

## 移動層内の擬似粒子の粉化

//////////  
 論文  
 //////////

九 島 行 正\*

## Disintegration of Pseudo-particles in the Moving Bed

Kosei KUSHIMA

## Synopsis :

Material disintegration in the blast furnace should be relative not only to the material strength but also to the stresses in the furnace. However, there are only few papers on the particle disintegration related to stresses.

Disintegration of pseudo-particles in the moving bed was investigated by using the reduced scale model of Hirohata No. 4 blast furnace. Normal stresses in the model were also measured and analyzed in relation to the particle disintegration.

As a result, the followings were clarified. Most of the particle disintegration occurred at the periphery of the model. The generation rate of fine particle in the lower part was higher than that in the upper part. Particles were highly disintegrated when a large dead zone was temporarily formed at the wall. Through the comparison of the stresses with the particle strength, it was suggested that the shear stress causes the particle disintegration. Maximum shear stress possibly acts on the particles at the boundary of the temporary dead zone. The shear stress possibly varies in accordance with the temporary dead zone growth.

When the strength of the materials charged into the blast furnace is lower than the shear stress, the materials will enormously be disintegrated.

**Key words :** blast furnace ; moving bed ; particle disintegration ; shear stress ; particle strength.

## 1. 緒 言

高炉操業ではガス流安定化のため炉内粉率を低く保つことが重要である。このため、装入物の篩分けや装入物強度上昇の努力が払われてきた。炉内粉化についてはこれまでも多くの研究がなされたが、たとえば、焼結鉄の還元粉化の研究に代表されるように、炉内における装入物の強度劣化機構に関するもの<sup>1)2)</sup>が主であった。S. TOYAMA<sup>3)</sup>は、円筒型移動層の実験を行い、粉化が周辺部で起こったと報告している。炉内粉化は装入物強度と炉内応力の相対関係で決まるものと考えられるが、炉内応力に着目した研究例は少ない。

そこで、高炉縮尺模型を用いて移動層内での擬似粒子の粉化実験を行い、粉化が起こりやすい場所および粒子のドラムテストによる粉化率と炉内粉化率の関係を調べた。また、炉内応力分布を測定し、粉化原因となる応力について考察した。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験装置

実験には Fig. 1 に示した高炉縮尺模型を使用した。炉体は、広畑 4 高炉 1/20 縮尺の半周模型で、炉体前面の透明アクリル樹脂板を通して炉内装入物の降下状況を観察できるようにした。炉内装入物は羽口前のレースウェイ近似の排出口を介して系外に排出される。高炉下部の炉壁近傍で降下が停滞した場合を想定した実験では、ペリー上部に張出長さ 50 mm または 20 mm の棚状突起を取りつけた。

## 2.2 実験の方法

擬似粒子強度が一定の実験（実験 I）では、模型炉内に粒径 6 mm のアルミナ球を充填し、ストックライン (SL) から 200, 500, 800 mm のレベルの、炉壁から 20, 40, 60, 100, 150 mm 炉内側の場所に擬似粒子を 30 個ずつ設置した。なお、アクリル樹脂面から 25 mm 以内では、樹脂面とのまさつの影響で粒子の降下の遅れが観察されたので、擬似粒子設置場所は樹脂面から 50

平成元年 4 月本会講演大会にて発表 平成元年 7 月 7 日受付 (Received July 7, 1989)

\* 新日本製鉄(株)広畑技術研究部 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

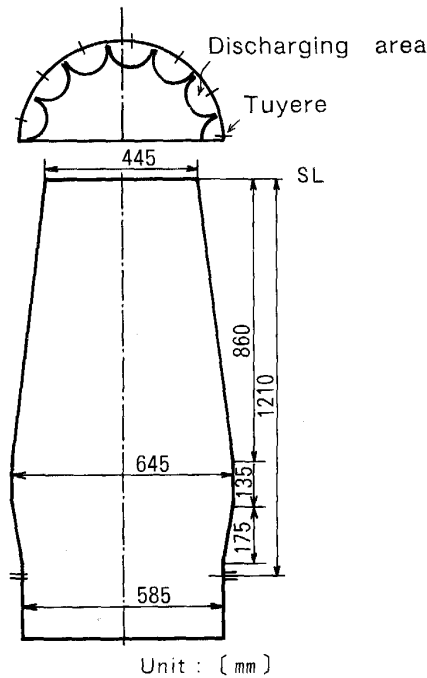


Fig. 1. 1/20 reduced scale model of Hirohata No. 4 blast furnace.

mm 以上離すようにした。炉口部での断面平均降下速度を 66 mm/min に保ち、装入物を一定距離降下 (SL から 500 mm の位置のトレーサーが 250 mm 降下) させた。この降下に要した時間は約 6 min であった。切出しを停止後、炉内容物を上部からそと取り出し + 3 mm の擬似粒子重量を測定し、炉内設置時の重量との差から、炉内粉化量を求めた。炉内粉化率は、単位移動距離当たりの粉化量を比較するため降下距離 100 mm 当たりに換算して表示した。実験 I は炉壁面が平滑な場合とベリー上端に 50 mm の棚状突起を取りつけた場合について行った。

粒子強度を変化させた実験 (実験 II) では SL から 200, 500 mm のレベルで、炉壁から 20 mm の場所に擬似粒子を設置した。また、周辺部の粉化が、実験 I の平滑壁面の場合と 50 mm の突起取り付けの場合の中間の値になるようにするため、ベリー上端に 20 mm の棚状突起を取りつけた。

移動層内粉化試験に先立って、清水ら<sup>4)</sup>と同様の方法で炉壁部および層内の応力分布を測定した。壁面圧力の測定では、受圧面径 26 mm, 共振周波数 620 Hz の土圧計を炉高方向 8 か所に設置し、層内応力の測定では、受圧面径 56 mm, 共振周波数 900 Hz の土圧計を用い、炉半径の中間位置 ( $r/R=0.5$ , 半周模型の中央部) を降下させた。シャフト部では層内応力の振動数と振幅は、それぞれ、10 ないし 12  $\text{min}^{-1}$ , 1 ないし 4  $\text{gf/cm}^2$  であ

り、ボッシュ部では 20 ないし 30  $\text{min}^{-1}$ , 5 ないし 15  $\text{gf/cm}^2$  であった。ベリー部では、シャフト部とボッシュ部の中間の値を示した。壁面圧力  $\sigma_w$  の振動数は、層内応力の場合とはほぼ同じであったが、振幅は層内応力の場合の 3 ないし 5 倍に達した。降下開始と同時に  $\sigma_w$  は増加を始めたが、1 min 以内に定常時の値になった。降下初期の増大時の  $\sigma_w$  と定常時の  $\sigma_w$  の間には大きな差は見られなかった。装入物の降下状況は、着色粒子をトレーサーとして断面内に均一層厚で装入し、一定距離降下後装入物を掻き出し、トレーサー分布を求め、それから降下ライン (Fig. 2) を作図した。

### 2.3 使用粒子の性状

主たる装入物として径 6 mm のアルミナ球を使用した。擬似粒子は、0.5-1 mm の砂と 0.1 mm 以下の珪石粉を重量比で 1:1 に混合し、ベントナイトを添加して造った。擬似粒子の粒径は 6-8 mm で、強度はベントナイト添加量を 0.1 から 0.4 wt% の範囲で変えることによって調節した。粒子強度は圧潰強度 (CS: [gf/個]) およびドラムテスト粉化率 ( $DI_{30/5}$ <sup>†</sup>) で代表させた。

実験 I では CS 200 gf/個,  $DI_{30/5}$  85%, 実験 II では CS 300, 500, 650, 700, 900 gf/個で,  $DI_{30/5}$  はそれぞれ 80, 67, 52, 45, 32% のものを用いた。CS のばらつきはいずれも約 20% であった。擬似粒子の見掛け密度は 2.5  $\text{g/cm}^3$  で、アルミナ球の見掛け密度とはほぼ等しい。

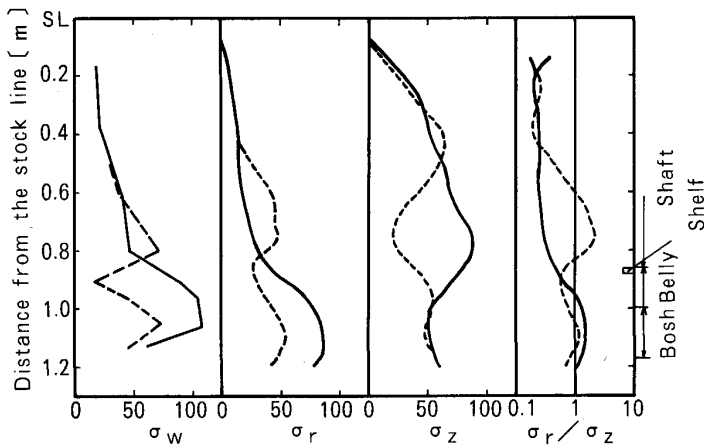
## 3. 実験結果

### 3.1 粒子強度が一定の場合 (実験 I)

高炉模型内の装入物降下状況を Fig. 2 に示す。シャフト上~中部では装入物の降下はフラットである。この領域を以下では「フラット降下域」と称する。炉壁近傍では壁面まさつ抵抗のためわずかながら降下が遅れる。ここでは降下層が塑性変形を続けており、以下では「変形領域」(Plastic deformation region) と称する。シャフト下部とベリー部でもフラット降下域は広いが、変形領域が拡大する。ボッシュ部ではレースウェイ相当の排出口に向かう縮流になっている。炉底には炉芯停滞層が形成され、その上に降下の遅い領域がある。ベリー上端に 50 mm の棚状突起を設けた実験では、棚状突起の上に停滞層が形成されるとともに、さらにその上に降下が極めて遅い領域があった。この領域を、以下では「擬停滞層」(Temporary dead zone) と称する。

炉内応力分布測定結果 (振動の平均値) を Fig. 3 に示す。壁面が平滑な場合、シャフト部では水平応力  $\sigma_r$

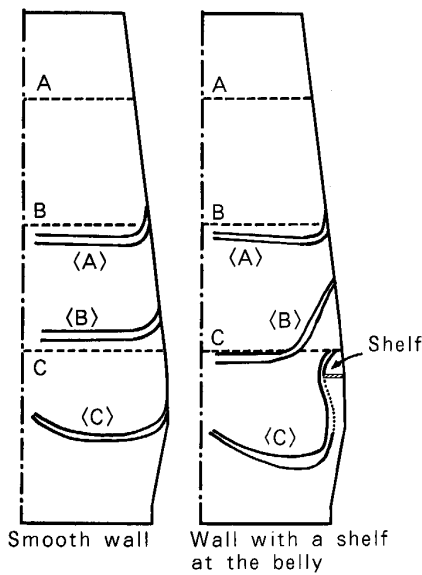
<sup>†</sup>  $DI_{30/5}$ : 30 rpm, 5 min での -3 mm 粉発生割合 (%)



Unit of  $\sigma$ : (gf/cm<sup>2</sup>)

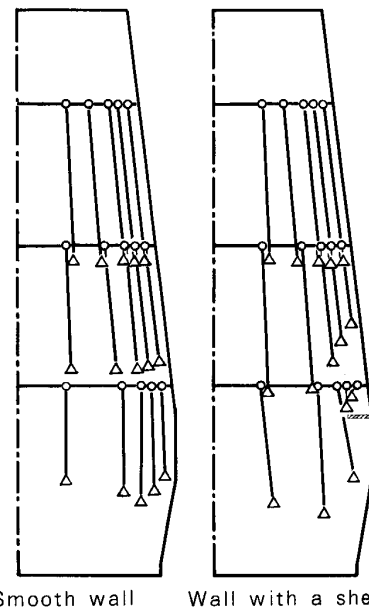
—: Smooth wall    - - - - : Wall with a shelf

Fig. 3. Distribution of normal stresses in the reduced model.



A, B, C: Initial position of tracers  
 <A>, <B>, <C>: Tracer distribution after descent

Fig. 2. Burden descent in the reduced model.



○: Initial position    △: Position after descent

Fig. 4. Descent of pseudo-particles.

に比べて垂直応力  $\sigma_z$  が大きく、主動状態 ( $\sigma_r/\sigma_z < 1$ ) であるが、シャフト下部で  $\sigma_r$  が増大しはじめ、 $\sigma_z$  が減少してベリー部以下は受働状態 ( $\sigma_r/\sigma_z > 1$ ) になっている。壁面応力  $\sigma_w$  は炉高方向のほぼ全域にわたって  $\sigma_r$  よりも大きい。ベリー部上端に棚状突起を設けた実験では、 $\sigma_w$  は突起上で極大となり、その下方では平滑壁面の場合よりもかなり小さい。 $\sigma_r$  はシャフト中段で増加しはじめ、 $\sigma_w$  と同様に突起直上レベルで極大となる。一方、 $\sigma_z$  は突起レベルよりもかなり上方のシャフト中段で極大となり、それ以下では減少するため、受働状態領域が平滑壁面の場合よりも上方にシフトした。

移動層内粉化実験における、擬似粒子の降下状況を Fig. 4 に、粉化状況を Fig. 5 に示す。

平滑壁面の場合、炉中間域よりは周辺部で粉化率が高い。また、シャフト上部よりもシャフト下部の粉化率が

高い。炉下部では、炉芯停滞層上方での粉化率が高い。ベリー上端に棚状突起を設けた実験では、平滑壁面の場合に比べてシャフト下部以下の炉壁近傍で粉化率が異常に高くなった。炉内を降下した擬似粒子は、割れているものは少なく、球形を保ったまま粒径が小さくなっていることが多い。

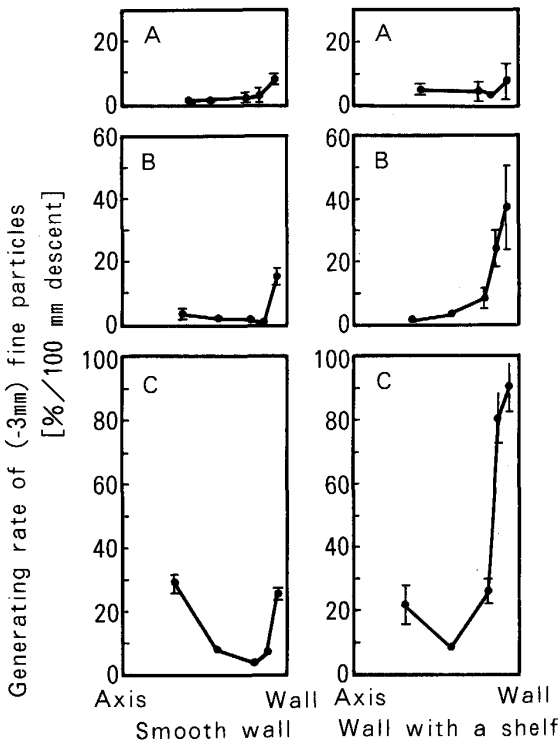
### 3.2 粉化率に及ぼす粒子強度の影響 (実験 II)

実験結果を Fig. 6 に示す。  $DI_{30/5} < 67\%$  では炉内粉化率は低く、  $DI_{30/5}$  が 70% を超えると炉内粉化率が極端に多くなる。この傾向はシャフト上-下部で共通しており、繰返しテストでの再現性は良好であった。

## 4. 考 察

### 4.1 粉化原因となる応力の検討

シャフト部では装入物の降下につれて降下面積が拡大



A: Upper part B: Intermediate part C: Lower part  
Fig. 5. Disintegration of the descent particles.

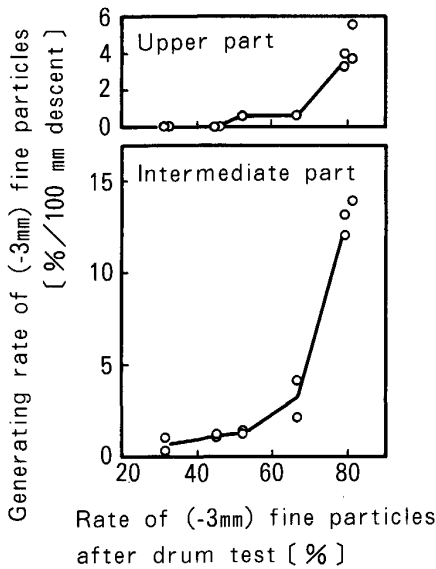


Fig. 6. Drum test strength of pseudo-particles and disintegration degree in the moving bed.

し層厚がしだいに薄くなり、隣接粒子同士の配列変化があるから、フラット降下域は厳密にはプラグフローとはいえないが、この領域では粉化率が低く、変形領域の粉化率が高い。また、シャフト上部よりは下部の粉化率が高い。

炉内応力の解析に当たって、次の仮定を設けた。

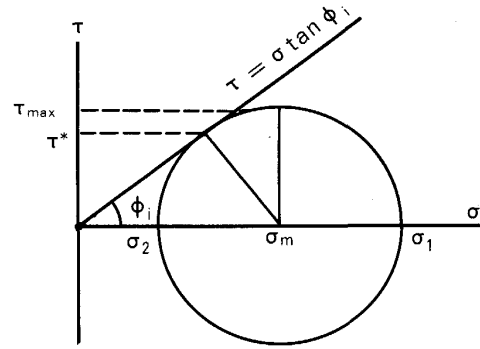


Fig. 7. Mohr's circle.

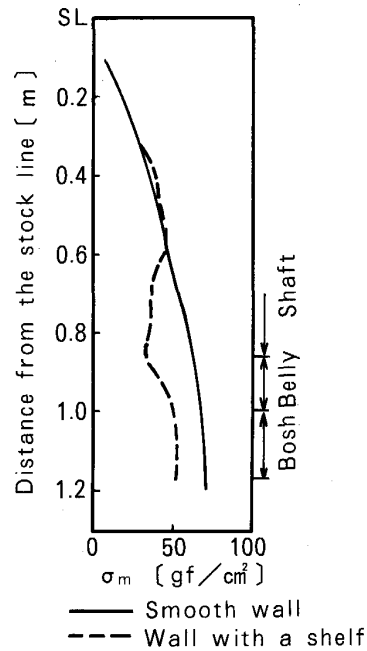


Fig. 8. Distribution of the mean normal stress  $\sigma_m$ .

仮定-1: 対象移動層は連続体として取り扱える。

仮定-2: 粒子は非粘着性のクーロン粉体である。

仮定-3: 水平断面内では炉壁近傍も含めて、垂直応力  $\sigma_z$  と水平応力  $\sigma_r$  の平均値  $\sigma_m$  は一定である。

Fig. 7 に示したモール円から、層内の最大主応力  $\sigma_1$  は(1)式で表される。

$$\sigma_1 = \sigma_m(1 + \sin\phi_i) \dots\dots\dots(1)$$

$\phi_i$ : 粒子の内部まさつ角 [deg]

ここで、 $\sigma_m$  は(2)式で表される。

$$\sigma_m = (\sigma_r + \sigma_z)/2 \dots\dots\dots(2)$$

$r/R=0.5$  の位置での炉高方向の  $\sigma_m$  分布を Fig. 8 に示す。実験で使用したアルミナ球の  $\phi_i$  は後述するように、約  $35^\circ$  と推定されるから、Fig. 8 の  $\sigma_m$  の最大値と(1)式から模型炉内の  $\sigma_1$  は  $120 \text{ gf/cm}^2$  を超えないと判断される。 $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  の振動の最大値から求めた  $\sigma_m$  でも

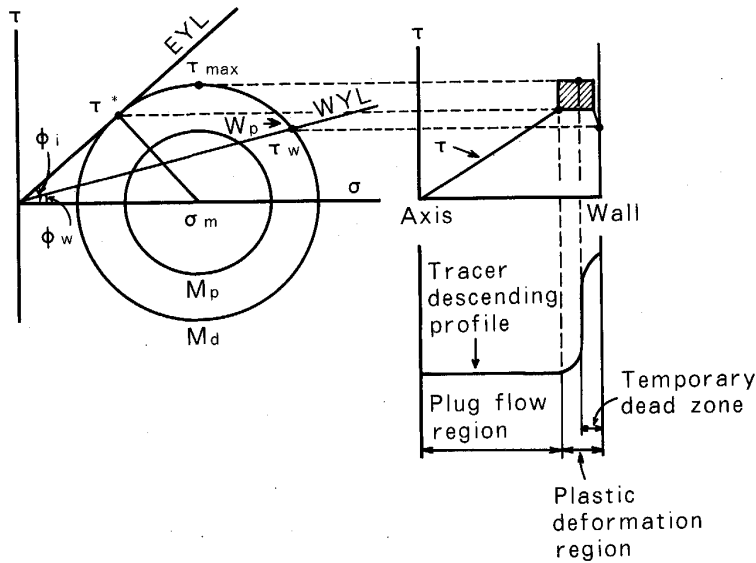


Fig. 9. Schematic illustration of radial distribution of the shear stress in the shaft.

150 gf/cm<sup>2</sup> であり、 $\sigma_w$  の最大値も 150 gf/cm<sup>2</sup> であった。しかるに、擬似粒子の強度が最も低い実験 I の場合でも圧潰強度は約 200 gf/個であり、この強度を擬似粒子径 7 mm、空間率 0.4 として単位面積当たりに換算すると 312 gf/cm<sup>2</sup> に相当するから、粒子表面に垂直に加わる応力が粉化の直接原因とは考えられない。炉内降下後の擬似粒子があまり割れておらず、磨耗による粒径の減少が目立ったことから、炉内粉化はせん断応力によってひきおこされたものと推察できる。

4.2 炉内せん断応力分布とその変化要因

プラグフロー域では粒子層の破壊 (Yield) は起こらないから、Fig. 9 において、プラグフロー域の応力状態を表すモール円  $M_p$  は粒子層の破壊包絡線 EYL に接しない。一方、変形領域では継続的に層の破壊が起こっており、その応力状態を表すモール円  $M_d$  は EYL と接する。変形領域内では (3) 式のすべり線に沿ってアブレーションが起こると考えられる。

すべり線の方程式：

$$dz/dr = \tan(\alpha \pm \eta) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\alpha$  : 最大主応力面と鉛直面のなす角度

$$\eta = \pi/4 - \phi_i/2$$

すべり線に沿ったせん断応力  $\tau^*$  は (4) 式で表される。

$$\tau^* = \sigma_m \sin \phi_i \cos \phi_i \dots\dots\dots (4)$$

仮定-3 が成立すれば、変形領域では一定値の  $\tau^*$  が作用することになる。高橋ら<sup>5)6)</sup> は移動層内に降下流の速度が不連続的に変化する境界線が存在し、それが塑性力学的に求められる速度特性線と対応することを指摘している。この速度特性線は層内のせん断歪み速度が最大となる方位を示すもので、(5) 式で表される。

速度特性線の方程式：

$$dz/dr = -\cot(\alpha - \pi/4) \dots\dots\dots (5-a)$$

または

$$dz/dr = \tan(\alpha - \pi/4) \dots\dots\dots (5-b)$$

炉下部壁面に棚状突起を設けると擬停滞層が形成され、その境界がほぼ速度特性線と対応することは別の実験<sup>6)</sup> で確かめた。壁面に棚状突起がない場合には擬停滞層は明瞭には現れない。アブレーションが速度特性線に沿って起こっている場合には、層内の最大せん断応力  $\tau_{max}$  が作用することになる。

$\tau_{max}$  はモール円から (6) 式のように表される。

$$\tau_{max} = \sigma_m \sin \phi_i \dots\dots\dots (6)$$

壁面に接して降下する粒子には壁面せん断応力  $\tau_w$  が作用するが、この  $\tau_w$  は受働状態の場合モール円と壁直近の破壊包絡線 WYL の交点のうち  $W_p$  点で表される。

シャフト部にプラグフローが存在するとすれば、水平断面内で  $\sigma_z$  が一定ならばプラグフロー域では  $\tau_{rz}$  は (7) 式で表され<sup>7)</sup>、半径方向距離  $r$  に比例する。

$$\tau_{rz} = r/2(\gamma - \partial\sigma_z/\partial z) \dots\dots\dots (7)$$

$\gamma$  : 嵩比重量 [gf/cm<sup>3</sup>]

これらの結果から炉内水平断面内のせん断応力分布は模式的に Fig. 9 のように表される。ただし、高炉のシャフト部では隣接粒子同士の配列変化があり、塑性平衡状態に近いと考えられるから、炉中心部のせん断応力はゼロにはならないはずであるが、少なくとも周辺部よりも大きくなることは考えにくい。このせん断応力  $\tau^*$  ないし  $\tau_{max}$  が粒子のせん断強度を上回るときに粉化が起こるものと考えられる。粉化が主として周辺部で起こったのは、Fig. 9 で明らかなように、周辺のせん断応力が大きいためと理解できる。ペリー部に突起を設けたとき

に粉化率が高くなったのは、突起上に擬停滞層が形成され、 $\tau_{max}$ が作用する頻度が増えたためと推察される。炉芯の上方にも擬停滞層があり、その境界でも炉壁擬停滞層の場合と同様に $\tau_{max}$ が作用する可能性がある。炉下部中間域の粉化率が高いのはそのためであろう。

モール円を使用して応力解析を行うためには、粒子の内部まさつ角 $\phi_i$ を知る必要がある。粗い粒子の $\phi_i$ を測定するのに適当な方法はないが、G. C. GARDENER<sup>8)</sup>によれば、底部に仕切板を設けた移動層では、仕切板上に形成される停滞層の排出口近傍での傾斜角は $\phi_i$ にほぼ等しい。この方法で求めた傾斜角を以下では動的内部まさつ角 $\phi_d$ と称する。高炉模型実験で使用したアルミナ球の $\phi_d$ は $35^\circ$ 。鉍滓粒子の場合は $\phi_d$ が $50^\circ$ 以上であった。内部まさつ角が $35^\circ$ と $50^\circ$ の粒子を層状に装入した場合の応力状態はそれぞれFig. 10のモール円 $M_{35}$ と $M_{50}$ で表される。 $\tau^{*35}$ と $\tau^{*50}$ はほぼ等しいが、 $\tau_{max50}$ は $\tau_{max35}$ よりもかなり大きい。このことから、擬停滞層が炉内側に拡大してフラット降下域が狭くなるときにはペレットに比べて内部まさつ角の大きな焼結鉍の方が、より大きなせん断応力を受けるものと推察される。

森山<sup>9)</sup>は、壁面応力の振動の考察から、炉壁近傍の降下が断続的になっているときには微小な動的アーチの形成と崩壊が起こっていて、動的アーチ形成時に $\sigma_m$ がかなり大きくなることを指摘している。たとえば、 $\sigma_m$ が $n$ 倍になると(4)および(6)式から $\tau^*$ と $\tau_{max}$ も $n$ 倍になることがわかる。本実験でも、ベリ一部とボッシュ部で $\sigma_w$ の振動数が増え、振幅が大きくなっており、このために炉下部での粉化率が高くなったことが推察される。

#### 4.3 粒子強度の検討

炉内せん断応力( $\tau^*$ ないし $\tau_{max}$ )が粒子のせん断強

度を上回れば粉化が起こるはずだから、Fig. 6のデータは炉周辺の $\tau^*$ が $DI_{30/5} = 70\%$ の擬似粒子の強度に近かったことを示している。すなわち、このせん断応力が炉内粉化が起こるか否かの粒子の臨界強度の目安といえる。炉壁に突起ができて擬停滞層が成長しているときには、 $\tau_{max}$ が作用する頻度が増えると考えられ、その場合には装入物のせん断強度を高めなければならない。

実高炉装入物の内部まさつ角やせん断強度、および、炉内のせん断応力の測定方法はまだ確立されていない。これらの問題は今後の研究課題といえよう。

## 5. 結 言

高炉模型を用いて移動層内の粒子の粉化状況を調査した結果、次のことが明らかになった。

(1)粉化は炉周辺部で起こりやすい。また、炉内で粒子強度が一定であれば、炉上部よりも下部で粉化が起こりやすい。

(2)炉壁際の擬停滞層が炉内側に拡大してフラット降下域が狭くなると、粉化率が異常に高くなる。

続いて、粉化原因となる応力に関する考察から、次のことが推察された。

(3)粉化を引き起こす力は粒子表面に垂直に加わる応力ではなくせん断応力である。

(4)擬停滞層成長時には最大せん断応力が作用する可能性がある。

(5)粒子のドラムテスト粉化率と移動層内粉化率の関係は、粒子強度が高いときには直線的で、かつ粉化率は低い。粒子強度が低下すると急激に炉内粉化率が高くなるような臨界強度が存在する。この臨界強度は炉内せん断応力に対応して変化するものと考えられる。

## 記 号

CS: 擬似粒子の圧潰強度 (gf/個)

$DI_{30/5}$ : ドラムテストでの $-3\text{ mm}$ 粉発生割合 (—)

EYL, WYL: 粒子層および壁面の破壊包絡線

$M_d, M_p, M_{35}, M_{50}$ : モール円

$R$ : 炉半径 (m)

$r, z$ : 半径方向, 重力方向の距離 (m)

SL: ストックライン

$W_p$ : モール円において受働状態での壁直近粒子の応力を表す点

$\alpha$ : 最大主応力面と水平方向に直角な面のなす角 (rad)

$\gamma$ : 嵩比重量 (gf/cm<sup>3</sup>)

$\sigma_r, \sigma_z, \sigma_w$ : 水平応力, 垂直応力, 壁面応力 (gf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_m$ :  $\sigma_r$ と $\sigma_z$ の平均値 (gf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_1$ : 最大主応力 (gf/cm<sup>2</sup>)

$\tau^*, \tau_{max}$ : すべり線に沿ったせん断応力および最大せん断応力 (gf/cm<sup>2</sup>)

$\tau_{rz}$ :  $\sigma_r$ に対応するせん断応力 (gf/cm<sup>2</sup>)

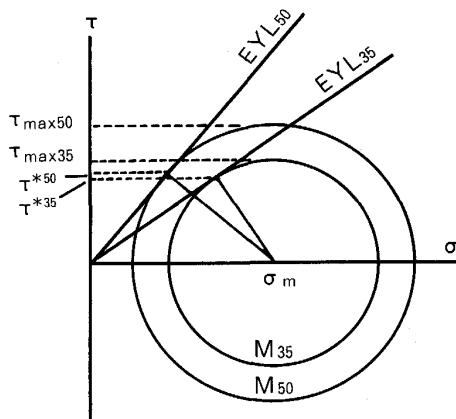


Fig. 10. Shear stresses in case of different angles of internal friction.

$\tau_w$ : 壁面でのせん断応力 ( $\text{gf}/\text{cm}^2$ )

$\phi_i, \phi_d$ : 粒子の内部まさつ角および動的内部まさつ角  
(deg or rad)

$\phi_w$ : 壁面でのまさつ角 (deg)

### 文 献

- 1) 志垣一郎, 沢田峰男, 前川昌大, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1513
- 2) 中島龍一, 炭竈隆志, 脇元一政, 長野誠規, 川田 仁, 桜井雅昭: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1964
- 3) S. TOYAMA: Powder Technology, **4** (1970/71), p. 214
- 4) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晋一, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 936
- 5) 高橋洋志, 小幡英二, 竹内隆男: 化学工学論文集, **13** (1987), p. 340
- 6) H. TAKAHASHI, K. KUSHIMA, T. TAKEUCHI: ISIJ International, **29** (1989), p. 117
- 7) 高橋洋志, 柳井 弘: 化学工学, **35** (1971), p. 357
- 8) G. C. GARDENER: Chemical Engineering Science, **21** (1966), p. 261
- 9) 森山龍一, 神保元二: 化学工学論文集, **12** (1986), p. 63