

特別講演

□西山賞受賞記念

移動現象論に基づく製鉄プロセスの解析と評価

Analysis and Evaluation of Ironmaking Processes Based on Transport Phenomena Theory

八木 順一郎 東北大学 名誉教授
Jun-ichiro Yagi



* 脚注に略歴

1 はじめに

この度、日本鉄鋼協会の名誉ある学会賞（西山賞）を拝受し、大変な光栄に感激致しております。これも会員諸氏のご指導・ご支援のお陰であり心から感謝の意を表します。また、私の研究室において研究の遂行にご協力頂いた研究室のスタッフの方々、外部から研究に参加していただいた研究員・研究生、さらには学生諸君の努力の結果による受賞でありますので、これら多くの方々に厚く御礼を申し上げます。私の今日に至るまでの研究の中には日本鉄鋼協会の共同研究に關与した多数の研究がありますので、以下にこれらの研究成果を中心にして、私の行ってきた製鉄プロセス研究の概要、ならびに、今後の製鉄研究について私見を述べさせていただきます。

2 私の製鉄プロセス研究の歩み

わが国においては、移動現象論に基づく本格的な製鉄プロセスの研究は1960年代に名古屋大学の鞭巖教授により開始された。鞭研究室発足初期に私は大学院生として同研究室で、移動現象論について学びながらその応用である高炉の数学的モデルの研究に参加した。当時のコンピューターは容量、演算速度ともに十分ではなく、1次元モデルの数値解を求めるに留まっていた。その後、私は1969年に東北大学選鉱製錬研究所において、製鉄プロセスの研究を始めたが、次第に炉内現象の解明が進み、計算機的高速化、大容量化に伴い、現在のような3次元非定常モデルによるシミュレーションが可能になった。

1960年代、日本の鉄鋼産業は急激に成長し粗鋼生産量は1

億トンを超えた。1973年に発生したオイルショックにより量的拡大は約1.2億トンで止まり以後、70—80年代の効率追求期、90—現在の環境との調和期へと変化していった。

このような鉄鋼産業の変遷下で、私の研究目標も生産拡大のための科学技術から効率追求、さらに、環境改善を目指す科学技術へと方向を変換していった。

すなわち、当初は鉄鉱石の還元速度論的研究や高炉、シャフト炉による還元プロセスの解明であった。次いで、製鉄プロセスにおける伝熱、省エネルギー中心の研究を行い、次第に充填層反応器の他プロセスへの応用、廃棄物のリサイクル、排出エネルギーの有効利用、排出CO₂のメタノールやDMEへの転換、さらにはH₂の利用技術など、環境改善を目指した課題に多く取り組むようになっていった。

しかし、高炉の多次元モデルの研究は現在に至るまで、継続して実施してきた。これには、日本鉄鋼協会の研究会として、充填層中の気固液移動現象部会（1989—92）、4流体の移動現象研究会（1993—96）、高炉下部機能強化研究会（1997—2000）の3部会・研究会の部会長/主査を務めながら、十数年にわたり、産学協同研究を実施したこと、さらにその後、高炉限界制御研究会（2001—5）、および、1999年から5年間にわたりコンパクト高炉プロジェクトに参加し共同研究¹⁾を行ってきたことが、長期にわたる研究を可能にしたといえる。

この高炉の数学的モデルの開発に関連して行った要素現象の速度論的研究とシミュレーションモデルの構築に関する研究から、その他の充填層プロセスの研究に発展し、また、モデルによるプロセス解析を活用した環境問題、特に、CO₂放出削減に関する研究テーマが取り上げられている。Fig.1に研究室で取り上げた主要な研究テーマの関係を示す。

* 昭和39年名大工学部金属工学科卒、44年同大学院金属工学専攻博士課程修了後、44年東北大学選鉱製錬研究所助手に採用、同年講師、46年助教授、58年教授に昇任、平成13年改組により東北大学多元物質科学研究所教授、平成17年定年退職し、東北大学名誉教授、現在に至る。

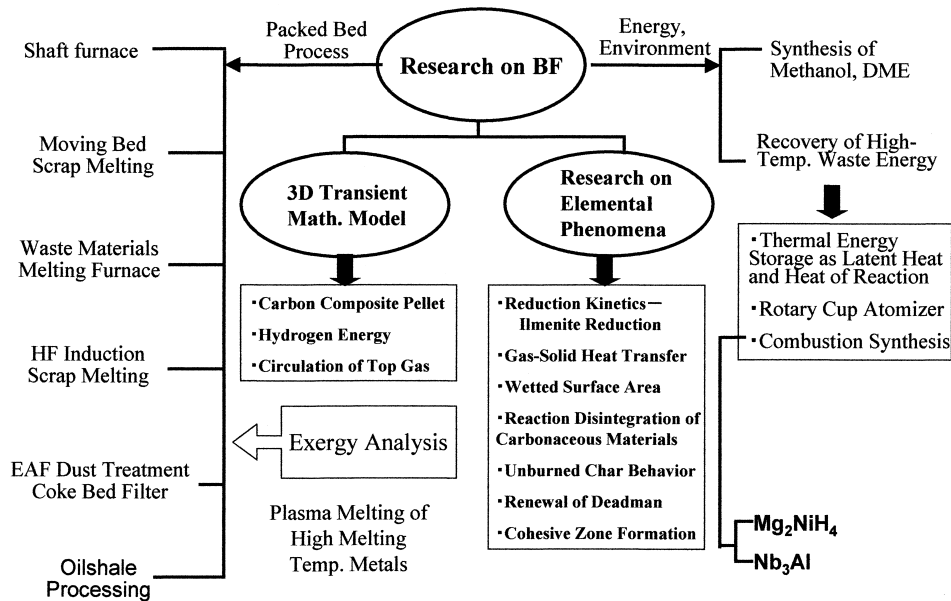


Fig. 1 Research Themes in Yagi Laboratory

3 高炉の数学的モデルの開発

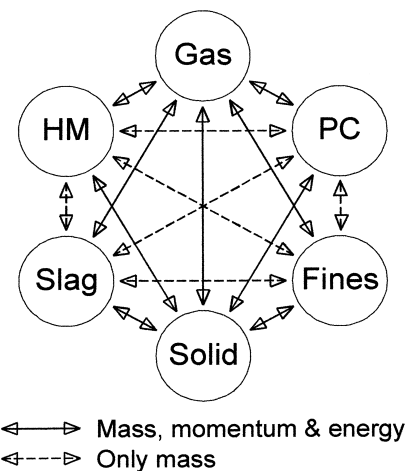
高炉の数学的モデルは操業改善や新プロセスの開発を予知するため仮想操業のシミュレーションが可能であることが必要である。しかし、モデルの精度を向上させるため、当初は実操業のシミュレーションを実施し、モデルの精度を確認したのち、より高効率あるいは低環境負荷操業法の開発に利用してきた。また、数値解析においては、高炉の複雑な形状を考慮して、BFC法 (Body Fitted Coordinate) を採用した²⁾。

しかし、数学的モデルの価値は炉内で生じる移動現象を如何に考慮しているかに強く依存する。これらの現象は相間における運動量、熱および物質の移動量ならびに相内における生成量を含んでいる³⁻⁵⁾。開発されたモデルには高炉内現象として、鉄鉱石の還元、コークスの燃焼やガス化のような気固反応のほか、ホットメタルや溶融スラグを介した固液あるいは気液反応、さらには気体間反応など多数の化学反応の速度が考慮されているが、これらに加えるに、固液相変態、気固液粉体4相間の伝熱、運動量移動、粒子の粉化、粉体の蓄積なども組み込まれている²⁻⁸⁾。Fig.2には取り扱った異相間の相互作用が示されている。

この数学的モデルは、運動量、エネルギー、質量の収支式から成りたっており、連続体を仮定し多流体理論に従うと、一般形で表し (1) 式のように書くことができる。

$$\frac{\partial(\epsilon_i \rho_i \psi)}{\partial t} + \text{div}(\epsilon_i \rho_i u_i \psi - \epsilon_i \Gamma_\psi \text{grad} \psi) = S_\psi \quad \cdots (1)$$

ここで、下付き*i*は考慮した6つの相 (ガス、充填粒子、溶鉄、スラグ、炭材粉体、鉄鉱石粉体) をあらわす。従属変数 ψ は解くべき変数であり、各相の流速、エンタルピー (温

Fig. 2 Diagram of inter-phase transfer of mass, momentum and energy considered in the model²⁾

度)、質量分率である。 t は独立変数時間である。 ϵ は空隙率、 ρ は密度、 u は流速である。 Γ は粘性係数、熱伝導率、拡散係数などの輸送定数であり、温度や組成の関数である。 S は湧き出し項である。

4 高炉の操業改善・低環境負荷のためのシミュレーション

高炉の生産性、還元材比の改善、環境負荷の低減を実現するための基本的な方法としてFig.3に示すように、低温化と高速還元化が重要であり、また、CO₂放出削減のためには、水素系の還元材使用⁷⁾や炉頂ガスの循環使用⁸⁾などが有望な方法である。開発した数学的モデルによるとこれらの可能性を定量的に検討することができる。注意したいことは、モデ

ルは改善法を示唆するものではなく、改善が予想される方法を研究者自身が考え、シミュレーションの条件として与えれば、モデルはその方法の効果を定量的に示す、ということである。

還元的高速化のためには、焼結鉱の被還元性の改善、および、炭材内装ブリケット (CCB) の使用⁶⁾などが有効であり、また、低温化のためには、CCBの装入による熱保存帯温度の低下は有効であるが、これだけでは不十分であり、還元鉄の浸炭促進やスラグの低温溶融が不可欠である。低温溶融のメカニズムおよび速度はまだ十分には解明されていないが、数学的モデルを使用すると、低温化による高効率化の程度を予測することができる。

水素系還元材の使用については、環境負荷低減の観点も考慮して、プラスチックの吹込みが有望である。また、炉頂ガスのリサイクル使用は排出ガス削減のため有効であり、同時に高生産性を可能にできれば、将来展望が開ける方法であり期待されている。以下に、モデルによるシミュレーション結果の一例を示す。

Fig.4は焼結鉱100%装入操作を基準操作 (1) として、CCBを20%装入した場合 (2)、その上に還元鉄の溶融温度を100℃低下させた場合 (3)、さらにスラグ層表面における

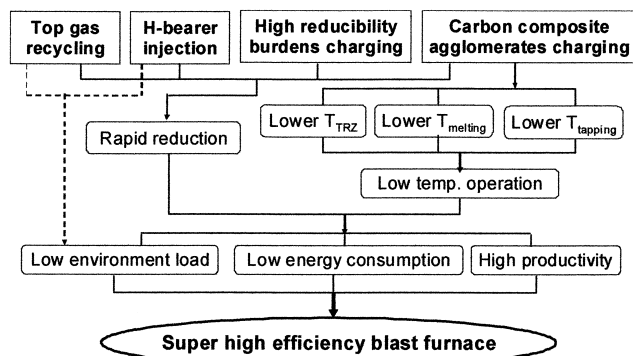


Fig. 3 Super high efficiency operation of blast furnace¹⁰⁾

溶銑温度を50℃低下させた場合 (4) の炉内における固体温度の分布を示している。CCBの装入は熱保存帯の温度をかなり低下し、軟化融着層の位置を低下させている。装入物の融点を低下させた場合には、生産性の増加により軟化融着層の位置はさらに低下しているが、滴下帯付近で固体温度は急速に上昇し、それ以下の炉下部ではわずかな変化に留まっている。溶銑温度の低下は軟化融着層の位置の低下に現れている。Fig.5はこのシミュレーションにより得られた生産性と還元材比の変化を示している。約10%の生産性の向上と7.5%の還元材比の低下が期待できる。

多流体力論に基づくシミュレーションの結果は超高生産、超低エネルギー消費、超低環境負荷操業を開発することができる可能性を示しているが、さらに、浸炭現象の高速化、物性値の高精度推算法などの基礎的研究を進め、計算条件であるレースウェイ温度やボッシュガス量などの制限を取り払い、上述の操業パラメータを合理的に組み合わせた操業を実

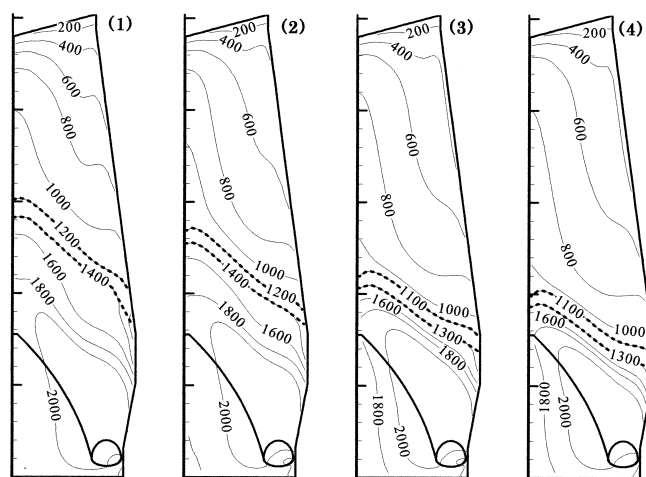


Fig. 4 Distribution of solid temperature under low temperature operation [Unit: °C]¹⁰⁾
((1) Base case, (2) CCB20% charge, (3) CCB20% + decrease of T_{melt} by 100℃, (4) CCB20% + decrease of T_{melt} by 100℃ + decrease of $T_{\text{hot metal}}$ by 50℃)

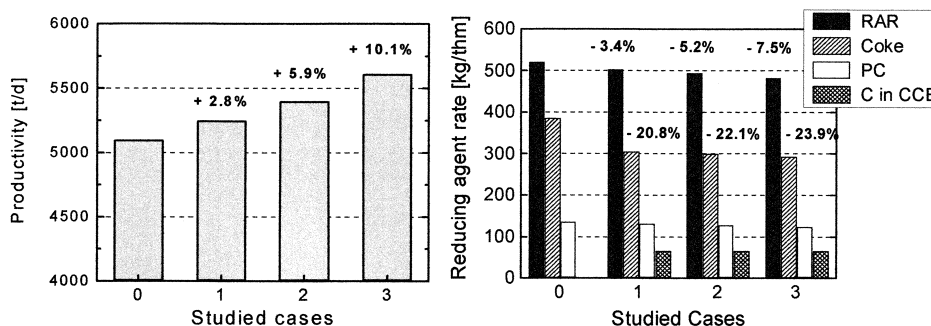


Fig. 5 Productivity and reducing agent rate predicted for low temperature operation¹⁰⁾
(0 : Base case, 1 : Base case + 20% CCB charge, 2 : Case (1) + decrease of melting temp. by 100℃, 3 : Case (2) + decrease of hot metal temp. by 100℃)

施すればさらに効率を改善することができると考えられる。

5 高炉モデルの他プロセスへの応用

高炉は複雑な充填層プロセスであり、その数学的モデルは他の充填層プロセスへの応用が期待され、高生産・省エネルギー、ならびに、CO₂放出削減などを目指し、1) シャフト炉、2) 高周波誘導加熱溶解炉、3) スクラップ溶解移動層、4) 廃棄物処理用ガス化溶融炉、5) 電気炉ダストから直接ZnおよびFeを回収するプロセスの炭材フィルター、6) オイルシェールからオイルを回収する充填層プロセス、などに応用された。

代表的な成果として、工場で発生した再酸化鉄粉と粉炭から製造したブリケットを加熱したときの反応による試料の質量および発生ガス量変化を測定し、反応速度を求め、別途測定した浸炭速度⁹⁾とともに数学的モデルに組み込み、移動層内における還元、浸炭、溶融状況を予測し、必要エネルギー量を推定可能にした¹¹⁾。また、炭材フィルターにおける電気炉ダストの捕集特性を検討するため、コールドモデル実験を行い静的ホールドアップの分布を測定した結果、サブミクロン粒子は非常に高い捕集率を示したが、別の実験で、オーバーミクロン粒子については数%程度の静的ホールドアップしか得られなかった。これらの実験結果は高炉の数学的モデルをもとにして充填層中の微粒子の挙動を推算するため作成されたモデルにより統一的に説明された¹²⁾。

6 高炉内要素現象の研究

高炉内現象については、従来、多くの有効な研究報告があるが、多流体モデルに基づく数学的モデルにおいて重要な役割を果たす現象のうち気固間対流伝熱係数、充填層中での濡れない流体の滴下流れおよび濡れ面積、充填層中での粉体の運動、炉芯コークスの更新、コークスからの粉体の発生、融着層の形成などの研究を実施してきた。充填層中における気固間対流伝熱係数¹³⁾については、数学的モデルを使用する多くの研究者から疑問視されていた伝熱係数を適確に推算するためRanz—Marshall式の修正式を提案した。

$$Nu = 2.0 + 0.39 (Re_p)^{1/2} (Pr)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

充填層中の融体の流れについては、充填粒子の表面処理を施し、高炉内と同様に濡れない系におけるモデル実験を行い、濡れる系について恩田らが示した測定値とはかなり異なる濡れ面積が得られている。無次元式で表すと(3)式のような¹⁴⁾。

$$a_w/a_t = 0.400 Re_m^{0.218} We_m^{0.0428} Fr_m^{-0.0238} Nc^{-0.0235} \dots (3)$$

濡れ面積は固液間の反応速度の評価に影響する重要な因子である。

7 エクセルギー解析

プロセスの評価法として、エネルギー効率をより正確に評価できるエクセルギー（有効エネルギー）解析を行い、製鉄プロセスにおけるエネルギーの有効利用を促進した。すなわち、高炉法、直接還元法、溶融還元法など製鉄プロセスの必要エネルギーの比較を行った¹⁵⁾。溶融還元法は大量のエネルギーを消費し、高温の熱エネルギーを未利用で放出するので、これを有効に利用するプロセスとの組み合わせが必要である。しかし、予備還元率と2次燃焼率を適当に選べば、高炉並みの効率にまで上げることができ、CO₂放出も削減できることを示した¹⁶⁾。

8 エネルギー効率、環境改善

製鉄プロセスは多量の廃棄物と未利用エネルギーを排出している。これらを有効に利用するという観点から、1500℃以上の温度で排出される溶融スラグの微粒化とエネルギー回収を同時に行うロータリーカップと充填層を組み合わせた新しいプロセスを提案し¹⁷⁾、スラグの微粒化と同時にスチーム・リフォーミング反応を利用した反応熱蓄熱法によるスラグの顕熱回収の有効性を示した。

一方、高炉の排出ガスからのメタノール合成実験を行い、有効な触媒を見出すとともに有用成分であるDMEが合成できることを見出している^{18,19)}。

水素吸蔵合金は来るべき水素エネルギー社会において、重要な水素の貯蔵・輸送媒体として期待されている。また、反応熱蓄熱法による中高温排熱回収法に使用するための有望な素材でもある。水素の最大吸蔵量が3.6 mass %と大きいMg₂NiH₄の新しい高効率製造法として水素化燃焼合成法²⁰⁾の開発に取り組んだ。MgとNiの粉体の成型体、混合物を一定の温度パターンで加熱したとき、完全なMg₂NiH₄が合成される圧力と保持時間の関係が明らかにされている²¹⁾。

9 まとめ

数学的モデルを使用した反応プロセスの解析と評価に関する研究には、コンピューターコードの開発およびプロセスシミュレーションという理論的側面と要素現象の速度論的研究という実験的側面があり、両者をバランスよく研究すること

により優れた成果が得られる。数学的モデルは数式で表現される枠組みと要素現象の速度式、物性値の組み合わせで構成されており、シミュレーションの結果はこれらの効果を重ね合わせたものである。従って、モデルの内容を十分理解している研究者のみが、結果を正しく解釈することができる。内容を理解しないまま、シミュレーションと称する計算にのみ走ることは、決してよい結果をもたらすものではない。特に、プロセスの改善や新プロセスの開発には予想される要素現象をモデルに適確に組み入れることが重要であり、この点を十分考慮してモデルを使用することが望ましい。

最後に、よき恩師、先輩、多くの優秀な共同研究者にめぐまれたこと、また、鉄鋼協会の会員の方々から多大な御支援を頂いたことに感謝致します。

参考文献

- 1) J. Yagi : Int'l. Workshop on Compact Blast Furnace, Tokyo (2003), 251.
- 2) J. A. Castro, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 42 (2002), 1, 44.
- 3) P. R. Aust in, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 37 (1997), 5, 458.
- 4) P. R. Aust in, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 37 (1997), 8, 748.
- 5) J. A. Castro, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 40 (2000), 7, 637.
- 6) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 44 (2004), 3, 510.
- 7) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 44 (2004), 5, 801.
- 8) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi : ISIJ Int., 44 (2004), 12, 2159.
- 9) 張興和, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 81 (1995), 11, 1043.
- 10) 八木順一郎: 材料とプロセス, 18 (2005), 1, 46.
- 11) 張興和, 高橋礼二郎, 埜上洋, 八木順一郎: 鉄と鋼, 87 (2001), 5, 410.
- 12) J. Yagi, S. Okabe, M. Ribas, H. Nogami and R. Takahashi, Proc. 5th Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environments in Metallurgical Industries, (2004), 517.
- 13) 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 76 (1990), 6, 848.
- 14) 牛明愷, 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 82 (1996), 8, 647.
- 15) 秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 74 (1988), 12, 2270.
- 16) 秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77 (1991), 8, 1259.
- 17) T. Mizuochi, T. Akiyama, T. Shimada, E. Kasai and J. Yagi : ISIJ Int., 41 (2001), 12, 1423.
- 18) A. Muramatsu, H. Sato, T. Akiyama and J. Yagi : ISIJ Int., 33 (1993), 11, 1144.
- 19) T. Akiyama, S. Machida, H. Sato, A. Muramatsu and J. Yagi : ISIJ Int., 38 (1998), 1, 93.
- 20) 磯貝宏道, 秋山友宏, 八木順一郎: 日本金属学会誌, 60 (1996), 3, 338.
- 21) T. Akiyama, T. Negishi, K. Saito, L. Li and J. Yagi : Mat. Trans., 42 (2001), 8, 1748.

(2006年3月20日受付)