをローカルサーバに送信して自動保存するようになっている。

ファイナルテスタにおいては取得データが多いため，個別にパソコンを持ちデータ保存を行っている。

これらのデータは最終的には実績管理端末 / 表示端末を介して上位サーバに保存される仕組みとなっており，今後はテスト結果とそれぞれの工程での結果データ，また，組立ラインのデータだけではなく，加工工程でのデータと紐づけしビッグデータ解析することで，よりよい品質のモノづくりへ発展を見込んでいる。

実績管理端末 / 実績表示端末では一部工程の IN/OUT 時間と異常ログを取得しており，これまでの生産実績表示板は最終実績のみを表示させるようなものであったが，ネットワーク上から取得したデータを活用することで，各工程の作業進捗等を表示できるように変更している。また，手書きで行っていた稼働実績表の記入を，自動で行うように変更し，上位サーバにデータをあげることで，ラインから離れていても社内ネットワークから，リアルタイムに稼働状況を確認できるようにしている。

今後は主要工程すべてで，稼働データを取得できるようにすることで，生産比率及び生産順位といった，これまで感覚的に決めてきていた項目を集めたデータを解析することによって最適な生産条件を導き出し，課題として残っていた，より細かな工数差の吸収を実現していきたい。

8　おわりに

今回紹介させていただいた統合においては，稼働ラインの統合ということもあり，製造部に多大なご協力をいただき，都度発生した問題も早急に解決することで，円滑な立上げを達成することができたことを，この場を借りて感謝申し上げます。

今後も各部署と協力しながら，この後に控える中期計画を一つずつ達成して行きたいと思います。

参考文献

(1) http://blog.livedoor.jp/kaizen_yougo/archives/51466800.html

著　者

近岡　洋

解説・講義

人とくるまのテクノロジー展 2019 への出展

Automotive Engineering Exposition 2019 Hosted by JSAE

飯田　陽平*
Youhei Iida

要　　旨

公益社団法人自動車技術会主催の自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展 2019」が開催された。

いすゞ自動車は自動車技術会の賛助会員として出展しており，いすゞの高い技術力と社会ニーズへの対応をお客様にご理解していただくため工夫を凝らしている。

2019 年はいすゞの最新技術を採用した ’18 型エルフ及び搭載エンジン 4JZ1 を展示した。あわせて，安全・経済・環境技術に対して，いすゞにおける最新の取組みを紹介した。

Abstract

Automotive Engineering Exposition 2019 hosted by Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. (JSAE) was held.

ISUZU takes part in this exposition as JSAE member and devises a better exhibition so that visitors understand its high lever technology and its correspondence to social needs.

In 2019, we exhibited ’18 ELF and 4JZ1 engine to which the latest technology is applied. For safety, economic and environmental technologies, we introduced the latest achievements in ISUZU, along with the exhibits.

1　はじめに

公益社団法人自動車技術会主催の自動車技術展「人とくるまのテクノロジー展 2019」が 2019 年 5 月 22 日（水）から 5 月 24 日（金）までパシフィコ横浜・展示ホール（以下，「横浜会場」と称す），7 月 17 日（水）から 7 月 19 日（金）までポートメッセなごや（名古屋市国際展示場）（以下，「名古屋会場」と称す）でそれぞれ開催された。来場者及び出展社は年々増加しており，高い注目を集めている。いすゞへの関心と魅力を感じていただくために最適輸送の高度化を目指す姿勢と先進技術開発への挑戦姿勢を示した。

2　人とくるまのテクノロジー展の紹介

2.1　開催概要

「人とくるまのテクノロジー展」は，世界に向けて最新技術・製品を発信するための国内最大規模の自動車技術展として 1992 年から開催されており，2019 年は「その先のテクノロジーが見える」[(1)(2)] をテーマに，各種講演及び展示が行われた。

2.2　来場者

各会場には，自動車各社，自動車関連企業，メディア関係及び学生などさまざまなお客様が来訪された。横浜会場の合計来場者数は 95,900 人に上り，2018 年の 93,458 人を上回る結果となった[(1)]。また，名古屋会場は 45,514 人で，こちらも同様に 2018 年の 41,306 人を上回る結果となり，いずれも過去最高を記録した[(2)]。近年各会場で来場者数が増加傾向にあることから，社会の関心が高まっていることが伺える。また，2019 年はインフラ技術との融合を目的に IT 業界などのメーカ出展が企画され，自動車業界以外の方々にも，多数来場いただいた。

いすゞ自動車（以下，「いすゞ」と略す）のブースにも多くのお客様にお越しいただいた（**図 1**）。

図 1　会場の様子

*開発技術企画部

3　いすゞ自動車の出展

3.1 出展コンセプト

いすゞの出展コンセプトは，エネルギセキュリティ・先進安全技術・テレマティクスサービスを中心のテーマとし，最新の ’18 型エルフ及び最新の開発成果を展示した。また，2019 年は初代エルフが発売されて 60 周年という節目の年であり，これを強調し，アピールすべく，歴代エルフを写真で紹介した（**図 2**）。

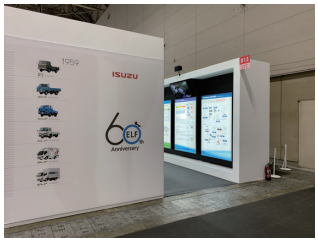


図 2　いすゞブース

3.2 展示内容

最新の ’18 型エルフ及び搭載ディーゼルエンジン 4JZ1 のカットモデルを展示した。

また，安全，経済，環境技術をパネルとモニタで紹介した。毎年，来場されるお客様にも満足していただけるように，新しい情報を用意した。

パネルはテンションファブリックを使用して，文字を際立たせ説明を読みやすくした（**図 3**）。

図 3　パネル展示

3.3 ブースレイアウト

’18 型エルフをブースの正面に展示し，床から照明を当てて車両を囲い天井へつながる造形で存在感及び高品質感を演出した。

なお，ブース中央に通り抜けのできる通路を作り，スムースな移動を可能とした（**図 4**）。

図 4　いすゞブース

4　展示物

4.1 ’18 型エルフ

燃費向上・クリーンな排出ガス・安全技術・架装性を両立させた ’18 型エルフを展示し，新たに標準装備されたステレオカメラを間近で見ていただけるようにした。

なお，従前車に対して進化した機能及び特徴をキャブ後ろのスペースに乗せたパネルで紹介した（**図 5**）。

図 5　’18 型エルフ

4.2 4JZ1　ディーゼルエンジン

’18 型エルフに搭載されたニューエンジン 4JZ1 をカットモデル及び資料で紹介した。

DPD（後処理装置：Diesel Particulate Defuser）を従来のシャシ搭載からエンジン近接搭載へレイアウトを変更したこと，並びにカット断面を用いて，新しくなった燃焼室形状及び VVT（可変バルブタイミング：Variable Valve Timing），i-ART®[1] インジェクタを説明した（**図 6**）。

注 [1] i-ART は株式会社デンソーの登録商標。

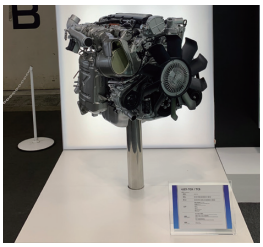


図 6　4JZ1　ディーゼルエンジン

4.3 バイオ燃料

ユーグレナ社と共同研究してきた DeuSEL®[1] をパネル，モニタ及び資料で紹介した。DeuSEL® はエンジン及びインフラを変えずに脱炭素社会に貢献するものであり，注目すべき燃料と捉えている。共同研究は 2014 年から取り組んできたが，「人とくるまのテクノロジー展」での展示は初めてとなる。

ユーグレナ社でバイオディーゼル燃料の製造実証プラントが 2018 年に竣工した。いすゞは次世代バイオディーゼル燃料に対するエンジン性能を確認しており，いすゞ藤沢工場と最寄り駅を結ぶシャトルバスで実証走行している。

注 [1] DeuSEL は株式会社ユーグレナ及びいすゞ自動車株式会社の共同登録商標。

4.4 天然ガス自動車

次世代天然ガス自動車技術の開発をパネルで紹介した。いすゞは既に商品化されている CNG-MPI に対して，更なる長距離輸送に対応するため LNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）を燃料とするトラックの開発を進めてきた。LNG トラックは 2018 年に公道を走行して実証しており，商品化に向けて着実に進行している。

なお，CNG-MPI においても更なる燃費向上・低 CO_2 化を実現するための開発を進めている。また，超効率天然ガスエンジン実現を目指すための DFCI（Dual Fuel Compression Ignition）の研究に取組んでいる。

4.5 電気自動車

開発中のエルフ EV（電気自動車）の開発状況をパネルで紹介した。なお，エルフ EV は実用化に向けて 2019 年 2 月から各事業者様の協力でモニタ走行を実施しており，商品化へ向けて着実に進行している。

4.6 先進安全技術

’18 型エルフに標準装備されたステレオカメラ方式による AEBS（衝突被害軽減ブレーキ：Advanced Emergency Braking System）機能及び誤発進抑制機能，先行車発進お知らせ機能をパネルとモニタで紹介した。また，主に市街地での歩行者及び自転車との事故防止，並びに荷崩れ防止など小型トラックの AEBS に対して，ステレオカメラを選択した理由を説明した。

4.7 テレマティクスサービス

いすゞが 2004 年から展開している MIMAMORI（運行管理システム）及び 2015 年から展開している PREISM（高度純正整備システム）をパネル及び資料で紹介した。

なお，’18 型エルフと同時にフォワードでも PREISM サービスが開始され，大型から小型トラックまでのフルラインナップ化を達成した。

5 運営

お客様の専門的な質問に対応すべく，各展示物の開発担当部署から説明員を選出した。また，4JZ1 ディーゼルエンジン，バイオ燃料，テレマティクスサービスについては配布資料を用意し，より詳細な技術説明を提供した。

なお，海外のお客様対応として，すべての展示物の説明は日英二か国語表記とした。また，円滑な意思疎通ができるように通訳の方に協力をいただいた。

6 お客様の反応

ブース正面に展示された ’18 型エルフを見た多数のお客様が足を止めてくださった。ブース内においても，説明をメモに取ったり，展示物を写真に撮ったりなど，熱心に展示物を見学されている様子で，いすゞへの高い関心を感じた。

また，お客様から展示物に関係するさまざまなご質問･ご期待をいただいた（**図 7**）。

図 7 説明員へ質問をされるお客様

7 おわりに

人とくるまのテクノロジー展 2019 は横浜会場・名古屋会場ともに盛況であった。「革新的社会インフラと融合した“くるま”進化を生み出す重要技術」をテーマとした主催者企画展示が集客効果となり，いすゞにおいても良い機会となった。いすゞブースに足を運んでいただいた皆様に深く御礼を申し上げます。

また，いすゞブースの運営管理及び設営にご協力いただいた株式会社広芸インテック殿，並びに本活動に参画いただいた社内関係部署の皆様にこの場を借りて，感謝の意を表します。

参考文献

(1) 自動車技術展 - 人とくるまのテクノロジー展横浜，公益社団法人自動車技術会，2019 年 7 月 31 日更新，https://expo.jsae.or.jp/
(2) 自動車技術展 - 人とくるまのテクノロジー展名古屋，公益社団法人自動車技術会，2019 年 7 月 31 日更新，https://expo-nagoya.jsae.or.jp/

著 者

飯田 陽平

社外発表（2018年1月 ～ 2018年12月）

◇講　演

発表者所属は、発表年月時点である

発表日	発表先	表題	発表者	所属
2/9	中部歯車懇話会 歯車シンポジウム 歯車技術の現状と将来展望	自動車用トランスミッションの現状と将来展望	古賀　英隆	駆動商品企画・設計部
2/27～ 2/28	ATZ live 5th International Engine Congress 2018	Diesel Powered Heavy Duty Vehicles in Japan	一政　都志夫	開発部門　執行役員
2/28	（公社）自動車技術会 排気触媒システム部門委員会 自動車排気触媒システムの多様性への対応	SCRモデルの高温領域でのNOx浄化性能予測精度向上の試み	岡　耕平 大堀　鉄平 大角　和生 板垣　裕 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所
3/15	藤沢市・藤沢商工会議所・ （公財）湘南産業振興財団 平成29年度藤沢市ロボット産業推進プロジェクト 第4回「藤沢ロボット産業研究会」	商用車の将来に向けた取組み	志賀　正樹	開発技術企画部
4/10～ 4/12	SAE International 2018 World Congress Experience	Improvement in Selective Catalytic Reduction Model Accuracy for Predicting NOx Conversion at High Temperature	岡　耕平 大堀　鉄平 板垣　裕 大角　和生 石川　直也 土橋　優貴 和光　栄治	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 エンジン実験第一部 〃
5/23～ 5/25	（公社）自動車技術会 2018春季大会	後端の旋回運動を伴うクランク軸の曲げ応力 －直列6気筒ディーゼルエンジン－	小林　紳一郎 木所　誠	エンジン実験第二部 〃
		ディーゼルエンジン筒内におけるPM生成挙動に関する研究（第1報） －筒内ガス全量サンプリングとGCMSおよび炭素分析によるPM生成過程の把握－	古川　伸哉 鈴木　浩高 柴田　慶子 齋藤　大晃 石井　義範 島﨑　直基	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃
		ディーゼルエンジン筒内におけるPM生成挙動に関する研究（第2報） －エンジンCFDへの詳細化学反応計算適用によるPM生成過程の解析－	齋藤　大晃 古川　伸哉 石井　義範 島﨑　直基 石井　一洋	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 横浜国立大学
		DPFに堆積したAshの構造解析	米山　香澄 中村　圭介 大角　和生 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃
		電動オイルポンプとパワートレインの振動騒音設計手法	近藤　幸成 石濱　正男 小林　喜幸	PT工務部 神奈川大学 日本電産トーソク
5/31	中国自動車技術研究センター㈱（CATARC） 重型车转鼓测试及营运车辆安全性测试研讨会	重量車実路排出ガス規制開発状況	塩安　健太 南　利貴	エンジン実験第一部 〃
6/28～ 6/29	（一社）日本交通科学学会 総会・学術講演会	商用車の先進安全に向けた取り組み	反町　一博	㈱いすゞ中央研究所
7/5～ 7/6	gfai tech GmbH、㈱SVジャパン アコースティックカメラ音源探査セミナー	いすゞにおけるアコースティックカメラの活用事例	小澤　恒	㈱いすゞ中央研究所

発表日	発表先	表題	発表者	所属
7/12	(公社)自動車技術会 人とクルマのテクノロジー展 2018名古屋 特別講演	大型トラック「GIGA」～5つの視点で磨き上げた5つ星トラック～	赤木　三昌 高橋　英樹 鹿内　和憲 末貞　貴弘 結城　俊男 武井　祐一 工藤　緋沙子	大型商品企画・設計部 PT商品企画・設計第一部 NGV企画・設計部 電装・制御開発部 ASシステム開発部 〃 コーポレートコミュニケーション部
7/24	アジレント・テクノロジー㈱ GC/MS 材料分析セミナー	空気質の技術動向とMarkesマイクロチャンバー（M-CTE250）を用いた車室内VOCの分析事例	達　晃一	㈱いすゞ中央研究所
8/28	（一社）日本機械学会 関東支部 神奈川ブロック 電力中央研究所 横須賀地区見学および若手技術者と機械系学生の交流会	後処理モデルのNOx浄化予測精度向上の試み	岡　耕平	㈱いすゞ中央研究所
9/3	（公社）自動車技術会 ディーゼル機関部門委員会 第3回ディーゼル機関部門委員会	ディーゼルエンジン筒内におけるPM生成挙動に関する研究	古川　伸哉	㈱いすゞ中央研究所
9/9～ 9/12	（一社）日本機械学会 年次大会 エンジンシステム部門ワークショップ	ディーゼルエンジンの振動騒音現象について	小澤　恒	㈱いすゞ中央研究所
9/27	（一社）日本機械学会 進歩的なパワートレインを支えるトライボロジー研究分科会	ディーゼルエンジン技術とエンジン油について	星野　崇	車両審査実験第二部
10/13	（公社）日本鋳造工学会 第172回全国講演大会	アルミニウム合金鋳物のT5処理における時効挙動に及ぼす冷却速度の影響	竹中　俊夫 池谷　拓哉 茂泉　健	IM推進部 〃 〃
10/17	カイザースロウテルン大学 Methane als Kraststoff fuer Nutzfahrzeuge (Methane fuel for Commercial vehicle)	CH4 fuel in Japanese transport sector	貴志　彰仁	NGV企画・設計部
10/29	九州大学 黒河研究室講演会	自動車用変速機の技術の変遷	古賀　英隆	駆動商品企画・設計部
11/5	（公社）自動車技術会 大気環境技術・評価部門委員会 自動車排出微粒子の評価手法の基礎と実践	粒子状物質の生態影響	柴田　慶子	㈱いすゞ中央研究所
11/15	アルテアエンジニアリング㈱ ATCx e-モビリティ	小型トラックを対象としたフルビークル電磁波解析の事例紹介	上田　威一郎 花岡　雄二 村井　信之	CAEデジタル開発推進部 〃 〃
11/22	日本ねじ研究協会 第1回ねじ研究シンポジウム	プリベリングトルク形ナットのねじ込みトルクに関する一考察	来住　健	PT商品企画・設計第一部
11/23	東海大学工学部機械工学科 機械の信頼性	商品開発と信頼性	古賀　英隆	駆動商品企画・設計部

（一社）：一般社団法人
（公社）：公益社団法人
（公財）：公益財団法人

◇投 稿

発表者所属は、発表年月時点である

発表月	発表先(掲載誌)	表題	発表者	所属
2018/1	American Foundry Society International Journal of Metalcasting 1-12	Study on Fatigue Design Method of an Engine Component Produced by Flake Graphite Cast Iron for Different Loading Modes and Mean Stresses.	白土　清 宮下 幸雄 西水 貴洋 高橋　浩平 衛藤　洋仁 新矢　伸昭 蛭川　耕二	PT商品企画・設計第三部 長岡技術科学大学 〃 PT商品企画・設計第三部 車両審査実験第二部 CAEデジタル開発推進部 PT商品企画・設計第三部
2018/3	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.2	エンジン構造用鋳鉄材料の疲労強度 に及ぼす黒鉛形状と基地組織の影響	白土　清 宮下　幸雄 斉藤　大翔 西水　貴洋 加藤　洋祐 衛藤　洋仁 新矢　伸昭 相田　眞宏	PT商品企画・設計第三部 長岡技術科学大学 〃 〃 〃 車両審査実験第二部 CAEデジタル開発推進部 車両審査実験第二部
2018/4	SAE International Technical Papers 2018-01-0346	Improvement in Selective Catalytic Reduction Model Accuracy for Predicting NOx Conversion at High Temperature	岡　耕平 大堀　鉄平 板垣　裕 大角　和生 石川　直也 土橋　優貴 和光　栄治	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 エンジン実験第一部 〃
2018/5	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.3	アンモニアスリップ触媒のプラントモ デル構築検討 ー貴金属合金触媒でのアンモニア酸 化過程のモデル化ー	大堀　鉄平 岡　耕平 藤井　謙治 大角　和生 板垣　裕 石川 直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃
2018/6	2018 International Conference on Material Strength and Applied Mechanics IOP Conference Series: Materials Science and Engineering No.372	Influence of crack-like surface defects on the fatigue limit of nitrocarburized carbon steel	山田　明徳 衛藤　洋仁 紺屋　純 高橋　宏治	車両審査実験第二部 〃 横浜国立大学 〃
2018/6	人間ー生活環境系学会 人間ー生活環境系学会英文誌 20巻, 1号	Study on the quantitative evaluation method of SVOC in a vehicle cabin using the passive method.	達 晃一 内藤 敏幸 徳村 雅弘 星野 邦広 岩崎 貴普 神野 透人 臼井 信介 長尾 祥大	㈱いすゞ中央研究所 〃 静岡県立大学 日本カノマックス㈱ ジーエルサイエンス㈱ 名城大学 ㈱カネカテクノリサーチ エスペック㈱
2018/6	㈱技術情報協会 MATERIALSTAGE 2018年6月号	車室内空気成分に対する自動車メー カーの取り組み	達　晃一	㈱いすゞ中央研究所
2018/7	(公社) 自動車技術会 自動車技術 Vol.72, No.7	自動車の快適な室内環境	松永　和彦	品質技術センター
2018/7	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.4	商用車用高効率低排出ガスディーゼ ルエンジンの研究 ー小容量ターボチャージャと吸気弁遅 閉じを組合わせた過給コンセプトー	大橋　伸匡 新田　淳一郎 榎　和広 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃
2018/9	(公社) 自動車技術会 自動車技術 Vol.72, No.9	商用車用天然ガスエンジンについて	原　裕一 貴志　彰仁	NGV企画・設計部 〃

発表月	発表先(掲載誌)	表題	発表者	所属
2018/9	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.5	ディーゼルエンジン筒内におけるPM生成挙動に関する研究 (第1報) ー筒内ガス全量サンプリングとGCMSおよび炭素分析によるPM生成過程の把握ー	古川　伸哉 鈴木　浩高 柴田　慶子 齋藤　大晃 石井　義範 島﨑　直基	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 〃 〃
2018/9	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.5	ディーゼルエンジン筒内におけるPM生成挙動に関する研究 (第2報) ーエンジンCFDへの詳細化学反応計算適用によるPM生成過程の解析ー	齋藤　大晃 古川　伸哉 石井　義範 島﨑　直基 石井　一洋	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃 横浜国立大学
2018/9	Inderscience Enterprises Ltd. International Jounal of AutoMotive Composites Vol.4, No.1	Fracture simulation of an FRP tube with continuous random fibres at the initial stage	小池　朝夫 秋田　麗佳 横山　敦士	㈱いすゞ中央研究所 伊藤忠テクノソリューションズ㈱ 京都工芸繊維大学
2018/11	(公社) 自動車技術会 自動車技術 Vol.72, No.11	商用車におけるアルミニウム合金の応用	八木　三哉 海老原　峻義	車両審査実験第二部 〃
2018/11	(公社) 自動車技術会 自動車技術会論文集 Vol.49, No.6	Diesel Particulate Filterに堆積したAshの構造解析	米山　香澄 中村　圭介 大角　和生 石川　直也	㈱いすゞ中央研究所 〃 〃 〃
2018/12	(公社) 自動車技術会 自動車技術 Vol.72, No.12	新型ノンステップ路線バスERGAの開発	髙木　正一 山倉　浩介	バス商品企画・設計部 ジェイ・バス㈱
2018/12	日本工業出版㈱ クリーンエネルギー Vol.27, No.12	日本初の大型LNGトラックの公道走行実証	鹿内　和憲 鳥居　芳樹 山本　広介 植木　繁 小林　雅行	NGV企画・設計部 法規・認証部 シェルジャパン㈱ 環境優良車普及機構 〃
2018/12	(公社) 日本鋳造工学会 鋳造工学 Vol.90, No.12	鋳物における鋳造後の冷却条件がT5処理時の時効挙動に及ぼす影響	竹中　俊夫 池谷　拓哉 茂泉　健	IM推進部 〃 〃

編　集　委　員

（2019年9月30日現在）

〈編集委員長〉

志賀　正樹　（開発技術企画部）

〈編集委員〉

谷山　由和　（産業エンジン開発部）
山之内　大介　（CAEデジタル開発推進部）
椎貝　竜二　（ASシステム開発部）
高城　豊　（デザインセンター）
岡本　壮史　（駆動商品企画・設計部）
児玉　裕　（NGV企画・設計部）
末永　一啓　（PT商品企画・設計第三部）
湯本　淳　（車両設計第二部）
河野　直樹　（PT商品企画・設計第二部）
大沼　潤一　（エンジン実験第一部）
小峰　保　（エンジン実験第二部）
柿沼　勉　（xEVシステム開発部）
池本　史朗　（バス商品企画・設計部）
甲斐　崇　（グローバルCV商品企画・設計部）
松澤　悟　（PT商品企画・設計第一部）
川島　行生　（シャシ設計第一部）
平田　将之　（シャシ設計第二部）
森　瑞樹　（車両設計第三部）
幾竹　弘志　（エンジン装置設計部）
佐藤　秀光　（大型商品企画・設計部）
小林　一彦　（電装・制御開発部）
高松　勇太　（小型・中型商品企画・設計部）
山口　英昭　（LCV商品企画・設計部）
高野　二郎　（車両審査実験第一部）
高橋　創一　（車両審査実験第二部）
坂尾　和也　（PT電子制御開発部）
南　健司　（車両技術部）
藤井　理恵　（(株) いすゞ中央研究所）
鈴木　章一郎　（いすゞエンジニアリング（株））

〈事務局〉

板垣　正二　（開発技術企画部）
渋谷　弘之　（開発技術企画部）
小林　桂太　（開発技術企画部）
岸本　智美　（開発技術企画部）
蛭川　正敏　（開発技術企画部）
飯田　陽平　（開発技術企画部）

編　集　後　記

元号が「令和」になって最初に発行するいすゞ技報131号は表紙をリニューアルし，8年ぶりのフルモデルチェンジとなる「新型ISUZU D-MAX」と「18型エルフの導入技術」をそれぞれ「特集」「小特集」として組みました。

D-MAXはワールドワイドピックアップトラックとして世界100ヵ国以上に展開されており，いすゞが力を入れて開発している車両の一つです。今回，“Efficient and Robust”をコンセプトとし，燃費性能と安全性を高めつつ，多様な使用環境とさまざまな使い方に対応できるポテンシャルの高い車になりました。本年10月11日，タイでの発表会では総勢約2700名の来場者の熱気に包まれ，大型モニタによる映像，ダンス，そしてワイヤアクションを用いた大規模な演出で会場が盛り上がりました。

一方，いすゞの主力車種である小型トラックエルフは2019年で60周年を迎え，同年11月に特定非営利活動法人日本自動車殿堂にて1959年に誕生した初代エルフTL151型が歴史遺産車として殿堂入りを果たしました。また，いすゞプラザでは5月から60周年記念企画展を開催中です。長年に亘り技術を培ってきた新しい18型エルフは，130号に引き続き本号でも紹介しております。

そのほか論文・報告記事の中では，「LNGトラック」「隊列走行」などの話題も取り上げております。いすゞはさまざまな研究開発に取り組んでおりますので，今後の成果にご期待ください。

いすゞ自動車は，「既存事業の深化」と「次世代に向けた新化」を基本方針として開発をしています。本号でもその一端を紹介しましたが，これまでの技術をベースとして更なる成長を目指し，将来へ向けて取り組んでおり，今後も引き続きいすゞ技報で取り上げて参ります。

この度，本誌の発行にご協力いただきました編集委員並びに執筆者の方々に感謝の意を表します。また，特集記事のご担当の方々におかれましては，本号で旬な情報をお届けするために短期間で執筆していただき，無事年内の発行に至りましたことを重ねて御礼申し上げます。

（蛭川　正敏：いすゞ技報編集事務局）

表紙について

今回の表紙は，8年ぶりにフルモデルチェンジを果たした新型ISUZU D-MAXです。いすゞの主力製品の一つとして世界100ヵ国以上で販売され，多くの好評を得ているワールドワイドピックアップトラックです。

なお，今号から表紙デザインのフォーマットも一新しています。自動車産業にとって100年に一度の環境変化が訪れると言われる2020年代に向け，今後もいすゞの技術の進化にご注目下さい。

（杉浦　康：デザインセンター）

いすゞ技報　第131号

2019年12月19日　発行

編集兼発行人　志賀正樹

発　行　いすゞ自動車株式会社
〒140-8722
東京都品川区南大井6丁目26番1号

発行所　いすゞ自動車株式会社 開発技術企画部
〒252-0881
神奈川県藤沢市土棚8番地
電話0466(45)2601

印刷所　株式会社　ホクシン
〒211-0021
神奈川県川崎市中原区木月住吉町22-3
電話044(433)3251(代表)

©2019　いすゞ自動車株式会社（禁無断転載）

ISUZU

TOYO INK

non VOC

いすゞ自動車株式会社