



高炉数学モデルの進歩と実操業への展開

埜上 洋*

Improvement of Mathematical Model of Blast Furnace and Its Application in Practical Operation

Hiroshi NOGAMI

Synopsis : Mathematical model of blast furnace operation has been being developed for about four decades. One of the major model frameworks consists of balance of mass, momentum, thermal energy and materials, transport phenomena theory, and chemical kinetics. The models on this basis have been extended from one-dimensional to multi-dimensional, and from steady to transient. This progress has improved the model accuracy and applicability. Although this model extension raised the computational load, recent progress of computer science and technology allows us to get the computed results in practical time period, and shows the capability to apply numerical simulation in the practical operation of blast furnace.

This paper gives an outline of the recent mathematical model of the blast furnace operation, and some applications to the novel operation such as scrap charging and top gas recycling. Next, the expected phases of the model application in the practical operations are shown. Finally some phenomena to be clarified and formulated that are indispensable for the further development of the blast furnace models, and a new direction of model development, such as stochastic process and discontinuity, are shown.

Key words : blast furnace; mathematical model, development; practical application.

1. 緒言

高炉の操業状態を予測する方法は、炉の全体・領域ごとの平衡論あるいは熱・物質収支に基づく方法、Rist線図、反応速度論・移動速度論に基づく総合モデルなど様々な方法がある。前二者、特にRist線図は現在でも種々の局面で用いられ、与えられた条件における操業の可否や総合的な操業状態を検討するために広く用いられている。一方、実際の高炉の操業やその設計にあたっては、操業値として検出端に表示される情報ばかりでなく、現状あるいは新たに導入される条件における炉内の現象や分布を把握した上で、問題となりうる現象が生じないように作業を進めていく必要がある。このためには、移動速度論、反応速度論に基づく炉内現象の予測が不可欠となる。そこで本稿では速度論的取り扱いに基づく高炉の総合モデルの近年の動向を

概説するとともに、その実操業への応用に関して、方法および問題点とその展望を述べる。

2. 高炉モデルの進歩

我が国における反応速度論、移動現象論に基づく微分方程式によって炉内の現象を表現した製鉄用高炉の数値シミュレーション技術は、八木の解説¹⁾に詳説されているように、1960年代の鞭らの試み²⁻⁵⁾に端を発する。この手法に立脚する数学モデルの開発の流れは、解法や境界条件の設定法は研究者によって様々であるが、全体としてFig. 1に示すように展開してきた。1980年代にまでに、考慮する現象や反応の拡大⁶⁾、非定常項の考慮^{7,8)}、炉内を半径方向に分割し、それぞれに一次元モデルを適用した擬二次元モデル⁹⁻¹¹⁾、さらに二次元モデル¹²⁻¹⁶⁾へと発展してきた。

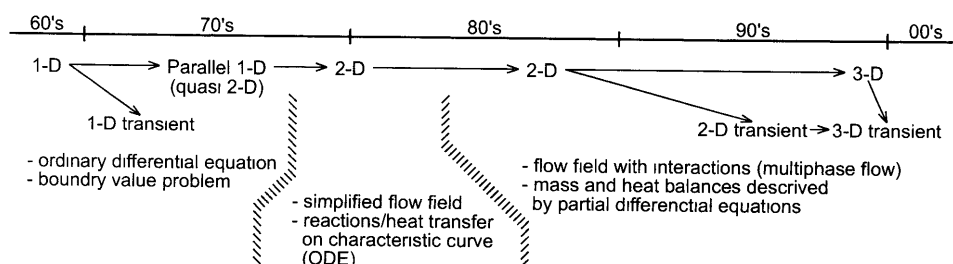


Fig. 1. Development of mathematical model of blast furnace.

平成14年9月4日受付 平成14年10月16日受理 (Received on Sep 4, 2002; Accepted on Oct 16, 2002)

* 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-8577)

これらのモデルは高炉の解体調査の結果と併せて、従来ブラックボックスとして扱われてきた高炉の内部現象を明らかにしたばかりでなく、送風圧変動の予測¹⁷⁾、限界燃料比の推定¹⁸⁾、火入れおよび吹き卸し操業の検討^{8,19)} および酸素高炉プロセスの解析²⁰⁾ などに応用されてきている。

その後、既に羽田野と栗田¹²⁾ および杉山と須賀田¹³⁾ の二次元モデルにその概念が一部持ち込まれているが、1989年から92年に活動した「充填層中の気・固・液移動現象部会」(日本鉄鋼協会特定基礎研究会)²¹⁾ では、炉下部における現象の多相流的取り扱いの重要性が指摘され、異相間の双方向の相互作用を考慮した多相流の取り扱いは、その後の高炉数学モデル²²⁻²⁶⁾ の開発において基礎概念として利用されている。また同研究会では、高炉内の流動に対して、物質の三態である気・固・液に加え、物理的には固体であるが、装入物とはその運動形態が異なる微粉を一つの独立相として取り扱う「4流体モデル」の概念が提案されており、この概念に基づく数学モデルも二次元²³⁾、二次元非定常²⁴⁾、三次元²⁵⁾、三次元非定常²⁶⁾ へと展開されている。

3. 最近のモデル構成例

前節で述べたように、高炉数学モデル開発においては、その基礎的な枠組みとして多相流の手法が取り入れられ、多次元化・非定常化が進められている。本説では近年報告された高炉の総合シミュレーションモデルの中で、流動および双方向の相互作用について可能な限り厳密に取り扱った著者らのモデルについて、その概略を紹介する。

高炉の融着帯より下部の領域では、羽口から吹込まれた衝風およびレースウェイ内で生成した還元ガス(気体相)、羽口前燃焼帯に向かうコークス粒子(固体相)、融着帯で発生した溶銑および溶融スラグ(液体相)に加えて未燃微粉炭および微粉コークスなど(粉体相)が同時に流通している。これらの物質(相)はそれぞれに異なる流動機構で運動し、また反応系への関与が異なるため、相ごとに異なる速度・温度・組成を有することになり、異相間の速度差、温度差を駆動力として、また反応や相変化を通して運動量、熱、物質を交換する。よって各相の流動・伝熱・物質移動を表現する基礎式群には、その影響を考慮する必要がある。

ここで挙げた気体・固体・液体・粉体の運動の解析法は、各相ごとに多数提案されており、またこれらを組合わせた混相流解析の手法も種々提案されている。本稿で対象とする高炉のプロセスシミュレーションを考えた場合、各相の流動ばかりでなく、伝熱、物質移動、反応の解析を同時に行う必要がある。物質移動解析においては、各相が数〜数十種の化学成分から構成されているため、基本的にこれらすべての化学種の保存式を連立して解く必要があり、

解くべき方程式の数は多数にのぼる。しかし、層内を不連続相として運動する粉体と液体の運動の表現に Euler 法を、また固体(充填粒子群)に対して流体近似を適用することにより、すべてのマクロ現象が統一された形式の保存式で表現され、同じ解析法を適用することができる。すなわち、各相の挙動は次に示す一般形に当てはまる基礎式で表現することができる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_i \rho_i \phi_i) + \text{div}(\varepsilon_i \rho_i \bar{u}_i \phi_i) - \Gamma_{\phi_i} \text{grad} \phi_i = S_{\phi_i} + \sum_j^{j \neq i} F_{\phi_i, j} \dots \dots (1)$$

各相の挙動を表現するのに必要な基礎式は、各相それぞれの連続の式、運動方程式、エネルギー保存式および化学成分の質量保存式である。上式中の添字 *i* に気体、固体、液体および粉体に対してそれぞれ *g*, *s*, *l* および *f* を代入することで対象とする相を表し、各方程式で解くべき変数、すなわち、速度成分、エンタルピまたは温度、相の体積分率または圧力および各相に含まれる化学種の濃度を記号 ϕ に代入すれば、必要な保存式が得られる。尚、連続の式を得るには ϕ に 1 を代入する。解析において考慮すべき化学種は、対象とする操業条件や解析の結果として必要となる情報により異なるが、著者らのモデルでは気相、固相、液相および粉体相に対して、それぞれ最大 12, 12, 9 および 10 成分を考慮できるようになっている。(1) 式中の ε は体積分率を表し、 Γ_{ϕ_i} , S_{ϕ_i} および $\sum_j^{j \neq i} F_{\phi_i, j}$ はそれぞれ考慮する変数に対する有効拡散係数、生成項および他相からの相互作用項である。生成項 S_{ϕ_i} では圧力勾配、重力、反応や反応に伴う吸発熱等を評価し、相互作用項においては異相間の質量、運動量および熱の交換量を評価する。質量交換速度については反応あるいは相変化の速度に基づいて与えられるが、考慮した 35 個の反応および相変化の速度は、温度、反応物濃度等の依存性を考慮した速度論的扱いを適用して推算した。異相間の運動量および熱交換速度は次式で評価される。

$$F_{\phi_i, j} = h_{\phi_i, j} (\phi_j - \phi_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、速度差および温度差に掛かる係数 $h_{\phi_i, j}$ はそれぞれ Table 1 および 2 に示した方法、あるいはこれに対象相間の接触面積を考慮して決定した。

実際の解析にあたっては、高炉の形状および内部領域分布に対応した連続な曲線座標を使用し、この曲線座標系の直交座標系への座標変換により変形した(1)式を、コントロールボリューム法を用いて離散化して代数方程式群とし、適当な初期および境界条件を与えて連立して解くことで、炉内における温度・濃度など各変数の分布を算出し、高炉の操業状態を推定した。

Table 1. Methods to estimate inter-phase momentum exchange.

System	Method	Ref.
Gas-Solid	Ergun's equation	27
Gas-Fine	Drag of single particle with Richardson-Zaki's modification	28, 29
Gas-Liquid	Drag of single droplet	28, 29
Solid-Liquid	Kozeny-Carman equation	30, 31
Solid-Fine	Fanning's equation	32, 33
Liquid-Fine	not considered	

Table 2. Evaluation methods for inter-phase heat exchange rates.

System	Method	Ref.
Gas-Solid	Ranz's equation with Akiyama's modification	34
Gas-Fine	Ranz-Marshall equation	35
Gas-Liquid	Mackey-Warner correlation	36
Solid-Liquid	Eckert-Drake correlation	37
Solid-Fine	Emulsion model	38
Liquid-Fine	not considered	

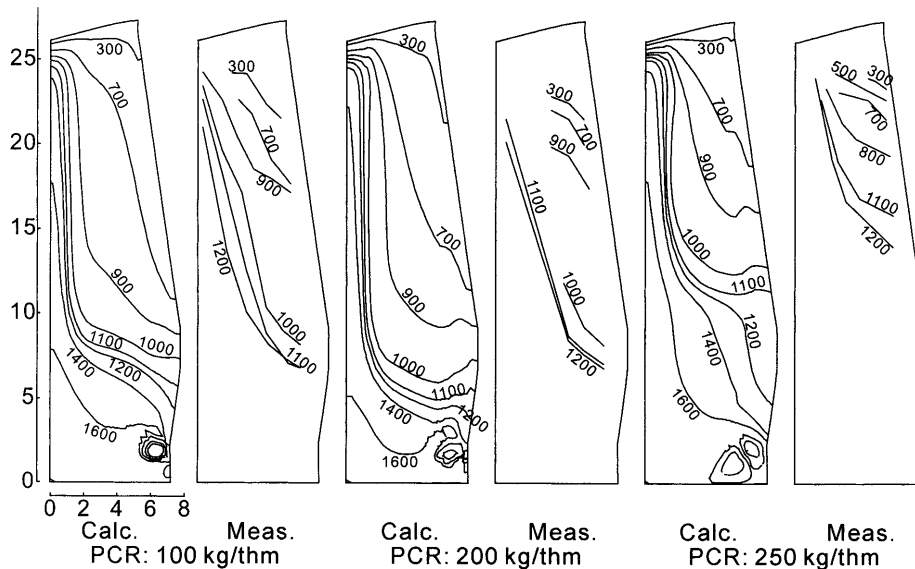


Fig. 2. Comparison of estimated and measured temperatures under three pulverized coal injection rates. Units: °C.

4. モデル解析の適用例

前節で紹介した手法は、高微粉炭比操業時の操業予測²⁴⁾や装入物分布変更時の炉内分布の非正常挙動の推算²⁶⁾といった、従来の高炉の炉内状態推定のみならず、現在では、大幅な設備変更が必要な場合も含め、様々な条件における操業の予測にも適用されている。以下にその代表的な例を示す。

4.1 微粉炭吹込み量の影響解析

Adilsonら²⁴⁾は数学モデルの妥当性の検証も兼ねて、羽口への微粉炭吹込み量が炉内状況および操業値に及ぼす影響について数学モデルを用いて解析している。Fig. 2 に微粉炭比 100, 200 および 250 kg/thm 時の炉内温度の解析結果と測定結果の比較を示す。微粉炭比 250 kg/thm の条件では、高温領域の高さに若干の差違が見られるものの、炉の中心軸付近で高温領域が炉上部まで急激に立ち上がっている傾向や全体的な温度レベルについては、解析結果は測定結果を良好に再現できており、微粉炭比の上昇とともに炉内の温度分布が全体に上方に移動していく傾向も良好に再現されている。Table 3 に主な操業値の比較を示す。これら一連の解析においては、衝風温度、流量、装入物分布など、実際に高炉の操業において操作可能な因子がモデルへの入力パラメータとなっており、これ以外のパラメータは

Table 3. Comparison of measured and calculated operational parameter.

Operational parameter	PCR: 100 kg/thm			PCR: 200 kg/thm			PCR: 250 kg/thm		
	Meas.	Calc.	%Err.	Meas.	Calc.	%Err.	Meas.	Calc.	%Err.
Production [kg/s]	96.8	98.2	2.8	106.5	107.0	0.5	97.8	96.4	1.4
Coke rate [kg/thm]	381	388	1.8	313	310	0.9	291	291	0.1
Slag rate [kg/thm]	270	255	5.5	261	255	2.3	265	272	2.6
Gas [K]	443	465	3.8	514	549	6.8	-	-	-
η_{CO} [%]	51.3	56.0	9.1	50.6	53.0	4.7	49.2	52.0	5.6

反応速度パラメータも含めてすべて同じ値を用いている^{23,24,39)}。結果として、COのガス利用率の推定誤差がやや大きくなっているものの、全体として高炉のシミュレータとして満足のいく精度が得られている。すなわち、原燃料の被還元性や反応性が期間ごとに異なっている可能性もあり、これらを考慮してパラメータを変化させることにより、さらなる精度向上が期待できる。

4.2 スクラップ装入

スクラップは既に還元された鉄であり、溶鉄を製造するのに還元に必要なエネルギーの投入が不要で、溶解に必要なエネルギーしか必要としないことから、スクラップあるいは金属鉄を炉上部から装入した場合には、出銑比の増加と燃料比の低減が期待できる。Austinら⁴⁰⁾は、高炉にスク

ラップを装入した操業を対象として、スクラップ装入量ばかりでなく、炉頂から投入する際の装入物分布についても検討した。

解析では、内容積 4900 m³ の高炉における衝風流量 8750 Nm³/min、コークス比 450 kg/thm、PC 比 57 kg/thm の条件を基準として設定した。この際の出銑量は約 8000 t/day である。装入物の粒径分布に関しては鉬石が 15-40 mm、コークスが 35.5-60 mm の範囲にあり、スクラップは 25 mm とした。スクラップの装入方法として Fig. 3 に示した中心装入、均一装入および周辺装入の三種類を検討した。

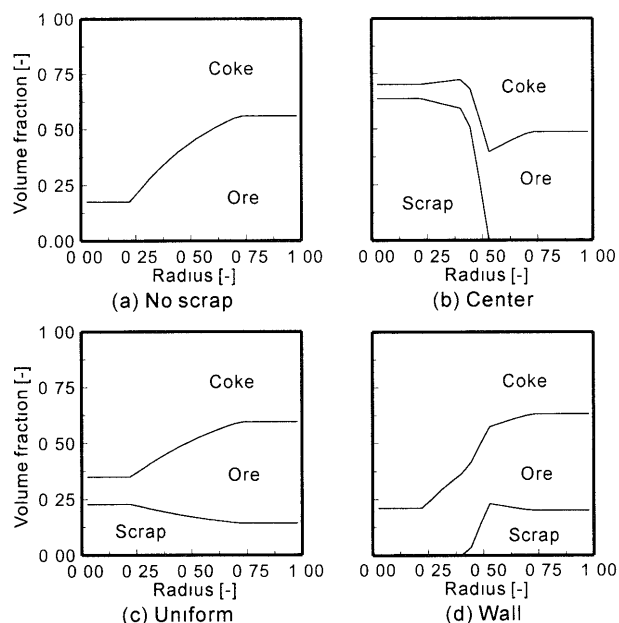


Fig. 3. Typical burden distribution patterns used in the computational study.

溶銑温度を一定とした条件下において得られたスクラップ装入量の各種操業値に及ぼす影響の推算結果を Fig. 4 に示す。解析ではスクラップ/鉬石比を所定の値に固定し、溶銑温度が一定となるように鉬石とスクラップの総量対コークス量の値が調整されている。スクラップ対鉬石の比を増加させると、装入方法のいかんによらず生産量が増加し、燃料比が低下する傾向が示されている。炉頂ガスのガス利用率はスクラップ比の増加に伴って漸減する傾向がある。炉頂ガス温度についてはスクラップ比の増加に伴って低下する傾向があり、中心付近へのスクラップ投入量が多い装入法ほどその傾向が著しい。レースウェイ温度については中心装入の場合に急激に低下する傾向が示されている。

スクラップを原料として装入した場合には、鉬石がスクラップに置き換わった分だけ還元と脈石成分の溶解に必要なエネルギーおよび炭素が不要となる。またシャフト部においては装入物中に含まれる鉬石の割合の減少とともに還元による CO の消費量が減って CO 濃度が保たれるため、間接還元による鉬石の還元が進行し、直接還元を利用される炭素の量が減少する。これらのことからスクラップ装入量の増加とともに燃料比が低下するものと考えられる。ガス利用率の低下についても、シャフト部における鉬石の還元による CO 消費量の低減によって説明できる。炉頂ガス温度の低下については、スクラップ装入割合の増加に伴う炉頂からの総装入物量の増加によってシャフト部での熱流比が増加するためであると考えられる。特に中心装入の場合には、シャフト部において比較的高温のガスが主に流通する中心部に多量のスクラップが装入されるため、その影響が顕著に現れている。

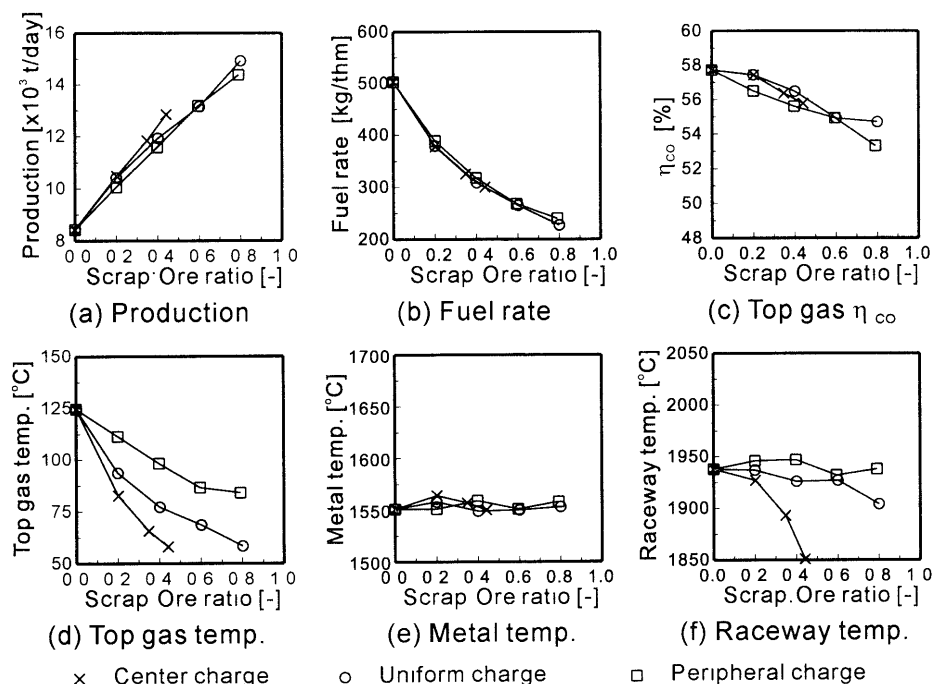


Fig. 4. Calculated furnace parameters for scrap charging operation.

4.3 炉頂ガス再循環

炉頂ガス再循環操作は、炉内に吹込まれる衝風の一部分を炉頂からの循環ガスに置き換えて羽口から吹込む方法である。炉頂ガスの循環量を増加させた場合には、炉内に流入する窒素の量が低下して、相対的に反応ガス濃度が増加するとともに、炭素の循環による実質的な炉内滞在時間の増加によって炭素の利用効率を向上させ、環境へのCO₂排出量を低減できる可能性がある。このような操作については小型の高炉における実験的な検討が過去に行われており、炉頂ガスをCO₂を除去しながら循環させ、送風中に酸素富化した場合、出鉄量が増加し燃料比が低減したことが報告されている⁴¹⁾。Austinら⁴²⁾は、炉頂ガスの循環操作に関してFig. 5に示した三種類の循環法について数値実験により検討を行った。第一の方法では衝風の流量を一定に保ったまま、その一部を単純に炉頂ガスに置き換える（単純置換）。二番目は単純置換と同様に衝風の所定の割合を炉頂ガスに置き換えるが、さらに炉内に流入する酸素量を一定に保つように酸素を付加する（酸素富化置換）方法である。ただし、この場合においても衝風の総流量は一定とした。三番目の方法は酸素付加置換と同様に、酸素流量および衝風流量を一定に保ちながら、所定の割合で衝風を炉頂からの循環ガスと置き換えるが、この方法においては炉頂ガスからCO₂を除去したガスを循環させる（HRG置換）。解析においてはスクラップ装入の場合と同様に、繰り返し計算においてO/C比を変更して溶銹温度を一定とする拘束条件を採用した。

Fig. 6に循環ガスの割合が高炉の操業値に及ぼす影響を示す。炉頂ガスを単純に衝風に混合する単純置換法の場合には、循環する炭素量は増大するものの、これとともに羽口前の燃焼帯にCO₂が吹込まれ、ソリューションロス反応の吸熱によって燃焼帯温度が低下する。これに伴う溶銹温度の低下を補償するために鉬石の投入量を減少せざるを得ないため出鉄量が減少し、燃料比が増加する。この装入物中の鉬石割合の減少により炉内の装入物降下速度が低下して熱流比が増加するため、炉頂ガス温度は上昇する傾向にある。また羽口から吹込まれるCO、CO₂の影響を補正した修正ガス利用率

$$\eta'_{CO} = \frac{m_{CO_2, \text{topgas}} - m_{CO_2, \text{blast}}}{(m_{CO_2, \text{topgas}} - m_{CO_2, \text{blast}}) + (m_{CO, \text{topgas}} - m_{CO, \text{blast}})} \dots\dots(3)$$

(ここで m はガス中のモル分率) も低下する傾向がある。すなわち単純に炉頂ガスを衝風に混合して再循環させる単純置換法は高炉の効率を低下させることが分かる。

炉頂ガスを衝風に循環させる際に酸素を富化する酸素富化置換法の場合にも、循環ガスの吹込み割合の増加とともに出鉄比が低下し、燃料比は増加するが、その影響は単純置換法の場合よりも小さくなっている。他の操業値についても単純置換法と同様の傾向を示した。酸素富化置換法を

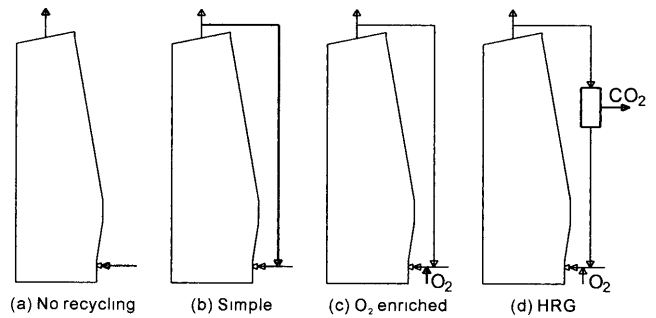


Fig. 5. Schematic diagram of top gas recycling methods. HRG: hot reducing gas.

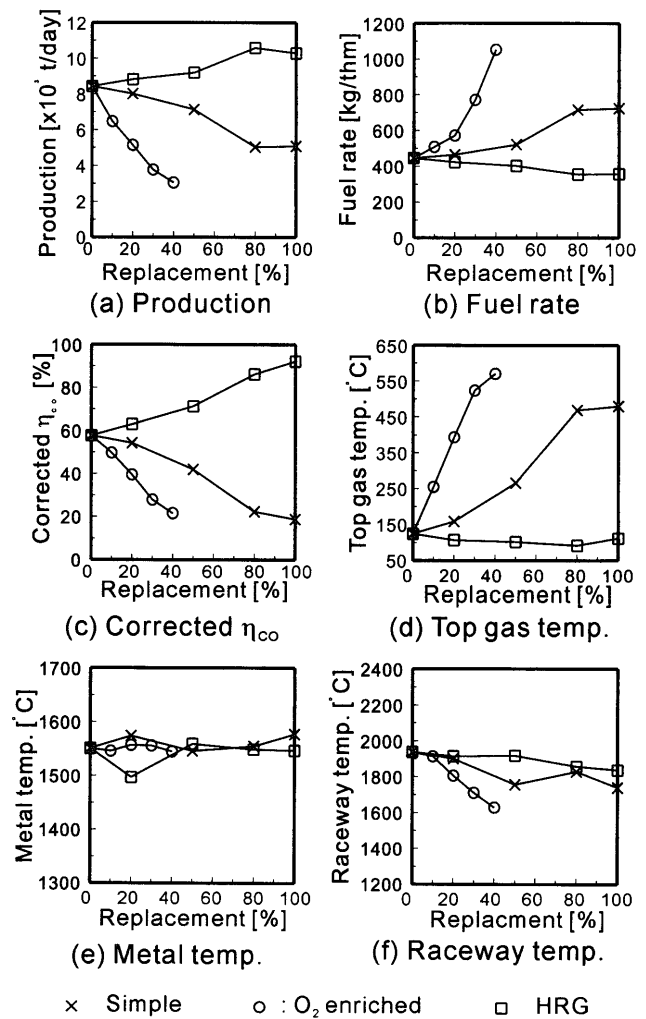


Fig. 6. Calculated furnace parameters for top gas recycling operation.

適用した条件で炉頂ガス再循環を行わない基準条件と同程度の操業効率を達成するためにはより多くの酸素を富化する必要がある。

炉頂ガスからCO₂を除去した後に衝風に混合するHRG置換法を適用した場合には、循環ガスの衝風への混入割合の増加とともに出鉄量が増加し、燃料比が低下している。その効果は循環を行わない基準の条件と比較して最大で出鉄量約25%の向上と燃料比約20%の低減が期待される。

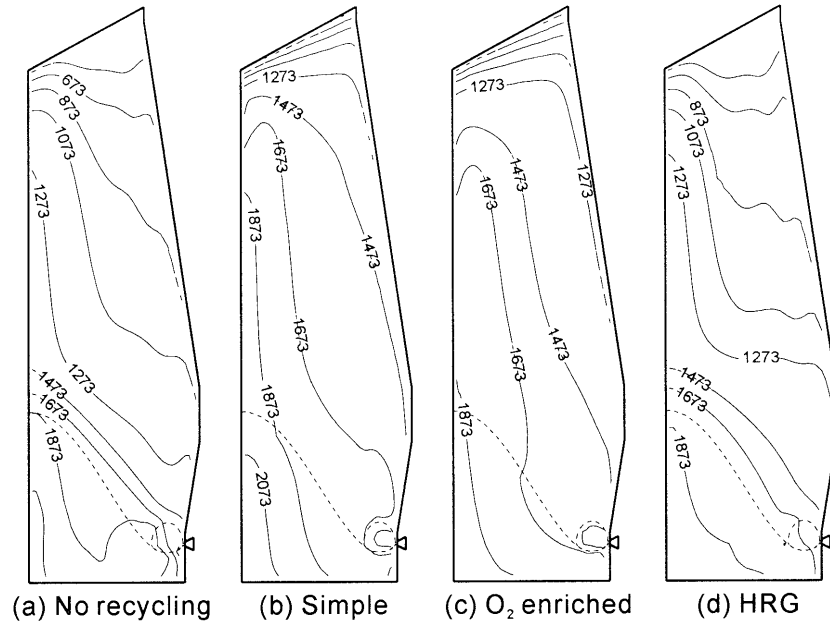


Fig. 7. Calculated solid temperature fields for the base case and three recycling methods. Unit: K.

ガス利用率も循環ガス割合の増加に伴って向上する傾向がある。この操業効率向上の傾向はTseitlinらの報告⁴¹⁾とも一致するが、彼らが報告したほどの改善は見られなかった。しかし装入物分布の調整や原料性状等の最適化により、さらに操業効率を上昇させることができるものと考えられる。

各置換方法で解析を行った最大の置換率における条件での炉内温度分布の解析結果を基準条件の場合とともにFig. 7に示す。基準の条件においては融着帯（1473Kから1673Kの間の領域と定義）は、炉芯の上縁からほぼ一定の高さの部分にほぼ一定の厚さで形成されている。単純置換法の場合には融着帯は中心付近では炉の上部にまで達しており、全体に厚さが非常に厚くなっている。この単純置換法の条件で、出銑量すなわち装入物流通量が減少しているにも関わらず融着帯厚さが急激に増大しているのは、レースウェイから放出されるガスが運搬する顕熱量が少なく、生成した鉄およびスラグを溶解するのに必要な時間が増大しているためである。酸素富化置換法においても同様の傾向が生じているが、その傾向は単純置換法と比較してやや穏やかなものとなっている。

循環ガスからCO₂を分離した後に衝風に混合するHRG置換においては、基準条件の場合と比較して融着帯厚さがわずかに厚くなっているが、炉内の温度分布は基準条件のものと同通ったものとなっている。一方銑石の還元率分布に関しては、基準の条件では融着帯の下端付近で還元が終了するのに対して、HRG置換法の場合には1273Kの等温線付近までに還元が終了している。この部分から融着帯上縁までは単に装入物の加熱のみが生じるのみで反応および相変化は生じていない。炉内の充填高さの低下によってこの不活性部分を圧縮できれば、炉壁からの熱損失量が低減

し、さらなる操業効率改善の可能性がある。

4.4 推算結果に基づくシステム解析

前項、前々項に紹介したプロセス解析においては、いずれの方法においても操業条件を整えれば出銑比の向上、燃料比の削減等、操業効率の向上が期待できることを示している。筆者ら⁴³⁾は上記の解析結果および羽口からの天然ガス吹込み操業⁴⁴⁾について数学モデルにより得られた操業状態の予測値に基づき、これらの高炉の操業条件の変更が、製銑システムの熱・物質収支に及ぼす影響について検討を行っている。ここで対象とした製銑システムは、高炉に加えてコークス炉、CDQ、焼結機、熱風炉から構成されており、解析で得られた高炉でのコークス、銑石、微粉炭使用量および送風条件に基づいてシステム内の各プロセスの処理量を変更し、システム全体としての所要原料・エネルギー量および二酸化炭素排出量等を算出した。尚、その際には高炉炉頂ガスの組成、すなわち発熱量が操業条件によって変化するため、炉頂ガスが含まれる燃料ガスの組成や流量を、各プロセスにおける単位処理量あたりの熱的条件を一定に保つように調整している。

その結果、スクラップのような還元鉄の装入はエネルギー消費量および二酸化炭素排出量の同時削減が可能であり、環境負荷低減への即効性が期待できること、また天然ガスのような含水素燃料の使用は二酸化炭素排出量削減への寄与が大きいことが示されている。

5. 高炉数学モデルの実操業への展開

前節までに、近年の代表的な高炉モデルの構成およびいくつかの適用例を示したが、本説では数学モデルの実操業への展開について展望と問題点を示す。

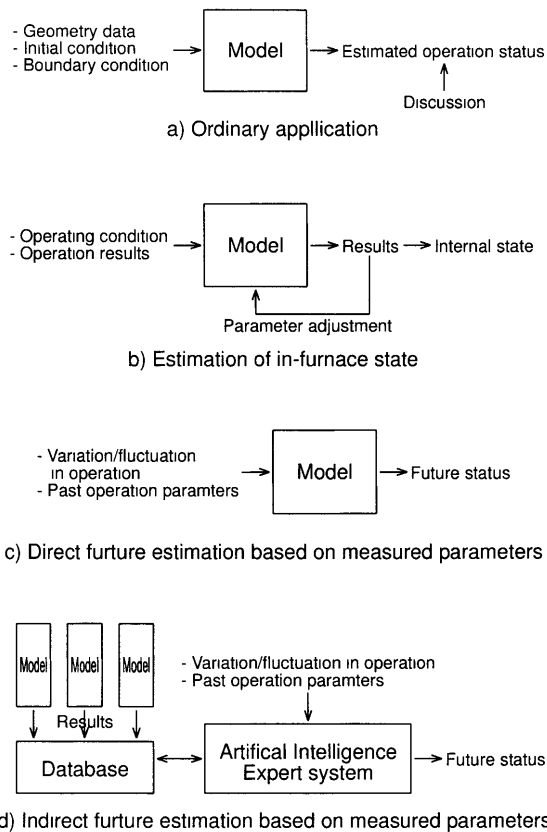


Fig. 8. Various applications of mathematical model in practical blast furnace operation.

高炉の数学モデルは、その構成や使用例が一般誌の論文として公表されていなくても、実際に高炉を稼働する企業においては様々な局面で利用されている。高炉数学モデルの最も基本的な使用法は、Fig. 8(a)に示したように、モデルに対して想定するあるいは実際に稼働中の操業に基づいた条件を解析の初期および境界条件として入力して数値解析を行うものである。これにより算出される結果は、与えられた条件における高炉の内部状況や操業状態、あるいはこれらの初期状態から与えられた最終の境界条件に対応する最終状態への過渡特性であり、その検討により新規操業条件の設定や操業変更時の操業安全性の検証が可能になる。従って、このような利用法は、装入物分布、原燃料性状、送風条件の変更等、種々の操業条件の変更によって生じる操業状態の変化に基づいた短・中期の操業設計、計画の検討を行うのに有用であると考えられる。

従来報告された速度論および移動現象論に基づくモデルの基礎式は、基本的に熱、物質および運動量の収支に基づいており、それらから得られる解析結果は全体の熱および物質バランスについては十分な精度を持つと考えられる。さらに流動解析法や使用される速度定数に関しても、その採用にあたって十分な事前検討や検証が行われており、その一部に簡略化された手法が用いられている場合であっても、解析結果は一定水準以上の定量性を有しているものと考えられる。よって例えば単一の操業条件の変更が相反す

る複数の現象に帰結するような条件の操業状態の予測といった利用法は数学モデル開発の元来の目的とも合致して非常に有効である。しかし、例えば溶鉄中の微量元素濃度に関しては、その溶解過程において、速度論的に平衡に達すると考えられる場合には、それなりの予測精度が期待できるものの、それが速度論に支配されている場合については、予測結果を定量的な検討に供しうる精度は期待できないのが現状であろう。これは数学モデルに適用可能な反応機構・速度に関する情報量が不足しているためばかりでなく、炉下部のような急峻な温度・濃度勾配が形成される反応場における反応物質の流動域および流量と滞在時間の分布の予測精度やその検証が現状では十分でないという側面にも由来している。上に述べたようなモデルの利用法における数値解析の適用可能範囲・事象の拡大に対しては、モデル解析の予測精度を向上させていくことが必要であるとされる。そのためには種々の現象の解明およびその定量・定式化が不可欠であるが、その多くは炉下部の多相現象に関連しており、実験的・理論的な解明が待たれている。その一例として

- ・ 炉内流通粉および液体の動的・静的滞留量の分離と両者の質量交換速度
- ・ 装入物の劣化・粒径低下およびこれに伴う粉発生速度
- ・ モザイク状多成分・複合物の溶解挙動および速度
- ・ 微量成分の溶鉄中への溶解速度
- ・ 液体・粉体間の相互作用
- ・ 浸炭の機構と速度
- ・ 炉芯の更新機構と速度および充填構造（不透過層、蓄積）

などが挙げられる。これらの項目のいくつかについては、現在進められているプロジェクト研究「文部科学省科学技術振興調整費 エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製錬反応に関する研究」および「(社)日本鉄鋼協会 CO₂発生ミニマム化を目指した高炉限界現象の制御研究会」での研究課題として採用されている。

このような未解明現象の定式化によりモデル中で考慮する現象の数が増加したり、使用されるサブモデルの精度が向上すると、数学モデルによる高炉の操業解析の精度も向上するが、これと同時に計算量が増加して数値解析に要する時間は増加する方向にある。また高炉の数学モデルは多次元化および非定常化により精度の向上を達成してきているが、これらに伴ってモデルを記述するプログラムも複雑・肥大化している。一方で昨今のコンピュータの高速化はめざましく、CPUとして1GHz 駆動の32ビットプロセッサを利用した一般的な構成の卓上型パーソナルコンピュータを利用した場合には、90×25程度の分割数の二次元定常解析の結果が、全体的な傾向であれば20分程度で得られるようになっている（最終的な収束解を得るにはさらに長時間の計算が必要であるし、解析の出発条件や入力する操業

条件によっても異なる)。なおもCPUやメモリの性能が上がり続けているという昨今の計算機の計算性能の向上を考慮すれば、モデルの開発にあたって操業の現場における「その場」で数学モデルの結果を利用するというのも視野に入れていく必要がある。

現場でのモデル解析の利用には、先にFig. 8(a)に示した従来の利用法と同様にモデルに特定の条件を入力して、その結果得られる過渡特性や定常解を検査する利用法と、操業に現れた変化や変動から炉内の状況あるいは将来の操業状態を予測するといった逆解析的な利用法とが考えられる。前者の例としては、操業を変更した後の安定状態の確保、変更に伴う遷移過程における問題発生あるいは現在安定に見える操業の継続性等の確認といった比較的短期的な予測への応用が考えられる。後者については、推定された内部状況およびその変化から、炉況の不調回避や効率維持のための将来の操業設計を検討するといった応用が考えられる。このような目的のためには、実際に稼働中の操業条件に基づく境界条件をモデルに与え、操業中に得られる種々の測定値を再現できるようにモデル中の何らかのパラメータ（例えば軟化溶融特性や融着帯位置など）を操作して、得られた内部分布やそれを出発点とした非定常解析により操業を検討する方法（Fig. 8(b) および (c)）と、事前に行った多種多様な条件での解析結果をデータベースとして整理し、測定された操業値から何らかの認知システムを通じてこれを利用する方法（Fig. 8(d)）が考えられる。いずれにしてもこのような利用法では、操業中に時々刻々と変化する測定値とモデルの予測値とを対応させることになるが、高炉の操業パラメータには変化や応答の時定数が大きかったり変動幅が僅少であるものも多く、このような条件下でも十分に長い期間、正確な予測を可能とするためには、モデルの定量性の向上が不可欠である。モデルの定量性向上のためには上に挙げたような未解明現象の解明と取り込みの他にもモデル内で利用されている反応や物性値に関するパラメータの予測精度の向上はいうまでもない。一方で、「その場」での解析を実現するためには、現場で使用される言葉や指標と、実際にモデルに入力したり結果として出力される数字の摺り合わせも肝要であろう。例えば、装入物の反応性についてはJIS法や各社がそれぞれの方法で規定しているCRIやRIといった指標で表されることが多いが、これらの指標とモデルに組み込まれている反応サブモデル中で利用されているパラメータとの関連を明確化し、原燃料の持つ反応特性を反応速度因子に正確に反映できるようにしていくことが必要であろう。

実際の検出端情報と解析結果の摺り合わせについては、これまでに発表された一般的な高炉の総合モデルの構成についても改善の余地がある。例えば、溶銑・溶滓温度は高炉の製品（溶銑）の重要な品質であり、また高炉の操業状態を表す重要な検出端情報であるにも関わらず、高炉操業

の総合数学モデルとしてはTakataniら²²⁾のモデルがスラグレベル以下の炉床を完全混合槽とする扱いを用いている以外は、多くのモデルで解析の対象領域を炉底部のスラグ面から炉頂部の装入物表面までの範囲に設定しており、溶銑・溶滓温度をモデル解析の結果として直接表示することはできない。炉内の融着帯で発生した溶銑および溶滓は、炉下部のコークス充填層中を滴下しながら昇温され、水平方向に温度と流量の分布をもって湯溜まりに流入する。湯溜まりに達したこれらの液体は、炉底部の充填構造と出銑滓および条件によってはコークフリースペースの形成・消失に誘起された駆動力に従って、出銑口から排出される。この間に充填層中の流通に伴う流体混合や炉底・側壁を通じた熱放散が生じて流出温度が決まり、検出端に温度が検知されることになる。従って、溶銑・溶滓温度の検出端情報をモデルによる解析結果と照合する必要がある場合には、炉床における伝熱を考慮した湯流れモデルを統合する必要がある。炉床を側壁からの熱損失を考慮した完全混合槽として扱ったTakataniらの総合モデル²⁰⁾では溶銑温度は良好に再現されており、さらに彼らは順次時間進行型（擬定常状態の連続）の炉床部湯流れを考慮した炉壁損耗推定モデル⁴⁵⁾を用いた解析で鉄浴に流入する溶銑流量の水平方向分布の最終的な炉底損耗形状（すなわち炉底煉瓦内温度分布）への影響は小さいと報告している。このモデルも含めて1980年代から行われている炉床湯流れ解析に用いられたモデル⁴⁶⁻⁵⁰⁾は、基本的には固定された溶銑面および単一相の定常流れを仮定している。しかし、溶銑・炉底間の総括伝熱係数は僅かな流れでも流れがない場合とある場合では大きく変化することが知られている。従って、定常流れを仮定した解析における総括伝熱係数は、貯出銑の切り替えによる炉底部の溶銑の流動・停止に起因する伝熱の非定常性を含んだパラメータであると考えられ、異なる出銑パターンへの対応や溶銑温度の正確な予測のためには、このような非定常性の考慮が必要であろう。

最近、銑・滓界面およびスラグ表面の移動を考慮した炉床部の非定常流動解析モデル⁵¹⁾の開発が進められている。現状ではこのモデルは流動のみを考慮しているが、この手法により出銑作業におけるパラメータの一つである出滓率（出銑滓時間に占める出滓時間の割合）を予測することが可能になるものと考えられる。従来からの炉床流動解析法も含めて、この炉床部流動解析モデルでは、基本的に高炉の総合モデルに用いられているのと同様の手法が用いられており、将来的にはこれに伝熱を含めて総合モデルと連結・結合することで、モデルの解析結果と実操業値の比較項目が増えると共に出銑滓温度の高精度予測法に発展することが期待される。

ここまでに述べたモデルの精度向上に関する項目は、基本的にこれまでのモデル開発の延長線上にあるものであるが、実際の高炉においては、固体・液体・粉体の非連続性

と確率過程の混入に起因して、諸々の検出端情報に変動が生じる。例として荷下がり、棚つり、スリップおよび風圧変動などが挙げられる。著者らのモデルも含めて、多くの高炉モデルでは、これら非連続相を擬似連続相として取り扱ったり、Euler法による運動の表現を用いているため、非連続性や確率過程が平均化されてしまっている。従ってこのような現象については、一部は流通抵抗や圧損などの予測値に基づいて不調発生の可能性を示唆することはできるが、直接現象そのものを予測することは不可能である。従って、従来法によるシミュレーションの結果、安定な操業が予想されても物質の不連続性に起因する変動が生じる可能性は拭いきれない。また実操業においても、見かけ上炉況が安定している場合でも炉況変化の予兆としてそのような変動が発生することも考えられ、物質の不連続性および確率過程の導入は、数学モデルの実操業への応用という観点からは、今後のモデル開発において重要な位置を占めていくものと考えられる。この非連続性や確率過程を含む現象については、例えば粉粒体のブリッジ形成のように、その発生場所や発生時刻が大きく確率論に支配されていたり、現象自体が未解明の問題も多い。解析法についても、粉粒体の運動に対する Discrete Element Method (DEM) のようにある程度確立された現象もあれば、充填層中の不飽和液体の運動のように解析法が未確立であるばかりでなく現象自体が未解明のものもある。これらの現象は高炉の種々の限界状態を左右する現象であると認識され、上に示した日本鉄鋼協会の研究会でも研究課題として取り上げられている。

不連続相の挙動を、例えば個々の粉粒体の運動を追跡するDEMのような解析法により表現しようとした場合には、膨大な数の要素（粒子や液滴）の挙動を追跡する必要がある。DEMにおいては粒子運動の解析については、対象となる要素数を摩擦や力学特性に基づいて少なくする方法も提案されているが、高炉の装入物はそれ自体が伝熱媒体・反応物であり、それらとの同時解析においてこのよう

な計算要素数低減の手法が適用可能とは限らない。また、このような解析法で得られる解は非連続性や確率過程を含んだ現象全体の中の瞬間的で局所的な一部分を詳細に表現するものと考えられるが、逆に操業の時間や空間スケールを表現するためには、現在主流となっている解析法とは比較にならない程の情報量や計算量が必要になる可能性がある。あるいは計算負荷を低減するために何らかの手法による空間・時間の平均化が必要になる。いずれにしてもこのような非連続性や確率過程の高炉モデルへの導入は、これまでのモデルの進展とは方向付けが大きく異なっており、高炉のモデリングの新たなパラダイムとして捉えていく必要があるかもしれない。

ここまで、高炉モデルの実操業への展開・応用範囲の拡大に関して、主にモデル自体の精度向上や構成について述べてきた。これまでに開発されたモデルの多くは、計算機および計算言語に長けた研究者・技術者によって開発され、利用されてきていると考えられる。一般に数学モデルへのデータ入力は数値あるいは数式によって行う必要があるため、数学モデルによる操業シミュレーションを行うためには、入力データを準備するだけでも数学や反応速度論あるいは計算言語などについて、それなりの知識が必要となる。この点も高炉の数学モデルの利用拡大に対する一つの障害になっているものと考えられる。言い換えれば、高炉操業の現場で数学モデルを簡便に利用するためには、利

Table 4. Important articles for further improvement of blast furnace model.

Item	Action
Improvement of accuracy	Formulation of unresolved phenomena ex. carburization separation of dynamic and static powder/liquid deadman renewal
Extension of applicability	Quantification of relation between industrial reaction indices and rate parameters
Easiness of application	Development of friendly user interface

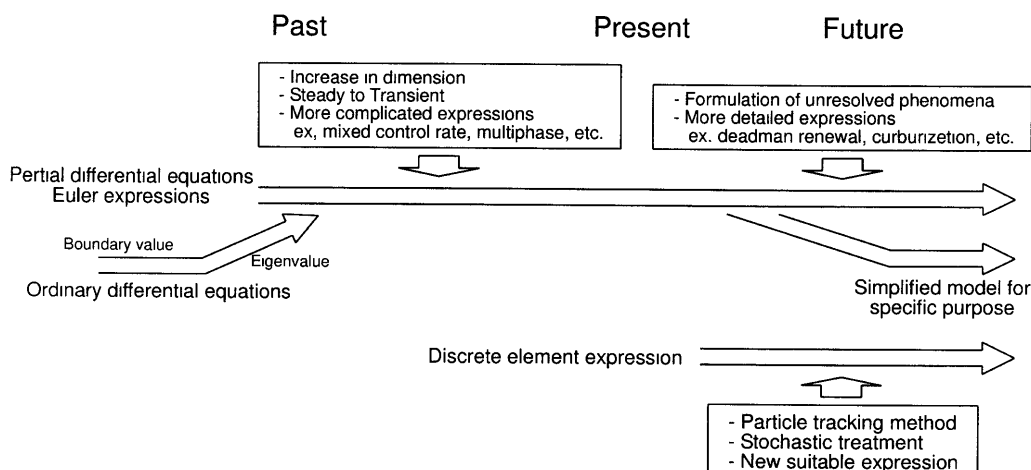


Fig. 9. Perspective on development of blast furnace model.

用者が検討を行いたい条件を簡単かつ迅速に数学モデルに伝える方法、すなわち利用者の要望を数値の入力情報に変換するユーザインタフェースが必要であり、その開発もモデル自身の高精度化と並んで重要な課題であるものと考えられる。

以上に述べた今後期待されるモデル開発の方向を Table 4 および Fig. 9 に概念的に示すが、これらの課題が克服されれば、高炉実操業の現場において数学モデルが有効利用される機会は大幅に広がるものと考えられ、早急な対策が望まれる。

6. 結言

本稿では、速度論的手法を基礎とした高炉の総合数学モデル開発の動向とその現状および今後期待される高炉実操業の現場での利用に対する課題を概説した。数学モデルの開発が始まった1960年代以降、計算機科学の進展ともあいまって、高炉の数学モデルは計算機容量の許す限り、より複雑な取り扱い、より多くの現象を取り入れてきたにも拘わらず、まだ考慮すべきと考えられる現象は（現象自体が未解明なものも含めて）数多い。前節に示した項目はそのごく一部であり、これらの現象の解明・定式化によるモデルの精度向上および新たな計算手法の開発や支配的な現象を見極めた上でのモデルの簡略化も含めて解析効率の向上が達成され、高炉数学モデルの応用範囲の拡大や新たなモデルの利用法が開発されていくことが期待される。

本稿の執筆にあたり武田幹治博士より有益なご助言を頂きました。記して感謝申し上げます。

文 献

- 1) J.Yagi *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1242.
- 2) I.Muchi, K.Tamura, J.Yagi and A.Moriyama: *J Jpn. Inst Met*, **30** (1966), 1109
- 3) I.Muchi, K.Tamura, J.Yagi and A.Moriyama: *J Jpn Inst Met*, **30** (1966), 1115.
- 4) J.Yagi, K.Sasaki and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **54** (1968), 1019
- 5) J.Yagi and I.Muchi: *Trans Iron Steel Inst Jpn*, **10** (1970), 392
- 6) M.Kuwabara and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 301
- 7) H.Kubo, T.Nishiyama and S.Taguchi: *Kawasaki Steel Giho*, **14** (1982), 134.
- 8) M.Hatano, K.Kurita, H.Yamaoka and T.Yokoi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2369.
- 9) M.Kuwabara and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 787.
- 10) A.Shigemi, A.Suzuki, I.Hida and K.Yamaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 547.
- 11) C.Myong and M.Tate: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), 948
- 12) M.Hatano and K.Kurita: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1898.
- 13) T.Sugiyama and M.Sugata: *Setetsu Kenkyu*, **325** (1987), 34
- 14) M.Kuwabara, S.Takane, K.Sekito and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1593
- 15) Y.Sawa, K.Takeda and S.Taguchi: *Ironmaking Conference Proceedings*, Vol 59, ISS, Warrendale, PA, (1991), 417
- 16) T.Sato, T.Nouchi and M.Kiguchi: *Kawasaki Steel Giho*, **29** (1997) 1, 30
- 17) N.Miyasaka, M.Sugata, Y.Hara and S.Kondo: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 18.
- 18) Y.Togino, M.Sugata and K.Yamaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 1544
- 19) M.Hatano, K.Kurita, H.Yamaoka and T.Yokoi: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2377.
- 20) H.Yamaoka and Y.Kamei: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1601
- 21) 高炉炉下部における移動現象, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1992), 201.
- 22) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa: *ISIJ Int*, **39** (1999), 15.
- 23) P.R.Austin, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **37** (1997), 748
- 24) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **40** (2000), 637
- 25) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **42** (2002), 44
- 26) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 960.
- 27) S.Ergun: *Chem Eng Prog*, **48** (1952), 89.
- 28) A.Haider and O.Levenspiel: *Powder Technol*, **58** (1989), 63.
- 29) J.F.Richardson and W.N.Zaki: *Trans Inst Chem Eng*, **32** (1954), 35
- 30) P.C.Carman: *Trans Inst Chem Eng*, **15** (1937), 150.
- 31) J.Szekely and Y.Kajiwara: *Trans Iron Steel Inst Jpn*, **19** (1979), 76.
- 32) K.Shibata, M.Shimizu, S.Inaba, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1267.
- 33) J.Chen, T.Akiyama, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **34** (1994), 133
- 34) T.Akiyama, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 848
- 35) W.E.Ranz and W.R.Marshall: *Chem Eng Prog*, **48** (1952), 141.
- 36) P.J.Mackey and N.A.Warner: *Metall Mater Trans*, **3** (1972), 1972
- 37) E.R.G.Eckert and R.M.Drake Jr.: *Heat & Mass Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York, (1959), 178
- 38) J.A.M.Kuipers, W.Prins and W.P.M. van Swaaij: *AIChE J*, **38** (1992), 1079
- 39) P.R.Austin, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **38** (1998), 246
- 40) P.R.Austin, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **38** (1998), 697
- 41) M.A.Tsetlin, S.E.Lazutkin and G.M.Styopin: *ISIJ Int*, **34** (1994), 570
- 42) P.R.Austin, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int*, **38** (1998), 239.
- 43) H.Nogami and J.Yagi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 108.
- 44) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 137.
- 45) K.Takatani, T.Inada and K.Takata: *ISIJ Int*, **41** (2001), 1139
- 46) M.Tachimori, J.Ohno, M.Nakamura and Y.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 2224.
- 47) Y.Tomita, H.Ogusu and T.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S36.
- 48) K.Shibata, Y.Kimura, M.Shimizu and S.Inaba: *Kobe Steel Eng Rep*, **41** (1991) No 4, 79
- 49) A.Preuer, J.Winter and H.Hiebler: *Steel Res.*, **63** (1992), 139
- 50) A.Shinotake, M.Ichida, H.Ootsuka and Y.Sugizaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 389.
- 51) K.Nishioka and M.Shimizu: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 865