

金属製造プロセスにおける 流動・凝固現象の連成解析

平田直哉¹⁾ 安齋浩一²⁾

1. 緒言

鋳造法は金属材料を液相線以上まで加熱して液体状態(溶湯)とした後に、鋳型へ注湯することで製品を成形する金属製造プロセスである。鋳造プロセス中は流動・伝熱・凝固・偏析・変形や化学反応といった様々な現象が生じ相互作用するため、現在利用されている金属製造プロセスのなかでも最も複雑なプロセスのひとつといえる。

高品質の鋳造製品を歩留まり良く安価・高速に製造するためには、プロセス中に生じている現象を正しく理解し、適切に制御する必要がある。しかし、鋳造プロセスでは様々な複合現象が相互作用している上、高温かつ不透明な鋳型の中での凝固プロセスであるため、観察や測定が困難であることが多く、未だ理解が十分ではない点が多い。そのような中で、コンピュータを用いた数値解析¹⁾による現象理解および製造条件検討は、現在では欠かせない技術となっている。

本報では、このような複合現象の考慮が不可欠な鋳造プロセス解析に対して従来用いられてきた手法における課題と、粒子法²⁾を用いた取り組みを紹介する。なお、本報では従来多く用いられてきたオイラー系格子法を「従来法」と呼び、特に断りのない場合は有限差分法や有限体積法を示す。一方、ラグランジュ系メッシュレス法(特に連続体を離散化するための手法のひとつ)のことを「粒子法」と呼ぶことにする。

2. 物質の移動を伴う複合現象の解析

現在、従来法を基にした鋳造解析ソフトウェアは既に商品化されており、湯流れ解析、凝固解析および熱応力解析などがパッケージ化されている³⁾。その多くは、湯流れ解析中の潜熱放出を考慮した伝熱解析や、凝固収縮に対する溶湯補給を考慮した引け巣予測、湯流れ・凝固解析後の温度分布を利用した変形予測のように、様々な現象の相互作用を考慮した解析が可能である。

本来であればできるだけ多くの現象を同時に扱い、相互作用を考慮した解析を行うことが理想である。しかし、実際は上に挙げたように高々2~3現象の相互作用を考慮する程度に止まっている。これは、主として従来法がオイラー系の解析手法を基にしていることに起因する。従来法では空間を離散化した「入れ物」を計算要素として用いる。この「入れ物」は、有限差分法や有限体積法では「格子」や「セル」などと呼ばれる。一般の有限要素法においても「節点」と「要素」を用いて同様の「入れ物」を定義する。各解析手法毎に様々な形状の要素が考案されているが、いずれの場合もまずは解析対象領域内に有限個の要素を配置し、その中にどのような情報を記録し、計算するかを定義する。要素内には物質の存在形態や量、温度、圧力、速度などの情報が記録されており、支配方程式を満足するように近隣要素との間で計算が行われる。従来法では、一般に特定の近隣要素との間に相互作用の計算が定義されるため、要素の位置を大きく移動・変形させることはほとんどない。そのため、流動解析のように物質が大きく移動する現象を扱う際は、要素そのものを移動させるのではなく、要素内に何らかの方法で定義した物質の存在情報(要素内の充填率など)を変化させて移動を表現する。このように、従来法では物質の移動そのものが間接的な手法によって表現されるため、移動を伴う複合現象を扱うプログラムは複雑化し、連成させる現象を増やすごとにその複雑さは増大する。

一方で、粒子法は物質そのものを離散化し計算要素とする。物質の存在は要素の存在で表され、通常はある一定質量を有する代表点として定義される。なお「粒子法」という名の通り球形を用いて要素が可視化される例が多いため、球形要素と誤解されることが多いが、一般的な粒子法において要素はあくまで連続体の代表点であり、形状情報は有しない。また物質の移動は要素の移動として直接的に表現するので、隣接要素は時間により変化する場合がある。そのため、粒子法では任意の要素間における相互作用計算が、各支配方程式に対して定義される。従って、任意の要素間に任意の支配方程式を適用することが可能であり、様々な複合現象を記

* 東北大学大学院工学研究科; 1)助教, 2)教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-1009)
Coupling Simulation of Flow and Solidification Phenomena for Manufacturing Processes of Metal Products; Naoya Hirata* and Koichi Anzai* (Department of Metallurgy, Tohoku University, Sendai)
Keywords: casting, flow simulation, solidification simulation, coupling simulation, particle method
2015年5月7日受理[doi:10.2320/materia.54.440]

述するのが従来法に比べ極めて容易な手法といえる。

このような粒子法の利点を生かした解析例として、以下に鋳造時の引け巣形成過程直接解析、および遠心鋳造における流動・凝固連成解析の例を示す。

3. 引け巣の形成過程の直接解析⁽⁴⁾

鋳造において代表的な欠陥に「引け巣」が挙げられる。これは金属が凝固する際に生じる収縮によって、鋳物内部もしくは外部に空洞や凹みが現れる欠陥である。時には空隙同士が連結することで強度や信頼性の低下を招いたり、気密性が損なわれるなど、製品品質に及ぼす影響が大きいため、その予測が極めて重要な鋳造欠陥のひとつである。

引け巣の主な発生原因は凝固収縮である。しかし、その発生箇所や形態の予測、およびその直接解析は難しく、従来法では鋳物の局所的な温度勾配や冷却速度を算出し、なんらかのパラメータを用いて間接的に評価することが多い。まず、伝熱を考慮した流動解析を行い、得られた温度分布を引け巣予測機能を有する凝固解析に引き渡して行う、という方法が採られることがほとんどである。しかし、実際は注湯中も薄肉部や端部は凝固が開始している可能性が高く、その凝固収縮が湯回りや最終的な鋳物の形状、温度分布、さらにはその後の変形に影響する可能性がある。

ここでは、注湯中に進行する凝固が、最終的な引け巣形状に及ぼす影響を粒子法により直接解析した例を示す。図1および図2は、高さ0.1 m、直径0.04 mの円柱の上に高さ0.1 m、直径0.03 mの円柱を積み上げた形の純アルミニウム鋳

物を、鋳鉄鋳型を用いて鋳造した場合の解析結果である。色は固相率を示しており、見やすさのため鋳物中央断面図を示している。また図1は4 sで注湯した場合、図2は同じ鋳型に14 sかけて注湯した場合である。図1は速やかに注湯したため、注湯完了後に全体的に凝固殻が成長している。その結果、鋳物内に大きな深い引け巣が生じている。一方図2は時間をかけて注湯したため、注湯している最中にも鋳物下部では凝固殻成長および凝固収縮が生じており、結果として凝固の指向性が強まり、引け巣は図1の場合よりも小さくなった。図3は最終的な引け巣形状を実験結果と比較したものである。計算結果はレイトレーシングソフト POV-Ray⁽⁵⁾を用いて可視化した。注湯速度による引け巣形状の違いだけではなく、最終的に得られた鋳物の高さの違いも良く再現できている。

ここで示した結果は、粒子法による伝熱・凝固解析と流動解析を連成させ、固相率増加による密度増加(すなわち要素が代表する体積の減少)を考慮したのみの単純な解析によるものである。従来法では一般に流動解析の結果を用いて凝固・引け巣予測解析を行うため、注湯中の凝固の指向性といった過渡現象の取扱いは困難である。一方で、粒子法では基本的にすべての解析を連成し同時に時間進行させるため、注湯中に生じる凝固殻の成長が、湯流れや伝熱等に及ぼす影響を同時に考慮することが容易である⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。今後、変形解析などを導入することで、鋳型への拘束や割れへの影響の予測も期待できる⁽¹²⁾。また収縮だけではなく膨張も同じアルゴリズムで取り扱うことが可能なため、球状黒鉛鋳鉄の膨張と

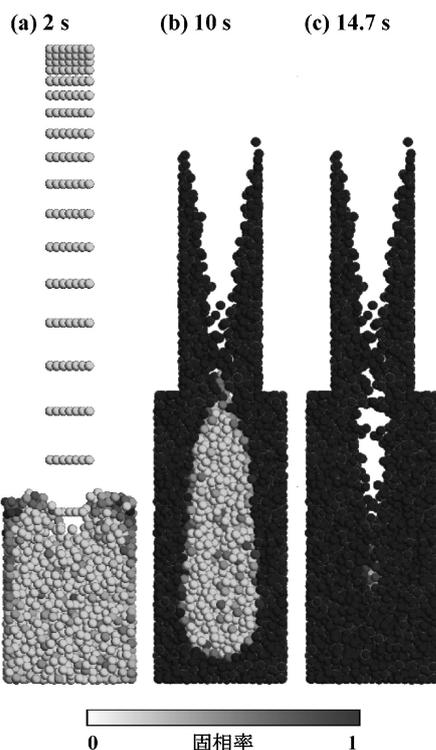


図1 凝固の進行と引け巣形成の解析結果： $t_{\text{pour}} = 4 \text{ s}$ 。

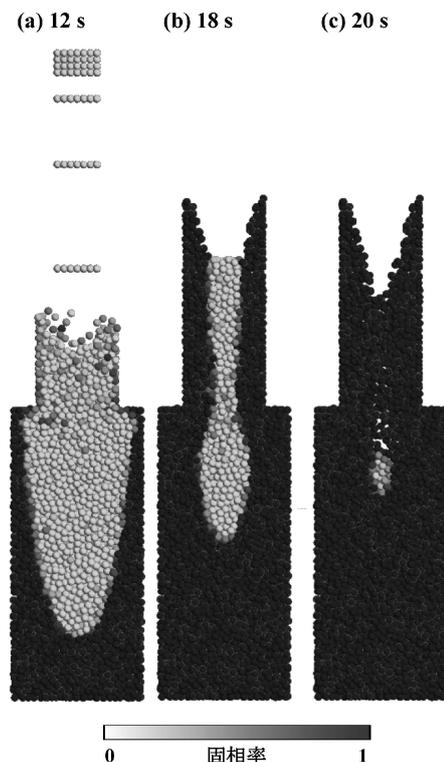


図2 凝固の進行と引け巣形成の解析結果： $t_{\text{pour}} = 14 \text{ s}$ 。

(a) 実験結果 (b) 計算結果 (c) 実験結果 (d) 計算結果
 ($t_{pour} = 4s$) ($t_{pour} = 4s$) ($t_{pour} = 14s$) ($t_{pour} = 14s$)

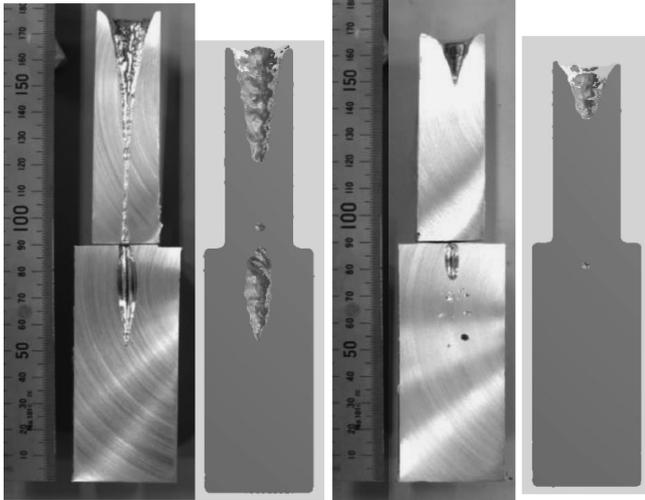


図3 粒子法による引け巣形状解析の可視化結果と、対応する実験結果の比較。

鑄型強度の関係を考慮することで、内部に生じる引け巣予測の高精度化なども期待されている。

4. 遠心鑄造の湯流れ・凝固解析⁽¹³⁾

次に、遠心鑄造の湯流れ・凝固解析例を示す。遠心鑄造は鑄型を高速回転させながら、その内側に溶湯を鑄込む鑄造法で、様々な長尺パイプ形状製品の製造に用いられている。引け巣の少ない緻密な鑄塊が得られる一方で、ラミネーション偏析といった欠陥がしばしば問題となる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。遠心鑄造品に生じる偏析欠陥は、自由表面のゆらぎや円周方向のせん断力による等軸晶の動きに起因すると考えられているが、実機におけるその場観察が困難なことなどから、水や透明有機物を用いた可視化実験が行われている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。一方で、実際の鑄物に近い物性値を用いた場合の挙動を予測するために、近年コンピュータを用いた数値解析によるアプローチも試みられているが⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾、なかでも回転する鑄型を直接表現することができ、凝固をはじめとする複合現象解析に適する粒子法が注目されている。ここでは、高速回転する鑄型に鑄鉄を鑄込んだ際の様子を解析した例を示す。

図4に凝固解析結果を示す。半径0.1mの時計回りに回転する鑄型に、充填率約50%となるように鑄鉄を鑄込んだ場合である。表示要素は溶湯要素であり、色は固相率を示している。従来法では回転する鑄型を直接表現するには複雑なプログラムが必要になるため、それに加えて凝固殻の成長を考慮することは極めて困難であるが、粒子法では鑄型要素を実際に空間内で回転させるだけで遠心鑄造プロセスを表現できる。なお今回示した結果はあくまで温度情報に基づいた固相率表示であり、固相率が1の要素に対して他の溶湯要素と同様に流動解析を適用しているが、溶湯が凝固するに伴い鑄型との相対位置を維持しながら回転する様子も、粒子法に

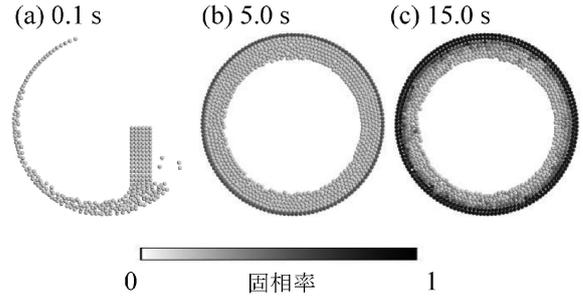


図4 遠心鑄造時の凝固殻成長解析結果。

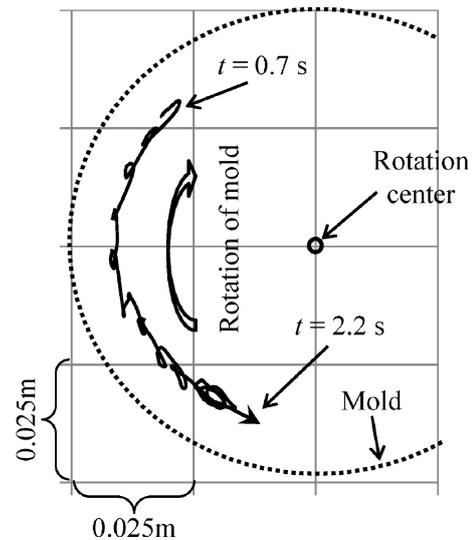


図5 回転する鑄型に対するある溶湯要素の相対位置の軌跡。

よれば直接的なモデル化が可能である⁽²¹⁾。

また、粒子法では物質の移動は要素の移動そのもので表されることから、特定の要素の追跡も容易である。図5はある溶湯要素の鑄型に対する相対位置を追跡した結果を示している。注湯完了直後の不規則な表面の揺らぎが落ち着く0.7sから2.2sまでの1.5s間の要素の軌跡を表しており、反時計回り(すなわち鑄型の回転に対し遅れる方向)に動いていることがわかる。これは江阪らの等軸晶の追跡を観察した実験⁽¹⁶⁾でも同様の報告がされており、本手法がある粒子の追跡に対しても有効であることを示している。ただし、前述のように粒子法における粒子はあくまで連続体の代表点であり、江阪らが報告した条件下では、溶湯は全体的にニュートン流体的挙動を示すため、本手法においても要素そのものの追跡のみにより妥当な結果を得ることができたことに注意が必要である。また今回示した結果は凝固収縮を考慮していない結果であるが、密度の温度や相変態に対する依存性を定義するだけで容易に導入可能であることは前述の通りである。凝固が進行するにつれ、固相の剛体(もしくは粘弾塑性体)としての挙動も考慮する必要があるが、そのような詳細な固相挙動に関する解析手法の開発は今後の課題である。

以上に示したように、粒子法によれば物質の移動を伴う複合現象を直接的に表現可能であり、また任意の要素間に任意のアルゴリズムを適用可能であることから、今後の拡張性も極めて高いことがわかった。

5. 最後 に

粒子法はマルチフィジックス解析や自由表面を有する流れ解析などにおいて特に有効と考えられており、その応用例や研究報告が近年急速に増加しているが、概念自体は1970年代から提唱されていた。従って、数値解析の歴史の中では、従来法と比べて極端に新しい手法ではないが、計算に要するメモリーや時間が膨大になるため、最近までほとんど日の目を見なかった。しかしコンピュータが急速に発達し、次第に実用レベルの解析が可能になってきた現在、その複雑複合現象解析に対するポテンシャルの高さから、製造業においても注目されるようになってきた。本報でも、従来法では取り扱いが困難とされてきた、物質の移動を伴う複合現象を含む金属製造プロセス解析に対し、粒子法の適用例および有効性について紹介した。

一方で、計算速度や精度、安定性といった基本的な解析技術は依然として従来法に及ばないケースが多く、現在は単純な流動や伝熱などで議論できる現象においては従来法が適する場合も多い。また、従来法と粒子法それぞれの有する長所・短所は様々なので、解析対象によってうまく使い分ける必要があることは今後も変わらないであろう。そのためには、それぞれの解析手法の特徴をよく知っておくことが必要である。

文 献

- (1) 越塚誠一：数値流体力学，培風館，(1997)。
- (2) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門，丸善，(2014)。
- (3) たとえば MAGMA Soft™， <http://www.scsk.jp/product/common/magmasoft/>， CAP Cast™， <http://www.capcast.co.jp/>， ADSTEFAN™， <http://www.adstefan.com/>， JSCAST™， <http://www.qualica.co.jp/jscast/>など。
- (4) 平田直哉，安斎浩一：铸造工学，投稿中。
- (5) <http://www.povray.org/>
- (6) N. Hirata and K. Anzai: Mater. Trans., **52**(2011), 1931-1938.
- (7) 一宮正和，酒井 謙：铸造工学会第162回全国大会講演概要集，**162**(2013)，104。
- (8) 一宮正和，酒井 謙：铸造工学，**85**(2013)，481-488。
- (9) 風間正喜，諏訪多聞：铸造工学会第162回全国大会講演概要集，**162**(2013)，105。
- (10) P. W. Cleary: Applied Mathematical Modelling, **34**(2010), 3189-3201.
- (11) 平田直哉，安斎浩一：铸造工学，**86**(2014)，127-135。
- (12) 平田直哉，安斎浩一，中川知和，堤 一之：铸造工学会第163回全国大会講演概要集，**163**(2013)，89。
- (13) 平田直哉，Y. M. Zulaida，安斎浩一：鉄と鋼，**99**(2013)，167-174。
- (14) 姜一求，大中逸雄：铸造工学，**69**(1997)，119-126。
- (15) 姜一求，大中逸雄：铸造工学，**69**(1997)，815-821。
- (16) 江阪久雄，平本潤一，宮原翔太，徳差 圭，篠塚 計：鉄と鋼，**97**(2011)，369-375。
- (17) 姜一求，大中逸雄：铸造工学，**69**(1997)，240-246。
- (18) K. S. Keerthiprasad, M. S. Murali, P. G. Mukunda and S. Majumdar: Metall. Mater. Trans. B, **42B**(2011), 144-155.
- (19) 鈴木 悠，岩井一彦：鉄と鋼，**99**(2013)，156-160。
- (20) 鈴木 悠，岩井一彦：鉄と鋼，**99**(2013)，161-166。
- (21) 平田直哉，安斎浩一：CAMP-ISIJ, **168**(2014)，807。

★★

平田直哉
2008年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
2008年- 現職
専門分野：铸造工学，プロセスシミュレーション
©铸造 CAE システム，新铸造プロセスおよび各種铸造品の信頼性向上に関する研究・開発に従事。

★★



平田直哉



安斎浩一