

技術報告

高炉塊状帯計測技術とその応用

米田 光生*・正久 徳治*・松井 正昭*
緒方 勲*・日野 俊喜*

Measuring Technic of Lumpy Zone in the Blast Furnace and It's Application

Mitsuo YONEDA Tokuji SYOKYU, Masaaki MATSUI,
Isao OGATA and Toshiki HINO

Synopsis:

A monitoring system for lumpy and cohesive zones in the blast furnace has been developed to help clarify the phenomena occurring in the furnace and stabilize blast furnace operation. This system consists of hardware which measures the condition of gas and burden, and mathematical model which estimates the state in the furnace using the data obtained by the hardware. New sensors, such as a gas velocity meter using a hot wire velocity meter and a layer thickness meter using a magnetometer, have been developed and practically applied to a blast furnace. The state in the blast furnace can be precisely clarified by these sensors and the model.

1. 緒 言

高炉の解体調査¹⁾により塊状帯及び融着帯の分布形状が炉内のガス流れ、熱バランス及び装入物とガスの反応効率に大きな影響を与えることが明らかとなり、塊状帯及び融着帯の分布形状の推定と制御方法の確立が高炉の安定操業上、また高炉プロセスを解明する意味からも極めて重要な課題となつている。

そこで当社堺製鉄所において、高炉塊状帯観測システムを開発実機化した。このシステムは高炉の炉頂部及びシャフト部でのガス流分布、ガス組成分布及び装入物分布挙動を計測するための検出端、及びこれらの計測情報から融着帯形状を推定するモデルから構成されている。

本報告はこの高炉塊状帯観測システムに用いた計測技術と融着帯推定モデル²⁾について述べたものである。

2. 高炉塊状帯観測システムの構成

高炉塊状帯観測システムの全体構成を Fig. 1 に示す。このシステムは炉頂部での径方向の情報を得るための炉頂さし渡しゾンデ (Throat-Diameter-Probe, 以下 TDP と略す)、シャフト部での径方向の情報を得るためのシャフトさし渡しゾンデ (Shaft-Diameter-Probe, 以下 SDP と略す)、同じくシャフト部での周方向の情報を得るためのシャフト炉壁近傍プローブ (Shaft-Wall-

Probe, 以下 SWP と略す) を有しており、これら各プローブ内に装着された計測装置からの情報に基づき融着帯形状を推定している。

3. 炉頂部計測技術

炉頂部では、ガス温度、ガス組成、ガス流速それぞれの径方向の分布を計測している。Fig. 2 に TDP の計測機能とその構造を示す。

温度計測には K タイプのシース型熱電対を使用している。炉中心部では熱電対先端部へのダスト付着による測温精度の低下を防止するため非測温中は N₂ パージを行つている。

ガス組成は赤外線式ガス分析計を使用し計測している。サンプリング管先端部へのダスト付着による閉塞防止のためガスサンプリングと N₂ パージを交互に行つている。

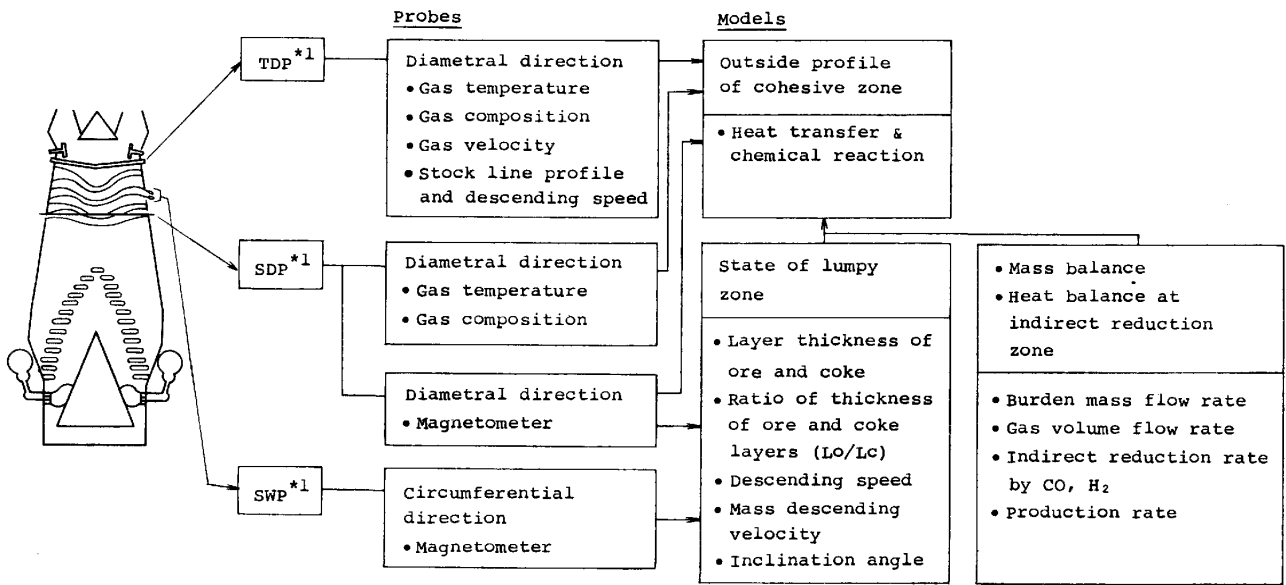
ガス流速は今回新たに開発した新タイプの流速測定システムにより計測している³⁾。この流速測定システムはピトー管と熱線式流速計を組み合わせたもので炉頂部のように多粉塵で比較的低速な領域での測定に適している。以下その詳細について記す。

3.1 ガス流速測定システム

炉頂部でのガス流速は最大 4~5 m/s 程度と考えられる。この時ピトー管により発生する差圧は 3 mm H₂O

昭和 58 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1983)

* 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp., 1 Chikkoyahatamachi Sakai 590)



Note *1

“TDP”……Throat Diameter Probe, “SDP”……Shaft Diameter Probe, “SWP”……Shaft Wall Probe

Fig. 1. Configuration of monitoring system for lumpy and cohesive zones in the blast furnace.

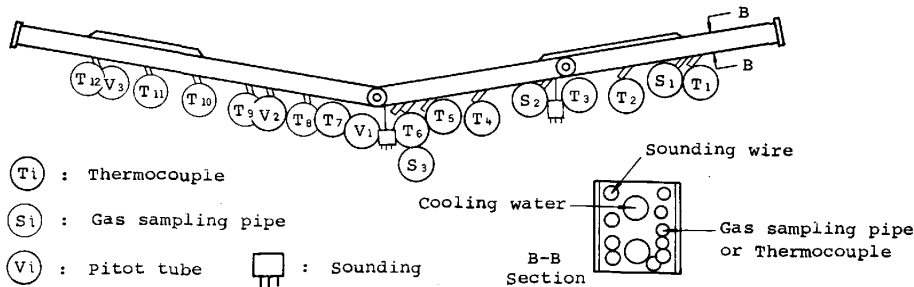


Fig. 2. Schematic structure of a throat diameter probe (TDP).

以下であるため従来の差圧測定用マンメータでは測定不可能である。そこでマンメータを熱線式流速計で置き換えたものを開発した。しかしながらこの熱線式流速計はその特性上熱線センサに触れる流体の密度変動、温度変動、圧力変動は測定誤差の要因となる。これらの誤差要因を除去するために熱線センサに触れる流体は密度が一定な N_2 とした測定導管及び熱線センサ部を恒温槽に入れ一定温度に保っている。圧力変動については炉頂部でのガス圧力が $1\sim 2\text{ kg/cm}^2$ 程度であり圧力変動は 0.05 kg/cm^2 程度である。この圧力変動を物理的に除去することは困難であるため炉頂部のガス圧力を実測することにより補正している。この流速測定システムの構成及び出力特性を Fig. 3 に示す。

非測定時はバルブ V_1, V_4 が開放、 V_2, V_3 が閉塞の状態です。ピトー管及び連絡導管のパージを行っています。

流速測定時にはバルブ V_1, V_4 を閉塞しパージガスの流入を停止後 V_2, V_3 を開放するとピトー管で生じる差

圧により測定導管内に炉内ガス流速に対応したパージガス N_2 の微少な気流が生じ熱線センサに接する。測定時間をピトー管から流入する炉内ガスがバルブ V_2 に届くまでの時間内にとどめると熱線センサには密度が一定でしかも清浄なパージガス N_2 が流れるため熱線センサの汚染やダストによる破損が防止できる。

この流速測定システムの総合特性は Fig. 3 のごとくそれぞれの特性の組み合わせになる。最終的には風洞実験を行い出力特性の校正を行っている。

4. シャフト部計測技術

シャフト部ではガス温度及びガス組成については炉径方向分布を、また装入物分布挙動については炉径方向と炉周方向を計測している。炉径方向測定のために Fig. 4 に示すような SDP を、また炉周方向測定のために Fig. 5 に示すような SWP をそれぞれシャフト部に装着している。

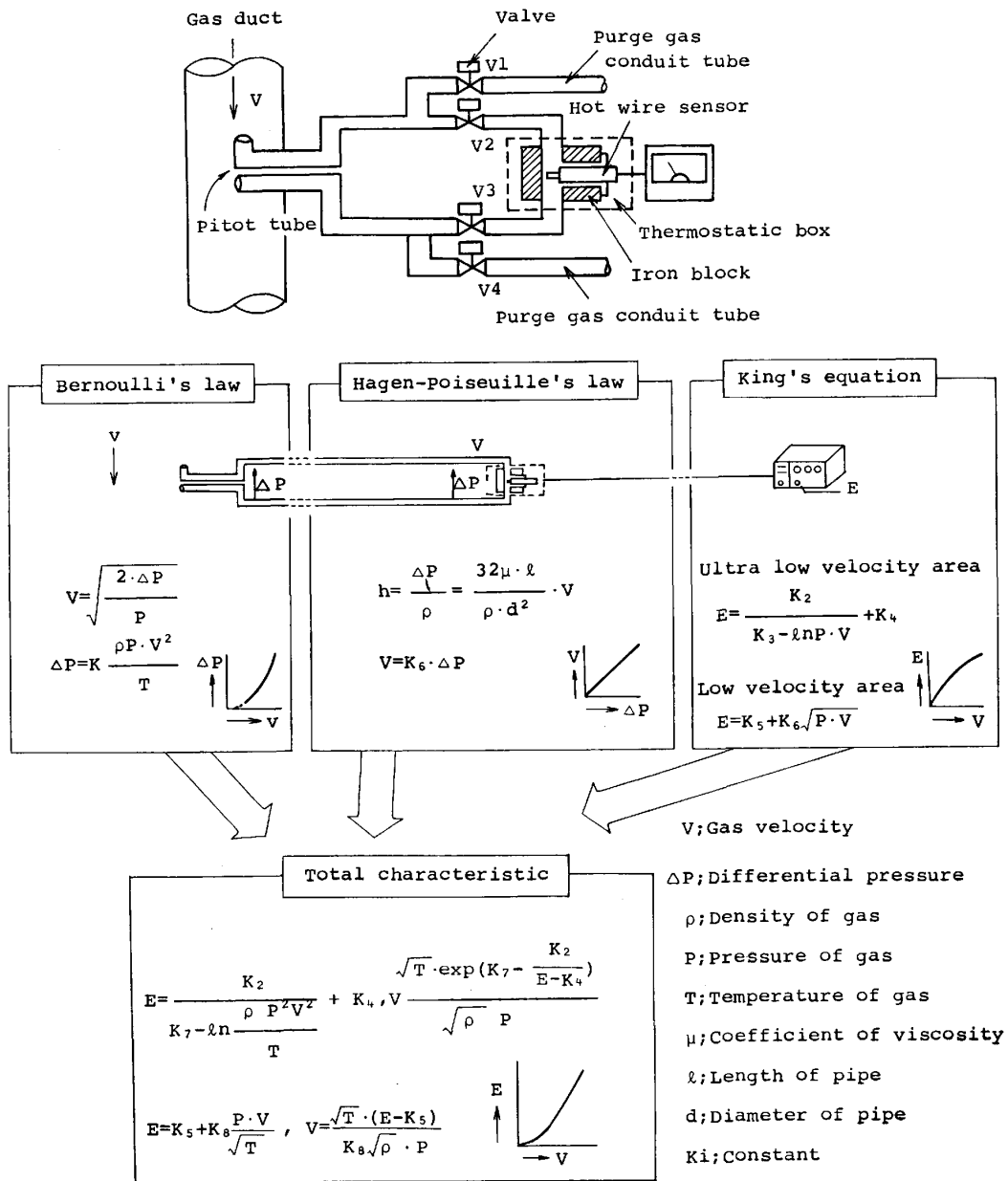


Fig. 3. Schematic drawing of gas velocity meter by Pitot tube and hot-wire sensor and output characteristics.

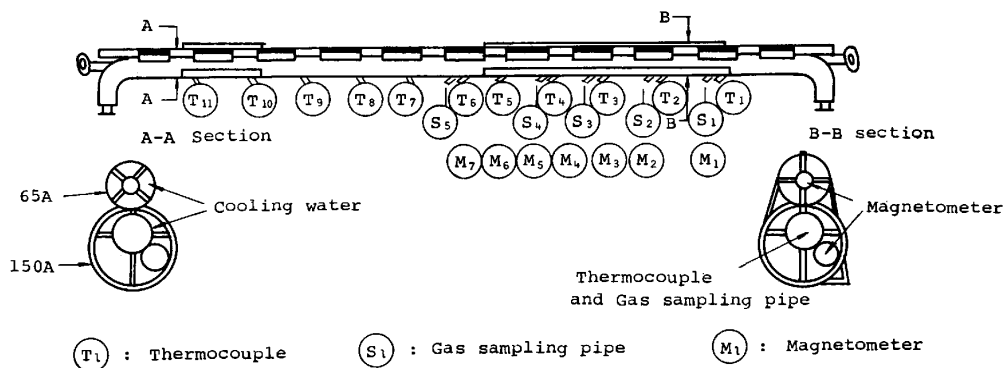


Fig. 4. Schematic structure of a shaft diameter probe (SDP).

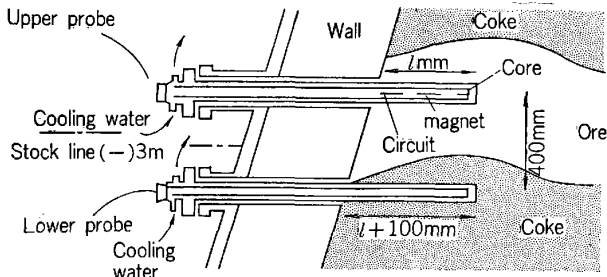


Fig. 5. Schematic drawing of shaft wall probe.

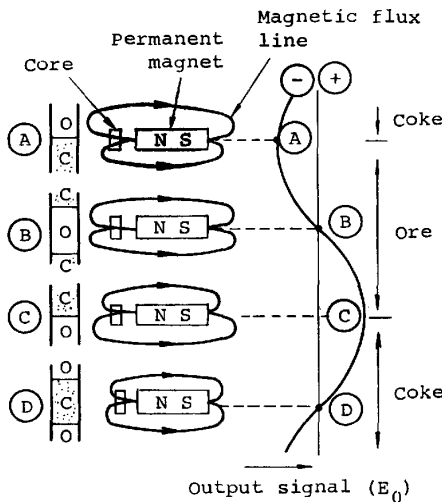


Fig. 6. Principle of measurement by magnetometer.

SDP によるガス温度及びガス組成の計測は TDP の場合と同様の方式により行っている。

装入物分布挙動には鉱石とコークスの透磁率の差異に注目して磁気マルチ型マグネットメータを利用し計測している。この磁気マルチ型マグネットメータ⁴⁾(以下MMと略す)はその特性上コークスと鉱石の層境界が検出可能であり、この層境界検出情報からコークス及び鉱石の①降下速度、②境界層の傾斜角、③層厚、④層厚比、⑤質量降下速度といった装入物分布挙動情報が得られる。

4.1 装入物分布挙動計測技術

4.1.1 MM による層境界測定原理

高炉内では、コークス及び鉱石は層状をなして堆積、降下している。そこで Fig. 6 に示すように装入物に外部磁界を与えるための永久磁石を装入物降下方向に対し垂直方向に、またコアを装入物降下方向と同一方向に配した装置を考える。この状態では鉱石は磁性体であるため永久磁石近傍に接近すると磁化されるがコークスは非磁性体であるため磁化されない。したがってコアの上半分の磁束密度が下半分より大の時に出力が負になるようにセットすると③または④のように上下がバランスすると出力 $E_0=0$ となり、①のようにコークス層から鉱石

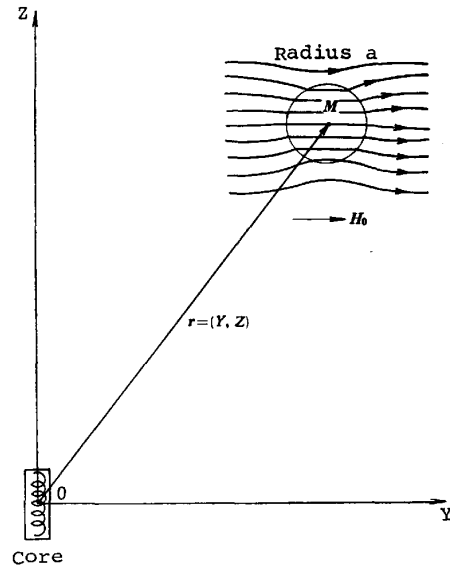


Fig. 7. Magnetic dipole model.

層への境界で出力は最小値となり、③のように鉱石層からコークス層への境界で出力は最大値を示す。したがって出力の最小値①点はコークス層から鉱石層への境界点、最大値③点は鉱石層からコークス層への境界点を示す。また出力の増加する方向である①~③~⑤間は鉱石が通過中であることを示し、減少する方向である③~①間はコークス層が通過中であることを示す。

4.1.2 MM の出力特性の解析

以下に MM の出力特性について解析する。簡単のため次の仮定をおく。

- ① 磁界は一様平行磁界とする。
- ② X, Y, Z 軸のうち X, Y 方向は無限にあるとし Y-Z 平面についてのみ考える。
- ③ 鉱石を半径 a の球とし、 a はセンサ位置からの距離 r より十分小さいとする。

さて一様平行磁界 H_0 中に透磁率 $\mu (\mu = \mu_s \cdot \mu_0 : \mu_s$ は比透磁率、 μ_0 は真空透磁率) なる半径 a の球がある時、球による磁気モーメント M は(1)式で表される。

$$M = 4\pi a^3 \mu_0 \cdot \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} H_0 \dots\dots\dots (1)$$

したがって磁位 ϕ_m は(2)式で表される。

$$\phi_m = - \frac{1}{4\pi \mu_0 r^3} M \cdot r = - \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} a^3 \cdot \frac{1}{r^3} H_0 \cdot r \dots\dots\dots (2)$$

$$r = (Y, Z)$$

ところでコアの向きはZ軸方向であるため磁界のZ成分のみを考えればよい。したがってコア位置におけるZ軸方向の磁界を H_z とすると H_z は(3)式で表される。

$$H_z = -\frac{\partial \phi_m}{\partial Z} = \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} a^3 \cdot \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{1}{r^3} \mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{r} \right) \dots (3)$$

ここで一様平行磁界の向きをY軸方向とすると \mathbf{H}_0 は (4)式で表される。

$$\mathbf{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z}) = (0, H_0, 0) \dots (4)$$

したがって H_z は (5)式で表される。

$$H_z = \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} (-3a^3 H_0 Y Z) \cdot \frac{1}{r^5} \\ = \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} (-3a^3 H_0 Y Z) \cdot \frac{1}{(Y^2 + Z^2)^{5/2}} \dots (5)$$

ここで Fig. 8 のような場合原点におけるZ方向の磁界をHとするとHは(6)式で表される。

$$H = \int_{Z_0-b}^{Z_0+b} \int_{Y_0}^{\infty} H_z \cdot dYdZ = -3 \cdot \frac{\mu_s - 1}{\mu_s + 2} \\ \cdot a^3 H_0 [\{Y_0^2 + (Z_0 - b)^2\}^{-1/2} \\ - \{Y_0^2 + (Z_0 + b)^2\}^{-1/2}] \dots (6)$$

ここで層はZ軸方向に降下している。そこで層の中間位置 Z_0 と出力 H との関係を図. 8 に示す。このグラフから次のことがいえる。

- ① $Z_0 = b$ の位置すなわち層境界部において出力 H がピークとなることが理論的にも実証された。
- ② ピーク値は比透磁率、粒度、永久磁石による磁界の強さ、層厚に依存している。

4.1.3 MM の装着状況

測定原理の章でも述べたように1つのMMによつて得られる情報は層境界である。したがってMMを上下ペアで設置し上下の層境界の時間差を測定することにより、コークス、鉱石の層厚、降下速度等の装入物分布挙

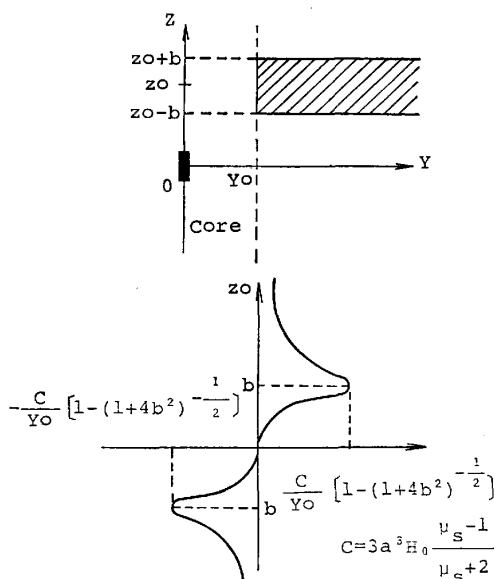


Fig. 8. Calculated wave form of magnetometer.

動の情報が得られる。

SDP では同一プローブの上部、下部にそれぞれMMを装着し径方向の装入物分布挙動を計測している。

SWP は Fig. 5 に示すように水冷プローブが上下ペアで炉内に突入しており、それぞれのプローブにMMを装着している。このSWPのペアを炉周方向に配置することにより炉周方向の装入物分布挙動を計測している。

4.1.4 装入物挙動指数の算出方法

MM 出力信号を図. 9 に示す算出フローに基づき計算処理することにより装入物分布挙動を示す、①降下速度、②傾斜角、③層厚、④層厚比、⑤質量降下速度といった情報が得られる。例として炉周方向における装入物挙動指数の詳細な算出方法を Fig. 10 に示す。

4.1.5 MM の実測波形と層境界検出

SWP に装着したMMの出力波形の例を図. 11 に示す。鉱石層とコークス層が識別可能な波形も得られているがA~Cに見られるように層境界波形が単一のピーク(単峰)としてでなく多峰化してしまうこともある。この多峰化の原因は測定原理から考察すると鉱石層とコークス層の間に透磁率の異なるもう一つの層が存在しているためと思われる。この層は鉱石層とコークス層の間に存在し透磁率も鉱石、コークスと異なっていることから鉱石とコークスの混合したいわゆる混合層と思われる。この場合この混合層の存在を無視しA, B, Cの破線のような近似を行つて仮想ピークを層境界としている。

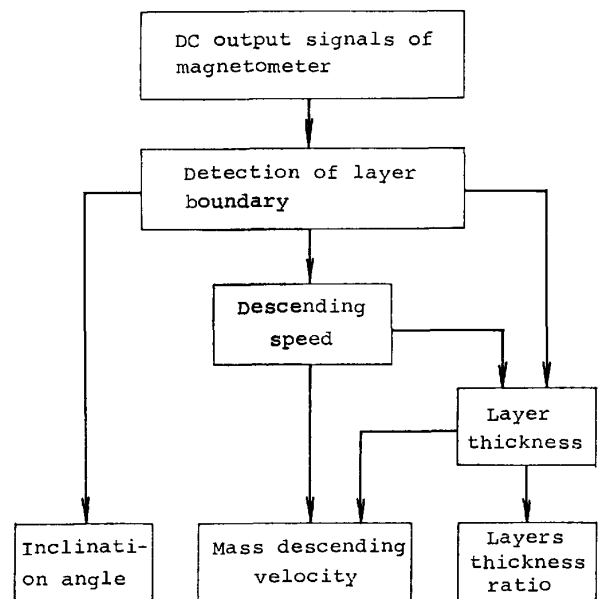


Fig. 9. Calculation flow the wave form signals of magnetometer.

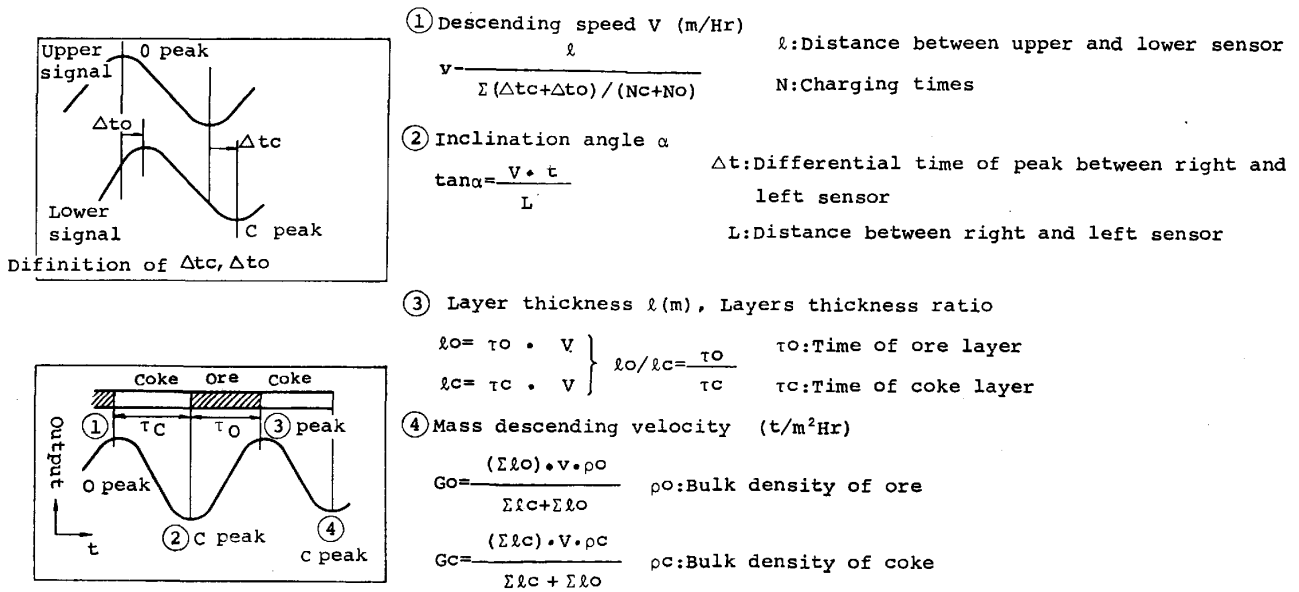


Fig. 10. Equations of burden behavior by magnetometer.

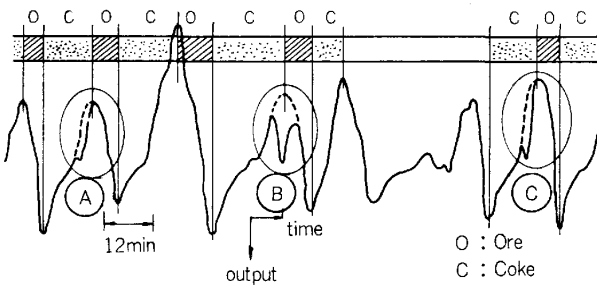


Fig. 11. Output wave form of magnetometer.

5. 融着帯形状推定モデル

当モデルは TDP のガス温度分布, SDP のガス温度分布及びガス組成分布, 塊状帯あるいは層頂における鉱石, コークスの積層状態や降下速度情報に基づいて高炉 2 次元における熱流比分布, 還元率分布等の多様な塊状帯状況及び融着帯外部形状を推定する機能を有する²⁾. 融着帯推定モデルの全体構成を Fig. 12 に示す.

このモデルの基本的考え方を以下に示す.

1) 本モデルで使用する主要な計測情報は, TDP のガス温度分布及び SDP のガス温度分布, ガス組成分布ならびに装入物の降下速度分布と鉱石, コークスの各層厚分布である.

2) 本モデルでは, ガスと装入物はともにピストンフローと仮定し, 各検出端で測定される半径方向 6 点の測定値を用い, 装入物降下速度分布, ガス流速分布, ガス組成分布, 温度分布, 鉱石の還元率分布, 融着帯の外部形状それぞれの炉高方向分布を推定する.

3) 層頂付近のガスと装入物の伝熱基礎式に基づいて

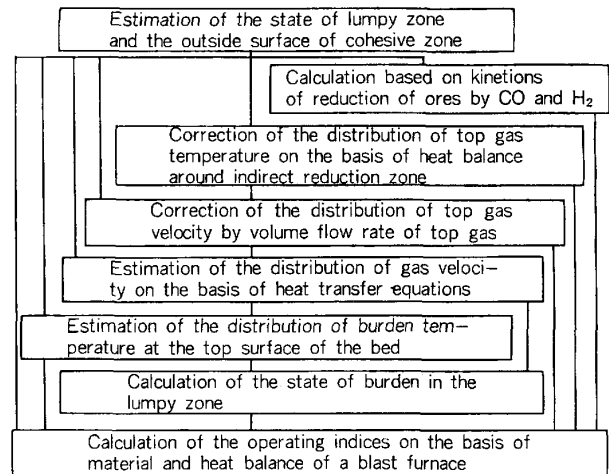


Fig. 12. Structure of the mathematical model for estimating the state of a lumpy zone in the blast furnace.

炉頂半径方向のガス流速分布を推定し, これから得られる炉頂ガスの容積流量が高炉の総括物質収支より定まる容積流量と整合するようにガス流速分布を補正する.

4) 装入物の降下速度分布を装入物の装入質量流量と整合するように補正する.

5) 塊状帯における反応としては, CO 及び H₂ による Fe₂O₃ の間接還元反応のみを考慮し, 1 界面反応モデルに基づく総括反応速度式により反応速度を推定する.

6) 塊状帯における温度, ガス組成及び還元率の各プロセス変数を推定するため, 前記の反応を考慮したガスと装入物の伝熱基礎式及び CO, CO₂, H₂ ならびに被還元 O₂ の各物質収支式からなる連立微分方程式を導

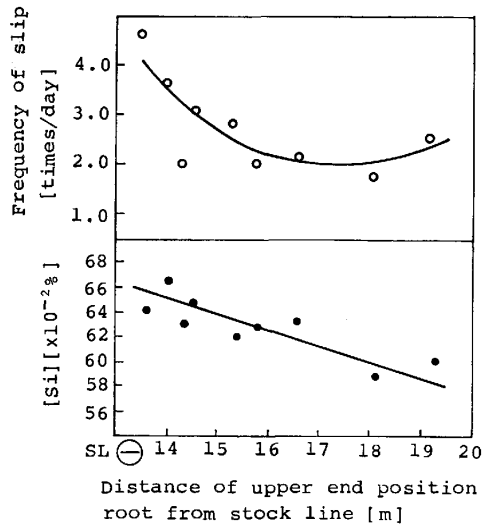


Fig. 13. Relation between upper end position of root, [Si] and slip.

き、これを Runge-Kutta-Gill 法で数値的に解く。

7) 間接還元帯の熱収支から定まる炉頂ガス顕熱量と整合するように炉頂ガス温度分布を補正し境界条件とする。

8) 層頂におけるガスと装入物の伝熱基礎式を解析的に解き、前記の炉頂ガス温度分布に対応する層頂の装入物温度分布を推定し、これを境界条件とする。

6. 融着帯形状と炉況指数との対応

高炉塊状帯観測システムは堺 2 高炉において開発実機化されたものである。以下堺 2 高炉における融着帯形状と炉況指数との対応について述べる。ここで炉況指数としてスリップ回数と溶銑 Si を取り上げた。

モデルで推定した融着帯根の上端位置とスリップ回数及び溶銑 Si の関係を Fig. 13 に示す。適正な融着帯形状は生産速度や原料条件等によつて変化するが、堺 2 高炉の適正な融着帯形状としては根部上端がストックラインより下方 16~19m のシャフト下部にあること、また頂部はストックラインより下方 5~8m の位置にあり外面形状は炉中心側に張り出していることである。この条件を満足するためには SDP 中心ガス温度 600°C 以上、中心部ガス利用率 (η_{CO} , $\eta_{CO} = CO/CO + CO_2$) が 30% 前後、TDP 中心ガス温度が 400°C 以上が望ましい。

7. 結 言

高炉塊状帯観測システムにおける計測技術と融着帯形状推定モデルを中心に述べた。炉内の情報として新たにガス流分布、装入物分布を計測することにより、融着帯の形状推定が可能となり融着帯形状と炉況との対応が明らかとなつた。今後は計測機能のよりいっそうの精度向上、特に混合層の評価方法を確立しモデルの精度向上を図るとともに最適な融着帯形状を実現するための制御方法の確立に向けて努力していきたい。

文 献

- 1) 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), p. 535
- 2) 山本崇夫, 彼島秀雄, 高橋敏夫, 緒方 勲, 林洋一: 鉄と鋼, 66 (1980), S 642
- 3) 藤井義博, 天満雅美: International-Measurement-Confederation (1979) Nov., p. 217
- 4) 藤井義博, 岡田浩郎: 日本機械学会誌, 82(1979) 731, p. 62