

高炉炉床部における炉芯浮沈と溶銑の流動挙動

Floating/Sinking of Deadman and Liquid Flow Behavior in Blast Furnace Hearth

篠 竹 昭 彦^{*(1)} 一 田 守 政^{*(2)} 大 塚 一^{*(3)} 栗 田 泰 司^{*(4)}
 Akihiko SHINOTAKE Morimasa ICHIDA Hajime OOTSUKA Yasushi KURITA

抄 録

高炉の炉床を模擬した温水模型実験を行い、炉床の流動伝熱特性を調べた。数学モデルによる計算を併せて行い、実高炉の流動伝熱挙動を推定した。炉芯浮上量が大きくなると、空隙内の高さ方向に一樣な流れにはならず、炉芯下端の直下部に速い流れができ、炉底近傍には停滞域ができる。炉底粘稠層よりも炉芯中央部の不透過領域が側壁部の環状流の原因となる。実炉の炉芯の浮沈を推定した結果、浮沈挙動と炉底温度の変化とが時間遅れを持って相関を持つ事例がみられた。炉床側壁温度が上昇した 1 事例を考察し、炉底周辺部のコークスフリー領域から出銑口へ向かう上昇流が原因であると推定した。

Abstract

The warm water model experiment that assumed the blast furnace hearth has been performed, and the liquid flow and the heat transfer property have been examined. The experimental result was considered using the calculation based on the mathematical model, and the flow and the heat transfer of a real furnace were presumed. The flow was not uniform in the direction of coke free layer height when the deadman floating height was large, there existed fast flow region in the right under part of the deadman bottom and stagnation region in the furnace bottom part. Not the furnace bottom upheaval but the deadman low permeability did strengthen circulating flow near the sidewall. Measures for floating or sinking of the deadman in an actual blast furnace were evaluated from the balance between solid load and buoyancy. In some cases a negative correlation was found between the calculated sinking depth and the center temperature of furnace bottom with some time delay. It was considered that when a deadman behaves in a specific manner, it may affect the temperature of furnace bottom through the liquid flow in the hearth region. From the consideration of period and spatial distribution of temperature rise, it was estimated that flows of molten iron which move in the hearth toward tapholes are the cause of the sidewall temperature rise.

1. 緒 言

高炉炉底の損耗は粘稠層の消滅、カーボンレンガの脆化が主要因である。この損傷メカニズムには炉床部の溶銑流が大きな影響を及ぼしている。溶銑流は炉底形状、出銑口位置、炉内浸食プロファイルなどの設備的条件、出銑口使用方法などの直接的な操業要因、炉芯形状や炉芯充填構造など一定期間の操業条件の継続または変動により現れる炉内充填状態によって変化する。

炉底溶銑流については従来いくつかの研究が行われている。例えば日月ら¹⁾は、数値計算および模型実験により炉底にフリーゾーンがある場合とない場合の流れの違いを検討し、狭い空隙がある場合ここを溶銑が多く流れることを報告した。富田ら²⁾も数値計算および模型実験による湯流れの検討を行い、炉芯コークスに粒径分布がある場合流れは細粒より粗粒側に偏ることを報告している。

Standishら³⁾も粒径分布の影響を実験的に検討している。柴田ら⁴⁾は、貯排銑時の炉底コーナー部のフリーゾーンの形成を 2 次元の模型実験により見出し、3 次元の湯流れ数値計算でコーナー部のフリーゾーンは環状流を発達させることを報告している。このほか、稲田ら⁵⁾の炉底湯流れと侵食の進行を組み合わせたモデルや、渡壁ら⁶⁾のトレーサ吹き込みと解体時の炉底調査による炉底保護機構の推定が報告されている。

以上のように、コークフリーゾーンに注目した溶銑流れの研究は多いが、炉芯充填構造の違いが溶銑流に及ぼす影響や、実炉における炉芯の浮沈と溶銑流の関係に注目して検討した例は少ない。

本研究ではまず高炉炉床充填構造に注目して、充填構造と湯流れの関係性を明確にすることを目的として模型実験を行った。次に数学モデルを用いた炉床部溶銑流の流動伝熱計算を行い、炉床充填構造変化時の実炉の湯流れと温度分布の変化を検討した。さらに、実炉

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター 製銑研究開発部 主任研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL: (0439)80-2835

^{*(2)} 環境・プロセス研究開発センター 製銑研究開発部 研究審議役 工博

^{*(3)} (元)環境・プロセス研究開発センター プラントエンジニアリング部
 マネジャー (現 太平工業株式会社)

^{*(4)} 八幡製鐵所 生産技術部 マネジャー

の炉床の力学バランスから炉芯浮沈挙動を推定して炉芯浮沈と炉底温度との関係を検討し、炉床側壁温度変化時の事例について炉床充填構造と湯流れ状態を考察した。

2. 炉床湯流れに関する模型実験

2.1 実験装置および方法

実験装置を図1に示す。高炉炉床部を模擬した円筒形水槽(内径0.57m)内に炉芯に相当する充填材(粒径4mmのポリプロピレン粒子)を入れ、所定温度の温水を循環させて、炉底、側壁、炉内高さ方向の温度と、炉底と側壁の一部では熱流束も測定した。充填材の密度は約900 kg/m³である。炉内の温度が平衡になった状態で着色液をトレーサとして投入し、透過光センサを用いて出鉄口に到達するまでの時間と出力波形を測定した。トレーサの投入位置および温度、熱流束の測定位置を図2に示す。

標準実験条件は、炉底から高さ15または25 cmの出鉄口を使用し、水位を出鉄口上10 cm一定に保ち、60 の温水66.7 cm³/sを均一に滴下させて等量を排出した。炉芯浮上量は0~5(場合により0~20)cmの範囲で変化させた。炉底、側壁は20 の水で冷却した。

2.2 実験結果

炉芯浮上高さについては、従来の多くの研究が、炉芯が沈下して

いる時とわずかに浮上して狭い空隙ができている時の流れの違いを主に研究し、空隙に高速流領域ができることを述べている。本研究では、近年多くの高炉の炉底がより深くなっていることを考慮して、炉芯が大きく浮上して広い空隙ができる条件まで実験を行った。結果の1例として、出鉄口高さを炉底から25 cmとし、炉芯浮上量を0~20 cmの範囲で変化させた場合の、トレーサ投入後出鉄口から出てくるまでの時間を図3に示す。水位は炉底から35 cm一定に維持し、炉芯浮上量は充填する粒子の量を変化させて変えた。横軸はトレーサ投入位置から出鉄口までの水平距離を示す。縦軸の時間は、トレーサ濃度が最大になる時刻を主流の到達と考え、トレーサ投入後、出鉄口での透過光強度の減衰が最大となるまで、すなわち波形のピークまでの時間を示した。

炉芯が沈下している(浮上0 cm)場合に比べて、浮上5 cmでは、全体にトレーサの到達時間が長くなっており、充填層の流速が低下しているか流路が遠回りになっている。浮上10 cm以上では、ある距離を超えるとトレーサの到達時間は短くなり、炉底の空隙の高速域経路になっている。浮上10 cm以上で炉底の高速域経路と推定される領域では、浮上量が大きい場合ほどトレーサは速く到達している。これは空隙に到達するまでの充填層の厚さが小さくなっていることに対応し、空隙が広がっても空隙内の流速はさほど小さくならないことを示唆している。すなわち、炉底の空隙が大きい場合、空隙内の高さ方向に一樣な流れにはならず、炉芯下端の直下部に速い流れができ、炉底近傍には大野ら^{7,8)}も指摘しているような流れの停滞域ができていると考えられる。

実炉において、湯流れの環状流化が炉床側壁部の温度が上昇する原因の1つと考えられている。炉芯浮沈とフリーゾーンの形成のみでは環状流化は説明しにくく、粘固層(凝固層)の発達による炉底隆起や炉芯内低通液性領域の発達が原因となる可能性がある。そこで、これらの影響を調べた。

炉底隆起の影響を調べる実験では、炉底中央部に円錐形小: D=20, h=5; 大: D=40, h=10(cm)の障害物を設置した。炉芯内低通液性領域の影響を調べる実験では、炉芯下部に円筒形 D=40, h=20(cm)の障害物を設置した。すなわち最も極端な例として、炉芯が完全に不透過となった条件を想定した。

炉底隆起条件および炉芯中央部に不透過領域を設定した場合の、投入トレーサの出鉄口までの到達時間の例をそれぞれ図4と図5に示す。炉底に山型の隆起領域があっても、必ずしも環状流化の傾向は見られなかった。これに対し、不透過領域を設定した場合は、炉

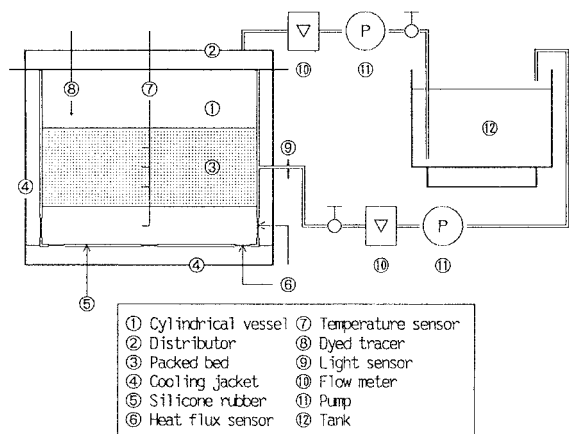


図1 実験装置
Experimental apparatus

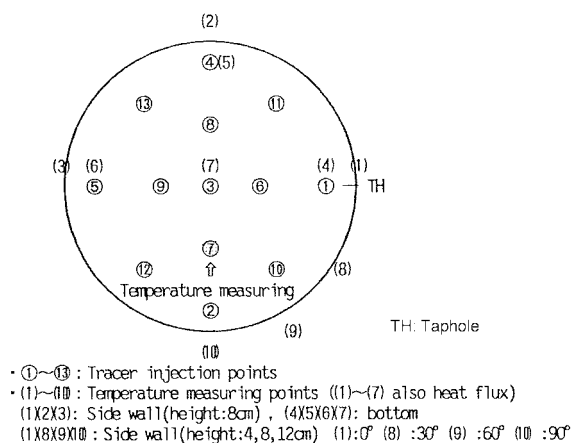


図2 温度測定・トレーサ投入位置
Temperature measurement and tracer injection points

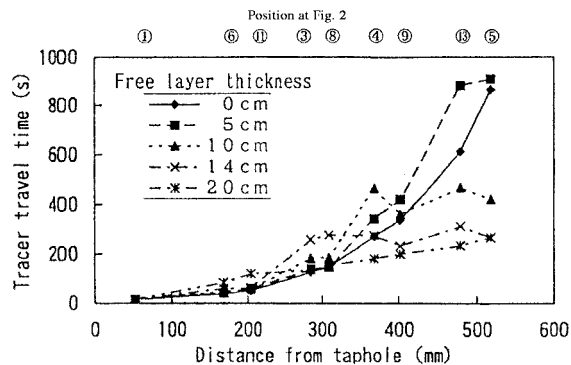


図3 トレーサ到達時間(出鉄口高さ25cm)
Tracer travel time (taphole height: 25cm)

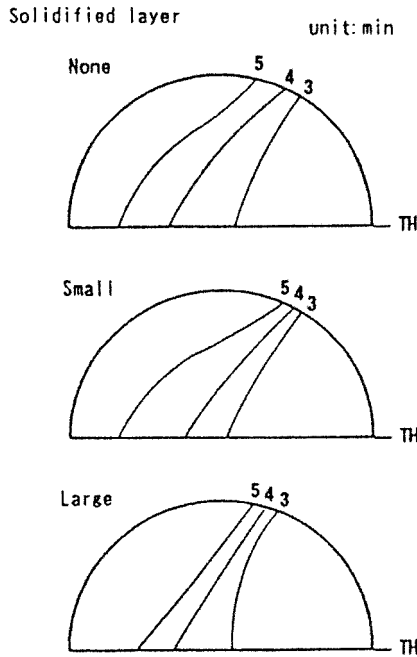


図4 トレーサー到達時間分布(凝固層の影響,フリー層5cm)
Tracer travel time map (effect of solidified layer, free layer 5cm)

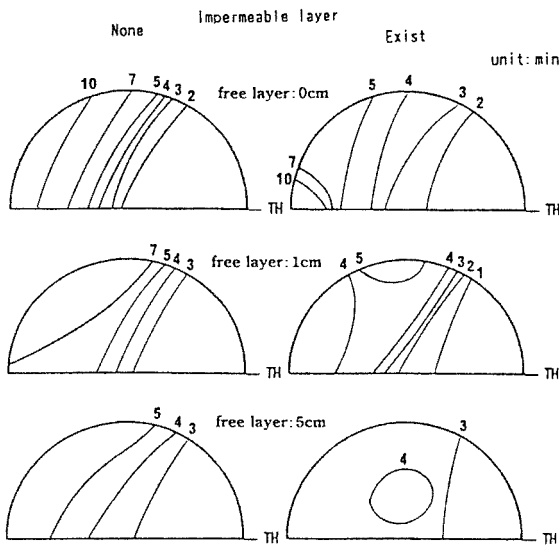


図5 トレーサー到達時間分布(低通液域の影響)
Tracer travel time map (effect of impermeable region)

芯浮上量にかかわらずトレーサの到達時間が早くなっており、特に出銑口から90度以上の角度に位置する周辺部からの到達が早く、環状流の発達を示している。側壁部の熱流束も増加した。

3. 数学モデルを用いた流動伝熱計算

湯流れモデルは高炉炉底湯溜まり部を計算領域とする3次元円筒座標系定常モデルである。流体は実炉条件では溶銑のみを考え、スラグは無視した。

基礎式は(1)の形で与えられる。 $\phi = 1$ が連続の式、 μ , w が運動量保存式、 h がエネルギー保存式を示す。速度変数 μ , w に対する生成項は3次元円筒座標系であるので(2)-(4)で与えられる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w\phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{r\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi \quad (1)$$

$$(\phi = 1, \mu, w, h)$$

$$(\mu, w: \text{velocity of } r, z \text{ direction}; h: \text{enthalpy})$$

$$(\Gamma_\phi: \text{diffusion coefficient}; S_\phi: \text{source term})$$

$$S_u = -\frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \quad (2)$$

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\rho (ur)^2}{r^3} - \left(\frac{\mu}{r^2} \right) \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial (ur)}{\partial \theta} \right) + v \right] \quad (3)$$

$$S_w = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

$$\text{grad}P = -\{f_1 + f_2 | \vec{v} | \} \vec{v} \quad (5)$$

$$f_1 = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{(\Phi d_p)^2 \epsilon^3 \rho} \quad (6)$$

$$f_2 = 1.75 \frac{1-\epsilon}{(\Phi d_p)^2 \epsilon^3 \rho} \quad (7)$$

$$q/A = \alpha (T - T_0) \quad (8)$$

コークス充填層の通液抵抗はErgun式(5)-(7)に従う外力が働くとして仮定した。 ρ , μ は流体の密度, 粘度, 空隙率, d_p は粒子の粒径, 形状係数である。境界条件として, 流れについては側壁と底面で壁関数を用いた。伝熱については, 充填層の固体粒子は液体と同じ温度になっていると仮定し, 側壁と底面では単位面積あたりの抜熱速度を(8)式すなわち境界面最近傍の流体の温度の関数として与えた。(8)式の左辺は単位面積あたりの熱流束で, 熱伝達係数は実験結果と実炉熱損失の実績から定めた。計算には汎用ソフトウェアPHOENICSを使用した。

図6に, 炉床径11m, 湯溜まり深さ3m, 出銑口高さ2.55mの炉で図のように炉底隆起および低透過領域を設定した場合の炉床の湯流れを計算した例を示す。溶銑滴下分布は図に示す周辺と中心の2領域に分け, 周辺は1550, 中心は1350で滴下量は周辺の1/5と仮定した。炉底上のコークフリーゾーンは0.6mとした。左側の中央断面図は出銑口を通る直径断面, 右側の側壁投影図は側壁に沿う最も外側の計算領域の流れと温度分布を示す。側壁投影図は出銑口から48°ずれた方向から見た側壁の曲面を平面に投影したものである。計算でも実験と同様, 炉底隆起だけでは側壁部の流速や温度の上昇はなく, 低透過領域がある場合に側壁部の流速, 温度が上昇する結果が得られた。

4. 実炉における炉芯浮沈の推定

実際の高炉での炉芯の浮上/沈下は直接測定が困難であり, 炉芯浮上は必ずしも共通認識とはなっていない。そこで, 実炉の操作データを用いて荷重と浮力のバランスを計算し, 炉底中心温度との相関を調べることで浮沈の有無を推定した。計算は田中ら⁹⁾の“炉芯沈降指数”の方法にならない, 荷重は融着帯平均高さより上部の鉱石とコークス, 融着帯平均高さより下部のコークスの重量の合計, 浮力は溶銑, スラグの浮力と送風ガスの圧損の合計で定義した。平均融着帯高さは田村ら¹⁰⁾の式で計算されるSi移動距離を融着帯-羽口の垂直距離と見なした。この方法で算出される炉芯沈降指数は長さの次元を持ち, 物理的には炉芯の液面下の沈み深さすなわ

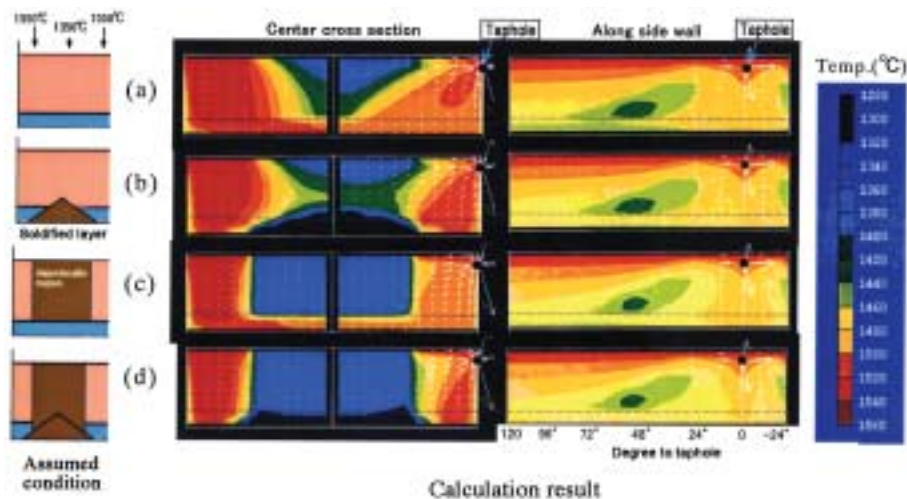


図6 湯流れと温度分布に及ぼす炉底凝固層と炉芯低通液域の影響
Effect of solidified layer and impermeable region on liquid flow and temperature

ち液面と炉芯下端の垂直距離に相当するが、炉内装入物と炉壁との応力を考慮に入れていないため、実際の沈み深さより大きな数値を示す。従ってこの指数は1つの高炉で炉芯が浮上傾向にあるか沈下傾向にあるかを示すと考えた。

新日本製鐵八幡製鐵所戸畑第1高炉の1995年7月から1996年9月までについて、10日間の平均を単位(1旬)とした炉芯沈降指数の計算値と炉底中心温度の推移を図7に示す。同一時期の両者の相関をとった図を図8に、炉芯沈降指数と3旬(1か月)後の炉底中心温度の相関をとった図を図9に示す。炉芯沈降指数は、同一時期の炉底中心温度との間に相関は見られないが、1か月後の炉底中心温度との間に逆相関が見られた。一部の連続した期間のデータは逆相関を示す直線から少し離れていた。

上記の結果について以下のように考察した。炉底中心温度は炉底部の湯流れと強く関係し、炉芯が沈下状態から浮上状態になって炉底部にコークフリーゾーンができるところを通過する溶銑流が増加し、温度が上昇する。一定の浮上量まではフリーゾーンの溶銑流が増加する効果により温度が上昇するが、一定レベルを超えてさらに浮上するとかえって炉底部の溶銑流は停滞し、温度は下降する¹⁾。逆に炉芯が沈下した場合、部分的に沈下して一部が浮上している間は炉底の溶銑流は沈下領域の大きさと相関をもつが、完全に着床し

てフリーゾーンが消滅する領域では湯流れは充填層流となり大きく変化しない。したがって炉芯沈降指数が一定の範囲にある場合に炉底中心温度との相関が出やすい。

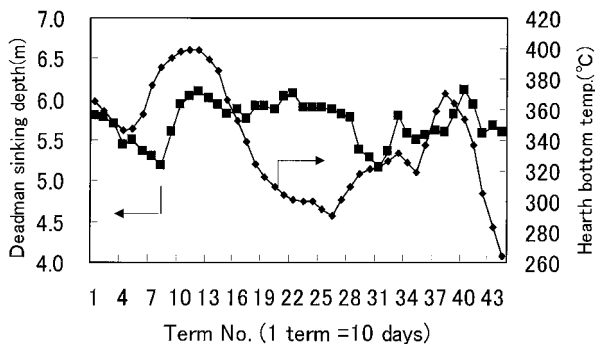


図7 炉芯沈み深さと炉底温度の推移(戸畑1高炉)
Deadman sinking depth and hearth temperature(Tobata 1BF)

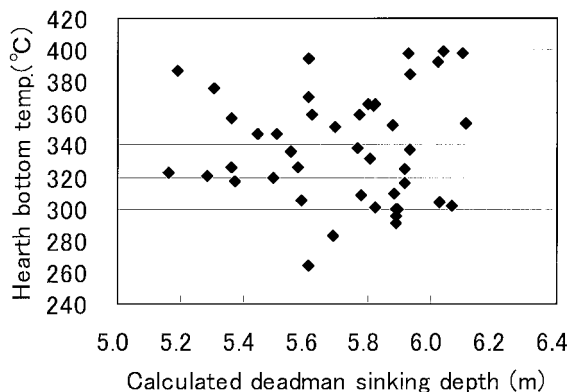


図8 炉芯沈み深さと炉底温度の関係(戸畑1高炉)
Relation between deadman sinking depth and hearth temperature (Tobata 1BF)

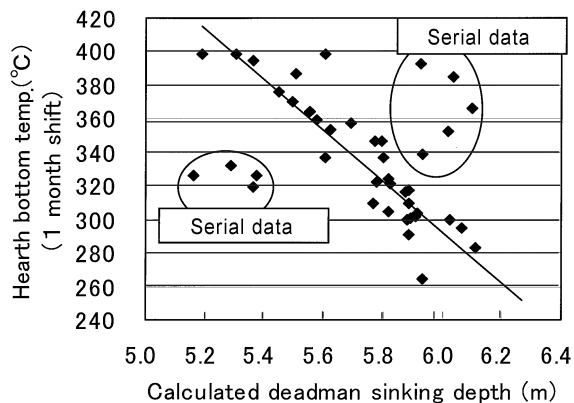


図9 時間遅れを考慮した炉芯沈み深さと炉底温度の関係(戸畑1高炉)
Relation between deadman sinking depth and hearth temperature considering delaying time(Tobata 1BF)

また、操業データから計算した炉芯沈降指数の計算値から伝熱遅れだけでは説明できない大きな時間遅れをもって炉底中心温度に影響が出るのは、沈降指数の計算値の減少または増加が長期間継続するときである。すなわち、固体粒子の集合体である炉芯は完全に一体の剛体として垂直1次元方向に浮沈するわけではなく、個々の粒子が離散的に移動して全体として沈下または浮上の傾向を示すことになるため、変化に時間がかかるというのが1つの解釈として可能である。したがって、炉芯沈降指数が一定の範囲にありかつ減少または増加が継続するときに、炉芯沈降指数と一定期間後の炉底中心温度との間に負の相関が出やすいと考えられる。これについては炉芯構成粒子の運動の離散的解析など、さらなる研究が必要である。

5. 炉床側壁温度変化時の溶銑流の推定

前述の戸畑1高炉において1996年末～1997年初めにかけて側壁温度が上昇した事例を図10に示す。図は側壁8, 9, 11段の各部位の温度の推移を示したものである。9A-25, 8A-26, 11A-26が同一時期に上昇・下降しているのに対し、円周方向の他の部位では大きな温度の変化はなく、3号出銑口下を下方から上方に出銑口へ向かう強い溶銑流があったと推定される。また、8段位置では8A-21にもや

や弱いながら同様の温度推移の傾向が見られ、図11(a)に示すように、下方ではやや広い範囲に上昇流があるものが、出銑口へ近づくと狭く強い流れに集約されていくものと推定される。この高炉では炉底中心部の温度が低下して側壁温度が上昇する現象がしばしば見られたため、炉芯中央部に炉底まで低通液領域ができる一方で周辺部では炉芯コークスが浮上してコークスフリー領域ができる状態が周期的に現れたと推定している。

図12に、異なる時期の9段円周方向の温度分布を示す。1996年末～1997年初めにかけては前述の通り3号出銑口下(25OT付近)のみ温度が上昇したが、3号出銑口下は最も侵食が進んでいたため、3号出銑口の使用を休止し、1, 2, 4号の3本の出銑口を使用した。1997年夏には4-1号出銑口下の間(31-34OT)と、2号出銑口下17OT付近)の温度が上昇した。この高炉では同一時期で周方向全体に温度が上昇するケースはなかった。2号出銑口下の温度上昇メカニズムは3号出銑口下の場合と同様であるが、4-1号出銑口下の間の温度上昇メカニズムは、図11(b)に示すようにどちらの出銑口を使用する場合も出銑口へ向かう溶銑流の通過地点である中間部が上昇したものと推定している。これも出銑口へ向かう溶銑流が側壁損耗の原因になることを裏付けている。

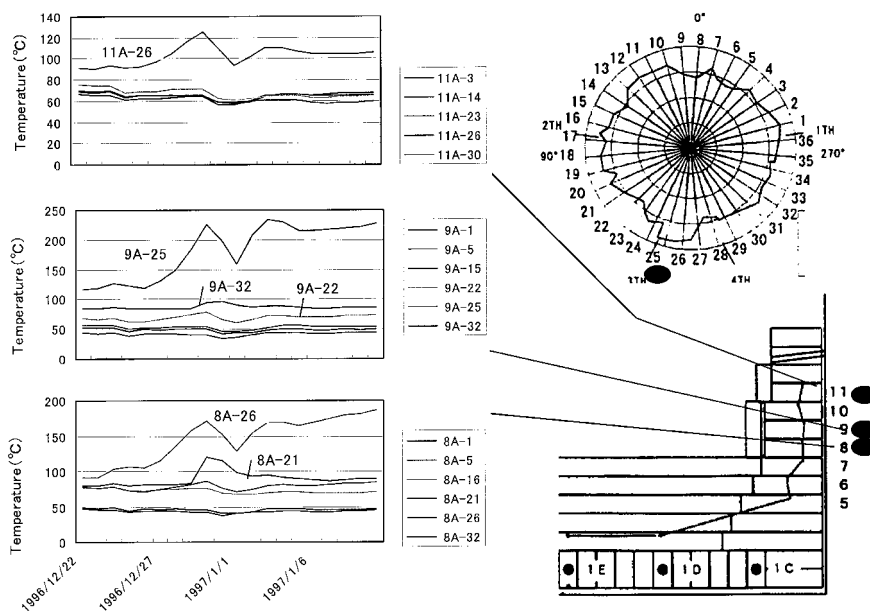


図10 炉床側壁温度の推移事例
Example of hearth sidewall temperature change

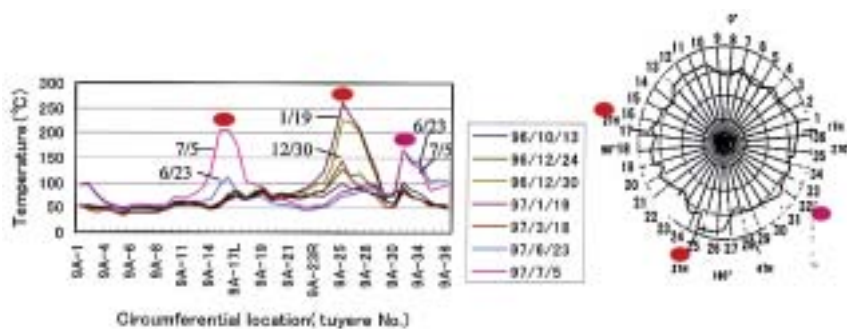


図11 炉床側壁温度の円周方向分布
Temperature distribution at various period

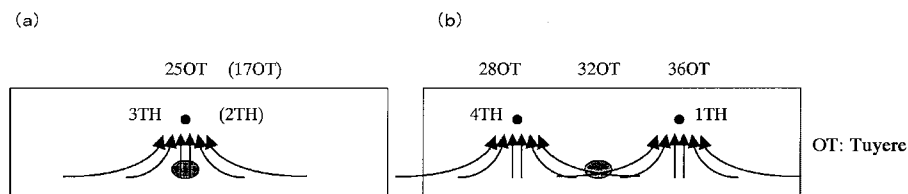


図12 溶銑流れパターンの推定
Estimated liquid flow pattern

6. 結 言

高炉炉床部の溶銑流について、1/20規模の温水模型実験装置を用いて炉床充填構造を変えた実験を行い、流れの変化を調べた。数学モデルを用いた流動伝熱計算も併用して実炉の湯流れと温度分布の変化を検討した。また、実炉の炉床の炉芯浮沈挙動を推定して炉底温度との関係を検討し、炉床側壁温度変化時の事例について炉床充填構造と湯流れ状態を考察した。

- (1) 炉芯浮上量が大きくなると、空隙内の高さ方向に一樣な流れにはならず、炉芯下端の直下部に速い流れができ、炉底近傍には停滞域ができる。
- (2) 炉芯の充填構造が変わらず単に炉底粘稠層があるだけでは、環状流や側壁温度上昇の原因とならない。炉芯中央部に不透過領域がある場合に、側壁部に高流の環状流ができる。
- (3) 荷重と浮力のバランスから計算した実炉の炉芯沈降指数が時間遅れをもって炉底中心温度と負の相関が現れる事例があり、炉芯の浮沈挙動が炉底の溶銑流を介して炉底温度に影響すると推定した。

- (4) 実炉の炉床側壁温度が同一の円周方向について異なる高さで同時に上昇した事例があり、炉底周辺部にコークスフリー領域ができて炉底周辺部から出銑口へ向かう上昇流が原因であると推定した。

参考文献

- 1) 日月應治 ほか:鉄と鋼 70 2224(1984)
- 2) 富田幸雄 ほか:日新製鋼技報 56(6) ,1(1987)
- 3) Standish, N. et al.: Trans. ISIJ. 24, 709(1984)
- 4) 柴田耕一郎 ほか:R&D神戸製鋼技報 41 79(1991)
- 5) Inada, T. et al.: Ironmaking Conf. Proc. 58, 615(1999)
- 6) 渡壁史朗 ほか:鉄と鋼 86 301(2000)
- 7) 大野二郎 ほか:鉄と鋼 67 ,S724(1981)
- 8) 矢代弘克 ほか:鉄と鋼 68 ,S793(1982)
- 9) 田中勝弘 ほか:CAMP-ISIJ 4 ,1028(1991)
- 10) 田村健二 ほか:鉄と鋼 67 2635(1981)