

2 次要素近似を用いた有限要素法による 高炉内ガス流れの解析

© 1986 ISIJ

工 藤 純 一*・八 木 順一郎*²

Gas Flow Analysis in Blast Furnace by Using Finite Element Method with Quadratic Elements

Jun-ichi KUDOH and Jun-ichiro YAGI

Synopsis:

A simulation of gas flow in a blast furnace was conducted by using the finite element method with quadratic elements. Vectorial form of the Ergun's equation was used for the equation of motion of gas in the packed bed. According to the variational principle, the discretization equation was derived from the equation of motion together with the equation of continuity. As for the infurnace structures required for numerical calculation, layered structure of ore and coke, cohesive layer and raceway zone were taken into account. Simulation computations were carried out for some different configurations of cohesive zone and/or some different distributions of particle size. A numerical computation was performed to obtain the distributions of gas flow and pressure for the case in which the whole ore layer consisted of double layers of different particle size.

The results indicated that the finite element method with quadratic elements gave much higher precision for gas flow computation than the finite element method with the simplex elements which was used previously. This simulation model makes it possible to estimate the changes in the distributions of gas flow and pressure which are caused by change in particle size distribution or bed structure. It enables also to evaluate the effect of the fine-particle-charge on the gas flow distribution.

1. 緒 言

高炉の数学的モデルの研究は、安定で効率の良い操業、省エネルギー、ならびにコンピューターオートメーション化を行うために近年急速に発達してきた。初期の数学的モデルには伝熱、反応を考慮した1次元モデル¹⁾があるが、現在では融着帯、レースウェイなどの炉内構造を考慮した2次元モデルに発展し、ガス流れと伝熱の同時解析が行われている。

従来の高炉モデルには差分法を用いたもの^{2)~4)}が多かったが、最近では高炉のような複雑な系に関して、内部の充填構造を考慮し、要素の形状および特性値を自由に变化させることのできる有限要素法を用いた解析^{5)~9)}も行われるようになってきた。

有限要素法には、内挿関数の次数によつて1次要素近似から高次要素近似までである。1次要素の内挿関数は変数が座標の線形関数で表される。この1次要素はすでに、高炉のガス流れと伝熱に関する研究に使用され、プ

ロセスの基礎的な特性に関する計算結果^{7)~9)}が報告されている。1次要素を使うと要素間で圧力は連続になるが、流束は不連続である。これに対して、2次要素では座標に関して2次の多項式で表され、要素間で圧力と流束がともに連続になる。しかし、要素方程式は1次要素の場合3行3列のマトリックスで表されるのに対し、2次要素の場合6行6列のマトリックスになり、かなり複雑になる。

本報告では2次要素を用いて、高炉の2次元ガス流れの解析を行い、2次要素近似を使用する場合の数値計算の基礎を確立した。充填層内ガス流れの基礎式としてはERGUNの式を使用し、層構造として2種類の融着帯形状、および、半径方向における粒度分布を考慮した場合を設定した。また、特殊な場合として、実操業で行われている粒度別装入のように、鉱石層を上下2層に分割し、両層が異なる半径方向粒度分布を持つ場合についてもシミュレーション計算を行い、充填層内のガス流れと圧力分布を推定した。

昭和 58 年 4 月 本会 講演大会にて一部発表 昭和 60 年 12 月 3 日 受付 (Received Dec. 3, 1985)

* 東北大学大学院 (Graduate School, Tohoku University)

*² 東北大学選鉱製錬研究所工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

2. 解 析 法

高炉内の流速分布, および, 圧力分布を求める方程式として, (3)式の ERGUN の式¹⁰⁾をベクトル場に拡張した(4)式¹¹⁾を用いた. この解析法は八木ら^{7)~8)}が高炉のガス流れと伝熱の同時解析を有限要素法 1 次要素を使用して行つた場合に基つている.

$$-\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 150.0 \frac{(1-\epsilon_b)^2 \mu}{(\phi d_p)^2 \epsilon_b^3 \rho_g} \mathbf{G} + 1.75 \frac{(1-\epsilon_b)}{(\phi d_p) \epsilon_b^3 \rho_g} \mathbf{G}^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$-\text{grad } P = (f_1 + f_2 |\mathbf{G}|) \mathbf{G} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $a_0 = 1/(f_1 + f_2 |\mathbf{G}|)$ とおくと, (2)式は(3)式のようになる.

$$-\text{grad } P = \mathbf{G}/a_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方, 連続の式は(4)式で表される.

$$\text{div } \mathbf{G} = Q_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3), (4)式から(5)式が得られる.

$$\text{div}(a_0 \text{ grad } P) + Q_m = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

a_0 は本来定数ではないが, 微小領域内で一定であると考えると, (5)式に対する汎関数を円柱座標系で軸対称の場合について, (6)式のように書くことができる.

$$X(P(r, z)) = 2\pi \iint_A \left[\frac{1}{2} a_0 \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right\} - Q_m P \right] r dr dz - \int_s q_m P ds \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, q_m は節点 1, 2 間の外表面から内部へのガスの流入量である.

$$[H^e] = \frac{a_0 \pi}{30A} \begin{bmatrix} 3A_1 C_{123} & -B_{12} D_{123} & -B_{13} D_{312} & A_1 E_{123} + B_{12} F_{123} & B_{12} E_{132} + B_{13} E_{123} & A_1 E_{132} + B_{13} F_{123} \\ & 3A_2 C_{231} & -B_{23} D_{231} & A_2 E_{213} + B_{12} F_{231} & A_2 E_{312} + B_{23} F_{312} & B_{12} E_{312} + B_{23} E_{213} \\ & & 3A_3 C_{312} & B_{13} E_{321} + B_{23} E_{312} & B_{23} F_{231} + A_3 E_{321} & B_{13} F_{231} + A_3 E_{231} \\ & & & 8(A_1 C_{231} + B_{12} D_{123} + A_2 C_{123}) & 4(B_{12} D_{312} + A_2 D_{231} + 2B_{13} C_{312} + B_{23} D_{123}) & 4(A_1 D_{312} + B_{12} D_{231} + B_{13} D_{123} + 2B_{23} C_{123}) \\ \text{Symmetry} & & & & 8(A_2 C_{231} + B_{23} D_{312} + A_3 C_{312}) & 4(2B_{12} C_{231} + B_{13} D_{312} + B_{23} D_{231} + A_3 D_{123}) \\ & & & & & 8(A_1 C_{231} + B_{13} D_{231} + A_3 C_{123}) \end{bmatrix}$$

変分原理によると, 汎関数を最小にすること, (5)式のベクトル方程式を解くこととは等価である. ここで, 有限要素法¹²⁾を用いて $X(P(r, z))$ を最小にする関数を数値的に求める. Fig. 1 に示したように高炉を十分小さい多数の三角形要素の集合と考える. 三角形領域における面積座標 N_i を形状関数とすると領域内の圧力は 2 次要素近似では(7)式で表され, この式を使用すると(6)式はつぎのようにして節点圧力 P_i に関する連立方程式に整理することができる.

$$P = \sum_{i=1}^3 N_i (2N_i - 1) P_i + 4(N_1 N_2 P_4 + N_2 N_3 P_5 + N_3 N_1 P_6) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(7)式中の形状関数 N_i は節点座標の関数として(8)式で定義されている.

$$N_i = (a_i + b_i r + c_i z) / 2A \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで, $a_1 = r_2 z_3 - r_3 z_2, a_2 = r_3 z_1 - r_1 z_3, a_3 = r_1 z_2 - r_2 z_1$
 $b_1 = z_2 - z_3, b_2 = z_3 - z_1, b_3 = z_1 - z_2$
 $c_1 = r_3 - r_2, c_2 = r_1 - r_3, c_3 = r_2 - r_1$

$$2A = \det \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

$(r_1, z_1), (r_2, z_2), (r_3, z_3)$ は節点 1, 2, 3 の座標である. これらの定義から(7)式を(6)式に代入し, 積分を行い, (9)式の関係を用いて X を最小にすると(10)式が得られる.

$$\frac{\partial X^e}{\partial P_i} = 0 \quad (i=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$[H]^e (P)^e - (F_b)^e - (F_s)^e = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし, $[H]^e$: 要素剛性マトリックス, $(F_b)^e$: 湧き出しベクトル, $(F_s)^e$: 流れベクトル, である.

ここで, 上式中の上付き e は要素に関する特性値を示す. $[]$ はマトリックスを, $()$ はベクトルを表しているが, 2 次要素では Fig. 1 に示したように節点が 6 個あるので, 要素剛性マトリックスは 6 行 6 列のマトリックス表示になる. (10)式中の $[H]^e, (F_b)^e, (F_s)^e$ はつぎのように求められる.

ここで, $A_1 = b_1^2 + c_1^2, B_{12} = b_1 b_2 + c_1 c_2, C_{123} = 3r_1 + r_2 + r_3, D_{123} = 2r_1 + 2r_2 + r_3, E_{123} = 3r_1 - 2r_2 - r_3, F_{123} = 14r_1 + 3r_2 + 3r_3$ であり, 他の係数は添字 1, 2, 3 をこの順に循環させると求められる.

$$(F_b)^e = \frac{\pi Q_m A}{30} \begin{bmatrix} 2r_1 - r_2 - r_3 \\ -r_1 + 2r_2 - r_3 \\ -r_1 - r_2 + 2r_3 \\ 8r_1 + 8r_2 + 4r_3 \\ 4r_1 + 8r_2 + 8r_3 \\ 8r_1 + 4r_2 + 8r_3 \end{bmatrix}$$

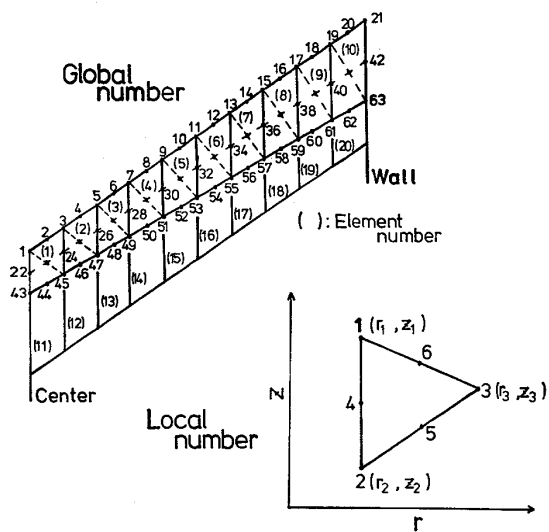


Fig. 1. Numbering of nodes for quadratic triangular element.

$$(F_s)^e = \frac{\pi q_m l}{3} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ 0 \\ 2r_1 + 2r_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ただし、三角形要素で節点 1 と 2 の間で流入 q_m があるとした。

(10) 式を高炉の全領域について計算し、重ね合わせると (14) 式のように節点圧力に関する連立 1 次方程式が得られる。

$$[H](P) - (F_b) - (F_s) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式をガウスの消去法を用いて解くと圧力分布が求められる。また、(7) 式を微分して (3) 式に代入すると、(15) 式が得られ、この式から流速分布を計算することができる。

$$\begin{bmatrix} Gr \\ Gz \end{bmatrix}^e = -a_0 \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial r} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix}^e = -\frac{a_0}{2A} \begin{bmatrix} b_1(4N_1-1) & b_2(4N_2-1) \\ c_1(4N_1-1) & c_2(4N_2-1) \\ b_3(4N_3-1) & 4(b_1N_2+b_2N_1) & 4(b_2N_3+b_3N_2) \\ c_3(4N_3-1) & 4(c_1N_2+c_2N_1) & 4(c_2N_3+c_3N_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

(15) 式の右辺は、2 次要素では N_i が残っているのですが、 r, z の関数で表されるが、1 次要素で (15) 式に相当する式

Table 1. Operating conditions of the blast furnace⁷⁾.

Blast volume	93.75	Nm ³ /s
Weight of sinter per one charge	1.152 × 10 ⁵	kg/charge
Weight of coke per one charge	0.277 × 10 ⁵	kg/charge
Number of charge	1.395 × 10 ⁻³	1/s
Deposit angle of sinter	28—32	deg
Deposit angle of coke	33—37	deg

は定数になり、位置に依存しない。 a_0 が定数であれば流速は要素間で完全に連続になる。ERGUN の式では a_0 は定数でないが、各要素ごとに一定であるとみなしたため上記理論には誤差をとまらう。この点については後述する。結果の表示のため本報では要素の重心の位置における流速値をその要素の代表流速として出力させた。 a_0 は流速ベクトル G に依存しているのので、再度 a_0 を計算し、同じ計算をくり返す。くり返し計算後の各節点における誤差の最大値が一定値 (相対誤差で 10^{-4}) 以下になった時計算は収束したと考えた。なお、この解析における境界条件は層頂ライン上で圧力一定の条件と羽口から流入する送風量が一定であるという二つの条件のみで、その他の条件は、自然境界条件を採用したので上記の数式展開の中に含まれている。

3. 設 定 条 件

数値計算に際して高炉を多くの要素に分割した。分割の方法は、半径方向には 10 分割とし、炉軸方向には鉱石、コークスの各層を要素分割の単位とし装入物が炉内を降下する時、その体積は変化しないと仮定して横方向の分割線を計算した。これは、八木らが^{7)~8)} 1 次要素の場合に採用した方法と同じである。得られた四角形を単位の要素と考えるが、この四角形をさらに半分の三角形要素に分割し、この三角形要素に基づいて数値計算を行っている。本研究では、2 次要素近似を採用しているの節点の番号付けは Fig. 1 のようになり要素数は 1 次要素の場合と同じであるが、節点数はかなり多くなる。

炉内構造の設定には各装入物の傾斜角が必要である。高炉の解体調査結果^{13)~14)} の報告の中には炉内中心部にコークス単味層が存在するものもある。一方、模型実験による構造の研究では成田ら¹⁵⁾ が通風時における装入物の表面傾斜角の研究を行い、送風量の増大にともない炉中心部に流動化コークス層が形成されたことを報告している。さらに、西尾ら¹⁶⁾ が提案している層頂でのコークスの流動化のメカニズムなどを考えあわせると、実炉内では炉中心部にコークスが多いと推定した方が合理的である。Table 1 に示した鉱石とコークスの傾斜角は、無風状態での実物大模型の測定結果であり、上述の推論とは逆の値になっている。ここでは、Table 1 のデータと

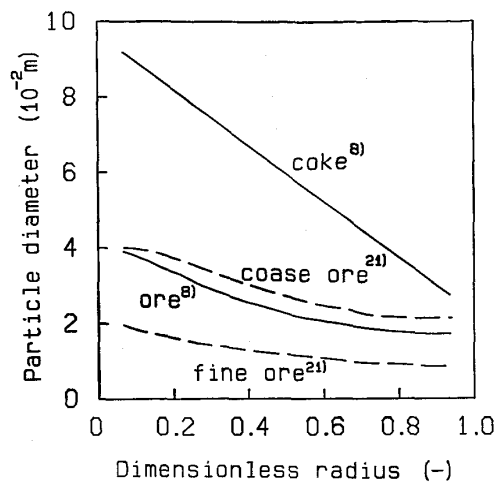


Fig. 2. Radial distribution of particle diameter.

は異なるが、上述の報告を参考にして、層頂での鉱石、コークスの傾斜角をそれぞれ 35° 、 30° とし、装入物の降下にもないこの傾斜角は減少するようにした。

炉内充填層の粒度と空間率の関係として山田ら¹⁹⁾~²⁰⁾の研究結果を用いたが、粒度構成の影響は無視して、鉱石とコークスの半径方向粒径分布は前報⁸⁾で示した分布を用いた。これら粒径分布は粒度別装入の場合の粒径分布とあわせて Fig. 2 に示した。融着帯の位置は任意に与えたものであるが、報告されている解体調査の結果¹³⁾~¹⁴⁾を参考にして設定した。V型融着帯は逆V型融着帯と炉軸方向の位置を等しくし、レースウェイについては、中村ら¹⁷⁾のレースウェイの大きさを推算する式から求め、稲谷ら¹⁸⁾のレースウェイ近傍の圧力分布の研究結果から空間率として 0.8 を与えた。

鉱石の粒度別装入の場合の層構造はつぎのようにして求めた。磯山ら²¹⁾、須沢ら²²⁾の粒度別焼結鉱装入法による試験操業の結果を参考にして、1層を形成する装入量は通常装入の場合と同じにし、粒度別装入の場合の鉱石層内の粗粒層と細粒層の体積比はあらかじめ指定した。したがって、鉱石層の要素は粗粒層と細粒層に分けられることになる。計算で用いた平均粒径は粗粒が 28 mm、細粒が 13 mm である。粗粒と細粒の境界面の傾斜角については、細粒を炉壁側にいれるのが一般的であるので、ここでは、鉱石層とコークス層の傾斜角の平均である 32.5° とした。この傾斜角は鉱石、コークスの傾斜角と同様に装入物の降下とともに減少するようにした。

境界条件として、羽口からの流入速度および層頂での圧力を与えた。層頂での圧力は装入物表面に沿って一定であるとした。これらの基本条件に基づき 10 種類の層構造を考えシミュレーション計算を行った。数値計算には現在稼働中の大型高炉のプロフィールを用いた。使用

Table 2. Material properties.

Layer	Particle diameter (m)	Voidage (-)	Shape factor (-)	Remarks
Ore layer	0.0205	0.445	0.84	Case 1, Case 4 Case 2, Case 5
	0.0245	0.457	0.84	
Coke layer	0.0477	0.524	0.90	
Cohesive layer	0.0205	0.10	0.84	Case 1, Case 4 Case 2, Case 5
	0.0245	0.10	0.84	
Raceway	0.0477	0.80	0.90	

Table 3. Equations used to calculate void fraction from particle size¹⁹⁾.

Bed	Equation
Sinter	$\epsilon_0 = 0.403 (100 d_p)^{0.14}$
Coke	$\epsilon_0 = 0.153 \log(d_p) + 0.724$

ϵ_0 : Void fraction (-)
 d_p : Particle size (m)

したデータは前報⁷⁾と同じであるが、ここではガス流れの計算に必要なもののみ Table 1 に示した。各層の粒度が均一である場合の各層の特質を Table 2 に示した。半径方向の粒度分布を考慮する場合には、各要素の空間率は Table 3 に示した粒度と空間率の関係式¹⁹⁾から計算した。数値計算のための主要な条件は融着帯の形状、装入物の粒度分布、鉱石の粒度別装入などであるが、その特徴を Table 4 にまとめて示した。

4. 解析結果

ケース 1 からケース 10 までの数値計算はすべて十数回のくり返し計算で収束した。この計算は東北大学大型計算機センターの計算機 ACOS システム 1000 を使用したが、CPU タイムはいずれの場合でも約 3 min であった。

Table 4 に収束時のガスの圧力損失、ならびに層頂でのガスの流量とその計算誤差を示した。この流量誤差は層内任意のレベルを通過する全流量の計算値が、入口で与えた流量に対してどの程度の誤差を持つかを調べた結果の一部であり、数値計算の精度に関係しているものと考えられる。なお、境界条件はすべてのケースで同一で、層頂での圧力が、0.1678 MPa、羽口でのガス流量が 202.44 kg/s である。

Table 4 によると、2次要素の場合は、流量の相対誤差がいずれのケースでも 0.511% 以下である。この値は1次要素を使用したケース 11 の場合の 1.716% よりも低く、2次要素の使用により計算精度が向上したと考えられる。

各ケースの圧力損失を比較してみる。ケース 1 は1次要素を使用したケース 11 と層構造が同一であるので、

Table 4. Computed results for some case studies.

Case No.	Cohesive zone type	Charge type	Particle diameter (m)	Pressure loss (MPa)	Top gas flow rate (kg/s)	Error of flow rate (%)	Figure No.
1	Inverse V type	A	0.02050 (ore) (uniform) 0.04770 (coke)	0.0596	202.80	0.158	
2	Inverse V type	A	0.02451 (ore) (uniform) 0.04770 (coke)	0.0526	202.80	0.158	
3	Inverse V type	A	Radially distributed for ore and coke	0.0517	202.53	0.043	Fig. 3
4	V type	A	0.02050 (ore) (uniform) 0.04770 (coke)	0.0943	202.80	0.158	
5	V type	A	0.02451 (ore) (uniform) 0.04770 (coke)	0.0811	201.94	0.250	
6	V type	A	Radially distributed for ore and coke	0.0718	201.43	0.500	Fig. 4
7	Inverse V type	B	0.013 (fine ore) 0.028 (coarse ore) ($R=1/1$) 0.04770 (coke)	0.0632	203.44	0.511	Fig. 7
8	Inverse V type	B	Radially distributed for ore ($R=1/1$) 0.04770 (coke)	0.0652	202.57	0.084	
9	Inverse V type	B	0.013 (fine ore) 0.028 (coarse ore) ($R=1/3.3$) 0.04770 (coke)	0.0552	202.30	0.049	Fig. 5 Fig. 6
10	Inverse V type	B	Radially distributed for ore ($R=1/3.3$) 0.04770 (coke)	0.0569	202.27	0.064	
11	Inverse V type	A	0.02050 (ore) Same particle 0.04770 (coke) Size as case 1 Simplex element	0.0604	202.92	1.716	

A: One charge for one layer B: Two separated charges for one layer R: Volume ratio of fine ore to coarse ore

圧力損失の値もほぼ同じである。逆V型融着帯構造の場合において、ケース1はケース2よりも大きい圧力損失を示している。半径方向の粒度分布を考慮したケース3の場合は層構造が同じであるケース1, 2より小さい値になった。V型融着帯構造の場合について、ケース4はケース5よりも大きい圧力損失を示している。半径方向の粒度分布を考慮したケース6は粒度分布が均一のケース4, 5よりも小さい値になった。

これらの計算結果から、融着帯形状が逆V型およびV型のいずれの場合でも、鉱石の粒径が小さくなると山田ら¹⁹⁾の空間率と粒径の関係式から得られる空間率も小さくなるので、(1)式のERGUNの式で求められる圧力損失が増大する。

半径方向の粒度分布を考慮したケース3とケース6において、炉中心側に粗粒が、炉壁側に細粒が分布するようになっているが、この分布については結果的に均一粒度の場合よりも圧力損失が小さくなった。

粒度別装入の効果を検討するため、鉱石層を体積比で1:1に分割し、上部に細粒、下部に粗粒を配した構造を考えケース7とした。ケース7は通常装入で鉱石層、コークス層の層構造が同じであるケース1の場合と比べて圧力損失が大きくなった。これは、細粒の効果による空間率の低下が通気性に強く現れているためと考えられ

る。

実際の操業に近い場合^{21)~22)}として鉱石層中の細粒と粗粒の体積比を1:3.3に分割したのがケース9であるが、ケース2と比較すると、ケース9の圧力損失がケース2より大きいので、やはり、上述の細粒の効果が現れていると考えられる。ケース7とケース9を比較すると、ケース9の圧力損失が小さくなっている。これは、細粒と粗粒の粒径を変えなければ、鉱石層のなかで細粒の割合を少なくすると、圧力損失が小さくなることを示している。

半径方向の粒度分布を考慮したケース8と10は同一構造で半径方向に均一粒度を設定したケース7や9と比較して、圧力損失がやや大きくなった。ケース8と10の鉱石の平均粒度はケース7や9とそれぞれほぼ同じであるから半径方向の粒度分布の影響が現れていると考えられる。なお、ケース8と9の計算に使用した半径方向の粒度分布をFig. 2に示したが、これは磯山ら²¹⁾の測定データを無次元化した半径方向距離に対してプロットしたものである。

つぎに炉内のガス流れパターンの比較を行う。逆V型融着帯構造の場合で半径方向の粒度分布を考慮した場合として、ケース3の計算結果をFig. 3に示した。粒度分布の効果によつてシャフト部では強い中心流が生じて

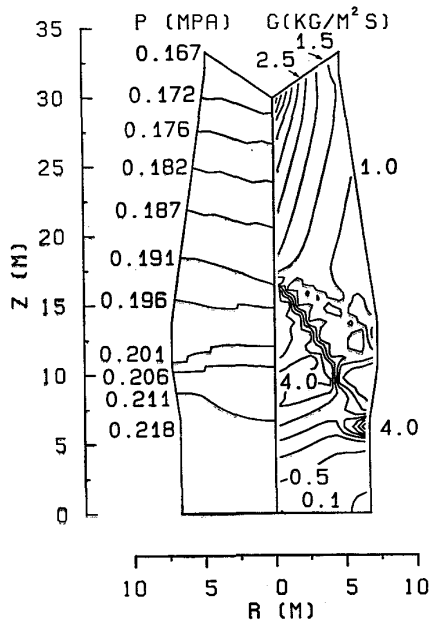


Fig. 3. Isobars and contour lines of averaged mass velocity of gas (case 3).

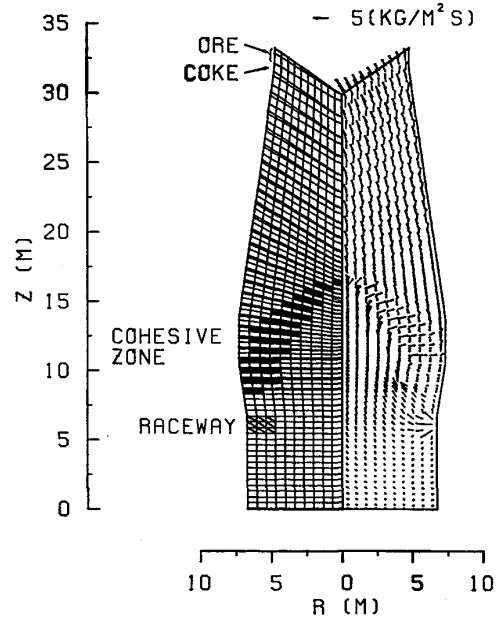


Fig. 5. Layered structure and computed gas flow vector (case 9).

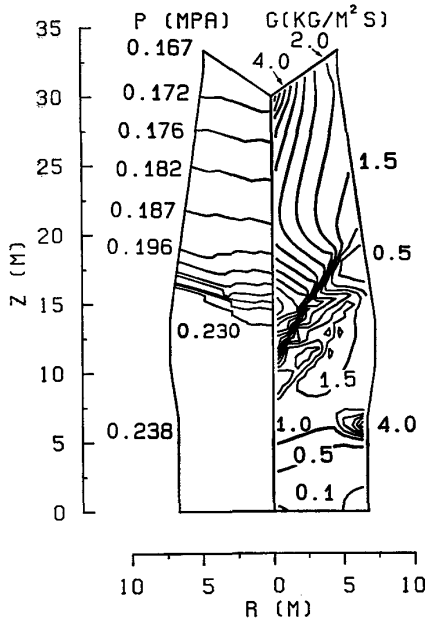


Fig. 4. Isobars and contour lines of averaged mass velocity of gas (case 6).

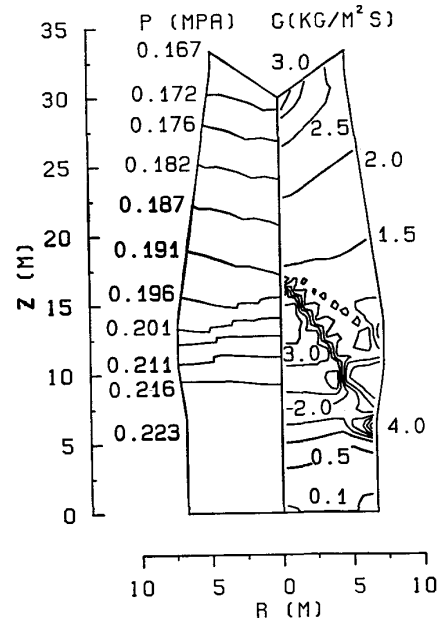


Fig. 6. Isobars and contour lines of averaged mass velocity of gas (case 9).

いるが、等流速線は融着帯付近で融着帯に沿っている。この流速分布の強い不均一性にもかかわらず、等圧線はほぼ水平になつているのが特徴である。

V型融着帯を有する炉内構造の場合で半径方向の粒度分布を考慮したケース6の計算結果を Fig. 4 に示した。Fig. 4 において、ガス流れはコークススリットを通過した直後には極端な中心流になつているが、融着帯の直上で炉壁方向に流れ再分配されている。しかし、中心部の粒子径が大きく空間率が大きいため、シャフト上

部でも流量は中心部の方が多い。

粒度別装入の場合の計算結果に関しては、鉱石層の細粒と粗粒の比を体積比で 1 : 3.3 にした炉内構造の場合を Fig. 5, 6 に示した。Fig. 6 の等圧線の分布は、細粒と粗粒の比が 1 : 1 の場合の Fig. 7 に比べて、圧力損失が小さいので軸方向の等圧線の間隔が広がっている。また、Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、等流速線の分布はシャフト部では類似しているが、層頂付近では Fig. 6 の方が、急激な変化を示している。これは粒度

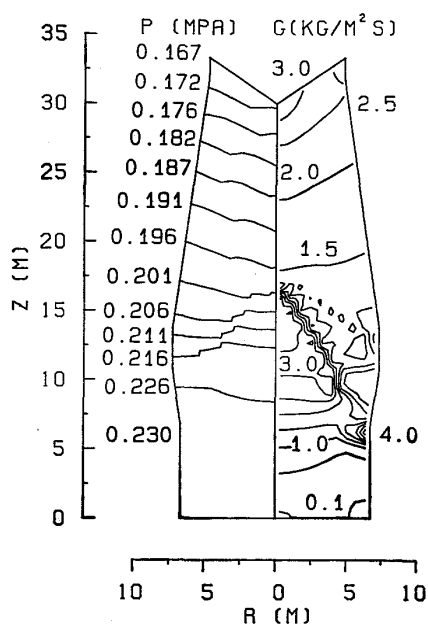


Fig. 7. Isobars and contour lines of averaged mass velocity of gas (case 7).

比 $(1/R)$ 3.3 の方が粒度比 1 に比べて炉壁側に細粒が少ないので、通気抵抗が小さいためだと考えられる。半径方向の粒度分布を考慮した Fig. 3 の場合も、等流速線の分布がシャフト部で不均一であり、強い中心流になっていた。これらの計算結果より、本報で使用した中心部の粒度が大きいような半径方向粒度分布を与えると、シャフト部に強い中心流が生じることになる。

また、炉下部での等流速線は融着帯の形状が同一であれば、パターンが類似していることから、融着帯の形状やレースウェイの構造などがガス流れを支配する、より重要な因子であると考えられる。

5. 結 言

有限要素法 2 次要素近似を用いた高炉内のガス流れの解析を行った。その結果、従来からの 1 次要素近似に比べて数値計算の演算時間は約 1 min から約 3 min になったが、計算精度はガス流量で比較して計算誤差が 1/3 以下に向上した。有限要素法の特徴が高炉内の複雑な炉内構造の表現や、半径方向の粒度分布、さらに、粒度別装入の場合の鉱石層の分割などに応用された。ガスの流速分布、圧力損失におよぼす粒度分布、粒度別装入の効果が推定できることを明らかにした。2 次要素近似は流速の計算精度が改善されているので、今後、開発を予定している高炉の総合的モデルにおいて、伝熱との同時解析の際には有利であると考えている。

最後に、本研究を行うにあたり新日本製鉄株式会社君津製鉄所より高炉の操業データの御提供を、日本鋼管株

式会社中央研究所よりガス流れに関する基礎プログラムの御提供を賜った。ここに厚く御礼申し上げます。

記 号

A : 面積領域	$(r-z$ 平面座標)
d_p : 装入物の平均粒径	(m)
f_1, f_2 : Ergun の式で粘性項と慣性項を表す係数	$(1/s), (m^2/kg)$
G : 質量速度	(kg/m^2s)
P : 圧力	(Pa)
Q_m : 質量の湧き出し	(kg/m^3s)
q_m : 流入速度	(kg/m^2s)
r : 半径方向座標	(m)
s : 境界積分領域	$(r-z-\theta$ 円柱座標)
X : 汎関数	
ϵ_b : 空間率	
μ : ガスの粘度	(kg/ms)
ρ : 密度	(kg/m^3)
ϕ : 形状係数	

文 献

- 1) J. YAGI and I. MUCHI: Trans. ISIJ, 10 (1970), p. 392
- 2) I. RADESTOCK and R. JESCHAR: Stahl Eisen, 90 (1970), p. 1249
- 3) M. KUWABARA and I. MUCHI: Trans. ISIJ, 17 (1977), p. 321
- 4) M. A. PROSPER and J. SZEKELY: Ironmaking Steelmaking, 5 (1979) p. 209
- 5) 大野陽太郎, 田島 治: 化学工学協会第 39 年会 (1974), p. 199
- 6) a; A. SASAKI, H. KOKUBU, S. TAGUCHI and N. TSUCHIYA: Preprint of the 5th Germany-Japan Seminar, Dusseldorf (1982), May 3/4, p. 47
b; 佐々木晃: 日本鉄鋼協会東北支部還元研究会資料, 仙台 (1982 年 3 月)
- 7) 八木順一郎, 武田幹治, 大森康男: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1888
- 8) J. YAGI, K. TAKEDA and Y. OMORI: Trans. ISIJ, 22 (1982), p. 884
- 9) J. KUDOH, K. TAKEDA, J. YAGI and Y. OMORI: Ironmaking Proc., 42 (1983), p. 615
- 10) S. ERGUN: Chem. Eng. Progr., 87 (1952), p. 48
- 11) J. RADESTOCK and R. JESCHAR: Stahl Eisen, 90 (1970), p. 22
- 12) J.J. CONNOR and C. A. BREBBIA: 流体解析への有限要素法の応用 (奥村敏恵, 坂井藤一, 岩本卓也共訳) (1981), p. 41 [サイエンス社]
- 13) 伊沢哲夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斉藤正紀, 宮本健彦, 福島 勤, 古川 武: 鉄と鋼, 63 (1977), S 446
- 14) 吉村研三, 佐藤 忠, 富貴原璋, 嶋崎重信, 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 64 (1978), S 551
- 15) 成田貴一, 稲葉晋一, 清水正賢, 山口荒太, 小林勲, 沖本憲一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 66
- 16) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 65 (1979), A1
- 17) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 28

-
- 18) 稲谷稔広, 福武 剛, 浜田尚夫, 近藤幹夫, 岡部
俠児: 鉄と鋼, 60 (1974), A1
- 19) 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鏝郎, 田口
整司: 川崎製鉄技報, 6 (1974), p. 16
- 20) M. KONDOH, Y. KONISHI and K. OKABE:
Proc. Int'l Conf. on the Operation of Blast
Furnace, Arles, IRSID (1980), p. 1. 3. 1
- 21) 磯山 正, 阿部哲也, 出野 正, 今井 徹, 奥野
嘉雄, 須沢昭和: 鉄と鋼, 67 (1981), S708
- 22) 須沢昭和, 三国 修, 奥野嘉雄, 原 義明, 今井
徹, 高域俊介: 鉄と鋼, 68 (1982), A5
-