

討 2

炉壁温度分布による軟化融着帯形状の推定と操業解析

(株)神戸製鋼所 鉄鋼技術センター 笹原茂樹, 山口荒太, 清水正賢
 杉山 健, 稲葉晋一
 加古川製鉄所 小野玲児, 八谷 晋

1. 緒 言

高炉内における軟化融着帯の形成状態は、炉内でのガス・固体流れ、還元および熱効率と密接に関係し、特にガス利用率や溶銑中Siおよび炉熱に大きな影響を与える。^{1)~3)} これらを安定に維持するためには炉内現象に及ぼす融着帯の影響を明らかにすると共に、融着帯の形成状態や動的挙動を各種計測情報によつて的確に検知し、制御へフィードバックさせる必要がある。現在、融着帯の位置と形状には、各種センサーによる直接測定^{4)~7)} や数式モデル^{8)~11)} を用いた推定が行なわれているが、その多くは間欠的であり操業管理まで至っていない。当社では、高炉熱間模型実験¹²⁾ 及び垂直水平ゾンデ¹³⁾ を用いた実炉調査より融着帯形状と炉壁温度分布との間に密接な関係のあることを見出し、炉壁温度分布による融着帯形状の連続検知方法を開発した。ここでは、炉壁温度分布による融着帯形状の連続検知方法、融着帯形状と炉内状況および操業解析結果について述べる。

2. 計測端による軟化融着帯の把握

融着帯と炉内状況を把握するための主な計測端とその活用状況を Fig.1 に示す。

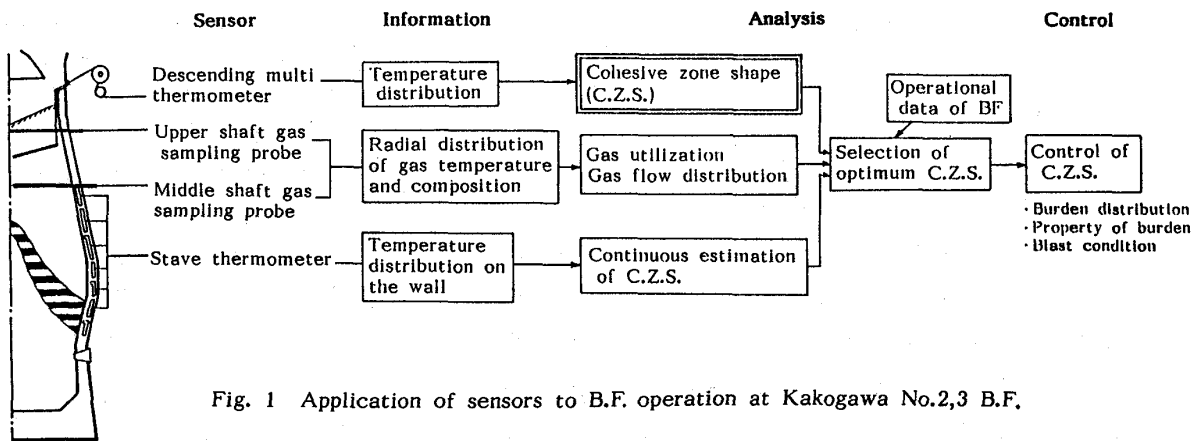


Fig. 1 Application of sensors to B.F. operation at Kakogawa No.2,3 B.F.

2.1 垂直水平ゾンデによる融着帯形状の推定

当社は、軟化融着帯形状を垂直水平ゾンデによつて直接測定している。この手法は、6本のシース熱電対を等間隔に取付けた鋼管を炉内に送り込み、炉内垂直断面の温度分布から融着帯形状を推定する方法である。¹³⁾ Fig.2に炉内温度分布の測定例を示す。融着帯形状は、1200°Cの等温ラインで代表した。多くの測定結果から、融着帯形状はFig.2に示すように逆V型、L型、W型の3種に大別されることが判明した。また、融着帯の位置や形状は長期に亘つて一定ではなく、原料粒度や性状の変動、付着物の生成等によつて変化していることが明らかになった。

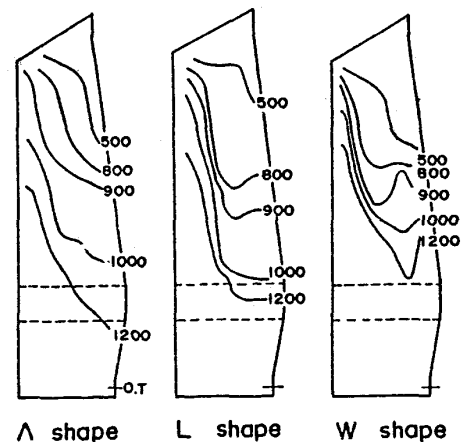


Fig. 2 Typical temperature distributions in blast furnace.

2.2 炉壁温度分布による連続検知法の開発

融着帯を日常的に管理するためには、その挙動を連続的に検知する必要がある。この手段として炉壁温度分布に着目し、融着帯形状との対応を調べた。Fig.3に模型実験の結果を示す。炉壁温度分布は各

融着帯形状に対応してそれぞれ特徴的なパターンを示し、特にシャフト中段から炉腹部の温度に注目すると、L型、逆V型、W型の順に温度レベルが上昇する。また、L型の場合は温度上昇が緩慢であり勾配が最も小さい。Fig.4に垂直水平ゾンテを用いて推定した実炉の融着帯形状と炉壁(ステーブ)温度分布の関係を示す。両者の間には、模型実験と同様な関係が認められ、炉壁温度から融着帯形状を推定し得る可能性を見出した。

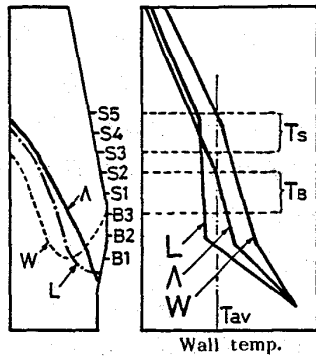


Fig. 3 Relation between cohesive zone shape and wall temperature distribution (hot model).

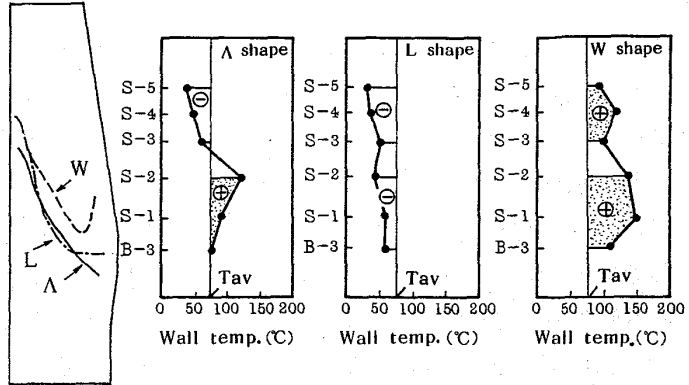


Fig. 4 Relation between cohesive zone shape and wall temperature distribution (Kakogawa No.2 BF).

炉壁温度分布を指数化するために、Fig.4に示したようにシャフト中部から炉腹部(S-5~B-3)の炉壁温度を高さ方向で2分割し、各領域の平均値をTs、Tbとして炉壁温度分布指数Sを①式のように定義した。

$$\left. \begin{aligned} & (T_S - T_{av})(T_B - T_{av}) > 0 \text{ の場合} \\ & \quad S = T_B / T_S \\ & (T_S - T_{av})(T_B - T_{av}) < 0 \text{ の場合} \\ & \quad S = -T_B / T_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{①}$$

ここで Tav : 一定期間の炉壁温度の平均値

Fig.5-(a)は垂直水平ゾンテによって推定した融着帯形状がTb~Sマップ上で明確に分類されることを示している。Fig.5-(b)に加古川№2高炉の10ヶ月間に亘る日データの解析結果を示す。データは例外なく(a)図で示した領域に区分され、本方法が融着帯の日常管理や炉況解析に有効に活用できることを確認した。

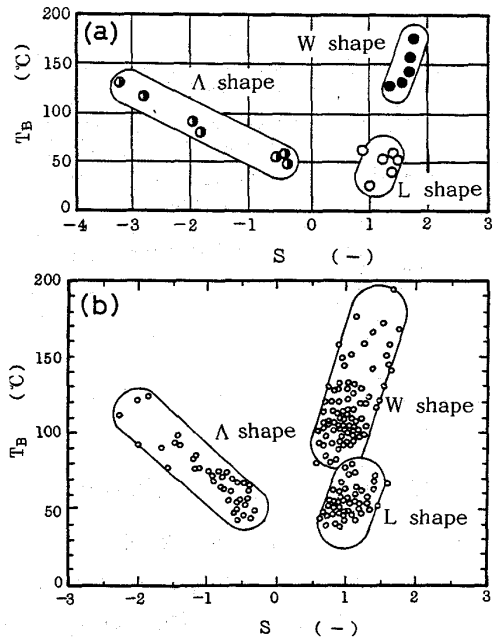


Fig. 5 Relation between cohesive zone shape and wall temperature index S.

3. 融着帯と炉内状況についての考察

3.1 融着帯形状とガス組成分布

Fig.6にシャフト上部および中部ゾンテで測定した各位置におけるガス温度と組成の関係をFe-O-C平衡と比較して示す。中間部(4p~7p)での測定データはほぼFe-FeO平衡線にあり、鉄石はシャフト上部でFe₃O₄、中部でFeOの組成近くまで還元されていると推定される。一方、中心部(2p)では、シャフト中部の900°C以上ではブルドワ平衡に近い組成を示し、シャフト上部でもCO濃度が高いことからO/Cの小さいことが伺える。また周辺部では、L型融着帯の場合にFe-FeO平衡に近いガス組成を示すが、W型の場合にはCO濃度が高く、ガスが十分利用されていない。Fig.7は炉内の500~1000°Cの塊状帯体積とガス利用率との関係を示しており、W型の場合はその体積が小さく利用率が低下している。これらの結果から、融着帯形状の制御に基づく炉内ガス流分布の適正化が低燃料比を指向する上で重要であるといえる。

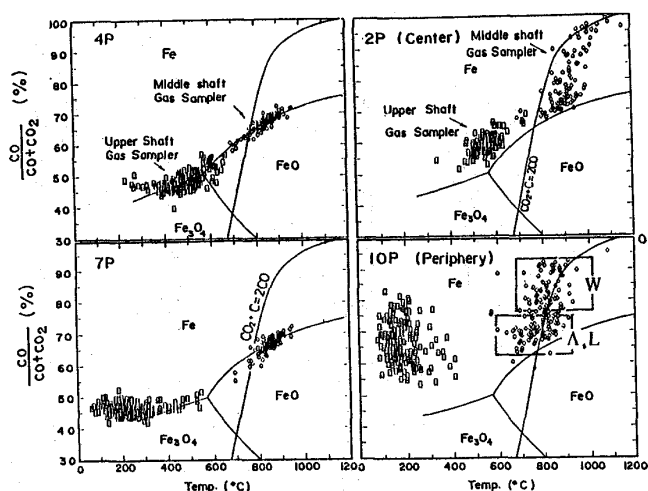


Fig. 6 Measuring results by upper and middle shaft gas sampler.

3.2 融着帯形状と炉況

融着帯の制御に際しては、融着帯形状と炉況との関係を明らかにしておく必要がある、Fig.8に炉壁温度分布指数を用いて推定した融着帯形状と送風圧力、溶銑温度、銑中Siの各変動値(σ)および補正燃料比との関係を示す。融着帯がW型の場合には、風圧変動や炉熱変動が生じ易く燃料比も高い。操業結果から判断して、炉況の安定化および燃料比の低減のためには、L型あるいは逆V型の融着帯が望ましいことがわかる。

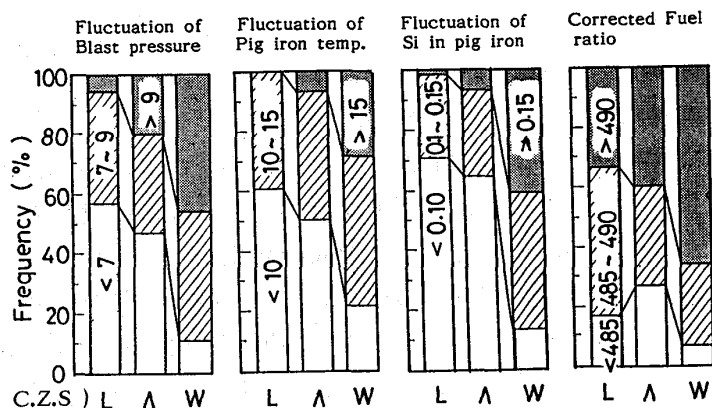


Fig. 8 Effect of cohesive zone shape on operational condition of blast furnace.

3.3 炉況変動の実験的考察

高炉熱間模型実験¹²⁾においてW型の融着帯を形成させた場合、炉壁部に接する根部融着層の形状が変化し易く、これに伴って羽口前圧力の変動が認められた。Fig.9は実験結果を用いて推算した炉内ガス流分布と圧力分布であり、炉壁に接する融着層の数によって径方向のガス流分布や羽口前圧力が大幅に変化することがわかる。一方、融着帯形状が逆V型の場合(Fig.10)には、根部融着層数に変化しても羽口前圧力や炉内ガス流の変化は小さい。この結果より、逆V型の融着帯が形成された場合に風圧や炉熱を安定に維持し易いことが判る。

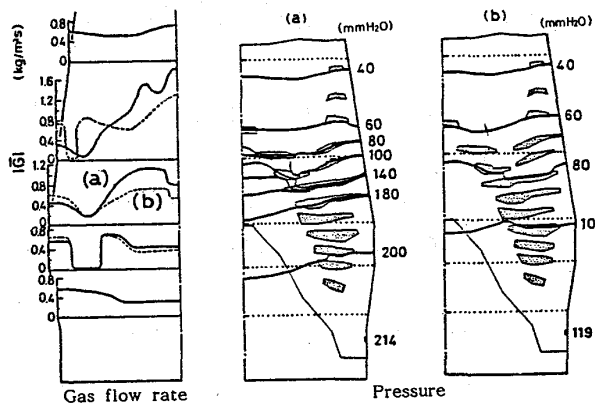


Fig. 9 Effect of the roots on gas flow and pressure distribution (W shape)

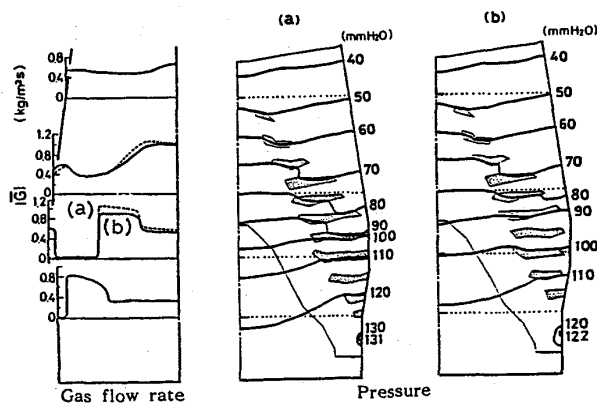


Fig. 10 Effect of the roots on gas flow and pressure distribution (Δ shape)

Fig.11はW型融着帯が形成された場合における羽口上方での装入物の降下特性を二次元模型でシミュレートした結果¹⁵⁾である。レースウェイへの固体の供給は融着帯最下点(p点)とレースウェイへの流入点(s点)との位置関係に大きく依存し、W型のようにs点がp点を通る滑り線より炉壁側に位置する場合(B図)には周辺部(W側)の粒子のみが降下する。この様な条件下で周辺部からの粒子の供給が停止した場合(C図)には融着帯下部が空洞化し、スリップの発生し易い状況になる。熱間模型実験においても融着帯がW型化した場合には、羽口直上部で棚吊りとスリップが多発し、不規則的な荷下りが観察された。

4. 融着帯の制御

融着帯形状はO/C分布に強く依存することを模型実験(Fig.12)によって確かめているが実高炉では同一装入条件下でも原料性状によって異った形状を示す。Fig.13に焼結鉱のRDIおよび-5mm%の影響を示すが細粒の発生が多い場合にW型を示す頻度が高い。これは炉内でのガス流分布が装入物分布だけでなく、降下時における堆積層の粒度変化や層構造変化にも大きく依存していることを示しており、融着帯の制御に当っては炉内状況の適確な検知に基づく適正な制御手段の選択が極めて重要と言える。現在当社は、装入物分布と原料性状の両面から融着帯の適正化に努めているが、今後炉壁部での層構造変化をも考慮した総合的な制御法を検討していく必要がある。

5. 結 言

軟化融着帯形状と各種計測端情報との関連について検討し炉壁温度分布による融着帯形状の連続検知法を開発した。これに基く炉況解析から高炉安定操業に適した融着帯形状はL型および逆V型であることを明らかにした。現在、この形状を指向して装入物分布制御および原料性状管理を行っているが、より適確な融着帯の制御を目指すには炉内での原料性状の変化や炉下部での降下状態を連続的に検知できるセンサーが必要であり、特に炉上部と下部の現象の関連性を明らかにすることが炉況制御の鍵になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 磯部ら：鉄と鋼，69(1983)12,S865
- 2) 渋谷ら：鉄と鋼，68(1984)12,S783
- 3) 上仲ら：鉄と鋼，70(1984)12,S801
- 4) 梶川ら：鉄と鋼，66(1980)4,S38
- 5) 福島ら：鉄と鋼，67(1981)4,S69
- 6) 岩尾ら：鉄と鋼，69(1983)12,S867
- 7) 山本ら：鉄と鋼，71(1985)12,S829
- 8) 宮本ら：学振54委提出資料，54委-1624
- 9) 成田ら：学振54委提出資料，54委-1576
- 10) 栗田ら：鉄と鋼，66(1980)13,P118
- 11) 杉山ら：鉄と鋼，71(1985)12,S884
- 12) 西田ら：学振54委提出資料，54委-1694
- 13) 西田ら：鉄と鋼，67(1981)4,S72
- 14) 笹原ら：鉄と鋼，71(1985)12,S890
- 15) 清水ら：鉄と鋼，68(1982)8,P936

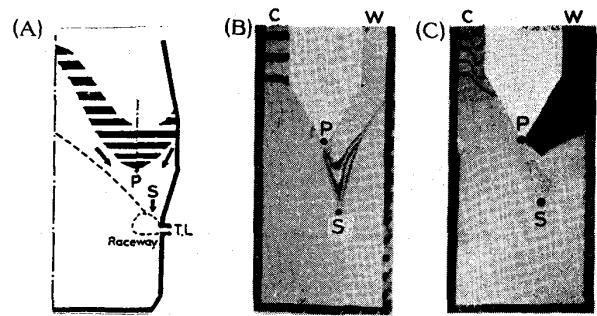


Fig. 11 Effect of discharging point on solid flow in the case of W cohesive zone shape (cold model).

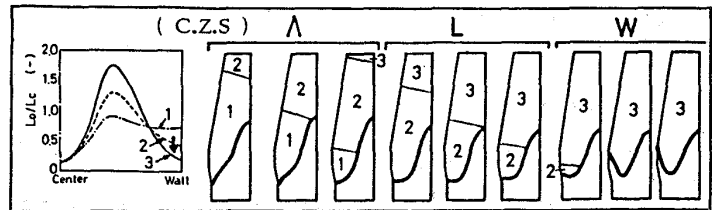


Fig. 12 Transformation of cohesive zone shape with change of burden distribution (Hot model).

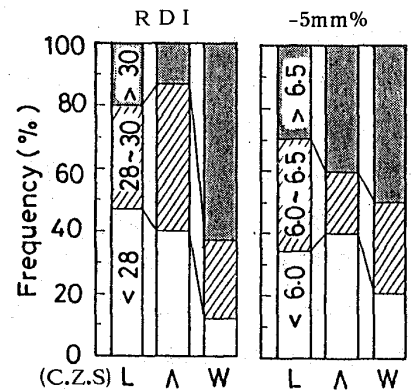


Fig. 13 Effect of properties of sinter ore on cohesive zone shape.