

高周波焼入れされたシャフトの残留応力分布特性に 及ぼす諸因子の影響に関する数値解析的検討

Numerical Studies on Effects of Various Factors on Residual Stress Distribution Characteristics
in Induction Hardened Shafts

山田 明德*
Yoshitomi Yamada

大藪 友希**
Tomoki Oyabu

岡野 成威**
Shigetaka Okano

望月 正人**
Masahito Mochizuki

要 旨

本研究では、高周波焼入れ時の相変態を考慮した硬さ及び残留応力分布の数値解析モデルを構築し、高周波焼入れを施したシャフトの硬さ及び残留応力の分布を推定した。更に、さまざまな条件下での高周波焼入れの数値シミュレーションにより、硬化層深さと残留応力分布との関係について評価を行った。

Abstract

We constructed a numerical analysis model of hardness and residual stress distribution considering phase transformation during quenching. Using the model, we estimated distributions of hardness and residual stress in the induction hardened shaft. The accuracy of the model was confirmed by comparison with the experimental data. Moreover, through the numerical simulations of induction hardening under various conditions, we also considered the relationship between the case depth and the residual stress distribution.

1 はじめに

自動車に使用されるアクスルシャフトには高周波焼入れによる表面熱処理が施されているため、表面の硬度が上昇することに加え、表面に圧縮残留応力が生じることで、部材の疲労強度を向上させることができる⁽¹⁾。

アクスルシャフトは高周波焼入れにより、外周部のみが高温まで加熱されたあとに急冷されることでマルテンサイト変態が生じ、その変態膨張が拘束されることでアクスルシャフト表面には圧縮残留応力が生じる。一方で、アクスルシャフト内部は外周部に比べて温度上昇残留応力が生じる。そのため、引張残留応力が大きくなる施工条件では焼割れが発生する恐れがあり、高周波焼入れ後のシャフト内部における残留応力分布も詳細に把握し、適切な施工条件を設定することが製品の品質を確保するうえで重要といえる。しかしながら、高周波焼入れにより生じる残留応力分布の影響因子に関する系統的な検討は必ずしも多くないため、シャフト内部における残留応力分布特性に諸因子が及ぼす影響について整理することができれば、シャフトの品質確保の観点から有意義であると考えられる。特に、高周波焼入れの施工条件は、主として硬さや硬化層深さを目安に設定されるため、硬さ分布と残留応力分布の関係を明らかにすることができれば、焼割れ防止に向

けた施工条件の適正化に有用となることが期待される。

そこで本研究では、数値シミュレーションを活用し、高周波焼入れが施されたシャフトの残留応力分布について系統的な検討を行った。まず、焼入れと焼戻し時に生じる相変態と塑性現象を考慮した硬さ分布と残留応力分布の数値シミュレーションモデルを構築し、シャフトの高周波焼入れと焼戻しを模擬した数値解析で得られた結果を実測結果と比較することで、モデルの有用性について検証した。そのうえで、残留応力分布特性には高周波焼入れ条件が大きな影響を及ぼすことから、シャフト寸法、加熱条件、冷却条件をそれぞれ変化させた条件で高周波焼入れシミュレーションを行い、焼入れ深さとの関係に着目した残留応力分布特性の系統的な評価を試みた。

2 相変態と塑性現象を考慮した数値シミュレーションモデルの概要

2.1 焼入れ時の相分率の計算方法

高周波焼入れは、鋼材の表面のみを急速に加熱したあとに急冷する熱処理手法であり、外周部のみ高温まで加熱されることで相変態が生じる。一方、中心部は外周部に比べて温度が上昇しないため、組織は変化しない。そこで本モデルでは、最高到達温度や冷却速度に基づいて相分率を予測した。ただし、一般的に焼入

* 車両審査実験第二部

** 大阪大学大学院

れは高温の鋼材を急冷する熱処理であるため、徐冷のような冷却速度が遅い場合は想定せず、マルテンサイト(M)とベイナイト(Zw)が生成する場合のみを考えた。また、初期組織はパーライト(p)と仮定した。

加熱過程では、最高到達温度に応じてオーステナイト(A)に変態する割合を求めた。変態中のオーステナイトの変態率の計算には式(1)を用いた⁽²⁾。

$$\xi_{\gamma} = 1 - \exp \left\{ -4 \left(\frac{T - A_{c1}}{A_{c3} - A_{c1}} \right) \right\} \quad (1)$$

ただし、 ξ_{γ} はオーステナイト変態中の温度 T でのオーステナイトの変態率、 A_{c1} と A_{c3} はオーステナイト変態開始及び終了温度である。

冷却過程では、冷却速度に応じてオーステナイトがマルテンサイトまたはベイナイトに変態する。冷却速度の計算には、式(2)に示すニュートンの冷却則に基づいて A_{c3} 点から 500°C に冷却するのに要する時間 t を概算した。

$$T = A \exp(-Kt) + T_0 \quad (2)$$

ただし、 A 、 K は定数、 T_0 は室温である。本研究で対象とする材料である機械構造用合金鋼SMnV440を用いてフォーモスタ試験を行った試験片の冷却完了時の硬さ、及びCCT図(連続冷却変態線図: Continuous Cooling Transformation diagram)より作成した冷却完了時の各組織の相分率を図1に示す。本図を用いて、 A_{c3} (839°C)点から 500°C に冷却するのに要する時間の概算値から求められる相分率に、オーステナイト変態した割合を乗じることでマルテンサイトとベイナイトが生じる割合をそれぞれ求めた。

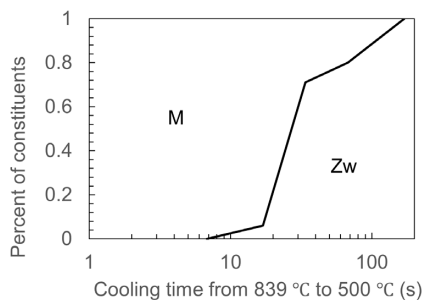


図1 冷却時間に対する各組織相の相分率

冷却過程での各相変態中の変態率を求めるにあたり、マルテンサイト変態は無拡散変態であるため、式(3)で表されるKoistinen-Marburger⁽³⁾の式を用いた。

$$\xi_M = 1 - \exp\{-0.011(Ms - T)\} \quad (3)$$

ただし、 ξ_M はマルテンサイト変態の変態率、 Ms はマルテンサイト変態開始温度である。また、ベイナイト変態は拡散変態であるとして式(4)に示すJohnson-Mehl⁽⁴⁾の式を用いた。

$$\xi_{Zw} = 1 - \exp\{-k(t - t_{Zw})^4\} \quad (4)$$

ただし、 ξ_{Zw} はベイナイト変態の変態率、 k は定数、 t_{Zw} はベイナイト変態開始温度に到達した時間である。

2.2 組織変化に伴う材料特性の設定方法

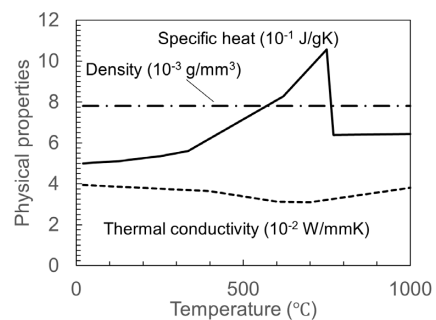
本モデルでは、あらかじめ組織ごとに材料特性を設定しておき、温度履歴に基づいて計算した相分率に応じて、混合則を用いて材料特性を変化させることで最終的に残留応力を計算した。文献値や実測データなどを参考に、各組織の物理的特性を図2に、機械的性質を図3に示すように設定した。寺崎らの文献⁽⁵⁾を参考に、変態潜熱は比熱として模擬した。密度及びポアソン比は、温度と相変態による変化は小さいと考え、一定とした。

マルテンサイトのヤング率と線膨張係数はパーライト及びベイナイトと同様とし、降伏応力は $1,200\text{MPa}$ 、加工硬化率は 60GPa で温度依存性を考慮せず一定の値を用いた。変態ひずみ量は、オーステナイト変態で 0.0025 、マルテンサイト変態で 0.0070 、ベイナイト変態で 0.0036 としており、各組織の相分率の変化量との積を熱ひずみに加算することで模擬している。変態塑性ひずみ⁽⁶⁾に関しては、式(5)で示される変態塑性ひずみ増分 ε_{ij}^{tp} を熱ひずみに加算することで模擬した。

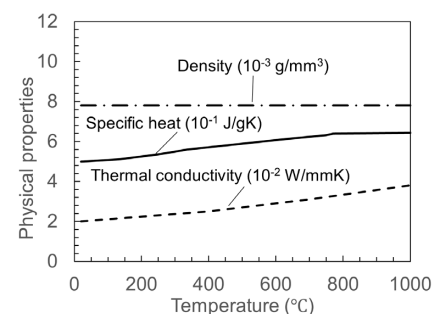
$$\varepsilon_{ij}^{tp} = 3K(1 - \xi)\xi s_{ij} \quad (5)$$

ただし、 K は変態塑性係数、 ξ は新相の相分率、 s_{ij} は偏差応力である。

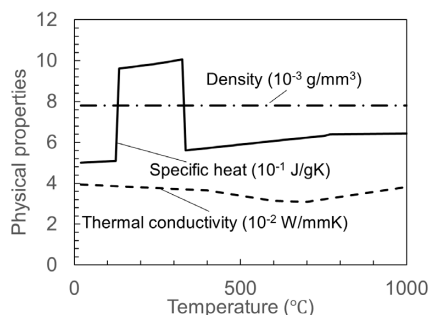
焼戻し時には、マルテンサイトが体積収縮することに加えて、塑性現象が生じることを考慮に入れた。体積収縮によるひずみ変化量は 0.0002 とした⁽⁷⁾。



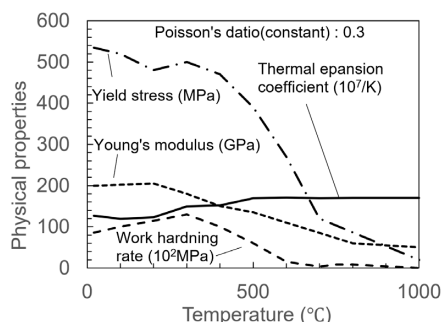
(a) パーライト及びベイナイト



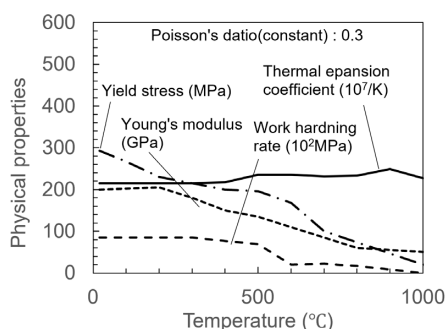
(b) オーステナイト



(c) マルテンサイト
図2 物理的性質



(a) パーライト及びベイナイト



(b) オーステナイト
図3 機械的特性

焼戻し時の塑性現象に関しては、変態塑性ひずみの構成式をもとに山崎⁽⁸⁾が考案した焼戻し塑性の構成式を用いて、焼戻し時の温度-ひずみの関係を再現していることから、低温焼戻しを想定して変更した式(6)を用いて焼戻しによる塑性ひずみ $\varepsilon_{ij}^{\text{temper}}$ を与えた。

$$\varepsilon_{ij}^{\text{temper}} = 3K_c s_{ij} \int_0^{\xi_c^{160}} (1 - \xi_c) d\xi_c \quad (6)$$

ただし、 K_c は定数、 s_{ij} は偏差応力、 ξ_c は焼戻し温度500℃で1.0となるように正規化して表した炭化物の体積分率であり、 ξ_c^{160} は0.13とした。

3 高周波焼入れシミュレーションの有用性検証

3.1 数値解析条件

高周波焼入れシミュレーションの有用性検証のために、まず、表1に示す条件で高周波焼入れと低温焼戻しを施したシャフトに対してビッカース硬さ試験と組織観察、中性子回折法とコンター法による残留応力測定を行った。そして、シャフトの高周波焼入れ焼戻しを模擬した数値解析を行い、得られた硬さ分布と残留応力分布を実測結果と比較することで、その有用性について検討した。

表1 高周波焼入れ焼戻し条件

Coil output power (kW)	330
Coil moving speed (mm/s)	7
Coil axial length (mm)	10
Quenching liquid flow rate (L/min)	200
Frequency (kHz)	3
Distance between coil and cooling start position (mm)	50
Tempering temperature (°C)	160
Tempering time (hr)	1

本検討で用いた数値解析モデルを図4に示す。実験に用いた試験片と同寸法である直径55mm、軸長200mmの円柱形状のモデルに対して、外周部から11.5mm、軸方向に10mmの領域に物体熱流束を与え、この領域を軸方向端部から7mm/sで移動させることで高周波焼入れによる加熱を模擬した。また、雰囲気温度を20℃とし、表面からの熱損失として、空気との熱伝達とステファン・ボルツマン則に従う熱放射を考慮しており、熱源通過後の熱伝達率を $2.5 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \text{ K}$ から $1.0 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^2 \text{ K}$ に変更することで加熱後の冷却液の噴射による冷却を模擬した。また、境界条件として、図4に示すようにモデルが移動・回転しないように拘束している。焼戻しは、表面熱伝達における雰囲気温度を160℃として1時間経過後に雰囲気温度を20℃とすることでモデルを加熱・冷却し、160℃で1時間保持した焼戻しを模擬した。

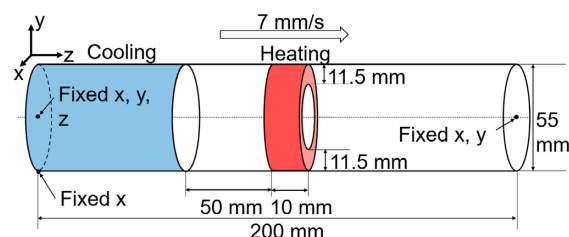


図4 高周波焼入れの数値解析における加熱領域及び冷却領域

3.2 数値解析結果

熱伝導解析によって得られた軸方向中央断面の最高到達温度分布を図5に示す。外周部のみが1,000℃以上の高温に加熱されており、高周波焼入れによる加熱を模擬できていることが確認できる。続いて、径方向の各組織の相分率を図6に示す。中心から16mmの位置までは相変態は生じておらず、それより表面側の領域で組織の変化が生じており、表面に近づくにつれてマルテンサイトの割合が大きくなっていることが確認できる。得られた組織分布をもとに、焼入れ後のマルテンサイトを690HV、焼戻し後のマルテンサイトを660HV、ベイナイトを320HV、パーライト280HVとして混合則に基づいて推定した硬さ分布をビッカース硬さ試験で測定した結果と併せて図7に示す。数値解析で得られた硬さ分布は実測結果とよく一致しており、本手法は高周波焼入れと焼戻しによる組織の変化とそれに伴う硬さの変化を求めるうえで有用であると考えられる。

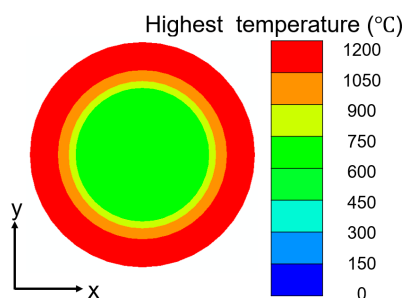


図5 最高温度分布

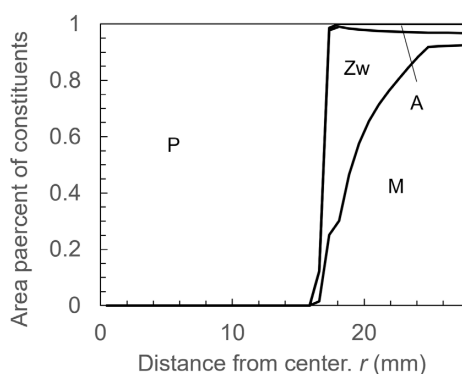


図6 径方向組織の相分率

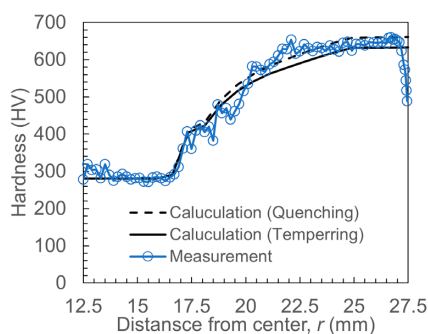


図7 計算結果と測定結果の硬さ分布比較

熱弾塑性解析で得られた軸方向中央断面における高周波焼入れとそのあとの焼戻しで生じた軸方向残留応力のコンター図を図8(a),(b)にそれぞれ示す。外周部では圧縮残留応力、内部では引張残留応力が生じており、一般的に知られている高周波焼入れにより円柱部材に生じる軸方向残留応力分布⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と一致している。また、高周波焼入れ後に生じる残留応力は焼戻しにより少し緩和されており、一般的な焼戻しによる応力の変化傾向⁽⁷⁾と同様であることが確認できる。続いて、残留応力の径方向分布を実測結果とともに図9に示す。周方向残留応力は、軸方向と同様に外周部で圧縮残留応力、内部では引張残留応力が生じる一方で、径方向残留応力は内部で比較的小さな引張残留応力が生じる。いずれの方向においても焼戻し後に生じる残留応力の数値解析結果は、中性子回折法やコンター法で測定した残留応力分布と引張残留応力の最大値やその位置がおおむね一致しており、本手法はシャフトの高周波焼入れと焼戻しによる残留応力分布を求めるうえで比較的良好な精度を有していると考えられる。焼戻しにより残留応力は緩和されるものの、分布形状や引張残留応力が最大となる位置には変化がないため、シャフトの残留応力分布特性は高周波焼入れによる影響がより支配的であると考えられる。そこで次章では、種々の焼入れ条件を設定し、得られた数値解析結果から高周波焼入れにより生じる残留応力分布特性の系統的な評価を試みた。

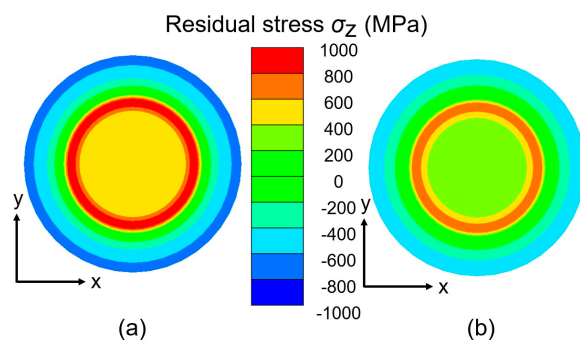
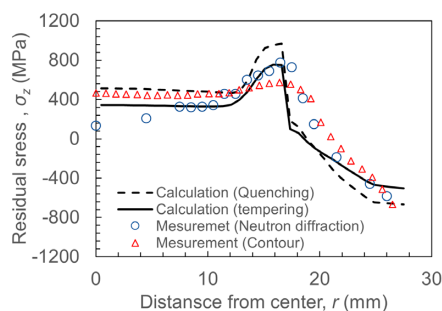
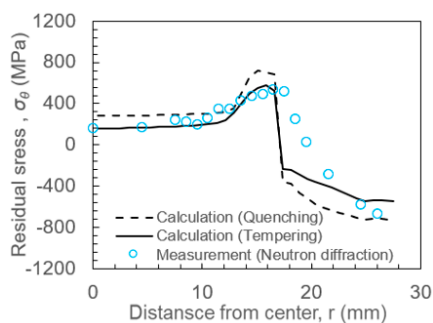


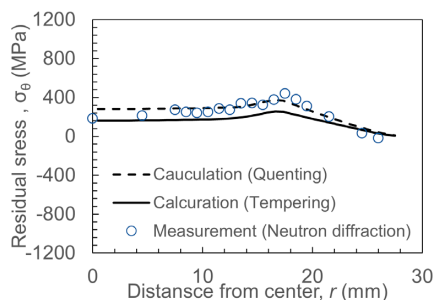
図8 高周波焼入れ焼戻し後における軸方向の残留応力分布



(a) 軸方向残留応力分布



(b) 周方向残留応力分布



(c) 径方向残留応力分布

図9 計算値と計測値による残留応力分布比較

4 残留応力分布特性に及ぼす諸因子の影響の系統的評価数値

4.1 解析条件

シャフト寸法、加熱条件、冷却条件をそれぞれ変化した条件で高周波焼入れシミュレーションを行った。表2に示すように、実製品のアクスルシャフトの寸法に基づき直径 $2R$ が45mmと55mmの2条件を設定した。加熱条件は周波数の変化による加熱領域の変化を想定し加熱深さ δ (mm)を直径に応じて変化させた各3条件を、冷却条件は冷却液の噴射量や冷却液の種類による冷却能の変化を想定して熱伝達率 h (W/mm²K)が 1.0×10^{-3} W/mm²Kと 2.5×10^{-3} W/mm²Kの2条件を設定し、計12条件で検討した。

表2 数値解析条件

Condition	$2R$ (mm)	δ (mm)	h (W/mm ² K)
1	45	7.5	1.0×10^{-3}
2			2.5×10^{-3}
3		8.5	1.0×10^{-3}
4			2.5×10^{-3}
5		9.5	1.0×10^{-3}
6			2.5×10^{-3}
7	55	9.5	1.0×10^{-3}
8			2.5×10^{-3}
9		11.5	1.0×10^{-3}
10			2.5×10^{-3}
11		13.5	1.0×10^{-3}
12			2.5×10^{-3}

4.2 解析結果及び焼入れ深さとの関係に着目した残留応力分布特性の考察

3章で得られた高周波焼入れ後の残留応力分布と硬さ分布を図10に示す。軸方向残留応力がおよそ0MPaとなる位置と硬さが400HVとなる有効硬化層深さはおおむね一致した。これより、JIS規格⁽¹¹⁾で規定された限界硬さより硬度が上昇した外周部の硬化層では圧縮残留応力、硬度が低い内部では引張残留応力が生じると推察される。なお、この位置では図6よりマルテンサイトが50%程度生じた。一方で、硬さが母材硬さから変化し始める全硬化層深さの位置近傍で引張残留応力が最大となった。この位置では相変態が生じておらず、局所的に引張残留応力が生じるのは加熱過程で生じた圧縮塑性ひずみの影響であると考えられる⁽¹²⁾。ここで、各条件で得られた全硬化層深さ d と半径 R の比 d/R と引張残留応力が最大となる径方向位置 r_1 の関係を図11に示す。ただし、 d は表面から硬さが母材硬さから変化し始める位置までの距離である。いずれの条件においても全硬化層深さの位置と引張残留応力が最大となる位置がおおむね一致したことが確認できる。これより、硬化層深さが大きくなることで引張残留応力が最大となる位置はより中心側に生じるといえる。

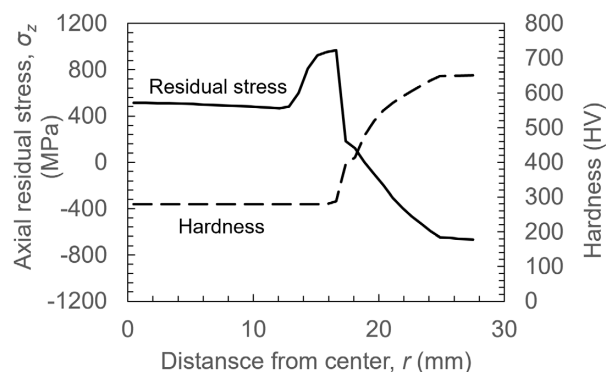


図10 半径方向の硬さ及び残留応力分布

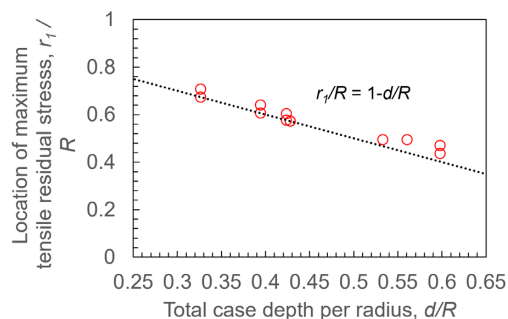


図11 全硬化層深さと最大引張残留応力の関係

図12(a),(b)に代表的な2種類の軸方向残留応力分布を示す。図12(a)に着目すると、中心にかけて引張応力が減少する分布傾向と、図12(b)に示すように、中心で最大値に近い引張残留応力が生じる分布傾向の2種類があることがわかる。この分布形状の変化に硬化層深さが及ぼす影響を評価するため、中心($r=0\text{mm}$)での残留応力と引張残留応力の最大値を全硬化層深さと半径の比 d/R で整理した結果を図13に示す。硬化層深さが大きくなることで、中心で生じる引張残留応力が大きくなる傾向が確認できる。これは、有効硬化層深さが大きくなることで、圧縮残留応力が生じる領域が広がる一方、引張残留応力が生じる領域は減少することから、自己平衡により中心部で生じる引張残留応力が大きくなると考えられる。また、全硬化層深さと半径の比 d/R が0.35程度では引張残留応力の最大値と中心での残留応力の差は大きい。全硬化層深さと半径の比 d/R がおよそ0.50から0.55程度で急激に減少していることがわかる。これより、残留応力の分布形状が変化する閾値(しきいち)は全硬化層深さと半径の比 d/R が0.50から0.55程度であると考えられる。適正な高周波焼入れ条件を選定するうえで、有効硬化層深さを目安にされることが多い^{(13) (14)}が、内部の残留応力分布(分布形状と大きな引張残留応力が生じる位置)を把握するには、全硬化層深さに着目することが重要であることが示唆された。

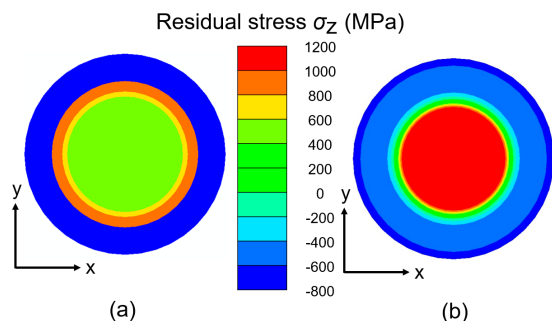
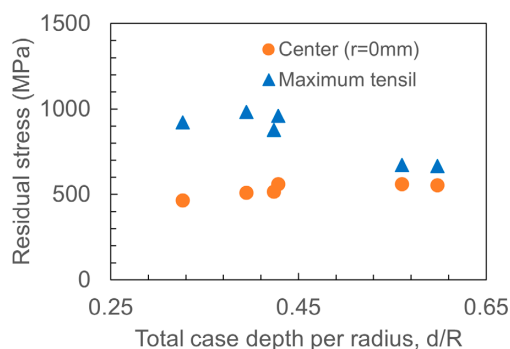
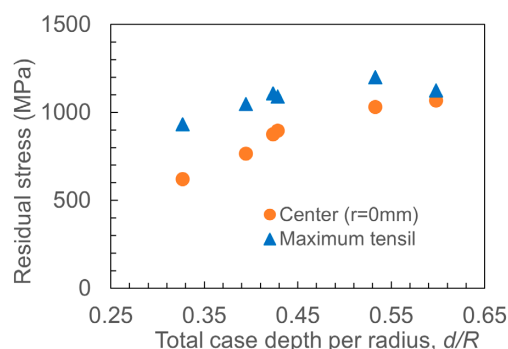


図12 代表的な2種類の軸方向残留応力分布



(a) $h = 1.0 \times 10^{-3} \text{ (W/mm}^2\text{K)}$



(b) $h = 2.5 \times 10^{-3} \text{ (W/mm}^2\text{K)}$

図13 全硬化層深さ変化に伴う最大引張残留応力と中心部残留応力の関係

5 おわりに

本報では、焼入れと焼戻し時に生じる相変態や塑性現象を考慮した硬さ及び残留応力の数値シミュレーションモデルを構築し、高周波焼入れとそのあとの焼戻しを模擬した数値解析の結果を実測結果と比較することで、その有用性について検証した。そのうえで、シャフト寸法、加熱条件、冷却条件をそれぞれ変化した条件で高周波焼入れシミュレーションを行い、硬化層深さとの関係に着目して残留応力分布特性について考察した。得られた結論を次に示す。

- (1) シャフトの高周波焼入れと焼戻しを模擬した数値解析で得られた硬さ及び残留応力分布は実測結果と良好に一致していたことから、構築した数値シミュレーションモデルは、シャフトの高周波焼入れと焼戻しに伴う硬さ分布と残留応力分布を求めるうえで比較的良好な精度を有していることが示された。
- (2) 軸方向残留応力が0MPaとなる半径方向位置は有効硬化層深さの位置と、引張残留応力が最大となる位置は全硬化層深さの位置とおおむね一致することが示唆された。
- (3) 全硬化層深さと半径の比で中心の引張残留応力と引張残留応力の最大値を整理すると、残留応力の分布形状が変化するおよその閾値が0.50から0.55程度であることが示唆され、全硬化層深さに着目することで内部の残留応力分布の形状が把握できる可能性を示した。

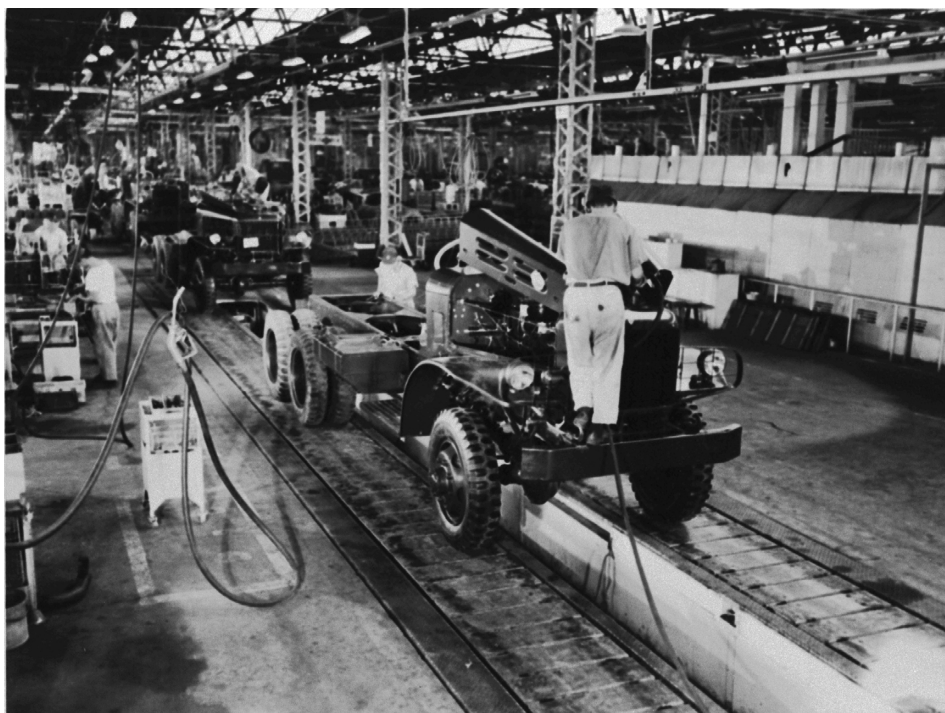
本文献は自動車技術会論文集2024年55巻1号に掲載された論文を加筆修正のうえ報告したものである。

参考文献

- (1) 林建吉 ほか：材料, Vol. 18, No. 195, (1969), pp. 1100-1105

- (2) 岡村一男：材料, Vol. 55, No. 5, (2006), pp. 529-535
- (3) D. P. Koistinen et al. : Acta Metallurgica, Vol. 7, (1959), pp. 59-60
- (4) W. A. Johnson et al. : Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol. 135, (1939), pp. 416-442
- (5) 寺崎俊夫 ほか：日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 2, (2005), pp. 169-177
- (6) 井上達雄：材料, Vol. 64, No. 4, (2015), pp. 247-257
- (7) 上田英明 ほか： M&M 材料力学カンファレンス, Vol. 2015, (2015), GS0306-469
- (8) 山崎陽介：大阪大学博士論文, (2020)
- (9) 小田哲 ほか：日本機械学会論文集C編, Vol. 60, No. 573, (1994), pp. 1856-1861
- (10) 渋谷剛広 ほか：材料力学部門講演会論文集, Vol. 2003, (2003), pp. 377-378
- (11) 日本産業規格：JIS G 0202 鉄鋼用語(試験)
- (12) 槇本哲平 ほか：自動車技術会論文集, Vol. 54, No. 3, (2023), pp. 534-539
- (13) 堀川武 ほか：材料, Vol. 45, No. 4, (1996), pp. 437-442
- (14) 宮近幸逸 ほか：日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 652, (2000), pp. 4080-4086

◇いすゞ歴史の一コマ



川崎総組立ライン(1958年ごろ)