

### 討 3 高炉内の原料の運動に関する模型実験の有効性と限界

(株) 神戸製鋼所 中央研究所

○ 稲葉晋一 清水正賢 沖本憲市

高炉は高温、CO ガス雰囲気、高圧力の条件で操業され、炉内では化学反応と物理現象が連続的に複雑に交絡して発生するため、長い間、高炉はブラックボックスと言われ、炉内現象はほとんど不明のままであった。近年、炉況の変化を的確に制御することの必要性から炉内現象の解明に注力されている。

ここでは、高炉操業にとって最も基本となる原料の物理的挙動を解明するための模型実験を対象として、観察された現象を解析する上での留意点と模型を製作する上で考慮すべき問題点を検討する。

#### 2. 模型装置の考慮すべき条件

##### 2.1 無次元数

模型が実物の縮小複製である限り無次元数を合わせれば、高炉内の現象を再現できるはずである<sup>1)</sup>。高炉内の原料の挙動に関する無次元数は粉粒体層の応力のつり合いを考えることによって導かれる。いま、直角座標系をとり、座標軸を(x, y, z) で表わす。この系での応力を( $\sigma_x', \sigma_y', \sigma_z' : \tau_{xy}', \tau_{yz}', \tau_{zx}'$ )、見かけの密度を  $\rho_a$ 、速度を  $u', v', w'$  とすると(1)式が成り立つ<sup>2)</sup>

$$\frac{\partial \sigma_x'}{\partial x'} + \frac{\partial \tau_{xy'}}{\partial y'} + \frac{\partial \tau_{xz'}}{\partial z'} = a_1 a_2 a_3 \frac{D'}{D' t'} (q u')$$

ただし、 $q = (1 - p) / (1 - p_0)$

$$\frac{\partial \tau_{yx'}}{\partial x'} + \frac{\partial \sigma_y'}{\partial y'} + \frac{\partial \tau_{yz'}}{\partial z'} = a_1 a_2 a_3 \frac{D'}{D' t'} (q v') \quad \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx'}}{\partial x'} + \frac{\partial \tau_{zy'}}{\partial y'} + \frac{\partial \sigma_z'}{\partial z'} = a_1 a_2 a_3 \frac{D'}{D' t'} (q w') + a_1 q$$

$\sigma$ : 応力	$g$ : 重力加速度
$\ell$ : 代表長さ	$p$ : 空隙率
$t$ : 時間	$o$ : 代表値を示す
$u$ : 速度	ダッシュ: 無次元化を示す

ここで、 $a_1, a_2, a_3$  は次の無次元数である。

$$a_1 = \frac{\rho_a g \ell}{\sigma_0} \quad a_2 = \frac{\ell}{g t_0^2} \quad a_3 = \frac{u_0 t_0}{\ell} \quad \dots \dots \dots (2)$$

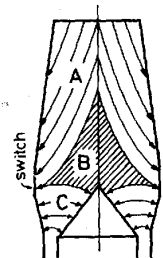
$a_1$  は堆積層の作用する力を表わし、装置の大きさを使用する粒子のみかけ密度との関係を表わしている。 $a_2$  と  $a_3$  は  $t_0 = \ell / u_0$  として剰算することにより Froude 数となる。

高炉内の原料の挙動を再現するためには、(2)式で示した3項の無次元数を合わせればよい。しかし、複雑な炉内現象の変化を明らかにして制御手段に利用しようとの考えから、現象を観察しやすい装置が要求されている。一般には、2次元スライス模型や扇形模型が用いられているが、これら装置が実物の縮小複製と異なることから、観察される現象に装置の影響が入ることが考えられる。そこで、これら装置形状が観察結果に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

##### 2.2 応力分布の相似性

高炉内の原料の降下挙動は堆積層内の応力分布によって決定される。一般に、定常降下時の最大主応力は Fig.1 のように、高炉下部で主動状態から受働状態に変化し、ベリ一下部に Switch 現象が現われる。これらの応力分布は中心軸対象で半径方向に分布を持っており、原料の降下挙動を対象とする模型実験では、これらの応力分布が再現されねばならない。

幾何学的相似条件が満足されない場合の応力特性の一例として、シャフト角度を変化させた場合の定常降下時における堆積層内の応力分布を Fig. 2 に、また、堆積層の降下状態を Fig. 3 に示す。Fig. 2 より、シャフト角度を増大させると層



A: Active state  
B: Transitional state  
C: Passive state

Fig.1. Direction of major principal stress in blast furnace.

内水平応力はほぼ一定であるにもかかわらず垂直応力が著しく増大し、最大主応力の方向が変化していることがわかる。また、シャフト角度が90°の場合にはシャフト部の応力場が急変し、局部的に受働応力状態を呈するようになる。一方、堆積層の降下状態もシャフト角度によって変化し、シャフト上部での径方向の降下速度分布および炉壁混合層の形成機構とその位置に影響が現われる。これらのことから、応力場が主動状態にある高炉シャフト部の原料の挙動を解明するに際し、幾何学的形状等に起因して応力分布の相似性が不十分な場合には、原料の降下挙動、特に炉壁近傍の混合層の形成状況等を正確に把握することはできなくなる。

### 3. 各種高炉模型の問題点の検討

#### 3.1 縮小比

巨大な高炉を対象とする場合、実験の経費や労力あるいは時間の負担を軽減するために、模型の縮小比を小さくすることが望まれる。しかし、縮小比を小さくすることによって、使用する固体粒子の大きさも小さくなる。

一方、実操業においては高炉の炉容が異なるにもかかわらず、ほぼ同じ粒径の原料が用いられている。炉口径が10~6.5 mの高炉に50mmのコークスを装入する場合を考えると、炉口径 $D_T$ に対する粒径 $D_p$ の比は $D_p/D_T=0.005\sim 0.0075$ となる。全円周高炉模型を用いて、粒径の影響を調べた結果をFig.4に示すが、堆積層の応力分布は粒径が異なっても変化しない。このことから、少なくともこの程度に装置と粒子の縮小比が異なっても、降下状態はほとんど同じであることが推察される。

#### 3.2 高炉を分割する壁板の影響

高炉に関する模型実験では高炉を垂直に分割し、その分割壁に透明板を使用して物理現象が観察されている。しかし、垂直壁面近傍の動的な応力状態は、高橋らも指摘しているように主動状態と受働状態を繰返しており、壁面応力の測定に際しても常に激しい圧力変動が観察される。したがって、垂直壁面近傍の堆積層の降下挙動は断続的であり、他の領域とはやや異なると考えられる。

#### 3.3 二次元スライス模型の問題点

高炉の炉内現象の観察を容易にするため、しばしば、高炉の中心軸を含んで縦方向にスライスした2次元模型が用いられる。しかし、高炉内の応力は中心軸対象でFig.5に示すように垂直・水平応力の外に円周方向の応力 $\sigma_\theta$ が存在している。Photo.1に2次元スライス模型と3次元半裁模型の炉芯コークス層の形成状況を示すが、スライ

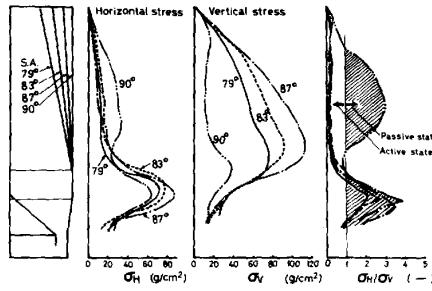


Fig.2 Effects of shaft angle on horizontal and vertical stress and coefficient of earth pressure at radial position of  $r/R=0.5$ .

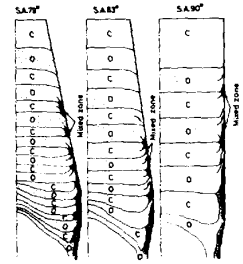


Fig.3 Appearance of burden descent obtained by dissection method.

Cylindrical model ( $\theta=83^\circ$ )

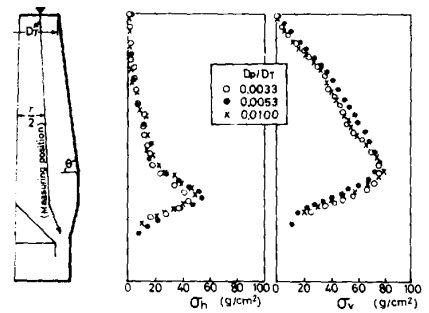


Fig. 4 Effect of particle diameter on stress distribution.

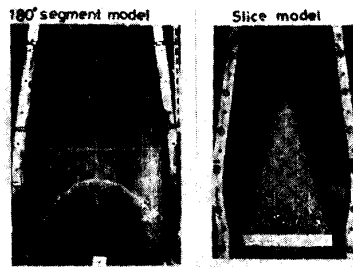


Photo. 1 Comparison of dead coke shape in 3-and 2-dimensional model.

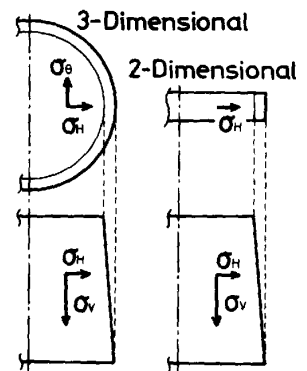


Fig.5 Stress elements in 3- and 2-dimensional model.

ス模型では  $\sigma_{\theta}$  を再現できないため、3次元模型と著しく異なる炉芯コークス層を形成している。

### 3.4 扇形模型の中心角の影響

Fig. 6は神戸No 2BFの1/5全円周模型(装入原料粒度は焼結鉱: 1~10mm, ペレット: 1~4mm, コークス: 5~20mm)に仕切板で中心部の扇形角度を15°, 30°, 45°, 90°, 180°に分割し, C↓O↓方式でベル装入した時の堆積層表面形状を示す。この表面形状は各扇形部分の中心線上で測定した結果である。図から明らかなように, 堆積層表面形状から判断する限り扇形角度30°以上ではほぼ同じ結果が得られる。

しかし, 中心部の扇形角度が小さい場合には扇形を形成する壁の間隔が小さくなることと, 壁面と粒子の摩擦により中心部の挙動を十分に評価することはできない。また, 堆積層の降下を伴う実験では中心部で2つの壁面が近接しており, 前述の垂直壁面の影響により正確な降下挙動が得られない。

### 3.5 半裁模型の問題点

Fig. 7はシャフト角83°の全円周模型と半裁模型の堆積層内の応力分布を調べた結果である。図から明らかなように, 全円周模型と半裁模型の応力分布はシャフト下部から若干の差を生じているものの, 全体的によく相似しており, 半裁模型は全周模型の応力状態をほぼ評価することができる。

しかし, Photo. 2に示すように, 垂直分割壁と炉体壁との接合部で粒子の滞留域が形成される。この滞留域は他の領域には認められず垂直分割壁から透視される降下状態は正確な内部構造とは異っている。したがって, 降下挙動の把握は垂直分割壁の影響のおよばない領域で行うことが重要である。

## 4. 炉内ガス流れ分布解明のための熱間模型実験

高炉内では不連続粒子の集合体である塊状帯と滴下帯を連続体である軟化融着層が結びつけており, この連続体は定常状態ではあたかも一定場所に静止しているかのごとく挙動する。このような移動層における固体の挙動とガス流れを解明するための熱間模型装置を検討した。

模型の選択に当っては炉内の応力分布が再現されることを条件とし, 前述の検討に従って, シャフト角度83°の半裁模型を採用した。しかし, 半裁模型はコーナー部の降下不良の影響を含むため, 融着層の位置と形状の確認は炉内を急冷後, 半裁面から中心角で45°掘りこんだ面で行なった。

模型の縮尺は加古川No 3BFの1/17としたが, 供試粒子の大きさは粒子の降下挙動の観察を容易にするため, コークス10~20mm, 擬似鉱石6.5mmを使用した。また, 本熱間模型は不連続固体粒子中に連続体が形成された場合のガス流れを明らかにすることを目的としており, 高炉内で生ずる化学反応は一切考慮せず, 炉内は対流伝熱状

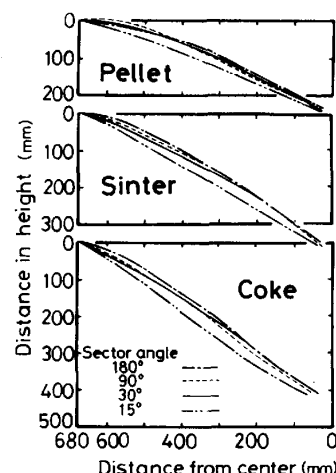


Fig.6 Surface profiles in model with different sector angle.

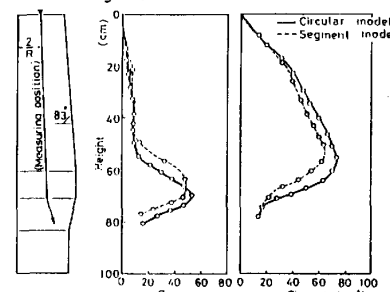


Fig.7 Comparison of inner stress distribution with cylindrical and segment model.



Photo.2 Horizontal cross section of burden material at belly.

Table 1 Properties of material and scale factor in model experiment.

Item	BF	Model
<b>Properties of Material</b>		
Coke :		
Mean dia (mm)	50.0	15.0
Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	0.5	0.5
Ore :		
Mean dia (mm)	10.0	6.5
Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	2.1	0.5
Repose angle (°)	38.0	34.7
Softening temp. (°C)	1200	105
Melting temp. (°C)	1450	114
Mean heat capacity (kcal/kg°C)	0.20	0.43
Melting heat (kcal/kg)	135	35
Mean shape factor (-)	0.70	0.75
Mean void fraction (-)	0.45	0.50
<b>Scale factor</b>		
St/G (-)	428	265-998
St (-)	411	223-429
Fr (-)	2.8x10 <sup>-5</sup>	1.9-3.8x10 <sup>-5</sup>
Ts=(ts-to)/(tb-to) (-)	0.49	0.47-0.54
Tm=(tm-to)/(tb-to) (-)	0.60	0.53-0.60

態にあると仮定した。実験条件は Table.1 に示すスケール因子が実操業に合致するように決定した。すなわち、粒子とガスの熱の授受能力を表わす  $S_t/G$  と  $S_t$  , 粒子の降下速度を表わす  $Fr$  , および軟化融着帯を相対的に実炉とほぼ同じ位置に形成させるために、無次元軟化温度 ( $T_s = (t_s - t_0)/(t_b - t_0)$ ) と無次元溶融温度 ( $T_m = (t_m - t_0)/(t_b - t_0)$ ) を採用した (ただし、添字  $o, b, s, m$  はそれぞれ炉頂, 熱風, 軟化, 溶融の温度を示す)。

実験により観察された軟化融着帯の形成状況を Photo.3 に示すが、上記スケール因子を採用することにより解体調査結果と相対的にはほぼ同様の位置に軟化融着帯が形成されている。本研究の目的は軟化融着帯が定常的に形成される時の炉内ガス流分布を解明することにある。しかし、現状では堆積層内のガス流速分布を正確に測定するセンサーがないために、ガス流分布の解明はこれら実験結果をもとにした有限要素法や差分法による計算に頼らざるを得ない。この場合重要なことは軟化融着帯の形成されている移動層の特性、例えば、炉芯コークス層の形状や堆積層内の空隙率分布を正確に測定することである。

Fig.8 に移動層の特性の一例として、空隙率の分布を示す。図から明らかなように、炉芯コークス層の空隙率は比較的小さいが、炉芯と融着帯との間の空隙率は大きく、しかも半径方向に分布をもっている。また、鉱石の溶融に伴って形成される融着層先端の空隙率は著しく大きく、0.6 以上となっている。さらに、レースウェイへ流入するコークス層では空隙率が急速に増大し、この部分にレースウェイから流出するガスが集中することを示している。

これらの特性値を用いて有限要素法で計算した炉内ガス流分布の一例を Fig.9 に示す。

### 5. 結 言

高炉は巨大な設備の上に、炉内で物理的、化学的反應が複雑に交絡し合っているため、完全な縮小複製模型では炉内現象を十分把握できない。そこで、現象を観察しやすい扇形模型やスライス模型が利用されているが、これら模型から得られる結果は装置特性を含んでいる。しかし、対象とする現象を支配する要因を見極め、観察する現象を特定することによって、炉内現象が徐々に把握されてきている。今後、これらの現象を総合した炉況の制御技術への発展が期待される。

### 参考文献

- 1) 中村信夫:「模型理論とスケールアップ」, 日刊工業新聞社 (1964)
- 2) 長尾高明: 昭和 57 年度科学研究費補助金研究成果報告書 — 粉体圧縮及び粉体貯蔵における応力解析と適応制御 — (March, 1983)
- 3) 高橋洋志: 化学工学, 47 (1983) 11, 682

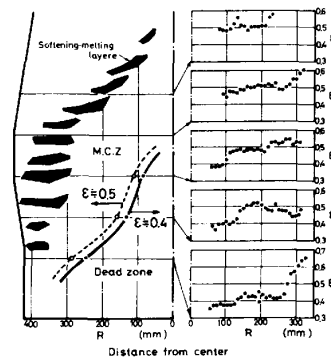


Fig.8 Distribution of void fraction measured by hot model test.

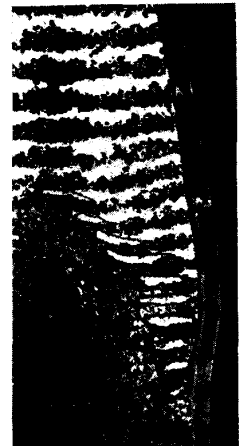


Photo.3 Observation of cohesive layer in a model experiment.

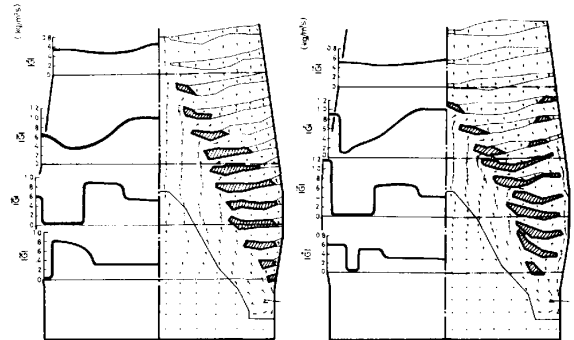


Fig.9 Estimation results of gas flow based on measurement in hot model experiment.