

20

薄肉ダイカストの事前検証技術開発 Development of Computer Aided Engineering Technology for Thin Wall Die-Casting

竹村 幸司*1 亀井 克則*2 米澤 英樹*3
Kouji Takemura Katsunori Kamei Hideki Yonezawa
菅谷 智*4 河野 一郎*5 達谷 正勝*6
Satoshi Sugaya Ichiro Kouno Masakatsu Tatsutani

要 約

マツダは「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、走る歓びと環境性能を高次元で両立させてきた。ハイプレッシャーダイカスト（以下、ダイカスト）の領域では、その最重要課題を「軽量化」と考え、鑄造工法とCAE技術の革新を進めてきた⁽¹⁾⁽²⁾。ダイカスト金型設計では、製品肉厚の薄肉化を軽量化の手段として、積極的にコンカレントエンジニアリング（以下、コンカレント）で形状提案してきた経緯がある。

次世代の商品では、従来を超える大幅な軽量化を実現するために、形状が成形できる限界肉厚への挑戦という野心的な目標を設定した。そのため、薄肉化により懸念される鑄造品質である、湯まわり性（溶湯が健全に製品に行き渡るか）をモデルベースで検証することが不可欠であると考えた。

Summary

Based on the "Sustainable Zoom-Zoom", Mazda achieved both driving pleasure and environmental performance at a high level. For high pressure die-casting, weight saving is considered to be essential, and the innovation of the die-casting method and CAE technology have been focused on. In die-casting die design, as a method of weight saving for making thinner plate of product thickness, we have proposed the shape of concurrent engineering.

In order to realize drastic weight saving more than normal in next product, we determined an ambitious target which is a challenge to limit thickness that the shape can be formed. Therefore, it is inevitable to verify molten metal flow (molten metal flows into the product completely) which is a concern of casting quality by making thinner with model base.

1. はじめに

車両の軽量化は、運転操作のダイレクト感向上とともに燃費の改善に貢献するため、鑄造部品の開発において重要課題として取り組んでいる。そのために、製品設計段階から鑄造解析により製品機能と品質の両立可能な駄肉削減をコンカレントで提案している。

更なる製品軽量化のために、製品の薄肉化を進めている。その理由は、薄肉前提で製品を設計することによって、局所的ではなく全体で軽量化効果を刈り取れるからである。しかし、その反作用として健全な溶湯が製品に行き渡らず、“湯じわ”や“湯境（ゆざかい）”と呼ばれる外観不良の総称である「湯まわり不良」に直結する

リスクをあわせもつ。したがって、製品の薄肉化と湯まわり不良をブレイクスルーするには、湯流れ解析を従来以上に活用することが求められる。

本稿では、製品機能と生産性を両立する世界一軽量なダイカスト製品を、実現可能な限界薄肉の鑄造性を事前検証できる技術の確立を目指した。ダイカスト鑄造は、数十ミリ秒間で溶湯を製品形状に流し込むため、薄肉形状の成形に有利な工法である反面、検証技術の確立で不可欠な湯流れ（溶湯が金型内を流動する現象を指す）の実態を把握する技術的難易度が高い。そのため、ゼロベースで技術的難易度を高めている要件を洗い出し、金型設計技術で解決すべき課題を明確にする。

*1～5 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Div.

*6 大同特殊鋼株式会社 技術開発研究所
Corporate Research & Development Center,
Daido Steel Co., Ltd.

2. ダイカスト湯流れの可視化

2.1 湯流れ可視化の取り組み

溶湯流れの実態把握は、旧来よりさまざまなアプローチで取り組まれている。それは、流動現象を視覚的にとらえる手段（可視化）と、流動経路に仕込んだセンサー類で間接的に検出する手段（点灯法）に大別できる。

可視化は流れを直接観察できる反面、実際の casting と異なる何かを犠牲にするデメリットが発生する。点灯法は、溶湯流路に配置したセンサー類（例えば、熱電対）から得られる信号がアウトプットであり、溶湯流れの速度や方向を測定結果から類推する間接的な検出手段である。次節では、ダイカストの湯流れを可視化するにあたり、過去の可視化事例を交えながら取り組み課題を明確にする。

2.2 ダイカスト湯流れ可視化に向けた課題

砂型を用いた重力 casting では、型の天井面を成形する砂型を取り外すことで、湯流れを可視化することができる。Fig. 1は、シリンダーヘッド砂型の一部を取り去り、溶湯の充填状態を可視化した事例である。しかし、ダイカストでは高速射出で溶湯を流し込むため、キャビティー（型内の閉空間を表す）の露出は溶湯が飛散する危険が伴う。このため観察面には、ガラスやアクリルといった可視化する像を阻害せずキャビティーを密閉する機能をもつ、透明な遮蔽板が必要となる。

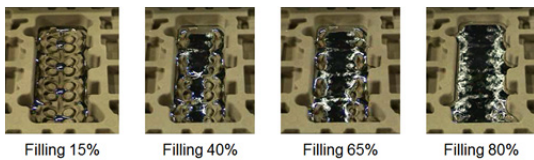


Fig. 1 Cylinder Head Experiment

Fig. 2左は、「水モデル」と呼ばれる、アクリル型に着色した水を流し、その挙動を可視化した事例である。この手法は、比較的多くの casting プロセスで採用されている。しかし、水モデルは溶湯の代わりに水を使用する都合上、温度低下による溶湯の粘度変化を再現できず、更には比重も水とアルミで異なる。ゆえに、可視化実験で取り扱う流体はダイカストで casting するアルミ材を用いる必要がある。

Fig. 2右は、黒鉛型内を流動する溶湯を、X線で可視化した事例である。これは、X線を透過できる材料（一般的に、黒鉛）を型材に使用することで、流体として溶湯が使用でき、アルミ湯流れの可視化実験に広く取り入れられている⁽³⁾。しかし、黒鉛は熱伝導率が一般的な金型材（工具鋼）の約3倍となるため、流動中に溶湯から型への抜熱量が大きくなり、溶湯の流動性を正しく評価でき

ない。このため、湯流れ中の金型-溶湯間の熱マネジメントの観点から、型材には工具鋼を使用する。

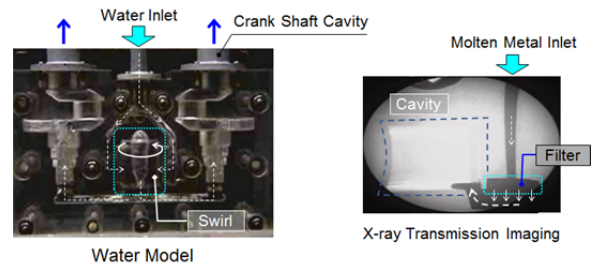


Fig. 2 X-ray Transmission Imaging

既報の事例⁽⁴⁾では、上記条件を満たしたテスト casting 機に、アクリル窓を設置して金型背面より流動を観察している。射出駆動にサーボモーターを採用することは実験の再現性が高く、比較的簡略な機構でテスト casting 機が設計できる。しかし、射出速度を十分に上げられないためゲート速度やキャビティー形状の自由度に制約が伴う。また、サイクリックに casting して金型温度上昇を実体に模した形で再現を試みたくても、型締め・型開きの機構面の煩雑さからテスト casting 機は不向きである。

この課題を解決するためには、量産 casting で用いるダイカストマシンや補助材（チップ潤滑や離型剤など）を使用した可視化実験が必須であると考えた。

3. ダイカストマシンでの湯流れ可視化

3.1 可視化構想の概要

一般的なダイカストマシンは型開き方向に溶湯射出や型の開閉機構、そして射出後に注湯口を押し込む casting 圧力によって、金型が開かないように保持するための丈夫な構造物（プラテン）が備わっている。このため、この方向で湯流れを撮像・記録する装置を設置するのは、制約が多い（Fig. 3）。

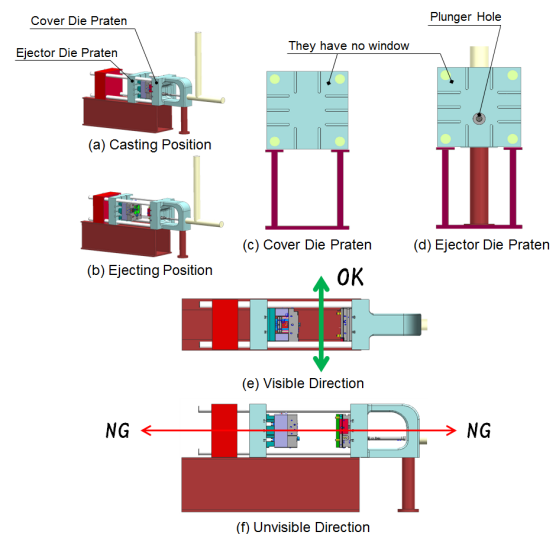


Fig. 3 Structure of Die-Cast Machine

撮像する方向に制約があるため、本稿は型開き方向に対して鉛直方向から撮像可能な金型構造を新たに考案した。可動型は、鋳造後の製品を取り出すエジェクター機構が可視化を阻害するため、可視化するための機構は、固定側に設置することとした。

Fig. 4は、固定型内に観察窓とそれに続くトンネルを設け、像を転写するための鏡面を設置する構造を示す。観察窓の寸法は102mm×86mmとした。

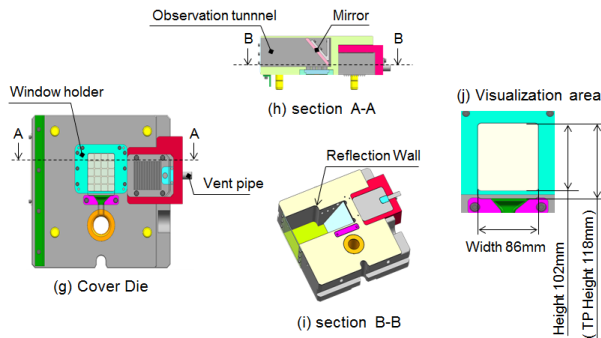


Fig. 4 Die Design for Die-cast Visualization

ダイカストを可視化する上で、照度の不足が問題となる。その理由は、数十ミリ秒間で充填が完了するダイカストの場合、ハイスピードカメラのような1000分の1秒オーダーで記録できる機器が必要となる。一般的に、そのフレームレートで撮像するには1000ルクス程度の照度が必要である。ダイカストマシン周囲の照明だけでは、金型内に掘り込んだトンネルにこの照度を確保することが困難である。

本稿は0.03秒で充填完了する試験片形状であり、湯流れ解析で分析する充填2%刻みのコマ割りという考え方の下2000分の1のフレームレートで撮像した。そのため、照度を確保するための構造を新たに考案し、可視化金型の設計に織り込んだ。光源は金型内部に設置する方法が考えられるが、光源そのものが鏡面体構造に映り込んで像を阻害する。そこで、金型外部に光源を設けて反射板によって散乱光をトンネル内で拡散させた。

観察窓材には、アクリルを採用した。可視化実験で広く用いられる石英ガラスは製作費が高く、金型の熱間膨張による破損リスクを鑑みて、消耗品であると割り切った。ただし、アクリルは溶湯からの熱によって表面が溶けだし実験の再現性が損なわれやすい。そのため、観察窓の交換によって鋳造サイクルを阻害しないように、型開き時状態で観察窓を交換できる構造とした。

また、溶湯射出時の衝撃力と鋳造圧によって、観察窓を破損させないための構造を金型設計に織り込んだ。それは、“バックアップ機構”と呼び、観察窓を格子状の柱で背面より支持する構造である。この柱は、縦・横寸法を等しくした正方形を構成し、柱の設計値と像との

関係をFig. 5に示す。

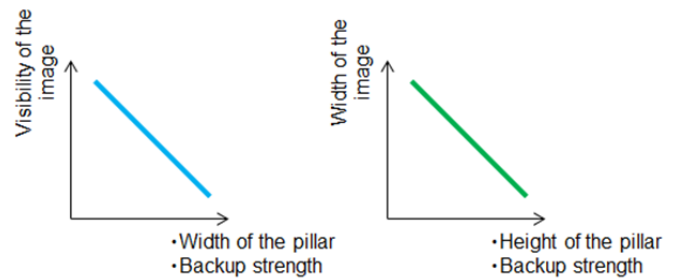


Fig. 5 Relationship of Design Parameter of Pillar and Image

柱の幅を細く設計すると、像の視認性が向上する反面、バックアップとしての強度が低下する。柱の高さは、ダイカストマシンに搭載できる固定型の厚みを最大にとり、可視窓構造部の厚みを除いた寸法で決める。柱の高さを増すとバックアップの強度が向上する反面、トンネル内に設置する鏡面の全長を短くする必要が生じる。鏡面の全長×cos45°が像の幅となるため、柱の高さを増すと像の幅が狭くなる。この関係性をFig. 6にまとめた。

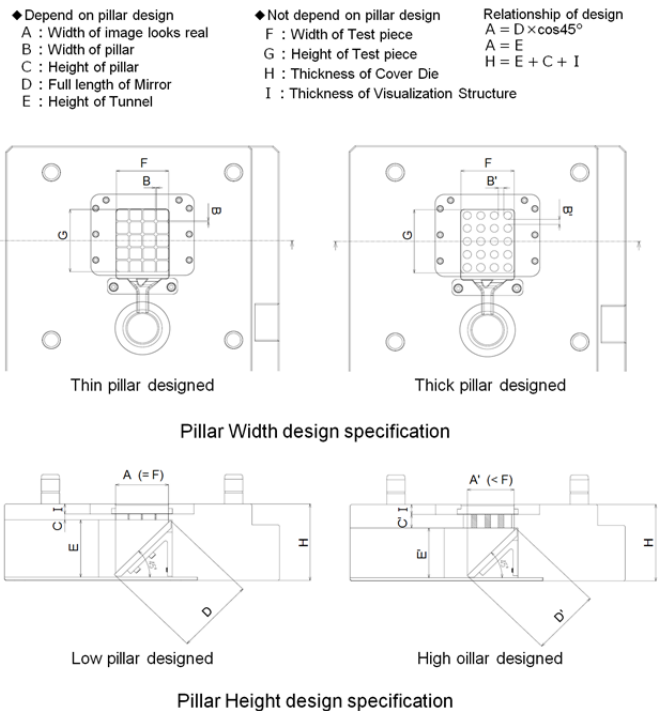


Fig. 6 Relationship Design Value of Pillar and Image (Cover Die)

以上、Fig. 5及びFig. 6に記した金型構造上の制約を満たした上で、最大限に広い像を撮るために構造解析を繰り返す、柱の設計仕様の最適解を導いた (Fig. 7)。

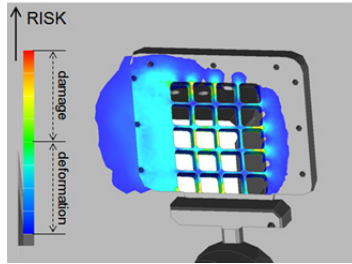


Fig. 7 Structural Analysis Results of Cover Die Receiving Casting Pressure

3.2 キャビティーの減圧

本稿ではダイカストで広く取り入れられている、真空ダイカストでの湯流れ挙動の可視化を実施する。キャビティー内の減圧は、湯流れ時の背圧影響を抑制するとともに、残存するエアや金型表面に塗布した離型剤から揮発するガスの除去を目的としている。可視化型においても、金型に減圧装置を接続し、型合わせ面にシール構造を施して、量産金型と同等の気密性を確保した (Fig. 8)。

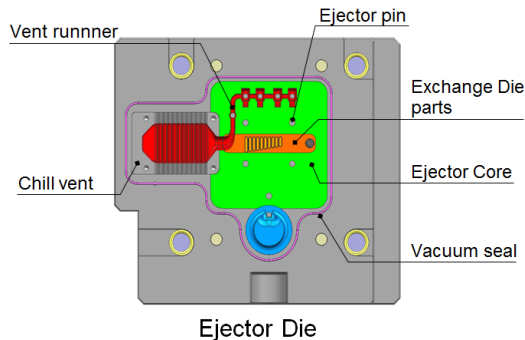


Fig. 8 Structure of Ejector Die

減圧装置は、真空ポンプ・タンク・バルブで構成され、キャビティーと真空タンク容量の比は、マツダで量産するシリンダーブロックと同じくした。また、減圧量を制御するため、圧力レギュレーターを真空ポンプとタンクの間設置した。

4. 湯流れ可視化実験

4.1 実験条件と水準

実験は、Table 1の制御因子と、水準とした。

Table 1 Experimental Conditions

Control factor	Level1	Level2	Level3
Decompression	80kPa	40kPa	atmosphere
Holding furnace temperature	720°C	670°C	
Gate speed	30m/s	50m/s	
Gate shape	Slanting	Straight	Branch
Production shape	Flat	Comb	

可視化する像の形状は、量産部品で実際に生じている流動現象を想定し、Table 1の組み合わせによってFig. 9のように再現する。

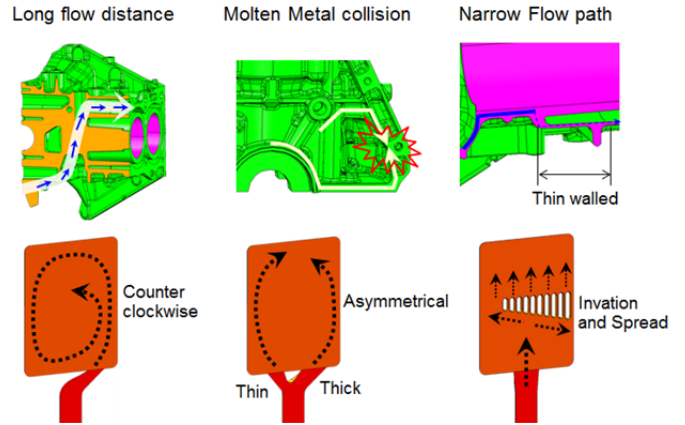


Fig. 9 Visualization Concept

4.2 湯流れ可視化実験の結果

可視化鑄造は、延べ140ショット鑄造した。代表的な撮像画像をFig. 10に示す。

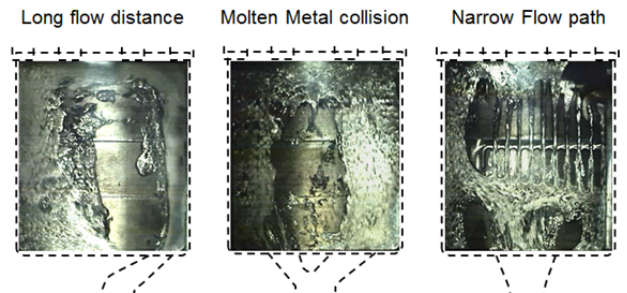


Fig. 10 Example of Visualization

なお、実験の再現性を検証するため、以下の物理量を計測したがバラツキは量産と同水準であった。

- 1) 溶湯温度 (水準1) : 720°Cねらいに対し, 722°C
- 2) 溶湯温度 (水準2) : 670°Cねらいに対し, 668°C
- 3) 給湯量 : 354±8g
- 4) ビスケット厚さ : 50.0±1.0mm
- 5) 金型温度 (サイクル内ピーク値) : 120±10°C

湯流れにおける減圧影響を表したのがFig. 11(a)である。溶湯温度は720°C, ゲートスピード50m/sで同一とし, 減圧80kPaと大気圧を比較し, 湯先形状に違いが出ることが分かった。減圧下では湯先が尖り直進性が高いのに対し, 大気圧では溶湯の広がり大きい。これは、キャビティー内の背圧抵抗によって溶湯進行が阻害され、本来の尖り部分が左右に広げられたためと考えた。

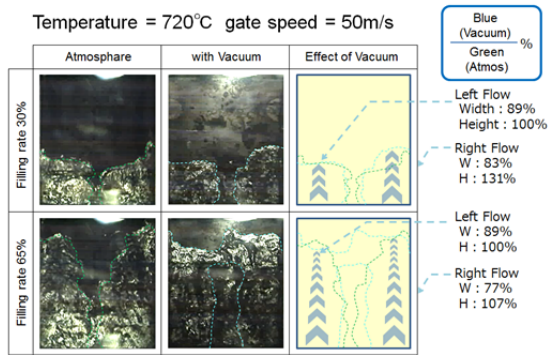


Fig. 11(a) Compare with Vacuum Effect

また、溶湯温度の影響を表したのがFig. 11(b)である。ゲートスピード50m/s, 減圧80kPaで同一とし、溶湯温度720°Cと670°Cを比較した。その結果、溶湯充填にかかる時間が溶湯温度720°Cでは0.028秒であるのに対し、670°Cでは0.044秒かかっていた。これは、温度低下によって溶湯の粘度が上がり流動しにくくなったためと考えた。

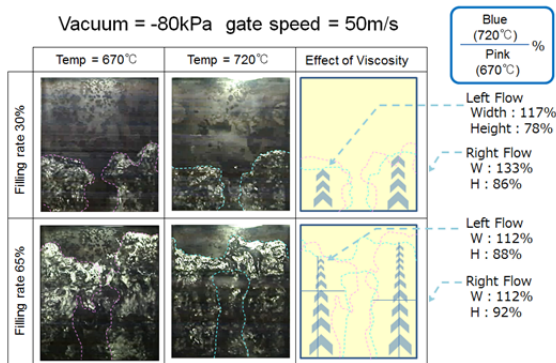


Fig. 11(b) Compare with Viscosity Effect

以上により、湯流れの“像”をとらえたことで、像を形成するための条件面が非常に重要であることが分かった。ゲートスピードは当然のことながら、溶湯温度が湯流れに対して非常に大きな影響をもつと判断し、湯流れ中の溶湯温度を実測する実験を追加で実施した。

4.3 湯流れ中の溶湯温度実測

Fig. 12に流動中の溶湯温度測定に用いた金型概略図を示す。キャビティーは、溶湯を一律で不可逆的な流れとするジグザグ形状とした。本実験の目的は、その形状内部に温度計測ポイントを設けて溶湯が流動しながら温度低下する様をとらえることである。

温度計は、プローブタイプの放射温度計を金型裏面より設置し、キャビティー面にはアクリルで栓を設けて溶湯と放射温度計が接触することを防ぐ。栓の材質にアクリルを選定した理由は、コスト面の他に、放射温度計の

検知する波長1000nm帯の赤外光の透過に優れるためである。

放射温度計を採用する理由は二点、接触式の温度計は接触子が溶湯の流れを阻害するためと、接触式では温度を検知して信号に変換するまでにタイムラグが生じ、ねらいのサンプリングレートを満足しないためと考えたからである。本稿では、1000分の1秒のサンプリングレートをもつ放射温度計を選定し、溶湯流動中に30点を計測できる計算となる。

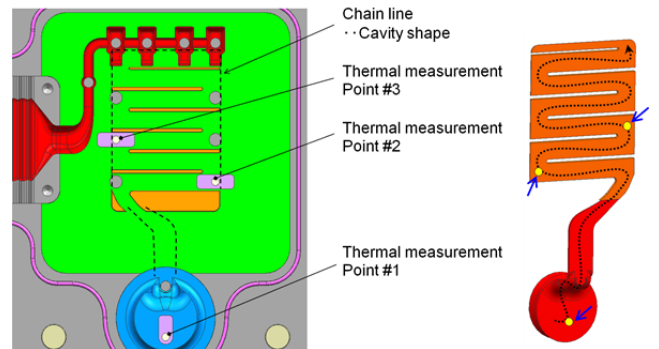


Fig. 12 Temperature Measurement Concept

Fig. 13は縦軸に流動中の溶湯温度、横軸に流動距離を表し、720°Cで铸造した際に得られたデータを示す。溶湯が流動するに従い、溶湯温度が低下する現象を確認した。充填完了後には、周囲の復熱によって温度がやや上がる現象を確認した。この実験により、溶湯の初期温度の違いによって到達時の温度や低下の勾配が異なること、そして到達までに要する時間が異なることが分かった。

次章にて、以上の実測結果を基に湯流れ解析の確からしさを確認する。

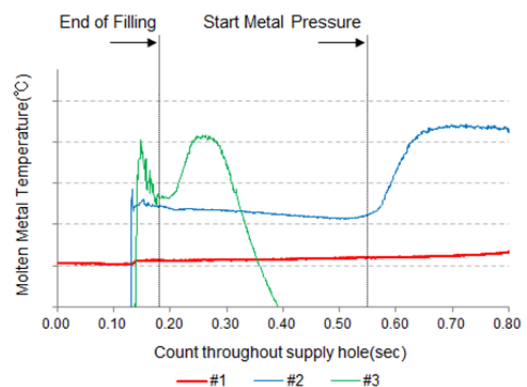


Fig. 13 Temperature Drop at 720°C

5. 可視化結果の分析と湯流れ解析への反映

5.1 可視化結果の分析手法

ダイカスト湯流れを、定量的な実測値とする手法を考

案する。最初に、可視領域に溶湯が占める割合を「溶湯充填率」とし、可視領域へ充填が始まる瞬間までを溶湯充填率0%、満充填する時を溶湯充填率100%と定義する。

ハイスピードカメラで撮像した像（静止画）をマトリクス状に分割し、そのマトリクスに溶湯が充填する割合を「セル充填率」としてサンプリングする。マトリクスは、必要な分析精度と作業工数のバランスを考慮して分割数を決定する必要がある。ここまでの作業で「溶湯充填率」に対し、マトリクスに分割した数だけの「セル充填率」が定量的なデータとして求めることができる。

湯流れ解析の確からしさを確認するには、可視化実験と同条件で湯流れ解析を実施し、計算結果となるポスト表示（コンタ図）を使用する。手法はFig. 14に示すとおり、同じ溶湯充填率の静止画とコンタ図を抽出し、静止画のセル充填率に対するコンタ図のセル充填率の再現率をセルごとに算出する。例えば、静止画でセル充填率17%に対し、コンタ図でセル充填率100%であればそのセルの解析精度は17%となる。Fig. 14の例では、溶湯充填率30%においてセル充填率の総平均、つまり解析精度が62%であることを示す。この分析を進めた結果、従来の湯流れ解析は52%の整合率であることが判明した。

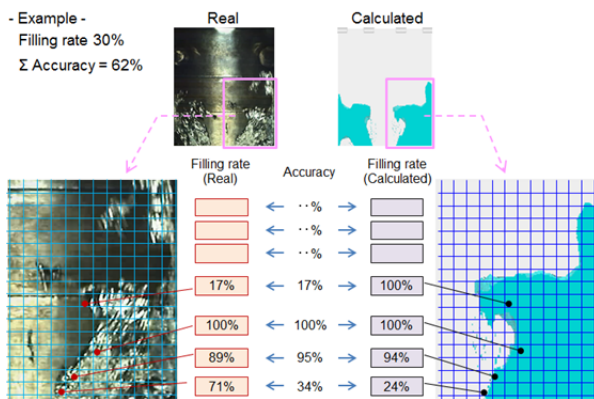


Fig. 14 Calculation Accuracy for Filling Sim. (Individual)

5.2 湯流れ解析の精度向上

鋳造CAEの精度改善で一般的に用いられるのは「合わせこみ」と呼ばれる手法である。湯流れ解析では、ナビエ・ストークス方程式を解いて理論的に解を求めるが、計算時間の制約もあり、例えば壁面への熱移動などを完全な理論式で再現することは実用的でない。そのため壁関数など、仮定をもったモデルとして定義する。その仮定をふまえた上で、物理学で説明がつかない結果も可能性として生じるが、実態の情報を衝として解析が最も実体を再現するパラメータを求めることが、合わせこみである。

上記のパラメータに先立ち、鋳造解析を実行する工程表 (Fig. 15) を説明する。

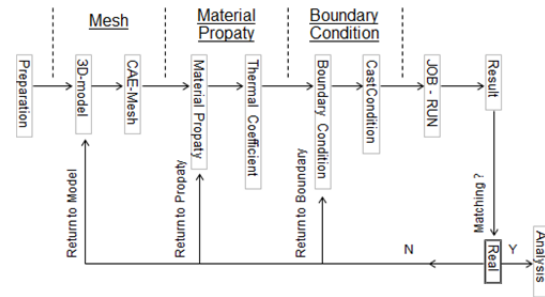


Fig. 15 CAE Turning Block Chart

工程は大きく分けて、計算メッシュの作成工程、材料の設定工程、境界条件の設定工程での作業による設定を経て、スーパーコンピュータ等で計算を実行し結果分析に至る。例えば計算メッシュのつくり方を変更し、解析の再現性が向上するかを試す場合は、Fig. 15計算メッシュの作成工程に戻ることを表している。

鋳造解析は、燃焼系や塑性領域を含む構造解析に比べると、現象が単純でありその歴史も古い。言葉を換えると、それは最も基本的な物理方程式に基づいた計算がなされており、計算に用いる溶湯や金型の物性値の確からしさが解析精度の根幹を担うともいえる。

溶湯材料の物性値は、特に高温領域において文献情報が乏しく、鋳造解析ソフトの初期（メーカーデフォルト）値を使用している。本稿では可視化実験によって実態を定量的に把握したため、それをものさしとして溶湯材料の合わせこみをすることに着想した。

式(1)は湯流れ解析で用いられるナビエ・ストークス方程式である。本稿では、溶湯材料の④動粘性係数νの合わせこみを実施した。それは、動粘性係数が流体計算の要となる物性値であるとともに、流体の粘度を測定する手段に理由がある。粘度は、オストワルド粘度計に代表される、ガラス管に注いだ流体の動作を目視で目盛を計測するが、溶融した金属はこの手段では測定できない。つまり、動粘性係数は鋳造解析の物性値合わせこみにおいて、直接粘度を計測した事例が過去に存在しないと考へ、最も信頼性が低いパラメータであると判断したからである。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g \quad (1)$$

①Time ②Velocity ③Pressure ④Viscosity ⑤Gravity

Fig. 14で紹介した実態と解析結果の比較に加えて、Fig. 13で実測した温度結果を組み合わせることによってアルミ材の温度依存の動粘性係数を得ることができる。その結果、溶湯の凝固が始まる温度付近の動粘性係数を、

初期値より大きく（粘りが出る）した方が整合率が改善することが分かった。

式(1)の③では、射出動作中のキャビティー減圧量を Table 1の実験条件ごとで調整した。③を算出する上で、背圧を考慮する気体の状態方程式は式(2)のようになり、質量項mは式(3)で算出される。

$$p \times V = m \cdot R \cdot T \quad (2)$$

p:Back pressure V:Volume m:Gas mass
R:Avogadro's number T:Temperature

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = \sum_i \dot{m}_{v,i} + \sum_j \dot{m}_{v,j} \quad (3)$$

$\dot{m}_{v,i}$: Gas mass from vent per second ··a
 $\dot{m}_{v,j}$: Gas mass into Cavity per second ··b

マツダが使用する湯流れ解析では、キャビティー内の減圧設定項目を調整すると式(3)・aが変更され、ナビエ・ストークス方程式計算へ反映される。以上、溶湯の動粘性係数と金型内の減圧量の合わせこみを進めた結果、活動前の湯流れ解析整合率が52%であったのに対し、82%まで改善することができた (Fig. 16)。

湯先の挙動を再現できたことにより、実際の鋳造品での表面性状品質がどのような湯流れを経て発現したかの考察が可能となった。そこで、製品への溶湯充填状態の解析情報を基に、湯まわり性を検証するための新技術開発を進めた。

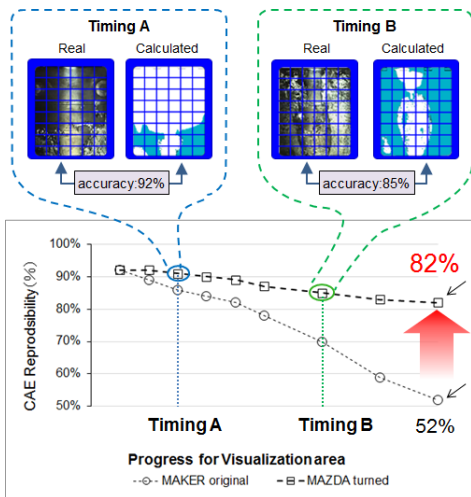


Fig. 16 Calculation Accuracy for Filling Simulation(overall)

6. 湯まわり性検証技術の開発

6.1 極薄肉シリンダーブロックの鋳造

鋳造プロセスにおける湯まわり性に関連する各工程の

入力と出力を明確にするため、金型を用いた鋳造実験を実施した。金型は、SKYACTIV-Gシリンダーブロックの量産金型を改造した実験型を用いた。

実験対象とした部位は、現状で製品の基本肉厚で設計するシリンダーボア外周に冷却水を通す機能をもつ“ウォータージャケット”外壁とした。それは、同部位は製品形状に広くまたがり、薄肉形状であるために湯まわり性の感度が高いと考えたからである (Fig. 17)。肉厚の水準は、従来設計での2.5mmに対し0.3mmと0.7mmの2水準とした。それは、金型製作精度を考慮して最小の隙間である0.3mmと、検証技術を構築する上で湯まわり品質を段階的につくる目的で経験的に0.7mmとした。

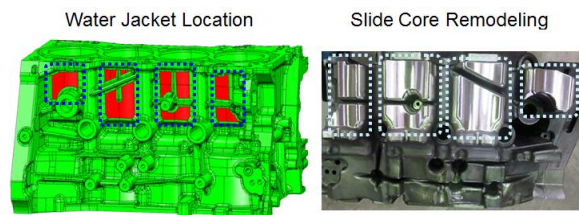


Fig. 17 Target of Thin Walled Experiment

Fig. 18に、本実験の鋳造品を示す。当初のねらいどおりの品質ができており、成形品の肉厚は0.3mmねらいに対して0.30~0.35mm、0.7mmに対して0.71~0.73mmであった。

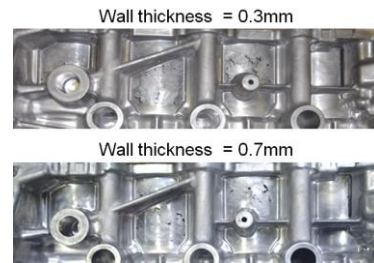


Fig. 18 Test Sample

6.2 湯まわり性検証技術の開発

湯まわり性の検証技術をつくる上で、既製品ソフトウェアの計算ロジックを、ユーザー側で編集できるものはおそらく存在しない。そのため、本稿では湯流れ解析で出力する結果を説明変数とする回帰式を作成した。

初めに目的変数を定義する。それは、湯まわり性を定量的に表現する必要があり、本稿では“湯まわり値”と呼ぶ指標を新たに作成した。それは湯まわり性を百分率で表し、材料の充填密度、光沢のRGB値、導電率を掛けあわせて算出する、マツダで独自に考案した数値であり、100%に近づくほど良好な湯まわり状態と定義する。まずは、前節で鋳造したシリンダーブロックのウォータージャケット外壁肉厚の湯まわり値を網羅的に調べた。

次に、前節の実験を忠実に再現（金型3Dモデル、鋳造条件）した湯流れ解析を実施し、解析結果を説明変数として求めた。重回帰分析の結果、 t 値が2以上となる説明変数が「有意である」と考え、かつ p 値が5%よりも小さくなる解析結果を説明変数とした。その結果「溶湯温度」、「溶湯流速」、「溶湯の継時劣化」、「溶湯流動長」、「溶湯空気接触量」を説明変数とした回帰計算によって湯まわり値を再現する回帰式を作成することができた。

Fig. 19は、湯まわり値の再現性を表す。横軸に事前検証した湯まわり値を、縦軸に実体から算出した湯まわり値を示す。点群の分布から分かるように、おおむね実体を反映する結果である。量産準備において、湯流れ解析をした結果、製品形状にこの値を下回る部位が生じる場合に鋳造方案や製品形状を見直す評価基準としている。

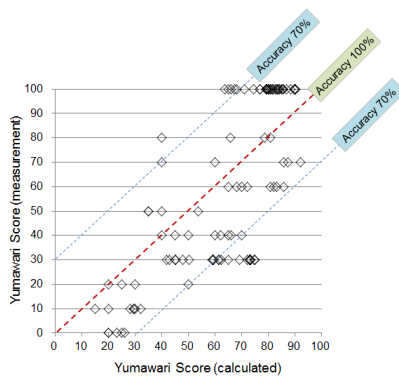


Fig. 19 Accuracy of Yumawari Score

直近では、SKYACTIV-Dの改良型エンジンシリンダーブロックにおいて、本技術を活用して開発コンカレントを進めた結果、従来比286gの製品軽量化を達成した。

7. まとめ

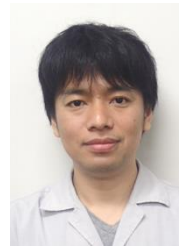
本稿では、将来にわたってダイカスト部品軽量化の可能性を大きく広げる湯流れシミュレーションの予測精度を改善した。それには、実際のダイカストマシン、金型を用いた湯流れ可視化と、さまざまな因子を計測する技術が大きな役割を果たした。コンピューティングパワーが大きく発達した現代にあっても、実態を徹底的かつ客観的に見ることの重要性を再認識できた。「現場現物」という考え方はしばしば生産性改善において語られるが、どんな場面にも共通して重要な「ものづくり」の肝であった。

今回、マツダのものづくりの考え方に共感していただき、ともにダイカスト湯流れの真理に迫る“同胞”として同じ釜の飯を食べた、大同特殊鋼(株)に対して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 竹村ほか：「走る歓び」を実現する薄肉ダイカストの金型設計技術革新，型技術者会議 2017，pp148-149
- (2) 大塚ほか：SKYACTIV 技術を実現した高精度薄肉ダイカストと金型技術，マツダ技報，No.31，pp.197-201 (2013)
- (3) 長坂ほか：ダイカスト湯流れ直接観察システムの開発に関するフィジビリティスタディ，(財)機械システム振興協会，平成16年度システム開発報告書
- (4) 飯見ほか：ダイカスト湯流れの可視化検証による解析精度向上，デンソーテクニカルレビュー，Vol.6，No.2，pp.100-106 (2001)

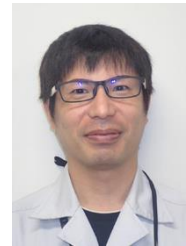
■ 著 者 ■



竹村 幸司



亀井 克則



米澤 英樹



菅谷 智



河野 一郎



達谷 正勝