特集記事 • 2
ここまで来た計算科学の鉄鋼への応用

高炉プロセス解析

Analysis of Blast Furnace Process

髙谷幸司
Kouji Takatani
住友金属工業 (株)　総合技術研究所
主監部長研究員

1 はじめに

鉄鋼プロセスにおいて高炉は、生産の要と言える重要な反応容器であり、細心の注意を払って操業されている。その炉内状態は、古くから研究されており、基礎的な実験、試験高炉、停止後の実高炉の解体調査等により炉内状態が理解されるようになってきた。その結果、炉内の主要な反応現象がFig.1に示すように[1]まとめられている。

このような炉内状態を理解する道具として、数学モデルもまた、歴史的に重要な役割を果たしてきたといえる。高炉の数学モデルは、1次元定常[2]に始まり、1次元非定常[3-5]、2次元定常[6-10]、そして3次元非定常モデル[11,12]へと計算機処理能力および解析技術の進歩に伴いFig.2に示すように[13]発展してきた。未だ未知な現象は多く存在するが、現在のモデルによっても実高炉の操業を定量的に予測可能であり、定常的な炉内状態の把握から火入れ操業のような非定常状態の推定、さらには炉体形状の設計等にも活用されつつある。

ここでは、高炉数学モデルの最近の進展を紹介し、今後の課題についてまとめてみた。

2 高炉数学モデルの最近の進展とその利用

高炉に関する数学モデルとしては、高炉の全体を表現する総合モデルと部分的な現象を記述する部分モデルとに分類することができる。以下に総合モデルと部分モデルについて、主として最近進展のあった事柄について、説明を行う。

2.1 総合モデル

総合モデルとして、3次元非定常状態を記述できるものは、

反応名	反応式	場所
ガス還元	$3Fe_2O_3+CO/H_2 \rightarrow 2Fe_3O_4+CO_2/H_2O$	塊状帯
	$Fe_3O_4+CO/H_2 \rightarrow 3FeO+CO_2/H_2O$	
	$FeO+CO/H_2 \rightarrow Fe+CO_2/H_2O$	
シフト反応	$CO_2+H_2 \rightarrow CO+H_2O$	
水性ガス	$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$	融着帯
ソリューションロス	$C+CO_2 \rightarrow 2CO$	
溶融還元	$(FeO)+C \rightarrow [Fe]+CO$	滴下帯
浸炭	$C \rightarrow [C]$	
Si 移行	$SiO+C \rightarrow [Si]+CO$	
P 還元	$(P_2O_5)+5C \rightarrow 2[P]+5CO$	
Mn 還元	$(MnO)+C \rightarrow [Mn]+CO$	
C 燃焼	$C+(1/2)\cdot O_2 \rightarrow CO$	羽口前
水性ガス	$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$	
SiO 発生	$SiO_2+C \rightarrow SiO+CO$	

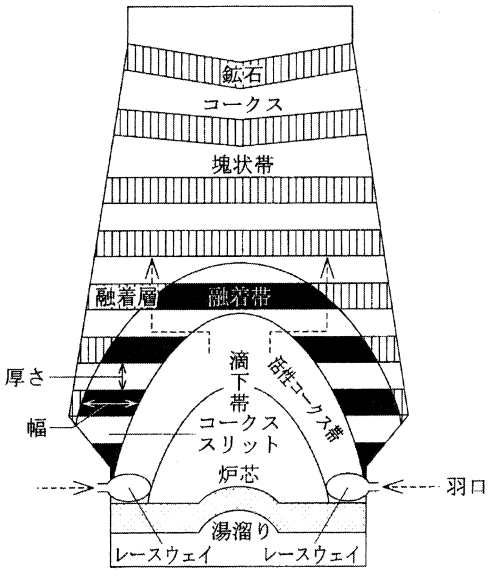


Fig.1　高炉内現象の模式図と主要な反応

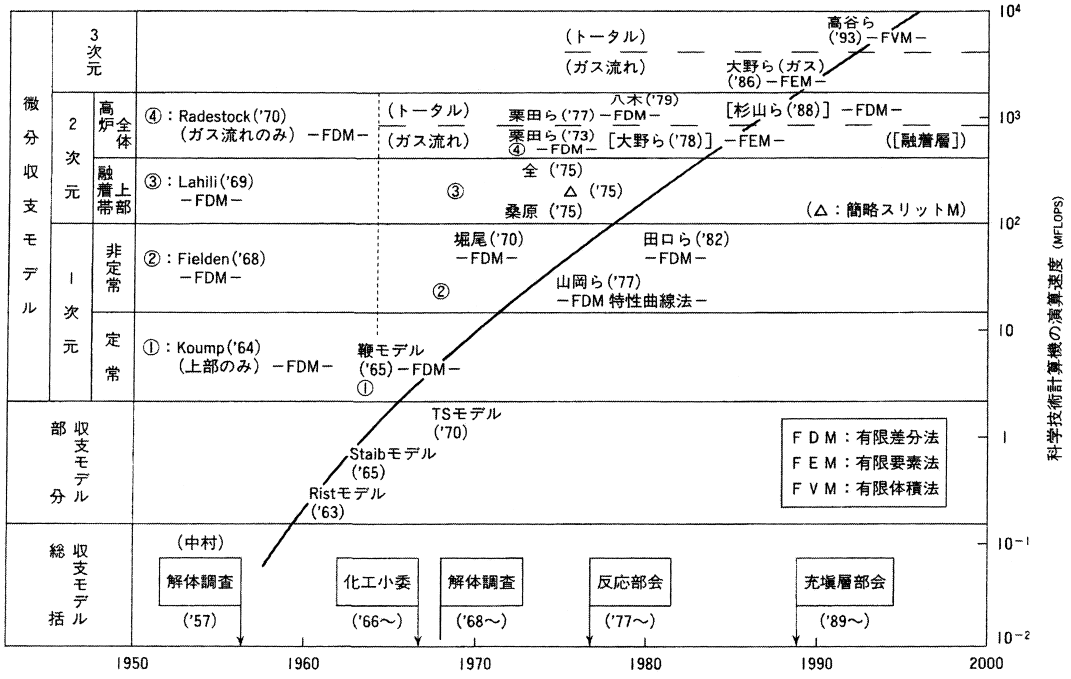


Fig.2　高炉数学モデルの変遷と計算機処理能力

現在までのところ2件の報告[11,12]があるのみである。これらの数学モデルは、細部の取り扱いは異なるものの基本的構成はほぼ同じで、記述できる現象に大差はないと考えて良い。これらのモデルでは、気・液・固3相に対して、物質、運動量およびエネルギーの収支式を解いて、各相の状態変数の空間的分布と時間的変化を求める。以下に解析結果の例を紹介する。

Fig.3には、ある部位の羽口からの送風を停止した場合の荷下がりとガス流れの3次元的分布、Fig.4には、定常解析における種々の状態変数の分布が示されている[11]。そして、炉内の温度分、炉壁静圧、炉頂での半径方向ガス組成分布等の解析結果が実炉における計測データと良く一致することが報告されている。また、このような定常的な状態のみならず、Fig.5に示す火入れ操業のような非定常現象についても実炉データとの整合性が検証され、実用的精度も十分であることが示されており、実炉の操業解析や操業予測に利用されている。

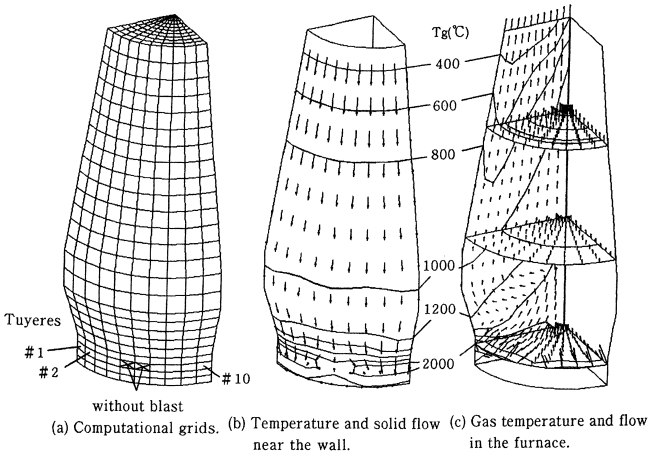


Fig.3　不均一状態における高炉内現象の解析結果
(送風量：7800Nm³/min、送風温度：1098℃、
送風湿分：49.8g/Nm³、微粉炭吹き込み：198kg/min)

2.2　装入物の降下挙動

高炉数学モデルのなかで、現在でも解明が十分でない現象は、炉内を降下する装入物（鉄鉱石およびとコークス）の挙動である。従来の解析では、kinematicモデル[14]、ポテンシャルフローあるいは粘性流体近似[15,16]等の単純化された流体力学的モデルが使われてきたが、最近の解析では、粒状体を弾塑性体[17]や亜弾塑性体[18]、あるいは剛塑性体[19]とみなしたより実際の現象に近いモデルを用いた解析が可能となっ

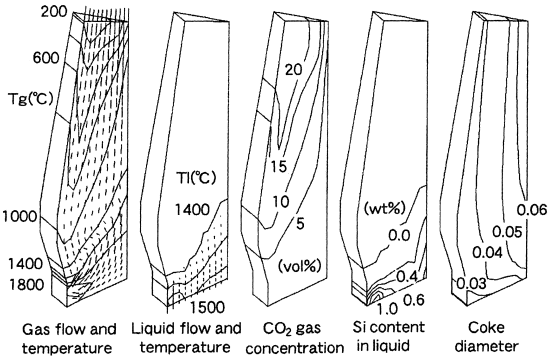


Fig.4　3次元非定常モデルによる炉内状態の解析結果

てきた。Fig.6には、弾塑性体近似を用いた解析結果と実験結果との比較を示す[17]。同様に、Fig.7には、亜弾塑性体モデルを用いた結果を示す[18]。これらの結果より、充填された粒子群の挙動を弾塑性や亜弾塑性体で近似することは妥当であると判断できる。これらのモデルは、一般的な有限要素法を用いた解析手法で解くことができるが、基本的には物質の動きとともに移動する座標系（ラグランジュ座標）で解析

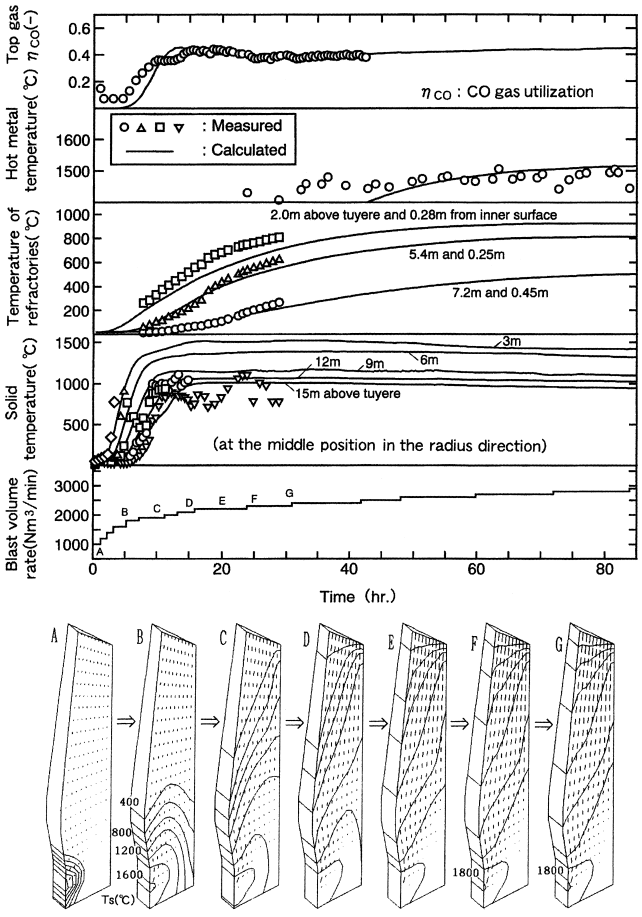
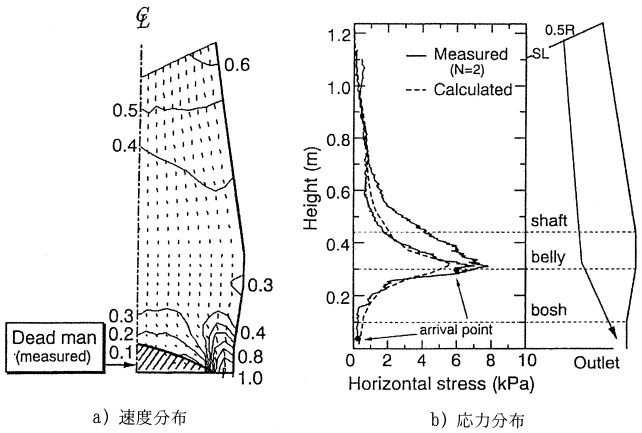


Fig.5　高炉の火入れ操業解析



a）速度分布　　b）応力分布

Fig.6　弾塑性モデルによる粒状体の降下解析

されるため、装入物の移動に伴って格子が変形し、時間経過に伴って格子の再配置が必要となる。その結果、上述の総合モデルで用いる場合は、固定座標系（オイラー座標）と移動座標系の2つの格子を用いて解析する必要があり、両格子間での状態変数の補間が必要となる。また、解析負荷も大きく、総合モデルのなかで使うには問題がある。

これら解析時間と格子に関する2つの問題点を解消するため、より単純化された剛塑性体近似モデル[19]が開発されている。剛塑性体近似モデルは弾塑性体モデルと比較して、計算負荷の大幅な軽減と固定座標系で記述できるという大きな利点を有している。この剛塑性体と前述の弾塑性体モデルによる解析結果との比較をFig.8に示すが、定量的に両者は良く一致しており、十分な精度を有していることが分かる。現在のところ、総合モデルの中で使うのに最適なモデルである。

2.3　炉底の湯流れと煉瓦損耗

高炉の炉下部の挙動として古くから注目されてきた現象として、炉底における湯流れ現象がある。炉底コーナー部の局所的な煉瓦の損耗および炉芯コークスが湯溜まり部を完全に占有しておらず、Fig.9に示すような溶銑が選択的に流れやすいコークフリー層の存在が、実高炉の解体調査で確認され、炉底部の湯流れと煉瓦の損耗状況との因果関係に興味がもたれてきた。

数学モデルとして、この炉底部の充填構造を与えて、炉下部の湯流れ状況や伝熱現象を解析するモデルは、いくつか報

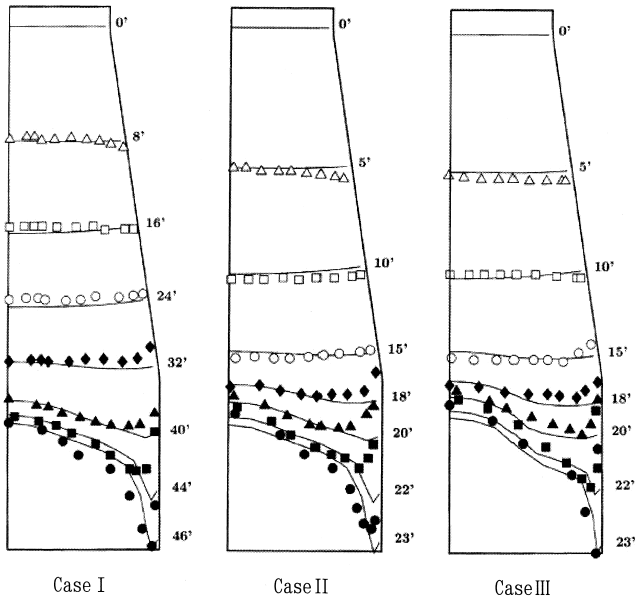


Fig.7　亜弾塑性体モデルによる粒状体の降下挙動解析

	Case II	Case II	Case III
送風ガス流量（10^{-3}×kg/s）	0	0	9.7
固体粒子流量（10^{-3}×kg/s）	2.985	5.97	5.97

告[20-23]され、実験的にもコークフリー層の重要性が認識されてきた。そして、現在では、炉底部の煉瓦を含めた熱流動解析と煉瓦損耗を同時に解析できるモデルが報告されている[24]。このモデルでは、煉瓦損耗の判定を温度で行っており、カーボン煉瓦では溶銑の凝固温度である1150℃、シャモット煉瓦では1350℃（煉瓦の耐火温度に応じて変更）を閾値として、それ以上の温度になったとき、煉瓦が消滅するとしている。Fig.10に煉瓦の損耗過程の解析結果を示す。また、Fig.11には、最終の煉瓦損耗形状の解析結果と実炉の解体調査結果から得られた損耗ラインの比較を示すが、ほぼ対応した結果が得られており、湯流れと煉瓦の損耗形状との定量的関係が把握されている。

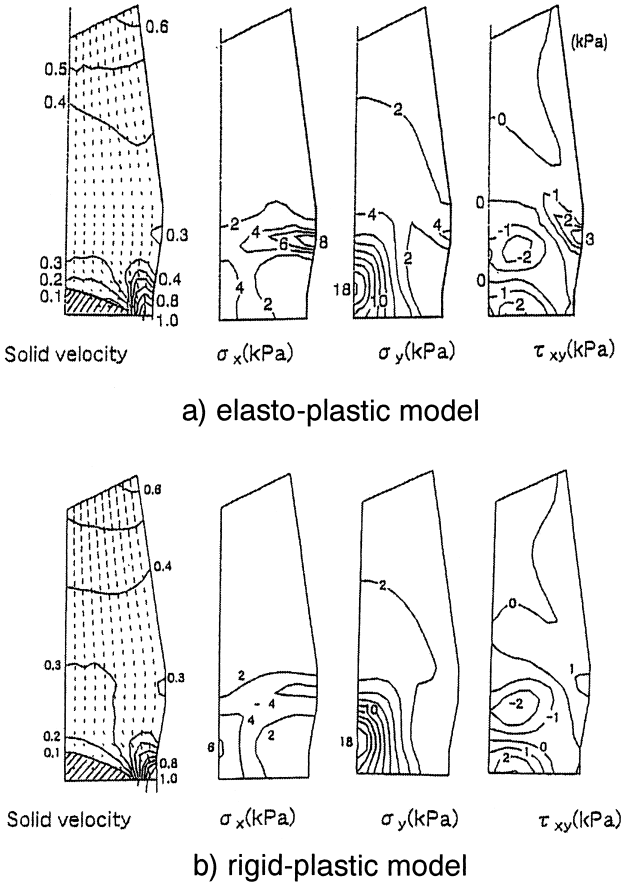


Fig.8　剛塑性体モデルと弾塑性体モデルとの比較

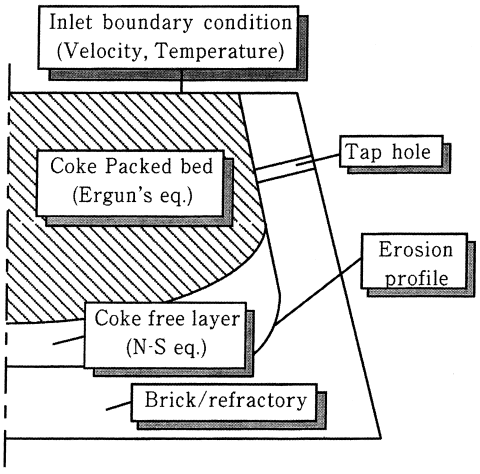


Fig.9　高炉炉下部の模式図

2.4　炉体プロフィールの設計

上述の総合モデルを核にし、部分モデルである装入物の降下および炉底の煉瓦損耗解析と組み合わせて、Fig.12に示すように[25]解析することにより、高炉の炉体形状の設計が可能となる。以下に解析例を用いて紹介する。

高炉の操業成績を評価する場合、エネルギー消費の観点から還元材比、運転の容易さからはガスの圧力損失が目安となるであろう。これらの2つの指標に着目し、炉容積を3000 m^3一定として炉体形状を変化させた場合の解析結果をFig.13に示す[26]。圧力損失は、炉口径/炉床径の値が0.7近傍で最小となる領域が存在する。一方、還元材比については、炉腹径/炉床径が大きくなればなるほど、すなわち炉下部体積が増えるほど、少なくなることが分かる。実際の設計においては、圧力損失の許容範囲内においてできるだけ還元材比が少なくなるように、炉口径/炉床径を小さくとるのが得策である。このとき、Fig.14に示す荷下がり解析により得られる充填層内の応力分布から求められるガスの吹き抜け指数（Channeling factor＝ガス圧力損失/装入物垂直荷重）の分布が重要で、シャフト部に1以上の領域が大きく広がらないように炉体形状を選択することになる。

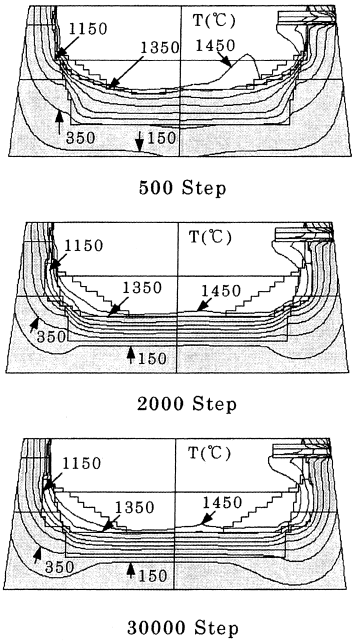


Fig.10　高炉炉底煉瓦の損耗過程

次ぎに炉容積の影響について、国内高炉の炉体形状の統計的データを基に炉容積に応じた形状を設定し、比較を行った結果をFig.15に示す。圧力損失については、大型高炉では炉高が高いのと流速が少し速くなっているため不利な状況にあるのに対し、還元材比においては大型高炉の方が炉壁からのヒートロスが少ないために有利な結果となっている。なお、炉体からのヒートロスは、炉容積が3500 m^3を超えたあたりから飽和傾向にあり、大型化のメリットはあまりないことが分かる。また、炉底の湯流れモデルから炉底煉瓦の底部と側壁における残存厚みがFig.16のように求められており、大型高炉ほど炉底煉瓦の損耗が大きいことが示されている。

以上のように、総合モデルと部分モデルを適切に組み合わせることにより、高炉全体の炉体設計が合理的かつ定量的に行えることが理解できる。

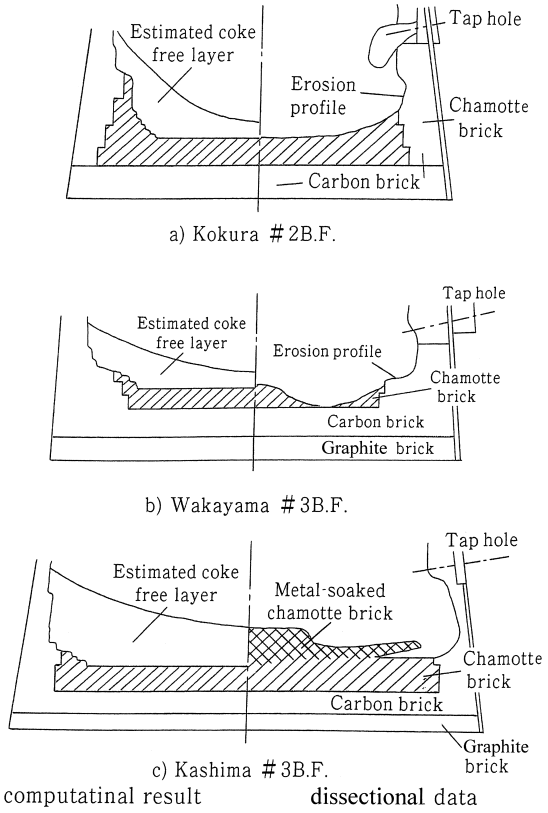


Fig.11　高炉炉底煉瓦の損耗解析結果と実炉データとの比較

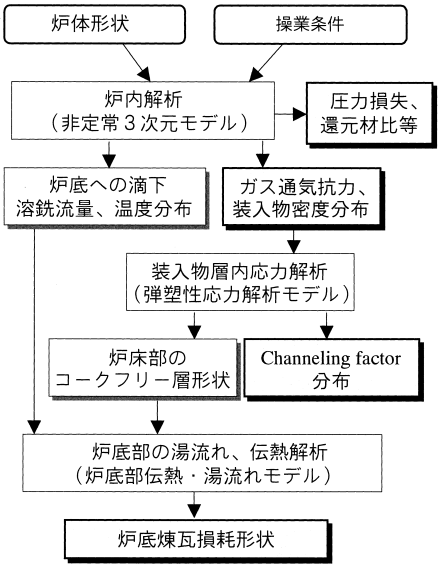


Fig.12　炉体形状設計のための検討項目

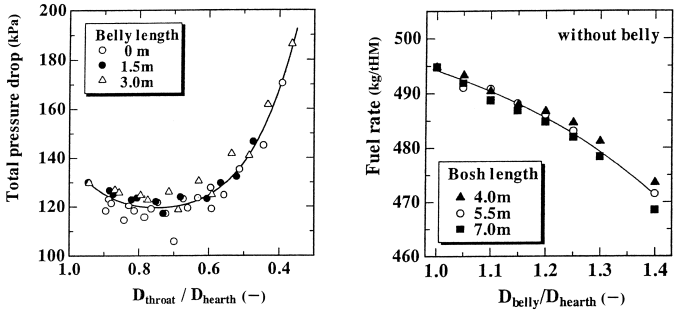


Fig.13　炉体形状が圧力損失と還元材比に及ぼす影響

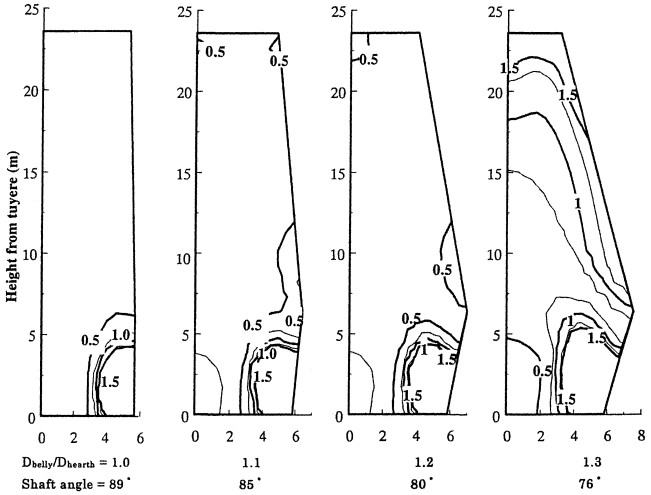


Fig.14　炉体形状が吹き抜け指数に及ぼす影響

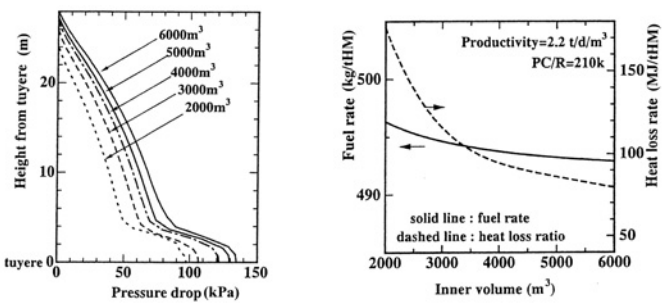


Fig.15　炉容積が及ぼす圧力損失と還元材比への影響

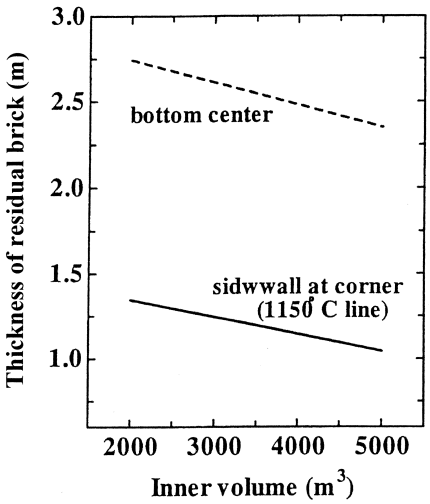


Fig.16　炉底煉瓦の残存厚みに及ぼす炉容積の影響

2.5　固体粒子の不連続性記述に関する新しい試み

最後に、高炉内現象で非常に大きな問題である固体粒子運動の解明についての最近の取り組みを紹介する。高炉内での固体粒子の挙動は、先に紹介した荷下がりモデルによりかなりの部分が理解されるようになってきたが、棚つりやスリップといった現象やレースウェイ形成に関する不連続な現象の記述が困難であり、定量的な記述がいまだできていない。また、炉下部の炉芯コークスの構造や置換挙動についても未知な部分が多く、現象解明にはまだ時間がかかると考えられる。これらの現象を解明するために、粒状体の本来の性質である不連続性が考慮できる数学モデルによる解析が試みられている。なかでもDEM（Discreet Element Method：離散要素法）と呼ばれる粉体工学の分野で実績のある手法[27]を用いたものが注目される。このモデルでは、粒子ひとつひとつの運動方程式を解いて粒子の位置と速度を時々刻々求めるのであるが、粒子間の接触を接線と垂直方向に分解してバネやダッシュポットあるいは塑性要素によりモデル化して粒状体の特性をうまく表現できるよう工夫されており、計算時間はかかるが、粒状体の基本特性が記述可能な解析方法である。

レースウェイを含んだ領域の粒子挙動を解析した例では、粒子の不連続な挙動が記述できており、冷間の模型実験結果との整合性も良好である[28]。さらに、固気相反応を考慮したDEMによりレースウェイ内のコークスのや微粉炭の燃焼が解析されている[29]。コークス粒子の形状変化（反応に応じて小さくなる）やガス組成・温度分布等の解析結果をFig.17に示しており、解析結果と実測値との整合性についても良好である。また、反応により小さくなった粒子によって形成される領域の形状が、Fig.18に示すように実際の高炉で観察される鳥の巣と呼ばれるガス通気性の悪い領域に対応しているのが興味深い。高炉全体をこのモデルで解析するには今のところ、計算負荷が大きすぎるが、炉芯コークスの挙動解明にも応用されており[30]、不連続現象を解明する手段として今後の進展に大きな期待がかかる。

3　今後の課題

以上紹介したように、非常に複雑な高炉内現象をできるだけ精緻に解析・理解しようと多くの研究が行われてきたが、高炉を思うがままに操れるようになるまで今後も継続して更なる高度化が行われるであろう。今後の注力すべき課題としては、1）炉下部現象を含めた装入物の不連続現象の記述、2）生成・消滅を考慮した装入物からの発生微粉や羽口からの吹き込み微粉炭の挙動、3）装入物の反応性や壁への付着性に大きく影響すると考えられているNa、K、SあるいはZn等の微量元素の炉内循環の考慮等が挙げられる。

なかでも1）の装入物の挙動の解明が特に重要であり、先にも紹介した不連続性の記述をいかに行うかということである。炉内の固体粒子を離散要素で全て表現するのが理想的であるが、解析負荷の軽減や反応・相変化の組み込みといった解析技術上の多くの問題を克服する必要があり、実用的な解析を可能とするにはまだ多くの時間を要すると考えられる。従って、現在の連続体近似モデルで不連続な現象を記述できるようにするのが望ましく、数値流体力学の自由表面解析や混相流解析において開発されてきた種々の手法が参考になると思われる。

4　おわりに

高炉に関する数学モデルについて、最近特に進展のあったことがらを中心に紹介を行った。高炉内の炉内現象は、種々の現象が重畳する複雑なものであるが、単純な現象が積み重なった結果でもあり、これまでの数限りない研究の積み重ねから得られた情報を数学モデルに誠実に反映させることにより、今日の数学モデルができあがってきたのである。もちろん、これらのモデルによって全ての高炉内現象が理解できているわけではないが、かなりの部分が定量的に予測可能になっており、炉体設計を論理的かつ定量的に行えるまでに至っている。また、計算機の処理速度の向上は想像以上に速く、計算負荷の大きなモデルでも数年経てば、実用的な解析が可能になることが多く、計算負荷が大きく高度な数学モデルの開発がかなり容易に行える環境にある。先に述べた課題を克服できる日もそう遠くないかも知れない。高炉が鉄鋼業の要のプロセスである限り、また、自由自在に高炉を操業し、最適な設計ができるようになるまで、高炉を理解するためにたゆまぬ努力が続けられるであろう。そして、高炉を理解する

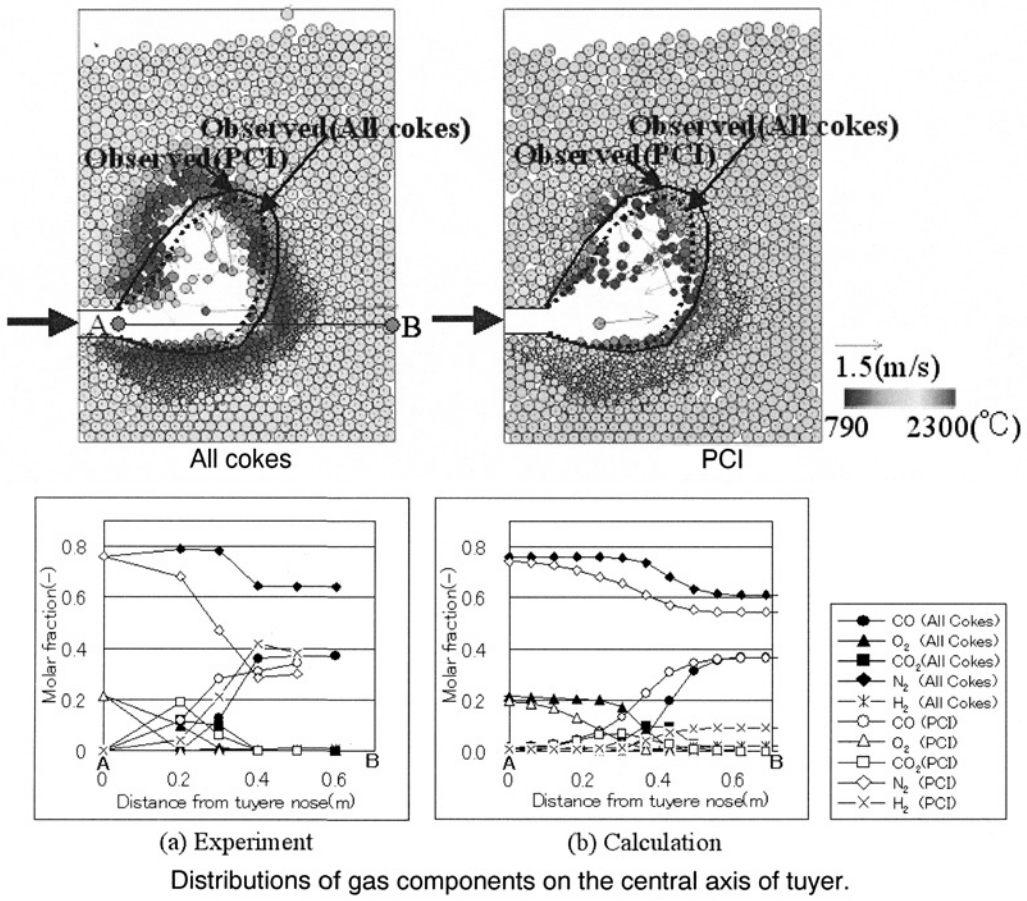


Fig.17　反応を考慮したDEMによるレースウェイ解析結果

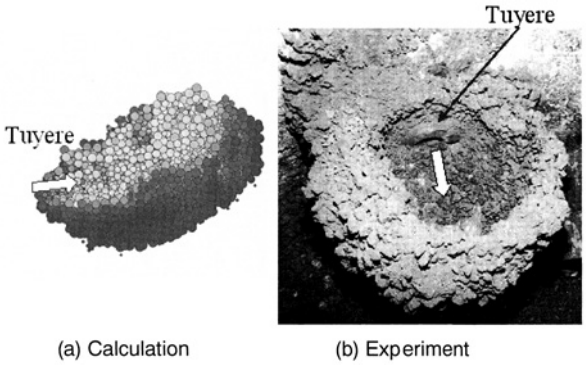


Fig.18　DEM解析および実験炉におけるレースウェイ外殻形状の比較

ための最も論理的手段としての高炉数学モデルには、更なる高精度・高機能化が求められるのである。

参考文献

1）篠原邦夫，高橋洋志，中村正秋：移動層工学，北海道大学図書刊行会，(2000)，39.
2）I.Muchi：Trans. ISIJ，7 (1967)，223.
3）羽田野道春，栗田興一，山岡秀行，横井　毅：鉄と鋼，68 (1982)，2369.
4）R.Wartman：Stahl u. Eisen，95 (1975)，442.
5）久保秀穂，西山哲司，田口整司：川崎製鉄技法，14 (1982)，134.
6）八木順一郎，武田幹治，大森康男：鉄と鋼，66 (1980)，1888.
7）羽田野道春，栗田興一：鉄と鋼，66 (1980)，1898.
8）桑原　守，高根慎司，関戸邦雄，鞭　巖：鉄と鋼，77 (1991)，1593.
9）杉山　喬，須賀田正泰：製銑研究，325 (1987)，34.
10）杉山　喬，松崎真六，佐藤裕二：鉄と鋼，78 (1992)，1140.
11）K.Takatani，T.Inada and Y.Ujisawa：ISIJ Int.，39 (1999)，15.
12）J.A.Castro，H.Nogami and J.Yagi：ISIJ Int.，42 (2002)，44.
13）羽田野道春：高炉製銑法，地人書館，(1999)，102.
14）R.M.Nedderman and T.Tuzun：Powder Technol.，22 (1979)，243.
15）J.Yagi：ISIJ Int.，33 (1993)，619.

16) J.Chen, T.Akiyama, H.Nogami and J.Yagi : ISIJ Int., 33 (1993), 664.
17) 片山賢治, 若林　悟, 稲田隆信, 谷幸司, 山岡秀行：鉄と鋼, 83 (1997), 91.
18) S.A.Zaimi, T.Akiyama, J.B.Guillot and J.Yagi : ISIJ Int., 40 (2000), 332.
19) K.Takatani and T.Inada : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 797.
20) 日月應治, 大野二郎, 中村正和, 原　行明：鉄と鋼, 70 (1984), 2224.
21) 妹尾義和, 田口整司, 福武　剛, J.F.Elliott：鉄と鋼, 71 (1985), s68.
22) Y.Tomita, H.Ookusu and M.Kawano : CAMP-ISIJ, 1 (1988), 79.
23) K.Shibata, Y.Kimura, A.Shimizu and S.Inaba : CAMP-ISIJ, 2 (1989), 92.
24) K.Takatani, T.Inada and K.Takata : ISIJ Int., 41 (2001), 1139.
25) T.Inada, K.Takatani, K.Takata and T.Yamamoto : ISIJ Int., 43 (2003), 1143.
26) T.Inada, K.Takata, K.Takatani and T.Yamamoto : ISIJ Int., 43 (2003), 1003.
27) P.A.Cundall and O.D.L.Strack : Geotechnique, 29 (1979), 47.
28) K.Nakano and H.Yamaoka : CAMP-ISIJ, 16 (2003), 144.
29) H.Nogami and H.Yamaoka : Proc. Int. Workshop on Science and Technology of Innovative Ironmaking for aiming at Energy Half Consumption, Tokyo, (2003), 225.
30) T.Nouchi, S.Watakabe, K.Takeda, M.Sato and T.Ariyama : CAMP-ISIJ, 16 (2003), 796.

(2004年9月1日受付)