

論 文

UDC 669.162.283 : 669.162.263.4

融着帯形状推定モデルによる高炉操業の解析*

加瀬 正司**・須賀田正泰**・山口 一良**

Analysis of Blast Furnace Operation Based on the Mathematical Model for Estimating the Profile of Softening-melting Zone

Masaji KASE, Masayasu SUGATA, and Kazuyoshi YAMAGUCHI

Synopsis :

A mathematical model for estimating the profile of softening-melting zone and the radial gas distribution in the furnace in operation has been developed by use of the measured shaft gas pressures in the furnace.

Close agreement was obtained between the results of this estimation and the data obtained with other instruments in the furnace, and the accuracy of this estimation was satisfactory.

Indices representing the operation state in the furnace have been derived based on the results of this estimation, and the usefulness of these indices was confirmed for the control of the heat efficiency, reducibility, molten metal quality, permeability, material descending state, and so on.

Further, operation states were analysed in the case of a decrease in production and an increase in pellet ratio in burden based on the results of this estimation, and it was showed that the actual phenomena in the furnace could be analysed sufficiently and accurately.

1. 結 言

実高炉を稼動中の状態のまま吹き止め、水冷後炉内状態を発掘調査するいわゆる解体調査^{1)~11)}の結果、融着層の存在が確認され、融着帯が高炉の熱交換機能、通気機能、還元機能と密接な関係をもち、とくに融着帯のコークススリットがガス分配機能を有し、塊状帯でのガス流れを決定する大きな要因であることが明らかになってきた。

筆者らは、融着帯の位置形状が設定されたとき、各コークススリットのガス流分配割合と塊状帯炉壁部のガス圧力分布を推定する数学モデルを開発し、融着帯の高炉操業に及ぼす機能の明確化および高炉操業において望ましい位置形状の検討を行つた¹²⁾。検討結果によると、高炉において望ましい融着帯形状は、安定性、被還元性、熱効率の点から、融着帯内側（溶け落ち開始線）が高炉の炉芯に近づいている形状であり、実炉操業試験によりそれを実証した¹³⁾。

高炉操業を融着帯を介して解析する場合、実炉における融着帯形状およびガス流れの推定が必要となるが、融着帯全体の位置形状を推定する数学モデルは現在のところ見当たらない。そこで筆者らは、上述した数学モデル

を發展させ、実炉の炉壁部のガス圧力（以下シャフト圧力と称する）を用いて融着帯の位置形状と各コークススリットのガス流分配割合を推定する数学モデルを開発し、推定結果の高炉操業データによる検証および推定結果を用いた高炉操業解析を行つた。ここでその結果を報告する。

2. 数学モデルの概要

2.1 モデルの基本的な考え方

融着層の通気抵抗は非常に大きくガスを通さないとすれば¹²⁾、羽口前で発生したガスは、融着層間のコークススリットを通つて塊状帯炉壁方向に分配される。このとき各スリットを通過するガス量はスリット断面積、スリット長さ等によつて決まり、スリットから塊状帯に出て流れるガス圧力よりも滴下帯を流れるガス圧力が高いように各スリットのガス量が分配されるから、融着帯形状が異なると各コークススリットへのガス分配量に差を生じ、その結果炉壁部のガス圧力損失およびシャフト圧力分布も異なってくる。よつて実炉のシャフト圧力分布がわかれば融着帯形状が推定できることになり、本モデルはこの原理にもとづいて作成した。

* 昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 4 月 28 日受付 (Received Apr. 28, 1980)

** 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

2.2 モデルの前提

既開発のモデル¹²⁾の前提に対し、実炉の融着帯形状を推定するために次に述べる前提を与え、そのほかの前提は既開発のモデルと同じとした。

(1) 融着帯形状は $y=a\sqrt{x}$ の式で表されるものとし、Fig. 1 に示すように、融着帯の頂層と根の間に原点を設け、内側の上部下部、外側の上部下部ごとに a を与えた。融着帯形状は広畑 1 高炉解体結果²⁾から、 $y=a\sqrt{x}$ の曲線で近似させることにした。ただし x, y : Fig. 1 の原点に対し、上方を正、左方を正とした座標軸。

(2) 炉芯の形状は宮坂らの式¹⁴⁾、清水らの式¹⁵⁾を用いて求め、炉芯にはガスが流れないとした。この理由については 2.4 で述べる。

(3) ガス温度は Fig. 1 に示すように、炉頂装入物表面を炉頂ガス温度、羽口中心を羽口前フレーム温度、融着帯内側を 1800°C、外側を 1000°C とし、その間には高さで直線近似した。融着帯内側と外側の温度は、断面均一反応伝熱モデル¹⁶⁾により計算した値をベースに決定したが、今後装入物の高温性状が明らかになった時点で設定しなおすことも考えられる。

(4) ガスの粘性はガス組成、温度にかかわらず一定とした。ガスの密度はガス組成にかかわらず一定とし温度変化のみ考慮した。

(5) 羽口中心のガス圧力は送風圧力の 0.9 倍とした。

(6) 装入物の高さ方向の圧縮率の変化を考慮するため洞岡 4 高炉の解体結果³⁾より、鉬石、コークスの嵩密度を次の式で与えた。

$$\rho_o = 1.90 + 1.3x \quad \dots\dots\dots (1)$$

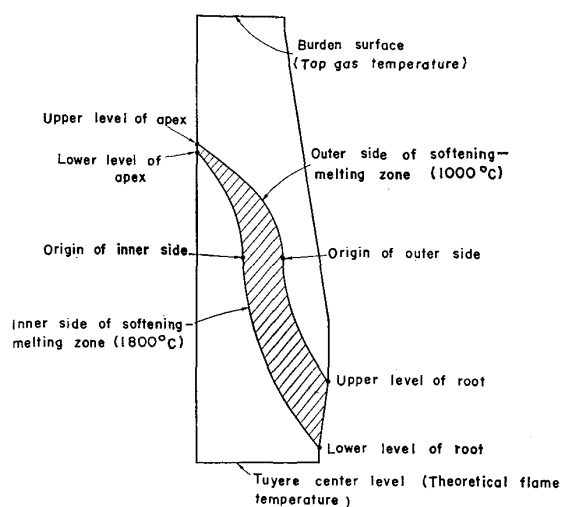


Fig. 1. Determination of the profile of softening-melting zone and gas temperature in the furnace.

$$\rho_c = 0.45 + 0.3x \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし ρ_o, ρ_c : 鉬石、コークス嵩密度 (t/m^3)

x : 炉頂装入物表面より羽口中心までの距離を 1.0 とした炉頂装入物表面よりの無次元高さ (—)

2.3 モデルの計算手順

Fig. 1 に示すように、頂層上端、根上下端、内外側原点の 5 点を与えれば融着帯形状が決まる。頂層下端は頂層上端が決まれば鉬石層厚により自動的に決まる。モデルの中では、5 点に初期値を与えてシャフト圧力分布を計算し、シャフト圧力測定孔取り付け位置における計算値と実測値の差の 2 乗和が最小になるように 5 点を変化させる。融着帯形状を設定してガス流れを計算する方法は既開発モデル¹²⁾と同じであるが、5 点の変更順序については事前に検討を行い、シャフト圧力分布を変化させる程度の大きい点より変更することにし、次に示す順序とした。なお高さの変更は、鉬石、コークス装入量によって区分した各層に対し、一層単位で行う。

根下端高さ→原点高さ→原点における内径→頂層上端高さ→根上端高さ→原点における外径

最初の点を変化させ、計算値と実測値の差の 2 乗和が減少するうちは計算を続け、増加に転じたときに次の点に移る。最後の点を変化させた計算を終了すると、計算した範囲内で差の 2 乗和が最小となる融着帯形状が決まるが、この形状を初期値としてもう一度最初の点より変化させて計算を行う。二度目の計算の結果差の 2 乗和の最小となる融着帯形状を求めるものとする。なお、差の 2 乗和の最小は計算した範囲内における最小値とし、絶対値の制約は設けない。

以上の手順で求めた融着帯形状は、5 点のあらゆる変更順序を経て計算したわけではないので、厳密には差の 2 乗和が最小になっているとはいえないが、後述するモデルの検証結果が良好なことから、かなり厳密な解に近いと考えられ、モデルによる計算時間短縮を考慮して本節で述べた手順とした。

2.4 モデル作成時の検討

2.2 で述べたモデルの前提を与える際に検討した主要事項について概説する。

Fig. 2 に、冷風の場合とガス温度を 2.2 (3) で述べたように与えた場合の推定結果を比較して示すが、冷風の場合は炉上部でのガス圧力勾配が大きく、炉頂装入物表面での計算ガス圧力と実測炉頂ガス圧力との差異が大きくなり、ガス温度を簡易的に与えることは妥当であることがわかる。既開発モデル¹²⁾の検討の際に、冷風でもガス温度を与えてもコークススリットのガス分配割合に

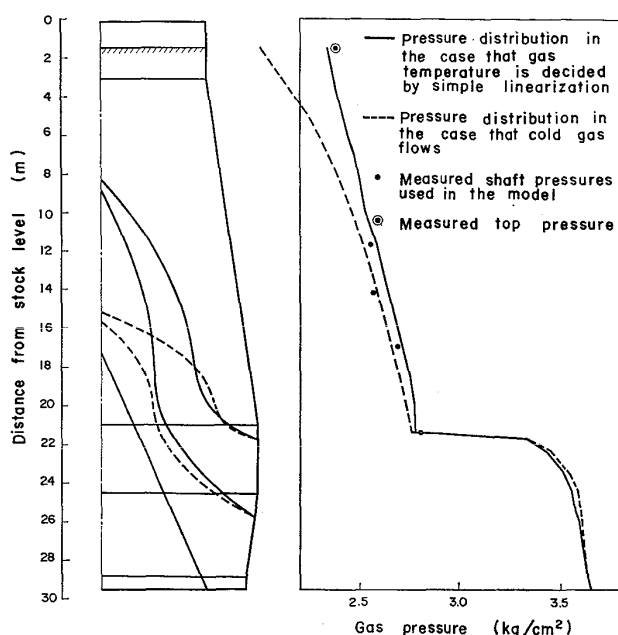


Fig. 2. Effect of gas temperature on the profile of softening-melting zone.

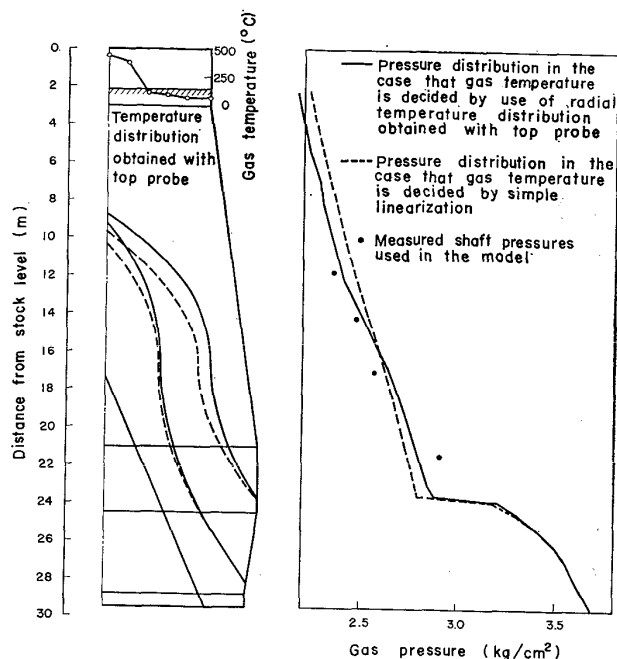


Fig. 4. Effect of the determination of gas temperature on the profile of softening-melting zone.

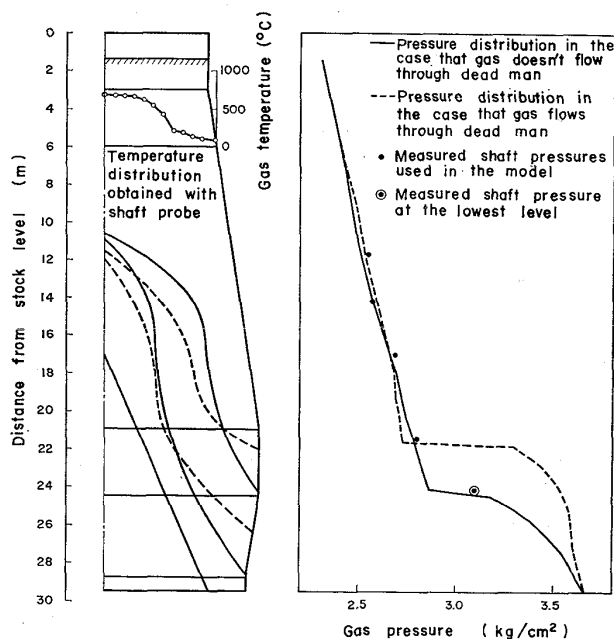


Fig. 3. Effect of dead man on the profile of softening-melting zone.

大きな差のないことを示したが、融着帯形状を固定しシャフト圧力分布の値に注目しない場合と異なり、実炉のシャフト圧力分布に合うように融着帯形状を変化させて推定するためには、実炉に近似したガス温度を与える必要がある。

Fig. 3は、炉芯にガスを流した場合と流さない場合の推定結果の比較であるが、次の3点より炉芯にガスを流さないほうが妥当であるとした。なお Fig. 3 におい

て、根上端付近において大きな圧損を示す理由は、根がまったくガスを通さないため、根部における炉壁部圧力は、滴下帯を流れるガス圧力と同じであるのに対し、最下段のコークスリットからガスが炉壁方向に流れて圧力が低下することによる。

(1) 最下段の実測 シャフト圧力との一致度合が高い。

(2) シャフトゾンデによる半径方向ガス温度分布からみて、融着帯根部はかなり炉下部に存在すると考えられる。

(3) シャフト圧力の計算値と実測値の一致度合が高い。

二次元ガス流れモデルによる計算結果¹⁷⁾からみても、炉芯を通るガス量は少なく、まったくガスが流れないとしても実炉推定に問題ないと思われる。

Fig. 4にガス温度を簡易的に与える場合に対して、炉内ガス温度の高さ方向の分布を炉頂ゾンデのガス温度測定値を初期値として次に示す指数関数で与え、炉頂ゾンデの半径方向のそれぞれの測定値を用いて、ある高さにおける半径方向の温度を求め、それらを平均した場合の推定結果を示す。

$$T = d_1 + d_2 \exp(-d_3 x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし T : ガス温度 ($^{\circ}\text{C}$)

d_1, d_2, d_3 : 定数

x : 炉頂装入物表面よりの距離 (m)

ガス温度をより精度よく与えることにより、シャフト圧

力の計算値と実測値の一致度合が高くなり、融着帯形状推定精度は向上しているといえるが、形状推定結果に大きな差異のないことから、ガス温度を簡易的に与えることにした。

2.5 モデルの検証

モデルによる融着帯形状推定結果の妥当性を検証するために、実高炉に取り付けてある他検出端からのデータとの対応をとって検討した。

筆者らは、炉頂ゾンデ（あるいはシャフトゾンデ）による半径方向のガス温度分布とガス組成分布を初期値とした、高炉内半径方向、高さ方向の温度分布を求める数学モデルを開発し、固体温度 $=1000^{\circ}\text{C}$ の等温線が、洞岡4高炉解体結果の示した融着開始線に比較的良好一致することを述べた¹⁸⁾。このモデルにより、シャフトゾンデ測定値を用いて求めた固体温度 $=1050^{\circ}\text{C}$ の等温線と、今回開発したモデルにより推定された融着帯外側形状を Fig. 5 に示すが、両者は比較的良好一致している。壁ぎわの一致度合が悪くなっているのは次のように考えられる。最近の大型高炉では装入物分布調整装置（ムーブルアーマー等）により壁ぎわの鉱石とコークスの装入割合（以下 O/C と称する）を高くして、ガス流れを調整している。O/C が低いと装入物の通気抵抗が

小さいためガス量が多く、ガス流速が大きいことから、還元が十分に進まないうちに装入物が昇温され、融着開

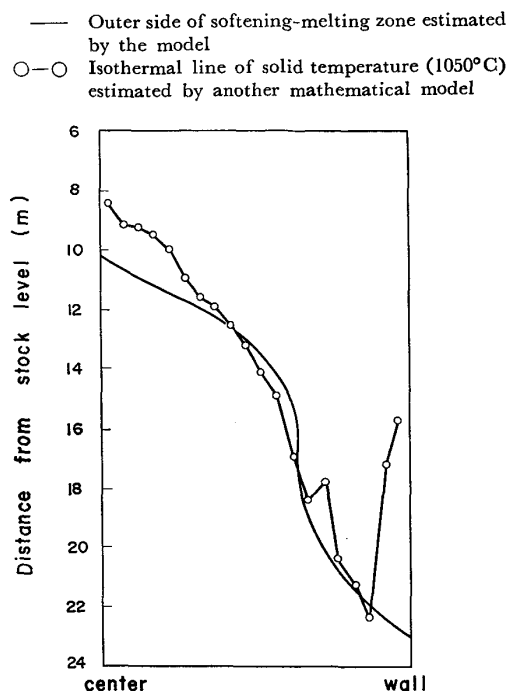


Fig. 5. Comparison of the estimated results by the model with the ones by another mathematical model.

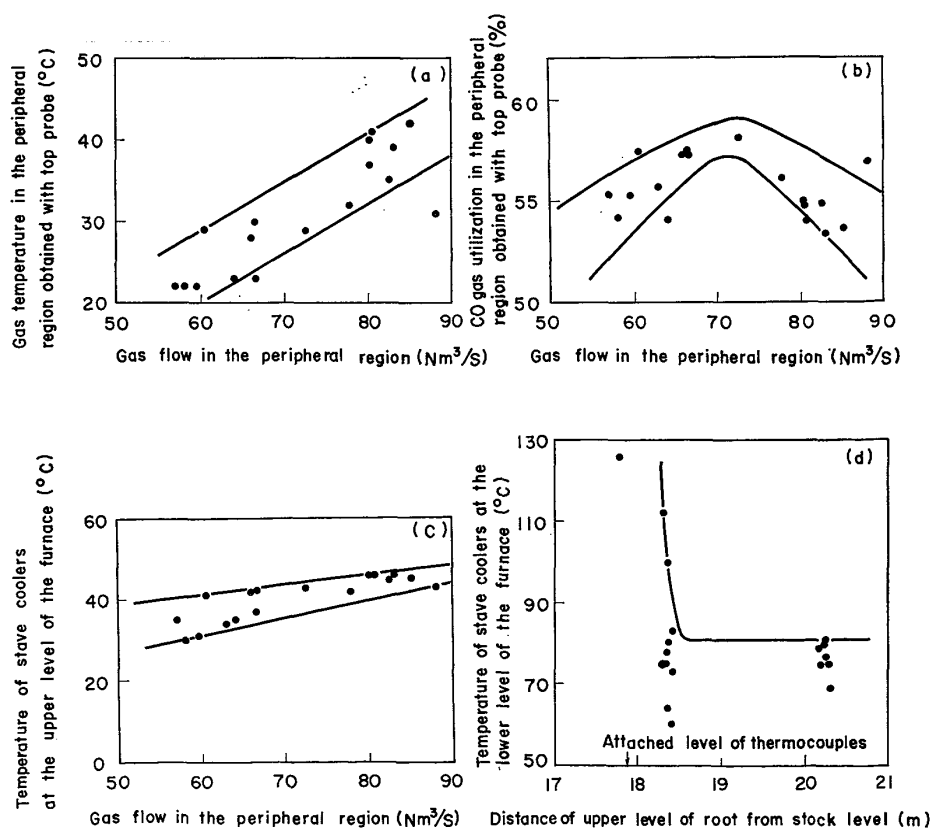


Fig. 6. Relation between the estimated results by the model and data obtained with other instruments in the furnace.

始は早くなるが、逆に O/C がある程度高いと、装入物が急速に昇温されず還元が十分に進行し、融着開始が 1050°C よりも高い温度で起こることになるためである。固体温度の等温線を 1050°C にとつた理由は、洞岡 4 高炉解体時に比べて装入物被還元性が向上し 1000°C 付近での残留 FeO が少なくなり、これに起因する融着開始温度が上昇したと考えられることによる。

次に、今回開発したモデルにより推定された各コークススリットから出てくるガス量のうち、周辺部分の横断面積 30% を流れるガス量を周辺部ガス量として、炉頂ゾンデ測定値、ステーブ温度との対応をとつた結果を Fig. 6 に示す。周辺部ガス量が増加すると、炉頂ゾンデで測定された周辺部ガス温度は上昇している。また周辺部ガス量の増加に対して、炉頂ゾンデで測定された周辺部 CO ガス利用率（以下 η_{co} と称する）は極大値をとる。ガス量が多いとガス流速が高すぎ、ガス量が少ないと鉱石の加熱不足でいずれも η_{co} が低下するためと考えられる。また周辺部ガス量が増加すると、シャフト上部ステーブ温度は上昇するが、シャフト下部ステーブ温度については、推定された根上端位置が下からステーブ温度計取り付け位置に近づくと、コークススリットからのガスの横流れの影響を受けて温度が上昇している。

以上のように、本モデルによる推定結果は、他検出端データとの対応性がよく、高炉内現象をよく説明できており、融着帯形状を介して高炉操業を解析することは十分可能であるとともに、本モデルの推定精度の高いことを示している。

3. 数学モデルによる推定結果から導かれる指数と高炉操業との関係

高炉の操業管理を行う場合、操業状況を示すいろいろな管理指数を導き、それを調整していくことは重要なことである。この節では、モデルによる推定結果をもとに種々の指数を導いて、高炉操業との対応をとり、管理指数としての評価を行つた。指数として Fig. 7 に示すように、塊状帯体積、滴下帯体積、融着帯内側コークススリット断面積、融着帯内側と炉芯との最短距離（以下 $4L$ と称する）をとりあげた。

Fig. 8 に塊状帯体積と高炉操業との関係を示す。塊状帯体積が増加すると、ガスと装入物との熱交換が十分に行われるため炉頂ガス温度（平均）は低下するが炉頂ガス中 η_{co} （平均）は上昇していない。これは還元はある温度以下ではほとんど進行しないこと、および塊状帯体積のほかに、塊状帯における半径方向のガス流れ分布の影響が大きいと思われる。

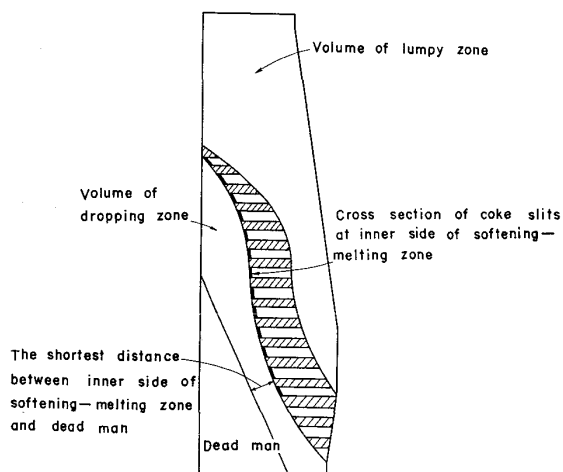


Fig. 7. Indices representing the operation state in the furnace.

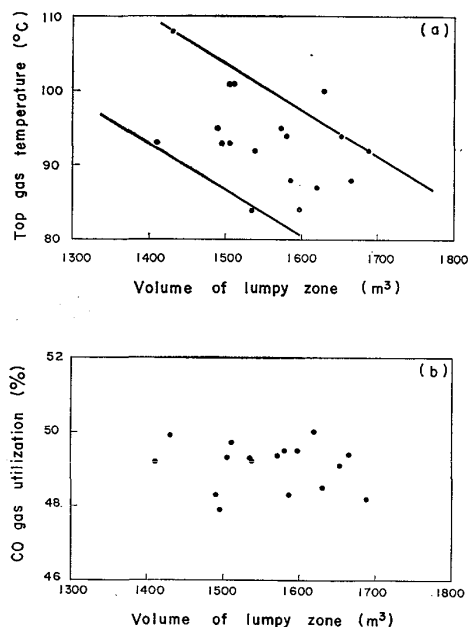


Fig. 8. Effect of volume of lumpy zone on the furnace operation.

Fig. 9 に滴下帯体積と高炉操業との関係を示す。滴下帯体積が増加すると、ガスから溶銑への伝熱量が増加するため溶銑温度は上昇し、滞留時間が増加するため溶銑中 Si 含有量も上昇する。溶銑中 Si 含有量はある滴下帯体積以下で一定値を示すが、この範囲では、反応速度の速い SiO ガス-メタル反応が主流であり、これ以上体積が増加すると、スラグ-メタル反応の寄与が大きくなるためと考えられる。また炉芯を通過する中心部のメタルは、Si があまり含有されない前に炉芯に入ると考えられ、この量は少ないことから Si に及ぼす影響は小さいと思われる。

以上述べたように、塊状帯体積は高炉の熱効率、還元

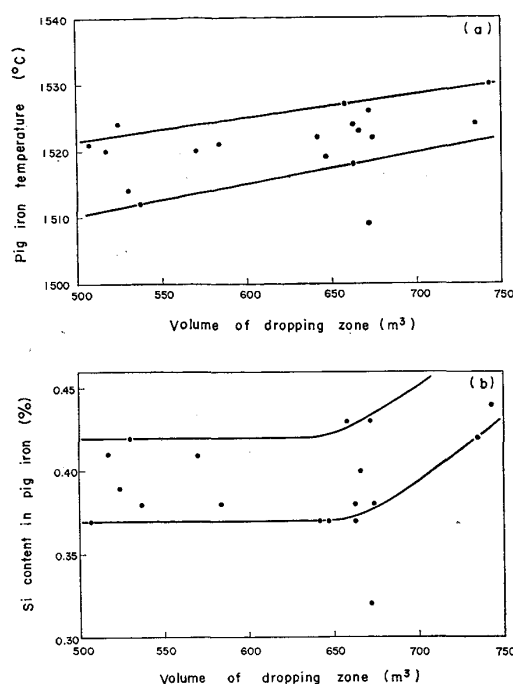


Fig. 9. Effect of volume of dropping zone on the pig iron qualities.

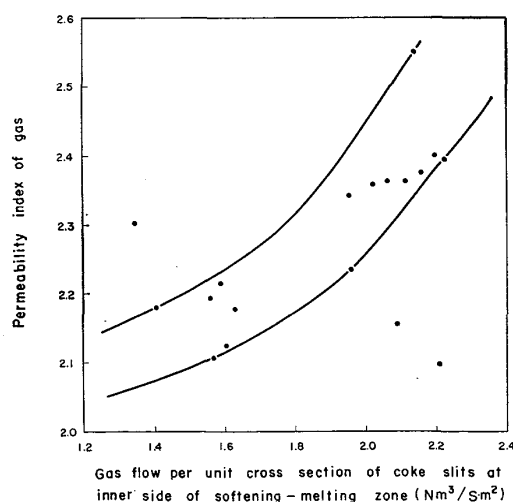


Fig. 10. Effect of gas flow per unit cross section of coke slits at inner side of softening-melting zone on permeability index of gas.

効率を、滴下帯体積は溶銑品質を表す指数として有効であることがわかる。

Fig. 10 より、融着帯内側コークススリット単位断面積当たりガス量が増加すると、高炉の通気抵抗指数が上昇している。これは融着帯頂層が低下することによりスリット総断面積が小さくなり、ガス圧力が上昇したためと考えられる。なお通気抵抗指数 K は次の式により求めた。

$$K = (P_b^2 - P_t^2) / BG^{1.7} \dots\dots\dots (4)$$

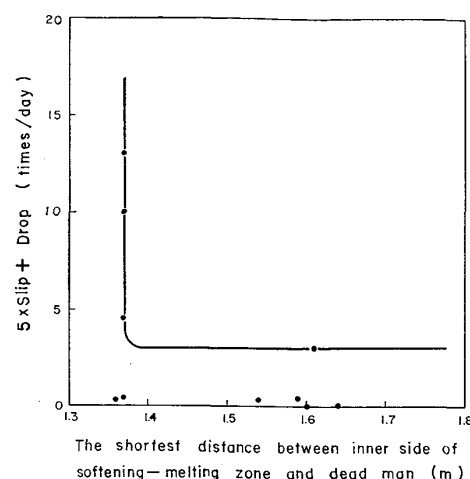


Fig. 11. Effect of the shortest distance between inner side of softening-melting zone and dead man on descent of burden.

ただし P_b , P_t : 送風圧力, 炉頂圧力 (g/cm²abs)

BG: 羽口前発生ガス量(以下ボッシュガス量と称する) (Nm³/min)

Fig. 11 に装入物降下異常を示す指数として、スリップ回数×5+ドロップ回数を取りあげ(スリップは装入物表面の 1m 以上の瞬間的降下, ドロップは 1m 以下), ΔL との関係を示す。 ΔL が狭くなると降下異常が激しくなるが、これはレースウェイへのコークス供給が不連続になることによる¹³⁾と思われる。

このように、モデルによる推定結果から導びかれた指数は、高炉操業状況を表す指数として非常に有効であり、高炉操業管理のために、これら指数の制御法を確立することが今後の課題である。

4. 数学モデルによる高炉操業解析

モデルによる推定結果を用いて、高炉操業解析を行った例につき以下に述べる。

4.1 減産操業解析

高炉において減産操業を実施したデータにより、本モデルにて融着帯形状を推定した結果では、一般的にはボッシュガス量が減少することにより、頂層は低下し根は上昇する。そこで減産操業時の融着帯形状変化を頂層と根の変化に注目し、これらを変化させる操業要因を検討してみた。

Fig. 12(a) に示すように、高炉内平均単位断面積当たりのガス量が増加すると頂層は上昇しているが、これは頂層の生成がガス量増加による鉱石への伝熱量増大によつて速くなるためと考えられる。しかし頂層の上昇傾向は 18m 付近で飽和しており、頂層が上昇しすぎると塊状帯体積が小さくなり高炉の効率が低下するので、頂

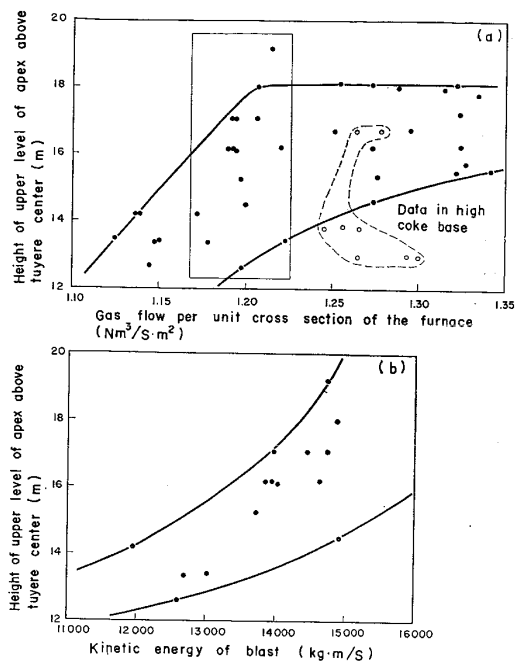


Fig. 12. Factors having an effect on the level of apex.

層上昇を防止するため中心流を抑えるアクションをとった結果であると思われる。また1チャージ当たりの鉱石装入量が多いと (Fig. 12(a)中、コークス装入量の多いデータとして破線で囲んである)、同じガス量でも頂層は低下しており、鉱石層厚が厚いことによる鉱石内部の加熱遅れの結果と考えられる。さらに、Fig. 12(a)の実線で囲んだデータのみをとりあげて(b)を作成すると、同じガス量でも羽口前の衝風エネルギー (以下羽口エネルギーと称する) の大きいほど頂層は上昇している。羽口エネルギーが増加することによりレースウェイ奥行きが深くなりガスがより中心部へ流れるためと思われる。

次に、Fig. 13(a)に示すように、羽口1本当たりボッシュガス量の多いほど根は低下しているが、ガス量の多いほどレースウェイ奥行きがひろがり、ガスがより中心部へ流れるためと考えられる。ガス量が減少してくると、レースウェイ奥行きが浅くなり炉壁を流れるようになるため、ガス流が根を突き上げる形で根の溶解が促進され根が上昇する。また同じガス量でも1チャージ当たりの鉱石装入量が多いと (Fig. 13(a)中、コークス装入量が多いデータとして破線で囲んである)、根の内部への伝熱が遅れ根は低下している。さらに、Fig. 13(a)の実線で囲んだデータのみをとりあげて(b)を作成すると、同じガス量でも羽口エネルギーの大きいほど根は低下している。ガスがより中心部へ流れ周辺部のガス量が減少するためと思われる。また、図示していないが、燃料比が低いと根を溶解するガス量が減少するため根が低下

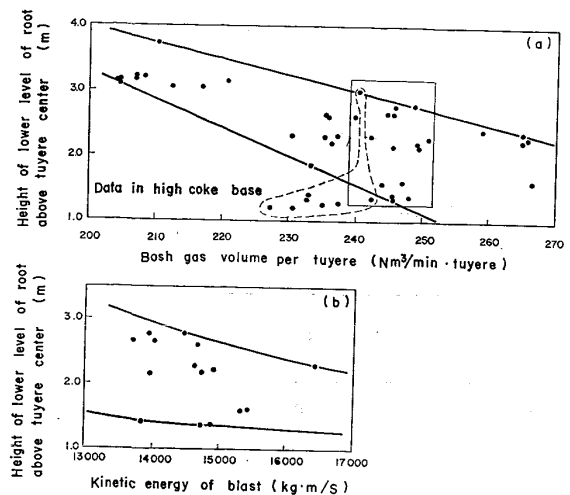


Fig. 13. Factors having an effect on the level of root.

する結果も得られている。

以上の検討結果をもとに、減産操業時の頂層低下、根上昇の機構を推定すると Fig. 14 のようになる。ただし減産操業によりボッシュガス量が減少したときの、羽口エネルギー、高炉内平均単位断面あたりガス量、羽口1本当たりボッシュガス量の減少程度、1チャージ当たり鉱石装入量、燃料比などの変化により、頂層と根の変化程度は異なる。また、同一内容積の高炉であれば、羽口本数の少ない高炉、炉腹径の小さい高炉ほど、減産操業時の頂層と根の変化量は小さいといえる。

4.2 ペレット配合比増加時の操業解析

ペレット配合比を20%まで増加した場合の融着帯形状変化を、頂層と根の変化に注目してみる。一般的に、ペレット配合比を増加させると、ペレットの炉内における傾斜角が小さいことから、中心部におけるO/Cが増加し中心ガス流が減少し周辺ガス流が増加する。このため根が上昇し、頂層は低下する傾向は Fig. 15 にみられるが、この傾向はペレット配合比増加とともにゆるやかになつてくる。

Fig. 15 に示す数字は、コークス、コークス、鉱石、鉱石の4バッチで1チャージを構成する装入スケジュールにおいて、ムーバブルアーマー位置 (ノッチと称する) をバッチごとに調整する方法¹⁰⁾を示すが、2バッチ目のコークスノッチの大きいほうが周辺部のO/Cが高くなる。Fig. 15によると、ペレット配合比増加につれて、周辺部のO/Cを増加するアクションをとり中心流を確保し、頂層低下、根上昇を抑えていることがわかる。また同じペレット配合比においては、2バッチ目のコークスノッチの大きいほうが周辺部のO/Cが高くなり、頂層低下、根上昇を抑える効果大きい。

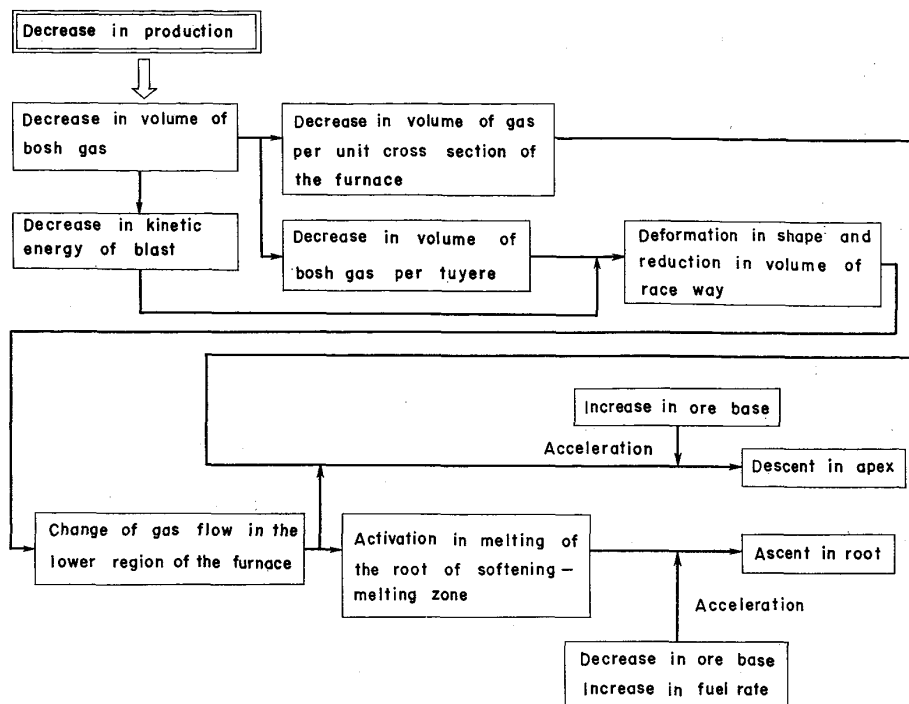


Fig. 14. Change of the furnace condition with a decrease in production of the blast furnace.

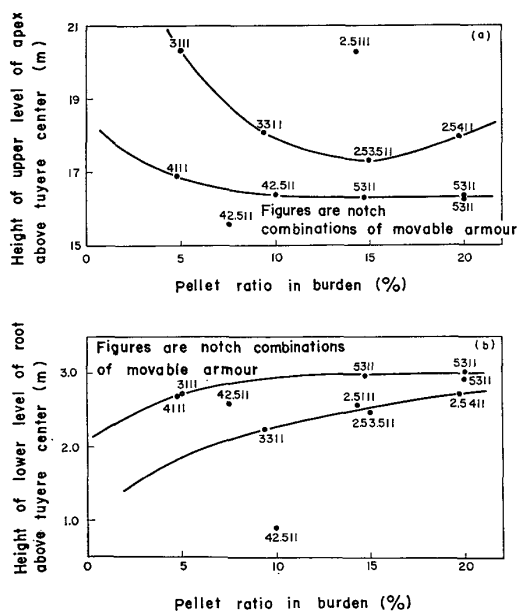


Fig. 15. Effect of pellet ratio in burden on the levels of apex and root.

5. 今後の方向

実炉の融着帯形状およびガス流れを推定するために開発された本モデルは、推定精度が良好であることが検証され、高炉操業状況を表す指数の導出、融着帯形状を介した高炉操業解析にも非常に有効であることが示された。

本モデルは実炉推定を目的とした配慮はなされているが、かなり大胆な前提をおいて単純化しており、さらに推定精度を向上させるためには、融着帯を直接検知する方法を考慮する必要がある今後の課題である。

6. 結 言

実炉の炉壁部ガス圧力（シャフト圧力）を用いて、実炉における融着帯形状およびガス流れを推定する数学モデルを開発した。このモデルによる推定結果は、実炉に取り付けた他検出端からのデータとよく対応し、十分推定精度の高いことが検証された。次に、このモデルによる推定結果から、高炉操業状況を表す指数を導き、熱効率、還元効率、溶銑品質、通気抵抗、装入物降下状況などを管理する指標として有効であることを確かめた。さらに、減産操業、ペレット配合比増加時の操業の解析を、モデルによる推定結果を用いて行い、高炉内現象を十分説明できることを示した。

今後は、このモデルによる推定結果の高炉操業への適用を続け、高炉操業成績の向上に役立てていく。

文 献

- 1) A. KODAMA and S. HASHIMOTO : Proc. ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 112
- 2) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62

- (1976) 5, p. 535
- 3) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 547
 - 4) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 559
 - 5) 小島鴻次郎, 西 徹, 山口徳二, 仲摩博至, 井田四郎: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 570
 - 6) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊東孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 580
 - 7) 梶川脩二, 隅田 昇, 吉越英之, 福島 勤, 鴨志田友男, 福山辰夫, : 鉄と鋼, 59 (1973) 11, A81
 - 8) 伊沢哲夫, 里見弘次, 中島龍一, 梶川脩二, 宮本健彦, 隅田 昇, 福島 勤: 鉄と鋼, 61 (1975) 12, S 399
 - 9) 伊沢哲夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斎藤正紀, 宮本健彦, 福島 勤, 古川 武: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 446
 - 10) 橋爪繁幸, 高橋洋光, 中川敏彦, 富田貞雄, 佐藤政明, 森岡恭昭, 小坂橋寿光: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 108
 - 11) 吉村研三, 佐藤 忠, 富貴原璋, 島崎重信, 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 551
 - 12) 研野雄二, 須賀田正泰, 安倍 勲, 中村 展: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, p. 1526
 - 13) 研野雄二, 楯岡正毅, 須賀田正泰, 山口一成, 久米正一, 山口一良, 安倍 勲: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, p. 1553
 - 14) 宮坂尚親, 須賀田正泰, 原行 明, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972) 1, p. 18
 - 15) 清水政治, 長井 保, 岡部俠児, 近藤幹夫, 稲谷稔宏: 鉄と鋼, 58 (1972) 5, p. 589
 - 16) 研野雄二, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼, 65 (1979) 10, p. 1544
 - 17) 日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会高炉内反応部会中間報告: “高炉内現象とその解析”, (1979), p. 202
 - 18) 重見彰利, 鈴木 明, 肥田行博, 山口一良: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 47
 - 19) 研野雄二, 楯岡正毅, 安倍 勲, 久米正一, 天野繁: 製鉄研究, 288 (1976), p. 54