

製鋼プロセスへの数値解析技術の適用

三宅俊也 (株) 神戸製鋼所機械研究所流熱技術研究室主任研究員
Toshiya Miyake

Application of Computer Aided Engineering to the Steel Making Process

1 はじめに

製鉄プロセスに代表される素材製造プロセスにおいては、ユーザーの厳しい品質要求、コスト削減を実現するべく、プロセス改善、新プロセスの開発を行っている。これを効率良く行うためには、プロセス内の物理現象をできる限り短期間に正確に理解することが要求される。このとき、生産設備を用いながら、量、質ともに十分データ収集が可能であるならば、Full-Scaleの実設備を用いた実験を行うことが最も即物的なアプローチである。しかしながら、実機実験、またそれに近いスケールの実験になれば実験費用が大きく、1600度近い温度を有する溶融金属内の物理現象を直接任意の点を測定によって定量化することは、実験手法または安全の面で困難である。そこで、コールドモデル実験、または小規模なホットモデルを中心とした実験工学的なアプローチが試みられ実績を上げてきた。たとえば、製鋼プロセスであれば、対象は反応容器の内の溶鋼であり、この動粘性係数が水とほぼ同じであることと、安全、安価であることから水を用いたモデル実験が多く用いられている。近年のレーザ計測、画像処理を用いた計測技術などモデル実験における計測技術の進歩により実験からも以前と比べて膨大な情報を得ることができるようになった。ところが、簡便で、かつ安全である反面、反応および凝固など相変化を含む伝熱現象、電磁力と流体の連成などのモデル実験は非常に困難である。一方、冶金の実験からは反応のモデル化の基礎となる知見、反応メカニズムに関する知見が得られるが、スケールアップの効果などの評価が困難である場合が少なくない。コールドモデル、小規模のホットモデルどちらのモデル実験の場合でも、現象を支配する無次元量を実機のそれと完全に一致させることは困難である。そこで、これを補完する手段として、計算機演算能力の進歩を背景に製鉄プロセスの開発、改善のテーマに対して、数値解析を用いたアプローチがいろいろな工程の検討に用いられるようになっていく。したがって、数値解析に期待される役割は、次の点に要約される。

①モデル実験だけでは、物理現象を支配する因子に対して相似則が成り立ちにくい場合のスケールアップ効果の評価。

②プロセス改善のための現象を支配する因子の絞り込み。
または、費用、および時間を要するモデル実験、実機実験条件の絞り込み。

③実機での実験が困難な場合の現象の定量化、可視化。

さらに、上の三項目に加えて、数値解析技術を確実に操業、プロセス改善に結び付けるためには、設計者、操業者の要求するレベルに応じた改善提案をタイムリーに出すことが要求される。たとえば、いくらか精緻なモデルを使用した計算であっても1ケースの検討に1ヶ月かかるようであれば試行錯誤的な検討はできない。逆に、大胆な仮定を置いたモデルであっても現象の本質的なところをはずしていなければ、大胆なモデル化を行った数値計算を用いたパラメータスタディーの方がよい場合もある。数値解析を効率よく使いこなしていくためには、このあたりのセンスが技術者に要求されるところである。

さて、数値解析に話をもどせば、相似則の問題点からは解放されたのであるが、製鉄プロセスにおいては現象が複雑であるため数学モデルが不完全である現象も多く、それに関連して境界条件などが明確である現象はむしろ少ない。そのため「使える数値解析結果を得る」ために、実プロセスまたはモデルを用いた実験にもとづく境界条件の設定、フィッティングパラメータの設定、数学モデルの構築、修正など実験的アプローチと組み合わせて使用することが一般的である。

以上述べてきたように、実験技術、数値解析技術もそれぞれ長所、短所があり、プロセス改善、改良を効率よく行うためには、モデル実験、実機実験、数値計算それぞれの特長を生かしながら現象の理解へつなげてゆく作業が、現状のもっとも効率の良い手法であろうと考えられる。本稿では、製鋼プロセスに関して、数値解析のプロセスへの適用例を示しながら、数値解析の適用の現状を紹介する。

2 数値解析からみた製鉄プロセス内の流れの特徴

ここで、数値解析を製鉄プロセスに適用する際の、数値解析からみた製鉄プロセス内流れの特徴を整理する。

①複雑な物理現象の連成系である！

たとえば転炉内の現象を数値解析ですべて扱うことを想定すれば、転炉内は固気液三相流であり、気相はランスからの噴流のように超音速の状態から、溶鋼中の気泡領域の部分までである。液相である溶鋼はガスの衝突によって湯面は大きく変形しており、内部は当然乱流状態である。かつその中で精錬反応が起こっている。この種の現象をすべて数値解析で表現することは現状では絶望的であるし、また経済的アプローチでない。したがって、着目する現象が表現できる範囲まで計算モデルを単純化し、さらに境界条件の設定、数学モデルの構築、修正などはモデル実験とうまく組み合わせて行う必要がある。

②境界条件がわからない？

プロセスを対象とした計算を始める場合に、必ず境界条件が必要になるが、その際、流れの境界条件、熱的な境界条件が不明などの問題に突き当たることが少なからずある。境界条件をどう取り扱うかはノウハウによるところも多く、計算機上の試行錯誤と実験結果との比較の中で適切な値を設定することが多い。

③空間、時間スケールの全くことなった現象が混在！

一回の処理が数十分の時間スケールの反応容器の中に精錬反応、燃焼などの時間スケールの非常に短い現象が存在するような適用先が多数ある。このような“固い系”を非定常計算で取り扱う場合、数値計算上多数の計算回数を必要とし、この種の計算を困難にしている。また、空間のスケールでは数mの長さスケールの反応容器の中の容器内で数mmのスケールの現象を云々する場合、格子解像度に問題が生じる場合がある。

④使用している数学モデルの妥当性は？

①に関連して、解析に使用しているモデルが、対象とする系に適合しているかどうか不明の場合も多い。または、混相流解析での相間の運動量交換、物質伝達等の様にモデル化が未だ確立していない領域も多い。

3 数値解析手法

さて、製鋼プロセスに対して数値解析を行うため支配方程式について簡単に紹介しておく。

3.1 流動場の支配方程式

製鋼プロセスにおいては、溶銑、溶鋼を取り扱うため、基本的にはNavier-Stokesの式(N.S.方程式)とエネルギー式、

連続の式が使用される。

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Navier-Stokes式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu_l + \nu_t) + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \beta (\Gamma_{ref} - T) g + f_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

エネルギーの式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha_l + \frac{\nu_t}{\sigma_T}) \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 介在物、気泡の取り扱い

製鋼工程では、気泡および、非金属介在物挙動を問題にする事が多い。介在物等の数値的な取り扱いに関しては、気泡、非金属介在物を溶鋼中の分散相として浮上速度を考慮した濃度の移流拡散方程式を用いる場合と、離散的な粒子と仮定して粒子の運動方程式を解く場合の2種類に大別されよう。

a. 連続相としての取り扱い、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_l + \frac{\nu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$u' = u + u_{slip}$

ここで、 u_{slip} ：介在物または気泡の浮上速度、 u ：流体の流速をあらわす。

D_l ：層流拡散係数、 ν_t ：乱流動粘性係数、 σ_c ：乱流シュミット数

b. 離散的に取り扱う場合

Basset, Boussinesq, Oseen, and Tchen式(以下B.B.O.T.式)⁹⁾を非定常に解くことにより離散的な介在物の軌跡を求めるものである。B.B.O.T.式の場合、抗力係数 C_D はStokes則を用いて与えているが、実際の粒径の分布をもつ介在物では、Stokes則の適用限界を超える場合もあるので、それぞれの適当な抗力-パーティクルレイノルズ数の相関式を用いて決定すればよい。

$$\begin{aligned} \rho_p V_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = & -\frac{1}{2} \rho_p (\vec{U}_p - \vec{U}_f) \left| \vec{U}_p - \vec{U}_f \right| C_D A_p & (\text{抗力の項}) \\ & + V_p (\rho_p - \rho_f) g & (\text{浮力の項}) \\ & + \rho_f V_p \frac{d\vec{U}_f}{dt} & (\text{圧力勾配の項}) \\ & + \frac{1}{2} \rho_f V_p \left(\frac{d\vec{U}_f}{dt} - \frac{d\vec{U}_p}{dt} \right) & (\text{付加質量に対する加速に要する力}) \\ & + \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho_f \mu_f)^{\frac{1}{2}} \int_{t_0}^t dt' \frac{\frac{d\vec{U}_f}{dt'} - \frac{d\vec{U}_p}{dt'}}{\sqrt{t-t'}} & (\text{バセット項}) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

添え字 p ：粒子、 f ：流体

V_p 、 A_p 、 d_p はそれぞれ粒子を完全に球と仮定した場合の体積、投影面積、直径を表す。

μ ：粘性係数、 ρ ：密度、 C_D ：抗力係数、 $\vec{U}$ ：流速ベクトル、 g ：重力加速度

3.3 乱流の取り扱い

ここで(2)式を無次元化することで現れる流れを支配する重要な無次元数であるレイノルズ数 Re のオーダーを考えれば次のようになる。溶鋼において数cm/sec～数m/sec、代表長さを1mのオーダーであるとする Re は $10^4 \sim 10^6$ のオーダーとなり、乱流の現象も考慮する必要がある。

数値的に乱流を扱う場合、モデル化をすることなくN.S.方程式を非定常で解く直接解法、N.S.方程式に平均化操作を施した基礎式にもとづく乱流モデルを用いる方法に大別される。プロセス設計に供する熱流体の数値解析では乱流の微視的な構造を問題にするよりも、反応容器内の巨視的な運動量、エネルギーの輸送を問題にする場合の方が圧倒的に多いため、乱流モデルを用いた解析を行うのが一般的である。その場合、定常状態を問題とする場合は時間平均化したN.S.方程式にもとづく $K-\epsilon$ モデルが多く用いられており、汎用ソフトウェアも大部分がこの手法を用いている。一方、非定常の流れの挙動を問題にする場合は格子サイズ以下の渦に対してはモデル化し、格子サイズ以上の大きい渦は直接解くLarge Eddy Simulationが用いられる。乱流モデル及びその解析手法については文献6)などを参考にされたい。

3.4 数理解析手法

図1に、乱流モデル、非圧縮性流体の数理解析手法、汎用プログラムの変遷を示す。非圧縮性流体の解析手法は差分法、または有限体積法をもとに構造格子系で発展してきた。計算上表現できる形状は構造格子系においてもBody Fitted Coordinate(BFC)、Multi-Block BFCなどが考案され計算対象の形状の自由度が広くなり、最近では、非構造格子系の計算も活発に行われている。解析手法そのものの基本的な考え方は、1970年代に考案されたMAC²⁾、SIMPLE³⁾法などが現在も使われている。この手法を取り入れた商用

の汎用プログラムも1980年代に登場し、カタログ機能的には、混相流、燃焼、乱流等複雑な現象の解析まで取り扱える。しかし、一方で、本稿で取りあげているような対象に対しては、ユーザが独自で反応モデル等のカスタマイズをする必要が多くあり、そのため汎用コードはハンドリング性の悪さ、中身の細かい部分の不透明さもあり、自社開発したコンピュータプログラムを使用する場合も多い。

4 具体的事例

ここでは、製鋼工程での具体的な事例を紹介する。製鋼工程における数値計算の主な適用先と適用した目的および、各工程での着目現象を代表的な文献とともに表1に示す。表をみてもわかるように製鋼プロセスにおいては、熱流体の数値計算の技術分野のほとんどがプロセスの各工程に関連しており、さらには、電磁場解析と連成させた解析、熱流体解析結果にもとづいた熱変形等の構造解析など広い範囲の解析技術の融合が現象の解明に必要となっている。以下に紹介する事例に関連した連成計算の手順を図2に示しておく。

表1 製鋼工程における熱流体解析

工程	解析で知りたい現象	モデル化すべき現象	参考文献
溶銑予備処理	①インジェクション方法による混銑車内流れの変化 ②混銑車形状による混銑車内流れの変化	①気泡攪拌 ②脱S、脱P反応 ③固液三相流	(11)
転炉	①気液界面反応 ②転炉内の反応速度 ③転炉内の溶鋼流動 ④溶鋼への着熱効果	①固液三相流 ②気相内燃焼反応	
鍋精錬	①鍋内の混合特性、温度分布、濃度分布 ②鍋内の反応速度	①気泡流 ②精錬反応モデル化	
RH	①脱C速度(容量係数) ②鍋内濃度分布 ③RH形状による異流量特性	①気泡流 ②脱C反応	(12)、(13) (14)
タンディッシュ	①タンディッシュ形状による介在物浮上特性の変化 ②タンディッシュヒーターによる溶鋼加熱特性と流れへの影響 ③タンディッシュ内パブリングの影響 ④異鋼種製造時の成分非定常変化の把握	①介在物運動のモデル化 ②介在物運動に対する壁面、スラグメタル界面でのモデル化	(19)、(20) (21)、(23) (24)、(25) (26)、(27) (28)、(29) (30)
鋳型内流れ	①鋳型内介在物浮上特性、または凝固殻への捕捉 ②鋳型内気泡浮上特性 ③浸漬ノズルの形状による鋳型内流れの影響 ④鋳型内流れに対する電磁力の影響 電磁攪拌の影響 電磁ブレーキの流れへの影響 高周波磁場による流れへの影響 ⑤流れと凝固成長の把握 ⑥鋳型形状と介在物浮上特性の関係 ⑦異鋼種製造時の非定常混合特性	①介在物の挙動 ②気泡運動のモデル化 ③電磁力と流れの連成 静磁場との連成 移動磁場 高周波磁場 ④流れと凝固の連成 ⑤鋳型形状、浸漬ノズル形状のモデル化	(31)、(32) (33)、(34) (35)、(36) (37)、(38) (39)、(40) (41)、(42) (43)、(44) (45)、(46) (47)、(48)

4.1 溶銑予備処理

著者らが行った混銑車内流動計算の例を示す。混銑車をもちいた予備処理の場合、その形状の影響で、容器端部の溶鋼の攪拌が悪く、そのため脱硫(S)量の不均一分布が生じる。脱硫反応の不均一をなくす目的で電磁力等を用いて混銑車内の端部を中心に向かって攪拌力を付加した場合、トランジトリー反応が大部分を占める脱硫反応に対してS濃度分布の解消にそれがどの程度効果があるものかを検討した。図3にその計算結果の一例を示す。攪拌によって混銑車内S不均一分布が大きく緩和することが理解でき

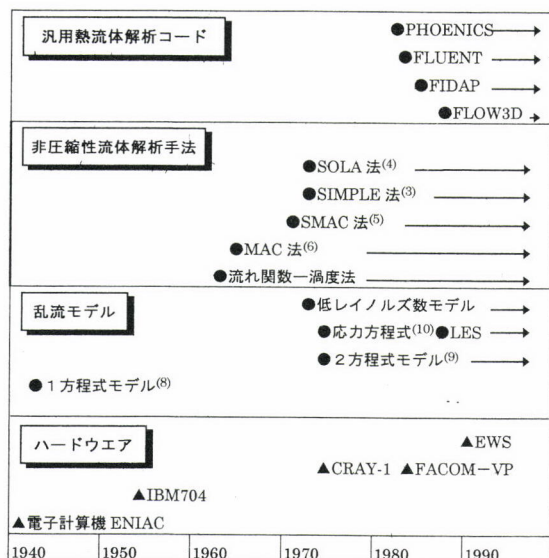
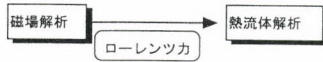


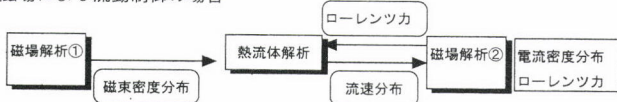
図1 熱流体数値解析手法の進歩

①磁場による流動制御の効果の評価

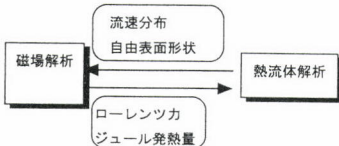
低周波磁場による流動制御の場合



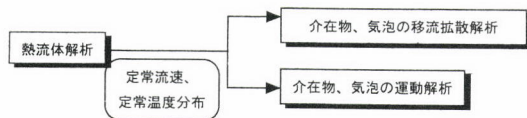
静磁場による流動制御の場合



高周波磁場による流動制御の場合



②介在物、気泡の挙動、浮上特性の評価



③鋳型内の不均一凝固の評価

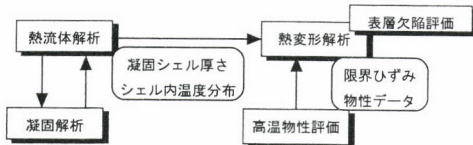


図2 連成計算の代表的手順

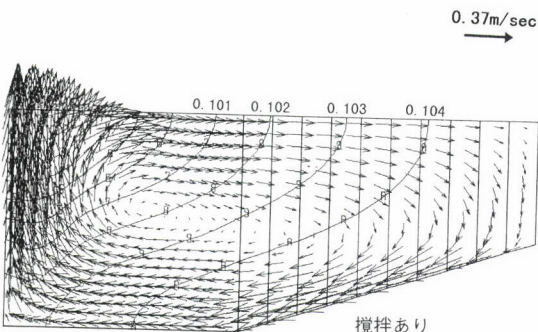
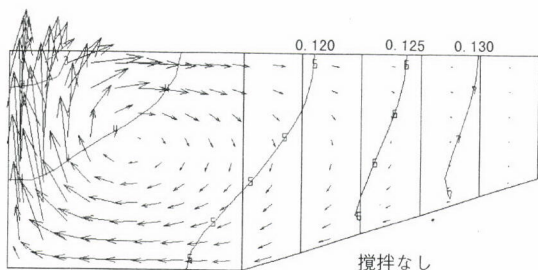


図3 混鉄車中央断面における速度ベクトル図、及び濃度の等値線

る。さらに両者の計算における反応時間を比較することで攪拌強化によって処理時間がどの程度短縮できるかを検討できる。この計算においては、気泡の領域を実験にもとづき仮定し、その領域でのみ反応がおこるものと仮定した。反応速度定数は、非攪拌時の平均処理時間が操業データに

フィットするように調整し、攪拌のある、なしの差異を検討している。

4.2 RH、銅

RHに対して、加藤ら¹²⁾は、取鍋内の流動状態を組み込んだ脱炭反応モデルを構築して、脱炭速度に及ぼす溶鋼流動の影響を考察している。図4に計算例を示しておく。Tsujinoら¹⁴⁾は、取鍋内での短絡流の有無、管径拡大の効果を解析で検討している。古野ら¹³⁾は、RHの形状と取鍋内の混合特性の関係を検討している。これらの研究は主として鍋内の流動に着目しており、貫流量を境界条件として与えた計算を行っている。

取鍋のガス攪拌については、主として取鍋内の混合特性を定量化するねらいのものが多く、計算上の取り扱いとしては、気相と液相のそれぞれの運動方程式を相間の運動量交換を考慮した手法と、気泡流領域を仮定して気泡による攪拌効果を溶鋼の運動方程式の浮力として取り込む手法に大別できる。前者の手法については、Ilegubusiら¹⁶⁾、Johansenら¹⁵⁾の研究、後者の手法については、Zhuら¹⁷⁾、Shengら¹⁸⁾らの研究がある。前者の場合、気相と液相間の運動量交換は、気泡の抗力の実験式にもとづいて与えられている。

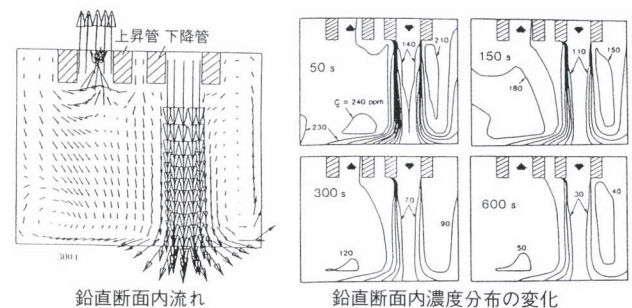


図4 RHでの流動反応解析例（加藤ら（12）より引用）

4.3 連続鋳造装置

4.3.1 タンディッシュ内流れ

タンディッシュにおいては、介在物浮上を促進するため、一般に溶鋼滞留時間を大きく、短絡流を抑える必要がある。そのためのタンディッシュ形状、堰の位置、長さなどの最適化に関する事例が多い^{19),20),22),23),30)}。また鍋交換による成分、温度の非定常性を述べたものとして、Chakraborty²¹⁾、Damleら²⁹⁾の研究がある。高谷ら²⁴⁾、Shumiyaら²⁷⁾は注湯方法による介在物浮上特性への影響について解析を行っている。図5に高谷ら²⁴⁾の計算結果を示す。この計算は先に述べた濃度の輸送方程式を用いて介在物の浮上、流出を検討している。その他、石井ら²⁶⁾はタンディッシュヒーターの効果も流も含めて検討している。さらにタンディッシュ内の乱流、層流の取り扱いを2流体モデルを用いて検討したIlegubusi²⁸⁾の研究がある。

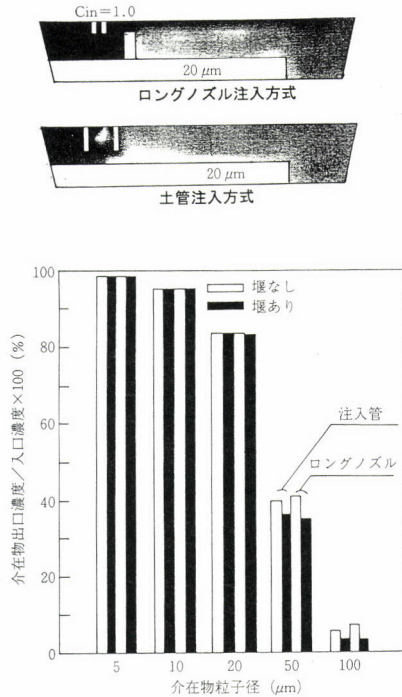


図5 注湯方法によるタンディッシュ内の介在物濃度分布の変化および介在物径による介在物出口濃度の変化 (高谷ら (24) より引用)

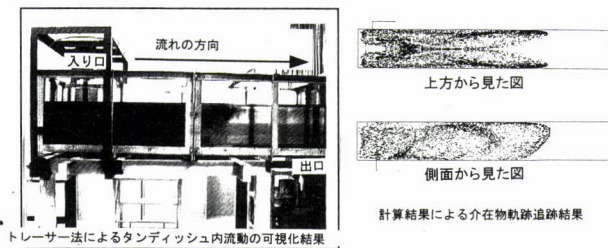


図6 水モデルによるタンディッシュ内流動の可視化と計算結果との比較

ここで、図6に介在物を離散的に扱った場合の計算例と水モデルを用いた可視化実験結果の比較を示す。両者は良好に一致している。この例での粒子は、可視化実験のトレーサーを模擬するために介在物径が非常に小さいもの（1ミクロン）を扱っている。手順は、流れの定常解を求めた後に流れ場を固定し、粒子の運動方程式を非定常に解くことにより各時刻での粒子の位置を求めるものである。粒子

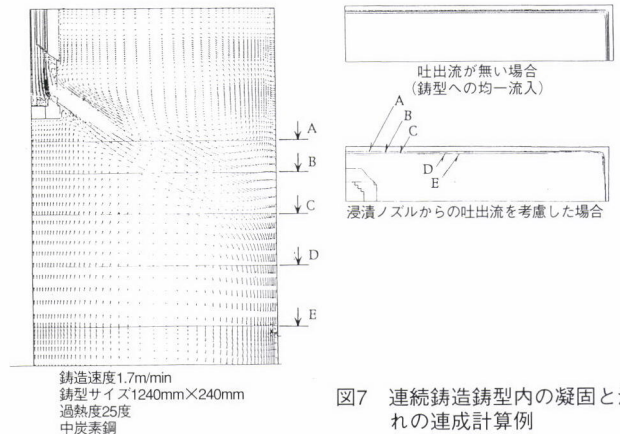


図7 連続鋳造鋳型内の凝固と流れの連成計算例

径を変化させることにより、介在物などの粒子径と浮上特性の変化を調べることも可能である。ただし、粒子のスラグメタル界面での捕捉条件、介在物の溶鋼中での凝集、合体についてはモデルが未確立であり、計算での浮上率と実験での浮上率の定量的な対応は現状困難である。

4.3.2 鋳型内流れ

鋳型内の流れは、浸漬ノズル形状による鋳型内熱流動の変化^{46)~48)}、電磁力を用いた流動制御による流動の変化を数値的に解析し、介在物浮上効果などを議論したものが多い。凝固、電磁場と流体の連成、その中での介在物の挙動を解析するなど様々な連成解析が行われている。

4.3.2.1 凝固と流れの連成^{31),32)}

連続鋳造鋳型内では、溶鋼流動が凝固殻成長に対して影響を与えることが指摘されており、これを定量化することで品質上問題となる表層欠陥と鋳型内流動との関係を明確にすることができる。図7に、著者らが行った凝固と流れの連成計算の例を示す。鋳型コーナー部において凝固殻の不均一が生じていることが観察できる。この不均一凝固を防止するような流れを実現することで表面品質の向上を図ることができる^{33)~37)}。凝固と流れの連成では、潜熱によるエンタルピー変化を考慮したエネルギー式とN.S.式を連立

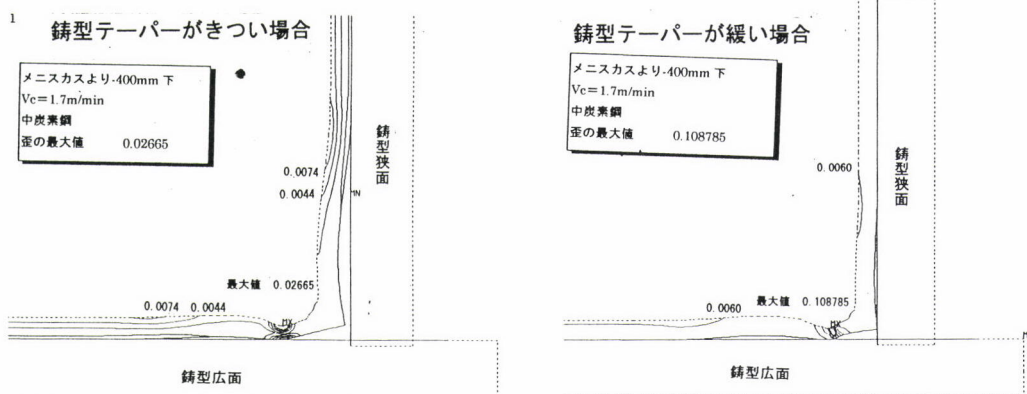


図8 凝固遅れによる鋳片コーナー部の凝固殻変形一ひずみの等直線一

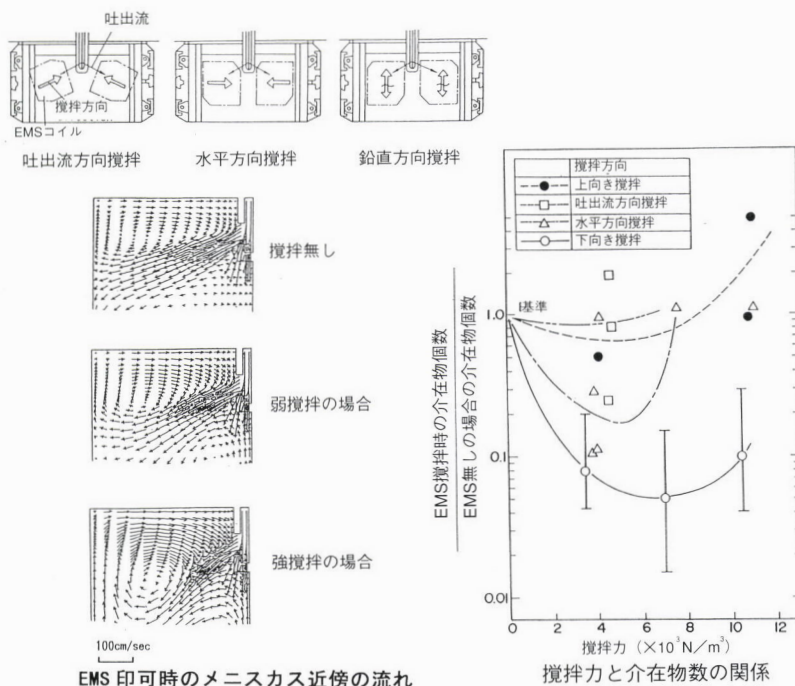


図9 電磁攪拌の数値解析例

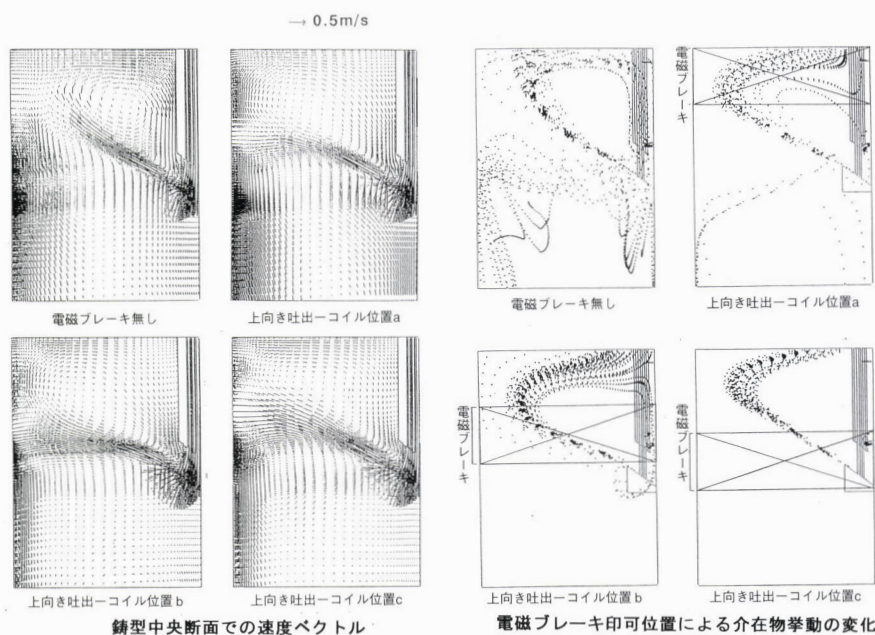


図10 電磁ブレーキによる流動制御の解析例

させて解くことで実現できるが、固液共存相での抵抗則、凝固計算時の乱流モデルの取り扱いなど今後の課題も多い領域である。

4.3.2.2. 凝固遅れと凝固殻変形

鋳型内の凝固殻の成長は、モールドパウダーを介した鋳型への抜熱と数十度の過熱度を持った溶鋼から凝固殻への入熱の釣り合いで決まる。そのバランスが不均一である場合、凝固殻厚さおよび凝固殻変形も不均一となる。図8に、

凝固遅れが鋳片コーナー部にある場合の凝固殻変形を示す。解析には、別途行った実験により得られた高温強度の物性値を使用し、熱収縮、溶鋼静圧を考慮している。凝固殻の成長に不均一がある場合、凝固遅れ部に大きなひずみが発生することが分かる。また、鋳型テーパ送り量を適切にすることでひずみが緩和されることも理解できる。このように鋳型内の流動、凝固さらには流動に影響を受けた凝固殻の変形といった流動解析、構造解析の組み合わせで表層欠陥の原因の解明も可能となる。

4.3.2.3 電磁力による流動制御

電磁力による溶鋼流動の制御は、鋳型内流れの制御技術として、電磁攪拌、電磁ブレーキなどが実用化されている。電磁力による流体の制御をモデル実験で扱うためには、低融点金属、水銀を用いた実験を行う必要があるため、設備検討には電磁場解析と流体解析を組み合わせた数値計算が活用されている^{38)~42)}。ここでは、その例として、鋳型内電磁攪拌、電磁ブレーキ、高周波磁場による流動制御の計算例を示す。福元ら³⁸⁾、Genmaら³⁹⁾は電磁場解析と流体解析を組み合わせて、湾曲鋳型内での電磁攪拌による介在物低減効果を検討している。A- ϕ にもとづく電磁場解析により得られた時間平均のローレンツ力を流体解析の外力として考慮することで、低周波磁場による電磁攪拌の効果を表現している。図9に電磁攪拌の攪拌方向によって、攪拌力-介在物個数の関係が変化することがわかる。次に図10に電磁ブレーキによる流動制御の解析例を示す。電磁ブレーキは静磁場中で溶鋼が運動をする場合、それを制動しようとするローレンツ力が働くことを利用したものである。この制動効果を考慮した流動計算を行うには、一般に電磁場解析を独立して行い、流れの支配方程式と電位ポテンシャル、電流密度を連成して解くことで取り扱われている。図のように数値解析を用いることで静磁場印可位置、磁場強さ等の最適化が可能となる。

5 最後に

図11に大型コンピュータ、その次の世代であるワークステーション(EWS)、さらに、ここ数年で民生用として大きく裾野を広げたパーソナルコンピュータ(PC)の性能の変遷を示す。図中の性能はLINPACKベンチマーク(n=100)の結果にもとづくもので、スカラー演算能力を示すと考えてよい。最近のPCのスカラー演算スピードは、10年前の汎用機程度のスピードであり、数十万円で購入できる計算機で現

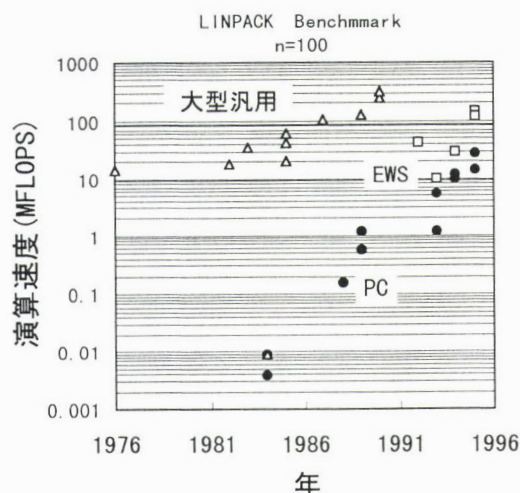


図11 計算機環境の進歩 (データはDongara J. (49) より引用)

状のワークステーションで行われているような規模の計算が可能になっていることがわかる。本稿で紹介したような解析もかなり身近に設計者、開発者らが、安価におこなえるであろう。このとき、得られる結果の信頼性、質の向上が今後いっそう問われることになるであろう。したがって、我々自身がこれまで数値計算を使いこなすうえで蓄積したノウハウ的な経験則を体系的に整理しておくことも重要であり、一方で基礎的な現象の解明、数学モデルの開発、解析手法の改良など、学際的な分野もふくめてソフトの質の向上をめざした努力を今後とも継続してゆく必要がある。

ハードとソフトがバランスよく進歩することによって、数値解析技術を、開発効率をあげるためのツールとして、さらには、現象の理解を深め、創造的な思考、発想をうむための支援ツールとして活用してゆけるものと信じている。

参考・引用文献

- 1) Hinze, J.O. : "Turbulence" 2nd ed. , (1975) , p.460, McGrawHill
- 2) Harlow, F.H. and Welch, J.E. : Physics of Fluids, Vol.8 No.12, pp. 2182-2189 , (1965)
- 3) Patanker, S. V. and Spalding, D. B. : International Journal of Heat and Mass Transfer , Vol.15 , pp. 1787-18061, (1972)
- 4) Hirt, C. W. , Nicols, B.D. and Romero, N. C. : Los Aramos Scientific Report LA-5852, (1975)
- 5) Amsden, A. A. and Harlow, F. H. : Los Aramos Scientific Report LA-437 , (1970)
- 6) 乱流解析, 数値流体力学編集委員会編, 東京大学出版, (1995)
- 7) Prandtl, L. : ZAMM, 5, pp. 136-139 , (1925)
- 8) Prandtl, L. , : Math. Phys., K1, pp. 6-19 , (1945)
- 9) Launder, B. E. and Spalding, D. B. : Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3, pp. 269-289 , (1974)
- 10) Launder, B. E. : J.Fluid Mech. , Vol. 68 , (1975) , p.537
- 11) 三宅俊也, 相楽嘉一, 藤田貴, 小川兼広, 蝦名清, 堀川健一 : 材料とプロセス, Vol.8, (1995) , p.107
- 12) 加藤嘉英, 中戸参, 藤井徹也, 大宮茂, 高取誠二 : 鉄と鋼 Vol.77 , (1991) , No. 10, p.1664
- 13) 古野好克, 石口由紀男, 政岡俊雄, 井上茂 : 材料とプロセス, Vol.4 , (1991) , p.232
- 14) Tsujino, R. , Nakashima, J. , Hirai, M. and Sawada, I. : ISIJ Inetrnational, Vol. 29 , (1989) , No.7, pp.589-595
- 15) Johansen, S. T. and Boysan, F. : Metallurgical Transactions B, Vol. 19B , (1988)
- 16) Ilegbusi, O. J. and Szekeley, J. : ISIJ-International, Vol. 30 (1990) , No. 9. pp.731-739

- 17) Zhu, M. Y., Inomoto, T., Sawada, I. and Hsiao, T. : ISIJ International, Vol. 35, (1995), No. 5, pp.472-479
- 18) Sheng, Y. Y. and Irons, G. A. : Metallurgical Transactions B, Vol. 24B, (1993), p.695
- 19) Jung, T., Kim, K. J., Jung, Y. and Lee, S. M. : SEAIQ Quarterly, (1992), pp.36-51
- 20) Sinha, S.K., Godiwala, K.H. and Sivaramkrishnan, C. S. : Ironmaking and Steelmaking, Vol.20, (1993), No. 6, p.485
- 21) Chakraborty, S. and Sahai, Y. : Ironmaking and Steelmaking, Vol.19, (1992), No. 6, pp. 479-487
- 22) Joo, S. and Guthrie, R. I. L. : Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 30, (1991), No. 4, p. 261
- 23) 森正晃, 大崎真宏, 岩崎正樹, 堤直人, 沢田郁夫 : 製鉄研究, 第338号, pp. 29-34
- 24) 高谷幸司, 城田良康, 樋口善彦, 谷澤好徳 : 住友金属, Vol. 45-3, (1993)
- 25) 木村秀明, 森正晃, 後藤修, 白井登喜也, 田中宏幸 : 材料とプロセス, Vol.4, (1991), p.1198
- 26) 石井俊夫, 近藤裕計 : 第6回伝熱シンポジウム講演論文集, p.75
- 27) Shumiya, T., Shiraishi, A., Iwata, K., Hitomi, Y. and Nagahata, T. : The Sumitomo Search No. 55, pp. 7-13, (1994)
- 28) Ilegubusi, O. J. : ISIJ International, Vol. 34, (1994), No. 9, pp. 732-738
- 29) Damle, C. S. and Sahai, Y. : Steelmaking Conference Proceedings, (1994), pp.235-247
- 30) 赤井芳弘, 山田和之, 豊田守, 布袋屋道則, 関野一人, 高谷幸司 : 材料とプロセス, Vol. 4, (1991), p. 1322
- 31) 蝦名清, 森下雅史, 三宅俊也, 徳永宏彦 : 材料とプロセス, Vol.7, p.285, (1994)
- 32) Miyake, T., Morisita, M., Tokunaga, H. and Ebina, K. : WCCM III, Vol. 2, (1993), p. 1778
- 33) 徳永宏彦, 小林高, 森下雅史, 田井啓文, 蝦名清, 安中弘行, 三宅俊也, 仲山公規 : 材料とプロセス, Vol.8, p.345, (1995)
- 34) 田井啓文, 安中弘行, 蝦名清, 谷川完士, 木村雅保, 仲山公規 : 材料とプロセス, Vol.8, p.286, (1995)
- 35) 安中弘行, 蝦名清, 小北雅彦, 谷川完士, 木村雅保, 仲山公規, 竹鼻直人 : 材料とプロセス, Vol.8, p.287 (1995)
- 36) 森下雅史, 田井啓文, 蝦名清, 三宅俊也, 徳永宏彦 : 材料とプロセス, Vol.8, p.346, (1995)
- 37) 田井啓文, 安中弘行, 森下雅史, 蝦名清, 徳永宏彦, 小林高, 仲山公規, 三宅俊也 : 材料とプロセス, Vol.8, p.347, (1995)
- 38) 福元裕彦, 坂本雄二郎, 源間信行, 貝原保男 : 神戸製鋼技報, Vol.40, No.3, (1990)
- 39) Genma, N. : ISIJ International, Vol.29, No.12, pp. 1056-1062, (1989)
- 40) Fujisaki, K., Sawada, K., Ueyama, T., Okazawa, K., Toh, T. and Takeuchi, E. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.272
- 41) Okazawa, K., Toh, T., Takeuchi, E. and Fujisaki, K. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.278
- 42) Lehman, A. F., Tallback, G. R., Kollberg, S.G., and Hackl, H.R. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994), p.372
- 43) Morisita, M., Miyake, M., Tokunaga, H. and Ebina, K. : International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, (1994)
- 44) Idogawa, A., Sugizawa, M., Takeuchi, S., Sorimachi, K. and Fujii, T. : Materials Science and Engineering, A173, (1993), pp.293-297
- 45) Takatani, K., Nakai, K., Kasai, N., Watanabe, T. and Nakajima, H. : ISIJ International, Vol. 29, (1989), No. 12, pp.1063-1068
- 46) Wang, Y. H. : 10th PTD Conference Proceedings, (1992), p.271
- 47) 横谷真一郎, Westhoff, R., 浅古豊, 原茂太, Szekely, J. : 鉄と鋼, Vol. 80, (1994), No. 10, p.759
- 48) Bessho, N., Yoda, R., Yamasaki, H., Fujii, T. and Nozaki, T. : ISIJ International, Vol.31, (1991), No. 1, pp. 40-45
- 49) Dongara, J.J., //www.netlib.org/benchmark/performance.ps, (1996)

(1996年2月22日受付)