

## 粒子法による製鋼プロセス解析ツールの開発 研究会の活動と成果の概要

Introduction of Activity of Research Group for Development of Analysis Tool for Steel Making Processes Using Particle Method

<sup>東北大学</sup> 半田直哉 (現:日立産業制御ソリューションズ) 助教 (現:技師) Naoya Hirata <sup>東北大学</sup> 安斎浩一 <sub>教授</sub> Koichi Anzai

# し はじめに

製鋼プロセスは流動・凝固・反応など様々な現象が多相に わたり生じるため、きわめて複雑な挙動を把握する必要があ る。しかし、製鋼プロセスは一般に高温・不透明な環境下に あるため、実機におけるその場観察が困難なことから、水や 透明有機物を用いた可視化実験が行われている。一方で、実 際の鉄鋼に近い物性値を用いた場合の挙動を予測するため、 コンピュータを用いた数値解析の利用も盛んである。現在数 値解析に多く用いられている差分法や有限要素法といったオ イラー系解析手法は、解析の精度や安定性、速度に優れる一 方で、同時に取り扱える方程式の数が限られているため、た とえば自由界面を含む複合現象を連成させた解析などは困難 である。近年、このような複雑・複合現象を連成させた解析 に適した手法として注目されているのが、ラグランジュ系解 析手法のひとつである粒子法<sup>11</sup>である。

粒子法は物体を離散化して計算要素とする、ラグランジュ 系メッシュレス法に分類される手法である。広義には、不連 続な解析対象を個別にモデル化し、解析を行う離散要素法の ような手法も粒子法に含まれるが、ここでは特に連続体を離 散化し演算するための手法を粒子法と呼ぶことにする。なお、 一般に粒子法の可視化には計算要素を球状で表示することが 多いが、本来連続体を離散化する手法であるため、計算要素 はその物体がある一定の質量をもって存在することを示す代 表点に過ぎないことに注意が必要である。粒子法を用いた金 属の凝固に関わる複雑・複合現象の解析例としては、一宮ら による注湯・凝固・引け解析<sup>2,3</sup>、風間らによる引け解析<sup>4)</sup>、 Clearyらによる低圧鋳造解析<sup>5)</sup>、平田らによる鋳造解析<sup>610)</sup>な どが挙げられる。しかし、製鋼プロセスについては山崎らに よる連続鋳造時の2次冷却時のスプレー水挙動解析<sup>11)</sup>が見ら れる程度である。

粒子法は複雑・複合現象を容易に解析できるという期待が ある一方で、なかなか実用化例が見られない理由のひとつと して、入力データ作成や結果の可視化といったソフトウェア が整っておらず、開発者以外ほとんど使用できないことが挙 げられる。また計算速度や安定性が従来のオイラー系解析手 法に比べ未成熟であり、実用レベルに達していないという点 も挙げられる。そのため、製鋼プロセスへの適用可能性も未 だ不明なままである。

このような背景から、当研究会は、従来法では取り扱いが 困難な解析対象に対して、粒子法ベースで現場でも容易に解 析可能な技術開発に関する基礎知見獲得を目指し発足した。 当初目標としては、まず粒子法に関する特別な知識を不要と するインターフェイスを有する解析ツールを開発し、委員に 配布することで、委員全員が同様の条件で試用・評価可能な 環境を整える。そして、粒子法の適用が期待されるプロセス について専用の事例インターフェイスを実装し、企業側委員 による試用・評価を重ねることで、製鋼プロセス解析の実 用化に向けた解析システムの構築を目指した。試用を重ねる なかで課題を抽出し、製鋼プロセスに対する粒子法の基本性 能を明らかにすることを目的とした。ここでは当研究会の体 制、そして開発した解析ツールの概要の説明、および各事例 に対する粒子法の適用性について得られた知見を紹介する。

## 2 研究会の体制

当研究会の体制の概略図を図1に示す。当研究会では開発 チームと試用・評価チームに分かれた。開発チームは大学委 員およびソフトウェアメーカが担当し、解析ツールの開発と UI (ユーザインターフェイス)の開発を行った。多相流解析 や複合現象連成解析といった解析プログラム本体 (ソルバ) の開発、およびユーザーが使いやすいグラフィカルなイン ターフェイス (GUI)の開発・改良に取り組んだ。試用・評 価チームは鉄鋼・特殊鋼メーカーの委員が担当し、開発チー ムが作成した解析ツールを試用・評価し、精度等の性能評価 や課題抽出を行った。特に解析速度については使用PCの性 能に依存するため、当研究会では開発チームが解析ツールを 組み込んだPCを用意し、解析ツールをあらかじめ組み込ん だ状態で試用・評価チーム委員に配布した。これにより、委 員全員が同様の条件で使用・評価を可能とした。

### **3** 解析システム概要

当研究会では、開発者以外のユーザーでも使いやすいよう に、企業側委員の試用・評価をもとにグラフィカルなユーザ インターフェイスを有する解析ツールを開発した。図2にそ の主画面を示す。画面左上にプロジェクトウィザードが配置 してあり、上から順にボタンをクリックすることで、逐一グ ラフィカルな入力画面が表示され、直感的かつ容易に解析条



図1 研究会の体制



図2 GUIベースの解析ツール

件の設定および解析実行が可能である。また画面下部には解 析結果の可視化に関する操作部が配置されており、右上の解 析結果描画エリアにその場で反映されるため、結果の観察・ 評価が容易になっている。

ここでは各事例専用のGUIの例として、KR法の場合を紹 介する。解析ツール主画面のプロジェクト管理にてKR法を 選択し、続いてモデル定義ボタンをクリックすると、図3に 示すように容器寸法やインペラ形状、寸法を指定するための グラフィカルなダイアログが表示される(図3(a))。ここに 寸法等情報を入力すると、図3(b)のような粒子配置が自動 で生成される。なおここでは見やすさのため溶鋼は表示して いない。その他の事例では、例えば連続鋳造では鋳型寸法や ノズルの太さ、吐出口寸法等を設定可能である。その後、用 いる材料の物性値を入力し、鋳造速度やインペラ回転速度と いった境界条件も入力するが、これらもグラフィカルなダイ アログにて入力可能である。

## 4 製鋼プロセスへの適用事例

前節で紹介したGUIにより、開発者だけではなくユーザーも 容易に解析ツールを利用できるようになった。本章では試用・ 評価結果から主なものを示す。まずは企業委員による精度検 討まで至った事例として連続鋳造の湯流れ解析と、KR法の撹 拌挙動解析、そしてその他に大学委員において検討した中から TD内流れ解析とインゴット凝固解析の2事例を紹介する。

#### 4.1 連続鋳造鋳型内の流動・凝固・引き抜き解析

まずは、複雑・複合現象の連成解析が要求される事例として、連続鋳造鋳型内の湯流れ・凝固・引き抜き解析の例を紹介する。図4(a)が解析ツールにより自動生成された粒子配置の例である。厚さ方向の中心断面を表示してあり、見やすさのため溶鋼粒子は表示していない。図4(b)はGUIによる



図3 モデル定義:GUIによる各事例専用の入力ファイル生成機能

ノズル形状設定画面の例である。ノズルの内径、外形、吐出 口の位置や開口寸法、角度などが指定できる。

本解析事例では、溶鋼・パウダーの2相流解析、溶綱の潜 熱を考慮した伝熱・凝固解析、鋳造速度に応じた溶鋼の引 き抜きと、ノズルからの新たな溶鋼の流入を考慮した解析が 可能である。計算規模の都合で、メニスカス付近の溶融パウ ダーや凝固殻などの詳細な挙動を追跡することは困難である が、流入・引き抜きと自由表面を考慮した2相流解析が可能 なため、研究会においては主に速度プロファイルにより計算 精度を評価した。以下に、過去の知見や汎用流動解析ソフト との比較結果を述べる。

#### 4.1.1 鋳型内流速分布

まず、幅1225mm x 厚さ250mmのスラブの連続鋳造の鋳 型内速度分布を、汎用ソフト Fluent15.0と比較した結果を図 5に示す。図5 (a) は解析モデルの寸法で、厚さ方向中央断面 を示している。吐出口は幅方向に2カ所、15°の傾斜をつけて ある。図5 (b) ~ (d) に、鋳造速度は1.4m/minとした場合 の計算開始から10s後の厚さ方向中央断面における速度の絶 対値を示す。図5 (b) は粒子法による結果、(c) はFluentに よる結果で、Laminar モデルを用いた場合、(d) はFluentに よる結果で、標準k- ε モデルを用いた場合の結果である。

流動解析結果としては、粒子法の結果は全体的に見ると Fluentで乱流モデルを適用した場合に近い結果となっている が、吐出流の広がりが小さく流れがシャープになっているた め、鋳型短辺において特に下降流速がやや大きくなる結果と なった。ただし鋳型内全体としての流動状況や流速の分布に 関しては顕著な違いは無く、モデルの妥当性に大きな問題は ないものと推察される。

#### 4.1.2 鋳型内流速プロファイル

次に、図6に示す鋳型内の中央から幅方向に75,250, 460mmの3ライン上の速度プロファイル比較を行った。鋳造



図4 連続鋳造解析の粒子配置例

速度は1.6m/minであり、水モデルとFluentとの比較結果を 図7に示す。図7(a)は鋳型中央から幅方向に75mm、(b)は 250mm、(c)は460mmにおける流速の絶対値を、計算開始 から9~10sの間で平均した値の分布である。3者は若干の相 違はあるが、粒子法が乱流モデルを考慮していないことなど を考えるとよく一致していると考えられる。

#### 4.1.3 ノズル吐出口における流速プロファイル

次に、ノズルの吐出口における速度プロファイルについ て、Chaudhary<sup>12)</sup>らがFluent等を用いて計算した結果との比



図5 連続鋳造鋳型内部の速度分布



図6 連続鋳造鋳型内の速度プロファイル測定:解析モデル



図7 連続鋳造鋳型内の速度プロファイル

較を行った。彼らが、k- εモデルを用いて計算した定常解析 結果や、ラージエディシミュレーション (LES) を用いて計算 した時間平均流速と、今回粒子法により計算した時間平均流 速とを比較することにより、乱流の影響について検討した。

モデル形状は、鋳型幅140mm、鋳型厚み35mm、鋳型長さ 300mm、浸漬ノズル内径10mmとし、測定位置を図8(a)に 示す。流出境界条件については、モデル実験や、格子を用い た比較計算では、鋳型に底を設け、流入流量と等しい流量で 溶湯を底部の側方から流出させているのに対し、粒子法によ る計算では鋳型底面全面から一様な流速で下方に流出させ る流出境界条件を用いた。また、鋳型内湯面は、モデル実験 ではフラックス無しの自由表面、格子を用いた比較計算では フラックス無しで変形しないSlip壁となっているのに対し、 粒子法による計算では、密度6130kg/m<sup>3</sup>の溶湯 (GaInSn) の上に、密度3180kg/m<sup>3</sup>、平均厚み20mmのフラックスを 浮かべる条件とした。溶湯の動粘度は3.52×10<sup>-7</sup>m<sup>2</sup>/sとし (Chaudharyらの文献に動粘度0.00216 kg/m·sとあるのは、 粘性係数の誤記と考える)、計算に用いる粒子径は2mmとし た。溶湯流量については、格子を用いた比較計算が、鋳造速 度1.4m/min (流量110mL/s) となっているのに対し、約8% 大きい、1.46m/min (119mL/s) 相当の計算条件とした。

図8 (b) に粒子法との比較結果を示す。計算開始から8.0~ 8.2sの0.2s間の時間平均値である。line1は、厚み中心に沿っ た線であり、line2は、厚み中心から厚み方向に2mm離れた 線である。吐出口部においては、標準k- ε モデルとLESの 結果が比較的良く一致しているのに対し、粒子法による計算 結果は、他の2者に比べ、流速の大きい領域が極端に吐出口 下端部に集中し、吐出口上部の逆流(吸込)領域が大きい結 果となっていて、吐出口の流速分布の計算精度はあまり高く ないように思われるが、粒子法はそもそも乱流モデルを考慮 していないため、さらなる検討が必要である。得られた流速











から算出した乱流エネルギーについても、標準k-εモデルや LESモデルと比較すると大幅に小さな値となった。

これらの評価結果から、鋳型内流動は比較的従来の知見と

良く一致しており、十分な精度が見込まれる一方で、Fluent など従来法に比べて100倍以上要する計算時間のわりには、 粒子径より細かい乱流に起因すると思われる計算誤差が大き く、現時点では従来法に対する優位性を示すのは困難である との指摘が挙げられた。実用化に向けては乱流の影響を考慮 した場合の精度が不明確であることや、計算速度不足、マル チスケール問題が課題である。

#### 4.2 KR法による撹拌解析

次に、移動剛体により撹拌される多相流解析が要求される 事例として、KR法における撹拌解析の例を紹介する。KR法 の数値解析における主な課題は、溶鋼やフラックスの多相流 解析であること、回転する固体(インペラ)により駆動され る撹拌挙動であること、溶鋼-フラックス-インペラ間の複雑 な界面が存在することが挙げられる。メッシュを用いる従来 法では、回転するインペラはその都度メッシュを切り直すな ど、何らかの工夫を施すことにより解析は可能であるが、イ ンペラと界面が混在する領域の扱いは困難である。一方、粒 子法によれば原理的に回転するインペラは直接モデル化が可 能であり、複雑な界面との相互作用も特別なプログラムは必 要ない。

本解析事例では、粒子法による撹拌解析の基本性能の検証 として、渦形状を水モデル実験と比較した結果を紹介する。



図9 KR法における渦高さの水モデル実測値と計算値の比較

図9に、粒子法による計算結果と対応する水モデル実験結果 を比較したものを示す。これらは計算開始時の静止湯面に 対し、撹拌時における渦の底までの深さΔH1と、湯面最大 値までの高さΔH2について、インペラ回転数を変化させた 場合の結果を比較したものである。いずれの場合も、粒子法 による結果は水モデルと良い一致を見せた。渦高さのほかに も、インペラと渦底の位置関係により分類される渦モードと フラックスの巻き込み量も良い相関を得ることができた。ま た、溶鋼-フラックスの単純な積算接触時間から脱硫の進行 を見積もる簡易的な脱硫反応モデル計算により、脱硫効率評 価において実用化が十分期待できることが示された。今後の 課題としては、撹拌条件が脱S反応の効率に及ぼす影響を直 接解析できるためのモデルの拡張が挙げられる。

#### 4.3 その他事例

#### 4.3.1 TD内流れ解析

粒子法によるTD内の湯流れ解析結果例を図10に示す。左 上に取鍋からの流入口、右下にスライディングゲートを想定 した流出口を設置してある。色は粒子の番号ごとに色づけし てあり、流入してきた粒子がTD内でどのような軌跡を描く か追跡できる。TD内の湯流れは、2次元解析では奥行き方向 の挙動をとらえられないため、極めて不自然な流れになった が、3次元解析を行うことである程度妥当な流れが解析でき ることがわかった。しかし、取鍋交換時の大きな湯面変動や、 介在物の追跡や堆積評価に期待されたが、十分な解析精度を 得るには膨大な計算時間がかかることがわかった。実用化に 向けては解析速度の大幅な改善が課題である。

#### 4.3.2 インゴットの凝固解析

大型鋳塊の凝固解析も、介在物や偏析など様々な現象が複 雑に相互作用し、欠陥として現れるため、粒子法による連成 解析が期待されている。図11に、単純な流動・凝固解析結果 例を示す。これは幅1m、高さ1.5mの2次元における引け巣 形成過程の解析結果である。流動を含む凝固収縮挙動を良く 再現することはできたが、50000sの凝固時間に対し計算時間



図10 TD内湯流れ解析例:色は粒子番号



が80000s以上かかった。今後3次元化、偏析等様々なモデル の導入など、解析時間がさらに増大することが想定されるた め、解析速度の抜本的改善が課題である。

5 = ±20

当研究会は製鋼プロセスにおける複雑・複合現象解析の有 力な手段として、粒子法の実用化に向けた研究を行った。従 来法では取り扱いが困難な解析対象を現場で容易に解析可能 な技術開発を目指し、多相流解析技術の開発、凝固・湯流れ 等複合現象連成解析手法の開発、そして現場でも使いやすい よう各技術を製鋼プロセスの具体的な事例に適用したユーザ インターフェイスの開発を行った。

主たる成果としては、ユーザインターフェイスの開発と、 KRプロセス解析が挙げられる。まずユーザインターフェイ スについては、複合現象解析に期待されながらも従来開発者 以外ほとんど使用することができなかった粒子法解析におい て、入力ファイルの生成・可視化が容易で高度な知識がなく とも解析が可能な環境を実現した。またKRプロセス解析に ついては、脱硫効率に影響すると考えられている渦形状や、 フラックス巻き込み挙動についてモデル実験と良い一致を示 しており、今後反応のモデル化を行うことで反応効率や脱硫 剤歩留まりといった現場において重要な情報を得るための ツールとして期待できる。一方で、その他の解析については 主に解析速度・精度が課題として挙げられる。連続鋳造の鋳 型内速度プロファイルなど、過去の研究や従来法による解析 結果と比較し、良い一致を見せるケースも見られたが、配布 PCにおいてFluentに比べて100倍以上の計算時間がかかる など、実用化に向けてはまず解析速度の抜本的な改善が必要 といえる。また、取扱う流体粒子より小スケールの乱流効果 の取り込みも、計算速度の向上とあわせて本法における根本 的な課題として依然として残っており、それらの解決が望ま れる。将来の計算速度の向上、並列計算手法の進展に合わせ て本手法は実用化が期待される。

#### 参考文献

- 1) 越塚誠一: 粒子法シミュレーション, 培風館, (2008)
- 2)一宮正和,酒井譲:鋳造工学会第162回全国大会講演概 要集,162 (2013),104.
- 3) 一宮正和, 酒井譲: 鋳造工学, 85 (2013), 481.
- 4)風間正喜,諏訪多聞:鋳造工学会第162回全国大会講演 概要集,162 (2013),105.
- P.W.Cleary : Applied Mathematical Modelling, 34 (2010), 3189.
- 6)平田直哉,安斎浩一:鋳造工学会第152回全国大会講演 概要集,152 (2008),34.
- 7)平田直哉,安斎浩一:鋳造工学会第153回全国大会講演 概要集,153 (2008),71.
- 8) N. Hirata and K. Anzai : Mater. Trans., 52 (2011), 1931.
- 9) 平田直哉, 安斎浩一: 鋳造工学, 86 (2014), 127.
- 10) 平田直哉, 安斎浩一: 鋳造工学, 87 (2015), 11.
- 山崎伯公,嶋省三,恒成敬二,林聡,土岐正弘:鉄と鋼, 99 (2013), 593.
- 12) R.Chaudhary, C.Ji, B.G.Thomas and S.P.Vanka : Metall. Mater. Trans. B, 42B (2011) 10, 987.

(2018年5月28日受付)