

論 文

高炉三次元ガス流れの解析

大野陽太郎*・山田 裕*²・近藤国弘*・竹部 隆*³

Mathematical Model Analysis on Three-dimensional Gas Flow in Blast Furnace

Yotaro OHNO, Yutaka YAMADA, Kunihiko KONDO and Takashi TAKEBE

Synopsis :

A mathematical model of three-dimensional gas flow in a blast furnace has been developed in which three-dimensional layer structure and permeability distribution are considered, using the finite element method.

Cohesive zone profile and pressure distribution were simultaneously measured in an actual blast furnace and compared with the computed results.

Good correspondence between them confirms the adequateness of the mathematical model analysis.

The principal results of the circumferential distribution analysis are as follows.

(1) On the side of high stockline, pressure increases and gas flow rate decreases.

(2) Gas flow rate varies with the permeability distribution that depends on thickness ratio of ore and coke layeres, but pressure is almost constant.

(3) With deviated cohesive zone profile, the level of the maximal variance of pressure distribution corresponds to the sectional average level of the cohesive zone, where pressure is high on the side of high melting level. In the lumpy zone, gas flow rate is low on the side of high melting level.

(4) Blast rate distribution is smoothed through the dropping zone and has no effect on the gas flow distribution in the lumpy zone. On the other hand, pressure drop through tuyere is important to equalize the blast rate distribution.

Key words : three-dimensional ; gas flow ; blast furnace ; circumferential ; cohesive zone ; simulation.

1. 緒 言

高炉内のガス流れについては、従来から半径方向分布が注目され、装入物分布の変更にもなうガス流分布の変化や、溶融帯(本論文では、以下、融着帯と同義で使用している。)形状のガス流れにおよぼす影響などが、二次元数学モデルにより検討され^{1)~8)}、高炉の炉内現象の定量的理解と炉況安定化に役立つてきた。

最近、より安定した炉況を実現するには、円周バランスの確保が重要であることが認識されるようになってきた⁹⁾。

ガス流れの円周バランスに影響を与えられ考えられる炉頂装入面レベルや鉬石粒径の円周方向分布が填充時に測定されている¹⁰⁾¹¹⁾。装入面レベルの偏りは、鉬石、コー

クスの層厚比も変化させると考えられる。また操業中の測定から、溶融帯の位置が、円周方向で不均一になることが報告されている¹²⁾。このような炉内通気抵抗の三次元分布が、ガス流れに与える影響については、今までほとんど検討されていない。

そこで前報¹³⁾の充填層三次元ガス流数学モデルをもとに、高炉内の三次元的層構造の変化、通気抵抗分布を考慮するための前処理モデルを追加し、高炉内三次元ガス流れを計算できるモデルに拡張した。

この数学モデルにより、装入面位置、 L_o/L_c (鉬石、コークス層厚比)、溶融帯形状、羽口ごと風量等の円周方向分布が炉内ガス流分布、炉壁部圧力分布に与える影響を検討した。

また実炉において、溶融帯形状と炉壁圧力の円周方向

昭和 58 年 10 月・59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 2 月 26 日受付 (Received Feb. 26, 1987)

* 日本鋼管(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Center, Nippon Kokan K.K., 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K.K.)

*³ 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K.K.)

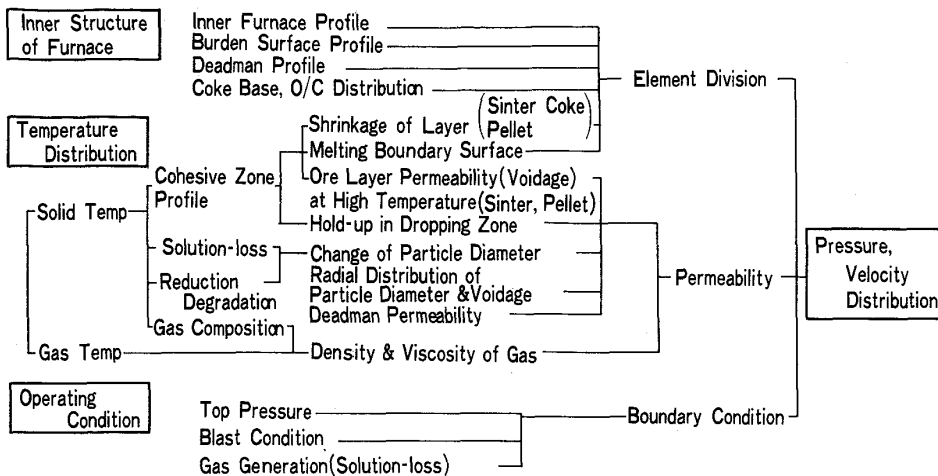


Fig. 1. Factors considered for calculation of gas flow in blast furnace.

偏差を測定し数学モデルによる推定値と比較した。

2. 高炉内で考慮すべき現象とその取扱い

高炉内のガス流れ、圧力分布を支配している要因を、大きく炉内構造、温度分布、操業条件に分けて Fig. 1 に示す。

計算の対象領域は、炉体内壁プロフィール、装入面および炉床の液面で囲まれた領域である。全領域にわたる流れを知ることが目的なので、レースウェイの存在は無視する。

温度場の中心軸（通常は、炉の中心軸と一致）に対し、円周方向 16 等分した垂直断面を設定する。各断面ごとに、装入面の位置、温度、熔融帯の上下面の位置、温度、羽口レベルの温度の半径方向分布を与え、高さ方向の温度変化を直線的に内挿し温度分布を計算する。各円周方向断面を直線的に内挿することにより三次元の温度分布が定められる。ガス-固体温度差をガス温度の関数として用い、固体温度を求める。装入面から、鉱石、コークスの層状構造とし、熔融温度以上の領域では、コークスのみとする。

要素分割は、半径方向に N_r 等分、円周方向に 8 等分とし、炉頂の L_o/L_c 分布、装入面形状を各円周方向ごとに与え、炉頂の第一層の座標を計算し、下方に向つて、炉体プロフィールの変化、鉱石の軟化収縮、コークスのソリューションロス反応による層の収縮を考慮して計算する。炉内構造を反映した要素分割の例を Fig. 5 に示す。

鉱石層の収縮率は Fig. 2(a), 収縮にともなう通気抵抗の変化は、荷重軟化テストの結果¹⁴⁾を空隙率の変化におきかえ Fig. 2(b) のように固体温度の関数として与える。滴下帯のホールドアップも、コークス層の空隙率の低下として取り扱う。

熔融帯下面で、融着鉱石層からコークス層への境界に

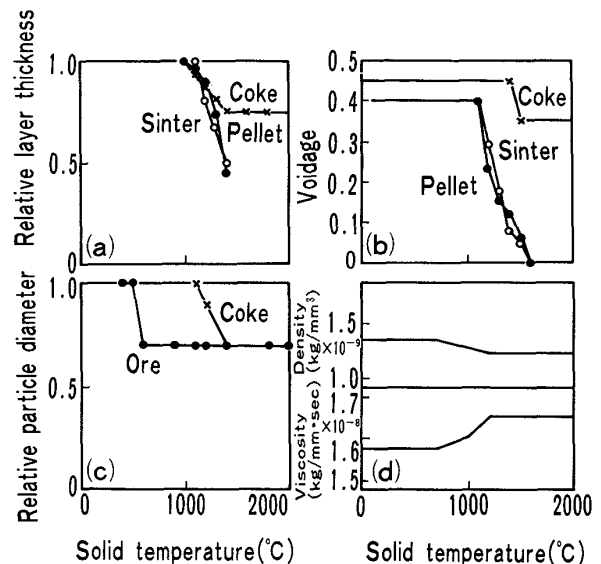


Fig. 2. Relative layer thickness (a), voidage (b), relative particle diameter (c). Gas density and viscosity at standard condition (d), as a function of solid temperature.

おける中間層については、対応する要素中で積分点¹³⁾ごとに、設定した熔融帯下面位置との相対位置から鉱石層またはコークス層と判定する。

粒度偏析、空隙率等の径方向分布は、高さ方向一定とする。反応に伴う粒径変化は、その反応の生ずる温度範囲を仮定し、Fig. 2(c) のように固体温度と関係づけて取り扱う。ガスの密度、粘度は組成変化の影響も受けるので、標準状態における値を、Fig. 2(d) のように固体温度と関係づけて取り扱う。

境界条件として、炉頂装入面に炉頂圧を与え、ソリューションロス反応によるガス発生は、発生温度域内の全要素で均等に起こるものとし、発生量をわりふる。羽口からの送風量は、炉口ガス量からソリューションロス反応に

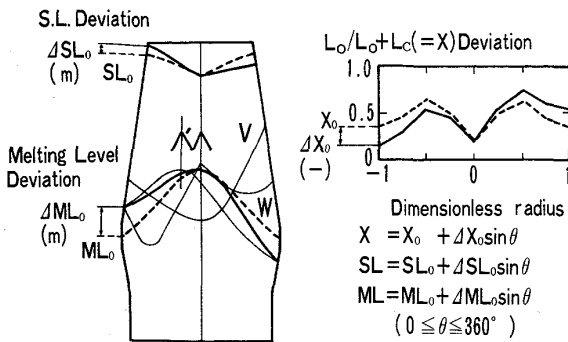


Fig. 3. Circumferential deviation conditions.

よる発生ガス量をさしひいた流量を用いる。

円周方向で、変化する可能性のある装入面形状 (S. L.), 鉱石層厚比 $X = (L_o / (L_o + L_c))$, 溶融帯形状 (M. L.) について, 任意の分布を仮定すると取扱いが困難になるので円周方向平均 (軸対称) の分布に対して, Fig. 3 に示すように周辺部でおのおの, ΔSL_0 , ΔX_0 , ΔML_0 を振幅として, 正弦波状に変化し, 中間部はそれに応じて変化するものとする。溶融帯の形状は, 大別して逆V, W, V型に分けられる。おのおのについて円周方向に偏差がある場合があり得るので, Fig. 3 のように, その形状を設定した。逆V型については, 頂部が炉の中心から偏心しているが, 炉壁部の位置は同一である場合の例についても検討した。なお, 各円周方向ごとの溶融帯上下面は, 次式により設定した。

$$Z = Z_A + Z_B \left[1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{R - R_B}{R_A} \right)^2 \right\} \right] \dots (1)$$

Z_A, Z_B, R_A, R_B : 溶融帯形状パラメーター

溶融帯の上, 下面の間隔は垂直方向で一定とし, 以下の計算では 3 m とした。

羽口毎風量分布については, 円周方向の要素分割数が 8 個であるので, Fig. 14 に示すように変化させた。

円周方向の要因の効果を, 炉壁部圧力分布と, 周辺部の流速分布について検討するために, 次のようなデータ処理を行った。

流速 (本論文では, 流速は標準状態における値である¹³⁾) については, 壁側の要素のより壁側 (無次元半径 0.894) の積分点における流速垂直成分を隣接要素間 4 点で平均し, その方向の周辺部流速とした。

塊状帯から溶融帯までは, 鉱石層とコークス層が交互に存在するので, 両層の平均値を用いた。流速を流量に換算するために, 炉体内壁プロフィールの変化を考慮した断面積を乗じ流量とし, 各円周方向の平均流量で除して, 相対流量とした。圧力については, 円周方向 8 点の圧力を平均し, その平均値からの偏差について解析した。

Table 1. Calculation conditions of three-dimensional gas flow in blast furnace (Ohgishima No. 2).

Operating conditions	Circumferential analysis	Comparison with measurement
Coke rate (kg/T)	501	496
Coke base (T)	31	31
Top pressure (kgf/cm ² G)	2.50	2.49
Blast volume (Nm ³ /min)	5 995	6 607
Solution loss (kg/T)	95	105

Average particle diameter: Ore 15 mm, Coke 50 mm
 Shape factor: Ore 0.90, Coke 0.90
 Dead man: Coke diameter 25 mm, Voidage 0.35
 Temperature range of Solution loss reaction 1 100-1 400°C
 Theoretical flame temperature 2 225°C

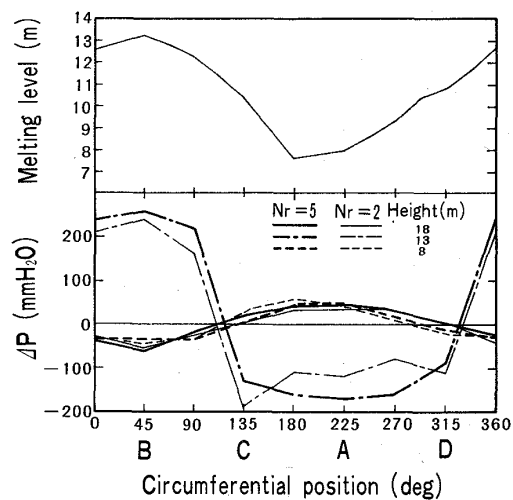


Fig. 4. Circumferential distributions of melting level and pressure at wallside.

3. 計算結果

炉内のガス流分布に大きな影響を与える溶融帯が, 円周方向で不均一に分布した場合, 炉内のガス流, 圧力分布も円周方向で不均一になると考えられる。そこで, 溶融帯形状の中心は炉軸と一致しているが炉壁側の位置が円周方向で変化している場合について計算を行った。装入面形状, O/C 分布, 羽口吹込み流量は円周方向均一とした。計算に用いた操業条件を Table 1 に示す。

計算精度が, 半径方向分割数 N_r に依存することを確認するために, まず N_r の大きな場合 ($N_r=5$) について計算を行った。この場合, 半径上の節点数は 11 個 (中心を含む) となり, 検証ずみの高炉三次元軸対称モデル⁷⁾ と同数であり, かつ, 要素が二次要素であることを考慮すると数値計算上, 十分な精度が期待できる。設定した溶融帯下面の壁面位置の円周方向分布を Fig. 4 に示す。また, 顕著な不均一性を示す方向 (A—B) の垂直断面の要素分割図, 等温線, 等圧線, 流速ベクトル (断面に平行な成分) 分布と炉壁圧力分布 (4 方向) を

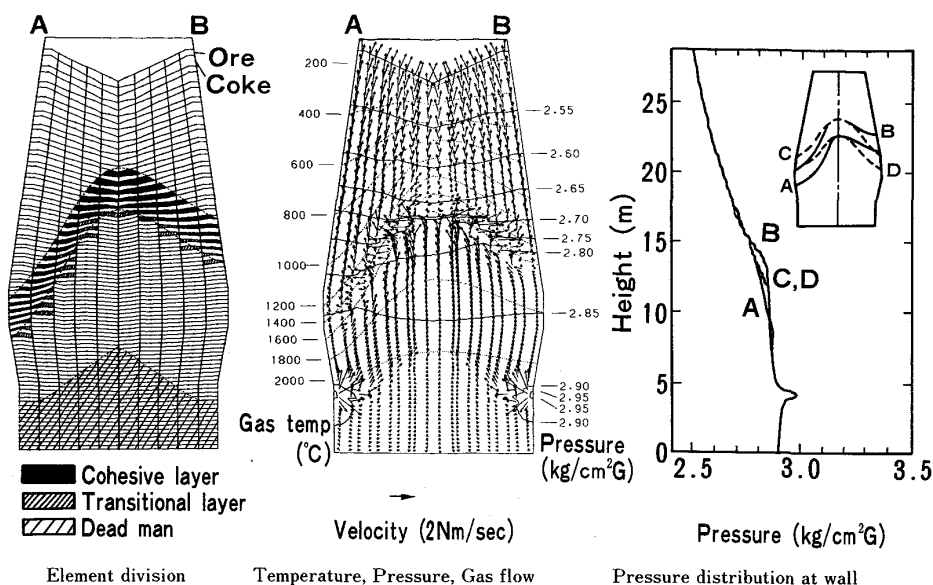


Fig. 5. Example of calculation result of 3-dimensional gas flow in blast furnace.

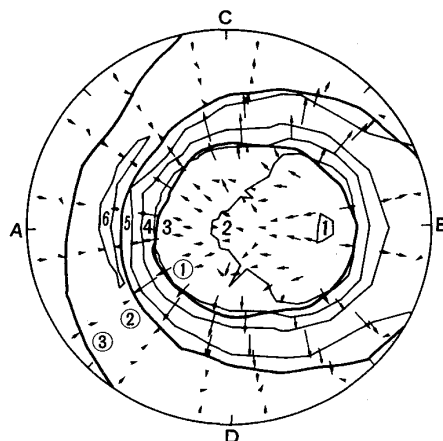
Fig. 5 に示す。

溶融帯形状の不均一性の影響が、圧力分布に現れており、この炉壁圧力の円周方向分布を、詳細に調べるため、ある高さの円周方向平均圧力（8方向の平均）から、各円周方向位置ごとの圧力の偏差を計算した。その結果を Fig. 4 に示す。溶融帯の上端および下端では差が小さいが、中間部では大きな差が生じており、溶融帯のレベルの高い方向(B)では、圧力が高く、反対方向では低くなっている、溶融帯下面の壁面位置の変化と明確に対応している。

溶融帯形状が対称な断面では、ガス流れも対称になっているが、非対称な断面では Fig. 5 に示すようにガス流れも非対称になっている。羽口レベルに近い下部では、炉心部で溶融帯の低い側から高い側へ (A→B) のガス流れがあり、溶融帯下面のすぐ近くでは逆に、スリット数の多い方向(A)へ流れ、また、溶融帯を通過した後は、反対方向(B)に流れているのがわかる。

溶融帯を水平方向に切断する面における等温線、等圧線、流速ベクトル(水平方向成分)分布を Fig. 6 に示す。この Fig. 6 で温度分布、すなわち溶融帯の偏りと圧力分布の偏りがよく対応しているのがわかる。中心部の滴下帯では水平方向の流速成分は小さいが、(B→A) 方向に流れており、溶融帯の領域では、いわゆるスリット流れが大きくなっている。溶融帯を通過し塊状帯に入ると、流れの方向が上向きに変わるので、水平方向成分は小さくなっている。この例から、炉内ガス流れが溶融帯の形状により三次元的に変化しており、圧力分布も対応して変化していることがわかる。

($N_r=5$) にすると、計算時間が長くなるので、($N_r=$



Temperature (°C)		Pressure (kgf/cm²G)	
Solid	Gas		
① 1400	1600	1:2.80	2:2.79
② 1200	1300	3:2.78	4:2.77
③ 1000	1000	5:2.76	6:2.75

Velocity → 1 Nm/s

Fig. 6. Temperature, pressure and velocity distribution on a horizontal plane with cohesive zone ($Z=15$ m).

2) で、同じ条件を与え計算を試みた。円周方向の圧力偏差を比較すると Fig. 4 のようになり、($N_r=5$) の結果とほぼ同じになる。また、ガス流速分布も、ほぼ同じ結果であつたので、以下の計算は、($N_r=2$) で行つた。

なお、要素数、節点数、計算時間 (CPU time) は、おのおの次のとおりであつた。

$N_r=2$, 要素数=1 008, 節点数=5 253,
CPU Time=37.6 min (IBM-3081 D)
$N_r=5$, 要素数=3 060, 節点数=13 547,
CPU Time=104.2 min (CRAY-1)

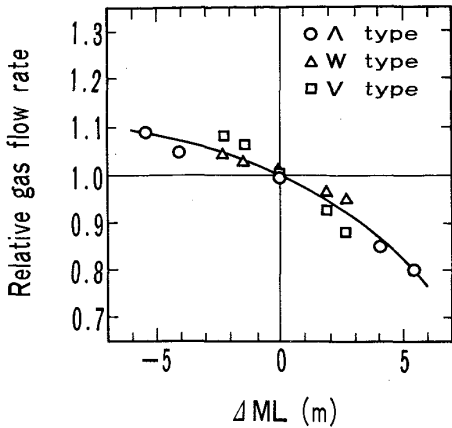


Fig. 7. Influence of melting level on gas flow rate in lumpy zone.

4. 考 察

溶融帯形状, 装入面形状, 鉍石層厚比, 羽口風量分布のおおのを単独に変化させた場合の炉壁部圧力とガス流量分布におよぼす影響について考察する。

4.1 溶融帯形状の影響 (変化幅±5 m)

Fig. 7 に各円周方向ごとの溶融帯レベルの平均値からの偏差 ΔML と, 対応する方向の相対ガス流量の塊状帯高さ方向平均値を示す。

溶融帯が, 平均レベルと一致する方向では, 流量も平均値に一致している。溶融帯レベルが高くなるにしたがい, ガス流量が減少している。このことは, 塊状帯では熱流比が大きくなり, 昇温が遅れ, やがて溶融レベルが低下する原因となると考えられる。溶融帯レベルを TDR (Time Domain Reflect meter) 法センサーで経時的に測定したところ, 周期変動をする場合があることが明らかになっている¹²⁾。このような現象が生ずるメカニズムとして, 上記のようなガス流分布の変化が考えられる。Fig. 7 には, W型, V型の場合の溶融レベル偏差と流量偏差も示したが, 逆V型と同様の傾向を示している。

Fig. 8 に, 円周方向の圧力変動 $V(= \sum \Delta P_{MLi}^2, \Delta P_{MLi}: i$ 方向の圧力と円周方向平均圧力の差) が, 最大となるレベルの各方向の圧力偏差 ΔP_{ML} と溶融レベル偏差 ΔML の関係を示す。

いずれの条件も, 溶融レベルが高いほど圧力が高くなっている。頂部が偏心している場合でも, 周辺部の位置が同一であれば, 圧力偏差は, 同様の値となることがわかる。同じ溶融帯レベル偏差に対し, 圧力偏差は, 逆V型→W型→V型と大きくなっている。これは, 装入物層

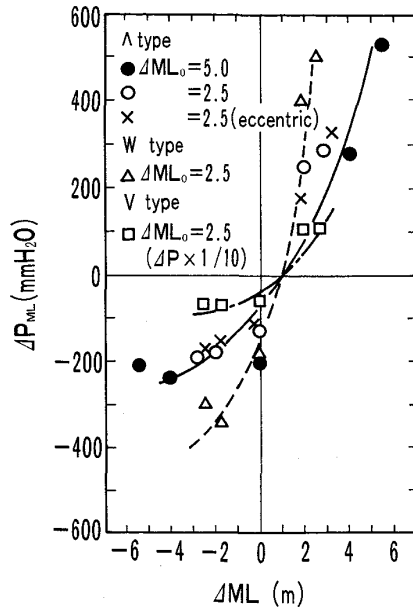


Fig. 8. Influence of melting level on pressure distribution.

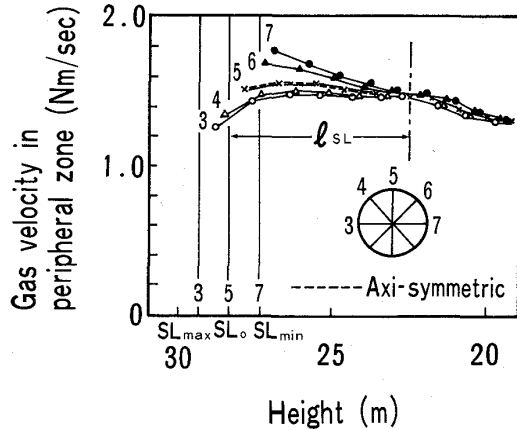


Fig. 9. Distribution of vertical component of gas velocity for circumferentially deviated stock line.

の中心方向への傾斜と, 仮定した各タイプの溶融帯形状の幾何学的関係から, この順に, スリット断面積の円周方向偏差, すなわち, 通気性の差が拡大するためと考えられる。

Fig. 8 を利用すると, 溶融帯のタイプがわかれば, 圧力偏差から溶融帯の偏差を推定することができる。Fig. 9 の圧力偏差の値は Table 1 に示した操業条件に対応したものであるが, 送風量, 平均 L_o/L_c , 炉頂圧等を補正すれば操業条件が異なる場合にも応用できる。

4.2 装入面の影響 (変化幅±2 m)

装入面が, 円周方向で傾斜している場合のガス流速の変化を Fig. 9 に示す。点線は装入面が円周方向で均一

の場合である。装入面の低い側で流速が大きくなっている。

Fig. 9 の場合、平均の装入面から 6 m 程度のレベルまで、ガス流速に円周方向偏りがみられる。この装入面がガス流れに影響する領域の平均の装入面からの長さを l_{SL} とすると、装入面の平均値からの最大偏差 ΔSL_0 との間には、ほぼ、 $l_{SL} = \text{炉口半径} + \Delta SL_0$ の関係が成立する。また、この範囲 l_{SL} における流量の平均値からの偏りを Fig. 10 に示す。装入面の ± 1 m の変化に対してガス流量は $\pm 5\%$ 変化するので、装入面の円周バランスを保つことが重要であることがわかる。

Fig. 11 に、圧力分布に対する影響を示す。装入面の低下量 ΔSL と圧力値の低下量 ΔP_{SL} は、正比例しており、この比例係数 $\Delta P_{SL} / \Delta SL$ は炉頂部の高さ方向圧力勾配と対応している。

4.3 鉱石層厚比 $L_o / (L_o + L_c)$ の影響 (変化幅 ± 0.2)

Fig. 12 に相対ガス流量の変化を示す。鉱石層厚比が大きくなるにしたがい、ガス流量が低下している。ガス流れは、鉱石層厚比からきまる通気抵抗分布に応じて変

化していると考えられるので、以下解析的にガス流分布を計算し、三次元ガス流れシミュレーションの結果と対比してみた。周辺部の無次元代表位置として、無次元半径 $= 0.894$ をとり、対応する鉱石層厚比 X_i 、鉱石、コークスの粒径 D_{oi}, D_{ci} から、鉱石層厚比を重みとした調和平均径 D_i を (2) 式から計算する。次に簡易的に¹⁵⁾ (3) 式で計算される圧力損失が、円周方向一定となるように、相対ガス流量 V_{Ri} を (4) 式により計算した。

$$\frac{1}{D^i} = \frac{X_i}{D_{oi}} + \frac{1-X_i}{D_{ci}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta P = K \frac{V_i^{1.7}}{D_i^{3.5}} \dots\dots\dots (3)$$

$$V_{Ri} = \frac{8D_i^{0.76}}{\sum_{i=1}^8 D_i^{0.76}} \dots\dots\dots (4)$$

計算結果を Fig. 12 に示すが、三次元シミュレーション結果とよく合っている。

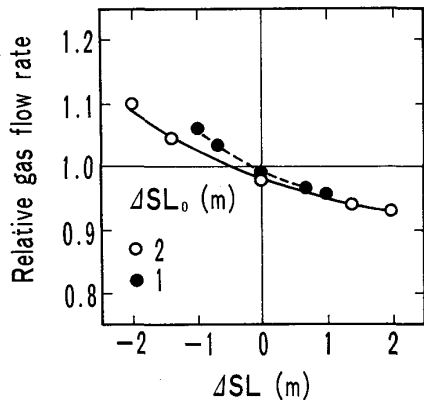


Fig. 10. Influence of S.L. on gas flow.

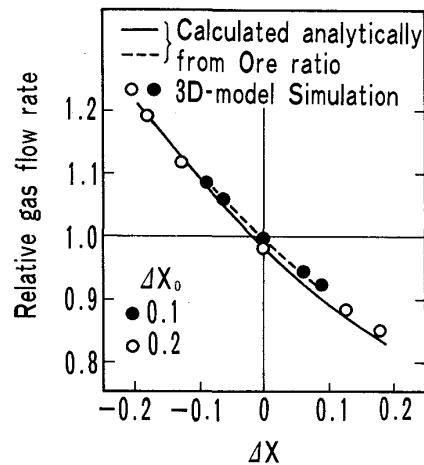


Fig. 12. Influence of ore layer thickness ratio on gas flow.

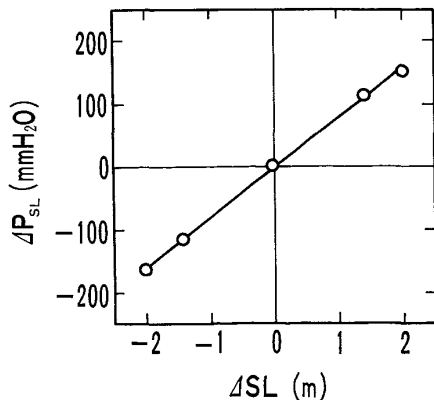


Fig. 11. Influence of S.L. on pressure distribution.

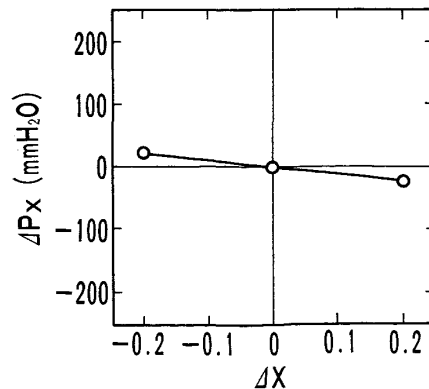


Fig. 13. Influence of ore ratio on pressure distribution.

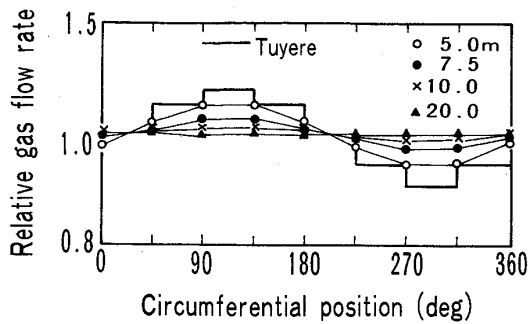


Fig. 14. Influence of gas flow rate distribution through tuyeres on gas flow in upper part.

ガス流が、通気抵抗分布に応じて分布していると考えよよいことがわかったが、Fig. 13 に示すように円周方向の圧力分布が、ほとんど生じていないことも、その裏づけといえる。円周方向の粒度偏析も層の通気抵抗を分布させる要因であるので、同様に取り扱うことができよう。

4.4 羽口風量分布の影響 (変化幅±20%)

Fig. 14 に、羽口先の風量を円周方向で最大±20%変化させた場合の周辺部相対ガス流量分布の高さ方向の変化を示す。ガス流分布は滴下帯で整流され、炉壁部で溶融帯の下面が存在する羽口上 10 m のレベルでは、羽口風量分布の影響は小さくなっている。溶融帯を通過し塊状帯に入ると、すでに述べたように、その場所における通気抵抗分布 (この例では均一) に従って分布されていることがわかる。

すなわち、羽口風量分布の変化は塊状帯の風量分布に影響を与えないが、羽口先のコークス消費量は、風量に比例して変化するので、塊状帯の降下速度も変化すると考えられ、羽口風量により塊状帯の熱流比分布が制御できると考えられる。

4.5 羽口圧損の役割

これまでの計算では、すべて、境界条件として、炉頂圧を装入面で与え、羽口流入面の流速を指定していたが、羽口圧損の効果を検討するために、羽口流入面の前に羽口に対応する要素を追加し、その上流で、送風圧を円周方向で一定として与えるようにした。羽口要素の圧力損失が通常高炉の数値 0.4 kgf/cm^2 の場合と、圧力損失が無い場合について、炉内のガス流分布の大きな支配要因である溶融帯形状の偏差が、羽口風量分布に与える影響を調べた。

Fig. 15 に計算条件として与えた溶融帯下面レベルの位置の変化と、計算結果である羽口流入風量の相対値の変化を示す。羽口圧損が無い場合、溶融帯レベルの低い

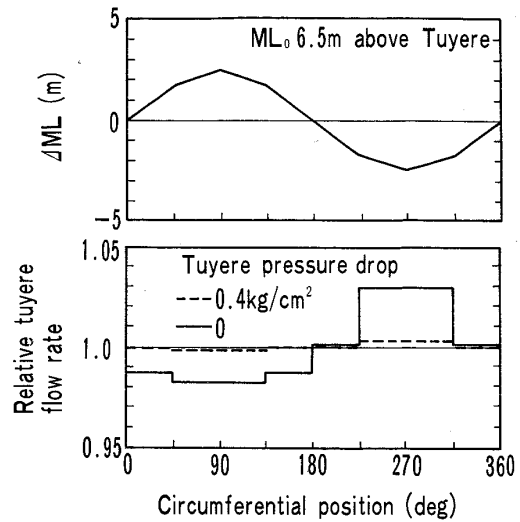


Fig. 15. Effect of tuyere pressure drop on tuyere flow rate distribution.

側、すなわち、コークススリットが多く、溶融帯の通気抵抗の小さい側の流量が大きくなっている。この例では、溶融レベル偏差 $\pm 2.5 \text{ m}$ に対し、風量偏差 $\pm 2.5\%$ であるが、羽口圧損 $= 0.4 \text{ kgf/cm}^2$ では、 $\pm 0.25\%$ となり無視できる。すなわち、羽口の圧損が大きいと、整流作用を生じ、炉内状況の変化により、羽口風量分布が変化して、炉内のアンバランスがより大きくなることを防ぎ、炉内円周バランスを確保する効果をもっていることがわかる。

5. 実測値との対比

溶融帯レベルと炉壁圧力分布を4方向で同時に測定し、計算値と対比した。溶融帯レベルは、TDR 法センサーにより測定した。結果を Fig. 16 に示す。円周方向溶融レベルの平均からの偏差 ΔML と、溶融レベルが円周方向でほぼ均一な時の圧力値からの対応する方向の圧力値の差を示す。圧力値についても、4方向の平均値からの偏差を用いる予定であったが、方向によっては、測定孔のつまり等のために、測定値を用いることが不可能であったので、このような処理をした。計算については、センサーケーブルの溶融温度がほぼ 1300°C であるので、 $1100 \sim 1400^\circ\text{C}$ まで、3 m で昇温すると仮定して、2 m 上のレベルを溶融帯上面、1 m 下を下面として計算した。なお、装入面、および、 L_o/L_c は、サウンディング装置で測定したが、円周方向でほぼ一定であった。実測値は、おのおの 1 h 平均値である。

溶融帯の上下4段のレベルについて、対比したが、各段ともかなり良い対応が得られている。

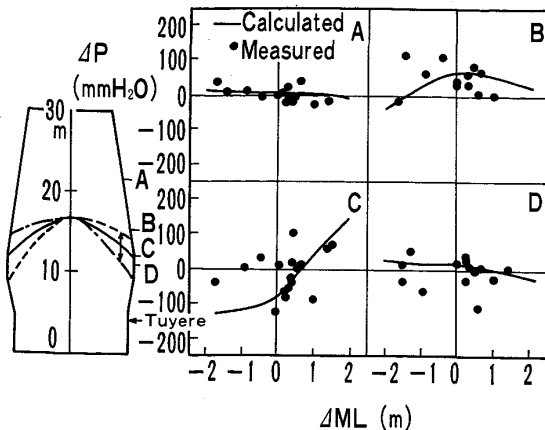


Fig. 16. Influence of peripheral melting level on wallside pressure distribution.

羽口ごと風量分布を同時に測定したが、風量は、溶融帯形状の変化に影響されず各羽口ともに一定であった。このことは、計算から予想されることとよく対応している。

6. 結 言

高炉内のガス流れを解析する上で、考慮すべき現象を検討し、それらを考慮できる高炉三次元ガス流れモデルを作成した。本モデルにより円周方向で変化する可能性のある装入面形状、 L_o/L_c 分布、溶融帯形状、羽口風量分布の炉内ガス流れ、圧力分布におよぼす影響を解析するとともに、実測値と比較し、次のことが明らかになった。

(1) 装入面が高い側で、炉壁部圧力が上昇し、ガス流速は減少する。

(2) 鉱石比が変化した場合、流速分布は鉱石比からきまる通気抵抗分布に応じて変化しており、圧力分布は円周方向にほぼ一定である。

(3) 溶融レベルが変化した場合、圧力偏差の最大となる高さは、溶融帯の断面平均レベルに対応しており、そのレベルでは溶融レベルの高い側で、圧力も高くなっている。

(4) 塊状帯のガス流量は、溶融レベルの高い側で低下

している。これは、同じ側の熱流比が大きくなり、昇温が遅れ、やがて溶融レベルが低下する原因になると考えられ、溶融レベルの周期変動のメカニズムを示唆している。

(5) 羽口風量の不均一分布は、滴下帯で整流されるので、溶融帯を通つた後の塊状帯には、その影響は現れない。一方コークス消費量は、風量に比例して変化し、塊状帯の装入物降下速度も変化するので、羽口風量により塊状帯の熱流比を制御できると考えられる。

(6) 羽口圧損は、炉内状況の変化が、羽口風量分布を変化させることを防いでおり、炉内円周バランスの確保に役立っている。

(7) 実炉において、溶融帯形状と圧力分布を同時に計測し、計算結果と比較したところ、ほぼ満足すべき結果が得られ、本数学モデルによる解析の妥当性を確認することができた。

文 献

- 1) J. RADESTOCK and R. JESCHAR: *Stahl Eisen*, **90** (1970), p. 1249
- 2) 桑原 守, 鞭 巖: *鉄と鋼*, **62** (1976), p. 463
- 3) 羽田野道春, 栗田興一: *鉄と鋼*, **62** (1976), p. 953
- 4) 羽田野道春, 栗田興一, 岡根幸司: *鉄と鋼*, **63** (1977), p. 217
- 5) 大野陽太郎, M. SCHNEIDER: *鉄と鋼*, **64** (1978), S31
- 6) 八木順一郎, 武田幹治, 大森康男: *鉄と鋼*, **66** (1980), p. 1888
- 7) 大野陽太郎, 山田 裕, 近藤国弘, 丹羽康夫, 炭竈隆志, 木村康一: *鉄と鋼*, **67** (1981), S71
- 8) M.A. PROSPER and J. SZEKELY: *Ironmaking Steel making*, **5** (1979), p. 209
- 9) 羽田野道春, 梶原義雄, 山県千里, 狩谷順二, 山西逸生, 山本章生: *鉄と鋼*, **68** (1982), S116
- 10) 大塚 一, 一関貞幸, 沢井敏明, 原 義明, 中川美男, 須沢昭和, 木村春男: *鉄と鋼*, **72** (1986), S6
- 11) 石岡信雄, 坂本愛一郎, 津田昭弘, 重松徳昭, 山口一良, 織田博史, 阿由葉善作, 野宮好堯: *鉄と鋼*, **72** (1986), S916
- 12) H. SAITO, Y. OHNO, Y. YAMADA and T. TAKEBE: *Ironmaking Proc.*, **45** (1986), p. 373
- 13) 大野陽太郎, 近藤国弘: *鉄と鋼*, **73** (1987), p. 2028
- 14) H. NISHIO, Y. YAMAOKA, N. NAKANO, H. YANAKA and K. SHIOHARA: *Ironmaking Proc.*, **41** (1982), p. 90
- 15) 児玉惟孝, 堀尾竹弘, 肥田行博: *鉄と鋼*, **52** (1966), p. 295