

アルミニウムの連続鋳造プロセスへの 数値シミュレーションの適用*

常川 雅功**

Application of Numerical Simulation to Aluminum Casting Process*

Masanori Tsunekawa**

1. はじめに

アルミニウム材料の製造メーカーにとって、熔融アルミニウムを凝固させ、下工程に供給できる高品質な鋳塊とする鋳造プロセスは基盤技術である。この鋳造プロセスは、工業的に数多く適用されているアルミニウム材料の出発点であり、鋳塊品質が最終製品の品質特性に大きな影響を及ぼすと言っても過言ではない。これまで、鋳造プロセスの開発には、試行錯誤による実験的な手法が主に用いられてきたが、近年のコンピュータ性能の著しい向上やソフトウェアの開発により、数値シミュレーション（以下、シミュレーション）が補助的に、あるいは主力として適用されるようになった。DC (Direct chill Casting) 鋳造プロセスにおける現象は多岐にわたり、溶解炉における地金の溶解や電磁力による溶湯攪拌に始まり、保持炉での溶湯処理によるアルカリ金属の化学的な除去、インライン脱ガス装置における水素ガスの除去や、ろ過装置における介在物の物理的な除去、そして、最後に、鋳型での溶湯の凝固（相変化）により鋳塊となるところまでが含まれる。これらの諸現象をモデル化してシミュレーションを適用し、新プロセスの開発や、操業条件の最適化、鋳塊品質の向上や安定化がなされている。

ここでは、DC 鋳造やCC (Continuous Casting) 鋳造に適用されたシミュレーションの事例を取り上げながら、国内外におけるアルミニウムの連続鋳造プロセスへのシミュレーションの活用について解説し、今後の展望についても述べる。なお、アルミニウム鋳物のシミュレーションに関しては割愛するが、いくつかのレビュー^{1), 2)}があるので、そちらを参考にされたい。

2. DC 鋳造プロセスのシミュレーション

DC 鋳造プロセスのシミュレーションは、1980年代から盛んとなり、当初はエネルギー保存則に基づく熱解析（凝固解析）のみであったものが、近年では、溶湯流動^{3), 4)}、溶質分布^{5), 6)}、デンドライト分布⁷⁾、熱応力や歪^{8)~10)}などDC 鋳造に関連した多くの現象を取り扱えるまでになった。溶湯流動や凝固伝熱、応力を連成解析できるPROCASTやABAQUAS, MAGMASOFTなど、また、ガス流体の燃焼反応を扱えるFLUENTなどのソフトウェアも市販されている。特に最近では、フリーの流体解析ソフトであるOpenFOAMを用いた解析例¹¹⁾も増えてきている。これらのソフトウェアでは、諸現象に関わる物理的な基礎式を離散化して、有限要素法や差分法により解き、得られた結果も高機能のポスト処理により見易く表示できる利点がある。

また、凝固伝熱、凝固組織形成のシミュレーションを実用展開するためには、平衡状態図など熱力学的なデータベースが必須であるが、多くの熱力学データベースを備えたThermo-Calcなどの統合型熱力学計算ソフトウェアや金属材料の物性値を計算できるJmatProなどのソフトウェアも市販されている。さらに、DC 鋳造における一次冷却や二次冷却に関する境界条件¹²⁾や固液共存域も含めた高温域における力学特性^{13), 14)}の定量化も進んでいることから、シミュレーションし易い環境が整いつつあると言える。シミュレーションによって実際に鋳造しなくとも事前に鋳造組織や応力の状態、変形の程度などを知ることができ、鋳塊割れや異常鋳造組織の対策、新規合金における鋳造条件の最適化などにシミュレーションが適用されている。

* 本稿の主要部分は、軽金属, **70** (2020), 285-291に掲載。

The main part of this paper has been published in Journal of The Japan Institutes of Light Metals, **70** (2020), 285-291.

** (株)UACJ R&Dセンター 第三研究部

Research Department III, Research & Development Division, UACJ Corporation

溶解から鋳造までのDC鋳造プロセスにおける諸現象についてシミュレーションが行われた例をFig. 1にまとめ、ここでは、それらのうちの一部を紹介する。

2.1 溶解炉

アルミニウムの鋳造工程では、主に溶解炉や保持炉に電磁攪拌装置（以下、EMS：Electro Magnetic Stirrer）が導入されていることが多い。このEMSの原理は、一方向に移動する磁場を炉内に発生させ、溶湯に生じる誘導電流と発生磁場との相互作用によって溶湯に電磁力を作用させるものである。非接触で溶湯を攪拌できるため、溶解速度の向上、成分の均一化、発生ドロスの低減などの利点がある。ここでは、EMS適用による地金の溶解時間短縮に関する事例を示す³⁾。

シミュレーションでは、溶解炉の炉底にEMSを設置し、耐火物層を含めた溶解炉内の電磁場解析モデルと、電磁力による溶湯流動と地金の溶解を考慮した熱流動解析モデルを構築し、両者を結び付けたプログラムが

用いられている。電磁場解析では、EMSによる交流磁場をマックスウェルの式から導出される磁場拡散方程式より算出し、さらに、フレミング則により溶湯炉内の溶湯に作用する電磁力を算出している。熱流動に関する基礎式は、擬似圧縮法に基づく質量保存則、電磁力と自然対流を考慮したナビエ・ストークス方程式、地金の溶解を等価比熱法にて考慮したエネルギー保存則を用いている。溶解炉は円形炉で、初期状態として、直方体のアルミニウム地金（約1トン）を20個配置し、溶湯50トンが地金を完全に覆った状態を仮定している。ここにEMSを稼働させ、地金の溶解挙動をシミュレーションしている。

Fig. 2³⁾にシミュレーション結果として、EMSの有無について、EMSの稼働開始から約330 s後の炉内溶湯の流動状況及び未溶解の地金を示す。EMSが稼働している場合、強い溶湯流動が発生し、20個の地金のうち、10個程度が完全に溶解している。一方、EMSなしの場合、溶湯の流動はほとんどなく、地金もすべて未

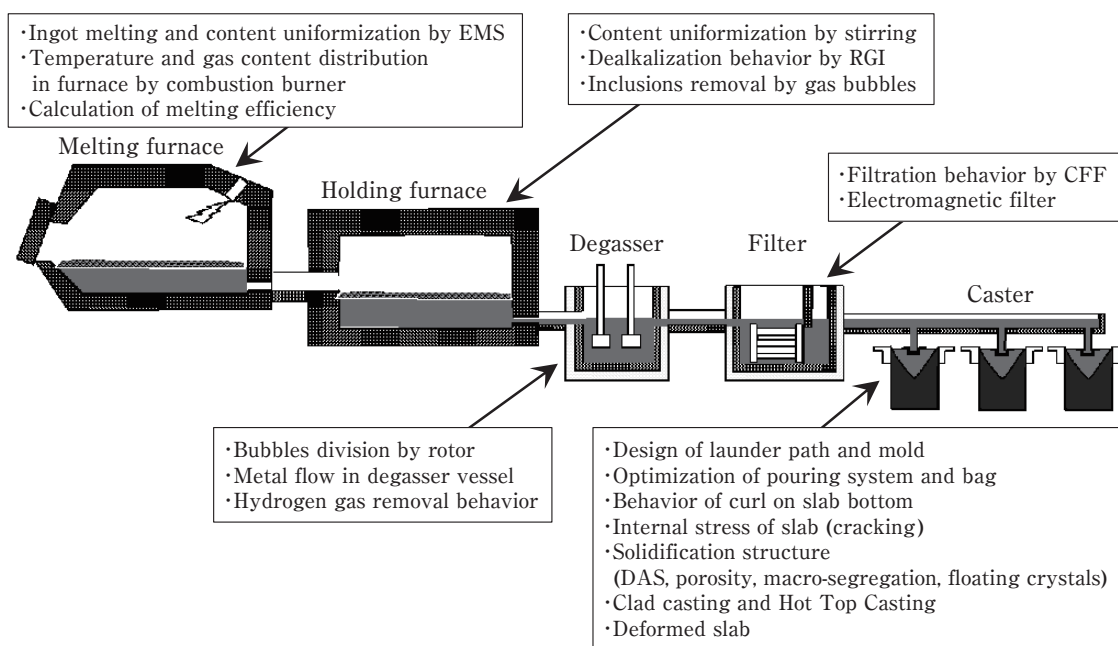


Fig. 1 Case of numerical simulations on DC casting process.

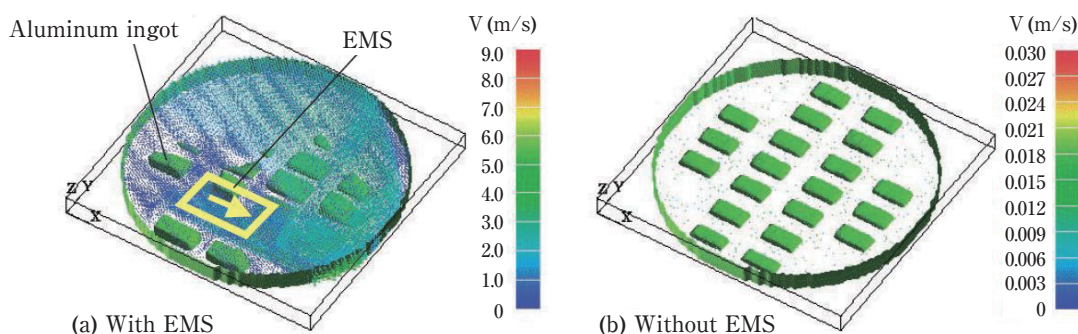


Fig. 2 Calculated aluminum melt flow and non-melted aluminum ingot in the furnace.³⁾

溶解のままである。EMSによる溶湯の流れは、円形炉に沿った周方向の旋回流と、電磁力が作用する前方炉壁の炉底部から溶湯表面に向かう上昇流と後方炉壁の下降流から成る縦方向の循環流を合わせた三次元的な流れとなる。これらが効果的に地金溶解に作用することがわかる。

溶解炉については、バーナ燃焼による炉内の雰囲気温度分布や、Fig. 3¹⁵⁾のように、StarCCMソフトウェアにて燃料であるCH₄ガスの濃度分布など、また、溶解プロセス制御などに関してもシミュレーションがなされている^{16), 17)}。

2.2 保持炉

5000系合金が、地金などを混入源とする不可避不純物であるナトリウムを含有する場合には、高温脆化により熱延や押出工程において割れが発生する場合がある。このため、保持炉では塩素ガスを含む混合ガスなどを溶湯中に吹き込んで、塩化ナトリウムを生成させ、湯面に浮上分離することで、ナトリウムを溶湯中から除去している。最近ではインペラ先端から混合ガスを

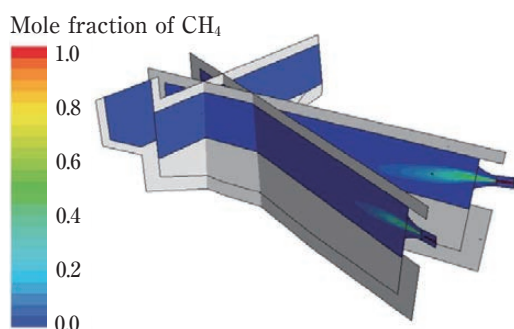


Fig. 3 CH₄ distribution in the furnace.¹⁵⁾

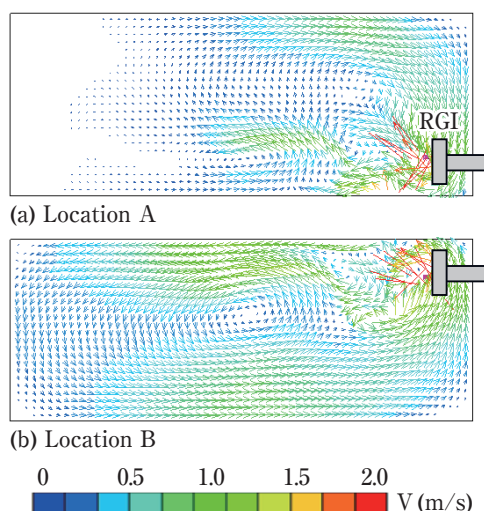


Fig. 4 Calculated aluminum melt flow in the furnace.¹⁸⁾

吹き込むRGI (Rotary Gas Injection) 装置の普及により保持炉内の溶湯を攪拌しつつ溶湯処理が行えるようになった。以下に、シミュレーションを用いてRGI装置の操作条件を最適化することにより、効率的なナトリウム除去を行った事例を示す¹⁸⁾。

ここでは、市販の熱流体解析ソフトウェアRflowを用いて、RGI装置による塩素ガスの吹き込みにより溶湯中のナトリウムが除去されるプロセスをシミュレーションしている。溶湯中のナトリウムの濃度変化は、ナトリウムと塩素ガスの反応が一次の濃度方程式によるとして、実験的に得られた除去定数を与えて計算している。また、RGI装置のロータ回転による保持炉内の溶湯流動は、非圧縮ナビエ・ストークス方程式、液体に対する体積保存則を解くことで得られる。これにより処理前のナトリウム濃度の高い溶湯に塩素ガスを吹き込み、反応除去した後、ナトリウム濃度の低い溶湯を炉内に流動させるプロセスをシミュレーションしている。

シミュレーション対象は、60トン保持炉で、初期ナトリウム濃度は20 ppmである。炉内の溶湯流動に及ぼすRGI装置の設置位置の影響をFig. 4¹⁸⁾に示す。溶湯中に斜めに挿入されたロータ(右回転)からの溶湯流は、炉床との衝突により回転軸よりも右側に逸れる。そのため、炉内の溶湯循環は紙面上で左回りとなるが、位置Aのようにロータ右側に広いスペースがあると流れが分散する傾向があり、炉内全体の溶湯循環が得られずデッドゾーンを形成する。これに対して、位置Bでは溶湯流が側面炉壁沿いに流動し、炉内全体に循環する。Fig. 5¹⁸⁾には溶湯処理1800 s後の炉内ナトリウム濃度分布を示す。上記の溶湯流動を反映した濃度分布

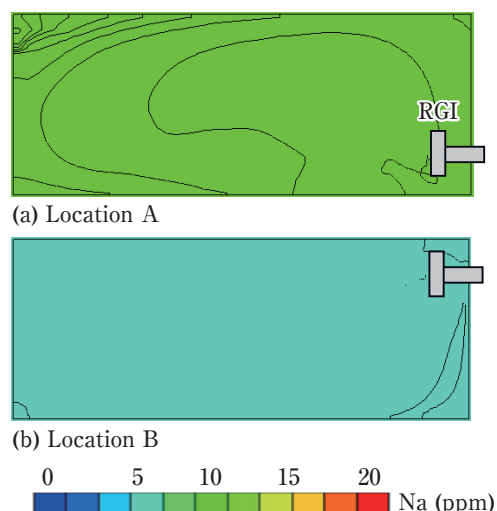


Fig. 5 Calculated sodium concentration distribution in the furnace.¹⁸⁾

になっており、位置BへのRGI装置の設置では炉内のナトリウム濃度が低く好適であることがわかる。

2.3 脱ガス及びろ過

アルミニウム材料中の水素ガスは熱処理時のフクレ不良や材料特性に悪影響を及ぼすことから、微細なArガス気泡などを溶湯中に吹き込んで水素ガスを除去する脱ガス処理が必須である。このような処理を行う脱ガス装置では、回転するインペラを槽内の溶湯中に浸漬し、その先端からガスを吹き込み、溶湯流動によるせん断力により微細なガス気泡としている。脱ガス槽内の溶湯流動^{19), 20)}や、気泡の分断に関する詳細なシミュレーションもFig. 6²¹⁾に示すように行われている。ここでは、支配方程式にナビエ・ストークス方程式と連続の式を用いて、気液混相流モデルにVOF (Volume of Fluid) 法を適用している。

次に、ろ過工程は、アルミニウム溶湯中の介在物を除去する重要な工程である。しかしながら、ろ過フィルター構造の複雑さと、介在物サイズと装置スケールの大きな差異によりシミュレーションが困難な工程でもある。Fig. 7²²⁾に示すように、FLUENTソフトウェアによりCFF (Ceramic Foam Filter) における介在物のろ過挙動をシミュレーションした例もある。

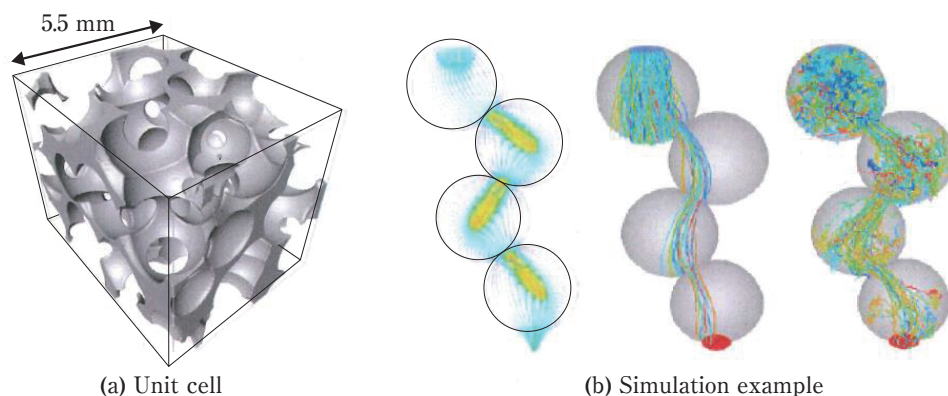


Fig. 7 Filtration behavior in CFF.²²⁾

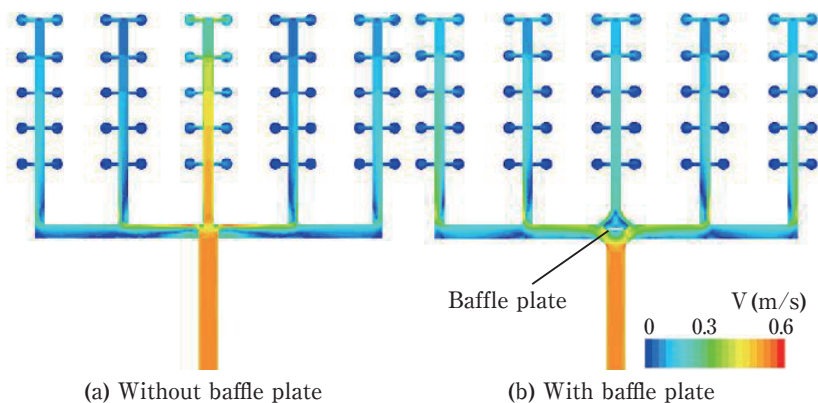


Fig. 8 Velocity contour at the top of the launders.²³⁾

2.4 DC鋳造

アルミニウムのDC鋳造では、多連装の鋳型間で溶湯温度を均一に溶湯供給することが重要である。そのために、FLUENTソフトウェアを用いて供給経路の最適化がFig. 8²³⁾のように行われ、バッフル板の設置により中央鋳型列への溶湯流入が適度に制限され、溶湯供給の均一化がなされている。また、鋳型内での溶湯流動や凝固現象についても、多くのシミュレーションが行われている。

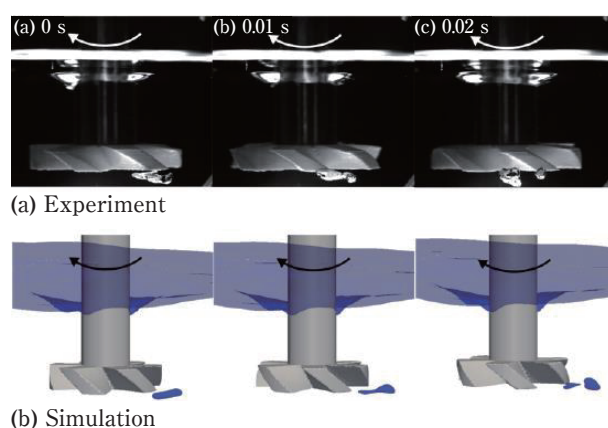


Fig. 6 Bubbles division behavior by experiment and simulation.²¹⁾

2.4.1 鋳塊底部反り

DC 鋳造では、特に大型鋳塊において鋳塊底部の反り上がり現象が生じる。これにより鋳塊短辺からの湯漏れ、鋳塊の底部割れ、あるいは鋳塊底部形状の非対称に起因する鋳塊曲がり、など多くの不具合が発生する。いずれの不具合も顕著な場合には鋳塊全部が不良品となるため鋳造歩留の低下を引き起こす恐れがある。また、反りに伴って発生するくびれと称する鋳塊底部短辺側の凹形状化についても、製品幅確保のためにくびれ位置までの切断除去を余儀なくされることから、歩留改善のためには反り低減対策が必要である。DC 鋳造における鋳塊底部の反り挙動の解明に関する事例を以下に示す⁸⁾。

ここでは有限要素法によるプログラムで、温度モデルでは、熱伝達方程式に鋳型冷却及びエアギャップ域、二次冷却域の熱伝達係数を与えて解いている。応力モデルの式展開では、歪増分理論に基づく弾塑性理論からモデルの構成式を導き、弾性歪に対するフック則、塑性状態におけるプラガーの適応条件、塑性歪の法線則、塑性歪と相当塑性歪の関係式を用いて、最終的にこのモデルの構成式を導いている。

反りの飽和時における三次元温度分布と、反り変形の主駆動力と考えられる鋳塊幅方向 (x 方向) 垂直応力分布を Fig. 9⁸⁾に示す。鋳塊全外周が二次冷却水により冷却された後、フレーム線で示した鋳塊初期形状 (仮想溶湯鋳塊) に対し底部短辺位置が反り上がり、同時にくびれが生じている。サンプル面近傍に分布する引張応力は、既に凝固低温化している外側凝固殻から凝固収縮や熱収縮を妨げられるために発生する応力であり、逆に言うともサンプル面近傍の引張応力が外側凝固殻を鋳塊内側に引き込む作用がある (数人が手をつないで輪を作り、一斉に引っ張り合うと全員が輪の内側に移動する現象と同じ原理)。これにより鋳塊底部の反りが生じる。その後、凝固の進行とともに反りは成長するが、

ある時点になると鋳塊底部の凝固殻が厚肉化かつ低温剛体化するため反り成長は鈍化・終息するものと考えられる。これらのモデルにより鋳造条件が反り量に及ぼす影響を定量把握でき、鋳塊底部の変形を抑制できる鋳造条件の最適化がなされている。

2.4.2 鋳塊割れ

鋳塊割れは、鋳造における不良で大きな割合を占めることから、その対策のために数多くのシミュレーションがなされている^{24)~26)}。ここでは、有限要素法による市販ソフトウェアである ABAQUS を利用した例²⁴⁾を示す。対象は 5182 アルミニウム合金であり、矩形スラブの鋳塊内応力をワイパ有無と、ワイパ位置を変えて Fig. 10²⁴⁾のように計算している。ワイパなしに比べてありの方が、さらに、ワイパ位置が高いほど (2次冷却域が狭いほど)、鋳塊内部の残留応力は軽減される傾向が確認できる。ワイパ設置により冷却水による冷却を抑制することで、鋳塊表面と内部の温度差や冷却速度差を低減し、発生応力を緩和している。

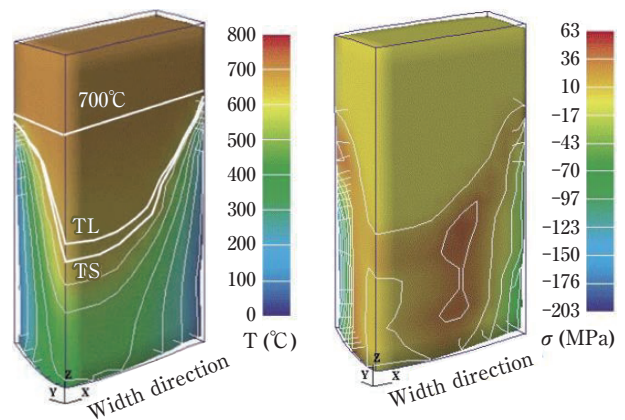


Fig. 9 Calculated temperature and stress distributions at saturated stage of butt curl.⁸⁾

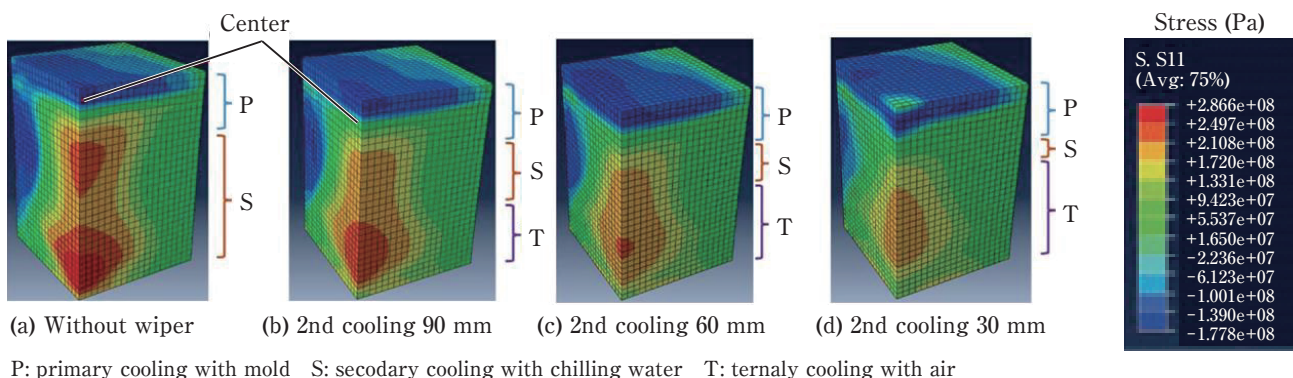


Fig. 10 Relations of wiper position and internal stress in the rectangular ingot.²⁴⁾

2.4.3 鋳塊の凝固組織

DC 鋳造プロセスの鋳塊の凝固組織において、あるべき姿は均一かつ微細な凝固組織である。均一微細な凝固組織であれば、下工程での加工や熱処理において品質不良が生じ難く、最終製品の品質特性も安定する。さらに、製造条件の自由度も増すことから、これまでにない新たな品質特性の発現も期待できる。このあるべき姿に近づくために、鋳造条件の最適化や数々のプロセス改良、技術開発がなされており、その開発支援にシミュレーションが適用されている。

アルミニウムの鋳造組織の出発点である核生成においても、 Al_3Ti 粒子や TiB_2 粒子を異質核としたシミュレーションがなされている^{27), 28)}。Fig. 11²⁸⁾には、アルミニウム溶湯中からの核生成を分子動力学法解析により実施した例を示す。1辺8 nmサイズのTi微粒子をアルミニウム溶湯中で810 K、830 Kで保持した場合の例である。810 KではTi微粒子から核生成したアルミニウムが大きく成長するのに対して、830 Kでは小さな過冷度により成長が途中で止まっている様子が確認できる。なお、フェーズフィールド法によるデンドライト成長も盛んにシミュレーションされており^{29), 30)}、レビューは本連載³¹⁾にも掲載されているので参考にされたい。

次に、市販の連続鋳造解析ソフトによる凝固組織のシミュレーション事例を示す⁷⁾。鋳塊の凝固組織シミュレーションでは、まず、熱解析においてナビエ・ストークス方程式、質量保存則、エネルギー保存則、非定常の熱伝導方程式を解き、加えて、ダルシー則、溶質保存則、温度と固相率の関係式、運動方程式、圧力式を連成解析することで、凝固組織のDAS (Dendrite Arm Spacing) のみならずマクロ偏析やポロシティの形

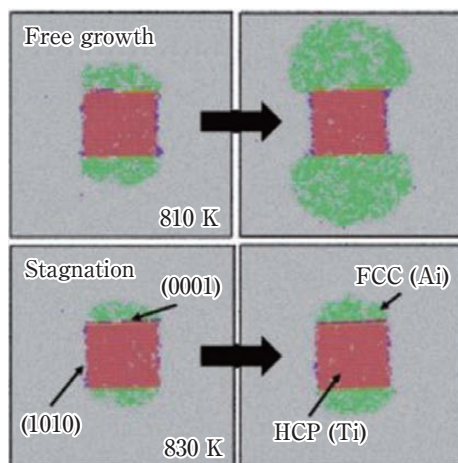


Fig. 11 Cross section of refiner particle-containing cell after 600ps.²⁸⁾

成をシミュレーションできる。

3004アルミニウム合金鋳塊(幅0.55 m、厚さ0.17 m)におけるCPROソフトウェアによる凝固組織シミュレーションの事例を示す。Fig. 12⁷⁾には鋳塊厚さ方向のDAS分布のシミュレーション結果を示すが、鋳塊表層部のチル層や粗大セル層に対応するDAS分布が得られており、実鋳塊と同様な傾向が見られた。また、Fig. 13⁷⁾に示した鋳塊中の成分分布(マクロ偏析)では、共晶元素が表層部で高濃度化する逆偏析の現象も明瞭に確認できる。シミュレーションにより合金組成や鋳造条件を決めれば、ある程度の凝固組織シミュレーションは可能であると言える。

ここ最近では、マクロ偏析に関するシミュレーションが精力的に行われており^{32)~36)}、また、低ヘッドでの鋳造³⁷⁾や、特殊なクラッド鋳塊^{38), 39)}のDC鋳造に関するシミュレーションなどもなされている。

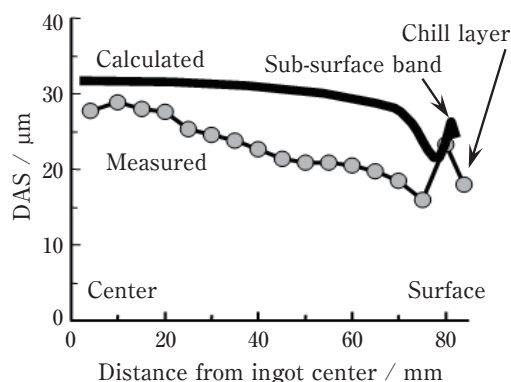


Fig. 12 Comparison between calculated and measured DAS.⁷⁾

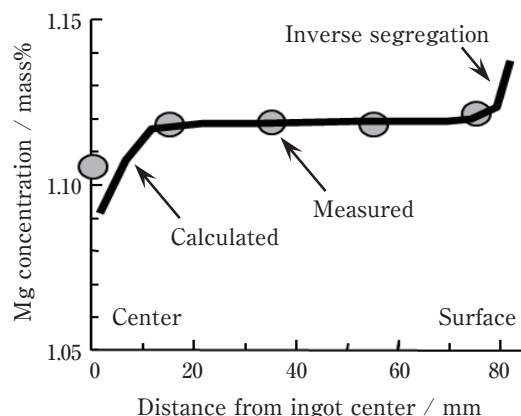


Fig. 13 Comparison between calculated and measured Mg concentration.⁷⁾

3. CC 鑄造プロセスのシミュレーション

CC 鑄造プロセスのシミュレーションは、DC 鑄造ほどの報告件数はないものの定常的に行われている。双ロールキャストに関しては、Fig. 14⁴⁰⁾に示すようなチップ内の溶湯温度や流速分布を市販のFLUENTソフトウェアを用いてシミュレーションした例や、チップ出側からロール出側までの温度分布をシミュレーションした結果なども報告されている^{41)~45)}。また、ベルトキャストにおけるシミュレーション例もあり^{46), 47)}、Fig. 15⁴⁶⁾には、FLOW-3Dソフトウェアによるクラッド板の事例を示す。

4. 鑄造シミュレーションの動向と今後の展望

鑄造プロセスのシミュレーションは、国内をはじめ海外の大学や研究機関、アルミニウムメジャー会社を中心に、鑄造関連の装置メーカーでも盛んに行われている。対象は溶解炉における地金溶解から、DC 鑄造における鑄塊割れやマクロ偏析などの組織シミュレーションに至るまでの鑄造プロセスのみならず、効率的な鑄造工場のレイアウト設計にまでわたる。いずれも多くは市販の汎用ソフトウェアが単独、あるいは複合して使用されている。また、解析手法として、新たに粒子法⁴⁸⁾も注目されている。粒子法では、従来法のような

格子は使用せず、小さな流体領域を1つの流体粒子で表し、流体全体を粒子の集合で表現する。従来の差分法とは異なり、粒子法の計算点は移動し、計算点の移動速度は、その流体粒子の速度に対応する。表面形状が複雑に変わっても、この計算点の移動により簡単に対応できる画期的な手法である。

今後、このようなシミュレーションを活用した鑄造条件の最適化や鑄造組織制御は高精度化され、対象範囲の拡大が予想される。また、凝固組織形成のようなミクロ現象と鑄塊割れのようなマクロ現象の連成解析も進展するはずである。その中で、結晶粒微細化剤による不均一核生成を起点としたデンドライト成長への発展や、鑄塊割れに関してはDC 鑄塊の割れ発生位置の高精度な予測が期待される。また、最適な鑄造条件の選定に関して、シミュレーションによる現象の再現に加えて、自動最適化手法の適用が望まれる。

5. おわりに

鑄造プロセスへのシミュレーションの適用においては、いずれもモデリング段階において多くの仮定が必要であり、誤った判断をしないためにもシミュレーションのモデル内容を熟知した上で活用する必要がある。また、アルミニウムを連続体のみの扱いから、原子レベルや粒子レベルで扱うことも可能になりつつあり、ミクロとマクロの連成シミュレーションを期待したい。今後も種々の鑄造現象の解明や、素材メーカーの基盤技術である鑄造プロセスの技術開発にシミュレーションが有効な武器となることは疑いない。

最後に、本稿作成にあたり種々の文献からデータを引用させて頂いたので、著者の方々には心から謝意を表します。

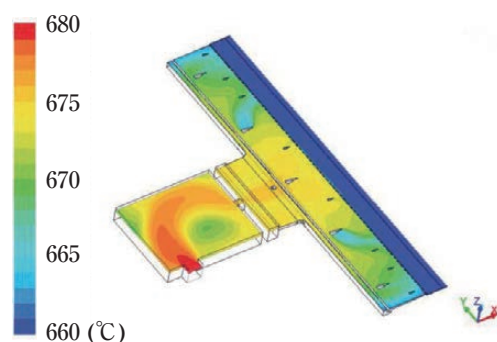


Fig. 14 Molten metal temperature distribution in box and tip.⁴⁰⁾



Fig. 15 Clad materials temperature distribution in belt caster.⁴⁶⁾

参考文献

- 1) 前田安郭：精密工学会誌, **76** (2010), 395-398.
- 2) 大中逸雄：まてりあ, **53** (2014), 462-466.
- 3) 高橋功一, 石川宣仁：Furukawa-Sky Review, **3** (2007), 31-36.
- 4) S. Wagstaff and A. Allamore: Light Metals, (2017), 1005-1012.
- 5) 高橋功一, 石川宣仁：軽金属学会第123回秋期大会講演概要, (2012), 133-134.
- 6) D. Mortensen, M.M' Hamdi, K. Ellingsen, K. veito, L. Pedersen and G. Grasmø: Light Metals, (2014), 867-872.
- 7) 谷真一, 渡辺良夫：軽金属学会第109回秋期大会講演概要, (2009), 185-186.
- 8) N. Ishikawa: Light Metals, (2005), 1045-1050.
- 9) D. Larouche, D. Nguyen, S. Cockcroft and A. Larouche: Light Metals, (2009), 811-816.
- 10) J. Coleman, K. Fezi and M. Krane: Light Metals, (2016), 641-646.
- 11) 山本卓也：軽金属学会第137回秋期大会講演概要, (2019), 165-166.
- 12) 常川雅功, 林典史, 宇野照生：軽金属, **46** (1996), 132-137.
- 13) 坂口信人：軽金属, **67** (2017), 101-108.
- 14) 高井量資, 広原嶺, 遠藤直輝, 永田益大, 岡根利光, 吉田誠：軽金属, **69** (2019), 255-262.
- 15) M. Hassan and A. Brimmo: Light Metals, (2015), 915-919.
- 16) J. Furu and A. Buchholz: Light Metals, (2015), 895-900.
- 17) C. Belt: JOM, **11** (2015), 2690-2695.
- 18) 常川雅功, 鶴飼百一：軽金属学会第115回秋期大会講演概要, (2008), 257-258.
- 19) B. Wan, W. Chen, M. Mao, Z. Fu and D. Zhu: J. Mater. Process. Tech., **251** (2018), 330-342.
- 20) M. Tong, J. Patel, I. Stone, Z. Fan and D. Browne: Light Metals, (2017), 1123-1129.
- 21) 山本卓也, コマロフセルゲイ, 石渡保生：軽金属学会第137回秋期大会講演概要, (2019), 143-144.
- 22) H. Duval, C. Riviere, E. Lae, P. Brun and J. Guillot: Light Metals, (2007), 645-652.
- 23) L.Zhang: Light Metals, (2007), 665-669.
- 24) Y. Wang, M. Krane, K. Trumble: Light Metals, (2015), 865-870.
- 25) 高井量資, 遠藤直輝, 吉田誠：軽金属学会第131回秋期大会講演概要, (2016), 201-202.
- 26) A. Meysami, S. Mahmoudiz, M. Hajisafariz: Materials and Technology, **51** (2017), 1011-1017.
- 27) S. Ma, R. Yan, T. Jing and H. Dong: Metals, **8** (2018), 521-537.
- 28) 澁田靖：軽金属学会第137回秋期大会講演概要, (2019), 135-136.
- 29) 島岡三義, 岩川光善：奈良工業高等専門学校研究紀要, **39** (2003), 35-41.
- 30) 棗千修：神戸製鋼技報, **58** (2008), 35-39.
- 31) 高木知弘：軽金属, **69** (2019), 562-568.
- 32) 石川宣仁, 山田竜也, 久保貴司, 高橋功一：UACJ Tech. Rep., **3** (2016), 31-40.
- 33) S. Wagstaff and A. Allamore: Light Metals, (2017), 973-980.
- 34) A. Pakanati, K. Tveito, M. M' Hamdi, H. Combeau and M. Zaloznik: Light Metals, (2019), 1007-1013.
- 35) R.Cabralles and N. Moraga: Applied Mathematical Modelling, **52** (2017), 288-305.
- 36) M. El-Bealy: Metall. Mater. Trans. B, **47** (2016), 630-648.
- 37) H. Mainul and B. Latifa: Heat and Mass Transfer, **52** (2016), 789-803.
- 38) X. Han, H. Zhang, B. Sho, K. Zuo and L. He, K. Qin and J. Cui: Mater. Trans., **56** (2015), 1893-1900.
- 39) L. Wu, T. Wang, J. Li, H. Chen, J. Sun and Z. Cao: Inter. J. Cast Met. Res., **27** (2014), 242-249.
- 40) C. Schmidt, A. Buchholz and K. Karhausen: Light Metals, (2015), 1209-1213.
- 41) Y. Matsui and K. Takahashi: Light Metals, (2017), 803-810.
- 42) C. Schmidt, D. Mortensen and K. Karhausen: Light Metals, (2017), 811-819.
- 43) C. Rodrigues, A. Ludwig, M. Wu, A. Kharicha and A. Vakhurshev: Metall. Mater. Trans. B, **50** (2019), 1334-1350.
- 44) Z. Mao, J. Xie, A. Wang, W. Wang and D. Ma: Materialwiss., **49** (2018), 1224-1235.
- 45) M. Xu, M. Zhu and G. Wang: Metall. Mater. Trans. B, **46** (2015), 1510-1519.
- 46) S. Heugenhauer, T. Mittler, M. Pintore and P. Schumacher: Light Metals, (2016), 1017-1021.
- 47) M. Xu, M. Isac and R. Guthrie: ISIJ, Int., **59** (2019), 69-75.
- 48) 平田直哉, 安斎浩一：鋳造工学, **87** (2015), 702-708.



常川 雅功 (Masanori Tsunekawa)
(株)UACJ R&D センター 第三研究部,
現 第二研究部