

スーパーコンピューターによるシミュレーションで 鋳巣発生部位の時系列予測に成功 —高圧ダイカスト鑄造における巻き込み空気と鋳巣形成を可視化—

【発表のポイント】

- スーパーコンピューターによる High-Fidelity シミュレーション^(注1)により、高圧ダイカスト鑄造における鋳巣^(注2)発生部位の時系列特定に世界で初めて成功しました。
- 従来手法では観察不可能であった非定常凝固を伴う鋳巣の微細形状を可視化し、鋳巣欠陥形成要因を明らかにしました。
- 実鑄造品のX線CT^(注3)計測との比較検証で、鋳巣発生部位の空間一致率が最大60%に達し、予測の有効性を確認しました。

【概要】

自動車や精密機器産業において、アルミニウムダイカスト製品は軽量化と高強度を両立する基幹部品として不可欠ですが、鑄造工程中に空気が巻き込まれることで生じる鋳巣（ポロシティ）は、外観からは検知困難な内部欠陥であり、従来のシミュレーションでは正確な予測が極めて困難とされてきました。

東北大学流体科学研究所 石本淳 教授の研究グループは、VOF（Volume of Fluid）法^(注4)とLES（Large Eddy Simulation）^(注5)を組み合わせ、気体の圧縮性と凝固プロセスを統合した三次元 High-Fidelity シミュレーションにより、高圧ダイカスト鑄造の充填過程から初期凝固段階までの全過程を解析しました。スーパーコンピューターによる大規模計算を活用し、気泡の生成・移動・圧縮・封じ込め挙動を時系列で追跡することで、鋳巣発生部位の時系列特定に世界で初めて成功しました。実際の量産品のX線CT計測データとの比較検証では、鋳巣発生位置の空間一致率が最大60%に達し、予測の有効性が確認されました。なお Astemo 株式会社との共同研究によりオープンソース CFD（数値流体力学）ソフト OpenFOAM^(注6)を新たに開発し、シミュレーションにあたってはこれを基盤としたオリジナル鑄造計算ソフトウェア

「DiecastCompressibleInterFoam」を用いました。

本手法は、ダイカストアルミニウム製品の欠陥予測とプロセスフィードバックに有効であり、製品設計のフロントローディングと量産時の品質保証に大きく貢献するものと期待されます。

本研究成果は、学術誌 International Journal of Metalcasting に2026年3月23日にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

自動車や精密機器産業において、アルミニウムダイキャスト製品は軽量化と高強度を両立する基幹部品として不可欠です。これらの製品は複雑な形状と高い寸法精度が求められるため、製造工程中に導入される欠陥が製品性能に直接影響を及ぼします。なかでも、鑄造工程中に溶融アルミニウムが高速・高圧で金型内を流れる際に空気が巻き込まれることで生じる鑄巣（ポロシティ）は、外観からは検知困難な内部欠陥であり、製品の強度低下や破損リスクを招く深刻な問題です。

商用鑄造シミュレーションソフトウェアは溶湯流動や凝固挙動の解析に広く利用されていますが、従来の手法では充填後に加圧すれば空気は排除されるという前提で解析が行われており、鑄巣の正確な発生位置や微細な形状を予測することは極めて困難でした。実際に X 線 CT 計測で得られる実製品の内部欠陥データとシミュレーション結果を比較すると、欠陥が実際に発生する箇所が予測されないケースが多く、溶融金属の乱流挙動や気泡の生成・移動・消滅といった複雑な物理現象の再現性に課題がありました。こうした予測精度の限界を克服するためには、より高精度な物理モデルに基づくシミュレーション技術の導入が不可欠でした。

今回の取り組み

東北大学流体科学研究所の石本淳 教授の研究グループは、Astemo 株式会社との共同研究により、超並列スーパーコンピューティング技術を用いて、オープンソース CFD ソフト OpenFOAM を基盤としたオリジナル鑄造計算ソフトウェア「DiecastCompressibleInterFoam」を開発しました（図 1）。

本ソフトウェアは、VOF（Volume of Fluid）法による気液界面の高精度追跡と LES（Large Eddy Simulation）による乱流モデリングを組み合わせ、さらに気体の圧縮性と溶湯金属の凝固プロセスを統合した三次元解析を可能にします。ゲート部で 40 m/s を超える高速乱流領域においても、気泡の生成・分裂に影響する過渡的な渦構造を捉えることができます。また、約 6 MPa に達する高圧鑄造環境下での空気の圧縮挙動を圧力ベースの状態方程式により再現し、予測精度の向上を実現しました。

解析モデルの構築においては、実製品の三次元鑄造方案データに基づきポリヘドラルメッシュを採用し、曲面や複雑形状への適合性を高めました。鑄巣が発生しやすい厚肉部や冷却が遅延する領域では局所的にメッシュ密度を高め（最小 0.25 mm）、温度場・流速場の再現精度を向上させています。境界条件には実機の射出波形データと商用ソフトウェアによる溶湯温度分布を反映し、オーバーフロー部へのマイクロアウトレット設置やベント部の個別圧力設定により、真空鑄造を想定した現実的な気相排出挙動を再現しました（図 2）。

さらに、スーパーコンピューターによる大規模計算を活用し鑄造充填過程から初期凝固段階までの全過程を解析した結果、気泡の生成・移動・圧縮・封じ込め挙動を時系列で追跡することで、これまで予測が不可能とされていた鑄巣発生部位の時系列特定に世界で初めて成功しました。さらに、非定常凝固を伴う鑄巣の微細形状を可視化解明し、従来の手法では観察不可能であった鑄造欠陥形成メカニズムの詳細を明らかにしました（図3）。

実際の量産品の X 線 CT（コンピュータ断層撮影）計測データとの比較検証では、高分解能ボクセル（172 μm ）を用いた空間グリッドベースの一致率評価により、鑄巣発生位置の空間一致率が最大 60%に達し、予測鑄巣率 0.42%は実測値 0.26%と良好な対応を示しました（図4、図5）。また、メッシュ構造の最適化・対称モデリング・スリーブ部の分割解析といった計算効率化手法を導入し、フルドメイン解析と比較して計算時間を最大約 55%削減することにも成功しました。

今後の展開

本研究で開発した DiecastCompressibleInterFoam は、ダイカストアルミニウム製品の欠陥予測とプロセスフィードバックに有効であり、製品設計のフロントローディングと量産時の品質保証に大きく貢献するものです。シミュレーションにより製造前に欠陥発生リスク箇所を特定できるため、物理的な試作回数を大幅に削減し、開発期間の短縮とコスト低減が期待されます。

今後は、現在の解析が対象としている充填過程に加え、増圧工程における圧力伝播と引け巣（シュリンケージ）の予測への拡張を進めます。また、酸化膜形成に基づく水素ガス析出モデルを統合し、ガスポロシティと引け巣の両方を包括的に予測できるフレームワークの構築を目指します。

さらに、本研究で蓄積された High-Fidelity CFD の大規模シミュレーションデータを教師データとして活用し、AI・ディープラーニング等の機械学習機能を実装することで、鑄造欠陥予測精度の飛躍的な向上が期待されます。具体的には、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）等の深層学習モデルにより、鑄造条件（射出速度、金型温度、溶湯温度等）と鑄巣発生パターンの相関を学習させることで、従来の CFD 解析では数日を要していた欠陥予測を数秒オーダーで実行可能とするサロゲートモデルの構築を目指します。これにより、量産環境でのリアルタイムプロセス制御や、射出条件の最適化に適した高速欠陥予測システムの実現が見込まれます。オープンソースソフトウェアとして開発されている本ソルバーは、学術研究機関や中小製造業がライセンス費用の制約なく利用・拡張できるため、AI 技術との融合も含めた産学連携によるダイカスト技術の更なる高度化が期待されます。

【謝辞】

数値計算の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ「AOBA-B」等のスーパーコンピューティングリソースを利用して実施しました。また、東北大学流体科学研究所のFUJITSU AFI-NITY スカラ並列計算機を一部使用しました。

【用語説明】

- 注1. High-Fidelity (高忠実度) シミュレーションとは、より多くの物理現象を精緻に再現する高精度計算手法を指す。
- 注2. 鑄巣 (ポロシティ) : 鑄造工程中に内部に形成される空洞や気泡による欠陥。製品の強度低下や破損の原因となる。
- 注3. X線 CT (コンピュータ断層撮影) : X線を用いて製品内部の三次元構造を非破壊で可視化する計測技術。
- 注4. VOF (Volume of Fluid) 法 : 気体と液体の界面を追跡する数値解析手法。各計算セルにおける流体の体積分率を追跡することで、気泡の生成や移動を可視化できる。
- 注5. LES (Large Eddy Simulation) : 乱流の大規模渦を直接計算し、小規模渦のみモデル化する高精度乱流解析手法。
- 注6. OpenFOAM : オープンソースの流体解析ソフトウェア。ソースコードが公開されており、学術研究機関や製造業で広く使用されている。

【論文情報】

タイトル : Visualization and Validation of Air Entrapment and Porosity Formation in Compressible Multiphase High-Pressure Die Casting

著者 : Hideaki Yamada, *Jun Ishimoto, Fumikazu Sato, Yoshikatsu Nakano

*責任著者 : 東北大学流体科学研究所 教授 石本 淳

掲載誌 : International Journal of Metalcasting

DOI: 10.1007/s40962-026-01946-y

URL: <https://doi.org/10.1007/s40962-026-01946-y>

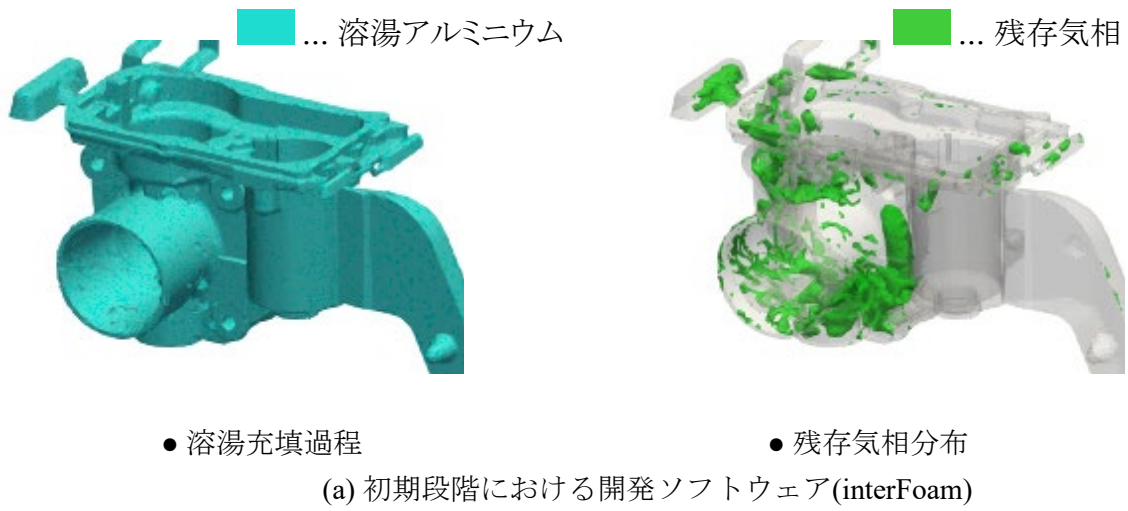


図 1. 鋳造解析専用ソフトウェア開発の変遷（溶湯混相流体の圧縮性を考慮し、凝固過程をシミュレート可能なソフトウェア開発に成功した）

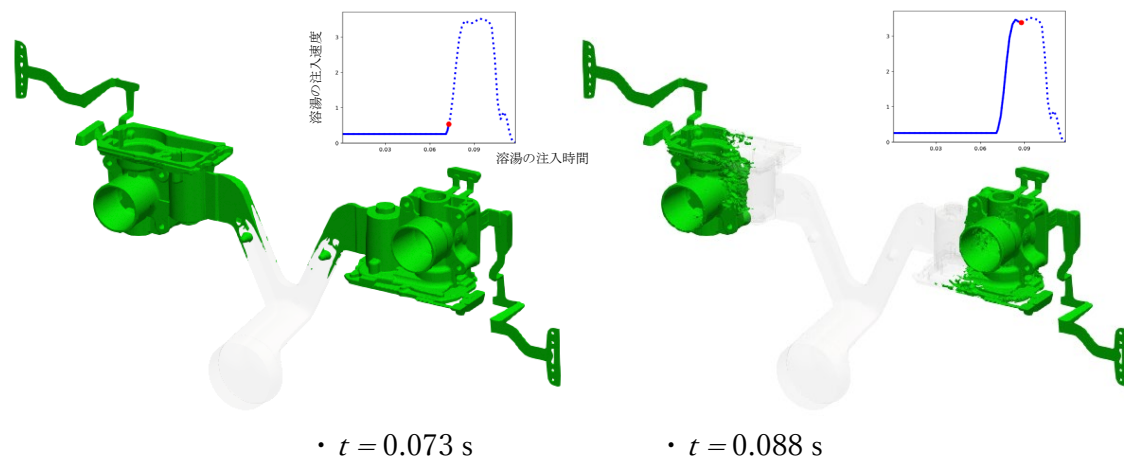


図 2. ソフトウェア DiecastCompressibleInterFoam による、残留空気予測に関する計算結果. 空気と溶湯の界面を緑色の界面として可視化することで、残留空気の挙動を詳細に分析することが可能となりました。

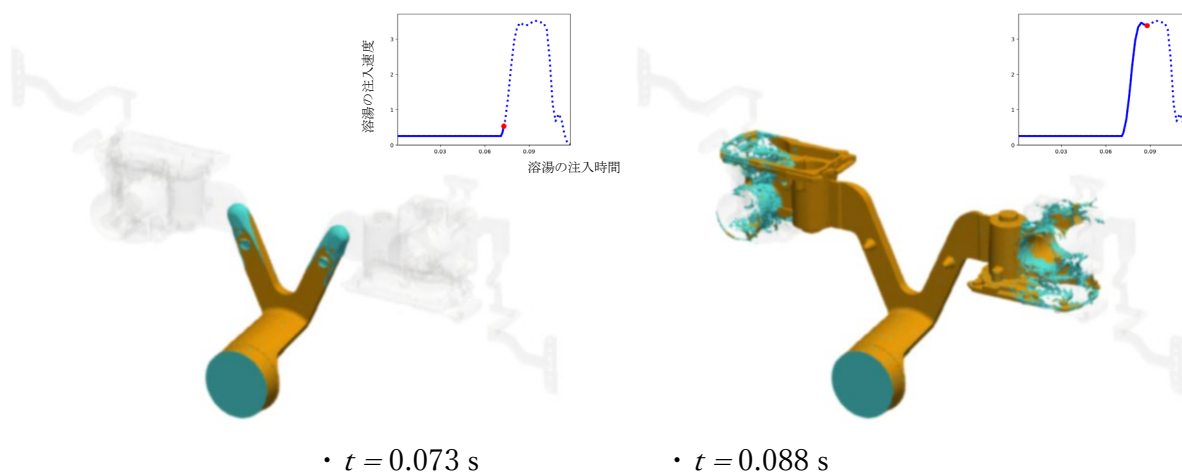
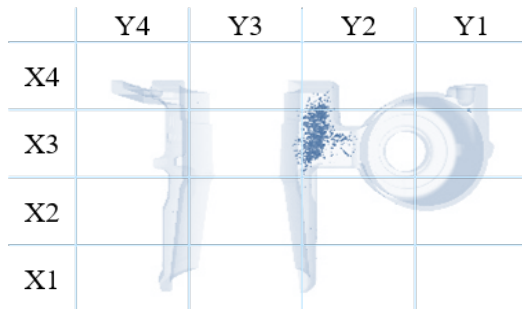
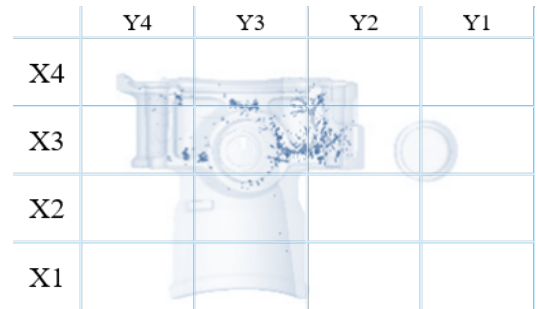


図 3. DiecastCompressibleInterFoam による、充填・凝固プロセスに関する計算結果. 溶湯充填がまだ進行中の段階で、金型接触面や薄肉部において凝固(オレンジ色の領域)が開始することを示しています。溶湯は部分的に凝固した領域中や周囲を流れ続け、その領域が気泡閉じ込めの核生成部位となり得ることを明らかにしました。



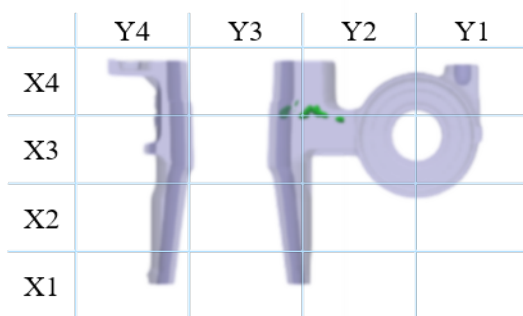
• Z2 断面



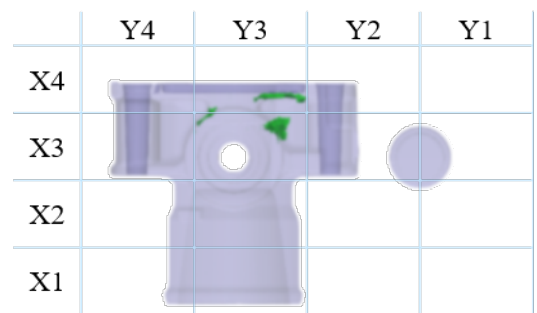
• Z1 断面

図4 実铸造品における铸巢形成に関するX線CT画像計測結果. 量産品の中から代表的な製品を選定し、X線CTを用いて内部铸造欠陥の分布を可視化しました。CT画像により、欠陥の位置・形状・大きさが明確に把握できました。

。



• Z2 断面



• Z1 断面

図5 ソフトウェア DiecastCompressibleInterFoam を用いた铸巢発生部位と铸巢形状に関するシミュレーション予測結果. 実铸造品に対応する位置における铸巢形状・残留空隙率と比較することで、シミュレーションの精度を定量的に評価したところ、铸巢の空間的一致率は60%に達し、全体の空隙率はCT画像による計測結果とほぼ一致しました。

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学流体科学研究所

教授 石本 淳

TEL: 022-217-5271

Email: ishimoto@alba.ifs.tohoku.ac.jp

URL: <https://mfelifstohoku.org/>

（報道に関すること）

東北大学流体科学研究所

国際研究戦略室（広報）

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp