

3次元模型実験による高炉炉芯の下端形状と浮沈挙動

篠竹 昭彦*・一田 守政*・大塚 一*²・栗田 泰司*³

Bottom Shape of Blast Furnace Deadman and its Floating/Sinking Behavior by
3-dimensional Model Experiment

Akihiko SHINOTAKE, Morimasa ICHIDA, Hajime OOTSUKA and Yasushi KURITA

Synopsis : A three-dimensional scale model which simulates the motion of a deadman in a blast furnace was used as the experimental apparatus. The floating and sinking movement and the bottom shape of the deadman were investigated. The effects of factors such as furnace bottom shape and liquid level on the deadman behavior were examined.

When the water level moved up or down, the movement of the deadman bottom center lagged behind the change in water level. When the deadman touched the furnace bottom before floating, floating of the deadman started earlier with air injection from the tuyere than without it.

In the condition without blast from the tuyere, the initial shape was almost unaffected even if one of the factors such as water level, a load on the deadman, or exhaust of particles was changed as a variable. In contrast, in the condition with blast from the tuyere, when particles were exhausted simultaneously with water supply or drainage, the deadman bottom gradually rose up toward the furnace wall.

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. In other cases, a negative correlation was not found. 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.

Key words : blast furnace; hearth; deadman; model experiment; liquid flow; water model; packed bed; bottom profile.

1. 緒言

高炉寿命の支配要因である炉底の損耗には炉底部の溶銑流が大きく影響する。溶銑流と炉芯の充填構造の関係については模型実験や数学モデルを用いたシミュレーションなど従来多くの研究が行われている¹⁻⁴⁾。筆者らも模型実験と数学モデルを用いたシミュレーションを行い、炉芯の浮沈レベルや炉芯下端形状の変化により溶銑流は大きく変わることを報告した⁵⁾。従来、炉芯の更新や固体の移動は数例検討されている。例えば片山らは2次元模型を用いて擬似溶銑の注入/排出を繰り返す実験を行い、粒子の移動を観察した結果を報告している⁶⁾。高橋らも2次元模型や3次元半裁模型を用いた水モデル実験により、固体粒子にマーキングする方法を用いて炉芯を構成する粒子の移動と炉芯の更新挙動を観察した結果を報告している⁷⁾。戸田らも3次元半裁模型を用いて炉芯更新速度を測定する実験を行っている⁸⁾。しかし、炉芯浮沈挙動と下端形状に注目した研究は少ない。本研究では、3次元の模型実験装置を製作し、炉芯浮沈挙動と下端形状に注目して、装置の炉底形状や液面レベルの変化などの要因の影響を検討する実験を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を Fig. 1 に示す。装置本体は透明プラスチック製3次元全周モデルで、上部、中部、下部の3ユニットおよび炉底ユニットから構成されている。上部、中部ユニットはシャフト部を想定した上部が下部より狭い円錐台形状である。下部ユニットは下部が上部より狭い円錐台形状で、側面に送風羽口、粒子切り出し装置、給排水口が設けられている。送風羽口は円周方向に8箇所ある。粒子切り出し装置も8箇所、各送風羽口間に設置されている。高さは送風羽口および粒子切り出し装置の中心が下部ユニットの下端から15 cmの位置にある。給排水口は高さが下部ユニットの下端から5 cmおよび10 cmの2水準あり、周方向には上下それぞれ8箇所あるが、通常は上の1箇所から給水し、下の1箇所から排水した。炉底ユニットは Fig. 1 に示す4種類を製作し、交換可能である。F1, F2は平坦で深さが異なり、B型、M型はそれぞれいわず「おわん型」、「のらくろ型」の浸食プロファイルを想定したものである。溶銑の模擬物質には水を、コークスの模擬物質には粒径2.8~4.0 mmの発泡ポリスチレン粒子（協和化成製：ピオセラン、密度約140 kg/m³、白色）を用いた。装置下方には、

平成14年8月19日受付 平成14年12月6日受理 (Received on Aug. 19, 2002; Accepted on Dec. 6, 2002)

* 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futsu 293-8511)

* 2 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (現: 太平工業(株)) (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., now Taihei Kogyo Co.)

* 3 新日本製鐵(株) 八幡製鐵所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

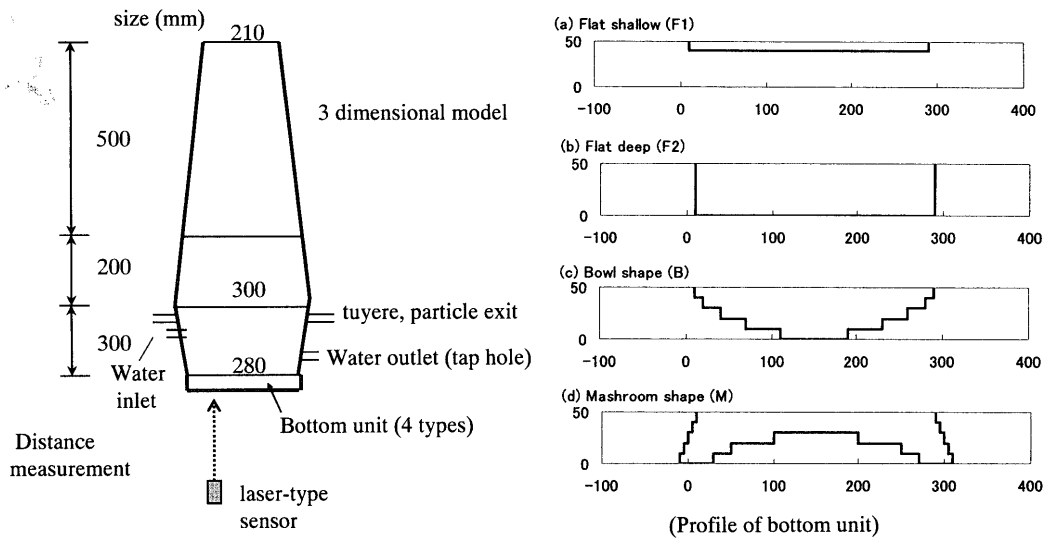


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions.

	Actual BF (a)		Cold model (b)	(a)/(b)
	Ex. 1	Ex. 2		
Hearth diameter(m)	12.0	13.8	0.28	43~49
Belly diameter(m)	14.0	15.5	0.30	47~52
Inner volume(m ³)	3273	4250	0.05656	57900~75100
Particle diameter(mm)	20~40	20~40	2~4	5~20
Liquid production rate(m ³ /h)	41	59	0.03~0.06	680~1970
Air flow rate (Nm ³ /s)	83	111	0.011~0.017	4970~9510
Air velocity at tuyere(m/s)	220	220	4.6~6.3	30~52

X-Y 2次元方向に駆動できる機構上にレーザ式変位センサ（キーエンス：LB-300）を設置して炉芯下端位置を計測した。変位センサは変位を電圧に変換して出力する仕様になっているが、この実験では空気、プラスチック（装置下面）、水の層を透過して粒子下端を計測することになり出力と変位の間に線形性が成り立たないため、あらかじめ検量線を作成しておき、実験で得られた出力から変位を換算した。

実験は以下のように行った。まず装置内に粒子を1~3 kgの所定量充填した。初期充填層高はF1型の炉底ユニットを用いた場合で粒子1, 2, 3 kgに対しそれぞれ18.0, 34.5, 53.0 cmであった。次に水位が所定のレベルになるまで一定の速度で給水し、炉芯下端中央で炉芯の浮上すなわちレベルの変化を計測した。この状態から給排水、送風、粒子排出、荷重の付加など各実験ごとに設定した条件で実験した。炉芯下端位置の測定は、原則として炉芯の浮上/沈下中は炉芯下端中央のレベルの時間変化を、停止時はセンサをX-Y 2次元方向に駆動してプロフィールを測定した。

装置スケールと主な実験条件を実高炉の例と比較してTable 1に示す。実高炉は2例を示す。実験装置は特定の高炉の縮小模型ではないがスケールは約1/40~1/50である。使用した固体粒径は高炉内のコークスの約1/10で、装置径比に比べてやや大きい。実験条件は、送風は実験と実炉の流速比がほぼ装置径の比に近いが、給排水した液（水）の

流量は、炉底部の液流速が実高炉の炉床の溶銑流速に近い0.1~1 mm/s程度である。

3. 実験結果と考察

3.1 浮沈の基礎特性

まず炉芯浮沈の基礎特性を調べた。装置内に粒子2 kgまたは3 kgを充填し、水位0から8.3 cm³/sの一定速度で給水を行い、中心部の炉芯下端の変位を調べた。0.017 m³/sの送風を同時に行った場合と送風なしの場合の実験結果をFig. 2に示す。図中の点線は粒子の荷重と水の浮力だけを考えた場合の、炉芯下端の計算位置を示す。送風なしの条件②、④の結果をみると、バランス計算上の浮上開始時刻よりも遅れて浮上を開始し、浮上直後は勾配が小さいが、その後はほぼバランス線と平行に浮上する。また、バランス線との乖離は充填粒子量が3 kgの場合の方が2 kgの場合より大きい。これは、炉芯の浮上時に粒子と壁面の間に応力が働き、装置上部では上方ほど断面が狭まる形状となっているため充填層高が高い3 kgの場合に影響が大きくなることに対応する。また、注水と同時に羽口送風を行った場合は送風なしの場合に比べて早く浮上開始している。送風は流体抗力として粒子に作用し荷重を軽減する効果として寄与していることがわかる。

次に、炉芯が浮上した状態から出銑/貯銑を想定して排

水/給水を行い、炉芯下端中央の変位と水位の変位との関係を調べた。粒子量が多くなると水位が羽口近くまで上昇しても炉芯浮上量が小さくなるため、浮沈の変化幅を大きくとれるよう装置内に粒子1kgを装入した条件で実験した。結果をFig. 3に示す。横軸は水位、縦軸は炉芯下端中央の高さを示す。実験の開始点は水位88mm, 炉芯下端45mmで、まず排水により水位65mmまで下げた後、給水により水位110mmまで上げ、再度水位75mmまで排水した際の水位と炉芯下端高さの関係を示している。排水中は図中の上側の軌跡を下降し、給水中は下側の軌跡を上昇した。すなわち、給排水による液面の変動により炉芯が浮沈する場合、炉芯下端は液面より遅れて昇降する。炉芯の変

位量は液面の変位より小さかった。したがって、水位が同じでも炉芯沈下中の方が炉芯浮上中より下端位置が高い。この原因は、水位の変化により浮力が変化しても、粒子と炉壁の摩擦や粒子間の応力により、単純に浮力-荷重バランスで計算されるよりも炉芯の変位が小さくなるためだと考えられる。

3.2 炉底形状変化時の浮沈と下端形状の変化

炉底ユニットの形状を変えて炉芯浮沈実験を行った結果をFig. 4~Fig. 6に示す。Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6はそれぞれF1型, B型, M型の炉底ユニットを用いて実験した結果である。Fig. 4を例にとって図の見方を説明する。右側の図が炉底の水平面とX-Y座標の位置関係を示す。装置の中心がX=Y=150にある。装置の炉床径が280mmであるから

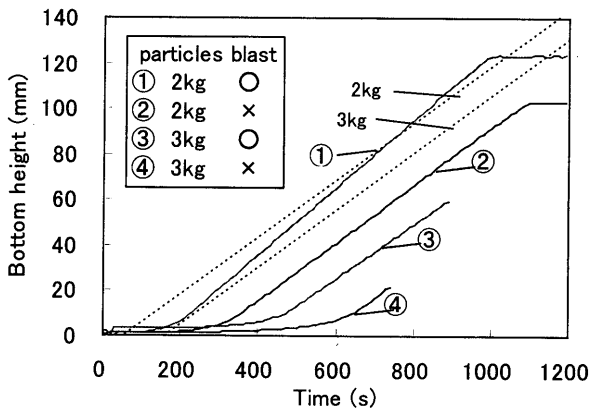


Fig. 2. Deadman bottom height during storage.

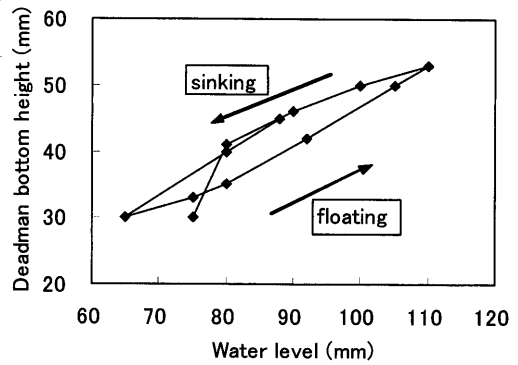
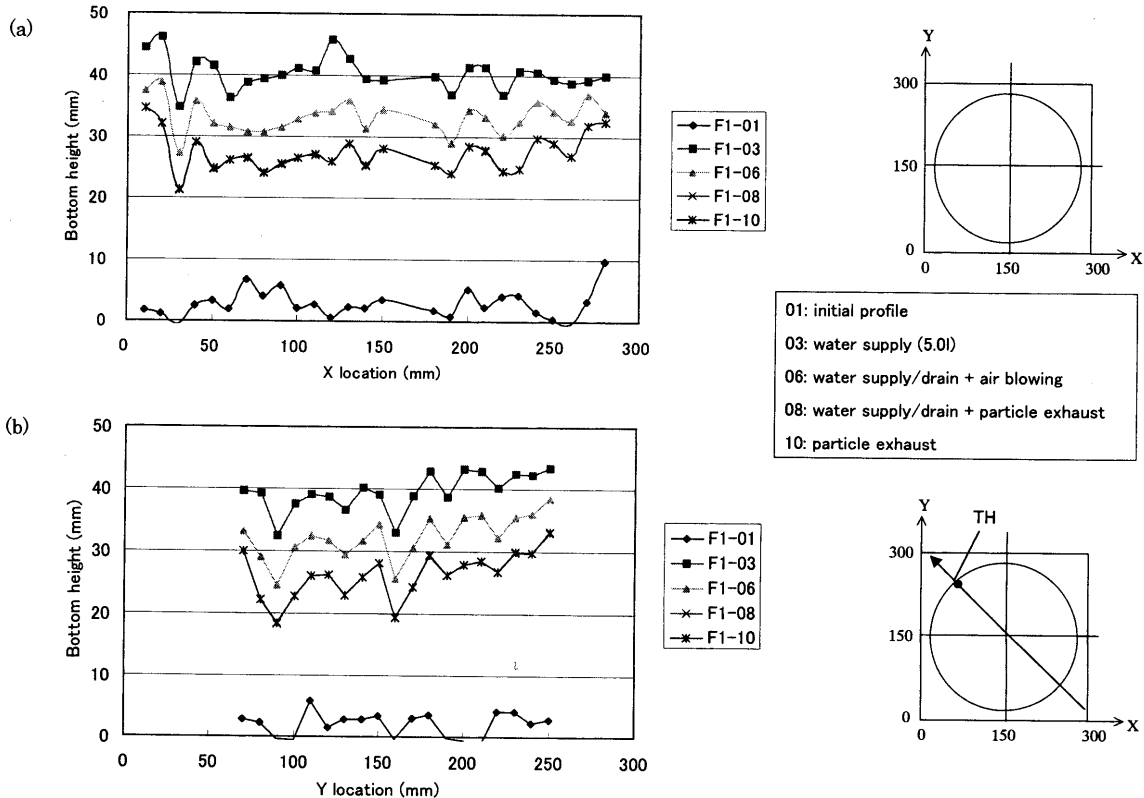


Fig. 3. Change of water level and deadman bottom position.



(a) at Y=150, (b) along X+Y=300 line

Fig. 4. Change of deadman bottom (flat-shape hearth bottom).

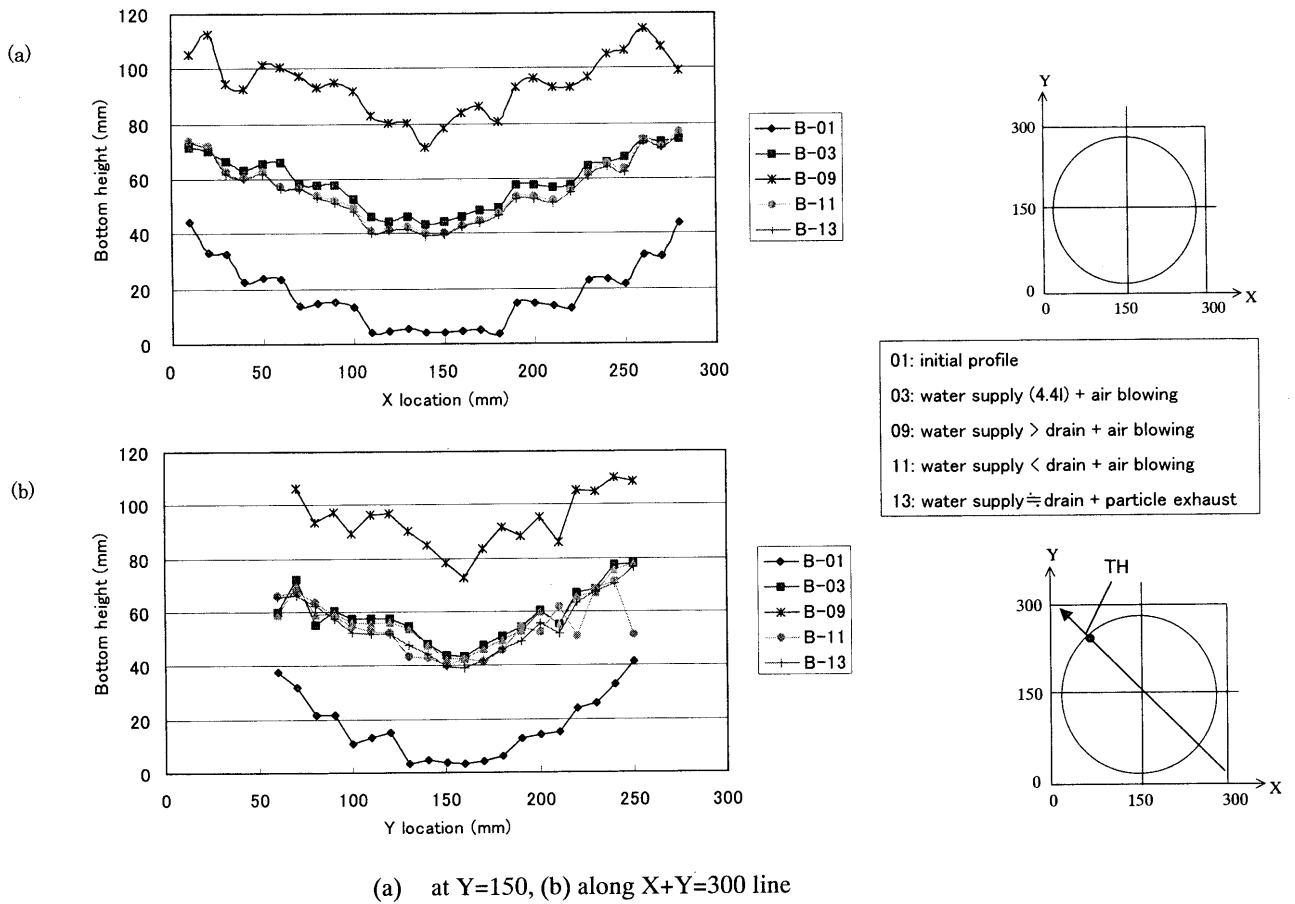


Fig. 5. Change of deadman bottom (bowl-shape hearth bottom).

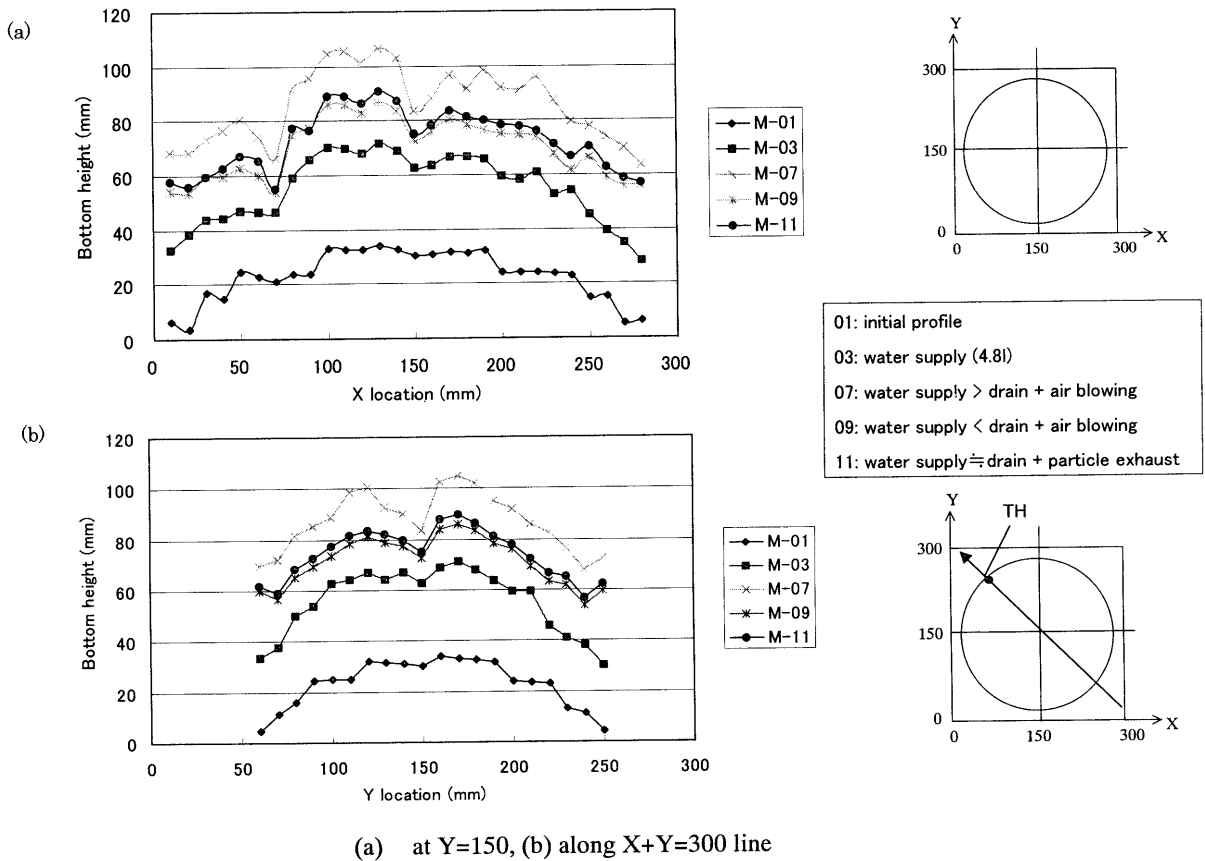


Fig. 6. Change of deadman bottom (mushroom-shape hearth bottom).

$Y=150$ の直径断面上では $10 \leq X \leq 290$ が装置の範囲内に相当する。左側上の図は $Y=150$ の直径断面上での X 座標に沿った炉芯下端高さの変化を示す。また、左側下の図はそれと45度ずれた $X+Y=300$ で表される直線上の炉芯下端高さの変化を Y 座標に対して示したものである。この直線上の $X=51, Y=249$ 近傍にこの実験で用いた出銑口がある。この図は出銑口近傍の炉芯下端の変化が他の周辺部と比べて差があるかどうかをみるのを目的として示した。Fig. 5, Fig. 6も同様である。

炉芯下端の変化の見方を示す。Fig. 4の左側上下の図の場合、F1-01は水を入れる前の炉芯下端位置である。完全に0でないのは、固体粒子が歪みのある球形状をしており充填層に不均一な隙間があること、レーザが透過する面が完全に均一でなく変位計の出力に若干のばらつきがあることによる。F1-03は水を $8.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ で合計 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 供給した後の炉芯下端位置で、約40 mm浮上している。F1-06はその後10分間水の供給・排出をともに $8.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、羽口からの送風を同時に $0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ で行った後の炉芯下端位置である。F1-03と比べてほぼ形状を保ったまま平行にレベルが下がっていることがわかる。F1-06がF1-03より沈下しているのは、水の供給・排出量をそれぞれ手で制御したが排出量が供給量をやや上回り装置内の総水量が減ったためである。F1-08はその後10分間水の供給・排出をともに $8.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、羽口レベルからの粒子排出を同時に行った後の炉芯下端位置である。排出粒子量は256.5 g (平均0.43 g/s)である。F1-08がF1-06より下がっているのもやはり排水量が給水量より多く水量が減ったためであるが、ほぼ下端形状を保って沈下している。ただし周辺部のごく近傍のみ沈下量が他の内側に比べて小さく、粒子排出の影響の可能性が考えられる。これについては別途詳細に調べた結果を後で述べる。F1-10は最後に水の供給、排出を行わず粒子排出のみを480秒間行って207.6 g (平均0.43 g/s)の粒子を排出した後の炉芯下端位置である。F1-10はほぼ完全にF1-08に重なっており、給排水がない条件ではこの程度の粒子排出で炉芯下端形状は変化しないことを示している。

B型の炉底ユニットを用いて実験したFig. 5の場合、水位の昇降にともなう炉芯下端形状の変化は、ほぼ最初の炉底形状に従うが、①炉芯が浮上すると階段状がややなめらかになること、②炉壁近傍では変化量がやや小さいことが観察された。炉壁近傍で変化量が小さいのは粒子と壁面の摩擦が原因だと考えられる。この場合も羽口レベルからの送風と粒子排出による炉芯下端形状の変化は観察されなかった。

M型の炉底ユニットを用いて実験したFig. 6の場合も、水位の昇降にともなう炉芯下端形状の変化は、ほぼ最初の炉底形状に従った。ただしB型の場合に比べると、炉壁近傍の変位は中心部と比べて必ずしも小さくなかった。これ

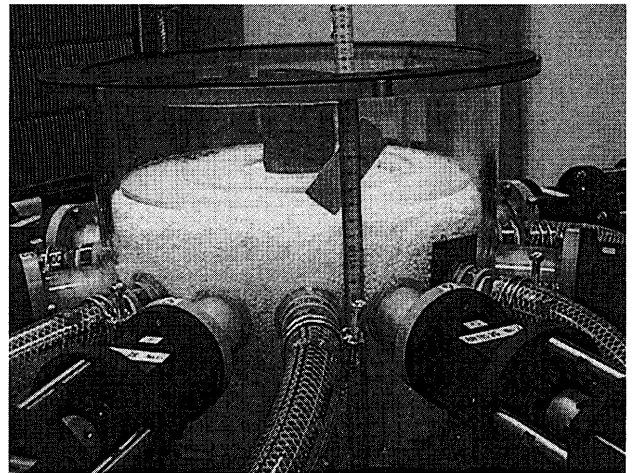


Fig. 7. Loading experimental methods.

は、炉壁近傍の変位が小さいとすると、B型の場合は炉壁に向かって上向きに傾斜しているため炉芯浮上につれて炉芯下端の傾斜が平坦に近づくのに対し、M型の場合は炉壁に向かって下向きに傾斜しているため炉芯下端の傾斜角がより大きくなるという違いがあることによると推定される。この実験でも送風と粒子排出の影響は観察されなかった。

3・3 荷重付加時の浮沈と下端形状の変化

実炉では、高炉の半径方向に荷重の分布があると考えられる。荷重分布が炉芯下端形状に及ぼす影響を調べる実験を行った。Fig. 7に荷重を中心部に付加した実験の状況を示す。浮沈の変動幅を大きくとれるよう下部ユニットのみを用いて1kgの粒子を充填し、給水により炉芯を浮上させた状態を初期条件として実験した。固体粒子の層の上に同心円状のプラスチック製円板(外径90, 180, 270 mm)を3枚(合計340 g)のせ、中央の円板の上に鉄製の薄板(1枚37 g)を積み重ねていき、炉芯下端位置の変化を測定した。送風や粒子排出は行っていない。結果をFig. 8に示す。左上の図は $Y=150$ の直径断面、右上の図は $X=150$ の直径断面における炉芯下端形状の変化を示した図である。F2-04は荷重をのせる前の粒子のみの下端プロフィール、F2-05は円板を3枚のせ、中央の円板に約500 gの荷重をかけた後の下端プロフィール、F2-06は中央の荷重をはずして3枚の円板のみ残したときの下端プロフィールである。また、下の図はF2-04における各点の位置を基準として、F2-05およびF2-06における変位を相対値で表したものである。F2-05において中央に500 gの荷重をかけたとき、固体層の上面では中央部において約10 mmの沈下が認められた。これに対し、炉芯下端すなわち固体粒子の下面では、高々1~2 mmの沈下にとどまった。F2-06において中央部の荷重を取り去ると下端中央部の沈みが少しだけ復元した。また、F2-05より薄板をさらに中央に積み重ねていくと、おおむね500~600 g程度で粒子層が中央部の荷重を支えきれず突

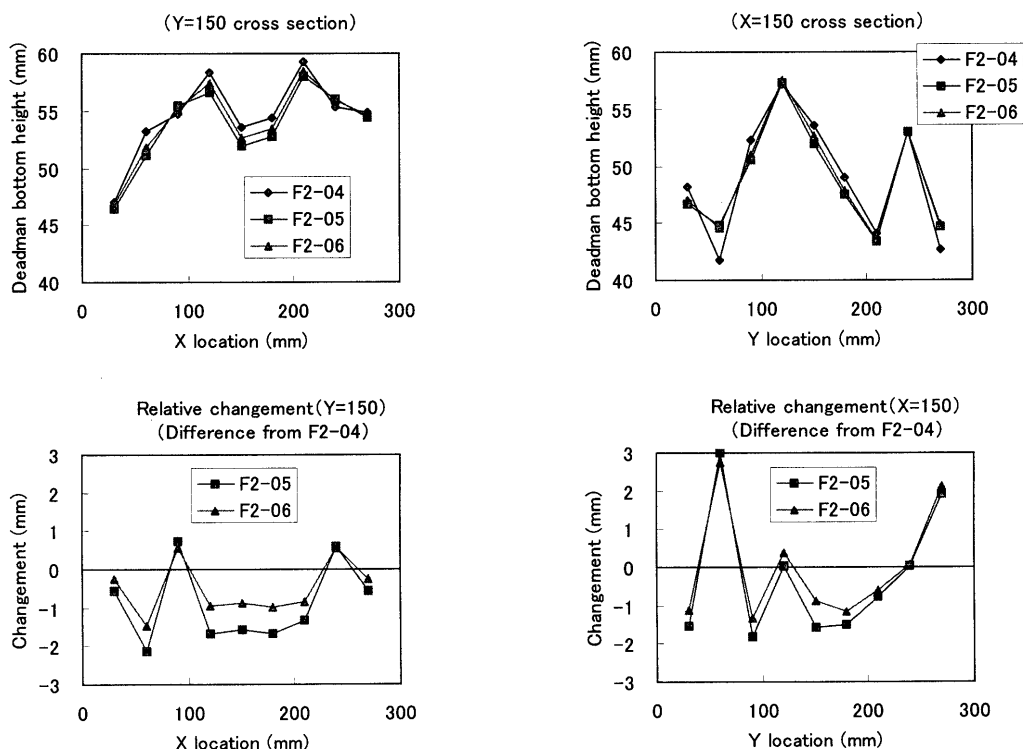


Fig. 8. Effect of load on deadman bottom profile.

然崩落する現象が発生し、それ以上の荷重付加の継続が不可能であった。この現象を考察すると、上部の荷重が1次的に垂直方向に伝播して炉芯下端形状に影響するわけではなく、充填層の圧縮すなわち空隙率が減少する作用と、隣接粒子間で力が伝わることにより応力が2次的に伝播して炉芯全体で荷重を受ける作用があり、前者は荷重の軽減である程度復元する。また、局所的に大きな荷重がかかった場合は充填構造が崩壊するような粒子群の動きが発生する可能性がある。

3.4 炉芯更新時の下端形状の変化

3.2節で述べた粒子排出時の下端形状の変化を詳細に調べるために以下の実験を行った。平坦型の炉底ユニットを用い、3.3節の実験と同様、粒子1kgを充填し、炉芯下端が約40mm浮上する位置まで静かに給水した。この状態を開始点として0.017m³/sの送風を行うとともに粒子を排出しながら給排水量のバランスを繰り返し変えて炉芯を浮沈させた。おおむね給水のみ8.3cm³/sを400s継続して炉芯を浮上させた時点から給水はそのまま排水を開始し、16.7cm³/sの排水を400s継続して炉芯をほぼ元のレベルまで沈下させた。この給排水1サイクルで約250gの粒子を排出し、荷重を一定に保つために排出量に見合う粒子を上部から断続的に静かに補充した。浮沈を繰り返したときの炉芯下端プロファイルの測定例をFig. 9に示す。全体ではほぼ平坦な形状を保っているが、沈下時の炉壁側が徐々に傾斜している傾向がみられた。さらに沈下時の高さがほぼ一定になるように給水/排水による浮沈を繰り返した場合の沈下時のプロファイルを図中のF2-06, 10, 12,

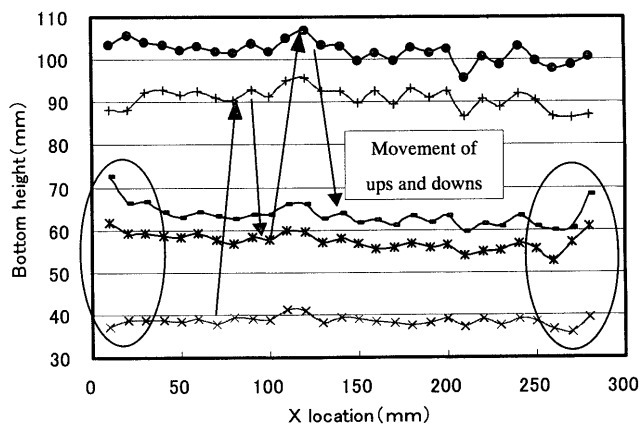


Fig. 9. Change of deadman bottom shape (at Y=150).

14はそれぞれ浮沈を3, 5, 6, 7回繰り返した後の沈下時の炉芯下端形状である。炉壁側約30mmの範囲で平均約30度の傾斜が生成した。それより内側はほぼ平坦であるが、繰り返しにともない傾斜領域が徐々に成長し、中央部と炉壁部の高さの差がわずかながら拡大した。この現象は次のように考察できる。液面レベルの変化により炉芯が浮沈する場合、壁面側では摩擦やせん断応力があるため、中央部に比べて浮沈しにくく、壁面側の炉芯下端のレベルは中央部に比べて浮上時に低め、沈下時に高めになる。また、排出される粒子がすべて羽口より上方からの移動によるものであれば羽口レベル以下の粒子は不動となり炉芯下端形状は変化しないと考えられるが、一部は羽口レベルより下の粒子が排出され、排出された粒子空間を補充するように壁面側で上方へ移動する粒子の運動が起こり、壁面近傍で安息

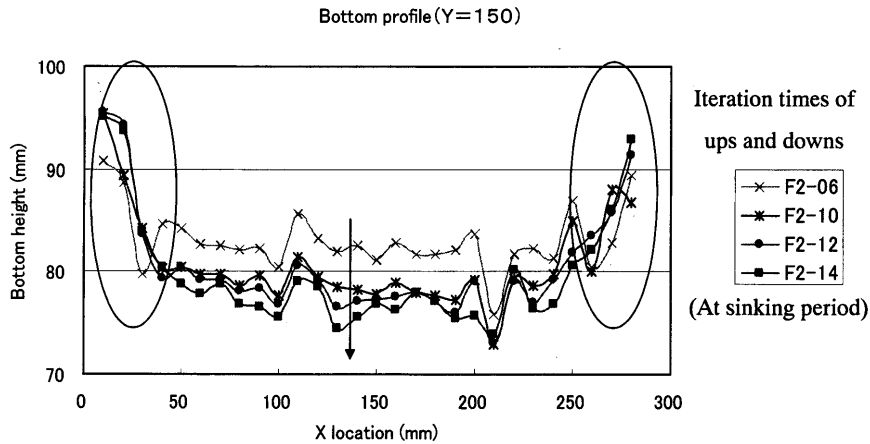


Fig. 10. Change of deadman bottom shape.

角に相当する傾斜をもつ炉芯下端形状が形成されるものと考えられる。

4. 実炉における炉芯浮沈の推定

以上模型実験による炉芯浮沈挙動を調べてきたが、いずれも実炉で炉芯が浮上することを前提に議論している。一方で、実際の高炉で炉芯が浮上しているのか沈下しているのか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、実炉の操業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」は長さの次元をもち、物理的には炉芯の液面下の沈み深さをなわ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。したがってこの指数は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。

戸畑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Fig.11に示す。同一時期の両者の相関をとった図をFig.12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Fig.13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みられないが、1か月後の炉底中心温度との間に逆相関がみられた。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。別の事例として、大分2高炉の1998年2月から1999年3月までのデータでは、炉芯沈降指数の計算値と炉底中心温度の推移はFig.14のようになり、炉芯沈

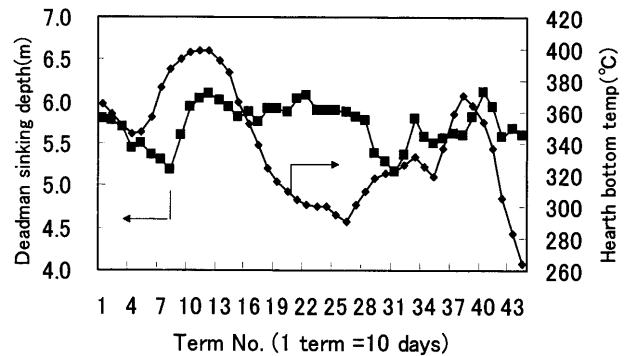


Fig. 11. Deadman sinking depth and hearth temperature (Tobata 1BF).

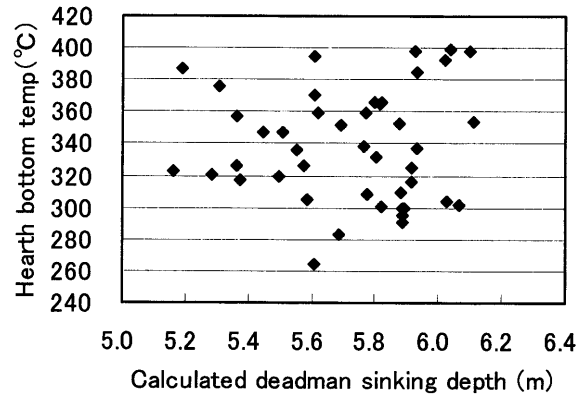


Fig. 12. Relation between deadman sinking depth and hearth temperature (Tobata 1BF).

降指数と3旬(1か月)後の炉底中心温度の相関をとってもFig.15のように相関はみられなかった。他的高炉についても数例検討したところ、高炉により、また期間によって戸畑1高炉のように相関がみられる事例と大分2高炉のように相関がみられない事例に分かれた。

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ここ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

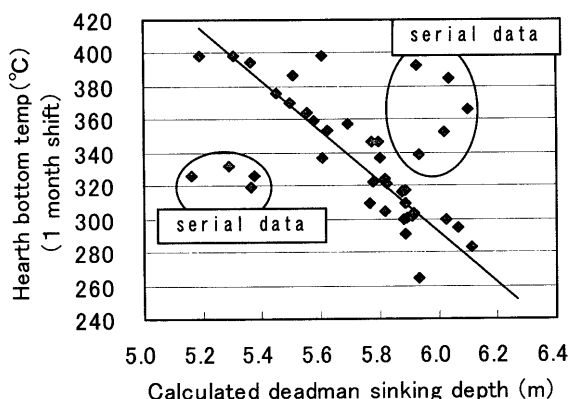


Fig. 13. Relation between deadman sinking depth and hearth temperature considering delaying time (Tobata 1BF).

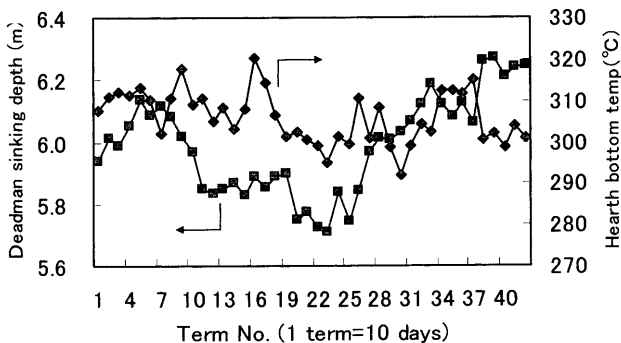


Fig. 14. Deadman sinking depth and hearth temperature (Oita 2BF).

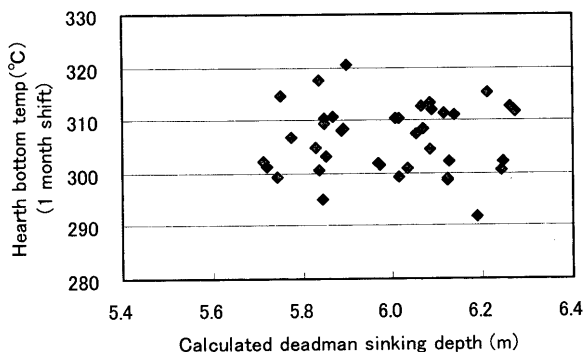


Fig. 15. Relation between deadman sinking depth and hearth temperature (Oita 2BF).

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は炉底中心温度と相関をもつが、この範囲からはずれた場合は相関が現れない。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は、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く、そうでない場合には相関が出にくいと考えられる。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. 結言

高炉を模擬した3次元の全周模型実験装置を製作し、炉芯浮沈挙動と下端形状に注目して、装置の炉底形状や液面レベルの変化など要因の影響を検討する実験を行い、以下の知見を得た。

(1) 炉芯沈下状態から給水により水位が上昇すると、荷重と浮力のバランス計算値より遅れて浮上を開始し、初めは炉芯下端の上昇速度は小さいが、その後バランス線とほぼ平行に上昇する。給水と同時に送風を行うと浮上が早まる。

(2) 羽口からの送風がない場合、給排水による水位レベル、上面の荷重、粒子排出のうち1つの要因だけが変化する条件下では、炉芯全体が浮沈してもその下端形状はあまり変化しない。

(3) 羽口からの送風がある場合、粒子の排出と給排水とを同時に行うと、炉壁側の炉芯下端は炉壁に向かって徐々に上方へ傾斜する変化がみられた。

(4) 実炉では、荷重と浮力のバランスから計算した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と、相関が現れない事例とがあり、炉芯の浮沈挙動が一定の条件を満たす場合に炉底の溶銑流を介して炉底温度に影響すると推定した。

文 献

- 1) M.Tachimori, J.Ohno, M.Nakamura and Y.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 2224.
- 2) Y.Tomita, H.Ohgusu and T.Fukuda: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **56** (1987), 1.
- 3) N.Standish and P.J.Campbell: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **24** (1984), 709.
- 4) K.Shibata, Y.Kimura, M.Shimizu and S.Inaba: *R&D Kobe Steel Eng. Rep.*, **41** (1991), 79.
- 5) A.Shinotake, M.Ichida, H.Ootsuka and Y.Sugizaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 388.
- 6) K.Katayama, K.Sunahara and T.Inada: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 185.
- 7) H.Takahashi and H.Kawai: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 373.
- 8) K.Toda, H.Nogami and J.Yagi: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 123.
- 9) K.Tanaka, H.Ohgusu, Y.Tomita, M.Hasegawa, T.Ooishi, T.Funakoshi, M.Isari and T.Ouchi: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1028.
- 10) K.Tamura, K.Ono and N.Nishida: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 2635.