

第 115 回講演大会討論会報告

I. 製鉄工程における数学的モデルの活用

座 長 東北大学選鉱製鉄研究所
八 木 順一郎
副座長 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所
田 口 整 司

製鉄プロセスの解明に数学的モデルを利用する方法が提案されてから 20 年以上になり、初期のころと比較すると、基本的なモデルの組立てに関する数学的方法、コンピューターにより解を求める数値解析ならびに炉内現象を記述するための物理的、化学的变化課程のメカニズムの解明等格段の進歩がみられるが、現在に至つても、まだ、数学的モデルのみによつてプロセスの安定操業や制御が実現できる最終的目標にはまだかなり遠いといえる。

本討論会においては、このような現状をふまえ、数学的モデルの今後の展開を計るため、対象を高炉ならびにその関連プロセスに限定して、

- 1) 数学的モデルの根幹をなす炉内現象の数学的表現
- 2) プロセスの性能評価モデルの開発
- 3) 数学的モデルの操業改善や管理への活用

の観点から、以下の講演、討議を行つたので、その概要を報告する。

(討 1) 結晶水を含有する非焼成ペレットの乾燥と伝熱解析

(東北大学選鉱製鉄研究所 秋山友宏ほか)

非焼成ペレットは製鉄工程におけるエネルギー低減の有効な手段と考えられているが結晶水を含有するため、高炉に装入された時、炉内の熱的状态に与える影響を検討し、必要な対策を考えるとともにエネルギー効率の評価を行つておく必要がある。本研究では基礎的に結晶水の分解による吸熱量ならびにペレットの熱伝導率の温度依存性を測定しこれを数式化して、非焼成ペレット単一粒子の乾燥を伝熱律速であると仮定した数学的モデルに組み込み、ペレットの中心と、外表面の温度変化を計算し実測値と比較した。その結果計算値は実測値とかなりよく一致し、結晶水の分解による昇温おくれも表現できることがわかつた。そこでこの結晶水が高炉内の温度分布に与える影響を評価するため、実験的規模の移動層において乾燥実験を行うとともに 1 次元の数学的モデルを作成して炉内の温度分布、水蒸気濃度分布を推定した結果、よい一致が得られ、非焼成ペレット投入量に応じて、熱流比と温度分布の関係が推定できることがわかつた。

この発表に対して、単一粒子および移動層における伝

熱係数の値のとり方、粒子内に生じる温度分布、層頂での水分の付着ならびに自由水の取扱い方などについて討論がなされた。

(討 2) 高炉内のガス流れと液の滴下流れ

(日本鋼管(株)鉄鋼研究所 大野陽太郎ほか)

高炉内におけるガス流れおよび滴下帯における溶銑とスラグの滴下流れは反応、伝熱に重要な影響を与え、ガスの吹抜けや液のフラッキング等も生産性の上限を支配する要因である。しかし、ガス流れや滴下流れは解体調査や操業中の高炉における測定からは情報が得られにくく数学的モデルから推定せざるを得ない。

本研究では、ERGUN 式を使用して高炉における 3 次元ガス流れモデルを作成し、円周方向における不均一流れと融着帯の高さの円周方向におけるアンバランスとの関係、羽口風量分布による塊状帯熱流比分布の制御の可能性を調べ実測値との対応性も得ている。

一方、コークス充填層内を降下する液の滴下流れについては、従来、連続体近似を用いたモデルが使用されていたが、ここでは充填層を粒子とその間隙の格子点からなるネットワーク構造と考え、統計的手法により物理的現象にあつた数学的モデルを導出し、コールドモデル実験によりパラメーターの値を定めた。このモデルを使つて高炉内で生じるフラッキング現象を解明している。その結果粒径、空隙率の低下よりも温度低下によるスラグの粘性の増加がフラッキングの主要因であることを見出している。

この発表に対しては、主として液流れに討論が集中し、粒径、空隙率の分布に関する考え方、気固液間伝熱における界面積の評価、高温におけるスラグ滴下の際に粘性のみならず表面張力が形状に及ぼす効果等について討論がなされた。

(討 3) オンラインシミュレーションモデルを利用した高炉プロセスおよび装入物の性状評価

(北海道大学工学部 石井邦宜ほか)

高炉装入物の高温性状は低温度域での履歴に依存する。この履歴も含めて装入物の高温性状ならびにプロセス評価を実現するため、微分反応器と数学的モデルを結合したユニークなモデルを開発している。微分反応器では鉱石の還元とコークスのガス化反応の速度を測定し、数学的モデルに与え、数学的モデルではガス、固体の温度および組成を推算し、微分反応器内の条件として与える。ペレットならびに焼結鉱を原料として与えた時のシミュレーションモデルから得られる高炉内のプロセス変数の分布はコークス比を変化させた場合、いわゆるコークスガス化炉や直接還元シャフト炉のような分布になつたり、高炉内状況を示す分布になつたりする。焼結鉱とペレットとの比較ではペレットの方が密充填されるため生産性は 20% 大きくなつた。融着帯の幅や溶融スラグとコークスの反応位置についても独特の結果を得てい

る。

この発表について、実炉の操業指針が得られるかどうか、数学的モデルの計算法としてガスと装入物でそれぞれ移動方向に計算すべきではないか等の討論があり、また、従来開発されている高炉の動力学的モデルが必ずしも現場操業に役に立っていないので、本モデルに期待しているというコメントもあつた。

(討4) シャフト式還元炉とキューボラ式溶解炉の3次元数学モデル

(住友金属工業(株)総合技術研究所 山岡秀行ほか)

シャフト炉形式の還元炉とキューボラ形式の溶解炉を組みあわせ、溶解炉に酸素送風と微粉炭吹込みを行う新しい製鉄法の開発を試み、8 t/day のパイロットプロセスにより 5 t/day m³ の高生産性操業に成功した。このプロセスの3次元数学的モデルを作成し、パイロットプロセスの操業結果のシミュレーションを行うと同時に 100 t/day および 2400 t/day プロセスの操業条件を予測した。この数学的モデルは羽口前の現象および炉床の液流れは含んでいないが、ガス、固体、液体の流れ、温度、組成、空間率、粒径、体積占有率等を推定できるものであり、輸送定数の一部はパイロットプロセスの結果に合わせるように修正されている。スケールアップの検討においては3次元モデルの特性を活用し、操業の可能性を検討すると同時に固体排出口の位置、個数等の適性化を計っている。

この発表に対して輸送定数、特に有効熱伝導率、粒子・流体間伝熱係数に修正を加えているが、モデルの精度と、これらの値との関係ならびにスケールアップ時の可能性の判断基準について討論がなされた。

(討5) 高炉内コークスの反応劣化と降下特性を考慮した高炉プロセス解析

((株)神戸製鋼所鉄鋼技術センター 上條綱雄ほか)

高炉の2次元数学的モデルは炉内状況の解析や操業条件変更時の予測に利用されているが、炉内装入物の性状変化や炉下部現象などに問題が残されている。ここでは炉下部でのコークスの挙動に注目し、羽口サンプリングに基づくコークスの反応劣化機構および固体の運動の研究に基づく炉芯の更新機構を新しい数学的モデルに適用している。具体的にはソリューションロス反応による塊内反応率分布と限界強度からコークスの粒度低下および粉率を求め、炉芯コークスは炉の中心部を降下するコークスによつて更新されるという機構であり、これを高炉の数学的モデルに適用することにより炉内温度分布に大きい影響を与えており、これらの因子が重要であることを示すとともに、実炉内状況をより適確に表現できるようにした。

この発表について、発生したコークス粉の反応、流動への影響、炉芯部での粉の分布、レースウェイでの粉の挙動、炉芯を更新する要因、炉芯更新の確認等について

討論がなされた。

(討6) 高炉トータルモデルの機能拡大と高精度化

(新日本製鉄(株)製鉄研究センター 杉山 喬ほか)

高炉内における流動、伝熱、反応の各理論を総合化し、2次元、操業設計や思考実験が可能なトータルモデルを開発している。ここでは実炉推定機能を拡大するため装入物分布推定モデル、層空間率推定モデル、還元粉化モデルを、また、設計機能を拡大するため熱収支、物質収支の整合性をとる機能をサブモデルとして付加し、従来よりさらに広範囲に応用できるモデルを開発した。炉下部現象として、炉芯内への液流れの基礎的研究を行い Darcy タイプの実用的な基礎式をモデルに組み込んでいる。移動速度現象の速度パラメーターの適正化が必要であるが、融着帯形状の推定値は実炉で観察される位置とよく一致している。

この発表については、粒径の異なる粒子を混合した時の空間率の推定において、特に焼結鉱が対象の時の気孔の定義、液の滴下モデルについては実験事実の解釈、また、巨大なトータルプロセスモデルの活用法等について討論がなされた。現場ではモデルで単にシミュレーションができただけでは使ってもらえないがどのように対処しているかの質問については現場のニーズにあわせてパラメーターを変化させる。一方、共通の計算を実施したい場合は技術研究所で行い絶対値ではなく、傾向を重視しているとの解答があつた。

(討7) 数式モデルを活用した高炉操業管理

(川崎製鉄(株)水島製鉄所 篠原幸一ほか)

企画システム、操業設計システム、炉況監視システム、操業管理システムを結合して実炉運転がなされているがそのうちで数式モデルを活用した操業管理において、特徴を有する炉内シミュレーター、装入物分布モデル、炉底侵食管理モデルの使用例について報告したものである。炉内シミュレーターは高炉内の伝熱、反応を1次元的にシミュレートするもので、焼結鉱の還元粉化機構と炉内ガス流れの関係より還元粉化指数の上限管理ならびに Si 移動機構の導入による溶銑中の Si 濃度の推定に使用されている。装入物分布モデルはムーバブルアーマーの大幅な変更時あるいはコークスペース変更時に操作の方向性を操業者に示すために作成されたもので、半径方向の熱流比分布、鉍石及びコークスの層厚、堆積状況、ガス流れパターンの三角ダイヤグラムで構成されている。炉底侵食管理モデルは境界要素法による炉底侵食ライン・凝固ラインを迅速に推定するシステムであり絶対値の精度向上には今後改良の余地が残されているが、侵食状況を2次元的に管理するために有効に活用されている。したがって、操業管理には精密で複雑なモデルより、目的に応じて簡単に近似する現象、厳密に対処する現象を区別してモデル化する方が有用な場合が多い。

この発表については操業度 2.0~2.2 のオールコーク

ス操業で $RDI > 40$ の可能性, 周辺部での分布制御の実施状況, 目的によりモデルを使い分けているがもつともよく使われるモデル, モデルを作る側と使う側での役割分担, 操業不安定時のモデルの使用法等についての討議がなされた。

運営方法として本討論会では, なるべく多くの出席者に討論に参加していただくことを目標に, 従来行ってきた文書により事前の質問事項を提出し, 講演者は事前に解答を用意しておく方式をとらず, フロアからの直接質問方式とし, なるべく多くの参加者に質問していただけるように配慮した。

その結果, 多くの質疑が出され, 活発に討議が行われ, 討論の時間がたりなくなり, 2~3 の問題が討議不十分のまま残ってしまった。もう一つの問題点は講演者は質問が出るまでその内容を知らされていないので, 解答のための準備ができないという点にあった。これに関連して質問者と講演者の見解が多少ずれており議論が成り立たないケースも生じた。本来, このようなケースでは座長が討論をうまくコントロールすべきであるが, 必ずしも完全には成功していない場面もあった。しかし, 全体としては活発に討議がなされ有益な討論会であったと確信している。参加者の御協力に感謝します。

II. 連続鑄造の高速化

座 長 東京大学工学部

梅 田 高 照

副座長 新日本製鉄(株)新素材事業本部

椿 原 治

我が国の鉄鋼業において, 連鑄設備が本格的生産設備として適用され始めたのは 1965 年以降であり, 我が国の年間粗鋼生産高がほぼ 1 億 t となった 1970 年以降, 今日までの連鑄の普及は驚くべきものがあつた (連鑄鋼比率 93.6%, 1987 年 10 月, 日本鉄鋼連盟)。しかし, 製造コスト低減の観点から, 鑄造速度を高速化することにより高効率化を図り, さらに連鑄の稼働基数の低減により省エネルギー, 要員・整備費の削減などが考えられるが, この高速化については品質問題, ブレークアウト, 前後工程のマッチングなど克服すべき課題が多く存在するため, 連続鑄造の高速化を本討論会のテーマとして取り挙げた。

討論会では, 高速化を達成するための設備対応, 操業対応, 品質対応, 前後工程について, 現状の技術水準ならびに今後の方向について討論を行った。

さらに, 従来のオシレーション方式の限界鑄造速度を踏まえて, 新連鑄方式の現状鑄造速度と将来実現の可能性についても触れた。

なお, 本討論会では, 講演後, パネルディスカッション

形式にて討論を行った。講演された 26 件中 21 件についてはすでに講演論文集「材料とプロセス」Vol. 1, No. 1 に掲載されているので, ここでは討論の要旨を記す。

Session 1 「高速鑄造用パウダー」

(討 8) 高速鑄造用パウダー

(日本鋼管(株)福山製鉄所 森 孝志ほか)

(討 9) 高速鑄造におけるモールドパウダーの改善

(日新製鋼(株)呉製鉄所 前田雅之ほか)

(討10) 高速鑄造中炭材用パウダーの鑄型内流入挙動

(住友金属工業(株)総合技術研究所 中井 健ほか)

(討11) 高速鑄造のための鑄型およびパウダー

(新日本製鉄(株)製鋼研究センター 長野 裕ほか)

種々討論の結果, 高速鑄造に適したパウダーとは, 適正な粘性, 軟化温度を保ち, スラグリムが少なく, 高熱伝導のものとの見解に達した。

一方, パウダー面からみた高速鑄造の限界は実操業では 3 m/min の実績ではあるが, 理論計算上は約 7 m/min まで可能であろう。

Session 2 「鑄型内溶鋼流動」

(討12) 高速鑄造における鑄片鑄型間の潤滑挙動

(川崎製鉄(株)千葉製鉄所 鷲尾 勝ほか)

(討13) 拘束性ブレークアウトの防止方法 (モールド総合診断技術の開発第 4 報)

(新日本製鉄(株)堺製鉄所 松下 昭ほか)

(討14) 高速鑄造時における表面清浄鑄片製造技術

(日本鋼管(株)福山研究所 手嶋俊雄ほか)

(討15) 電磁ブレーキによるモールド内溶鋼流動制御

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 斎藤健志ほか)

(討16) 連鑄モールド湯面制御技術

(住友金属工業(株)鹿島製鉄所 坂下 勉ほか)

鑄造速度を上昇させていくと, 鑄片と鑄型間の摩擦が増大し, 拘束性ブレークアウトに至る。さらに, 介在物および気泡の巻込みが生じ, 品質の劣下をきたす。

このため, 取鍋および TD 内での溶鋼の清浄化はもちろんのこと, モールド内湯面制御技術の向上, EMBR の導入, BO 予知計の採用などが対策として報告された。

これらの諸対策の結果, 鑄型内溶鋼流動の観点から, 鑄造量として 7~8 t/min くらいが限界であろうという見解が示された。

Session 3 「鑄片の冷却条件と品質」

(討17) 高速鑄造時の鑄型抜熱と二次冷却条件

((株)神戸製鋼所加古川製鉄所 松尾勝良ほか)

(討18) ミスト冷却ダイナミック制御の開発

(住友金属工業(株)鹿島製鉄所 山下幹夫ほか)

(討19) 高速鑄造時の中炭素鋼鑄片凝固界面歪の解析

(住友金属工業(株)総合技術研究所 河島寿一ほか)

(討20) クレーターエンドプロフィールにおよぼす鑄造条件の影響