

討 1

検出端情報に基づく融着帯挙動の解明とその制御技術

日本鋼管(株)京浜製鉄所 佐藤 武夫 山岡 洋次郎 竹部 隆 木村 亮介
 福山製鉄所 山田 裕
 中央研究所 大野 陽太郎 システム技術研究所 宮崎 孝雄

1. 緒言

当社の高炉においては、従来より、各種検出端情報や数学モデルによる炉内状況の推定・診断と管理を行ってきた。しかしながら、これらの検出端情報の量と精度の不足から、炉内状況の総合的な把握は必ずしも十分ではなく、また、モデルの利用も大部分がオフライン解析にとどまっていた。このような背景から、現在、より総合的かつ精度の高い炉内状況の推定とそのオンライン制御をめざして、各種新センサー、制御モデルおよび制御装置の開発を進めている。本論文では、今回の討論テーマの趣旨に沿って、当社で開発したTDR(Time-domain reflectometer)法¹⁾による融着帯挙動の測定・解析結果と、これらの知見をもとに開発中のオンライン融着帯制御モデルに重点をおいて報告するとともに、新センサーの開発状況についても報告する。

2. 融着帯挙動

高炉の解体調査から、炉下部において、装入物が固体から液体に状態変化する所謂、軟化融着帯の存在が明らかとなった。従って、その位置、形状はガス流分布・温度分布などの炉況の変動を集約的に示す重要な指標であり、逆に炉況を制御する際の最も重要な対象と考えられる。このような観点から、当社では、TDR法(鉍石の熔融温度に近い融点をもつ特殊ケーブルを炉頂から装入し融着帯レベルを測定する方法)による融着帯挙動の調査に取り組んできた。

その一例として、融着帯レベルの時系列変化をFig. 1に示す。(CZLi: 融着帯上面の羽口からの距離)

この時の融着帯形状は逆V型であり、その変動巾は、炉の中心・中間部では小さいにも拘わらず、周辺部では5m程度と大きくなっている。解析の結果、この挙動は炉頂部で計測した装入物降下速度とガス流分布の不均一性と相関があり、Figs. 2, 3に示すように、塊状帯におけるガスと固体の熱流比 γ ($=C_g W_g / C_s W_s$)から説明できることが判明した。なお、熱流比の推定方法については後述する。

ここで; C_g, C_s : ガス, 固体の比熱, W_g, W_s : ガスと固体の質量流量。

Fig. 4は炉周辺部の融着帯レベルとシャフト下部熱負荷との関係を示したものである。現状、炉壁からの熱負荷は、冷却水温度上昇と炉壁温度計(炉内壁面から100mm鉄皮側に設置×円周方向8本)から検出され、融着帯レベルと熱負荷との間には逆相関が認められている。この挙動は、融着帯のレベルが上昇した方向のコークス

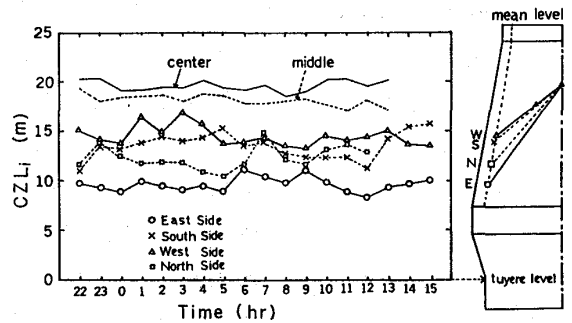


Fig.1. Change in cohesive zone level (CZLi).

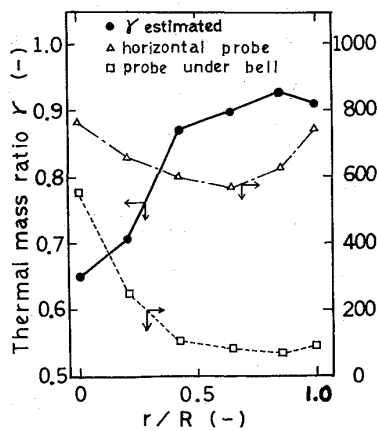


Fig.2. An example of estimated radial distribution of thermal mass ratio.

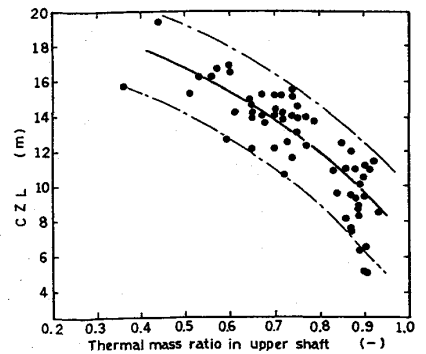


Fig.3. Relation between measured cohesive zone level and estimated thermal mass ratio.

・スリット数が他の方向より減少し、その部分の炉内ガス量が相対的に低下するためと推定される。以上述べたように、高炉の融着帯レベルは、熱流比に応じて分布をもっており、現在、その円周方向および半径方向の分布を、オンラインで制御するシステムを開発中である。以下にその概要を紹介する。

3. 融着帯制御モデル

3-1 融着帯円周バランス制御システム²⁾

融着帯の円周方向挙動に関して、TDR法による測定結果と3次元ガス流れモデル解析³⁾による知見をまとめると以下のようになる。

- (1) 融着帯レベルは数時間周期で変動し、24時間平均値でも、円周方向のアンバランスはかなり大きく、これは熱流比のアンバランスと密接に関係している。
- (2) 3次元ガス流れモデルによる計算から、融着帯の円周方向分布がアンバランスになった場合には、融着帯の高い方向でガス流速が低下することが確認されている。このことは、この方向での塊状帯の熱流比が大きく、やがて融着帯レベルは低下すると推定され、融着帯レベルの周期的変動のメカニズムを示唆している。
- (3) 融着帯レベルの不均一は、炉壁部の圧力分布・温度分布からも推定することができる。

従って、円周バランスの制御を行うためには、現在の融着帯レベルと熱流比とを計測し、これをもとに以後数時間単位の融着帯の推移を予測した上で、操業アクションを取る必要があると考えられる。Fig. 5 にその制御方法の概要を示す。また、熱流比から推定された現時点での融着帯レベルが、今後どのように推移してゆくかを推定し、制御の要・不要を判定する方法の概念をFig. 6 に示す。図中の曲線は平均的な熱流比と融着帯レベルの関係を示し、また、矢印はアクションを取らないで放置した場合の炉内の熱的状态(熱流比と融着帯レベルの相対関係)の変化の方向を示す。本法は、まず、制御しようとする融着帯レベルの上下限CZL(1)、CZL(2)と、それに対応する熱流比 γ_1 、 γ_2 により、予め炉内の熱的状态を領域分割しておき、次に、この分割領域の中で、(1)融着帯が高く、熱流比の低い領域A、(2)融着帯が低く、熱流比高い領域Bに対して、後述する熱風制御バルブにより、羽口毎の熱風量を制御し、適正な領域に戻す方法である。他の領域においては、熱流比と融着帯レベルの相対関係から、放置していても吹抜け、生鉱下りなどの炉況異常を起こさないで適正領域に収束する。ここで、制御しようとしている融着帯レベルの上下限CZL(1)、CZL(2)の決定は、許容レベル偏差 ΔCZL を任意設定することにより行なう。

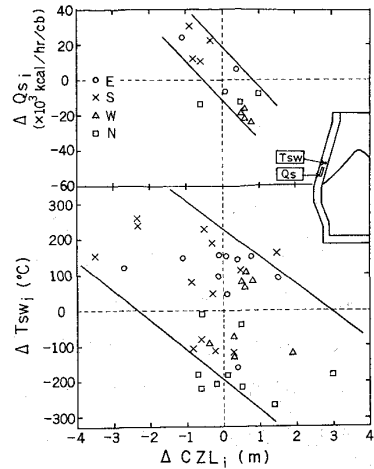


Fig.4. Relation between heat loss and $\Delta CZL_i (=CZL_i - CZL_{av})$.

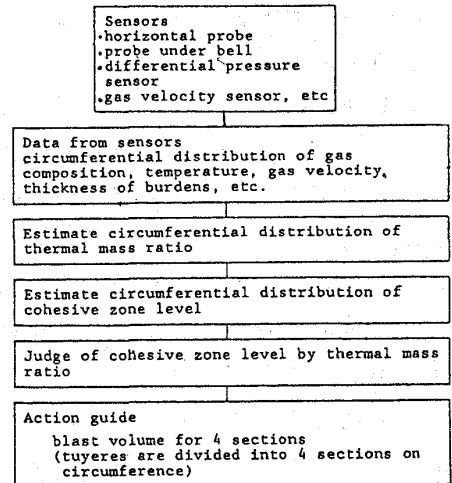


Fig.5. System for controlling the circumferential balance of cohesive zone level.

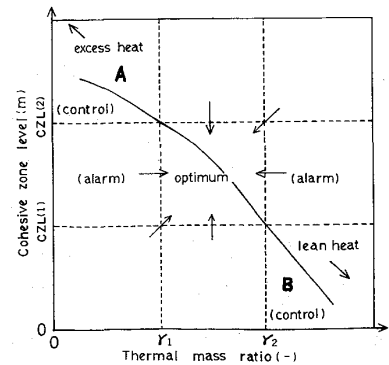


Fig.6. Diagram for judging of cohesive zone level by thermal mass ratio.

$$CZL(1) = CZL - \Delta CZL \dots \dots (1)$$

$$CZL(2) = CZL + \Delta CZL \dots \dots (2)$$

CZL : 現時点での円周方向の
平均融着帯レベル

3-2 融着帯半径方向分布制御システム

本システムは、前述の融着帯円周バランス制御システムにより、融着帯の円周バランスを確保した後、融着帯の半径方向分布を目標分布に合致させるよう送風条件（温度・湿度）および装入条件（ムーブルアーマ（MA）位置、ストックライン（SL）レベル）を制御して、熱流比を制御するシステムである（Fig. 7）。

半径方向の検出端情報としては、現在のところ、ベル下ゾンデ温度・ガス組成分布、SL下4.9mに設置した水平ゾンデの温度・ガス組成分布、重錘式炉口プロフィール計による装入物降下速度分布などを採用している。また、装入条件に応じた半径方向の層厚分布 $Lo/(Lo+Lc)$ (Lo, Lc : 鉱石, コークス層厚) および表面形状は、装入物分布モデル⁴⁾により推定している。半径方向の熱流比分布は、これらの情報を用いて、以下の式により推定する。すなわち、シャフト部におけるガス - 固体間の熱収支は、還元反応熱も考慮すると③④式で表わされる（Fig. 8）。

$$Wg \cdot Cg \cdot dTg = Ws (Cs + CSR) dTs \dots \dots (3)$$

$$CSR = \frac{(\Delta Y_{CO} \cdot \Delta H_{CO} + \Delta Y_{H_2} \cdot \Delta H_{H_2}) Wg}{(Tg \cdot B - Tg \cdot A) Ws} \dots \dots (4)$$

③式を層頂、水平ゾンデ位置における境界条件のもとに解くと⑤式が得られる。

$$\gamma (Tg \cdot A - Ts \cdot A) \exp((1-\gamma)\lambda(B-A)) + \gamma (Ts \cdot A - Tg \cdot B) + (Tg \cdot B - Tg \cdot A) = 0 \dots (5)$$

$$\lambda = \frac{a \cdot hp}{(Ws \cdot Cs)} \dots \dots (6)$$

⑤式に半径方向分割層毎の $Tg \cdot A, Tg \cdot B, Ts \cdot A, A, B, \lambda$ を代入して数値計算すれば、分割層毎の γ が求まり、 γ より Wg が求まる。

記号

A, B : 層頂, 水平ゾンデのストックラインからの距離

Tg, Ts : ガス, 固体の温度

$Tg \cdot A, Tg \cdot B, Ts \cdot A$: 層頂, 水平ゾンデ位置でのガス温度および層頂での固体温度

$\Delta Y_{CO}, \Delta Y_{H_2}$: 層頂, 水平ゾンデ間の CO, H₂ ガス組成の変化

$\Delta H_{CO}, \Delta H_{H_2}$: CO, H₂ 還元反応熱

a : 伝熱面積 (単位体積当り)

hp : ガス - 固体間の熱伝達係数

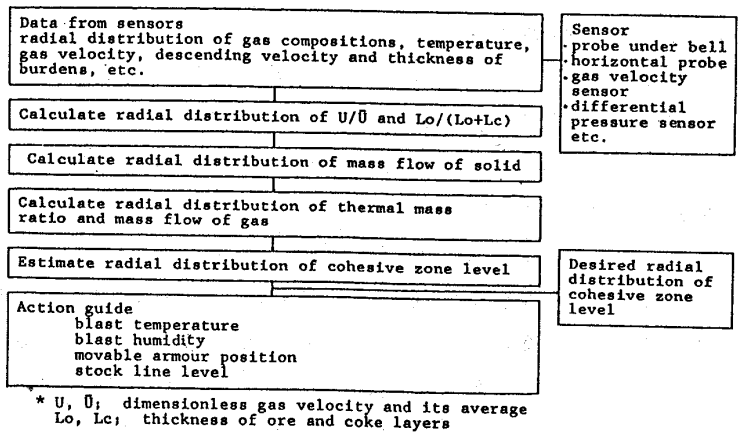


Fig.7. System for controlling the radial distribution of cohesive zone level.

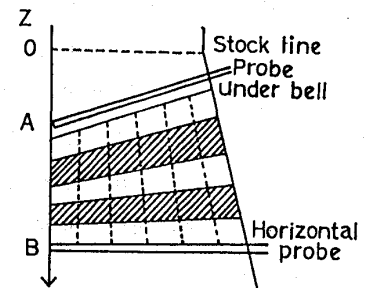


Fig.8. Conception for calculating the radial distribution of thermal mass ratio.

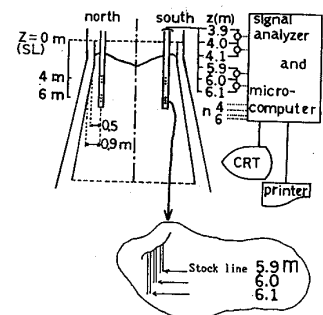


Fig.9. System for measuring thickness and descending velocity of burdens.

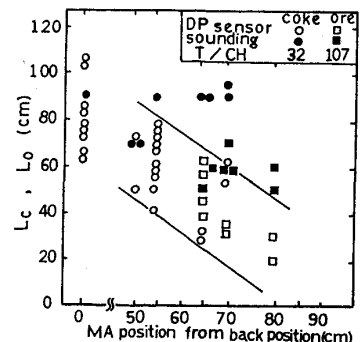


Fig.10. change in thickness of ore and coke-layers (Lo, Lc) with movable armour position.

4. 検出端・制御装置の開発

前記オンラインシステムによる円周および半径方向の融着帯制御の精度向上のためには、検出端の精度改善および制御装置の開発が是非とも必要であり、現在、以下の開発を進めている。

4-1 差圧式層厚降下速度計⁵⁾

これは、従来の重錘式検尺方法に代る装入物分布および降下速度の検出端として開発中のものであり、現在、扇島第2高炉南北2方向の垂直ゾンデに設置して実用テストを行っている(Fig. 9)。本検出端は、炉内任意の位置における微小区間内3点の差圧を連続的に測定し、鉱石層とコークス層の通気性の差による差圧の周期的変動を、オンラインで解析処理することによって、層厚と降下速度を求めようとするものである。

本装置による測定結果の一例として、チャージ装入(C↓O↓)した場合の、MA位置の変更によるLo、Lcの変化をFig. 10に示す。本装置により計測した層厚は、重錘式検尺から求めた値に比べて、MA位置との相関が明確であり、また、炉体レンガの損耗による変動も検知することができるなど、計測精度は高い。

4-2 層内ガス流速計⁶⁾

本検出端は、装入物層内のガス流速を直接計測することを目的として現在開発中のものであり、その概略構造をFig. 11に示す。また、実炉での測定結果の一例(休風立上時の流速変化)をFig. 12に示すが、送風量の変化と良い対応関係が得られており、現在実用化を急いでいる。

4-3 熱風制御バルブ⁷⁾

本バルブは、融着帯の円周バランスを制御するための手段として開発(旭硝子(株)と共同)したものであり、バルブ本体にSiCを使用することにより、1300°Cまでの高温に長時間耐え得る構造となっている。約1年半前より、扇島第2高炉に1基設置(Fig. 13)して、各種テストを実施してきたが、風量制御性、耐久性など使用上の問題は全く認められない。今後は、基数を増やすことにより、上記円周バランス制御に適用する予定である。

5. 結言

以上、京浜製鉄所において現在開発中の新検出端とその利用技術について概略を紹介したが、この他に、操業中の炉内状況のより正確な把握と解析を目的として、羽口ゾンデ(レースウェイ深度・温度・ガス組成測定)、シャフト中部サンプラー(半径方向の温度・ガス組成測定・操業中の炉内試料採取)、シャフト下部サンプラー(同左、休風中の炉内試料採取)を設置ないしは設置中である。今後は、これらの情報を総合体系化することによって、より高度な操業管理を行ってゆきたいと考えている。

参考文献 (全て鉄と鋼)

- 1) 福島ら: Vol. 67(1981), S69
- 2) 大野ら: Vol. 70(1984), S788
- 3) 大野ら: Vol. 70(1984), S789
- 4) 西尾ら: Vol. 70(1984), S46
- 5) 佐藤ら: Vol. 71(1985), S896
- 6) 宮崎ら: Vol. 71(1985), S827
- 7) 佐藤ら: Vol. 70(1984), S743

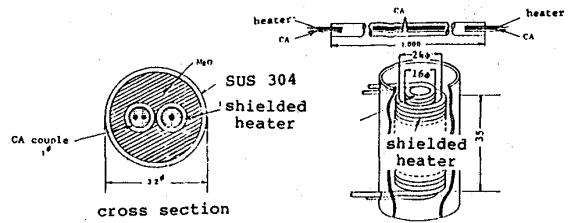


Fig. 11. Schematic drawing of radiation shielded velocity sensor.

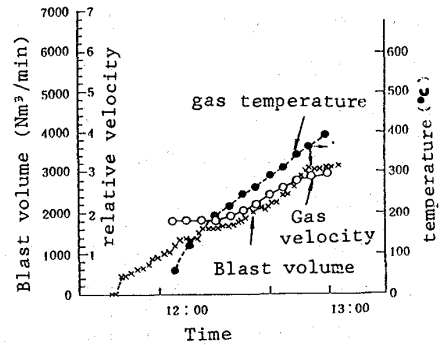


Fig. 12. Gas velocity measured by sensor.

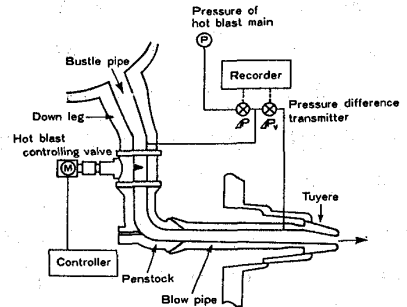


Fig. 13. Schematic drawing of installation of hot blast controlling valve.