

ダイカスト型における3D冷却設計パラメータが 金型温度へ及ぼす影響

Effect of 3D Cooling Design Parameters on Mold Temperature in Die Casting Mold

千田 修平*
Shuhei Chida

横山 賢介*
Kensuke Yokoyama

正橋 匠*
Takumi Masahashi

要 旨

アルミダイカスト製品の競争力強化に向けたコスト低減施策の一環としてサイクルタイム短縮が必要である。課題達成の新たな工法として金属3Dプリンタを用いた3次元的な金型内冷却の活用を開始した。本稿では、3D冷却設計を最適化及び標準化するために、設計パラメータが金型温度へ及ぼす影響をCAEにより検証した事例を紹介する。

Abstract

It is necessary to shorten the cycle time in order to reduce the cost of aluminum die casting products. Mold 3D cooling using a metal 3D printer is adopted as a new method to achieve the problem. This paper introduces a case in which the effect of design parameters on mold temperature was verified by CAE in order to optimize and standardize 3D cooling design.

1 はじめに

ダイカストは、高温で溶かした合金を高速・高圧で金型内に注入し、短時間で成形・凝固させる casting 工法であり、特にアルミニウム合金を用いた自動車部品の大量生産においては、なくてはならない技術である。いすゞでも自社工場でアルミダイカストによる生産を行っており、脱炭素化及びコスト低減のために高効率生産を目指し、サイクルタイム短縮に取り組んでいる。その中で金型温度起因の不具合対策に苦戦しており、課題解決のために金型温度制御技術の進化が不可欠である。

2 ダイカストのハイサイクル化

2.1 ダイカスト工程概要

ダイカストの工程フローを図1に示す。1サイクルの casting 機動作は、型締め→注湯→射出→製品凝固→型開き→製品取り出し→離型剤スプレー→エアブローであり、これを短時間の内に繰り返し行う。高温で溶かしたアルミニウム合金を金型内に高圧で充填し、金型がアルミニウム合金から膨大な熱量を奪うことで凝固し、製品形状ができあがる。金型を開き、製品を取り出したあとに、金型表面を冷やししながら製品と金型の固着を防止するための離型剤をスプレー塗布し、余分な水分をエアブローで飛ばすことで、次のサイクルの準備をする。この中で製品の品質に最も影響があるのは、

金型温度管理である。図2にサイクルタイムの構成要素割合を示す。金型の冷却に関わる製品凝固及びスプレー・エアブロー時間が工程の約半数を占めることから、金型温度制御及び短時間での冷却が工程設計における最重要課題の一つといえる。

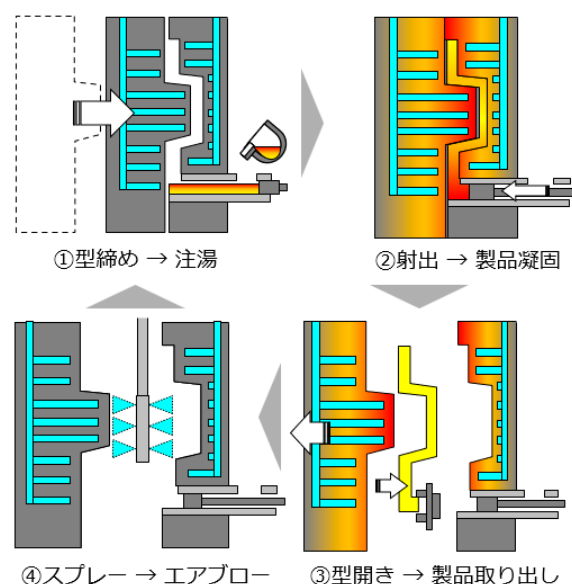


図1 ダイカスト工程フロー

* 要素技術部

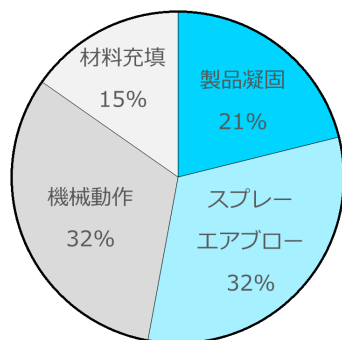


図2 サイクルタイム構成要素割合

2.2 金型冷却機構と型温起因の不具合

金型の温度制御は、図1に示したように金型内に設置される内部冷却回路及び離型剤等の外部冷却によって行われる。特に金型の内部冷却の寄与度が高く、その設計が重要となる。

従来から用いられている金型内部冷却構造を図3に示す。製品形状部の背面側からドリルで直線的に加工した穴の中へ、冷却穴先端付近に冷却管の先端が来るようにインナパイプを設置する。冷却水はパイプの先端から噴射され金型を冷やしパイプの外側から排水側へ流れ循環する仕組みになっており、これをスポット冷却と呼ぶ。金型冷却設計では、CAE(Computer Aided Engineering)解析により高温が予測される部位にスポット冷却を配置し、冷却が不十分な箇所には離型剤スプレーを塗布することで、サイクルタイム中に金型温度を適正に制御する。

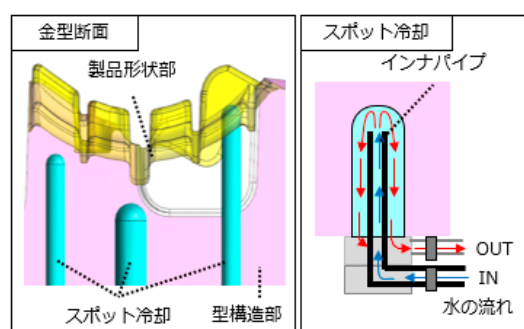


図3 金型内部冷却構造(スポット冷却)図

金型温度が適正でない場合には、製品の品質不具合及び金型の早期損耗の原因になる。中でも、冷却能力が不足して金型表面が高温になった際に、アルミニウム合金が金型と反応し溶着してしまう現象を焼付きと呼ぶ。焼付きの程度が大きくなると強度及び耐圧性の低下等の製品機能を阻害するため、ダイカストマシンの量産稼働を中断させ、焼付き部分を手作業でミガキ落とし、金型表面を正常状態に戻す作業が発生する。これにより日当たりの生産数量が低下してしまうことから、生産性向上に取り組む中で大きな課題である。図4に焼付きが発生している金型の写真を示す。

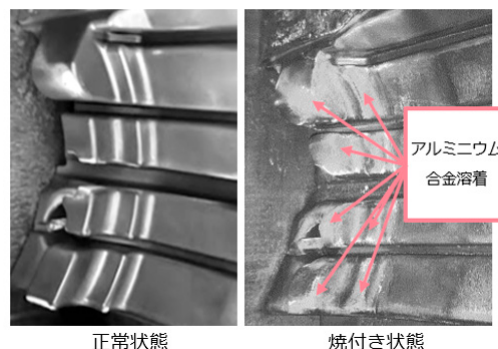


図4 金型表面の焼付き不具合

この焼付き不具合を発生させないために、アルミニウム合金の充填前と離型剤塗布前の金型温度を最適化する必要があるが、生産性向上のためにサイクルタイムを短縮することと、十分に金型を冷却する時間を確保することと相反するため、より短時間で効率的に冷却する手法が求められる。

2.3 金型冷却の課題

スポット冷却は、金型の加工が容易であることに加え、水管内部がさびたりカルキで詰まってしまった場合のメンテナンスが可能であるというメリットがある反面、金型冷却能力においては、次の①～③のような幾つかの課題を抱えている。

- ① ドリルでの機械加工の都合で穴径はある程度の大きさが必要なため、細穴形状はNGであり形状先端部まで冷却経路が届かない。
- ② 金型の構成部品が密集する部分では、部品同士が干渉してしまうことがあり、自由な水管設置ができないことがある。
- ③ パイプ先端からの噴射部分のみ冷却能力が高く、側面部分はさほど冷却効果がないため、冷却が及ぶ範囲が局所的である。図5に、スポット冷却における冷却水の流速と熱伝達率の分布を示す。

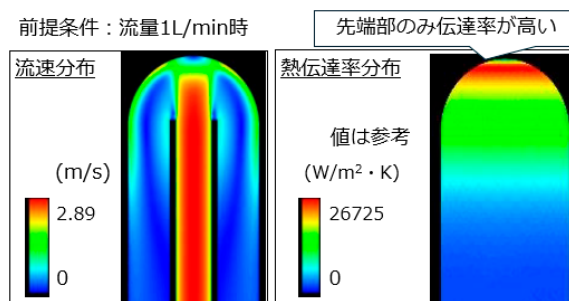


図5 スポット冷却内の流速と熱伝達率分布解析

これらの課題に対し、高熱伝導材料の採用、及び冷却水の流量・圧力アップ、外部スプレー方法の見直しなど種々の対策を行ってきたが、効果は限定的であり、サイクルタイムの更なる短縮効果は得られなかった。

そこで近年注目されている金属3Dプリンタを活用し、3D冷却(金型内冷却)を用いることで、従来不可能だった製品形状に沿った理想的な冷却設計ができるようになり、飛躍的に内部冷却の効率を上げることが可能になった。

3D冷却では、冷却水の出入口さえ設定できれば、金型内部に自由度の高い冷却経路を設計することが可能であるため、冷却不足による焼付き発生箇所へピンポイントでアプローチでき、金型温度に起因する不具合を解消することが可能となる。実際に、図4で示した重度の焼付き発生金型に対して3D冷却を採用した結果、焼付きが大幅に減少しミガキ作業のための稼働停止がゼロになる実績を得た。図6に3D冷却採用による金型温度変化をサーモグラフィで撮像した結果を示す。金型表面温度が120℃低下しており、適正温度へ冷却されたことで、焼付きが発生しない状態で連続生産が可能になった。今回、3D冷却を採用したのは、図6中白破線部分の金型のみだが、3D冷却を金型全体に適用した場合には、冷却所要時間の短縮によりサイクルタイム短縮が可能になった。

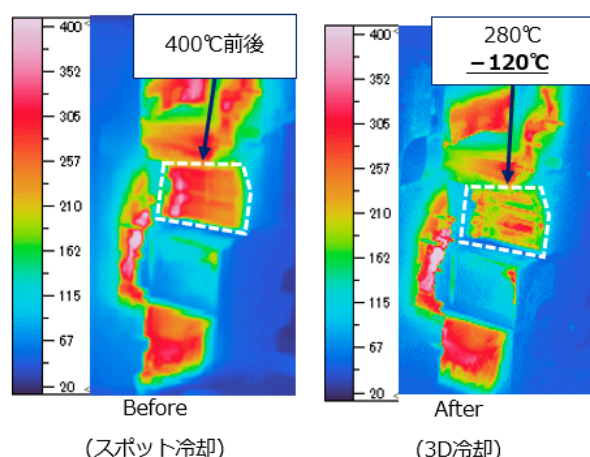


図6 3D冷却採用による金型温度変化

3 金属3Dプリンタによる金型積層造形

金属3Dプリンタによる造形方式には幾つかの種類があるが、3D冷却金型向けには、PBF(レーザー粉末床溶融結合：Powder Bed Fusion)と呼ばれる方式を採用している。これは、平らに敷き詰めた金属粉末上にレーザーを照射して任意部分のみを溶融・凝固させながら積層していくことで、従来の鋼材からの切削加工では実現できない形状を得ることができる。このPBF方式により造形された金型は、約50μmずつ積層することで高精度な冷却回路を配置できるため、金型温度全体の最適化が可能となる。このような造形技術を用いた金型を積層金型と呼ぶ。PBF方式により造形された金型は、模式図を図7に、実際にレーザーが金属粉末上に照射されている様子を図8に示す。また、表1に鋼材が

ら切削する従来の切削金型と積層金型の比較表を示している。

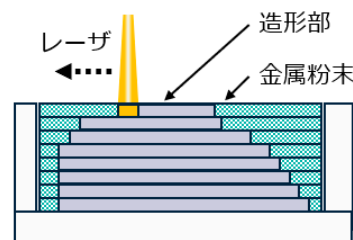


図7 PBF方式の造形模式図

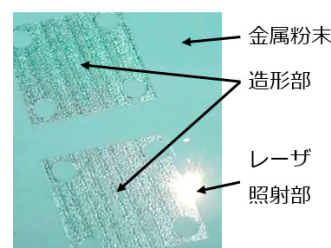


図8 PBF方式による造形の様子

表1 切削金型と積層金型の比較

項目	切削金型	積層金型
冷却効果	△ 先端のみで局所的	◎ 水路全体で抜熱可能
金型製作	○ 汎用加工機 材料鋼材(安)	△ 専用装置 材料粉末(高)
金型寿命	○ 実績多数で安定	△ 早期割れ懸念
設計自由度	× 穴径・配置の制約(多)	○ 出入口以外は自由配置可
設計難易度	○ シンプル 習熟(易)	× 検討要素(多) 工数(大)

一方で、積層金型には幾つかの課題も存在する。まず、微細な金属粉末材料を使用する工法の特徴上、粉末材料が高価であるため、金型製作費が高額になる課題がある。更に、積層内部に微小な欠陥(空隙)の発生及び局所的な溶融・凝固の繰り返しによって内部応力が蓄積されることで、従来の金型と比較して疲労強度が劣るリスクもある。特に、金型表面にヒートクラック(き裂)が発生し、それが金型内部に進展し冷却水管へ到達すると水漏れが発生してしまうため、金型は使用不可となる。そのため、積層金型の割れを発生させないためには、 casting中の熱負荷を最小限に抑えつつ、製品品質を確保できる金型温度範囲内で、低温かつ温度を一定に保つ技術が求められる。積層金型を最大限活用するため、ノウハウ獲得を目的として、PBF方式の3Dプリンタ装置を内製導入し、技術開発への取り組みを開始しているが、本稿ではその内容は割愛する。

4 3D冷却型設計最適化への取り組み

4.1 3D冷却の水管設計

3D冷却は、任意に設定した冷却水の出入り口から、製品形状面に沿った自由水路を設計する。製品形状によって金型各部の温度に差が生じることから、冷やしたい部分は製品形状面に水路をなるべく接近させ、冷やしたくない部分は遠ざけることで、理想の金型温度への均一化を目指す。実際の水管モデル断面図、及び代表的な設計パラメータを図9に示す。3D冷却設計ではこれらを適切に組み合わせることが求められる。

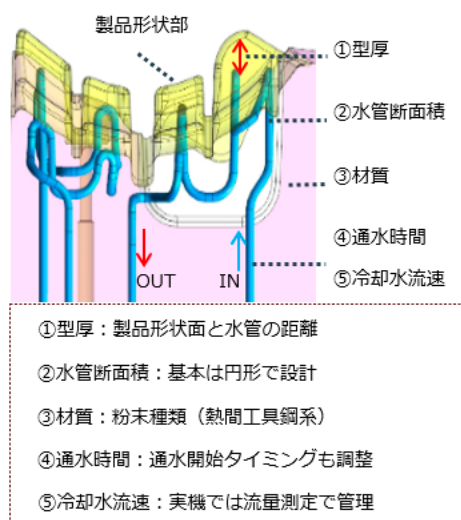


図9 3D冷却モデルと主要設計パラメータ

3D冷却における水管形状は自由だが、円形にすることで、金型割れの起因となる応力集中リスクが軽減される。断面積が一定であれば冷却水の流速変化が抑えられるため、CAE評価の正確性が担保しやすいというメリットがある。この理由から、基本設計は円形断面を採用している。ただし、製品形状部が複雑な場合などは、部分的な凸形状及び扁平な水路形状を設計することも可能である。

3D冷却の設計フロー概要を図10に示す。CAE(使用ソフト：CAPCAST)により、目標金型温度に制御できているかを確認しながら、水管モデリングから金型温度評価を繰り返し行う。3D冷却はスポット冷却と比較して設計自由度が高いため、設計ノウハウがない状態では、目標金型温度を大きく外してしまう懸念、及び水管モデリング標準がない状態では完成までに膨大な時間がかかる可能性が高い。スポット冷却との大きな違いの一つとして、金型からの抜熱能力が高いために、冷却水の出口温度が大幅に上昇し、水管内での沸騰リスクがある。水管内で沸騰してしまうと、狙いの冷却能力が得られないため、最終評価として冷却水の温度を解析し沸騰有無を確認する必要がある。そのため、沸騰の可能性が高いと判断した場合には3D冷却の経路数を増設する必要がある。

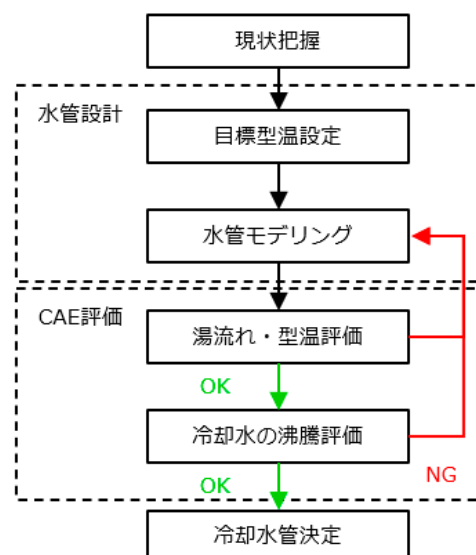


図10 3D冷却の設計フロー概要

そこで本研究では、3D冷却設計を的確に行い、CAE解析から水管モデリングの修正回数を削減するとともに、金型割れのリスクを回避可能な設計ノウハウの獲得を目的として、設計パラメータが金型温度に及ぼす影響について調査を行った。その結果について報告する。

4.2 CAEによる検証条件

今回の検証を行うにあたり、図6で示す実機での金型温度とCAEによる予測型温を比較し、乖離がない様にベースの解析条件の調整を実施しており、CAEによる評価の妥当性を確保している。

設計検討の指標として冷却能力を式(1)に示す ΔT で定義をした。 T_A (型内冷却を一切用いずにアルミニウム合金からの受熱のみの金型温度)と、 T_B (3D冷却を用いた際の金型温度)の差分を求める。これにより3D冷却設計パラメータが金型温度に与える影響を評価した。

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = T_A - T_B \quad \dots (1)$$

なお、金型温度は1サイクルの中で最大となるタイミング(凝固した製品を金型から取り出した直後)で評価を行った。

CAE評価の前提条件は、アルミニウム合金溶湯の温度を640℃、鑄造サイクル数は金型温度が安定する12サイクル目とした。表2に、評価対象の設計パラメータと水準値を示す。金属3Dプリンタ及び鑄造機の制約を考慮し、実際に設定可能な範囲内で各設計パラメータの水準値を決定し、検証を行った。

表2 評価対象の設計パラメータと水準値

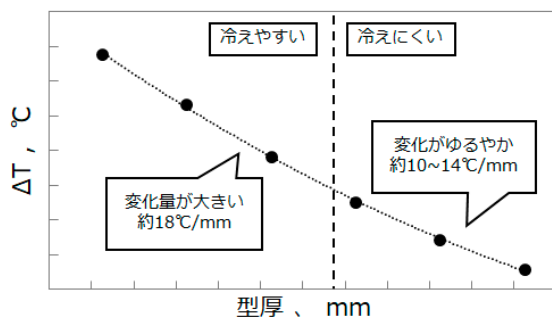
設計パラメータ	水準値
型厚 (mm)	基準 $t \sim t+10$
水管直径 (mm)	基準 $D \pm 1$
材質 (熱伝導率)	低炭素鋼 (低) 熱間工具鋼① (中) 熱間工具鋼② (高)
通水時間 (sec)	基準 $s \pm 5$
冷却水流量 (L/min)	基準 $Q \pm 2$

4.3 CAEによる検証結果

基準条件に対し、各パラメータの水準を個別に変更して行ったCAE評価の結果から、次の①～⑤の知見を得た。

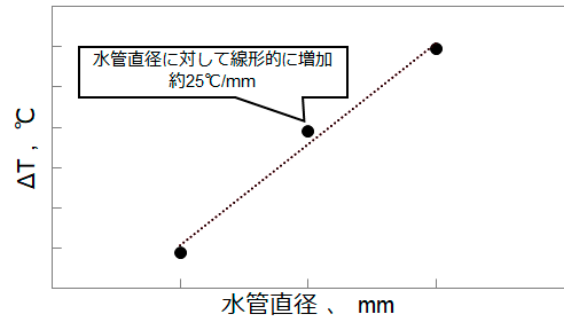
① 型厚の影響

型厚を1mmずつ遠ざけていながら評価をした結果得られた ΔT と型厚の関係を図11に示す。型厚を大きくすると18°C/mmの関係で変化した。ただし、この変化量はある型厚値を超えたところで緩慢になり冷却効果が薄れた。これは水管による冷却よりも、金型表面から内部への熱拡散の影響が大きくなっているためだと考えられる。


図11 ΔT と型厚の関係

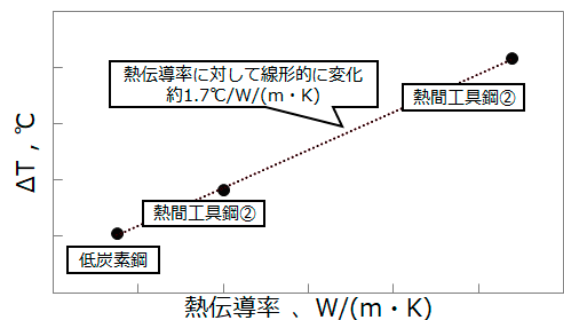
② 水管径の影響

水管径を1mmずつ変化させ、流速が一定になる条件で評価結果得られた ΔT と水管径の関係を図12に示す。 ΔT は水管径に対して線形的に増加し、+25°C/mmで変化した。これは抜熱断面積の拡大による影響と考えられる。


図12 ΔT と水管径の関係

③ 材質の影響

基準条件において、材質を変更し評価した結果得られた ΔT と材質(熱伝導率)の関係を図13に示す。材料固有の熱伝導率に対して1.7°C/(W/(m・K))で線形的に変化している。この結果から新規材料に変更したい場合でも、型温変化量の予測が可能であることを示している。


図13 ΔT と金型材質(熱伝導率)の関係

④ 通水時間の影響

冷却水の通水時間を1sずつ変化させながら評価をした結果得られた ΔT と通水時間の関係を図14に示す。通水時間に対して線形的に23°C/sで ΔT が増加するが、スプレー塗布開始時間以降で3D冷却を通水し続けても、 ΔT はほぼ変化しない結果を得た。

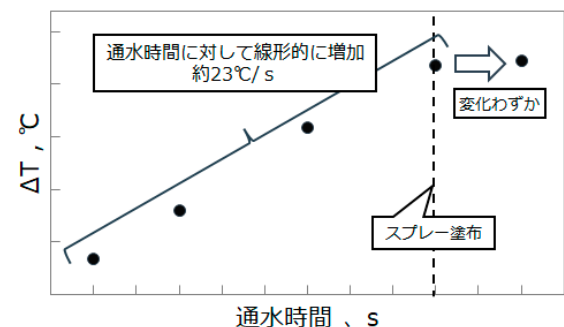

図14 ΔT と通水時間の関係

図15にサイクル中の通水時間ごとの金型表面温度を示す。 ΔT はスプレー塗布前で評価している。サイクル終了時の金型温度に差があっても、製品凝固中の受熱により金型表面の最高温度は同程度に収束しているためだと考えられる。

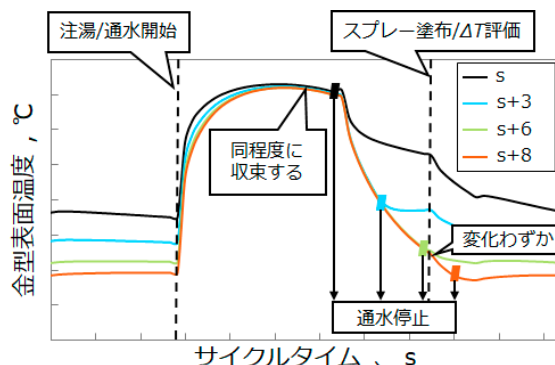


図15 サイクル中の通水時間ごとの金型表面温度

⑤ 流量(流速)の影響

冷却水流量を1 L/minずつ変化させた評価をした結果得られた ΔT と流量の関係を図16に示す。ある値までは流量の増加に伴い2次関数的に ΔT の値が増加したが、一定値を超えたところで、 ΔT の変化量が極少になる。これは単位時間当たりの金型内の熱移動量の限界値に達しているためと考えられる。いくら大量の水を流しても冷却能力には限界があるが大流量を流すことで、水管内での沸騰リスクを下げられるので、その対策としては有効である。

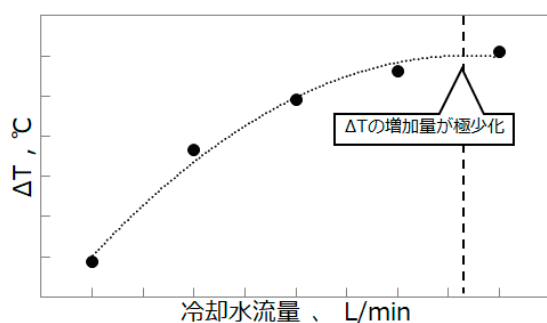


図16 ΔT と冷却水流量の関係

また、型設計段階で決定が必要な主要パラメータとして水管径及び型厚の組み合わせによる ΔT 変化量を図17に示す。通水時間と流量は、実機鋳造評価時にある程度調整が可能なため、型設計段階では基準条件で設定した。この結果から水管径を大きくするほど、型厚が大きくなることが分かる。更にこのグラフから、目標金型温度に対する型厚の設定値が一目で分かるようになった。例として、 $\Delta T 200^{\circ}\text{C}$ を目指す場合、ある値で水管直径を設計したもののに対して、直径2mm拡大することで、金型の厚みを1.3倍厚くすることが可能だとグラフから分かる。これは冷却能力を変化させずに、

金型表面からの割れによる水漏れリスクを抑えられることを示す。短時間で金型寿命まで考慮した設計ができることは、3D冷却採用活動として非常に大きな成果であり、標準化の指標として非常に有用である。

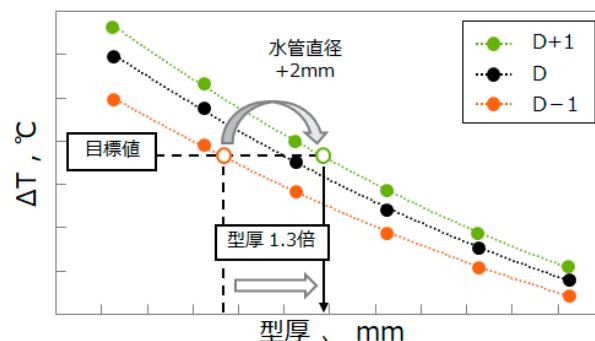


図17 ΔT と水管径及び型厚の関係

5 今後の課題

この取り組みで得られた各設計パラメータが ΔT に及ぼす影響は、CAEの結果をもとにまとめたものである。今後、さまざまな製品形状部に対して実物での型温評価を進め、有効性の確認とノウハウのブラッシュアップをしていく必要がある。

6 おわりに

ダイカストの生産性向上を目指す上で、ハイサイクル化における金型冷却不足による焼付き不具合に対し、3D冷却は劇的な改善効果が見込める。ただし設計難易度の高さから、ノウハウの獲得及び蓄積が必要であり、今回水管設計パラメータが冷却能力及び金型温度へ与える影響度を定量的に捉える活動を行った。現時点ではCAEでの評価にとどまるが、3D冷却設計最適化に向けた検討精度向上及び設計工数の大幅削減効果が期待できる結果を得た。

今後、内製導入した金属3Dプリンタ装置を活用し、型設計～造型～量産鋳造～金型メンテナンスの工程全体を最適化し、アルミダイカスト製品の競争力向上を推進していく。