

技術報告

高炉炉頂プロフィール計を活用した装入物分布
モデルによる炉内状態の検討栗 田 興 一*・村 井 達 典*²Estimation of the Inner States by the Use of the Burden Distribution
Model Based on the Profile Meter Measurements at Blast Furnace

Koichi KURITA and Tatsunori MURAI

Synopsis :

Based on the results of profile meter measurements in the blast furnace, an advanced burden distribution model was developed. The simulated results were used as input data to the two dimensional blast furnace model, which was developed by considering radial distributions of gas flow, heat transfer, and reactions.

The effects of burden distribution on the condition inside of blast furnace were numerically studied. The burden distribution investigated was the radial distribution of ore to coke ratio (O/C) and the radial distribution of particle diameter.

It was clarified that the condition inside of blast furnace was strongly affected by the radial distribution of O/C. For example, by moving the armor position of the ore to the furnace center, O/C at the wall was decreased and the shape of the cohesive zone was changed from a inverted V type to a W type. The changes in gas composition and temperature distributions at the top and also in gas pressure at the furnace wall in the stack, which were caused by O/C distribution change, were in good agreement with the simulated results.

Key words : blast furnace ; burden distribution ; profile meter ; simulation model ; ore to coke ratio ; cohesive zone ; armor position.

1. 緒 言

高炉の装入物分布制御は、高炉の炉内状態を制御する最も重要な因子の一つである。このため、低燃料比操業あるいは炉体保護等の操業目的に応じて、分布制御が試みられてきた。特に最近の減産操業下においては、シャフト下段、炉腹中段等の炉壁部温度低下に見られる不活性帯生成を防止するため、装入物分布調整により、周辺流の確保を試みている¹⁾。

このような、装入物分布調整の重要性に鑑み、従来、ホッパー内の装入物の流れ²⁾、ベルからの落下軌跡³⁾、層頂炉中間部においては、コークス層の層内傾斜角の減少を表すコークス層崩れ⁴⁾、さらに、炉芯部においては、鉬石装入により押し流されたコークスが炉芯部に堆積する現象を表す炉芯部層内流れ込み^{5)~7)}等、装入物分布形成要因についての検討が進められている。しかしこれに

よつて、炉内状態とりわけ融着帯形状がどのような影響を受けるかについては、まだ十分検討されているとは言えない。

そこで、著者らは、ベル・アーマータップの高炉のプロフィール計実測結果に基づき、装入物分布の推定法を検討した上で、装入物分布（特に、鉬石/コークス比の分布、粒度分布）が炉内状態に与える影響について、高炉 2 次元数式モデル⁸⁾を用いて検討し、実炉実測結果と比較した。

2. 装入物分布モデルの概要

実高炉では装入物は層状に装入されるが、その装入物の半径方向分布を求めるには、層頂形状の把握が不可欠である。層頂形状把握のために小倉第 2 高炉ではプロフィール計（1 点ずつの計 6 点順次計測式で、計測時間 3 min 44 s を要している。同時計測でないための誤差と

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 23 日受付 (Received Mar. 23, 1987)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)小倉製鉄所 (Kokura Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

して、測定時間中の荷下がり量および炉芯部層内流れ込み等が考えられるが、ここでは、検尺棒から求めた代表荷下がり速度を用いて、測定時間中の荷下がり量の誤差のみを、補正した.)を使用している。このプロフィール計の計測結果を解析することにより、アーマー位置変更による装入物層頂形状変化および送風量と半径方向層頂傾斜角分布の関係等を定式化し、この関係から幾何学的な層頂形状を推定した。さらに、層頂での鉱石およびコークス層の幾何学的な形状を、層内におけるコークス層崩れ⁴⁾および炉芯への流れ込みの影響^{5)~7)}を考慮して、補正することにより、半径方向装入物分布を推定した。

2.1 アーマー設定位置と山の頂点位置

小倉第2高炉の填充時に調査した層頂形状と、アーマー設定位置の関係を Fig. 1 に示す。図中、左側が鉱石、右側がコークスの層頂形状を示す。図より次のことがわ

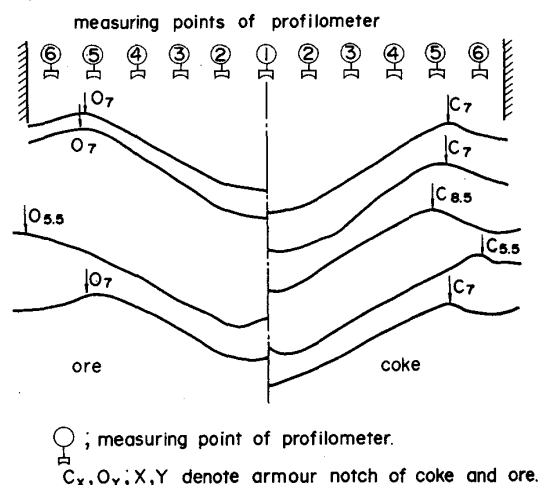


Fig. 1. Stock line profile measured at the filling of blast furnace.

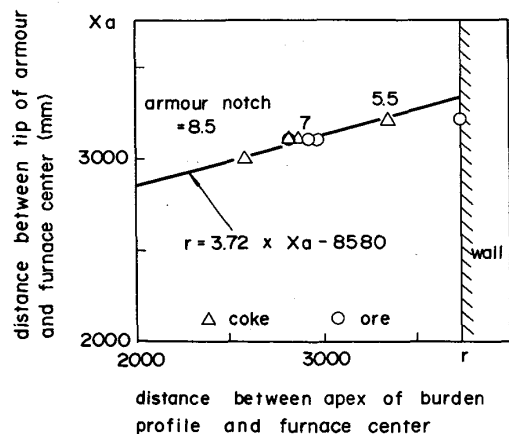


Fig. 2. Relationship between armour position and apex of burden profile.

かる。

(1)アーマー押出しにより、山の頂点位置は、炉芯側に移動する。

(2)アーマー設定位置 C_7 または O_7 の時の山の頂点位置(半径方向)はストックラインの高さが変化しても、ほとんど変化しない。

このアーマー設定位置と山の頂点位置との関係をまとめると、Fig. 2 のようになる。すなわち、アーマー押出しにより、山の頂点位置は、ほぼ比例的に炉芯側に移動することが分かる。本検討では、この関係を、次のように近似した。

落下位置 = $3.72 \times (\text{アーマー先端位置}) - 8580$ (mm)
ただし

アーマー先端位置(内、外側アーマー平均) = $-69.3 \times (\text{アーマーノッチ}) + 3570$ (mm)

アーマーノッチ; アーマー設定位置を指標化して表した数、押し出されるほどアーマーノッチは大きくなる。
($C_X O_Y$ では X, Y がそれぞれコークスおよび鉱石のアーマーノッチを示す。)

2.2 層頂傾斜角におよぼす要因の検討

プロフィール計より得られた、層頂形状実測結果から、炉内半径方向位置での層頂傾斜角と、送風量、装入量、アーマー設定位置との関係を整理検討した。Fig. 3 にその結果を示す。

なお、層頂傾斜角はプロフィール計の各測定ポイント(Fig. 1) 間の層頂の勾配から逆 $\tan$ をとって求め、角度の符号は、炉芯側が下がる方向の傾斜角をプラスとした。

(1)送風量の影響

送風量と層頂傾斜角との関係については、すでに杉山らの実験式⁹⁾および西尾らの理論式¹⁰⁾が報告されているが、ここでは、プロフィール計の実測結果に基づき、送風量と層頂傾斜角との関係を Table 1 のように、2次の回帰式として表し、Fig. 3 中に実線および破線で示した。なお、最も炉壁寄りの傾斜角は、装入時の装入物の落下衝撃の影響を受けているため、一つ炉芯寄りの送

Table 1. Slope angle of ore and coke.

		Center 0 mm ~ 672	672 ~ 1344	1344 ~ 2014	2014 ~ 2688	Wall 2688 ~ 3360 mm
Ore	$A \times 10^{-6}$	-3.609	-1.714	-3.280	-1.549	-1.549
	$B \times 10^{-3}$	1.203	3.193	6.120	0.5961	0.5961
	C	11.61	29.06	28.55	29.53	29.53
Coke	$A \times 10^{-6}$	-1.979	-2.156	-1.089	-4.079	-4.079
	$B \times 10^{-3}$	2.892	3.862	1.349	9.249	9.249
	C	18.11	30.25	32.59	28.40	28.40

Slope angle = $A \cdot V_B^2 + B \cdot V_B + C$

V_B : Blast volume (Nm^3/min) Diameter of throat = 7.5 m

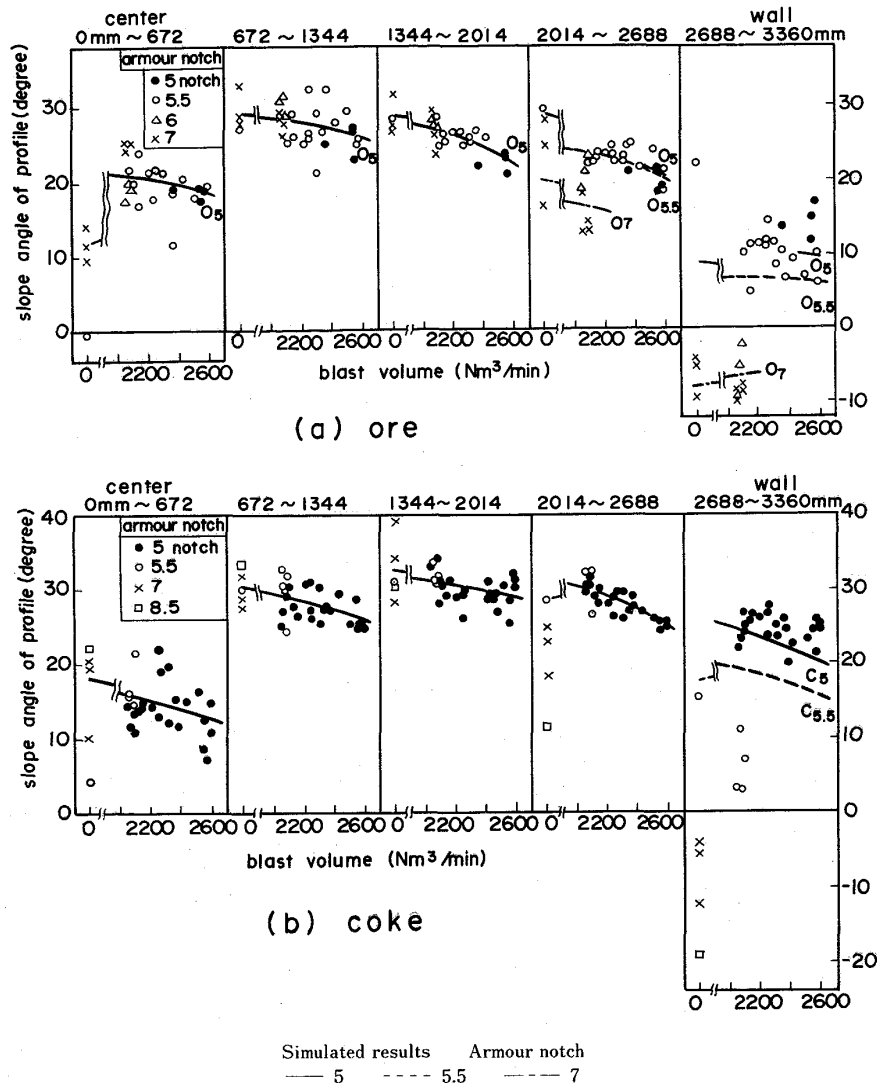


Fig. 3. Relationship between slope angle of stock line profile and blast volume.

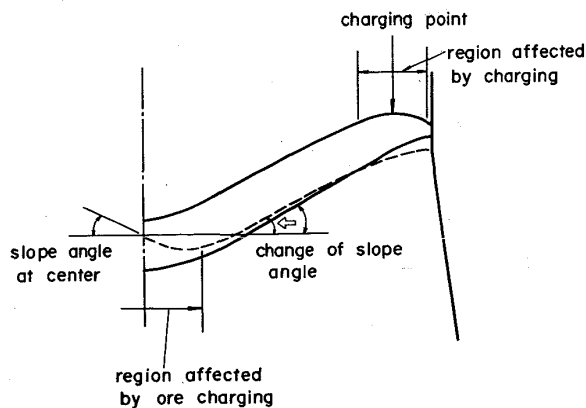


Fig. 4. Schematic diagram of layer construction.

風量と層頂傾斜角との関係で代用した。

(2) 装入物落下衝撃の影響

装入時に装入物が衝突する層頂面位置～炉壁部に、

Fig. 4 に示すように、層頂傾斜角が連続的に減少する落下衝撃影響域が形成される。落下位置が Fig. 1 の⑤-⑥ポイント間の落下位置 $C_{5.5}$ から C_7 へ移動するに伴い、Fig. 3 に示すように、落下衝撃影響域の存在により、落下位置を含まない④-⑤ポイント間でも層頂傾斜角が徐々に減少し、 C_7 または O_7 における⑤-⑥ポイント間の傾斜角は、ついにはマイナスとなった。すなわち、炉壁側に向かって層頂面が低下した。

シミュレーションでは、このように装入物が衝突する層頂面の位置を境に、それより炉心側では、層頂傾斜角が④-⑤ポイント間での層頂傾斜角から徐々にゼロとなり、逆に炉壁側では、層頂傾斜角がゼロから絶対値が④-⑤ポイントの層頂傾斜角と同じマイナスの層頂傾斜角に連続的に変化するとした。このように装入物が衝突する位置近傍で、層頂傾斜角が連続的に減少する領域を、落下衝撃影響域とした。

この落下衝撃影響域を、層頂傾斜角のシミュレーション結果 (Fig. 3 の実線および破線) が実測結果 (プロット点) とほぼ一致するように求め、鉱石で約 0.7 m, コークスで約 0.4 m を得た。しかし、コークスについては、アーマーを押し出した時の ($C_5 \rightarrow C_{8.5}$), 炉壁側層頂傾斜角の減少は約 40° と大きく、これを完全に説明するには、さらに検討が必要である。

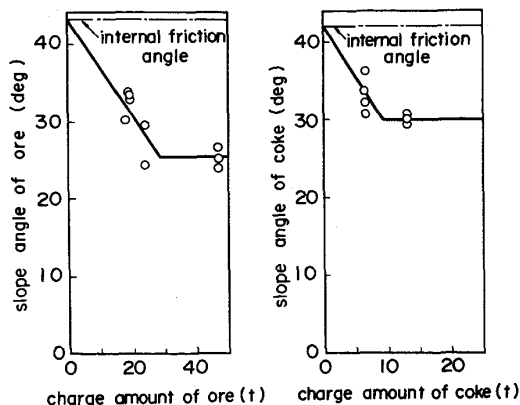
(3) 装入量の影響

成田ら⁶⁾はコークスの装入量を減少するにつれて、コークス層の堆積角が増加することを報告している。Fig. 5 は小倉 2BF においてプロフィール計で実測した炉中間部の傾斜であるが、鉱石、コークスともに装入量の減少により層頂傾斜角が増加する傾向を示している。すなわち、鉱石装入量約 30 t コークス装入量約 10 t を境に、それ以下に装入量を減少させると、その装入した層の傾斜角が静止安息角に近づく結果が得られた。

2.3 コークス層崩れ

層頂のコークス層は、その上部に装入された鉱石層の影響によつて、コークス層崩れを起こす⁴⁾。このため、コークス層のプロフィールは、Fig. 4 の実線 (層頂プロフィール実測結果) から破線のように変化する。この時の崩れる前のコークス層の傾斜角は炉中間部で $32\text{--}39^\circ$ であるのに対し、崩れた後の傾斜角は $28\text{--}32^\circ$ と低くなる。このコークスの崩れるパターンはガス流の有無によつて大きく変わることはないといわれている⁴⁾。

これらの知見に基づき、本検討では炉中間部での層内コークス傾斜角を層頂コークス傾斜角の 0.8 倍にすることにより、コークス層崩れを表現した。炉芯部でのコークス層崩れは炉芯部層内流れ込みとして次節で取り扱う。



Diameter of throat=7.5 m

Fig. 5. Relationship between slope angle and charge amount.

2.4 炉芯部層内流れ込み

炉芯の層内流れ込みは、鹿島第 1 高炉の填充時に磁気センサーを用いて計測した混合層測定結果を⁷⁾ 基準に、層内傾斜角を次のように設定した。

その炉芯部の流れ込み領域内では Fig. 3 に示すように、層内傾斜角は、もとの層頂傾斜角から、炉芯部に向かつて大きく減少する。この層頂傾斜角から層内傾斜角への変化は炉芯部で最も大きくなるので、流れ込み影響域を、鹿島第 1 高炉の填充時の実測結果をもとに、炉芯から約 2 m の領域とし、層内傾斜角を炉芯からの距離の関数として次式で与えた。

$$\text{層内傾斜角} = ((1 - C) \times (\text{炉芯からの距離(m)}) / 2 \text{ m} + C) \times \text{層頂傾斜角}$$

ただし、炉芯からの距離 < 2 m

層頂傾斜角から層内傾斜角への変化割合 ($= C$) は鉱石装入量が多いほど大となるので、この傾向を次式のように鉱石装入量の関数として与えた。

$$C = 1 - (\text{鉱石装入量}(\text{kg/m}^2)) / 1020 * \times \text{係数}$$

$$1020 * = \text{鹿島第 1 高炉実績鉱石装入量}(\text{kg/m}^2)$$

$$\text{係数} = 1.25$$

2.5 装入物分布計算フローチャート

以上の知見を用い、Fig. 6 に示すフローに従つて装入物分布を推定した。なお、半径方向の粒度分布は、填充時の粒度分布測定結果をもとに、2 次曲線近似で与え、この粒度分布から、山田らの方法¹¹⁾に従つて、空隙率

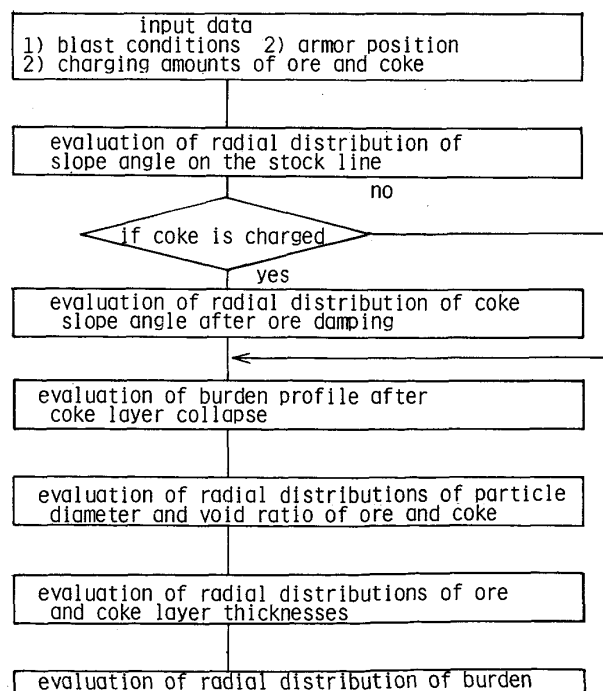


Fig. 6. Flow chart of calculated scheme of burden distribution model.

を推定した。本検討に用いた装入物の層頂半径方向の粒度および空隙率推定結果を Fig. 7 に示す。

2.6 装入物分布推定結果

(1) コークス層崩れの影響

プロフィール計による層頂傾斜角をそのまま用いて、径方向の鉱石/コークス比の分布を推定すると、Fig. 8 a) の実線のような結果が得られる。これに対し、炉中間部コークス層崩れを考慮すると、同図の破線のように変化し、炉芯部の鉱石/コークス比が低下する。

(2) 炉芯部層内流れ込みの影響

さらに炉芯部での層内流れ込みを考慮すると、Fig. 8 b) の実線から破線のように変化し、炉芯部での鉱石/コークス比がさらに減少する。

(3) アーマー設定位置の影響

アーマー設定位置を変更した場合には、Fig. 8 c) に示すように、鉱石アーマーノッチの増加により、炉壁側の鉱石/コークス比が多くなり、炉壁側の鉱石/コークス比が減少する。

以上のように、炉芯側の鉱石/コークス比には、コークス層崩れ、および、炉芯部における層内流れ込みが、大きく影響し、炉中間部および炉壁側の鉱石/コークス比には、アーマー設定位置が大きく影響することが分かる。

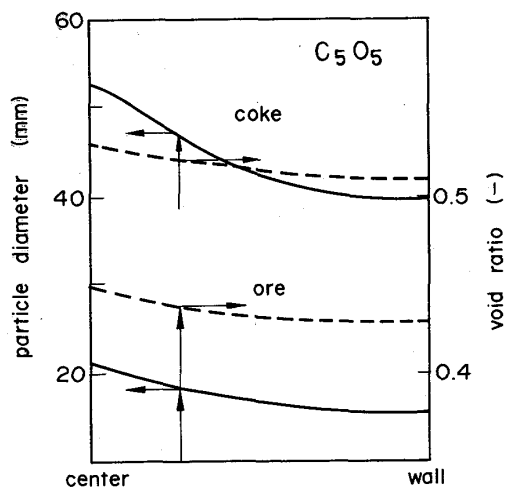


Fig. 7. Radial distributions of particle diameter and void ratio.

クス層崩れ、および、炉芯部における層内流れ込みが、大きく影響し、炉中間部および炉壁側の鉱石/コークス比には、アーマー設定位置が大きく影響することが分かる。

3. 高炉 2 次元数式モデルによるシミュレーション方法

高炉 2 次元数式モデルによるシミュレーション方法⁸⁾を以下に示す。

(1) 装入条件を入力条件として、装入物分布モデルにより、層頂での鉱石/コークス比、粒度、空隙率の半径方向分布を求める。

(2) 送風条件を入力条件として、初期値として仮定した炉内状態のもとで、高炉内ガス流れモデル¹²⁾を用いてガスの流線、流速、ガス圧力分布を求める。

(3) 固体の流線を、シャフト部はピストン流れ、ベリールおよびボッシュ部はポテンシャル流れを仮定する。さらに、液体の流線は、炉体形状に沿うと仮定する。

(4) ガス、固体、液体の各流線に沿って、各相の熱および反応を同時解析し、炉内状態を算出する。

(5) 上記、炉内状態が初期値として仮定した炉内状態と一致するまで初期値を変更しながら、装入物分布、ガス流れ、熱、反応計算を繰り返す。

(6) 定常的に一致した解が得られたところで、計算結果をプリントし、作画処理する。

4. 装入物分布の影響の検討

以上述べた、装入物分布モデルによる推定結果を、高炉 2 次元数式モデルに入力することにより、炉内状態を推定する。

4.1 鉱石/コークス比の分布の影響検討

(1) 固体温度分布

鉱石アーマーを押し出すにつれ ($C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$)、炉壁側の鉱石/コークス比が減少し、炉中間部で増加する。この鉱石/コークス比の分布変化により、炉壁側の温度

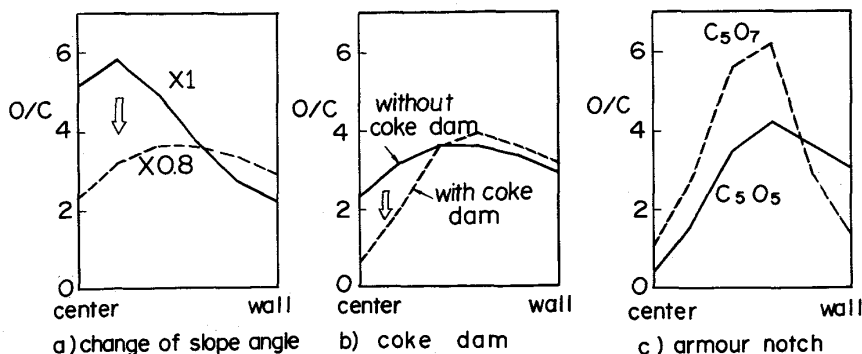


Fig. 8. Various effects on the radial distribution of O/C.

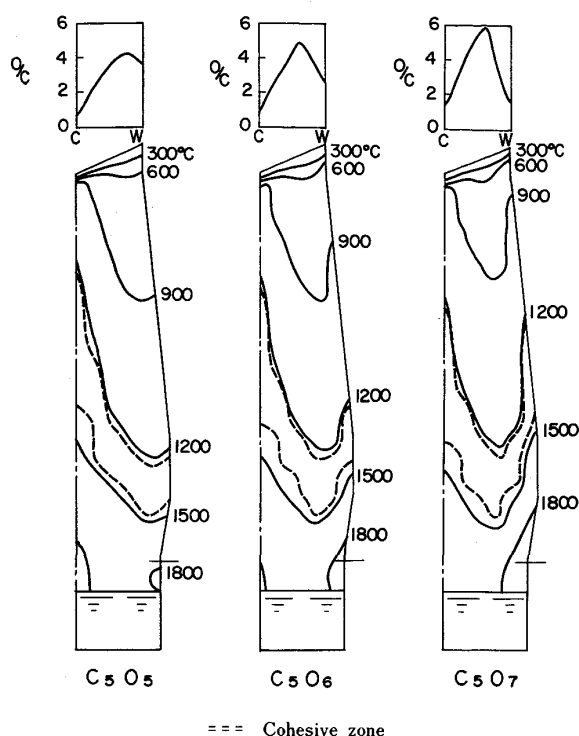


Fig. 9. Influence of O/C distribution on the distribution of solid temperature.

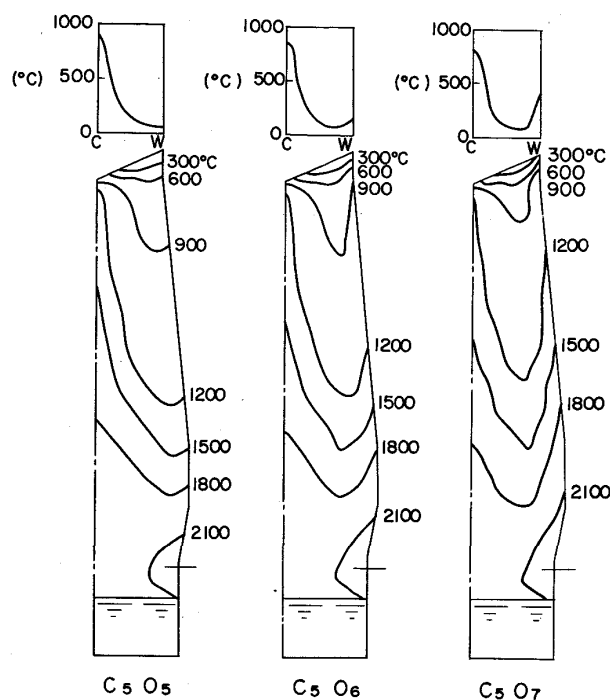


Fig. 11. Influence of O/C distribution on the distribution of gas temperature.

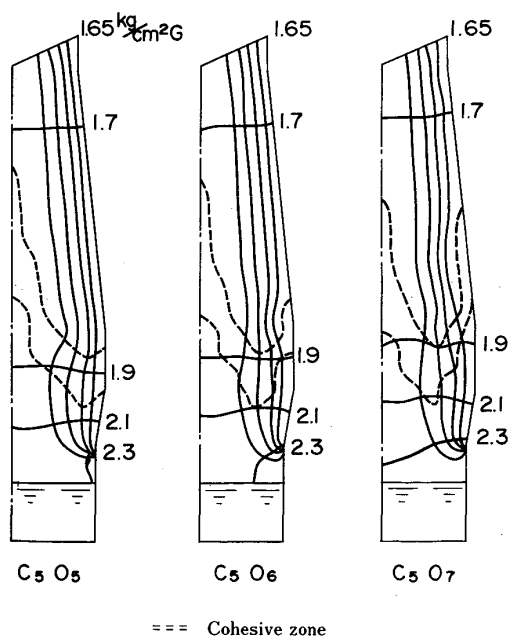


Fig. 10. Influence of O/C distribution on gas flow line and iso-bar line.

が上昇し、炉中間部の温度が低下するため、融着帯の形状は、逆V型から、極端なW型へと変化する (Fig. 9).

(2) ガス流れ分布

融着帯形状が逆V型の場合には、炉芯から炉壁に向かう流れが強くなっており、逆に、W型になると、融着帯上面で、炉中間部へガス流れが集中する現象が見れる

(Fig. 10).

(3) ガス温度分布

炉中間部の鉱石/コークス比が上昇するに従い ($C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$), ガス温度分布も、炉芯および炉中間部で低下し、炉壁部で上昇する (Fig. 11). 層頂の温度分布は、炉内の温度を反映し、 $C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$ となるに従い、炉芯側で低下し、炉壁側で上昇する。

(4) CO, CO₂ 分布

CO, CO₂ モル分布は、おのおの Fig. 12, に示すごとく、ほぼ炉内のガス温度分布に対応した分布を示す。この結果、層頂半径方向分布で見ると、 $C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$ に変化させるに従い、CO モル%分布は、ガス温度分布と同様の傾向を示す。

(5) 実績との対比

小倉第2高炉の層頂プローブは、層頂面上に水平に挿入される構造で、炉内状態を間接的に測定する装置である。

これらの実測結果と、シミュレーション結果とを比較し、Fig. 13 に示す。すなわち、 $C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$ に変化させ、炉壁側の鉱石/コークス比を低下させることにより、炉壁側で CO% が上昇し、CO₂% が低下する。炉芯側では、逆に、CO% が低下し、CO₂% が上昇する。これらの傾向は、シミュレーション結果と、実測結果とで定性的に一致しており、モデルの妥当性を示していると考えられ

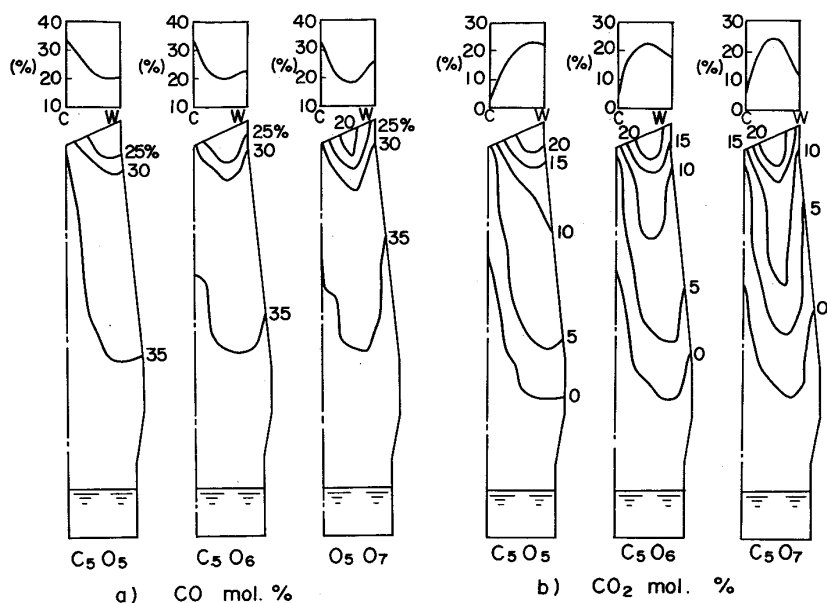


Fig. 12. Influence of O/C distribution on the distribution of CO mol% and CO₂ mol%.

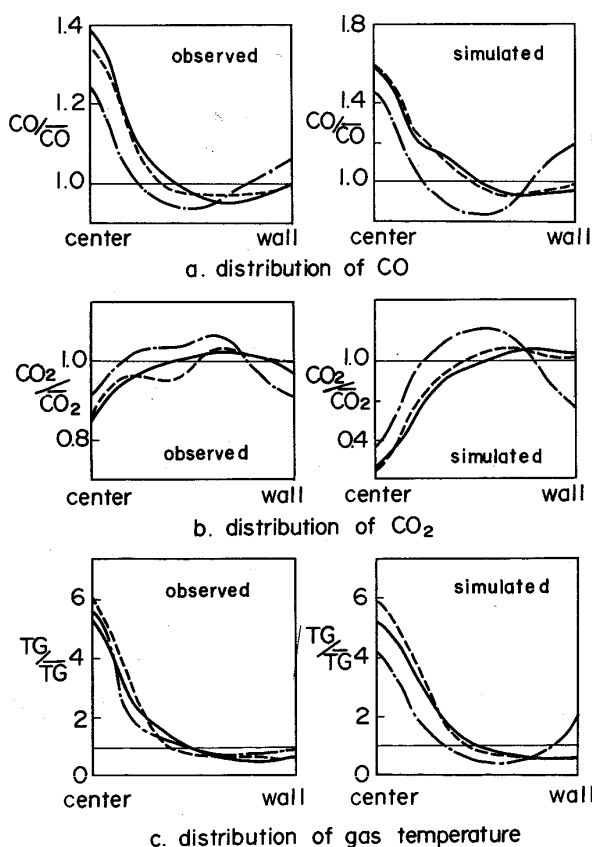


Fig. 13. Comparison between observed results and simulated results above the stock line.

る。

また、この結果は、ガス温度分布の変化より、むしろ、ガス組成分布の変化の方が、鉱石/コークス比の分布の変化をより反映していることを示している。

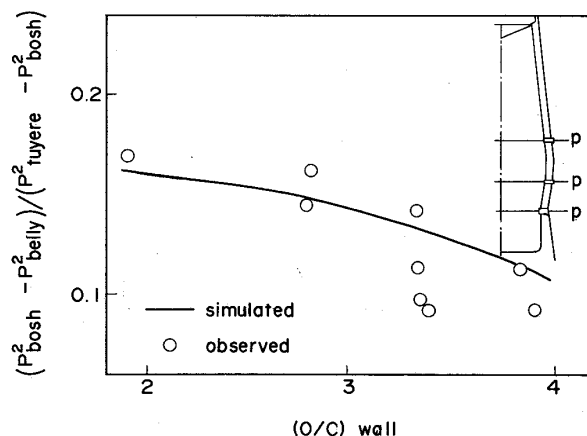


Fig. 14. Relationship between (O/C)_{wall} and ratio of pressure drop $(P^2_{bosh} - P^2_{belly}) / (P^2_{tuyere} - P^2_{bosh})$.

さらに、炉上部と炉下部の圧力損失比（融着帯の高さ位置に比例して変化）は、半径方向に3分割した時の炉壁側領域の鉱石/コークス比の低下とともに上昇する (Fig. 14)。すなわち、炉壁側領域の鉱石/コークス比の低下により、通気性の悪い融着帯が、炉上部に移動していることを示している。この結果は、シミュレーション結果とも一致した。

4.2 粒度分布の影響検討

粒径を変化させた場合の極端な例として、半径方向粒度分布がフラットな場合と、炉芯側で大きい場合とを比較する (Fig. 15)。コークス粒径を炉芯側で大きくした場合、炉芯側でのガス流速上昇効果により、ガス温度も炉芯側で上昇する。この影響により、融着帯も炉芯側で上昇する。炉芯側で、ガス流速が上昇する半面、炉壁側でのガス流速が低下するため、炉壁側で還元遅れが生じ

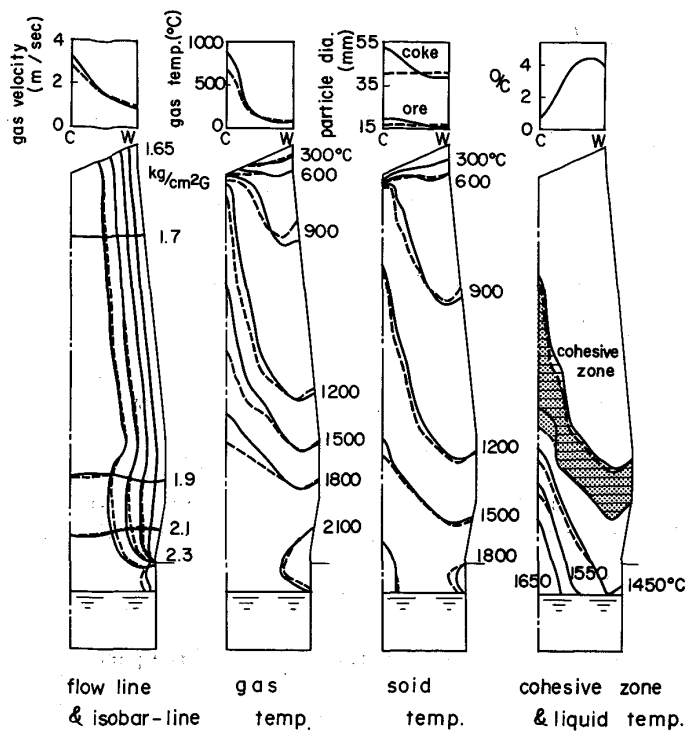


Fig. 15. Effect of the radial distribution of particle diameter on the distribution of gas flow, gas and solid temperature and cohesive zone profile.

る。この結果、ガス組成分布は、炉芯で CO% が上昇し、CO₂% は逆に低下する。

Fig. 9 と Fig. 15 の計算結果を比較することより、鉱石/コークス比の分布が炉内状態に与える影響の方が、粒度分布が炉内状態に与える影響より大きいと推定される。

5. 結 言

実炉における層頂プロフィール計の計測結果をもとに、装入物分布モデルを作成し、そのモデルによつて推定した層頂での半径方向鉱石/コークス比、粒度、空隙

率分布を高炉モデルへ入力することにより高炉のアーマー設定位置および装入物粒径分布が、高炉融着帯および炉内状態におよぼす影響を検討し、次の結果が判明した。

(1) 層頂面上の装入物落下位置～炉壁部に、落下衝撃影響域が現れることを明らかにするとともに、送風量の影響を考慮した装入物分布モデルを作成した。

(2) 高炉 2 次元数式モデルに上記装入物分布解析結果を入力し、次のことが判明した。

a. 鉱石アーマーを押し出し、炉壁側の鉱石/コークス比を低下させると、融着帯形状は、逆 V 型から極端な W 型分布に変化する。この結果、炉壁側温度の上昇、および、炉中間部温度の低下を招く。

b. 層頂での半径方向ガス温度、組成に関するシミュレーション結果と、層頂プローブ測定結果とは傾向的に一致し、シミュレーション結果の妥当性を確認した。

文 献

- 1) 新日本製鉄(株), 日本鋼管(株), (株)神戸製鋼所, 日新製鋼(株)(私信) 1983 年 10 月
- 2) 福武 剛, 藤田 勉, 田中康夫: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p. 405
- 3) G. HEYNERT, F. TOUSSAINTJUN, J. WILLEMS and G. QUADE: Stahl Eisen, 80 (1960), p. 473
- 4) 奥野嘉雄, 国友和也, 入田俊幸, 松崎真六: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 783
- 5) 新日本製鉄(株)(私信) 1971 年 9 月
- 6) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲市, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 358
- 7) 宮崎富夫, 梶原義雅, 酒井俊彦, 神保高生, 射場 毅, 山西逸生: 鉄と鋼, 67 (1981), S 18
- 8) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1898
- 9) 杉山 喬, 中村正和, 鵜野建夫, 原 行明: 鉄と鋼, 62 (1976), S 39
- 10) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1878
- 11) 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鉄郎, 田口整司: 川崎製鉄技報, 6 (1974), p. 16
- 12) 羽田野道春, 栗田興一, 岡根幸司: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 217