鑄造シミュレーション技術の現状と 今後の課題*

Status and Future Trends of Casting CAE

前田安郭**

Yasuhiro MAEDA

Key words computer simulation, mold filling, solidification, molding, sand core, casting defects

1. はじめに

鑄造工学のシミュレーションは、コンピュータの積極的な利用やデジタル化の中で鑄造 CAE として、各種鑄造プロセスや諸現象の解明、鑄造欠陥の予測、最適操業条件の探索などに利用されている。湯流れ・凝固シミュレーションをはじめとする鑄造 CAE システムは、すでにベンダー各社から専用のソフトウェアが販売され、適切に使用さえすればある程度有用に活用できる状況になっている。その他にも、製品形状、品質、性状等のデータを管理するデータベース技術、鑄造方案を支援するエキスパートシステム、鑄造用 CAD システム、模型製作をサポートする CAM、砂型および中子造型シミュレーション、また品質管理、最適化ツール、制御システムやコントロールユニットといったあらゆる局面においてデジタル化が進んでいる。本稿では、鑄造 CAE の中心である湯流れ・凝固シミュレーションの技術動向と今後の課題について、また最近注目を浴びつつある中子や主型の砂型造型シミュレーションについて検討する。

2. 鑄造 CAE システムの動向

図 1 に示すように、湯流れ・凝固シミュレーションは、1960 年代の 2 次元凝固解析から始まり、3 次元への拡張、引け巣予測手法の開発、高速化、大規模モデル化等を経て、また 1980 年代になって湯流れ解析が登場して、同じく 3 次元化、高速化、大規模モデル化等を経て、現在はほぼ実用化の域に到達しつつある。さらに熱応力解析などその他の解析についても、現在開発が進んでおり、近い将来

に実用レベルで活用されると推測される。

鑄造シミュレーションは、基本的にすべて 3 次元解析で実行されている。これは、他分野と比較すると、最初の 2 次元シミュレーション技術の運用が遅れた分、3 次元化がスムーズに進んだ結果といえよう。また、ハードウェアの進化とともに、かつてはコンピュータ能力の不足から実現できなかった理論が次々と適用できるようになり、鑄造 CAE の高機能化や高性能化が進んでいる¹⁾。

3. 湯流れ・凝固シミュレーション

3.1 支配方程式と離散化手法

鑄造 CAE の中心は、湯流れ・凝固解析であり、その支配方程式は、連続体力学における質量、運動量、エネルギーの保存則である。多くの場合、溶湯をニュートン流体の非圧縮性粘性流体として単相層流の伝熱凝固を伴う流れ解析を行い、充てん完了後に凝固解析を行うスキームである。その他ケースとして、半溶融・半凝固鑄造プロセスのための非ニュートン流体解析、キャビティ・鑄型内の気体流れ計算を加味した気液 2 相流解析、スリーブ内プランジャ移

*原稿受付 平成 22 年 1 月 21 日

**海上保安大学校海上安全学講座（広島県呉市若葉町 5-1）

前田安郭

1991 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。豊橋技術科学大学工学部助手、名古屋大学大学院工学研究科助手等を経て、2001 年海上保安大学校助教授、2004 年より同大学校教授。湯流れ・凝固および造型の鑄造シミュレーションに従事。工学博士。

図 1 鑄造 CAE の動向

図2 従来メッシュとPMメッシュでの充てん状況比較

動や取鍋カップの傾動を考慮した移動境界解析、ダイカスト高速射出を想定した乱流解析なども開発されているが、まだ実験との検証が十分であるとは言いがたい。また計算時間も層流解析に比べ長くなることから、今後のハードウェア進歩とともに進展し検証されると推測される。

支配方程式が連続体力学にもとづいているため数値計算には離散化が必要であり、大別すると有限差分法（有限体積法）と有限要素法がある。一般的には、有限要素法は、形状近似が良いがプログラムが複雑でメッシュ作成が困難、一方、有限差分法は、プログラムが単純でメッシュ作成も容易だが形状近似が悪いといわれていた。しかし、現在のソフトウェアにおいては各種改良が加えられ両者の差はほとんどなくなっている。有限要素系では自動メッシュプログラムによる性能向上によりスムーズな格子作成ができるようになってきている。また差分系の解析では、構造格子と非構造格子との混合格子による解析や、図2に示すポーラスメディア（PM）法を用いた解析¹⁾が行われるようになってきている。PMメッシュを採用すると斜め羽根での階段状近似による過剰な減衰が改善された精度良い結果となる。また大きめのメッシュが採用できるため、CPU時間短縮や省メモリ化がはかれることから、主流になりつつある方法である。

3.2 ソルバと数値解析技法

支配方程式の数値解法としては、SOLA法をベースにしている場合が多い。また鑄造湯流れでもっとも影響力の大きい現象が自由表面であり、自由表面追跡法にはVOF法が主流である。自由表面の追跡法については、数値流体

力学（CFD）分野からのVOF法の改良版などが登場してきている。また多くの湯流れ解析ソルバは空間微分に対して1次精度の差分を採用しているが、高次精度差分を採用するCIP法を用いて湯流れ解析精度の向上を試みた報告²⁾³⁾もある。

これら数値解法に関する部分はブラックボックス化しており、ユーザからはわかりにくい。鑄造CAEを適切かつ有効に活用するためには、この部分を理解することが肝要である。またCFD分野で開発された有用な解法が必ずしも鑄造分野でも有用であるとは限らず、実験結果との検証が必要であることは言うまでもない。そのためX線を用いた直接観察をはじめとする可視化技術⁴⁾は特に重要である。

最近の傾向としては、マルチコアCPUを搭載したPCが安価に導入できるようになり、並列化の開発をはじめとする高速化の開発が進みつつある。またGPUの進化に伴い、ユーザが使いやすいOpenGLベースのプリ/ポストプロセッサが開発されている。

3.3 材料データベース

溶湯などの物性値データに関しては、日本の材料データベースは諸外国に比べ貧弱な内容であるため、最近では金属材料物性値を計算するソフトJMatPro⁵⁾との連携を考慮した鑄造CAEソフトウェアも登場している。

3.4 解析精度の向上と機能追加

実際の鋳物品質に合致した解析精度を要求される機会が増え、厳密な表面張力計算や背圧の計算を行うソフトウェアの開発、その検証が進んでいる。具体的には、表面張力の計算には、CSFモデルを用いる方法²⁾⁶⁾などが登場し、検証が進んでいるところである。自由表面の解析精度の向上、表面張力の考慮に伴い、気泡巻き込み、湯回り不良、湯境、介在物、酸化膜、破断チル層など問題に対応する予測手法なども提案⁷⁾⁸⁾されている。

また、凝固時の引け巣欠陥予測に関しては、従来の等温度法、凝固時間、修正温度勾配（新山パラメータ）などを使う方法のほか、流動停止を対象とするものも登場している。さらに、従来のマクロ的な予測に対して、凝固収縮時のミクロポロシティ生成を予測する機能⁹⁾も一般的になりつつある。

さらに新たな試みとして、前述のSOLA法をはじめとする方法は支配方程式をオイラー法で解いているが、ラグランジュ法で解く粒子法（MPS: Moving Particle Semi-implicit）を用いた解析¹⁰⁾¹¹⁾も登場している。

また鋳型充てんの湯流れ・凝固解析ではないが、スプレー冷却によるダイカスト金型の温度予測の解析¹²⁾や、冷却水の解析報告¹³⁾などもある。これらは湯流れ・凝固解析のソフトウェアの有効活用の一例である。

4. 湯流れ・凝固との連成解析

4.1 ミクロ組織予測

単結晶、柱状晶およびデンドライト組織を中心に、CA（セルラ・オートマトン）法、MCA（改良セルラ・オート

マトン) 法, またフェーズフィールド法などによりマイクロ組織を予測するシミュレーション手法¹⁴⁾も開発されている。これらは伝熱・凝固解析と連成しており, まだ精度的に実用レベルであるとは言い難いが, 期待されている分野の1つである。

4.2 鋳造応力, 型応力解析

鋳造欠陥の中には鋳造応力に依存するものがある。有限差分系の解析の場合は温度履歴をエクスポートして市販の応力解析ソフトを用いることで, また有限要素系の鋳造CAEはダイレクトインターフェースを使うことで, 鋳造応力の解析, 鋳物冷却における収縮変形¹⁵⁾, 型応力, ひずみ計算などが解析されている。伝熱を伴う湯流れ→凝固→熱応力解析と順にシミュレーションを進めていくと応力解析を実施するときに必要な温度履歴に誤差が溜まるのは必然である。いかに精度良く前工程の温度解析のシミュレーションが実施できているかが重要である。

5. 中子/砂型造型のシミュレーション

鋳造プロセスにおいて中子や砂型は重要な役割を担うものの, デジタル化, シミュレーションに関しては湯流れ・凝固解析に比べ大きく遅れている。最近になって, 固気2相流解析と粒子運動方程式を連成させた計算で, 中子のブロー造型をシミュレーションするもの¹⁶⁾も出てきた。ここでは中子および砂型造型に関連するシミュレーションについて検討する。

5.1 鋳枠への砂充てんプロセスのモデル

ブロー造型のように圧縮空気を利用する造型方法は, 空気流で砂を運び鋳枠を充てんするとともに, 圧縮空気は, 形成する充てん砂層に対して造型の圧縮力としても作用して砂圧縮も同時に行う非常に複雑なプロセスである。一連の挙動を, 「空気が砂を運ぶ」砂の充てんプロセスと, 「圧縮空気が砂層をつき固める」圧縮プロセスに分けて考える。

鋳枠あるいはコアボックスへ圧縮空気などで砂を充てんさせる過程は, 砂と空気の混相流れとしてモデル化でき, 大別すると, 下記となる。

- 砂も空気と同様の流体として取り扱うモデル
 - ・砂と空気が混ざり合った1流体モデル
 - ・砂と空気の2流体モデル
- 砂を固体, 空気を流体とするモデル

砂も流体方程式で解く前者の方法は, 先行している湯流れ解析と同様のオイラー系メッシュや解析手法が採用できる利点があることから, バンダーソフトはこのタイプが多い。しかし, 流体方程式モデルを用いる場合は, 本来固体である砂を流体方程式で表現するために流体の粘性係数や動粘度といった未知の流体物性値を計測する必要がある, また造型固有の砂粒子の圧縮充てんメカニズムの考慮ができない, などの基本的な問題点がある。最近, 実測の流動挙動に一致するように充てんプロファイルを使用するなどのさまざまな工夫や数値解析テクニックにより, 比較的充てん密度が高くないケースでは実用的にも使用でき

図3 生型砂のHard-core/Soft-shell モデリング

る¹⁶⁾ようになってきた。

砂を固体粒子, 空気を流体方程式として固液2相流モデリングする後者の方法は, 前者に比べ物理現象に合致した方法である。代表的な解析方法として離散要素法 (DEM, Discrete Element Method) と呼ばれる数値解析法¹⁷⁾¹⁸⁾がある。DEMは, 粉体工学および土質力学分野において1990代に注目を浴びた方法で, 著者らもDEMをベースに生型砂のモデリング方法を提案^{19)~22)}するなど, 各種造型プロセスでの造型シミュレーションを試みている。

DEMは, 図3に示すように砂粒子を等方性弾性体でできた離散要素と仮定し, 運動方程式を順次時間積分することで各々の離散要素の挙動をラグランジュ法で解析する。そのため粒子同士の接触, 壁との衝突, 反発などのさまざまな力学特性を考慮できるとともに, 砂粒子の圧密化機構をそのまま考慮できる利点を有している。一方で, コンピュータハードウェアの制限 (低能力) から実個数でのシミュレーションができない, 計算時間がかかる等の問題があった。しかし最近のマルチコアCPUを搭載した安価なPCの登場により, 欠点を補う粗視化モデル²³⁾やGPUによる高速化²⁴⁾などの新開発が進み再び注目されつつある。

5.2 砂層の圧縮充てんシミュレーション

砂層に対して造型力を加えると砂層内の空隙がつぶされてみかけの体積が小さくなる。この現象は, スクイズ造型のみならず圧縮空気を用いるブロー造型, 流気造型, インパクト造型などにもみられる共通の圧縮充てん現象である。この現象のシミュレーションにはDEMが適している。著者らは, 図3に示す生型砂用のHard-core/Soft-shellモデリングを開発してDEMによる圧縮メカニズムに沿ったスクイズ造型や流気造型のシミュレーション方法を実施している。なお, Hard-coreは骨材を, Soft-shellは骨材表面に被覆している粘着層を意味している。

解析方法の詳細は文献^{19)~22)}を参照していただくとして, ここではその結果の一部を示す。図4は, 珪砂を骨材とする生型砂をφ50×170hの円筒鋳枠に自然落下で充てんした後の状態に対して, 上部より1.2MPaのスクイズ加圧を加え, 生型砂試験片φ50×50hを製作する過程を

図4 スクイズ造型時の圧縮充てん挙動の比較

比較したものである。図より、スクイズ加圧を加えることで5層は特に乱れることなく、各層がほぼ均一に圧縮されていく。骨材特性および粒度分布が異なるセラミックス砂 #650, #950 を用いた場合も、ほぼ同様なマクロ的充てん挙動であった。また圧縮充てんメカニズムに準じた充てん密度挙動²¹⁾²²⁾もシミュレーションでできることがわかった。

5.3 中子のガスに関するシミュレーション

中子に関連して、コールドボックス中子のガッシング(ガス硬化)解析や、ガッシング時の適切なガス流れを実現するための案を検討するソフトも登場している。また、鑄造時には、溶湯と接触した中子は反応ガスを生成し、適切にベントから排出できないときはガス欠陥となるが、この生成ガス流れのシミュレーションを行った報告²⁵⁾もある。

6. ま と め

鑄造 CAE の中心である湯流れ・凝固シミュレーションの技術動向について、また注目を浴びつつある中子や主型の砂型造型シミュレーションについて概観した。鑄造分野にはさまざまなプロセスや現象があり、それぞれに応じたシミュレーションやデジタル化手法が開発されつつあるが、解析精度と計算時間は大問題である。両者はトレードオフ関係にあるが、仮に計算時間を度外視したとしてもシミュレーションが実現現象を完全には捉えているとはいえず、さらなる精度向上が必要である。そのためには可視化をはじめとする正確な実現現象の把握が肝要で、実験および CAE 従事者が協力して、より良いものづくりへと発展していきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Y. Maeda and Y. Otsuka: High-Performance Simulation of Mold Filling Using Porous Media Method, Int. J. of Automation Technology, **2**, 4 (2008) 247.
- 2) T. Sakuragi: Mould Filling Simulation with Consideration of Surface Tension and Its Application to a Practical Casting

- Problem, Int. J. of Cast Metals Research, **18** (2005) 202.
- 3) 澤田朋樹, 安斎浩一: 高精度スキームを採用した直交差分法による湯流れ解析, 鑄造工学, **78** (2006) 629.
- 4) 大中逸雄, 杉山明, 木下文昭, 迫伸生, 朱金東: 湯流れの直接観察と数値シミュレーション, 日本鑄造工学会, 第 151 回全国講演大会講演概要集, (2007) 80.
- 5) JMatPro, <http://www.usi-asia.com/jmatpro/>
- 6) 平田直哉, 安斎浩一: 表面張力を考慮した湯流れ解析, 鑄造工学, **78** (2006) 636.
- 7) 柏井茂雄, 大中逸雄, 兼吉高宏, 朱金東: AC4C アルミニウム合金鑄物の湯境と湯じわの観察及び湯流れ解析による数値予測, 鑄造工学, **78** (2006) 245.
- 8) 桜木卓也, 中山一陽: ダイカストにおける湯境低減のための射出速度の最適化, 鑄造工学, **79** (2007) 592.
- 9) 久保公雄: ダイカストの湯流れ及び凝固シミュレーション, 鑄造工学, **78** (2006) 620.
- 10) N. Hirata and K. Anzai: Seamless Simulation from Fluid Flow to Solidification Using New Moving Particle Semi-Implicit (MPS) Method, Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes-XII, (2009) 229.
- 11) MPS-RYUJIN, (株)富士テクニカルリサーチ: http://www.ftr.co.jp/n/products/products_ryujin_fr.html
- 12) 李紹敏, 峯憲一郎, 三中西信治, 安斎浩一: 離型剤スプレー時のダイカスト金型表面温度の数値予測, 鑄造工学, **81** (2009) 123.
- 13) 中道隆, 富田高嗣: ポーラスメディア法の適用によるダイカスト金型内部冷却水の流れ解析, 日本鑄造工学会第 152 回全国講演大会概要集, (2008) 36.
- 14) D. Sun, M. Zhu, D. Raabe and C.P. Hong: Cellular Automaton-Lattice Boltzmann Model for the Simulation of Dendritic Growth with Melt Convection, Proc. of MCSP VII 2007, Edited by J. Jun-ze, et al. (2007) 249.
- 15) S. Kanou, K. Ogawa, A. Sato, I. Ohnaka, A. Sugiyama and F. Kinoshita: Estimation and Reduction of Deformation Defects in Steel Casting by CAE System, Proc. of MCSP VII 2007, Edited by J. Jun-ze, et al. (2007) 407.
- 16) B. Winartomo, U. Vroomen, A. Buhrig-Polaczek and M. Pelzer: Multiphase Modeling of Core Shooting Process, Int. J. of Cast Metals Research, **18** (2005) 13.
- 17) P.A. Cundall and O.D.L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, **29**, 1 (1979) 47-65.
- 18) Y. Tsuji, T. Kawaguchi and T. Tanaka: Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed, Powder Technology, **77** (1993) 79.
- 19) H. Makino, Y. Maeda and H. Nomura: Force Analysis in Air-Flow Press Moulding Using the Distinct Element Method, Int. J. of Cast Metals Research, **10** (1997) 171-175.
- 20) 前田安郭, 牧野泰育, 野村宏之: 3 次元離散要素法による生型砂のスクイズ造型シミュレーション, 鑄造工学, **75** (2003) 102.
- 21) 前田安郭, 丸岡洋介, 牧野泰育, 野村宏之: 粒度分布を考慮した離散要素法によるスクイズ圧縮シミュレーション, 鑄造工学, **75** (2003) 108.
- 22) Y. Maeda, Y. Maruoka, H. Makino and H. Nomura: Squeeze Molding Simulation Using the Distinct Element Method Considering Green Sand Properties, J. of Materials Processing Technology, **135** (2003) 172.
- 23) 酒井幹夫, 越塚誠一: 固気混相流における離散要素法の粗視化手法の開発, 粉体工学会誌, **45** (2008) 12.
- 24) 茂渡悠介, 酒井幹夫, 越塚誠一, 山田祥徳: GPU による離散要素法シミュレーションの高速化, 粉体工学会誌, **45** (2008) 758.
- 25) Y. Maeda, H. Nomura, Y. Otsuka, H. Tomishige and Y. Mori: Numerical Simulation of Gas Flow through Sand Core, Int. J. of Cast Metals Research, **15** (2002) 441.