

ダイカスト湯口方案のノンパラメトリック 最適化技術

Non-parametric optimization technique for die-casting gating system concept

山崎 吾朗 川谷 龍勢

要旨

近年、輸送機器業界では軽量化のためにアルミニウム合金の使用が進められている。当社でも二輪車部品等にアルミニウムが広く用いられており、それらの多くは薄肉化や高意匠化を実現するためにダイカスト鋳造で作られている。ダイカスト鋳造の主な不良の一つに鋳巣不良が挙げられる。これは鋳造時のアルミニウムの凝固収縮や空気の巻き込みによって発生する不良である。本研究では空気の巻き込みを低減する活動を行った。まずダイカストマシンを模擬した水モデル実験装置を作成し型やスリーブ内部の可視化を行い、空気巻き込み現象のメカニズムを解明した。その後、汎用熱流体解析ソフトウェアを用いて空気巻き込み量を定量評価し、遺伝的アルゴリズムを用いて鋳造条件や形状を最適化することで空気巻き込み量を低減した。最後に、最適化された条件を用いてダイカストマシンで鋳造を行い空気巻き込み量の低減を確認した。以上より提案手法の有効性が確認できたため本稿で報告する。

Abstract

In recent years, aluminum alloy has been widely used in the automobile industry in order to promote vehicle weight reduction. Yamaha Motor extensively uses the aluminum die-casting manufacturing process in particular to create thin motorcycle components with complex designs. One major cause of defects in die-casting is porosity, which occurs due to solidification shrinkage or air entrapments during casting. This research proposes an initiative to reduce air entrapment. First, water model test equipment was constructed to simulate the die-casting machine and visualize the filling inside the sleeve and die cavity, which in turn enables clarification of the air entrapment phenomenon mechanism. Next, quantitative evaluation of the air entrapment volume was carried out using computational fluid dynamics (CFD) simulations, followed by reduction of the air entrapment volume by optimizing factors such as the casting conditions and gating shape using a genetic algorithm. Finally, casting experiments were performed on the die-cast machine using the optimized factors, and reduction of the air entrapment volume was successfully confirmed. The results and effectiveness of the proposed method are presented in this report.

1 はじめに

アルミニウム合金（以下、アルミ）は、軽量な強度部材として、四輪車や二輪車等に広く利用されている。当社でも二輪車部品の多くにアルミが用いられており、中でもフレームやリヤアーム、クランクケースは、軽量かつ高強度、高意匠性を実現するために、高圧ダイカスト鋳造（以下、ダイカスト）によって作られている。図1に当社モーターサイクルのアルミフレームの一例を示す。

ダイカストとは高温に熱し溶かしたアルミ（以下、溶湯）を短時間で金型内に充填し圧力を加えたまま凝固させる工法である。形状転写性に優れ、表面が滑らかにでき、かつ複雑な形状を薄肉で実現できる特徴を持つ。また、短時間で成形できるので、生産性が高いこともメリットの一つである（図2）。



図1 モーターサイクルのフレーム例

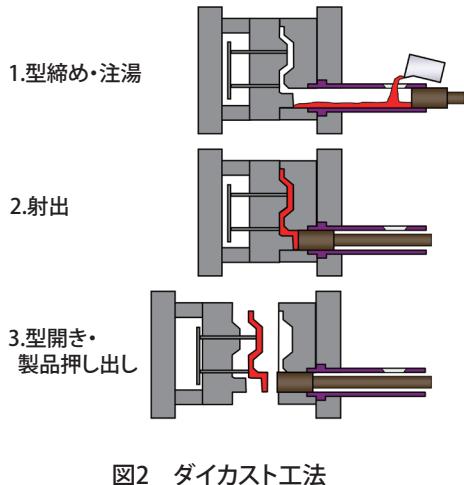


図2 ダイカスト工法

一方、高速で充填する際に製品部に混入した空気が気泡の形で空隙となり、強度低下やオイル漏れの不具合を引き起こす問題がある。製品部の空隙は鋳巣と呼ばれ、金属が凝固するときの収縮を起因とする鋳巣をヒケ巣、空気等の気体を起因とする鋳巣を巻き込み巣と呼ぶ。空気以外にも、製品を金型から離すために使われる塗布剤（以下、離型剤）や充填機構の潤滑剤が気化して発生するガスが巻き込み巣の原因となることが知られている。これらの現象は、金型内部の製品および方案部分と充填機構のスリーブ内で発生しているが、通常は金属に囲まれており、実物における溶湯の挙動を把握することは非常に困難である。

生産準備においては、方案の形状変更やプランジャの動作設定等で不具合対策を行っているが、熟練技術者の勘・コツや実機での試行錯誤に頼る所が大きく、限られた期間内で対策を完了させる難しさがある。鋳造品質向上のために、事前に効率的な対策検討ができる仕組みが必要とされている。

そこで本研究では、三重大学と共同で空気の巻き込みを低減する活動を行った^[1]。まず、スリーブおよび方案部を対象に実験装置による可視化およびシミュレーションによる溶湯の挙動予測を行い、最適化手法を用いたプランジャ動作設定および方案形状変更を行った。それにより空気巻き込みを低減し、実鋳造試験での品質向上が確認できたので、本稿ではその内容について報告する。

2 ダイカスト各部名称および動作

ダイカストマシンの各部の名称を図3に示す。また、充填時の基本動作を簡単に説明する。

溶湯を溜めている保持炉から、ラドルにより溶湯をすくい

出し、スリーブ上に移動する。ラドルを縦方向に回転（以下、傾動）し、溶湯をスリーブ内に流し込む（以下、注湯）。プランジャを前進（以下、射出）し、溶湯をキャビティ内に流し込む。

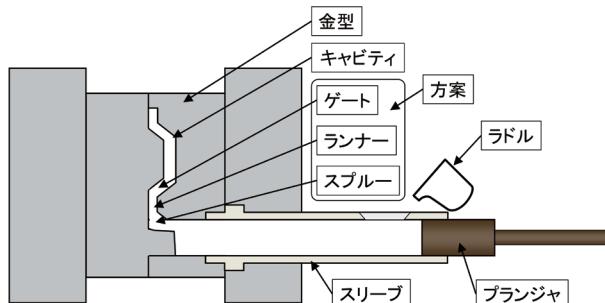


図3 ダイカストマシン各部名称

3 実験方法

3-1. 実験装置による可視化

実際のダイカストマシンを模擬した水モデル実験装置（以下、水モデル）を用いてスリーブおよび型内部の可視化を行った（図4）。

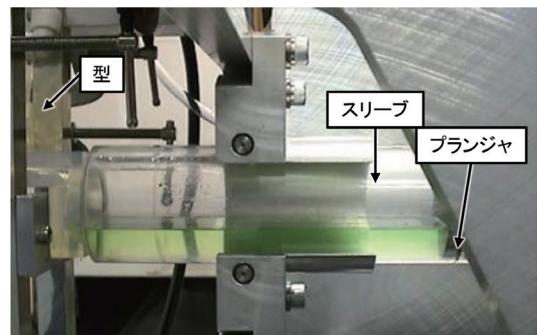


図4 水モデル実験装置各部名称

アクリル製のスリーブを用い、その先端に繋がるように光造型で作成した透明樹脂製の型を取り付けた。このスリーブの内径は4.8[cm]、スリーブの長さは21.6[cm]である。溶湯の代わりに水を用い、水には視認性をよくするために着色を行った。静水状態からプランジャを射出し、スリーブと型内部における水の挙動および空気巻き込みを、高速度ビデオカメラを用いて撮影し観察した。

3-2. 実鋳造評価試験

評価試験用ダイカストマシンの諸元を表1に示す。本研究では検証用の金型と生産用の金型それぞれで試験を実施した。

表1 ダイカストマシンの諸元

| | | 検証用金型 | 生産用金型 |
|-------|--------|----------|------------|
| マシン本体 | 製作 | 東芝機械 | 東芝機械 |
| | 型番 | DC135J-T | DC800J-T |
| | 型締め力 | 135[t] | 800[t] |
| | スリーブ内径 | 6.0[cm] | 10.0[cm] |
| | 射出入力 | 低速のみ | 低速+高速 |
| 注湯機 | 製作 | 東芝機械 | 東芝機械 |
| | 型番 | DAL-SVSH | DAL800SVSH |
| | 注湯入力 | 一定速 | インバーター制御 |
| | ラドル容量 | 1[kg] | 8[kg] |
| 材料 | アルミ | ADC12類似 | ADC12類似 |
| | 保持温度 | 670[°C] | 670[°C] |
| 潤滑剤 | 製作 | MORESCO | MORESCO |
| | 型番 | RCP-1 | B200R |
| 離型剤 | タイプ | 粉体 | 油性黒鉛 |
| | 製作 | MORESCO | MORESCO |
| | 型番 | NS-500 | NS-500 |
| | タイプ | エマルジョン | エマルジョン |

本研究では、注湯時のラドルの傾動速度を、90[deg] 回転するときに必要な時間と定義する。

参考として検証用ダイカスト金型の内部形状を図5に示す。

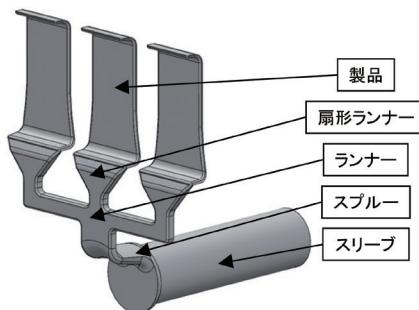


図5 検証用ダイカスト金型の内部形状

検証用金型において空気の巻き込み量は、三枚ある板形状を製品部とみなし、3つの項目で評価した。

- ① 密度：鋳巢割合を評価、高いほど良好。
- ② フクレ量：巻き込み巣の量を評価、低いほど良好。
製品部を530[°C]の熱処理炉内に4時間置き溶体化（以下、熱処理）し、内部で圧縮されている気体を膨張させた。
- ③ ガス量とガス成分：原因となる気体を推定、N₂は空気、CO₂は離型剤や潤滑剤、H₂は水と推測、少ないほど良好。製品部を熱し溶解して内部のガスを取り出した。

これらの密度およびフクレ量はワーク10個の平均、内部ガスはワーク1個を評価結果とした。

また、生産用金型では、製品部を2つの項目で評価した。

- ① フクレ量
- ② ガス量とガス成分

フクレ量はワーク10個の平均、内部ガスはワークから切り出した2箇所の試験片を評価結果とした。

評価に用いる機器の諸元を表2に示す。

表2 評価機器諸元

| | | 検証用金型 | 生産用金型 |
|---------|-----|-----------|-------------|
| 密度・フクレ量 | 計測器 | 電子比重計 | 医療用 CT |
| | 製作 | アルファミラージュ | Siemens |
| | 型式 | MDS-3000 | SOMATOM-E16 |
| ガス量 | 計測器 | ガス量測定装置 | ガス量測定装置 |
| | 製作 | 共立 | 共立 |
| | 型式 | GV-700 | GV-700 |
| ガス成分 | 計測器 | ガスクロマトグラフ | ガスクロマトグラフ |
| | 製作 | 島津製作所 | 島津製作所 |
| | 型式 | GC-8APT | GC-8APT |

4 シミュレーションによる溶湯の挙動予測

空気の巻き込み量を定量的に評価するために、汎用熱流体解析ソフトウェア、FLOW-3Dを用いる。水モデルと同様に静水状態から水の挙動を予測した。さらに、実際のダイカストマシンでは注湯動作があり、これによって発生する波も考慮する必要があるため、ラドルによる注湯機構を追加して、水の挙動を予測した。

5 最適化手法

5-1. 遺伝的アルゴリズム

空気の巻き込みには様々な要因があり、実際のダイカストマシンを用いて鋳造条件や方案形状などのパラメータを適切に設定して空気巻き込みの最小化を狙うことは困難である。そこで、FLOW-3Dと遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を用いて空気巻き込み量の最小化を行った。

GAとは、自然界における生物集団の遺伝と進化の過程における自然淘汰や突然変異をモデル化した、確率的な最適化手法である。この手法のステップを以下に示す。

- ① 初期個体の生成
- ② 各個体の評価
- ③ 評価に基づいた次世代個体の生成（②へ）

このステップを設定した世代数や収束性などの条件に達するまで繰り返す。本研究では、個体とは鋳造条件や方案形状などのパラメータであり、評価は空気巻き込み量である。

このアルゴリズムの終了時に最も評価の良い個体を最適個体とする。

5-2. ノンパラメトリック形状最適化

従来の形状最適化では、自由曲線による形状表現をする際、複数の制御点を設定してパラメータにより変更を行っていた。しかしながらこの手法では、制御点個数の選定が困難なことや、表現できない曲線が存在する問題点があった。そこで本研究では、有限個の制御点は用いずに、曲線を関数式として表現する最適化手法を採用した^[2]。この手法はGAに基づいており、曲線同士の数学的合成によって新たな曲線を生成する。理論上ではあらゆる曲線を表現できるため、方案部における複雑な流れに対し、より評価の良い形状を得られると考えた。

6 スリーブ内の空気巻き込み低減

6-1. 水モデル実験結果

プランジャ射出速度が 12.5[cm/s]、15.0[cm/s] の 2 パターンで、スリーブ内の空気巻き込み挙動を観察した。スリーブの充填率は 22%、水の体積は 85[cm³] とした。プランジャの射出完了直前での結果を図 6 に示す。15.0[cm/s] の入力ではプランジャの移動によって発生した波がスプルー側にあり、スリーブ内での空気巻き込みが見られた。12.5[cm/s] の入力では、同様の波がプランジャ側にあり、空気巻き込みが見られなかった。プランジャ射出速度の変更によって、発生した波の位置が変化し、スリーブ内の空気巻き込み量が変化することが確認できた。

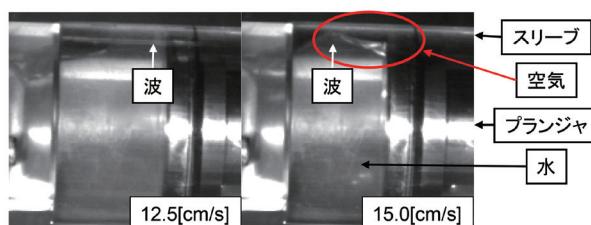


図6 スリーブ内の空気巻き込み現象

6-2. シミュレーション結果

水モデルと同じタイミングでのシミュレーション結果を図 7 に示す。シミュレーションにおいても、水モデルと同様の挙動が確認できた。そこで、スリーブ先端が流体で満たされた時点でのスリーブ内の空気残留量を空気巻き込み量と定義し、定量的に判断できるようにした。

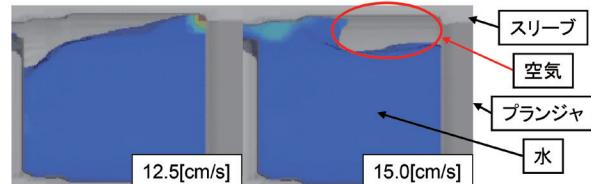


図7 シミュレーションを用いた現象の再現

6-3. 最適化による空気巻き込み量の最小化

注湯機構を追加したシミュレーションで、注湯完了時の溶湯の挙動を確認すると、波が発生していることが確認できた(図 8)。

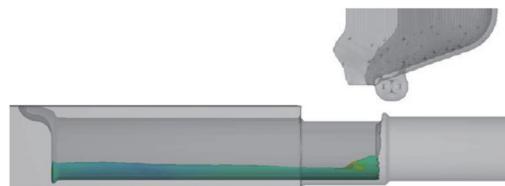


図8 注湯によって発生する波

このシミュレータと GA を用いて、スリーブ内の空気巻き込み量を最小化した。ここでは注湯時のラドル傾動時間、ショットタイムラグ、プランジャの射出速度の 3 つを変更している。ここでショットタイムラグとはラドルが傾動を完了してからプランジャが射出を開始するまでの時間である。

最適化された铸造条件は傾動時間 2.83[sec]、ショットタイムラグ 1.1[sec]、低速速度 32[cm/s] で、シミュレーション上の空気巻き込み量は 2.7 [cm³] であった。この铸造条件でのシミュレーション結果を図 9 に示す。プランジャの移動によって発生する波と注湯によって発生する波の合成波が、射出完了直前にプランジャ側にあるため、スリーブ内で空気巻き込みの少ない射出となることを確認した。

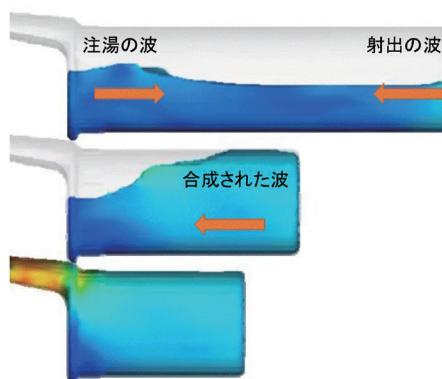


図9 スリーブ内で空気巻き込みのない射出

7

方案内での空気巻き込み低減

7-1. 水モデル実験結果

方案内の空気巻き込み現象解明のために、直角に曲がる流路を持つ水モデル型を作成し、可視化実験を行った。スリーブ内で空気巻き込みが発生しないよう、スプルーパまで水が充填した状態から 1.25[m/s] の一定速でプランジャ射出を行った。射出開始から $0.08[\text{sec}]$ 後と $0.20[\text{sec}]$ 後の水の様子を図 10 に示す。方案の角部で空気が取り残されていることが確認できる。これは方案の角部で外側から先に流体が流れるために内側に空気が取り残されるためと考えられる。

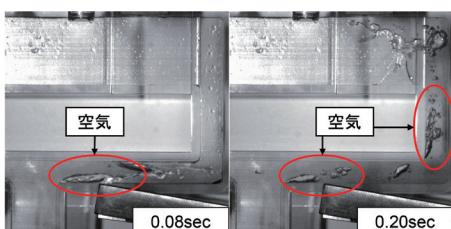


図10 方案内での空気巻き込み現象

7-2. シミュレーション結果

水モデルと同じく、射出開始から $0.08[\text{sec}]$ 後と $0.20[\text{sec}]$ 後のシミュレーション結果を図 11 に示す。方案の角部で水モデル実験と同様の挙動が確認できた。方案部においても、空気残留量を空気巻き込み量と定義し、定量的に判断できるようにした。

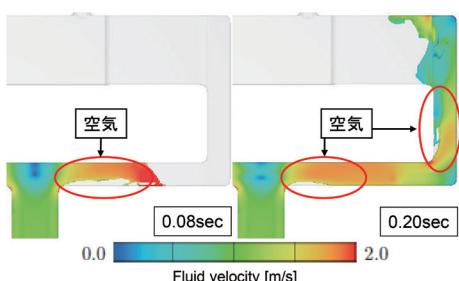


図11 シミュレーションを用いた現象の再現

7-3. 最適化による空気巻き込み量の最小化

方案部においてもシミュレータと GA を用いて空気巻き込み量を最小化した。ここでは方案形状を変更している。最適化されたシミュレーション結果を図 12 に示す。角部を滑らかに繋げることで水の流れる方向を変え、外側を若干膨らませることで外側を水が先に流れることを防いでいる。

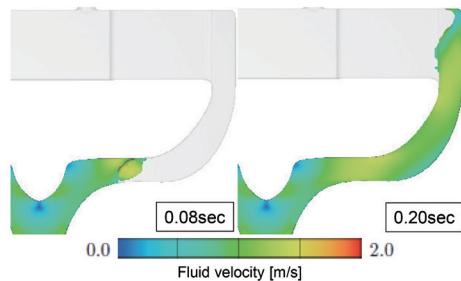


図12 空気巻き込みのない方案形状

この最適形状で水モデル型を作成し、可視化実験を行った結果を図 13 に示す。シミュレーションと同様に水モデルでも方案内の空気巻き込みが低減することを確認した。

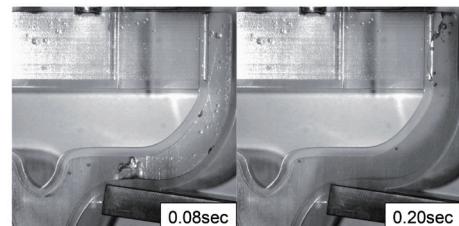


図13 水モデルでの再現

8

検証用金型での空気巻き込み低減

8-1. スリーブ内巻き込み試験

ダイカストマシンを用いて、鋳造条件の最適化によるスリーブ内の空気巻き込み量の低減効果を検証する。空気巻き込みが発生する条件としては、傾動時間 $2.83[\text{sec}]$ 、ショットタイムラグ $1.6[\text{sec}]$ 、低速速度 $20[\text{cm/s}]$ で、シミュレーション上の空気巻き込み量が $107.1[\text{cm}^3]$ となる。この条件で実鋳造評価試験を行った所、熱処理後の製品部で多くのフクレが見られた。三枚中、中央上部に多く発生していることから、スリーブからの空気は方案中心部を通って、分岐部を直進していると推測できる（図 14）。



図14 热処理後製品部(中央)

铸造条件を最適化し、空気巻き込みが少ない条件を用いた場合は、製品部の密度が高くなり、フクレ量と内部ガス量が少なくなった。空気は内部ガスの N₂ で 59% 低減しており、最適化の有効性が確認できた（図 15）。

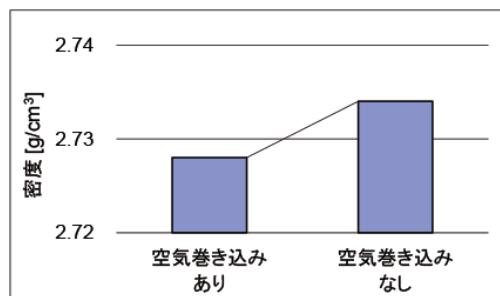


図15-1 密度の比較結果

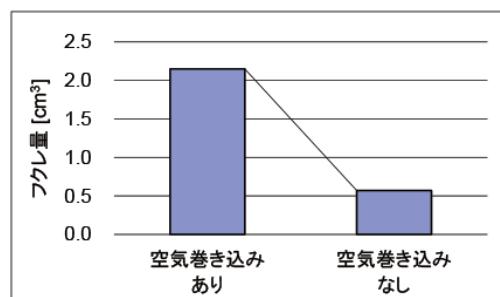


図15-2 フクレ量の比較結果

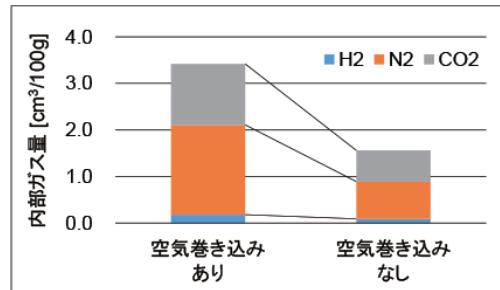


図15-3 内部ガス量の比較結果

8-2. 方案部形状の最適化

スプル、ランナー、扇形ランナーの 3箇所を対象に方案形状の最適化を行った。これによって導出された方案形状を図 16 に示す。

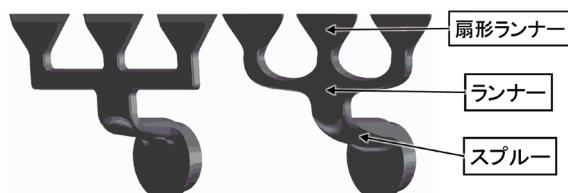


図16 初期方案形状(左)と最適方案形状(右)

最適方案形状ではスプルが大きく膨らんでいることが確認できる。これは流路の断面積を徐々に縮小することにより空気の巻き込みを防止している。次にランナーの角部が滑らかに繋がれていることが確認できる。これは角部の巻き込みを防止している。次に扇形ランナーでゲート付近に勾配を付けることによって流体の流入方向を調整しゲート通過後の製品内部での巻き込みを防止している。

これらの形状を用いた場合のシミュレーション結果を図 17 に示す。方案部の空気巻き込み量は初期方案形状で 4.27[cm³]、最適方案形状で 0.02[cm³] となった。シミュレーションから特に左右の製品部で空気巻き込みが低減していることを確認した。反対に中央部では、方案部の空気巻き込み量が初期形状で 0.39[cm³] と少なく、最適形状で 0.02[cm³] となったが、低減効果は限定的になるとえた。

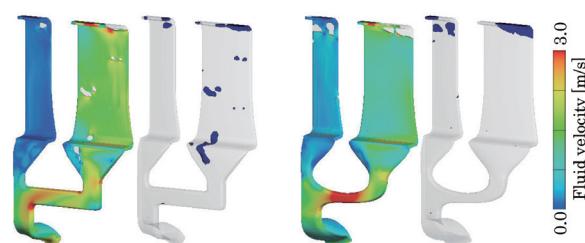


図17 初期方案形状(左)と最適方案形状(右)のシミュレーション結果(流体表示と空気表示)

8-3. 方案最適化形状の評価試験

実铸造評価試験にて、方案形状の最適化による空気巻き込み量の低減効果を検証する。最適方案形状の金型を新作し、初期方案形状と比較した。熱処理後の製品部において、中央部のフクレでは変化が見られないが、左右のフクレが低減しており、シミュレーションと同様の傾向が見られた（図 18）。



図18 热処理後製品部(右)

内部品質では、最適方案形状において製品部の密度が高くなり、フクレ量と内部ガス量が少なくなった。内部ガスのN₂は34%低減しており、こちらでも最適化の有効性が確認できた(図19)。

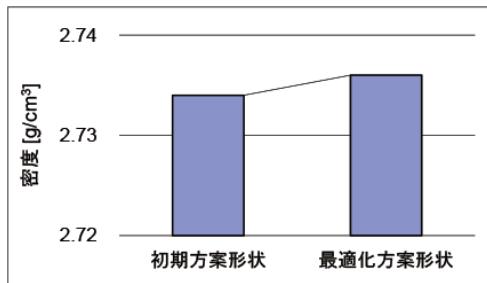


図19-1 密度の比較結果

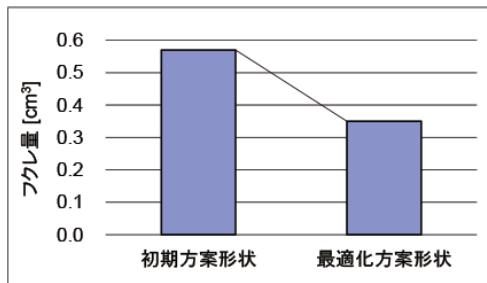


図19-2 フクレ量の比較結果

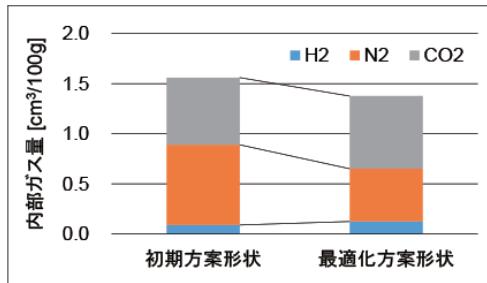


図19-3 内部ガス量の比較結果

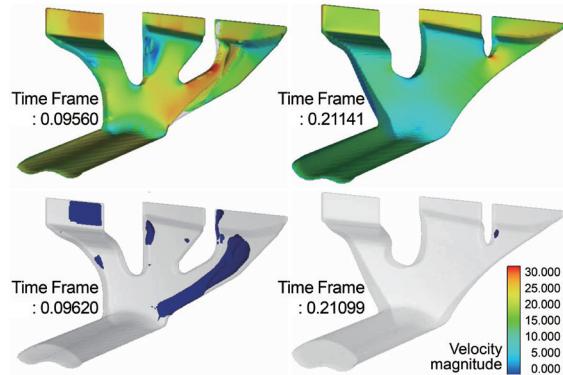


図20 初期方案形状(左)と最適化方案形状(右)のシミュレーション結果(流体表示と空気表示)

9-2. 方案最適化形状の評価試験

実鋳造評価試験にて、空気巻き込み量の低減効果を検証する。型更新により遊休となった金型を最適化方案形状に改造し、初期方案形状と比較した。製品および切り出し試験片の位置を図21に示す。

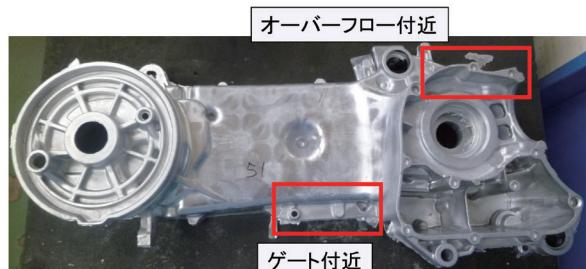


図21 製品および切り出し試験片の位置

熱処理後の製品をCT撮影し、得られた鋸歯形状分布を図22に示す。ここでは10個分を重ね合わせて表示している。ゲート付近およびオーバーフロー付近で鋸歯が減少していることを確認した。

内部品質では、最適化方案形状においてフクレ量と内部ガス量が少なくなった。フクレ量は8%低減しており、複雑な製品形状においても最適化の有効性が確認できた。ゲート付近のガスはN₂よりもCOやCO₂、CH₄の減少幅が大きいことから、スリープ内で気化した潤滑剤のランナー内巻き込みが改善できていると考えられる(図23)。

9

生産用金型での空気巻き込み低減

9-1. 方案部形状の最適化

生産用金型にて、ランナーを対象に方案形状の最適化を行った。これにより導出された方案形状およびそのシミュレーション結果を図20に示す。

検証型と同様に、最適化方案形状ではスプルの膨らみが確認できる。また、初期方案形状で大きく空気を巻き込んでいる箇所で、形状が特に変化していることが確認できる。

方案部の空気巻き込み量は初期方案形状で27.1[cm³]、最適化方案形状で0.41[cm³]となった。

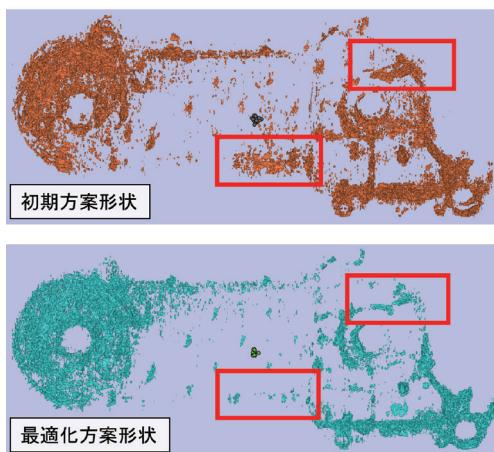


図22 鋳巣形状分布

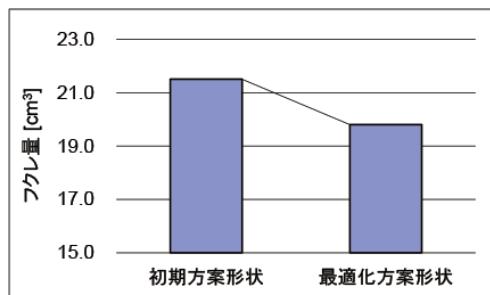


図23-1 フクレ量の比較結果

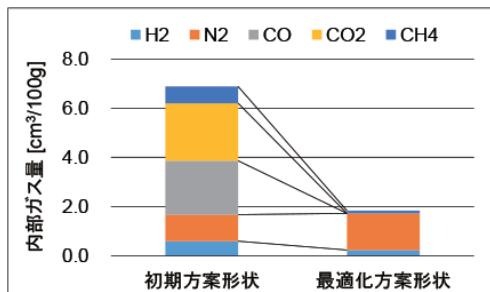


図23-2 内部ガス量の比較結果(ゲート付近)

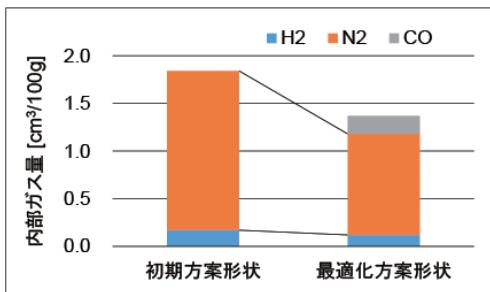


図23-3 内部ガス量の比較結果(オーバーフロー付近)

10

おわりに

本研究により、以下の知見を得た。

- 可視化実験により、スリーブや方案内部での空気巻き込み挙動を確認できた。
- シミュレーションを用いてスリーブや方案内部での空気巻き込み量を予測し、ラドルやプランジャーの動作条件および方案形状を最適化することで、これを低減できる手法を開発した。
- 上記手法にて実鋳造試験での空気巻き込みを低減し、実製品形状においても品質改善ができる事を確認した。しかしながら依然として製品部には巻き込みが発生している。内部ガスのN2は空気であり、製品部や注湯時の空気巻き込みを低減する必要がある。ダイカストマシンとシミュレーションのズレを少なくし、精度を向上することも重要である。CO2は潤滑剤や離型剤が気化したものであり、金型の表面処理や内部冷却の強化によって使用量を低減し、発生するガスそのものを少なくする必要がある。

本稿で紹介した方案形状の最適化は現在、複雑な製品形状内で発生する巻き込み巣の低減を対象とし、継続して研究を進めている。

最後に、今回の研究に携わった三重大学および社内外の関係者各位に深く感謝致します。

■参考文献

- [1] 金澤,矢野,小倉:流路内空気巻き込みの低減を目的としたダイカストランナー形状最適化, 鋳造工学 87(1), 29-38, (2015), 公益社団法人 日本鋳造工学会
- [2] 金澤ら:New Curve Optimization Method and Its Application to Shape Design for Die Casting Using a CFD Simulation (2013)

■著者



山崎 吾朗
Gorou Yamazaki
PF車両ユニット
コンポーネント統括部
生産技術部



川谷 龍勢
Ryuusei Kawatani
エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部