

鉄鋼プロセスにおける流体数値解析

八百 升*・篠原 虔章*・山元 深*²杉山 一久*³・目崎 令司*³

Numerical Flow Analysis in Steelmaking Process

Minoru YAO, Yoshiaki SHINOHARA, Fukashi YAMAMOTO,
Kazuhisa SUGIYAMA and Reiji MESAKI

1. はじめに

鉄鋼業は日本の重化学工業を代表する基幹産業であり、近年は自由世界第一位の生産実績と技術を持つに至っている。このような技術力が築かれてきた背景には日本特有の労働生産性や設備技術の進歩もさることながら、現場における操業データの解析能力向上や製造プロセスの挙動を表現し予測する無数の数値シミュレーターの開発や応用など、コンピューターの目ざましい発達と普及に伴うソフトウェア技術面での充実があつたことが注目される。一方、鉄鋼プロセスでは流れが鋼材品質や歩留りなどを左右する大きな要因であるがその分布を正しく評価する手法は確立されておらず、より高度で詳細な解析が切望されていた。

流れの数値解析は数値気象予報¹⁾や従来の風洞実験にとつて代わる数値風洞²⁾、あるいは原子炉内冷却水の挙動シミュレーション³⁾など航空、気象、原子力、機械等の分野を中心として発達してきた。これらはコストや危険性などの点で実施できない実験を数値的に代行して成果を挙げている例だが、計算コストや労力を考慮にいれてもモデル化と適用場面さえ適切ならば流体数値解析は流れの場を定量化する手段として極めて有力であることを示している。この分野は大規模科学技術計算専用スーパーコンピューターの発達と並行して今後も飛躍的な発展が期待されている。本解説では鉄鋼プロセスにおける流体解析の適用場面を考察し、溶銑、溶鋼、水などの流れの場を解くための非圧縮性流体の数値解析手法について概観すると共に、実際のプロセスでの解析事例をいくつか紹介する。

2. 鉄鋼プロセスにおける流体解析の意義と適用場面

鉄鋼業では高炉、転炉、連続鑄造機に代表されるよう

な溶銑、溶鋼の流れを扱うプロセスがある。これらは大容量のプロセスであるにもかかわらず単品種大量生産ではなくて、多数の鋼種を作り分ける小ロット生産が要求される。その効率的操業は高度な設備技術と適切な冶金学的解析が基盤となつて可能となるものであるが、これらプロセスの挙動を把握するためには流れの場を定量的に評価することが重要である。特に近年は上底吹転炉や溶鋼電磁攪拌などに見られるように積極的に流動を制御して冶金学的効果を上げる技術が指向されている。このような技術動向から伝熱、拡散、反応平衡と並んで流動現象を詳細に評価することが強く要請されている。

しかしながら、例えば水モデル実験による流れの可視化は冶金プロセスの流れ現象を調査する上で一般的な手法だが、 Re 数や Fr 数など種々の無次元数を合致させて実プロセスとのアナロジーを実際に成立させるのは困難であり、結果の整理にも多くの工数を要する。計測技術についても溶銑、溶鋼の高温に耐えて流れを乱さない流速センサーは現在のところ存在しない。すなわちこれら実験、計測をとおして得られる情報は解析にかかる負荷に対して極めて少なく、これらに代わる解析手段として流体数値解析技術に大きな期待が寄せられる。

数値シミュレーションの特徴は、特定の要因の寄与のみを純粋に抽出して解析できることや、完璧な再現性をもつ、などにあり異なつた条件を容易に相対比較することが可能なので、問題のモデル化が健全である限り少なくとも間違いの無い方向を見出すことができる。

このような流体シミュレーションの鉄鋼業における適用場面は溶融物を取り扱う製銑、製鋼工程が主体であるが、他にも加熱・冷却設備、配管系、化成工程などで数多く存在する。表1には適用場面の主なものをまとめてみたが、これらに数値解析のメスを入れるのは今後の重要な課題である。

昭和 59 年 10 月 15 日受付 (Received Oct. 15, 1984) (依頼解説)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1-1 Mizushimakawasaki-dori Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)鉄鋼企画本部 (Steel Business Planning Div., Kawasaki Steel Corp.)

*³ 三菱化成工業(株)総合研究所 (Research Center, Mitsubishi Chemical Industries Ltd.)

表 1 鉄鋼プロセスにおける流れ解析の適用場面

プロセス	流れ解析の適用場面	問題点
高 炉	炉底侵食, 最適操業 —炉底における溶銑流の挙動把握	TAPPING 流, 自然対流, 固液共存流れの取扱い
転 炉 脱 ガス 取 鍋	反応装置としての評価, より詳細なダイナミックモデルの開発 —溶鋼攪拌流, 反応物質の挙動	三次元流動, 自由表面の取扱い, 伝熱, 拡散, 流動の同時解析乱流モデルの評価
連 鑄	非金属 inclusion の評価, 電磁攪拌の検討, ノズルやタンディッシュの設計 —溶鋼のフローパターン把握	三次元流動, 高 Re 数, 複雑な形状の取扱い
鑄 物 造 塊	内部欠陥の定量化と予測 —溶鋼流動と偏析の関係, 注湯時の伝熱挙動	非定常流れ, 自然対流, 境界層流れの取扱い
加 熱 炉	設備診断, 操業方案の検討 —ガス流れと炉内伝熱の関係	三次元流れ, ガスの圧縮性の取扱い
配 管 系	ガス混合の評価, 管路流路の設計, 水撃現象等の解析 —圧力損失の評価	二相流, 非定常流れ

3. 非圧縮粘性流体の数値解法

3.1 流体解析の基礎式

非圧縮粘性流体の支配方程式は NAVIER-STOKES 方程式 (以下 N. S. 式) と連続の式であり, それぞれ次のように表される.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{F} = 0 \dots\dots (1)$$

ただし, 二次元系で $\mathbf{u} = (u, v)$,
三次元系で $\mathbf{u} = (u, v, w)$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

(1) の N. S. 式は運動量保存と渦度輸送, (2) の連続の式は物質保存を表現する方程式であるが, 離散化を前提とする場合にはこのような保存形で書くのが便利で一般的でもある. 非圧縮粘性流体の挙動を調べるためには上 2 式を連成して解く必要があり, 更に N. S. 方程式が非線型であるために解法を困難なものにしている. このような問題を数値解析で解く分野は近年「コンピュータ流体力学 (Computational Fluid Dynamics)」^{4)~6)} として位置付けられている.

流体数値解析の基本変数を選ぶ方法の一つは式 (1), (2) の u, P , を基本変数にとる方法 (Primitive Variable Method) で, もう一つは (3) 式に示すような流れ関数と渦度で N. S. 式と連続の式を書き換えるのが流れ関数-渦度 ($\psi-\omega$) 法であり, 二次元系では次のような流れ関数 ψ 及び渦度 ω を導入する.

$$\begin{aligned} u &= -\partial\psi/\partial y, \quad v = \partial\psi/\partial x, \\ \omega &= \partial u/\partial y - \partial v/\partial x \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

この方法によれば, 二次元問題では式 (4) のごとき渦度輸送方程式を, 連続の式を表す $\nabla^2\psi = -\omega$ の関係を用いて 2 階の渦度方程式に帰着させることができる.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \nu \nabla^2 \omega + \omega \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla \times \mathbf{F} \dots\dots\dots (4)$$

更に速度と渦度を基本変数にとる hybrid 法⁷⁾ もある. これら手法の優劣は一概には問えないが, u, P , を基本変数にとる方法が一般に三次元問題への拡張が簡単でかつ境界条件の設定が容易である.

3.2 解析手法

流体解析の基礎式たる N. S. 式と連続の式の離散化手法には大きく分けて有限差分法 (Finite Difference Method; Control Volume 法を含む), 有限要素法 (Finite Element Method), 境界要素法 (Boundary Element Method), の三つに大別される. 有限差分法は規則的な格子点メッシュを用いて基礎式を TAILOR 展開してメッシュ点ごとの差分方程式を導出して解くか, あるいは何らかの規則に基づいて Control Volume を定義し運動量バランスをとる. 有限要素法は変分原理や重み付き残差法を用い個々の要素について要素方程式を導く手法で, 任意の形状で解析できるのが特徴である.

境界要素法は境界点のみの計算で解を求めることができるので入力データを減らせるのが特徴であるが, 流れの解析に関しては報告例が現在のところ極めて少ないのでここでは割愛する.

以下では有限差分法, 有限要素法の代表的な計算手法の内容について簡単に説明する.

3.2.1 有限差分法

有限差分法に属する手法としては CHORIN の方法⁸⁾ PIC (Particle in Cell) 法⁹⁾ あるいは MACCORMACK の 2 段階差分法¹⁰⁾ など多々あるが, MAC 法¹¹⁾ が最も著名でかつ分かりやすくスキーム自身の価値としても今日十分に使用に耐えるものである. MAC 法はロス・アラモス科学研究所 (LASL) の WELCH らによつて二次元, 三次元空間での自由表面を有する非圧縮粘性流れの数値解法として提案され, 以後様々な改良を加えられた発展形が多く開発されている. MAC 法の特徴は, N. S. 式が圧力に無関係であるのを利用してポテンシャル関数を適当に決めて速度場を調整し間接的に連続の式を満足させる点や, 独特の変数配置のために二次の微分量がとりやすい点などにある. MAC 法と他の手法との比較が文献 12) に記されているので参照されたい.

MAC 法の発展形として速度場と圧力場の同時緩和を特徴とする SUMMAC 法¹³⁾, ABMAC 法¹⁴⁾ や SOLA (SOLution Algorism) 法¹⁵⁾, 及び陰的なスキームで圧縮性流体を扱う ICE (Implicit Continuous fluid Eulerian) 法¹⁶⁾ などがある. 更に直交格子のみならず曲がつた格子に body fitted coordinate¹⁷⁾ を適用することにより複雑な形状での解析も可能となつてきている (図 1

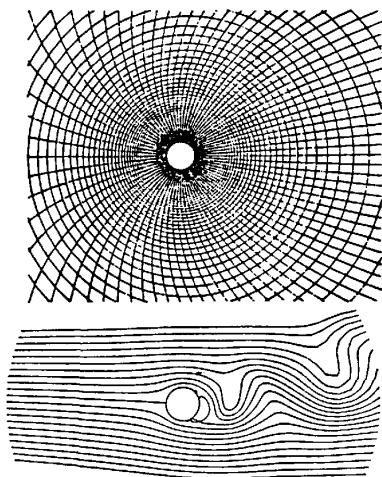


図 1 body-fit 型有限差分スキームによる KARMANN 渦シミュレーション

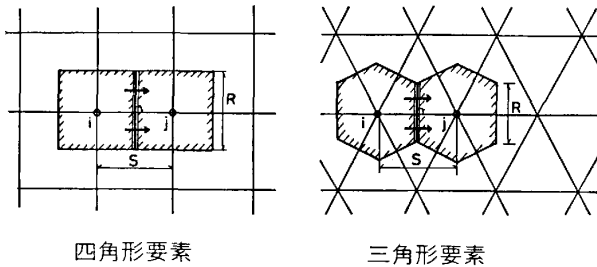


図 2 改良外節点法でのコントロールボリューム定義 (二次元系)

参照).

さて、ここで直接差分法¹⁸⁾またはコントロールボリューム法と呼ばれる手法について説明を加えておく。この手法の基本となる考え方は、速度や圧力などの物理量を定義する代表節点の周りに一定のルールで節点領域 (コントロールボリューム) 設けてその領域における運動量や質量のバランスをとり、微分方程式を経由せずに直接に節点ごとの差分式を導くというものである¹⁹⁾。直接差分法の一つである外節点法では、図 2 のごとくモデルを構成する要素の頂点で節点を、外心領域 (図中ハッチング部) でコントロールボリュームを定義する。この手法では要素の内部に外心があるという条件 (弱鋭角条件) の下ではボリューム界面とそれを通過する flux の方向が常に直交するので、精度の高いバランス式を導出できるという長所がある²⁰⁾。時間積分に関してはメッシュ定義に相違はあるものの MAC 法をそのまま踏襲することができる。このようにして有限差分法の簡便さを備え、かつ有限要素法のように複雑な形状やメッシュの疎密を自由に扱う汎用 solver を作る事が可能である。

またこの手法は二次元系では三角形、矩形要素を用いるが、図 3 のように TETRA, WEDGE, HEXA の三種類のソリッド要素を用いて三次元系に容易に拡張する

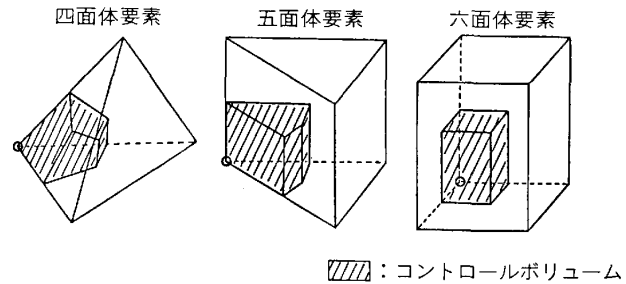


図 3 改良外節点法のコントロールボリューム定義 (三次元系)

ことができる²¹⁾。ただしこの solver を使いこなすためには、データチェックやメッシュ発生を行うプリプロセッサ、グラフィックスによる結果表示を受け持つポストプロセッサなどの周辺ソフトウェアが必須である。

3.2.2 有限要素法

有限要素法は 1954 年に発表されて以来応力解析の分野で飛躍的な発展を遂げてきたが、近年メッシュ分割が自由にできる長所を生かして流体解析への適用^{22)~24)}が研究されている。有限要素法は解析領域内においてある近似関数に対して重み付き残差を最小にするという方法によつて個々の有限要素における離散化方程式を求め、これを重ね合わせて全体の解くべき要素方程式群を得る手法である。そのため任意形状の要素を用いることができるが、現在のところ限られた Re 数の流れにしか適用できない。

原らには有限要素法による粘性流体の定常解析を、①直接法、②渦度・流れ関数法、③ペナルティ関数法の三つの方法に分類したが²⁵⁾、ここでは現在主流となつているペナルティ関数法についてのみ簡単にのべる。

直接法や渦度・流れ関数法では解が不安定となりやすいのだが、ペナルティ関数法では (5) 式のようなペナルティパラメータ λ を含む関数 $P\lambda$ を導入して、(6) 式のような連続の式を圧力の関数として考慮した有限要素解析法が提案され多くの解法が存在する²⁶⁾²⁷⁾。

$$P\lambda = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$([K] + \lambda[S]) \{u\} = \{F\} \dots \dots \dots (6)$$

ペナルティパラメータ λ の物理的意味は明確でないが、自然界にある流体が必ずわずかながら有している圧縮性を導入することに対応すると考えられ、これは期せずして MAC 法と共通するものがある。ペナルティ法は定常解析だけでなく非定常解析に拡張することが可能であり、例えば矢川、川原、中沢らの計算が著名である^{28)~30)} (図 4 参照)。

有限要素法の最近の傾向として注目すべきことは、超大型の実用問題の解法という現実を踏まえ陽解法の効率の良さが再認識されている点と、複雑な手法は淘汰されつつあるという点である。更に MAC 法のアルゴリズム

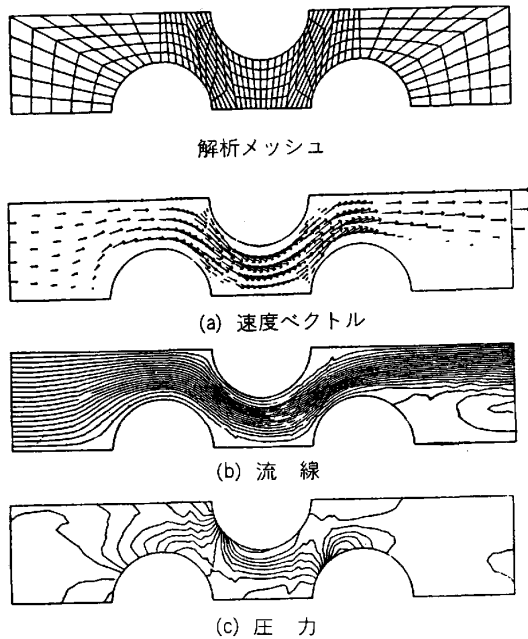


図 4 有限要素法による熱交換器内の流れ解析

ムを持った有限要素法や風上差分法のスキームを応用した上流有限要素法^{31)~33)}など、有限要素法と差分法の境界があいまいになつてきていることも興味深い。

3.3 計算テクニック

実プロセスにおいて役に立つ解を得るためには基本的なスキームを知っているだけでは不足であり、計算を安定化させるためのテクニックや乱流モデル、自由表面の取扱いなど様々な問題が生ずる。ここではそのような問題をいくつか挙げて若干説明を加えたい。

3.3.1 風上差分法³⁴⁾ (up-wind scheme)

風上差分法は(7)式のような移流項を含む簡単な微分方程式において、流れの向きが正ならば後退差分を負ならば前進差分を選ぶいわば非対称な差分である ((8)式)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{u}{\Delta x} (C_i - C_{i-1}) = 0 \quad \text{if } u \geq 0 \dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{u}{\Delta x} (C_{i+1} - C_i) = 0 \quad \text{if } u < 0$$

(参考 $\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{u}{\Delta x} \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2} = 0$: 中央差分)

この手法は元の方程式の中央差分に $\Delta x \cdot |u|/2$ だけ拡散係数(人工粘性)を増加させ物理量の分散を抑えせしめて計算を安定化させている。風上差分法は高 Re 数域での計算のためには非常に重要なテクニックだが、一方解析領域内の Re 数を実質的に下げて評価する恐れがある。これは高 Re 数域における流れの非線型性を確保して進めねばならない解析の場合特に問題となるので、種々のスキームが研究されている³⁵⁾。

3.3.2 乱流計算

流速がある臨界 Re 数を越えると流れは乱流となり非常に不規則で大きな運動量や物質の移動が観測され見掛け上粘性係数や物質移動係数が著しく増大する。乱流現象を数値計算で解く場合、現在三つのアプローチがあるとされているがそれらを表 2 にまとめた³⁶⁾。

現在主流となつているのは②の時間平均モデルに属する 0~2 方程式モデル、応力方程式モデル^{37)~39)}などであり、この内でも二方程式モデルの k-ε モデル⁴⁰⁾⁴¹⁾などについて数多くの計算例が報告されている⁴²⁾。しかし二方程式モデルは境界条件の割当てが複雑なことや、解析ごとにモデル内の係数を変えなければならないなどの欠点を持つている。それに対し現実の乱流現象をシミュレートする方法として最近注目を浴びているのが LES⁴³⁾であり、例えば MOIN & KIM の Deardorff モデル⁴⁴⁾を用いての計算では三次元チャンネル流れにおける壁面近傍のバースト、スウィープなどの特徴的な非定常乱流現象までも捕えることができている⁴⁵⁾ (図 5)。この方法は従来メッシュ数が大きくなければ精度が良くないとされていたが、比較的少ないメッシュでおこなつた計算でも良い結果が得られることが報告されている⁴⁶⁾。

最後に直接シミュレーションは最も単純で精度の良いことは分かつていながら現実には NAVIER-STOKES 方程式を精密に解くことは不可能に近く、これまで余り顧みられなかつた。しかし河村は三次精度の風上差分法を高 Re 数流れの計算に用いて乱流の直接シミュレーションに成功したとの興味深い報告をしている⁴⁷⁾。

乱流場の計算は流体解析の分野でも特に重要であるが、現状では非常に限られた条件での流れの評価ができ

表 2 乱流計算のアプローチ

手 法	内 容
① 直接シミュレーション	特別な乱流モデルは使わずにできる限り精密に NAVIER-STOKES 方程式を解く。
② 時間平均モデル	NAVIER-STOKES 方程式を時間平均した REYNOLDS 方程式を解くため乱流モデルを仮定する。
③ 格子平均モデル (Sub Grid Scale model or LES: Large Eddy Simulation)	大きな渦はそのまま計算し格子内に収まる小さな渦はフィルターをかけてモデル化して非定常三次元流として計算する。

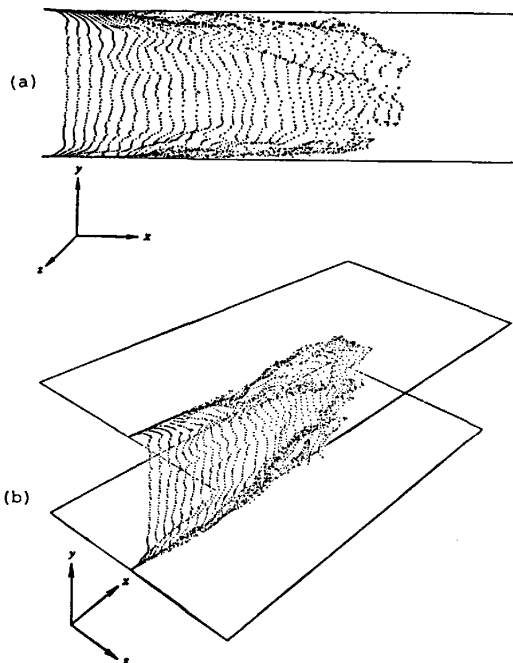


図 5 Large Eddy Simulation による平行板間乱流の解析

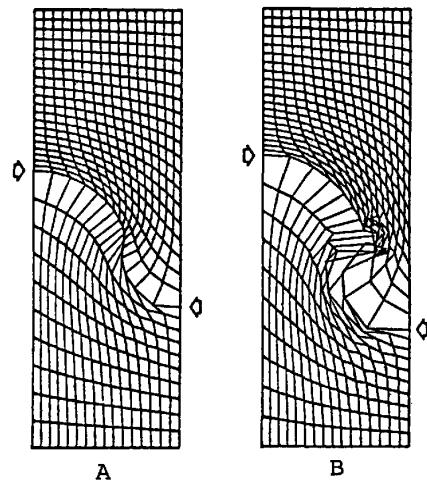
るに過ぎない。それも未知常数が三つも四つもあのような乱流モデルを実際の流れに合わせることに腐心しているように見られるが、我々の目ざすところはあくまでも計算機実験あるいは数値予測であり、パラメータフィッティングが目的ではない。このような考え方から、LES や直接解法などの未知常数の少なくシンプルな乱流評価手法が将来的にはより有利と筆者らは考えている。

3.3.3 自由表面の取扱い

自由表面のある流れは工学的に興味深い、その取扱いは Euler 的方法と Lagrange 的方法に大別される。

Euler 的方法は流体中の任意の一点に対しどのような速度と圧力を持つかを調べる方法で、我々の存在する空間に固定したメッシュと、流体と共に動く質量の無い有限個の marker を用いて自由表面の判定を行う。この方法は前述の MAC 法で使われた手法であるが marker の位置により流体内部、外部のセルを決定するので複雑な自由表面形状も捉えられる。height function を使って自由表面位置を求める手法⁴⁸⁾や Volume of Fraction 法⁴⁹⁾も Euler 的方法の一種である。

Lagrange 的方法は個々の流体素片が時間と共にどう



矢印は Lagrange メッシュの境界を表す。計算の進行につれてメッシュのもつれが表れる。

図 7 Lagrange メッシュによる RAILEIGH-TAILOR 不安定性問題の解析

移動するか調べる方法で自由表面の移動に合わせてメッシュ自体を動かす⁵⁰⁾。自由表面形状を写像変換して矩形領域などでの計算に置き換える body-fit 型の方法⁵¹⁾も Lagrange 的手法として分類して良いだろう。

図 6 は船舶の三次元造波問題を MAC 法⁵²⁾で、図 7 は移動境界を取り扱う代表的な問題である RAYLEIGH-TAILOR 不安定性問題を ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法⁵⁰⁾によつてそれぞれ解いた例であるが、個々の解法の特徴が良く現れた結果となつている。

3.3.4 time marching technique⁵³⁾ (時間進行法)

time marching は非定常問題の漸近解をもつて定常解とする手法で流体解析の分野では頻りに利用される。これは同じ NAVIER-STOKES 方程式を解く場合でも非定常方程式 (時間に対して双曲型) から時間項を除いて定常方程式を導くと時間に対して放物型になり、非定常の式の方が解法のアルゴリズムを組みやすいことなどが理由に挙げられる。また圧縮性流れの解法では音速以上と以下とで現象を記述する方程式が異なるための局所的な式の変更にしても良い。

非圧縮性流体の解法でも安定な解を求めるためにこの手法を用いることが多いが C. F. L 条件⁵⁴⁾のために大きな時間刻みを設定することができず計算時間が長大となることもある。定常解を求める方法としては陰解法⁵⁵⁾が近年急速に発達しているが安定性の高い陽的解法⁵⁶⁾の開発もあり、time marching はまだまだその魅力を失

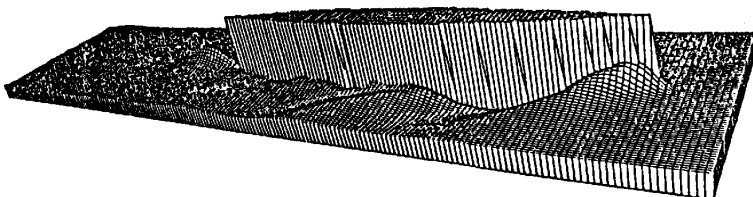


図 6 三次元 MAC 法による船底造波問題の解析

っていない。

4. 鉄鋼プロセスにおける流体解析の適用事例

4.1 高炉炉底部の溶銹自然対流の数学モデル化と炉底耐火物の侵食予測⁵⁷⁾

近年の高炉の大型化や操業条件の過酷化は炉底部耐火物の損耗を早め高炉全体の寿命を短くさせる大きな原因となっている。吉川らは高炉炉底異常侵食の定量的評価のために炉底の冷却によつて炉壁近傍に自然対流に起因する下降流が発生しこの流れが耐火物を侵食するというモデルを仮定し、炉底部にたまった溶銹の軸対称プール内の速度分布と温度分布を数値計算で求め耐火物の侵食量予測を試みた (解析モデル: 図 8 参照)。

解析には PUN らの CHAMPION コード⁵⁸⁾を使用し、乱流粘性に対しては $k-\epsilon$ 二方程式モデルで渦粘度を評価した。自然対流の取扱いは、熱膨脹によつて重力に起因する体積力の変化のみを driving force として扱う Boussinesque 近似⁵⁹⁾によつた (式 (9))。

$$\begin{aligned} \rho \cdot \partial u / \partial t = & (\text{移流項}) + (\text{圧力項}) + (\text{粘性力項}) \\ & + (\rho_0 - \rho) \cdot g \\ = & 0 \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

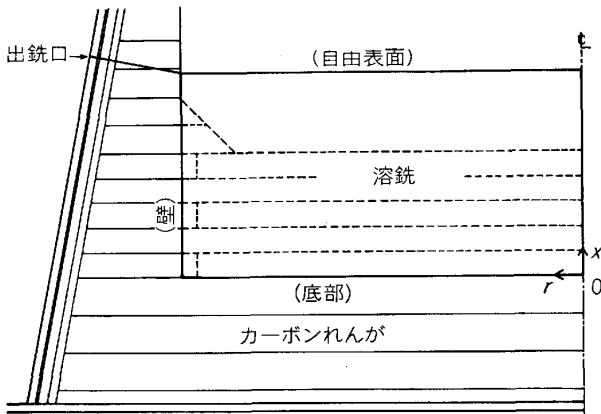


図 8 高炉出銹滓流の解析モデル

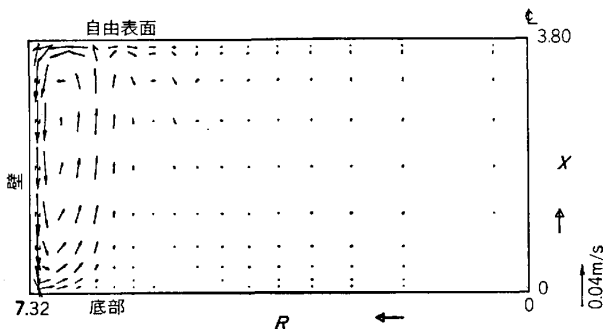


図 9 高炉炉底部溶銹の速度場 (計算結果)

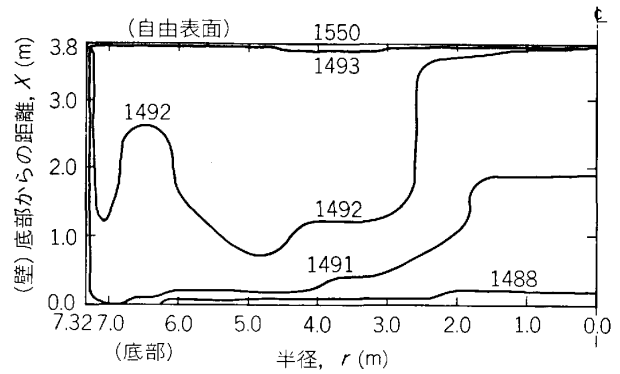


図 10 高炉炉底部溶銹の温度場 (計算結果)

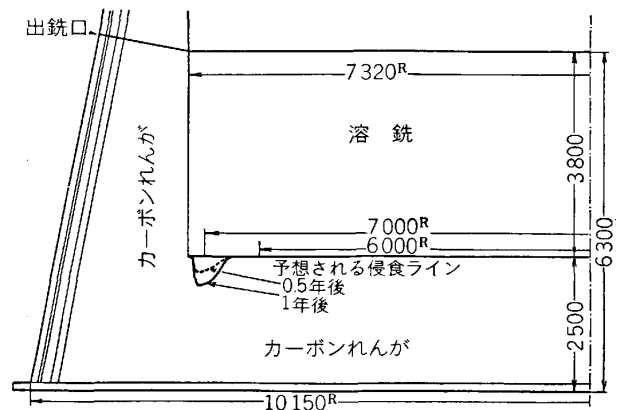


図 11 予測される侵食プロフィール

計算結果として速度分布 (図 9), 温度分布 (図 10) を示すが、炉壁付近に出銹による流動よりもかなり大きな循環流が発生していて、このような炉壁に沿つて下降する流れが炉底コーナー部の侵食に重要な役割を果たしていることが推測される。次にカーボンの物質移動係数を溶解実験や熱移動とのアナロジーから推定して炉底耐火物の侵食量を計算したところ図 11 のようであり、炉底コーナー部の侵食現象を定性的に説明していると考えられる。これら計算による知見から炉壁近傍の自然対流を減少ならしめる冷却方法の検討が重要であることが理解できる。

4.2 高炉出銹滓二相流の境界要素法による解析⁶⁰⁾

高炉安定操業の要件の一つとして出銹滓作業を十分に行つて炉床内の溶銹滓残留量を少なくしておくことが必要である。四方らは出銹滓作業の最適化を目的として出銹中の炉床内スラグ・メタル二相流れを境界要素法⁶¹⁾で計算し出銹条件のスラグ・メタル排出速度に及ぼす影響について検討した。図 12 に解析モデルを示すが炉床内がコークスで充填されスラグ・メタルの流れは Darcy 則 (式 (10)) に従うと二次元ポテンシャル流れとした。

$$u_i = -k_i \Delta \phi_i \dots \dots \dots (10)$$

また液面の時間発展は次式で表されるとした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{k_s (\partial \phi_s / \partial n)_{y=h}}{\cos \beta_s} + U_s \dots \dots \dots (11)$$

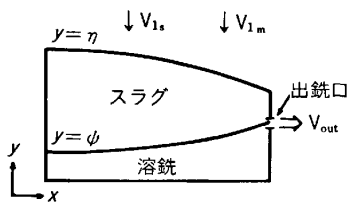


図12 高炉出鉄滓流の解析モデル

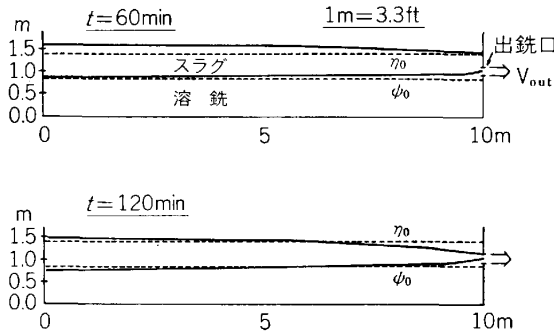


図13 出鉄滓流による液面時間変化(計算結果)

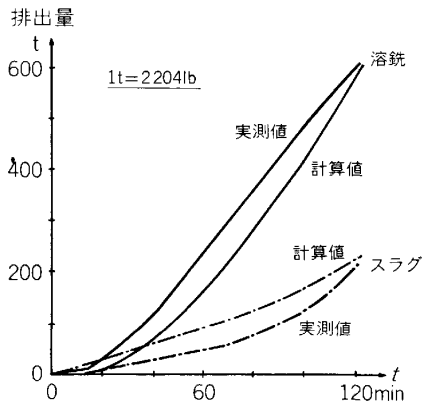


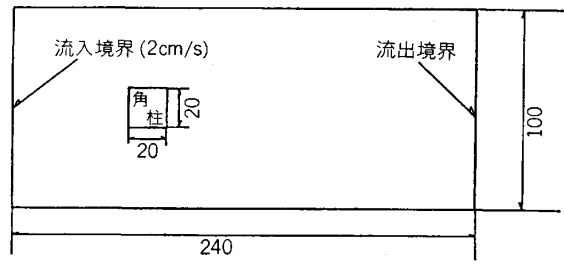
図14 出鉄滓排出量の実測値と計算値の比較

境界条件としてスラグ・メタル界面では法線方向速度成分と圧力が等しいこと、スラグとメタルの流速は出鉄口で等しく総排出速度は一定の溶損速度で排出率が変化することなどを与えた。このような問題を解く場合に境界要素法は界面形状が変わつても二相流の連成式を容易に構成できポテンシャルや流速を精度良く求めることができる。

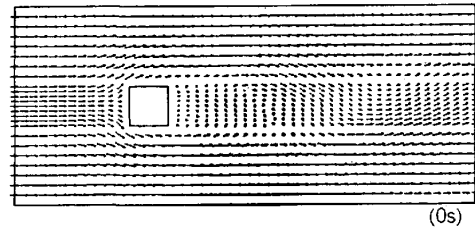
図13はスラグ・メタルの界面形状変化の計算結果であるがレベル変化を安定して求められ実測との一致も図14のように満足すべきものであつた。更に連続出鉄操作での解析から、スラグ透過率や出鉄口溶損に関する知見などが得られ、最大液面レベルに関する操作指針を見出すことができた。

4.3 KARMAN 渦シミュレーション

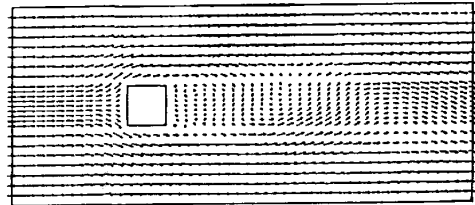
流れの中に置かれた物体の後流に KARMAN 渦が見られる現象は流体力学的にも数値計算的にも興味深い。これを直接差分法による二次元コードでシミュレートして



(a) 解析モデル



(0s)



(b) シミュレーション結果(速度ベクトル) (4s)

図15 改良外節点法による KARMAN 渦解析結果 (Re 数 : 400)

みた。Re 数が 100 になるように計算条件を設定したところ結果は図15のようであった。

最初は主流に置かれた角柱の周りに対称な渦が起こるが、計算が進行するにつれ数値的誤差が局部的に集積して渦は非対称に発達しはじめ、最後に見られるような KARMAN 渦が角柱の後流に千鳥状に現れるようになる。

この渦の発生間隔および主流に直角な方向の間隔は実験値⁶¹⁾と良く一致していて、直接差分法の非定常流解析での妥当性が確認された。

4.4 熱対流を考慮した凝固シミュレーション⁶³⁾

凝固しつつある鋼塊中の未凝固部分の流動は凝固殻の発達に大きな影響を及ぼすことが、これまで解析された例はほとんど無い。ここでは 10t 級円柱状鋼塊の自然対流による流動を主とした流れ場と温度場の解析を試みた。図16に高径比1及び1.5での計算結果の一例を示すが、凝固初期には鋼浴下部を中心に強い循環流が存在している様子がわかる。それに対し凝固中期から末期では凝固殻の生長と共に鑄型-鋼浴間の伝熱抵抗が増して鋼浴全体の流動は相対的に小さくなる。本計算で注目されることは、この時の温度分布(図17)を見ると高径比が大きい場合に鋼塊内部の固液共存域非流動部の幅が広くなり、固相率の高い部位への給湯が不十分となると推測されることである。本計算から鑄造欠陥の定量的予測において流動を考慮することの重要性が示唆されると考える。

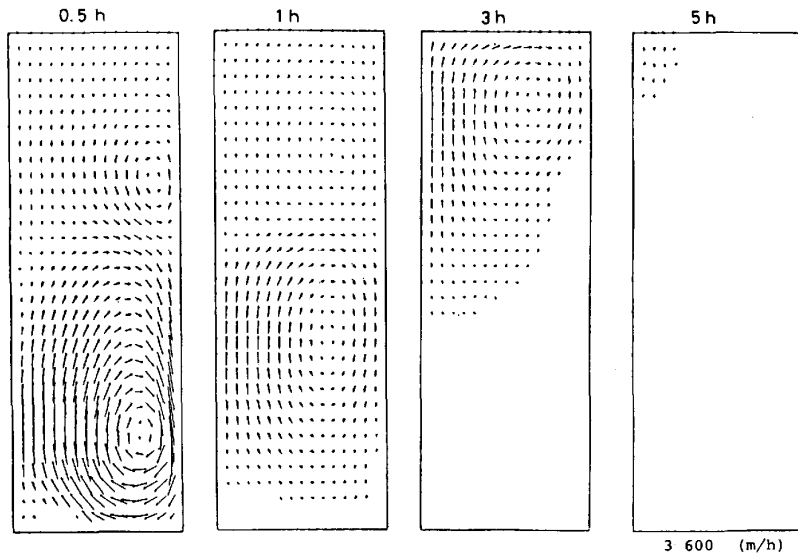


図16 自然対流を伴う鋼塊凝固シミュレーション結果 (速度場)

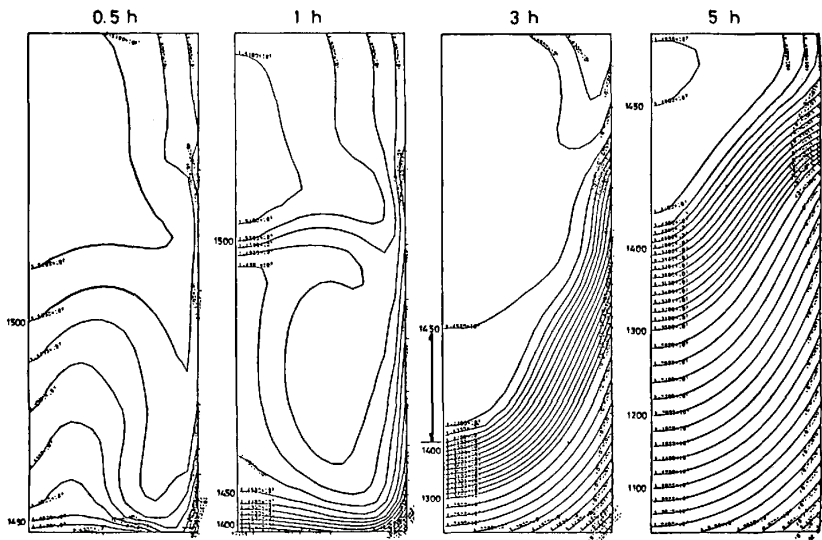


図17 自然対流を伴う鋼塊凝固シミュレーション結果 (温度場)

4.5 連鑄プロセスの流動解析⁶⁴⁾⁶⁵⁾

連鑄機タンディッシュやモールド内の流動状態は介在物の浮上や凝固シェル生成に影響を及ぼして直接に鑄片品質を左右する。ここではまず二次元直接差分法を用いて求めた連鑄モールド及びタンディッシュL断面の速度分布を図18, 19に示す。鑄込速度は1.0 m/min相当であり、乱流粘性はDEARDORFFモデルで考慮している。ノズルや堰の形状により鋼浴部分の流れ場に大きな影響があるのが理解できる。

ここで注意しなければならないのは、実プロセスでの流れの状態を調べるためには三次元シミュレーションが必須だということである。というのは冶金プロセス内の流れの大半は三次元的であり、問題の本質を二次元モデルで表現することが不可能なことが多いからである。

その例として、水島製鉄所第5連続鑄造機のモールド(220厚×1200幅)内溶鋼流動を直接差分法による三次

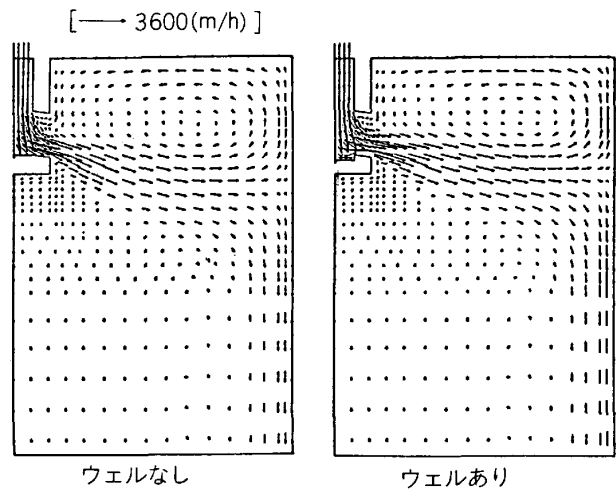


図18 連鑄モールド内溶鋼流動の二次元解析結果

元コードで解析した例を示す。図20は解析モデルとメ

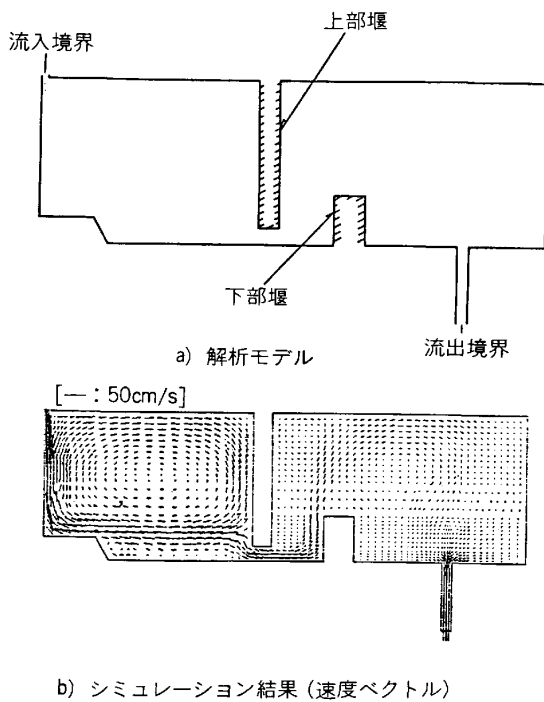


図19 タンディッシュ内溶鋼流動の二次元解析結果

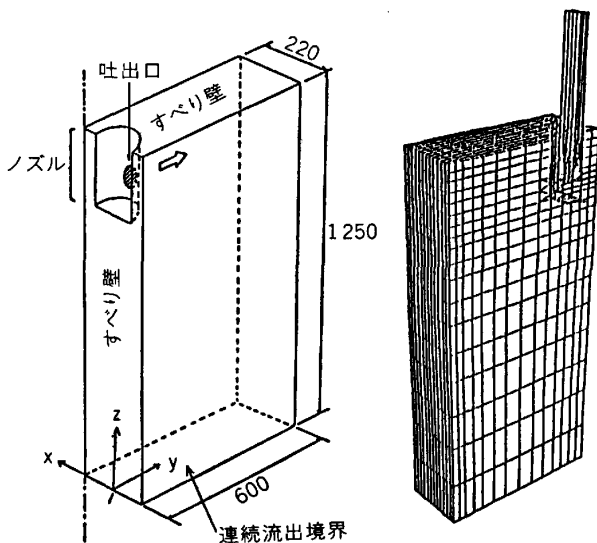


図20 三次元連铸モールド内溶鋼流動の解析モデル

ッシュの概形である。図 21 は計算結果として速度ベクトル鳥瞰図を示したが、全体の大まかな流動状況を把握することができる。図 22 は別の結果表示方法として本モデルの代表的な二次元断面における速度ベクトルを表示したものであるが、ノズルからの吐出流が減衰しつつモールド短辺に衝突して上下に反転流が生じそれぞれ大きな三次元渦流を形成する状態が良く理解できる。これらの流れの様子は水モデル実験の結果と良く対応しているが、二次元シミュレーションでは定性的にさえ表現できないものである。

また図 23 は EMBR (電磁ブレーキ) による吐出流の制動効果について解析した例で、ノズルからの流れに

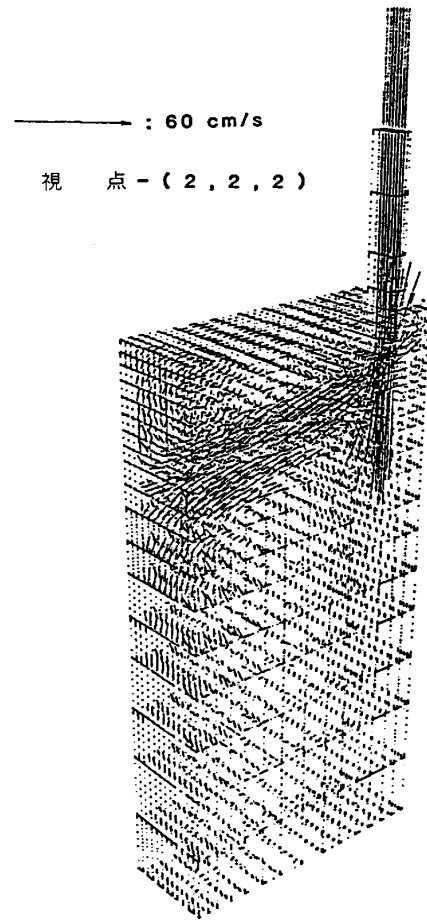


図21 三次元連铸モールド内溶鋼流動の解析モデル

制動がかかり短辺付近で一様でかつ静かな流れとなつている様子がシミュレートされている。

このような三次元流れでは結果を単にプリント出力すると膨大な量になるので、コンピュータグラフィックスを生かした表示手法も開発すべき重要な技術である⁶⁶⁾。

5. おわりに

流体数値解析の基本的計算手法と鉄鋼プロセスへの適用事例について述べてきたが、流れの場を定量化する一つ的手段としてこれら手法は十分にその役割を果たしていることが理解されたのではないだろうか。

ここで注意を喚起しておきたいのはこれら解析の成功は実際にその場で起こっている冶金現象の基本的理解と無縁ではないということである。すなわち実際に流れ場を定量化することができても、それが冶金理論と結び付き実際に役立つ知見につながらなくてはプロセス解析としては意味を成さない。ただ単に解析手法を知っているのと、それを実際に理解し応用できるのとでは雲泥の差があることを認識し、現場のニーズに見合った解析に留意することが必要である。

コンピュータの能力は日進月歩であり、現実到我々

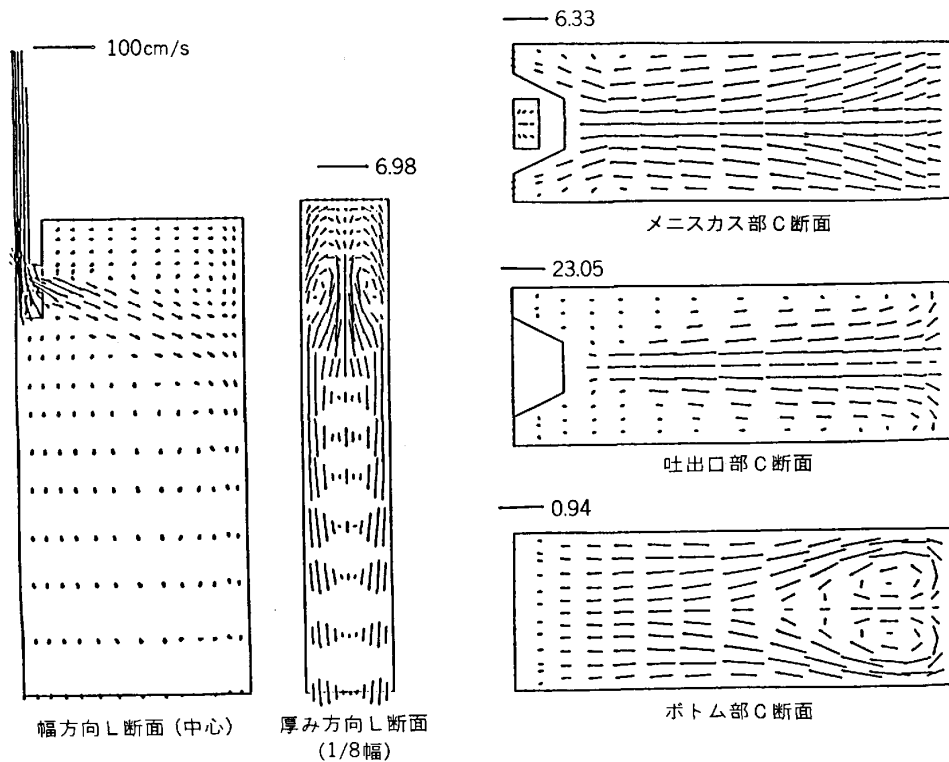


図22 三次元連铸モールド内溶鋼流動計算結果 (速度ベクトル鳥瞰図)

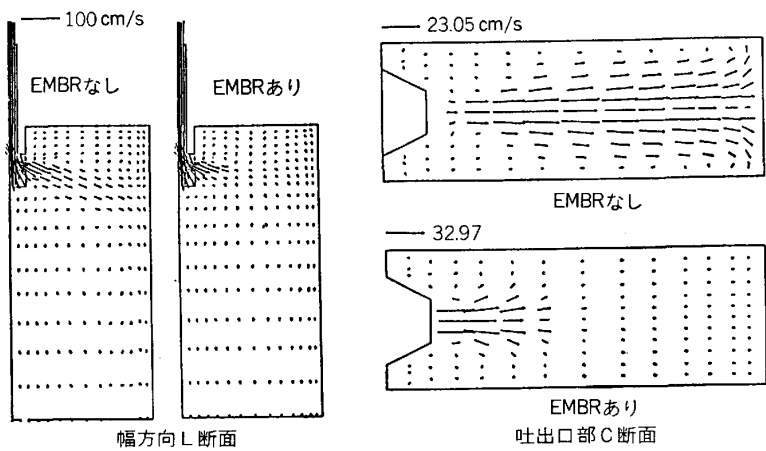


図23 三次元連铸モールド内溶鋼流動計算結果 (代表断面速度ベクトル)

がモデル実験の代わりに数値解析を日常茶飯に行う時代が迫ってきている。流体数値解析に求められている機能は今まで述べたように多くの先達の努力でほぼ満足できる段階に入りつつあると言えるが、鉄鋼業においては実プロセスへの応用面での困難をこれから乗り越えていかなければならない。本解説がそれら難関に立ち向かう若き初学者の手助けとなれば幸甚である。そしてそれらの人々が他産業に無いスケールメリットを持つわが鉄鋼業に多くの実をもたらしてくれることを期待したい。

最後に本解説をまとめるにあたり(株)構造計画研究所流体研究室、当社技術研究本部、システム部技術計算グループなどから資料提供をはじめ多くの協力、助言を賜ったことを感謝する。

記 号

- ρ : 密度
- \mathbf{u} : 速度ベクトル
- P : 圧力
- μ : 粘度
- \mathbf{F} : 体積力
- ϕ : 流れ関数
- ω : 渦度
- ν : 動粘度 ($=\mu/\rho$)
- \mathbf{K} : 粘性(剛性)マトリックス
- \mathbf{F} : 物体力ベクトル(過重ベクトル)
- \mathbf{S} : 形状関数に関するマトリックス
- \mathbf{M} : 質量マトリックス
- C : 濃度
- \mathbf{g} : 重力

ρ_0 : 基準密度
 Re: レイノルズ数
 θ : 温度
 k_i : 透過係数
 ϕ_i : 圧力ポテンシャル
 β : 二相流界面の角度
 t : 時間
 Δt : 時間きざみ
 ∇ : $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$
 ∇^2 : $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

文 献

- 1) 片山 昭: 情報処理, 22(1981), p. 1128
- 2) 三好 甫: 日経コンピュータ, 1984年1月20日号, p. 122
- 3) 中原崇文, 柘植綾夫, 鶴飼 修: 日本機械学会誌, 87 (1984) 785, p. 390
- 4) P. J. ROACHE 著, 高橋亮一編: コンピュータによる流体力学・(上), (下) (1978) [構造計画研究所]
- 5) 高橋亮一: コンピュータによる流体力学・演習編 (1982) [構造計画研究所]
- 6) 築山 洋: シミュレーション流体力学入門(1980) [企画センター]
- 7) R. K. AGARWAL: Proc. ASME/AIAA Conf. on Computers in Flow Predictions and Fluid Dynamics Experiments. Washington D. C. (1981), p. 73
- 8) A. J. CHORIN: J. Computational Physics, 2 (1967), p. 12
- 9) M. E. EVANS and F. H. HARLOW: LASL Rept. No. LA-2139 (1957), Los Alamos N. Mex
- 10) R. W. MACCORMACK: AIAA Paper, No. 69-354 (1969)
- 11) A. A. AMSDEN and F. H. HARLOW: LASL Rept. No. LA-4370 (1970), Los Alamos N. Mex
- 12) 棚橋隆彦: 機械の研究, 37 (1985) 3, p. 383
- 13) R. K. C. CHAN and R. C. STREET: J. Computational Physics, 6 (1971), p. 68
- 14) J. A. VIECELLI: J. Computational Physics, 18 (1971), p. 119
- 15) C. W. HIRT, B. D. NICHOLS and N. C. ROMERO: LASL Rept. No. LA-4370(1970), Los Alamos N. Mex
- 16) L. D. CLOUTMAN, C. W. HIRT and R. C. ROMERO: LASL Rept. No. LA-6236 (1976), Los Alamos N. Mex
- 17) Md. S. ALAM, T. KAWAMURA, K. KUWAHARA and H. TAKAMI: Proc. the 31th Japan National Cong. for Applied Mech., 31 (1981), p. 391 [Univ. Tokyo Press]
- 18) 大中逸雄: 金属, 50 (1980) 6, p. 15
- 19) 大中逸雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1737
- 20) 八百 升: シンポジウム「コンピュータによる鑄造品の凝固解析とその動向」テキスト (1985), p. 25 [素材形センター]
- 21) 八百 升, 一宮正俊, 篠原慶章, 岩崎 健, 杉山一久, 目崎令司: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1024
- 22) 川井忠彦編: Finite Element Flow Analysis (1982) [Univ. Tokyo Press]
- 23) 川井忠彦編: 第4回流れの有限要素解析シンポジウム (1983), p. 97 [日科技連]
- 24) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門 (1983) [培風館]
- 25) 原平八郎, 平野廣和, 池ノ内昌弘: 数理科学, No. 236 (1983), p. 14 [サイエンス社]
- 26) T. J. R. HUGHES, R. L. TAILOR and J. LEVY: Finite Element in Fluids, 3 (1978), p. 55
- 27) O. C. ZIENKIEWICZ: Lecture Notes in Math., No. 474(1974) [Springer-Verlag]
- 28) 江口 譲, 矢川元基, 宮内康行: 第4回流れの有限要素解析シンポジウム(川井忠彦編)(1983), p. 57 [日科技連]
- 29) M. KAWAHARA and H. HIRANO: Proc. JSCE (1983)
- 30) 中沢晶平: 日本機械学会誌, 87 (1984) 785, p. 316
- 31) J. C. HEINRICH, P. S. HUAYKORN, O. C. ZIENKIEWICZ and A. R. MITCHELL: Int. J. of Numerical Method in Engineering, 10 (1977), p. 131
- 32) D. W. KELLY, S. NAKAZAWA, O. C. ZIENKIEWICZ and J. C. HEINRICH: Int. J. of Numerical Method in Engineering, 15 (1980), p. 1705
- 33) M. TABATA: Memoirs of Numerical Mathematics, No. 4 (1977), p. 47
- 34) S. P. FRANKEL: Proc. 6th Sympo. in Applied Mathematics, AMS, 6(1965), p. 73
- 35) R. A. GENTRY, R. E. MARTIN and B. J. DALY: J. Comp. Phys., 1(1966), p. 87
- 36) 桑原邦郎, 高見穎郎: 数理科学, No. 233(1982), p. 62 [サイエンス社]
- 37) T. CEBECI and A. M. O. SMITH: Analysis of Turbulence Boundary Layer (1974) [Academic Press]
- 38) P. BRADSHAW, D. H. FERRISS and N. P. ATWELL: J. Fluid Mech., 28(1967), p. 593
- 39) K. HANJALIC and B. E. LAUNDER: J. Fluid Mech., 52(1972), p. 609
- 40) J. C. ROTTA: Z. Phys., 131(1951), p. 51
- 41) F. H. HARLOW and P. I. NAKAYAMA: Phys. Fluids, 10(1967), p. 2323
- 42) 石垣 博: 流体工学における電算機利用に関する調査研究分科会・成果報告書(日本機械学会編)(1983), p. 223
- 43) J. H. FERGIGER: AIAA J., 15(1977), p. 1261
- 44) J. W. DEARDORFF: J. Fluid Mech., 41 (1970), p. 453
- 45) P. MOIN and J. KIM: J. Fluid Mech., 118 (1982), p. 341
- 46) 狩野正徳, 小林敏雄, 石原智男: 日本機械学会論文集(B編), 50 (1984) 449, p. 257
- 47) 河村哲也, 岩津玲磨: 文部省特定研究領域「乱流現象の解明と制御」理論系合同研究会報告書(1984年1月), p. 25
- 48) 武内智行: 水工研報告, 3(1982), p. 41
- 49) B. D. NICHOLS, C. W. HIRT and R. S. HOTCHKISS: LASL Rept. No. LA-8355 (1980), Los Alamos N. Mex
- 50) A. A. AMSDEN and F. H. HARLOW: LASL Rept. No. LA5100(1973), Los Alamos N. Mex
- 51) 中山 司, 鷲津久一郎: 第30回応用力学連合講演会講演論文集(1980), p. 227

- 52) 宮田秀明: 日本造船学会誌 (1984) 658, p. 30
- 53) *J. von NEUMANN and R. D. RICHTMYER*: *J. Appl. Phys.*, 21(1950), p. 232
- 54) *R. COURANT, K. O. FRIEDRICHS and H. LEWY*: *Mathematische Annalen*, 100(1928), p. 32
- 55) *R. M. BEAM and R. F. WARMING*: *J. Comp. Phys.*, 22(1976), p. 87
- 56) *N. SATOHUKA and M. TUJITA*: *Proc. BAIL II Conf.* (1982), p. 364
- 57) *F. YOSHIKAWA and J. SZEKELY*: *Ironmaking Steelmaking*, 18(1981), p. 159
- 58) *W. M. PUN and D. B. SPOLDING*: Rept. No. HTS/76/2 (1976), Heat Transfer Section, Imperial College of Science and Technology, London
- 59) *D. D. GRAY and A. GIORGINI*: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19(1976), p. 545
- 60) *H. SHIKATA, I. ICHIHARA, M. TAMIYA, K. OKUMURA, K. ICHIHUJI and T. FUKUTAKE*: *AIME Ironmaking Conf.* (1983)
- 61) *C. A. BREBBIA*: 境界要素法入門(1980) [培風館]
- 62) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の力学(1978), p. 226 [理工学社]
- 63) 八百 升, 難波明彦, 野口英臣, 中西恭二, 新庄豊, 木下勝雄: 鉄と鋼, 69(1983), S 1022
- 64) 八百 升, 一宮正俊, 岩崎 健, 小沢三千晴: 鉄と鋼, 67(1981), S 130
- 65) *M. YAO, M. ICHIMIYA, S. KIYOHARA, K. SUZUKI, K. SUGIYAMA and R. MESAKI*: *Proc. AIME 68th. Steelmaking Conf.* (1985)
- 66) 例えば, 「流れとコンピュータグラフィックス」小特集, 日本機械学会誌, 88(1985) 799