

OpenFOAM®を用いた鋳造シミュレーションの解析事例紹介

高橋昌伸ⁱ

Introduction of Casting Simulation Using OpenFOAM

Masanobu TAKAHASHI

鋳造は古代から行われている金属加工技術であり、現代においても機械工業の分野で重要な技術となっている。鋳造の過程で溶融した金属を金型に流し込む際には、金属の溶融や凝固および充填時の残留空気と発生ガスの巻き込み等の複雑な現象を伴う。本稿では、鋳造の過程で溶融金属を充填する際の金型内部における溶融金属の流動(湯流れ)と残留空気の巻き込み挙動の再現を目的とした流体シミュレーションを、オープンソース CFD ソフトウェアの OpenFOAM®を用いて解析した事例を紹介する。

(キーワード): CFD, 鋳造, OpenFOAM, AMR

1 はじめに

鋳造は、古代から行われている金属加工技術の一つであり、紀元前 4000 年頃にメソポタミアで始まったと言われている¹⁾。現代においてもエンジンの部品には鋳造で作られたものが多く使われており、機械工業の分野で重要な金属加工技術となっている。鋳造の過程で起こる現象は非常に複雑で、溶融した金属を金型に流し込む際には、金属の溶融や凝固および充填時の残留空気と発生ガスの巻き込み等が生じる。これらの現象を実験で観察するには多大な労力と費用を要し、非常に困難である。一方、近年、鋳造に特化した商用の鋳造解析システムも多く開発されており、現場への鋳造解析システムの導入も進んでいる。本稿では、まず、代表的な商用の鋳造解析システムの特徴について紹介するとともに、オープンソース CFD ソフトウェアの OpenFOAM®の特徴についても紹介する。次に、鋳造の過程で溶融金属を充填する際の金型内部における溶融金属の流動(湯流れ)と残留空気の巻き込み挙動の再現を目的とした流体シミュレーションを、OpenFOAM を用いて解析した事例を紹介する。

2 商用の鋳造解析システムと OpenFOAM の特徴

本章では、代表的な 5 つの鋳造解析システムと OpenFOAM の特徴を比較し、OpenFOAM を鋳造解析に適用する際の優位性について述べる。

2.1 CAPCAST®

CAPCAST²⁾は、有限要素法を用いて高精度に鋳造現象の予測ができる鋳造シミュレーションシステムである。CAPCAST の主な特徴は、高精度複雑大物形状の鋳物、多数に分割された鋳型、複雑な冷却系、見切り面等の有限要素法メッシュを同時かつ高速に作成できる点や、湯切れ、凝固、変形解析を同一モデルで連続的に実施できる点である。また、湯流れ解析では、気液二相流を考慮したシミュレーションが可能である。

2.2 ProCAST®

ProCAST³⁾は、有限要素法を用いた高精度鋳造解析ソフトウェアである。ProCAST の主な特徴は、有限要素メッシュの優れた形状再現性により充填、凝固といった一連の鋳造プロセスの評価や、熱応力解析による製品の变形予測が可能となる点である。充填時の残留空気や発生ガス等の気相の流れについては考慮されていない。

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム コンサルタント

2.3 FLOW-3D® Cast

FLOW-3D Cast⁴⁾は、汎用3次元熱流体解析ソフトウェア FLOW-3D を解析ソルバに用いており、解析条件の設定を容易にするユーザーインターフェイスを備える鋳造解析専用ソフトウェアである。FLOW-3D Cast の主な特徴は、凝固収縮巣、湯回り不良、空気巻き込み量などの鋳造欠陥をはじめ鋳型温度分布、鋳型溶損、熱応力変形などを予測できる点である。また、直交メッシュでありながら部分的にメッシュを細かくする“キャビティ適合メッシュ”と呼ぶメッシング技法を採用することで、高精度・高効率な大型薄肉鋳物のシミュレーションを可能にしている。

2.4 Altair Inspire™ Cast

Altair Inspire Cast⁵⁾は、有限要素法ベースの鋳造シミュレーションソフトウェアである。Altair Inspire Cast の主な特徴は、シンプルかつ高速な溶湯充填および凝固のシミュレーションにより、巻き込み巣、引け巣、湯境などの鋳造プロセスの不具合を予測する点である。また、空気 - 金属の二相モデルを使用して計算が行われるため、エアートラップ予測の際、充填時のガスの巻き込みが適切に考慮される。

2.5 JSCAST

JSCAST⁶⁾は、各種鋳造プロセスにおいて、溶けた金属の湯流れおよび凝固のシミュレーションのためのパッケージソフトウェアである。JSCAST の主な特徴は、様々な鋳造プロセスに対応し、巣や湯回り不良など多種多様な鋳造欠陥を予測する点や従来見えなかった湯流れ、凝固の形態が可視化できる点である。

2.6 OpenFOAM

OpenFOAM⁷⁾は、非圧縮性熱流体解析、圧縮性熱流体解析、多相流解析、電磁流体解析および粒子追跡計算などを行うことができるライセンスフリーのオープンソース CFD ソフトウェアである。OpenFOAM を鋳造解析に用いるメリットは、大規模高速・並列計算に対応している点、非構造格子に対応しており、更に、溶融金属の先端を動的な適合格子細分化 (Adaptive Mesh Refinement : AMR) 法により高解像度で捉えることができる点であり、これは他の商用の鋳造解析システムには無い機能である。なお、動的な適合格子細分化の機能は、六面体格子

のみで使用可能であるが、複雑な形状に対しては、STL フォーマットの CAD データから OpenFOAM の自動格子生成メッシャー snappyHexMesh の使用により自動で静的な適合格子細分化が可能である。これ以外の利点としては、オープンソースのためソースコードレベルでの物理モデルの追加が可能で、専用ツールとして開発・設計解析にカスタマイズすることができる点、商用ソフトウェアと比べて大規模な並列計算に対するライセンスコストがかからない点などが挙げられる。一方、インストールの複雑さやマニュアルの整備が十分でない点があるが、当社では導入コンサルティングサービスを提供することでユーザー負担の軽減を図っている。

表 1 に、鋳造解析に必要な機能を各ソフトウェアで比較した一覧を示す。OpenFOAM は、「導入コスト」や「動的な適合格子細分化」の機能および「カスタマイズ性」で優位性があり、それ以外の機能についても、他の鋳造解析専用ソフトウェアと比較して遜色がないことが分かる。

表 1 各ソフトウェアの機能の比較

	CAPCAST	ProCAST	FLOW-3D Cast	Altair Inspire Cast	JSCAST	OpenFOAM
導入コスト	△	△	△	△	△	○
非構造格子	○	○	-	○	-	○
動的な適合格子細分化	-	-	-	-	-	○**
気液二相流解析	○	-	○	○	-	○
凝固・変形解析	○	○	○	○	○	○*
鋳型との熱連成解析	○	○	○	○	○	○
大規模高速・並列計算	-	○	○	-	○	○
カスタマイズ性	-	-	-	-	-	○

○：良または対応、△：並、-：不可または未対応、○*：カスタマイズにより可、

○**：六面体格子でのみ可

3 溶融金属の充填シミュレーション

3.1 計算モデル

図 1 に示す計算体系において、溶融金属の充填シミュレーションを行った。流入面から z 方向に 373.15[K]の溶融金属を 0.03[m/s]で流入させ、流出面は 298.15[K]で大気圧開放とした。それ以外の面は便宜上、断熱条件とした。なお、溶融金属の物性は仮想的な値を使用した。

本計算で使用した OpenFOAM のバージョンは v1712 であり、ソルバは compressibleInterDyMFoam

(圧縮性の気液二相流の気液界面を VOF (Volume of Fluid) 法と動的な適合格子細分化法により追跡するソルバ) を用いた。また、格子の細分化レベルの上限値は 2 とした。

る。なお、本計算では、流入面と流出面以外の面を断熱としたため除熱されにくい条件となっており広範囲の部分が高温となっている。

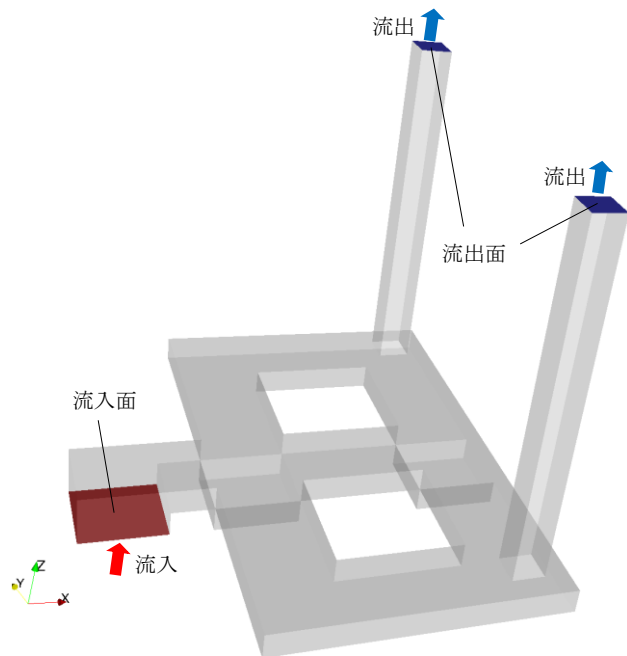
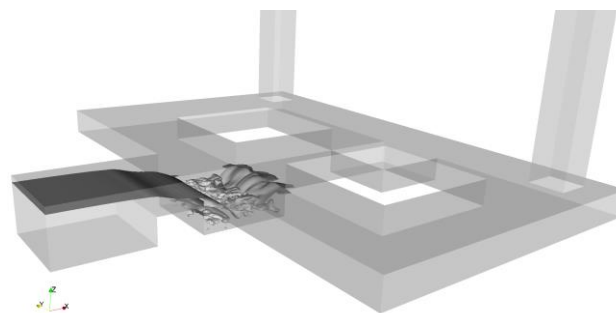


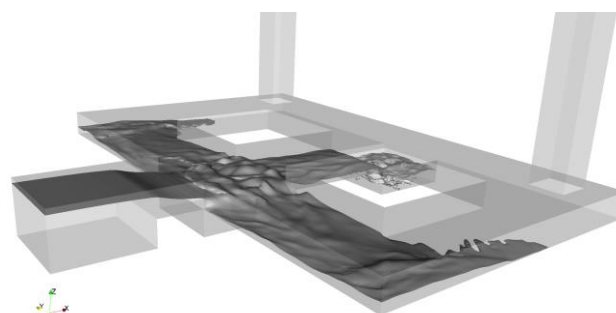
図 1 計算体系と境界条件

3.2 計算結果

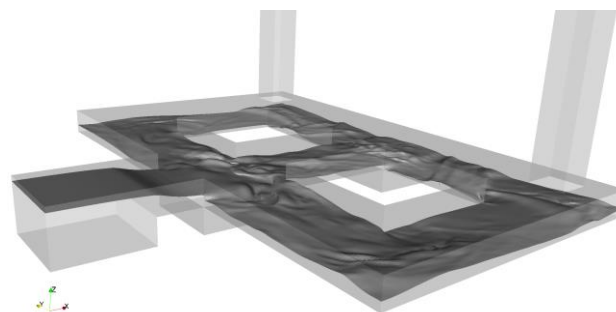
図 2 に熔融金属の充填開始から 0.8[s], 1.6[s], 2.4[s] の熔融金属先端の分布を示す。熔融金属先端 (熔融金属と気相の界面) の分布は、熔融金属の体積率が 0.5 の等値面を描画したものである。また、図 3, 図 4, 図 5 にそれぞれ熔融金属の充填開始から 0.8[s] の熔融金属先端と細分化格子の分布, 熔融金属先端と気相の速度分布, 熔融金属先端と温度分布を拡大したものを示す。図 2 から、流入面から流入した熔融金属は、まず、最初の凹部に充填され、充填開始から 1.6[s] で水平方向のほぼ半分の領域まで充填されている。充填開始から 2.4[s] で、水平方向の全域に熔融金属が充填されていることが分かる。また、図 3 から、熔融金属先端近傍の領域で格子が細分化されており、熔融金属のみの部分と残留空気のみ部分では格子は細分化されていないことが分かる。これによって、比較的少ない格子数で高解像度の計算をすることが可能となっている。また、図 4 から、熔融金属が残留空気を巻き込んで流動している様子が捉えられていることが分かる。さらに、図 5 から、熔融金属先端周辺で温度が上昇していることが分か



(a) 0.8[s]



(b) 1.6[s]



(c) 2.4[s]

図 2 熔融金属先端の分布

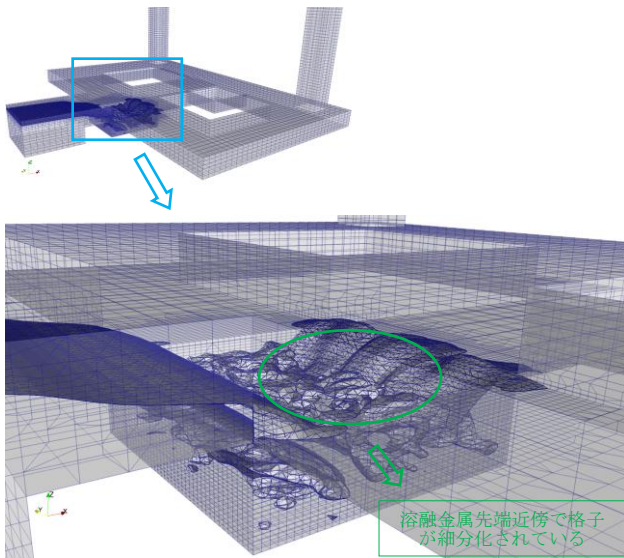


図3 溶融金属先端と細分化格子の分布 (0.8[s])

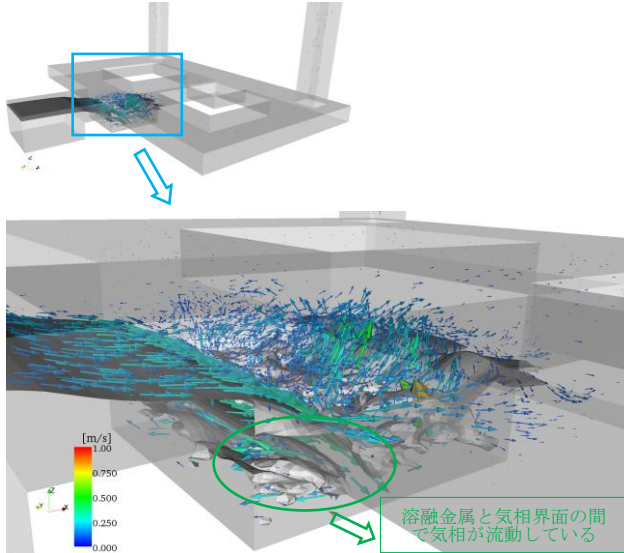


図4 溶融金属先端と気相の速度分布 (0.8[s])

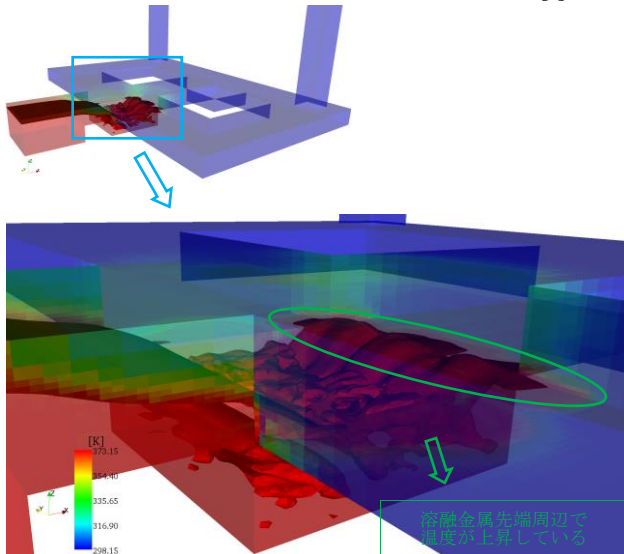


図5 溶融金属先端と温度分布 (0.8[s])

4 おわりに

本稿では商用の鋳造解析システムと OpenFOAM の特徴を比較し、OpenFOAM を鋳造解析に適用する際の優位性について述べた。また、溶融金属の充填シミュレーションを OpenFOAM を用いて行い、定性的に妥当な結果が得られることを示した。今後は、粘性の温度依存性を考慮することにより、溶融金属の凝固を再現することや発生ガスのモデル化及び溶融金属と金型の熱連成解析等を行うとともに、定量的な妥当性の検証も行い、OpenFOAM による鋳造解析の高度化を進めていく予定である。

引用文献

- 1) <https://foundry.jp/casting-related-information/history-of-casting/>
- 2) <https://www.capcast.co.jp/software/>
- 3) https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/4753/procast.pdf
- 4) <https://www.flow3d.co.jp/products/flow-3d-cast/index.html>
- 5) <https://solidthinking.jp/product/inspire-cast/>
- 6) <http://www.qualica.co.jp/service/manufact/design/jscast/index.html>
- 7) <https://www.openfoam.com/>

OpenFOAM® は ESI グループ OpenCFD 社の登録商標です。

CAPCAST® は株式会社 CAPCAST の登録商標です。ProCAST® は ESI グループの登録商標です。

FLOW-3D® は Flow Science 社の登録商標です。

Altair Inspire™ は Altair Engineering 社の商標です。