

# 高炉低還元材比操業を模擬した二次元コールデルによる 固体不安定降下挙動の解析

高橋 洋志\*・河合 秀樹\*・小林 基史\*・福井 俊史\*

Two Dimensional Cold Model Study on Unstable Solid Descending Motion and Control in Blast Furnace Operation with Low Reducing Agents Rate

Hiroshi TAKAHASHI, Hideki KAWAI, Motofumi KOBAYASHI and Toshifumi FUKUI

**Synopsis :** Unsteady behavior with bridging/slipping of solid bed in low reducing agents operation of blast furnace was simulated using a two dimensional cold model. Alumina sphere was used as representative particle of coke/ore packed bed. Two kinds of deadman particles different in gas permeability was examined. To simulate the effect of cohesive zone on unsteady behavior, a sand layer of lower gas-permeability was charged with a certain thickness at the top of the bed, which descended with a form of cohesive zone when it reached at the lower part. Further, a fine coke layer was set at the shaft bottom with a certain size assuming accumulation of fines. Unsteady phenomenon with the fine coke accumulation was also observed with another thin sand layers, charged in the shaft assuming increase of gas-permeability resistance in reducing coke supply operation. It was revealed that the ratio of peripherally flowing rate of tuyere gas had a considerable effect on the discontinuous behavior of both solid descending motion and gas static pressure. The ratio increased with decline in deadman gas-permeability, approach of the simulated cohesive zone to deadman surface and inflow of small particles into raceway. There was a lowest critical position of the simulated cohesive zone for the rapid increase of discontinuity. The bridging/slipping behavior with fines accumulation was significantly affected by the low gas-permeability layers charged in shaft. Setting up the chimney zone of high gas-permeability at the central part was effective to decrease the discontinuous motion.

**Key words:** blast furnace; low reducing agents; moving bed; solid flow; unstable solid behavior; bridging; slipping.

## 1. 緒言

棚吊やスリップで代表される固体の不安定挙動は炉頂コークス量装入割合の縮減により一層顕著になるものと考えられている。この様な低還元材比操業では通常操業に比べて軟化融着帯はより炉下方に形成され、その結果、炉芯と融着帯の間のいわゆるコークスファンネルフロー領域の流路幅が縮小し、棚吊・スリップ現象はこの流路幅縮小と深く関係すると考えられている<sup>1,2)</sup>。羽口から観察した火炎の輝度も周期的に変動し<sup>2)</sup>、これはコークスまたはコークス・鉄鉱石混合物のレースウェイへの流入が周期的であることを示唆している。特に炉芯の通気抵抗が大きい場合には、流路幅が狭く、かつ流路の長いコークスファンネルフロー領域を透過するためのガスの流体抵抗は増大する。これがレースウェイへのコークスのスムーズな流入を妨げるものと考えられる。コークス装入割合の減少による融着帯のコークススリット幅の減少もコークスファンネルフロー領域のガス通気抵抗を一層増加させる原因となる。

一方、コークス装入割合を縮減した操業下では、鉄鉱石、

コークスの交互供給で形成される鉱石・コークス混合領域の体積割合も増大する。従って、空間率の大きいコークス層の減少と空間率の小さい混合領域の増加により、シャフト部を透過するガスの通気抵抗は増大するであろう。大量のガスが炉下部で発生した時は、空間率の大きい壁部に添ってガス流が上昇し、ガスが炉頂に達した時点での炉頂壁近傍の固体のスリップも考えられる<sup>3)</sup>。さらに、コークスの降下中にはその機械的破壊により大量のコークス粉の発生が考えられる。これはコークスに対する化学反応の負荷増大により強度の弱い多孔質コークがより多く生成されるためである。小島ら<sup>4)</sup>は高炉の解体研究を行い粉コークスはシャフト中間レベルからレースウェイの領域に分布すると述べている。館ら<sup>5)</sup>は熱間モデル実験で燃焼領域周りの粉コークスの蓄積が炉況不安定の原因であると述べている。

本研究の目的は、上述の背景の下、炉頂コークス装入割合を縮減した操作における棚吊・スリップを含む充填層の不安定挙動を高炉二次元冷間モデルを用いて実験的に模擬することにある。基本粒子よりも通気抵抗の大きい粒子層

原著論文：ISIJ Int., Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1386-1395

平成18年4月21日受付 平成18年6月12日受理 (Received on Apr. 21, 2006; Accepted on June 12, 2006; originally published in ISIJ Int., Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1386-1395)

\* 室蘭工業大学機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto Muroran 050-8585)

を、炉頂にて一定厚みで水平充填すると、水平層は炉下部に至ってはあたかも融着帯に類似した形状で降下する。この擬似融着帯を利用して、充填層の不安定降下挙動に与えるコークスファンネルフロー領域の流路幅（擬似融着帯と炉芯の間の距離）の影響を評価した。さらに、シャフト部の通気抵抗を増加させた状況を作り、その上でシャフト下端に粉コークス層を初期充填（粉コークスの蓄積を模擬）した操作を行い、固体流れ挙動に与える粉蓄積層の影響を調べた。また、一般に固体粉のレースウェイへの流入は羽口ガスのレースウェイ奥（充填層内部）への透過を妨げる要因になるであろうとの観点から、粉コークスのレースウェイへの流入と固体の不安定挙動の関係も調べた。

## 2. 実験

透明アクリル樹脂板からなる二次元モデル（左半分モデル）を Fig. 1 に示す。レースウェイでのコークスの消費は装置背面に 45° で取り付けられた  $\phi 38$  のパイプから粒子を抜き出すことで模擬した。粒子の排出流量は密閉箱内の電磁フィーダーによって制御した。垂直壁側に取り付けられたサブパイプからも粒子を小流量で抜き出し炉芯高さをこの粒子抜き出しレベルで一定に保った。羽口として内径 0.9 cm のパイプ、4 本を一セットとしてボッシュ下部に取り付けた。羽口深度 = 0 の時、レースウェイはより垂直方向に膨張し粒子の不連続排出を伴う不安定挙動を起こしやすい<sup>6)</sup>。不安定炉況下ではこれに類似した状況で操作されるものと想定して、本実験では羽口深度 = 0 を採用した。空気は室温で供給し、炉頂より排出した。密閉箱内で粒子排出操作を行っているので空気の下流流れは起こらない。粒子の降下速度はフルード数に関する相似則を用いて決定した<sup>7)</sup>。ガス速度は、固体の不安定挙動を明瞭に捕らえるため、相似則から推定された速度の 2.5~3 倍に設定した。用いた粒子の物性を Table 1 に示した。粒子径 2.6 mm のアルミナ球を鉍石・コークス充填層を代表する粒子として用いた。アルミナ粒子は炉頂周辺 (Fig. 1, A) に 3 分毎に間欠的に供給した。固体排出の期間、レーザー変位センサーにより降下する粒子層表面とセンサーの間の距離を、また、ガス静圧、ベリ壁での固体圧力及び粒子フローパターンを測定した。測定箇所を Fig. 1 に示す。以下に示す二種類の実験を行った。

### 2.1 実験 1

擬似融着帯と炉芯表面間のコークスファンネルフロー領域の流路幅及びレースウェイに混入する細粒が固体の不安定流れに及ぼす影響を調べる実験。アルミナ粒子の流れが定常に達した後、炉頂から 15~20 cm の位置に、通気抵抗の大きい“砂粒子層”を厚さ 10 cm で水平にフルスパン充填した (Fig. 3(a) 参照)。Table 1 に示す砂 A、砂 B および砂 (A+C) を砂層として用いた。砂 (A+C) は体積比で (砂 A/

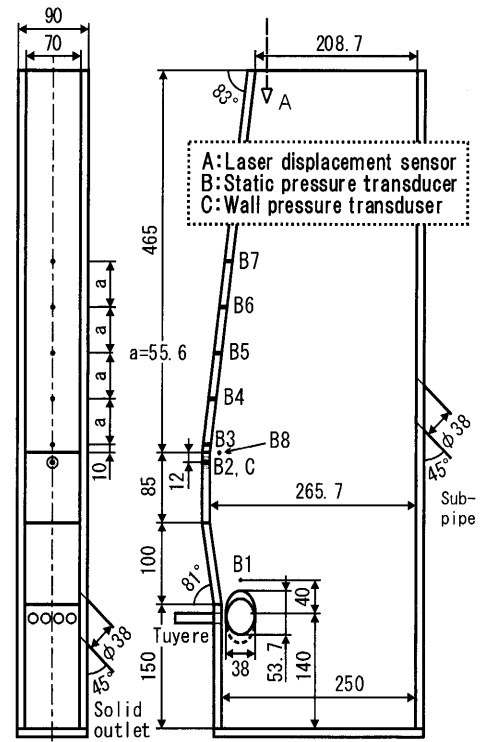


Fig. 1. Two-dimensional apparatus.

Table 1. Physical properties of particles.

Material	Alumina sphere	Sand				Fine coke
		A	B	C	A+C	
$d_p$ [mm]	2.6	1.9	1.2	0.6	—	0.55
$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	—	2600	2590	2615	—	—
$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	870	1350	1345	1455	—	671
$\epsilon$ [—]	0.48	0.48	0.48	0.44	0.45	0.51*
$u_{mf}$ ** [m/s]	1.02	0.976	0.732	0.335	—	0.224
$\phi$ ** [—]	1.0	0.6	0.7	0.9	—	0.8
$\theta$ [°]	29	41	37	37	—	40
$f_1$ *** [N·s/m <sup>4</sup> ]	1822	5102	9398	34240	—	25355
$f_2$ *** [N·s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup> ]	6344	8690	11794	25650	—	17689

\*Estimated value, \*\*Calculated value, \*\*\* $\Delta P/L = f_1 U + f_2 U^2$

砂 C) = 7/3 の混合物である。砂層を充填した後、アルミナ粒子を炉頂まで周辺供給し、その後アルミナ粒子の供給無しで 3 分間粒子を排出降下させた。この後再度アルミナ粒子を炉頂まで周辺供給する。この操作を 4~5 回 (通算 12 分~15 分間の流動) 繰り返した。水平砂層は降下と共に炉下部で融着帯に類似した形状となる。ただし、砂層の通気抵抗と実炉融着帯の通気抵抗に関しては気体と固体間相互運動の相似性は考慮していない。

以上の操作で形成される炉芯 (アルミナ球) 以外に、人為的に通気抵抗の大きい砂 A で炉芯を形成した実験も行った。これは、低還元材比操業下で形成される炉芯コークスの粒子径はより小さくなること、および炉芯表面に粉コークスが蓄積されること等により炉芯通気抵抗がより増加することを想定した実験である。砂 A 炉芯はアルミナ粒子炉

芯と同一形状になるよう調整した。

さらに、不完全水平充填層すなわち Fig. 1 の右壁（垂直壁）から 5 cm または 10 cm の部分は砂層非充填領域とした実験も行った。砂層非充填領域はアルミナ粒子で充填した。アルミナ粒子層のガス透過性は砂層よりも高いのでガスはこのアルミナ粒子層領域を透過しやすい。換言すると、ガス流路のチムニー効果（煙突効果）を期待した実験である。なお、エルガン式から計算した流体抗力に関する係数  $f_1, f_2$  を Table 1 に示した（エルガン式の  $U$  はガス空等速度である）。なお、実験 1 では全ての条件で羽口速度は  $U_B=40$  m/s で一定とし、静圧はタップ B1 で測定した。

2.2 実験 2

シャフト下端に粉コークスを初期充填し、粉コークスの局所蓄積を模擬した実験。粉コークスのシャフト下端への初期装入は粉コークスの炉内分布に関する小島ら<sup>4)</sup>の報告を参考にした。粉コークス層の厚みは 5 mm と 15 mm、幅はシャフト壁から 40, 80, 160 mm および右壁（垂直壁）までのフルスパンとした。また、コークス装入割合を縮減した操業で出現するシャフト通気性の低下を模擬するため、シャフト部に厚さ 5 mm の砂 B を三層、5 cm 間隔でアルミナ粒子と交互に充填して低通気性領域を作った。この場合も実炉とモデルの流動に関する相似則は考慮していない。炉頂表面の変位とベリー部からシャフトでのガス静圧を測定した。

充填粒子間の空間を通過する粉コークス粒子の輸送に関する考察<sup>8)</sup>に基づき、三種類のガス速度を選んだ。アルミナ粒子層の充填構造として、空間率が近い値を持つ等球の規則立方配列 ( $e=0.476$ ) を仮定した。単一細粒（粉粒子）に働く流体抗力を  $F_D$ 、外力を  $F_E$  とすると、 $F_E > F_D$  なら細粒に作用する外力が流体抗力に勝るのでアルミナ粒子間隙を落下する。この考えを規則立方充填配列の最狭窄部に適用して単一細粒に働く力のバランスからガス速度を定めた。即ち、シャフト下端レベルで、羽口速度  $U_B=35$  m/s のとき  $F_D > F_E$ 、 $U_B=28$  m/s のとき  $F_D < F_E$ 、 $U_B=31$  m/s は上記の中間の条件に対応する。一般に、 $F_D > F_E$  の条件で細粒は粗粒子間を上昇することができ（これを細粒のフラディングと呼ぶ）、一方、 $F_D < F_E$  では細粒は粗粒子と共に降下するであろう。Table 2 に実験 1、実験 2 の実験条件を示した。

3. 実験結果と考察

3.1 実験 1

炉頂表面の変位の変化状況から粒子群は停止と滑りを繰り返しながら降下することがわかった。この不連続運動は本装置ではレースウエイの膨張と収縮挙動と完全に対応していた。炉頂粒子はレースウエイが膨張している間は静止状態にあり、レースウエイの収縮、即ち崩壊と共に降下した。実験 1 で得られた炉頂変位の特性を棚吊/スリップの周

Table 2. Experimental conditions.

	Experiment 1	Experiment 2		
		(a)	(b)	(c)
$U_S$ [m/min]		0.019		
$U_B$ [m/s]	40	28	31	35
$u_r$ [m/s]	0.55	0.39	0.43	0.48
$W_R$ [kg/min]		0.22		
$W_S$ [kg/min]		0.02		

Table 3. Result of Experiment 1 ( $U_B=40$  m/s).

Run No	Material of horizontal layer	Deadman material	Run time	Bridging /slipping frequency	Slipping distance
			[min]	[s]	[mm]
1-1	Non( $U_B=0$ )*	Alumina**	0~12	0~0.2	0.05~0.2
1-2	Non	Alumina	0~12	1.5~2.5	0.5~1
1-3	Non	Sand A	0~12	8~15	5~7
1-4	Sand A (15~25cm)***	Alumina	0~10.5	1.5~3	0.5~2
			10.5~12	6.5~12	3~5
1-5	Sand B (20~30cm)	Alumina	0~8	0.8~2	0.5~1
			8~9	6~13	4~6
			9~12	10~16	5~9
1-6	Sand A (15~25cm)	Sand A	0~9	10~14	4~7
			9~11	11~18	4~7
			11~15	20~23	9~11
1-7	Sand A (20~30cm)	Sand A	0~7	9~14	3.5~6.5
			7~12	15~18	6.5~10
1-8	Sand B (20~30cm)	Sand A	0~8	7~10	3.5~5.5
			8~9	16~28	6.5~11
			9~12	30~33	12.5~15
1-9	Mixture layer (20~30cm)	Sand A	0~5	5.5~9	3.5~7
			5~6	10~17	7~12.5
			6~12	50~90	22~55
1-10	Sand A, Chimney (width, 10cm)	Sand A	0~6	5~9	3~6.5
			6~12	12~17	6~9
1-11	Sand A, Chimney (width, 5cm)	Sand A	0~7	5~9	3~5.5
			7~8	10~15	6~9
			8~12	15~19	7~12
1-12	Sand B, Chimney (width, 10cm)	Sand A	0~6.5	4~7	1.5~3.5
			6.5~8	9~18	4.5~8
			8~12	18~24	9~13

\*gas inject velocity  $U_B=40$  m/s except for Run 1-1

\*\*Alumina sphere, \*\*\*charged position: distance from top of the equipment

期とスリップ距離を指標として Table 3 に示した。本実験の炉頂変位の変動は比較的長周期かつ大きな振幅の範囲で測定されたため変動のスペクトル解析等を行わずとも上記の指標で変動特性の概略を評価できるものと考えた。

3.1.1 水平砂層を装入しない時の粒子挙動 (Run 1-1, Run 1-2, Run 1-3)

(1) ガス流れの影響

Table 3 の Run 1-1 は羽口からガスを供給しない時の炉頂

変位の変動特性を示す。ごく短い周期で運動停止とスリップを繰り返す、粒子重力流動の基本運動が示されている。Run 1-2はガスを流した場合( $U_B=40$  m/s)であり、Run 1-1に比べて端吊/スリップの周期およびスリップ距離共に大きく増加しており、炉頂降下運動の不連続性が增大していることが明瞭に示されている。

## (2) 炉芯のガス透過性の影響

羽口速度はすべての実験で $U_B=40$  m/sであるが、特に炉下部の局所ガス速度は炉芯の空間率など炉芯充填構造の影響を受ける。炉芯粒子の種類はRun 1-2ではアルミナ粒子、Run 1-3では砂Aである。炉頂に置ける棚吊/スリップの周期、レースウェイガス静圧(タップB1)、粒子壁面応力の時間的変化をFig. 2に示した。レーザー変位の水平部分は棚吊のため炉頂粒子が静止している期間を示し、変位の突然の増加はスリップによる粒子降下を示す。ベリ部粒子壁面応力(Fig. 1, Cの個所)はスリップの瞬間に減少し棚吊の瞬間に増加することが砂A炉芯のFig. 2(b)に示されている。この現象はスリップによるレースウェイへの粒子流入時では空間率の大きい流動状態が、棚吊ではアーチが粒子荷重を支える、応力の受働状態状態が形成されることに、それぞれ対応するものと思われる。

ガス静圧はレースウェイの膨張を伴う棚吊の間は増加するが、スリップで急激に減少する場合(Fig. 2(a))とFig. 2(b)のように最大静圧値を迎えた後に減少してスリップに至る場合がある。Fig. 2(b)ではレースウェイが膨張し、静圧タップB1が空隙率の大きい(通気性の良い)レースウェイ内に取り込まれた時から静圧は減少した。

Fig. 2に示されるように棚吊/スリップの周期とスリップ

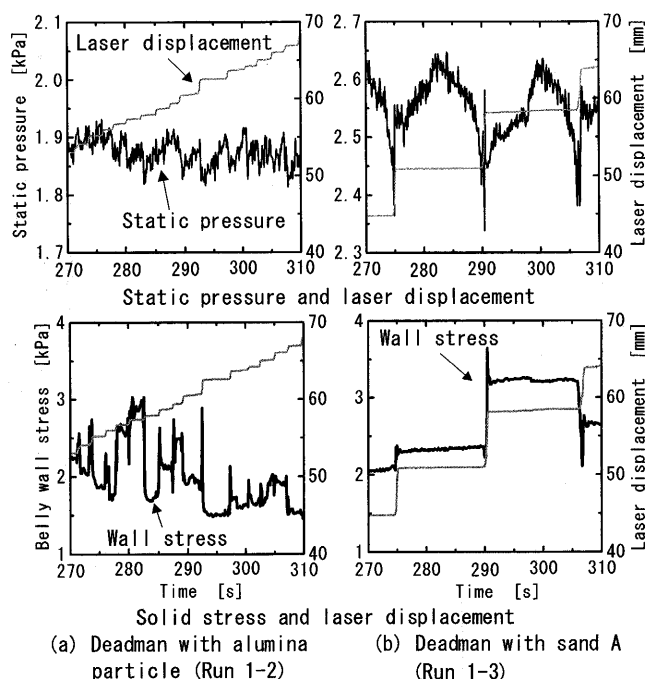


Fig. 2. Effect of deadman material on discontinuous solid motion and static pressure.

距離は砂A炉芯としたRun 1-3で顕著に増加している。Table 3によると、Run 1-3ではRun 1-2に比べて周期は5~6倍、スリップ距離は7~10倍大きい。固体流れの不連続性が増加する理由は、羽口ガスが通気抵抗の大きい砂の炉芯内部へと透過するよりも垂直方向に透過する方がより容易であること、これによりレースウェイ上方の粒子ブロックの固体荷重を支持するほどに流体抗力が増加したためと考えられる。B1(Fig. 1)で測定される静圧はFig. 2に示されるようにRun 1-2に比べてRun 1-3では相当大きい値となっている。このことは砂A炉芯のRun 1-3ではガスの周辺流化(レースウェイ直上での垂流化)によるガス圧力損失(流体抗力)の増大を意味する。

## 3.1.2 水平砂層を挿入した時の粒子挙動

### (1) アルミナ炉芯の場合

水平に充填された砂層の経時変化(Run 1-4)をFig. 3に示した。Fig. 4は540~720秒における棚吊/スリップの周期とスリップ距離を、砂層非装入のRun 1-2と比較して示したものである。Fig. 4よりRun 1-4における不連続性は操作開始後630秒(10.5分)まではRun 1-2のそれとほぼ同じであるが、それ以降ではRun 1-4の不連続性が顕著になって

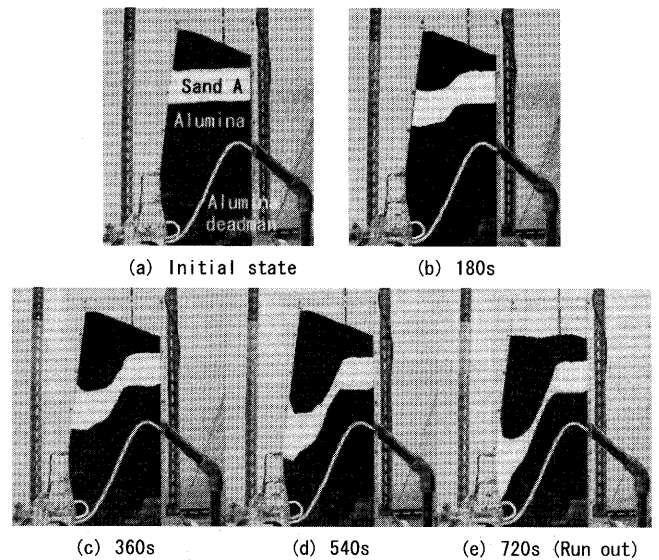


Fig. 3. Flow pattern of horizontally charged sand A layer (Run 1-4).

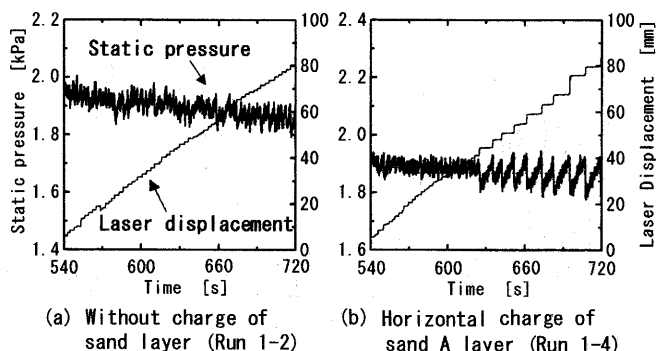


Fig. 4. Effect of sand layer on discontinuous solid motion and static pressure (deadman: Alumina particle).

いる。Fig. 3のフローパターンから模擬融着帯（砂層）は630秒以降、炉芯に極めて接近することが予想できる。

不連続挙動の発生の原因は一般に、(1)同一ガス流量を維持する時は低通気性の砂層には強い流体抗力が働き、これによりレースウェイ上に作用する粒子荷重（重力流動のポテンシャル）が減少して、レースウェイへ粒子を押し出す効果が小さくなる、さらに、(2)ファンネルフロー流路の大部分が擬停滞域（炉芯上方に発達して粒子があたかも停滞しているような領域<sup>6,7,9)</sup>）によって支配されるまでに至った時は、粒子のレースウェイへのスムーズな流れが極度に阻害される、ことによりレースウェイ膨張が進行するためと考えられる。

水平砂層に砂Bを用いた場合については、Table 3のRun 1-5（砂B）とRun 1-4（砂A）の比較をすると棚吊／スリップの周期とスリップ距離に関しては、両者に大きな差異はないが、砂Bの気体通気性が砂Aよりも小さいので不連続性はRun 1-5のほうが若干大きい。

(2) 砂炉芯の場合

Run 1-6とRun 1-3比較する。Fig. 5はRun 1-6のフローパターンと不連続性を示す。Table 3より、棚吊／スリップの周期およびスリップ距離を指標とする不連続性の度合いは、Run 1-6の操作開始後9分（Fig. 5で540秒）まではRun 1-3（水平砂層なし）と比べて大きな差はないことが判る。その時間以降、不連続性は徐々に大きくなり、3・1・1で述べた砂炉芯による周辺流化と上記(1)で示した理由により、かなり大きな不連続性が現れている。12分以降、レースウェイは砂によって完全に置換され極めて重大な不連続性が現れる事態となった。また、Run 1-6の不連続性はRun 1-4（アルミナ炉芯）より大きい（Table 3）がこれは先に述べた炉芯粒子の通気性の違いによる。粒子径のより小さい砂B層を用いたRun 1-8ではRun 1-6と比べてより大きな不連続性を示しており、特にレースウェイが砂Bで置換された後では特に顕著である。この状況でのレースウェイの挙動をFig. 6に示した。砂はスラッキング状態で流動化しており、かつ砂はレースウェイ周囲にも存在す

る。館ら<sup>9)</sup>は粗コークスと粉コークスの混合物を用いた熱間モデルで燃焼ゾーンの周り方に広がる粉コークスの蓄積層を観察し、この粉コークス層が高炉における不安定挙動の原因と仮定しているが、本実験結果はこれを裏付ける結果となっている。

(3) 砂混合層(A+C)の水平装入

砂層のガス通気性をより低くした実験である。結果はRun 1-9に示す。砂混合層がシャフト上部にあるときは砂単層の場合と比べて不連続挙動には顕著な差異は見られなかった。しかし、Fig. 7に示すように、砂Cがレースウェイに流入して砂Cの薄い層がレースウェイと炉芯の境界に形成された時は棚吊時間が最大90秒、炉頂スリップ距離50mmという単層砂Aや単層砂Bの場合には見られなかった極めて大きな不連続性が観察された。炉頂変位と静圧の変化はレースウェイの膨張と対応している。図で白く見える物質が砂Cである。

結果として、レースウェイ周囲での細粒薄層の形成や流動化もガスの周辺流化を促し、固体の不連続運動の重要な

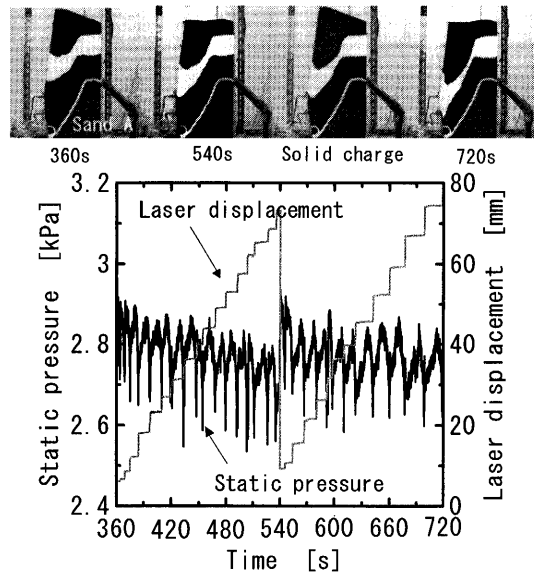


Fig. 5. Change of flow pattern and discontinuity with time (Deadman: sand A, Run 1-6).

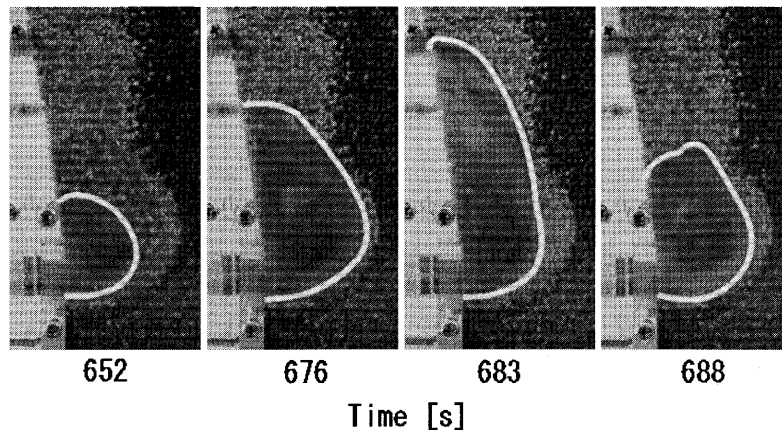


Fig. 6. Change of raceway size with time (Run 1-8, sand B layer).

因子になることが示された。

(4) チムニー効果

Table 3のRun 1-10~Run 1-12にチムニーを設定した場合の結果が示されている。Fig. 8にRun 1-10とRun 1-7のフローパターンと不連続挙動を比較して示した。図より棚吊/スリップの周期及びこれと連動する静圧変化の周期、さらにスリップ距離はRun 1-10のほうが小さくチムニー効果により不連続性が減少することが明らかである。Fig. 8(a)と比較して(b)のガス静圧が小さい。従って、よりスムーズな固体流れが得られたのは炉右側の垂直壁近傍で高

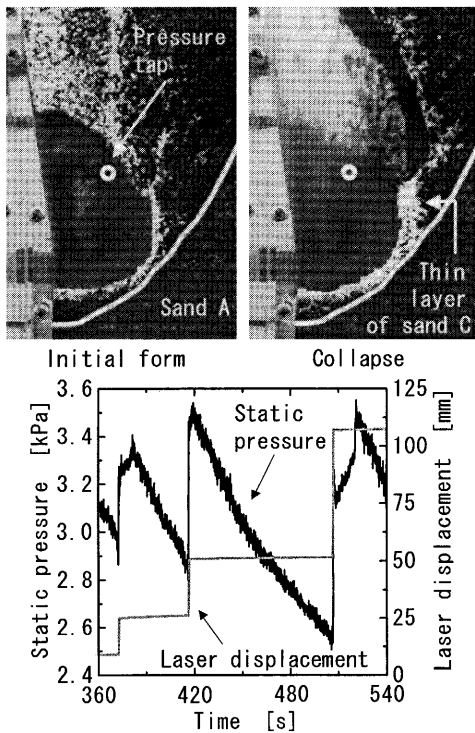


Fig. 7. Correspondence between raceway size and discontinuity (Run 1-9).

いガス透過性が確保された結果と考えることができる。チムニーのサイズの影響は実験の範囲では顕著でなかった (Run 1-10, Run 1-11)。

(5) ファンネルフロー流路の幅と不連続性

先に議論した模擬融着帯と炉芯表面間の距離が不連続挙動に与える影響をFig. 9にまとめた。図において「レースウェイから砂層の距離」は羽口と砂層の各々最下端の間の距離として定義されている。図は模擬融着帯が降下して、羽口との距離がある限界の距離より小さくなると不連続性が大きくなることを示しており、高炉の試験操作<sup>1,2)</sup>で得られた知見と対応している。擬似融着帯に砂B層を用いたFig. 9(b)でもRun 1-12 (チムニー)のほうが棚吊/スリップの周期がRun 1-8より短く、チムニー効果の存在が示されている。

3・1・3 羽口ガス周辺流化の指標—モデルによる評価

羽口ガスの周辺流化の指標をレースウェイ上方でアーチの形成を仮定したモデル<sup>10)</sup>から評価した。(垂直流量/全流入ガス流量) =  $\eta$  で定義した周辺流化の指標値は砂層 (擬

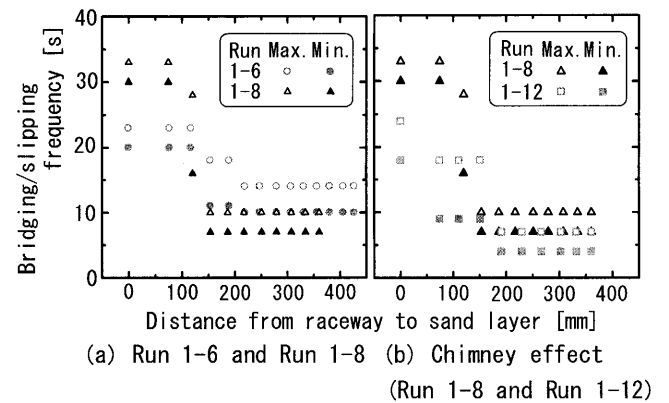


Fig. 9. Effect of distance between raceway and sand layer on bridging/slipping frequency.

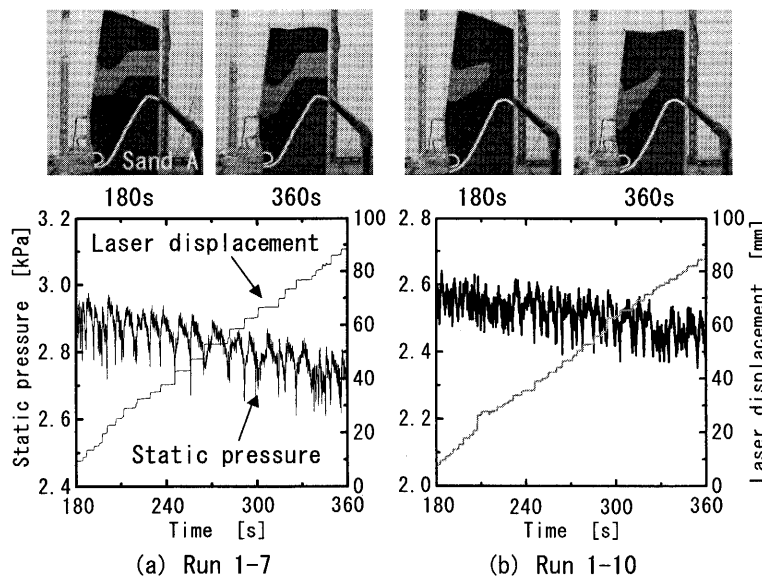


Fig. 8. Chimney effect with sand B layer.

似融着帯) 無しアルミナ粒子のみの場合は  $\eta=0.5$  であるが、一方、砂層装入実験では砂層が炉芯表面に接近するにつれて周辺流化は発達し、砂層がレースウェイに流入を始めると周辺流化は最大に達し、 $\eta=0.9$  となった。棚吊・崩壊挙動はレースウェイガスの周辺流化指標  $\eta$  と密接な関係にあることがわかった。

3.2 実験2

実験条件と粉コークスの挙動を Table 4 にまとめた。粉コークスの挙動は crack (亀裂), flooding (フラディング), bridging (棚吊), bridging/slipping (棚吊・スリップ) の用語で記述されている。Crack (亀裂) は粉コークス層の下端に亀裂の空間が形成される場合であり、粉コークス層が亀裂の崩壊・再生成を伴って降下する場合も含む。Flooding (フラディング) は粉コークス粒子がガスにより充填層空間を通過して上方へ輸送され充填層内へ拡散する状況を表す。粉コークス粒子が粗粒と共に降下しながら上方拡散する場合も含む。なお、表中、'descent' は粒子の降下運動を表す。

3.2.1 ガス流れの影響

Table 4 から明らかなように亀裂または棚吊・崩壊は一般に、シャフトの通気抵抗層 (砂B) の存在や炉芯形成粒子の種類によらず、 $U_B=35$  m/s 以上の高いガス速度の場合に観察され、時間の経過と共にフラディングが出現した。 $U_B=31$  m/s および  $U_B=28$  m/s では棚吊は現れずフラディングを伴う降下運動が主流であった。2.2 節で述べたように

$U_B=35$  m/s は、規則立方充填構造から計算された、単一コークス粉 (細粒) が充填層空隙を上方に輸送される限界速度である。このような条件下で多量のコークス粉が同時にその空隙に集中した場合に棚吊が起こるものと考えられる。亀裂あるいは棚吊が発生するための限界最小ガス速度が存在し、前報<sup>8)</sup> で示した方法によってこれを推定できることが確かめられた。

3.2.2 粉コークス層の厚み l の影響

$U_B=35$  m/s の場合について、Table 4 の Run 2-12 と Run 2-15 (共に炉芯粒子: 砂A, 層幅  $w=80$  mm) および Run 2-4 と Run 2-10 (共に炉芯粒子: アルミナ球,  $w$ =フルスパン) を比較して、粉コークス層の厚み  $l$  が固体流れに与える影響を検討する。棚吊・スリップは粉コークス層の層厚  $l=15$  mm の時に発生可能であり、一方  $l=5$  mm のように層厚が小さい時は粉コークスの運動はフラディングによって支配されている。このことより、亀裂または棚吊・スリップが発生するためにはある限界の最小厚み以上の蓄積が必要であることが示唆される (最小蓄積層厚み)。

3.2.3 粉コークス層の幅の影響

Fig.10 (Run 2-2, 2-3 及び 2-4: アルミナ粒子炉芯) により不連続挙動に与えるコークス層の幅  $w$  の影響を検討する。亀裂や棚吊は幅  $w$  が大きいほど発達しやすかった。通気抵抗の大きい粉コークス層の存在によりガス上昇流れの方向が右壁側 (垂直壁側) に縮流したことがこの一因と考えられる。ガス流量が同一である限りこのガス流路の収縮 (縮流) は高圧力損失を生み出すことになる。従って、コークス層直下の静圧の増加、即ち流体抗力が増加するため亀裂や棚吊を引き起こすのであろう。Run 2-3 では最大 8 mm の高さの亀裂が観察された。Run 2-4 に示されるように、もしも粉コークス層がフルスパンに渡って蓄積される場合は縮流の場合よりもっと大きな流体抗力が生じ、これが粉コークス層上に作用する粒子荷重に打ち勝つため棚

Table 4. Result of Experiment 2.

Run No.	Thickness $l$ [mm]	Width $w$ [mm]	Gas velocity $U_B$ [m/s]	Deadman material	Sand B in shaft'	Fines behavior
2-1	5	80	35	Alumina	non	crack-s**/flooding
2-2	15	80	35	Alumina	non	crack-s/descent/flooding
2-3	15	160	35	Alumina	non	crack/descent/flooding
2-4	15	full span	35	Alumina	non	bridging
2-5***	15	(full span)/2	35	Alumina	non	crack-s/descent/flooding
2-6	5	80	28	Alumina	non	descent/flooding
2-7	5	160	28	Alumina	non	crack/descent
2-8	5	80	31	Alumina	non	descent/flooding
2-9	5	160	31	Alumina	non	descent/flooding
2-10	5	full span	35	Alumina	non	flooding
2-11	15	160	35	Alumina	yes	bridging/slipping
2-12	15	80	35	Sand A	non	bridging/slipping
2-13	15	80	31	Sand A	non	descent/flooding
2-14	15	80	31	Sand A	yes	descent/flooding
2-15	5	80	35	Sand A	non	flooding
2-16	5	80	31	Sand A	non	descent/flooding
2-17	15	40	35	Sand A	non	crack-s/descent/flooding
2-18	15	40	35	Sand A	yes	crack/descent/flooding
2-19	15	160	35	Alumina	yes, with chimney	crack/flooding

\*Three layers of Sand    \*\*Small crack,  
 \*\*\*Fines layer was set at the position, (shaft height/4) on the belly top

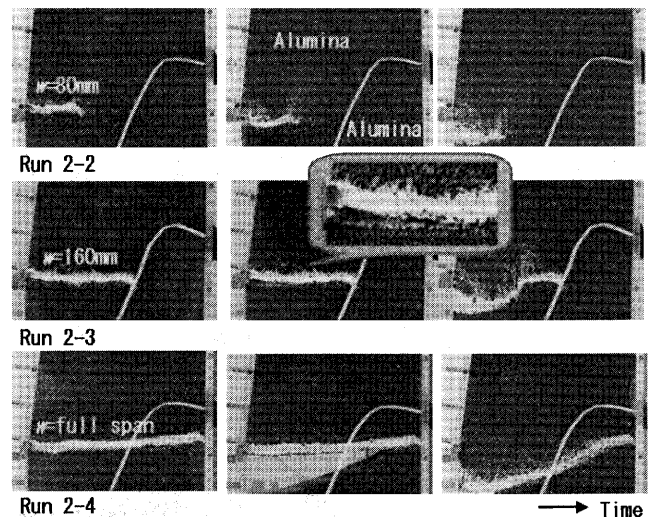


Fig. 10. Effect of fine coke layer's width on discontinuous motion (Runs 2-2, 2-3 and 2-4).

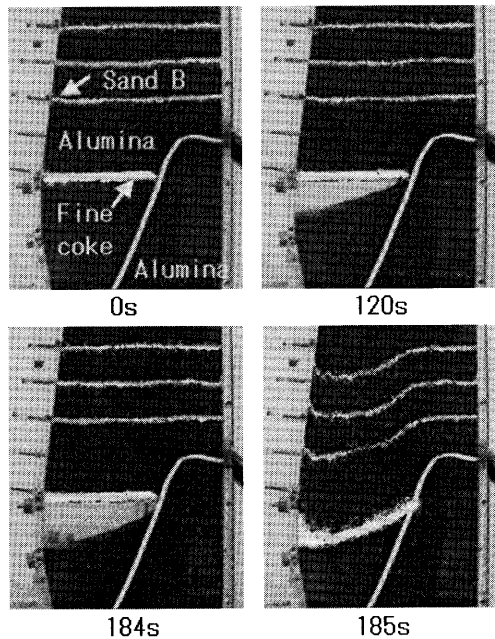


Fig. 11. Flow pattern with three layers of sand B charged in shaft (Run 2-11).

吊が発生したものと考えられる。しかし、仮にフルスパン蓄積が可能な場合でも、その厚み $l$ が小さい時は、3・2・2節で論じたように、細粒（粉コークス）は上方に拡散する。

### 3・2・4 シャフト上部に装入した砂B層（低通気性粒子）の影響

Run 2-3と低通気性の砂層を三層装入したRun 2-11を比較しよう。Run 2-11のフローパターンをFig.11に示す。Fig.10のRun 2-3では粉コークス層は亀裂を形成しながら、かつガス流れによる微粉の拡散を伴いながら降下している。一方、低通気性の砂Bの三層装入はFig.11のような大きな棚吊を引き起こしている。低通気性の砂層の存在により発生した大きな流体抗力がシャフト部の粒子荷重を支える結果、粉コークス層に作用する粒子荷重は減少する。Fig.11の棚吊は重力流動の原動力である粒子荷重の減少によるものと考えられる。シャフト部の通気性の低下は固体流れの不安定性を引き起こすことが示された。

Fig.12はシャフト部に砂Bを装入しないRun 2-3 (Fig.10)における静圧とレーザー変位の経時変化を示す。初期において静圧は初期静止充填状態から亀裂空間を含むより大きな動的空隙状態へ変化するにつれて急激に低下したが、それ以降は炉頂表面の降下（ヘッドの減少）により静圧も徐々に低下した。レーザー変位の変化はあたかも線形のように見えるがRun 2-3 (Fig.10)の亀裂の発生とスリップに対応する、炉頂変位の階段状の変化が測定されている<sup>10)</sup>。さて、180秒から360秒の間で静圧の増加を伴う重大な棚吊が発生し、その後突然のスリップと静圧の減少が起きている。120秒という長期の棚吊の後60mmのスリップが炉頂で観察されている。これはコークス粉のレースウェイへの

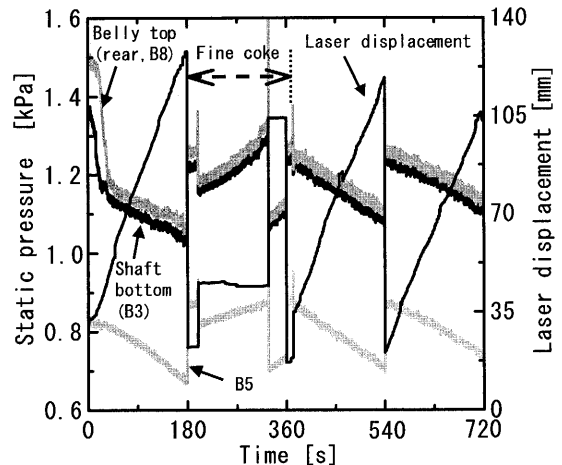


Fig. 12. Change of discontinuity with time (Run 2-3).

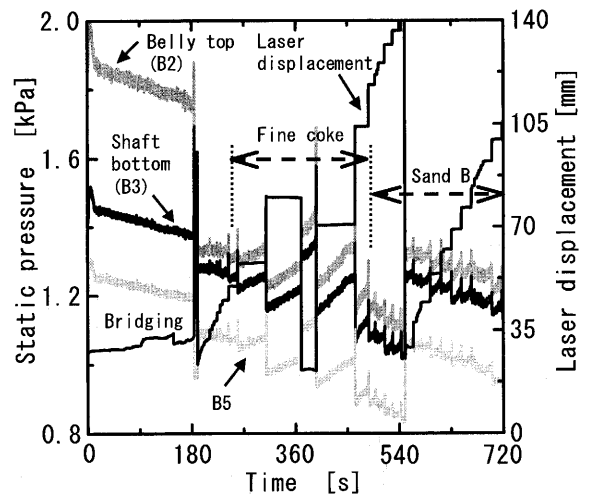


Fig. 13. Change of discontinuity with time (Fig. 14, Run 2-11).

流入とレースウェイ境界での低通気性のコークス粉薄層の形成が原因である（このメカニズムについては実験1, 3・1・2節で述べた）。およそ時刻360秒以降は、レースウェイの粉コークスが排出されコークス粉薄層も消滅しているので、いかなる不連続性も観察されていない。次に、Run 2-11 (Fig.11)の静圧とレーザー変位の経時変化をFig.13に示した。図は三段階の粒子挙動からなっている。第1段階は時刻0~184秒でありベリー上部からシャフト下端で大きな静圧と長期間の棚吊が出現し、その後約70mmのスリップが観察されている。第2段階はコークス粉のレースウェイへの流入期間での不連続挙動である。最後の段階は炉下部まで降下してきた砂B層のレースウェイへの流入の影響が現れる期間である。この最後の期間ではコークス粉の流入時よりも不連続性は小さい。レースウェイへ流入する粒子の粒子径が小さいほど不連続性は増大することがわかった。

低通気性の砂B層を装入した時は、粉コークス層の幅が $w=40$ mmと小さい時でさえ亀裂が発生した<sup>10)</sup>ことから考



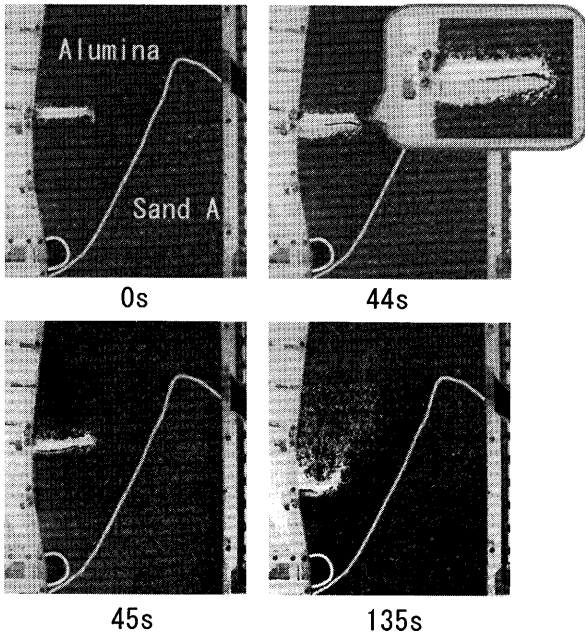


Fig. 14. Flow pattern with sand A deadman (Run 2-12).

えると、シャフト部における低通気性砂層の存在の影響は相当大きいと思われる。

垂直壁から 10 cm だけ砂 B を装入しない領域を作り、砂 B 不完全三層装入にてチムニー効果を調べた (Run 2-19)。Run 2-19 は Run 2-11 (Fig. 11) と同じ実験条件で行われ、結果は Table 4 に示されている。ここでも Fig. 11 のような棚吊／スリップは発生せずチムニー効果が確認できた。

### 3.2.5 炉芯粒子の通気性の影響

最後に、シャフトには低通気性の砂層を装入しない場合において、Table 4 の Run 2-2 と Run 2-12 の比較を行い、粉コークス蓄積時の不連続性に及ぼす炉芯粒子の通気性の影響を検討した。アルミナ炉芯の Run 2-2 では粉コークス層は微少の亀裂・スリップとフラディングを伴って降下した。一方、砂 A 炉芯としたときの Run 2-12 のフローパターン、静圧とレーザー変位の経時変化をそれぞれ Figs. 14, 15 に示す。棚吊が明確に観察され (Fig. 14)、時刻 45 秒に約 10 mm の炉頂スリップが示されている (Fig. 15)。低通気性の炉芯では、実験 1 と同様、ガスの周辺化流が促進され粉コークス粒子による不連続挙動にも重大な影響を及ぼすことが確認された。

## 4. 結論

高炉の低還元材比操業における棚吊・スリップを伴う固体の不安定運動を支配する因子を見出すための実験的研究を行った。低通気性の融着帯を砂層で模擬した実験では全羽口ガス流量に対する周辺化流の割合が固体とガス静圧の不連続挙動に大きな影響を与えることが判った。周辺化流の割合は以下の条件により増加した。1) 炉芯の通気性の低

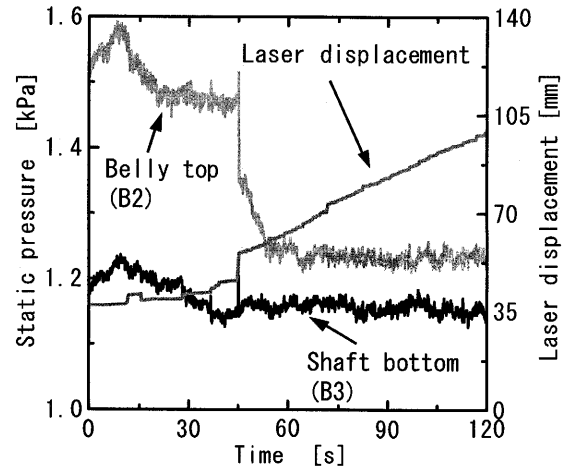


Fig. 15. Change of discontinuity with time (Run 2-12).

下、2) 炉芯表面への模擬融着帯の接近、3) レースウエイへの細粒の流入。上記 2) については、模擬融着帯がある限界の位置から更に低下すると不連続性が急激に増加することが認められた。この条件は実炉で融着帯が炉芯擬停滞域近傍まで降下移動した時と対応するであろう。シャフト下端レベルに蓄積した粉コークス層も不連続挙動を引き起こした。棚吊を引き起こす限界ガス速度、限界蓄積層厚みが存在し、その他、蓄積層の幅が関与することが示唆された。シャフト部低通気性粒子層の存在は蓄積粉コークス層の棚吊を誘引するほどの重大な影響を与えた。気体透過性の良いチムニー領域を炉中心部に設けると全ての場合において粒子挙動の不連続性を減少させることが出来た。

(株) 神戸製鋼所、松井良行氏および新日本製鐵 (株)、松崎眞六氏には有益な討論を頂いた。付して謝意を表します。

## 記号

- $d_p$  : Particle diameter (mm)
- $f_1$  : Coefficient of Erugun's eqation defined in Table 1 (N s/m<sup>4</sup>)
- $f_2$  : Coefficient of Erugun's eqation defined in Table 1 (N s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)
- $F_D$  : Fluid drag on a single particle (N)
- $F_E$  : External force exerted by a single particle (N)
- $l$  : Thickness of fine coke layer (mm)
- $u_f$  : Superficial velocity at shaft bottom level (m/s)
- $u_{mf}$  : Minimum fluidizing velocity (m/s)
- $U_B$  : Blast velocity (m/s)
- $U_S$  : Solid descending velocity at top of apparatus (m/min)
- $w$  : Width of fine coke layer (mm)
- $W_R$  : Solid discharging rate (kg/min)
- $W_S$  : Sub-discharging rate (kg/min)
- $\epsilon$  : Void fraction of particle bed (-)
- $\eta$  : Index of peripheral flow (-)
- $\theta$  : Angle of repose of particles (deg)
- $\rho_b$  : Bulk density of particle bed (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_p$  : Density of particle (kg/m<sup>3</sup>)
- $\phi$  : Sphericity, defined by dividing the surface area of a sphere of the same volume as the particle by the surface area of the particle,  $\phi=1$  for sphere (-)

## 文 献

- 1) Y.Togino, M.Tateoka, M.Sugata, K.Yamaguchi, S.Kume, K.Yamaguchi and I.Abe: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 1553.
- 2) S.Kajikawa, R.Yamamoto, R.Nakajima, S.Kishimoto and T.Fukushima: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 2361.
- 3) H.Kawata, S.Kishimoto, A.Maki, Y.Saijyo, H.Wakai and K.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 75.
- 4) K.Kojima, T.Nisi, T.Yamaguchi, H.Nakama and S.Ida: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 570.
- 5) M.Tate, Y.Kuwano, K.Suzuki, T.Chang, H.Go and M.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 495.
- 6) H.Takahashi and N.Komatsu: *ISIJ Int.*, **33** (1993), 655.
- 7) H.Takahashi, M.Tanno and J.Katayama: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 1354.
- 8) H.Kawai, H.Takahashi and M.Ichida: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1112.
- 9) H.Takahashi, K.Kushima and T.Takeuchi: *ISIJ Int.*, **29** (1989), 117.
- 10) H.Takahashi, H.Kawai, M.Kobayashi and T.Fukui: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 1386.