

# 焼結装入装置の模型実験方法

中野 正則\*・堀 純啓\*<sup>2</sup>・中野 真也\*<sup>2</sup>・井手 英治\*<sup>2</sup>・吉永 志郎\*<sup>2</sup>・細谷 陽三\*

A Model Design for the Charging Apparatus of a Sintering Machine

Masanori NAKANO, Yoshihiro HORI, Shinya NAKANO, Eiji IDE, Shiro YOSHINAGA and Yozo HOSOTANI

**Synopsis :** A model design for the charging apparatus of a sintering machine has been studied to propose a method of adjusting model rules. In this method, dried ore similar to the wet original raw mix in size distribution is used for model mix, and Floude number is taken into account in order to decide the operating conditions of the model sintering machine. This method has been checked by comparing size segregation in the bed between original sintering machine and 1/5 practical model, which has resulted in good accordance practically.

**Key words :** agglomeration ; charging ; iron ore ; modelling ; segregation ; sintering.

## 1. 緒言

焼結装入装置に関する研究は従来より多数行われ<sup>1-5)</sup>, 種々なタイプの装入装置<sup>5-9)</sup>が開発されている。これは、配合原料の焼結機ベッド層厚方向の粒度偏析を強化したり、装入密度の低減やバラツキの減少を図って、焼結生産性や成品歩留を改善することを狙いとしている。

それらの研究開発では、いずれも実機配合原料と幅方向のみを縮小した実寸大の装入試験装置(以下、1/1スライス模型)を用いており、垂直方向をも縮小した模型(以下、単に模型)による検討は試みられていない。しかし、1/1スライス模型は、試験装置製作にかなりの費用を要すること、試験に使用する原料の量が多いために試験作業に手間がかかること等、試験効率が悪いために、種々のタイプの装入装置の比較や装置諸元の詳細な検討がなされている例は少ない。ここに、本報は、装入装置開発研究を促進することを目的として、試験効率を改善する手段となる一つの実用的な模型実験方法を提案するものである。

従来、模型実験が試みられなかった理由は、原料粒子のモデル化が困難であったためと思われる。つまり、模型実験は原料粒子の縮小をも要求するものであるが、たとえば真粒度状態で実機原料と相似とした模型原料を準備しても、バインダーとして実機と同じ水を用いて造粒した場合、模型の擬似粒子と実機の擬似粒子とは幾何学的相似を満足しないことは明らかである。

ところが、近年、藤本ら<sup>10)</sup>は、移送を受けても配合原料の水分が一定である限りその擬似粒度は分析誤差内で変化が

認められないことを実験的に示した。これは、移送にともなう擬似粒子の合体・崩壊が無視でき、原料粒子を弾塑性体として取り扱える可能性を示すものである。つまり、模型実験を施行する観点からみると、模型原料として実機の擬似粒度分布に対して相似とした模型弾塑性体を使用してまず幾何学的相似を満たし、さらに具備すべき相似条件として後述する反発力や摩擦力を合わせ込むことを考えればよい。

本報では、実用上入手しやすい鉄鉱石を模型原料として使用する模型実験方法を検討した。まず、焼結装入装置の模型実験の相似則を検討して、ひとつの模型実験方法を提案する。次に、模型原料の水分量を変えて実機原料との摩擦力の一致を試み、さらにそれらの反発係数の実測を試みることにより、物性値の観点からの原料粒子の相似化がどの程度可能かを検証した。最後に、1/5模型装入装置による模型実験の粒度偏析結果を実機等のそれと比較し、実用面から本模型実験方法を評価した。

## 2. 相似則

### 2.1 焼結装入装置の相似条件

基礎物理量として、長さ( $l$ )、密度( $\rho$ )、力( $F$ )を採用する<sup>11)</sup>。前2者の相似条件は、(1)式および(2)式となる。

$$l = l' \cdot l'' \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = \rho' \cdot \rho'' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、上付き符号\*は相似比を、'は実機を、符号なしは

平成8年4月8日受付 平成8年7月15日受理 (Received on Apr. 8, 1996; Accepted on July 15, 1996)

\* 新日本製鐵(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

\* 2 新日本製鐵(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

模型を示す。式全体を□で囲んであるのは、 $\ell$ 、 $\ell'$ 等が代表値であることを示す。

装入装置上を落下する原料粒子の運動は、原料粒子の合体・崩壊がないと仮定すれば、粒子同士や装入装置部材との衝突と反発および自由な重力による落下の2種である。この時、考慮すべき力は原料粒子にかかる外力のみである。具体的に、衝突時に作用する主要な力として反発力( $F\varepsilon$ )と摩擦力( $Ff$ )<sup>11)</sup>、また、落下運動時に作用する主要な力として重力( $Fg$ )および慣性力( $Fi$ )の4つを仮定する。これらの力から導かれる無次元数は、反発係数( $\varepsilon$ )、摩擦係数( $\mu = Ff/Fg$ )およびフルード数( $Fr = Fi/Fg = v^2/\rho g \ell$ )の3つになる。これらの無次元数が模型と実機で等しくなる条件から、

$$\mu = \mu' \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$v^2/\rho g \ell = v'^2/\rho' g' \ell' \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、模型と実機での重力加速度は等しい( $g = g'$ )ことより、式(5)の相似比間の制約がある。

$$v^* = \sqrt{\rho^* \cdot \ell^*} \quad \dots\dots\dots (5)$$

以上の式(1)~(4)が、模型原料を規定する相似条件となる。式(5)は、模型の縮尺比( $\ell^*$ )と速度に関する相似比の関係を示し、模型装入装置の原料供給速度やパレットスピードを決める。

### 2・2 相似化の方法

著者が本報で提案する模型実験方法は、結論から先に言えば、“模型原料としてその真粒度構成を実機配合原料の擬似粒度分布に相似とした鉄鉱石を使用し、模型の運転条件としてフルード数を実機と一致させる方法”である。これは、前述のように、実機配合原料の擬似粒子が装入時の落下にともない粒度変化しない前提に立っている。この方法によって第2・1節の相似条件をどの程度満足させ得るかを以下に述べる。

まず、装置の縮尺比に等しく模型原料真粒度を実機配合原料擬似粒度にあわせて縮小することにより、系全体の幾何学的な相似条件である式(1)が満たされる。

また、本法は模型原料を鉄鉱石のみに単純化しているため、以下の2点で密度に関する相似条件の式(2)が厳密には満足していない。一つは、実機原料は石灰石、コークス等の混合物であり、粒子の平均密度が模型原料と異なること、もう一つは、実機原料では鉱石、石灰石、コークス等が様々な割合で擬似粒子化しているため粒子ごとに密度の違いがあることである。しかしここでは、いずれも配合量が石灰石で1割程度、コークスではそれ以下であることから、いずれもその影響は小さいと考慮して無視し、 $\rho^* = 1$ として取り扱った。

問題となるのは、式(1)および式(2)を上述のように満足させて調製した模型原料の摩擦係数および反発係数が、

Table 1. How to prepare model raw mix and operate model charging apparatus to satisfy model rules.

model rules	how to satisfy
$\ell = \ell'$	Meet the true size of model raw mix to the quasi size of original raw mix
$\rho = \rho'$	Use the same ores, limestone and coke breeze as original raw mix for model raw mix (neglected here)
$\varepsilon = \varepsilon'$	Adjust water content of model raw mix
$\mu = \mu'$ $Fr = Fr'$ ( $u^* = \sqrt{\ell^*}$ )	Control feeding rate and pallet speed of model

実機原料のそれらと等しくなるかどうか(式(4)および式(5)を満足するかどうか)である。摩擦係数については、水分調整にて多少の調整が可能と想定されたので、水分による模型原料の摩擦係数の変化を調べることとした。また、反発係数については、具体的調整手段は見当たらなかったため、実機原料と模型原料のそれを比較測定するにとどめた。その結果を次の第3章で述べる。

以上、満たすべき相似条件および相似化の方法をTable 1にまとめた。

## 3. 原料の相似の確認

### 3・1 摩擦係数の相似の確認

厳密には、式(3)の摩擦係数は動摩擦係数と考えるべきである。しかし、本報では測定の容易な静止摩擦係数としての安息角を測定することとした。

安息角は、Fig. 1に図示するように、円錐形に原料を体積させた時の体積高さ( $H_{max}$ )と底面の円周長( $L$ )を測定して求めた。原料および測定条件をTable 2に示す。体積高さを実機相当で1mと0.5mとし、模型縮尺を1/5および1/10の2ケースとした。実機原料は大分実機焼結のものをそのまま使用した。また、模型原料は、リオドセ鉱石を乾燥後、実機配合原料の湿粒度の粒度分布に模型原料の乾燥粒度が一致するように調製した。模型原料は水分値を変えて、それによる安息角の変化をみた。試験は、誤差評価のために同一条件にて2回繰り返している。

安息角( $\theta$ )の測定結果をFig. 2に示す。 $H_{max}$ の差の影響は有為ではなかった。実機原料の安息角は36°~38°であった。模型原料の安息角は、水分値を低下するほど低下し、1/5模型原料では水分0%と1.5%、1/10では0%で、実機配合原料とそれが概ね一致することがわかる。

ここに、当初の狙いどおり、乾燥した模型原料を用いても湿った実機配合原料と摩擦係数を一致させ得ることを確認した。

### 3・2 反発係数の相似の確認

反発係数の測定には武田の方法<sup>12)</sup>があるが、それを原料粒子に適用することは難しい。そこで、鋼板と各種鉱石との反発係数を測定することで、実機擬似粒子の反発係数とこ

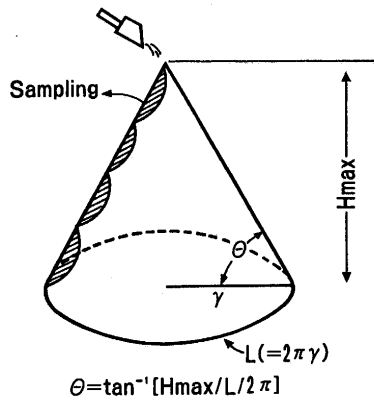


Fig. 1. Measurement of repose angle and segregation along conical slope.

Table 2. Conditions to measure repose angle of model raw mix.

raw mix	preparation of raw mix					cone height H <sub>max</sub> (mm)	
	maximum particle diameter (mm)	dimensionless size (d/d <sub>max</sub> )					water content (%)
		~.5	~.25	~.125	~.125		
original (pseudo-size)	10					5.7	1000 500
1/5 model (true-size)	2	20	30	23	27	0 1.5 3.0 5.5	200 100
1/10 model (true-size)	1						100 50

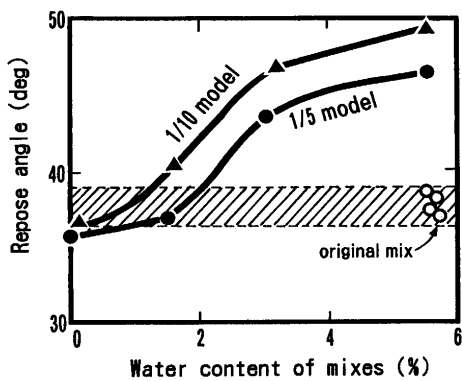


Fig. 2. Influence of water content on repose angle of model mixes.

こで使用を想定している乾燥鉱石のそれとを比較することとした。

その測定方法をFig. 3に示す。反発係数(ε)は反発前後の速さの比(v<sub>2</sub>/v<sub>1</sub>)として定義され、落下高さ(h<sub>1</sub>)、反発後の最大高さ(h<sub>2</sub>)と移動距離(ℓ<sub>2</sub>)から次式により求めた。

$$\epsilon = v_2/v_1 = ((h_2 + (\ell_2^2/16h_2))/h_1)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、落下高さは、粒子の落下衝撃による破壊がなく、かつできるだけ大きな反発後高さが得られるような条件と

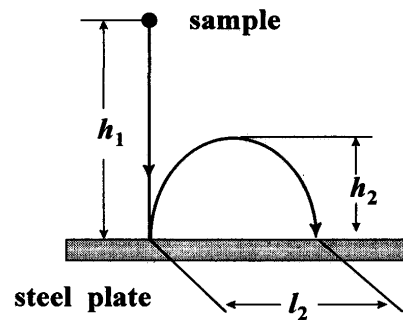


Fig. 3. Measurement of coefficient of restitution of ores.

Table 3. Coefficient of restitution of ores against steel plate.

ores	sample dia.	ε	σ <sub>n-1</sub>	n
pellet fired	12mm	0.65	0.06	15
sinter	5-10mm	0.46	0.06	15
ore (after washed and dried)				
Rio Doce	5-10mm	0.44	0.07	15
sinter mix (wet)				
p type	2-5mm	0.0-0.25		10
c type	2-5mm	0.26	0.06	10

して25cmを採用した。h<sub>2</sub>・ℓ<sub>2</sub>は目視によりcmのオーダーで測定したが、粒子ごとのバラツキが大きかったので測定数(n)は10~15個とし、その標準偏差も合わせて評価した。

反発係数の測定結果をTable 3に示す。実機擬似粒子は肥田らの分類<sup>13)</sup>によるP型、C型で異なり、前者で0から0.25の範囲、後者で0.26であった。一方、乾燥鉱石(リオドセ鉱)で0.44であった。これは、擬似粒子が衝突時に変形して衝撃力を吸収するため、水分の多いP型粒子で最も低い反発係数を示すものと考えられる。

以上の実測結果より、乾燥鉱石では実機原料の反発係数まで完全に一致させることはできないことがわかった。そこで、摩擦係数と反発係数が同時に一致する模型原料の採用はあきらめ、実機と模型のこの反発係数の差異が模型実験結果にどの程度の影響を及ぼすかを以下の第4章で実用面から評価することとした。

#### 4. 焼結機ベッド層厚方向粒度偏析の相似の確認

焼結装入装置改善の主な狙いはベッド層厚方向偏析の強化にある。また、一般的なスローピングシュート型の装入装置におけるベッド層厚方向偏析を最も強く左右する要因は原料供給量とされる<sup>4)</sup>。そこで、まず、それがもっとも遅い場合の安息角測定時の斜面での粒度偏析を比較し、次に、スローピングシュート型焼結装入装置により形成された原料ベッド層厚方向の粒度偏析を比較する。前者は、粒子速度が小さいことから慣性力が小さくかつ反発係数が物質に

よらず1に収斂する性質があることから、特に摩擦係数が重要となる系である。後者では、フルード数および反発係数も重要な系と考えられる。

4・1 ゆっくりと形成された斜面上での粒度偏析の確認

安息角測定にあわせて、円錐斜面状の垂直方向の粒度偏析も比較した。母線に沿って実機の場合は4等分、模型の場合は3ないし2等分した円錐面表層から原料をサンプリングし高さ方向の粒度偏析を調べた。

その結果を、実機のH<sub>max</sub>が0.5mの場合についてFig. 4に示す。最大粒子径(d<sub>max</sub>)で規格化した平均粒度はH<sub>max</sub>で規格化した斜面高さの低下とともに増加する。この時、1/5および1/10模型原料とも水分1.5%までは、つまりおおむね安息角が一致する条件において斜面上の偏析挙動も完全に一致することがわかる。この一致は、原料粒子速度が小さい系では摩擦係数が重要な因子となっており、多少の反発係数の違いは粒子挙動に重要な影響をおよぼさないためと考えられる。

なお、模型原料の水分値の増加により高粒度側に偏析挙動がずれる理由は、その擬似粒化による粒径の増加そのものの影響と、粒子径増にともなう粒子の転動挙動の変化によるものと思われる。また、H<sub>max</sub>の差の影響は有為でなく、実機のH<sub>max</sub>が1mの場合もほぼFig. 4と同様の結果であった。

4・2 焼結機ベッド層厚方向粒度偏析の相似の確認

実機焼結機、1/1スライス模型および本法による1/5模型の3つのスケールについて、原料供給量のベッド層厚方向偏析への影響を比較した。実機は、釜石焼結機、君津2・3焼結機および大分2焼結機を調べた。1/1スライス模型は藤本ら<sup>4)</sup>、福田ら<sup>7)</sup>の結果を使用した。また、1/5模型は大分1焼結に準じてFig. 5に示すものを製作し用いた。福田ら<sup>7)</sup>の

1/1スライス模型および1/5模型の実測値をFig. 6に示した。いずれも実験ごとの原料全体の平均粒度のバラツキの影響を差し引く意味で、横軸の原料粒度は最下層の粒度を基準としてそれからの差で示している。Fig. 6より、いずれも、おのおののベッド層厚方向偏析は上層から下層に向かって直線的に粒度が増加しており、原料供給量が増加するほどその傾き(偏析の強さ)は低下している。

そこで、偏析の強さを表わす指数として、最上層と最下層の粒度(それぞれ、MS<sub>top</sub>、MS<sub>bottom</sub>)の差をその間の距離(BH)で割った指数を偏析度(SG)と定義し、

$$SG = (MS_{top} - MS_{bottom}) / BH \quad \dots\dots\dots (7)$$

その偏析度と実機相当の原料供給量との関係をまとめてFig. 7にプロットした。実機の点を結んだ破線と比較して、本

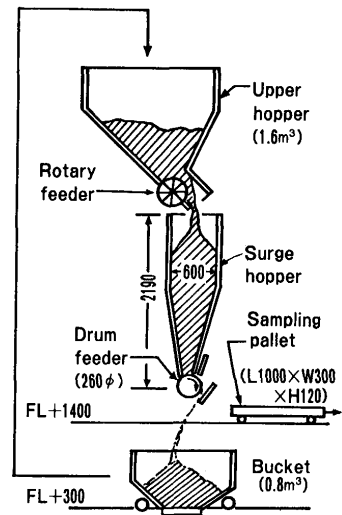


Fig. 5. 1/5 charging apparatus.

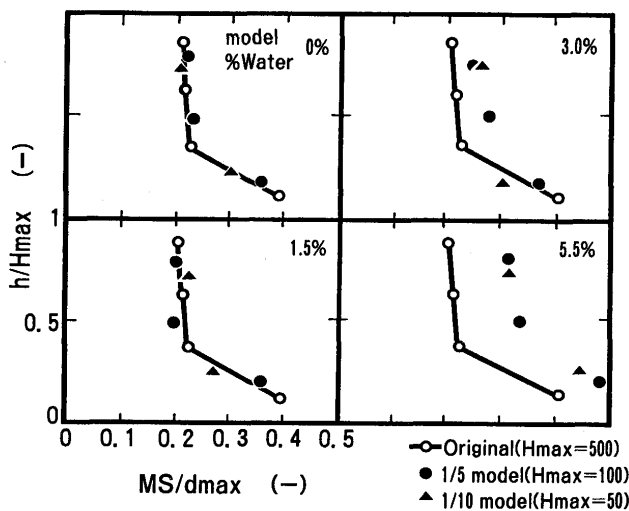


Fig. 4. Comparison of size segregation along conical slope between original mix and model one.

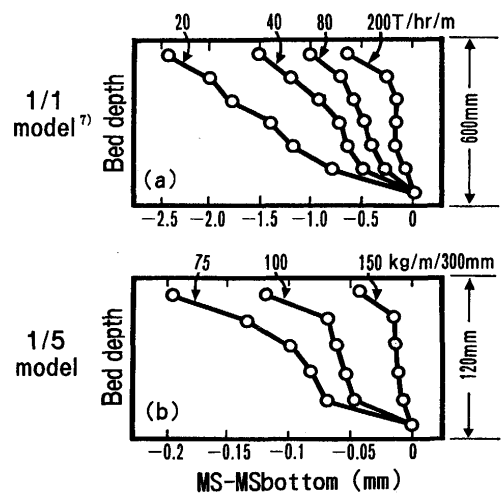


Fig. 6. Change of size segregation due to feeding rate of mix. (a) 1/1 slice model after Fukuda et al<sup>7)</sup>. (b) 1/5 model (this work)

法による1/5模型は高原料供給量側で偏析度が高くなった。これは、原料速度が大きい系では反発現象が重要となり、反発が良好な模型の特に高速度側で粒子の運動が活発化して粒子のパーコレーションが促進され偏析度が高くなったと考えられる。

しかしながら、1/5模型の偏析度は、1/1スライス模型に比較して、良く一致しており、著者らは実用上十分な程度にシミュレートしていると考えている。なお、1/1スライス模型で原料供給量変化による偏析度の変化が小さくなった理由は、パレット側面での摩擦が原料粒子の運動を制約するためと考えられる。

### 5. 大分1 焼結機装入装置改造への適用

大分1 焼結へのスリットバー型装入装置の導入の際、スリット下部の助走板長さ(C)およびデフレクターシュートの長さ(D)の決定に本モデル試験方法にそった1/5模型実験を

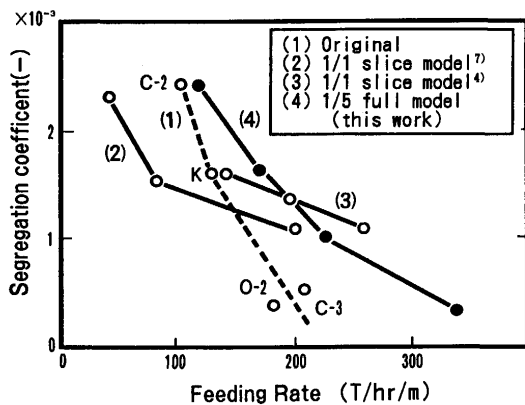


Fig. 7. Comparison of size segregation in the bed between original and models.

適用した<sup>14)</sup>。Fig. 8 に比較検討した6タイプの実機相当寸法と原料の流れの模式図およびベッド層厚方向粒度偏析結果を示す。

その結果、助走板を有しかつスリット下端から落下した上層原料を受けるに十分な長さを有する構造とした(b)ないし(b')タイプがベッド上層下層にわたって良好な偏析を形成すること、また必要以上にそれらを長くしても偏析強化には役立たないことが明らかとなった。この知見を実機設計に反映させた。

### 6. 結言

焼結装入装置の模型実験方法を検討した。その結果、"実機原料擬似粒度分布に相似となるように粒度調整した乾燥鉄鉱石の模型原料を使用し、模型と実機のフルード数を一致させる方法"により、焼結装入装置の主要特性であるベッド層厚方向の粒度偏析を実用上ほぼ満足できる程度にシミュレート可能であることがわかった。

- (1) 焼結装入装置の模型実験に際し重要な無次元数は、摩擦係数、反発係数、フルード数の3つと考えられる。
- (2) 実機原料擬似粒度分布に相似となるように粒度調整した乾燥鉄鉱石の模型原料は、実機原料と反発係数は異なるものの同じ摩擦係数を有する。
- (3) 上記模型原料を使用した模型実験において得られる焼結装入装置の主要特性であるベッド層厚方向の粒度偏析は、原料供給速度が小さい場合ほぼ完全に一致する。また、原料供給速度が大きい場合、フルード数を一致させて模型を操作する方法により、実用上ほぼ満足できる程度に一致する。

さらに、大分1 焼結機へのスリットバー型装入装置の導

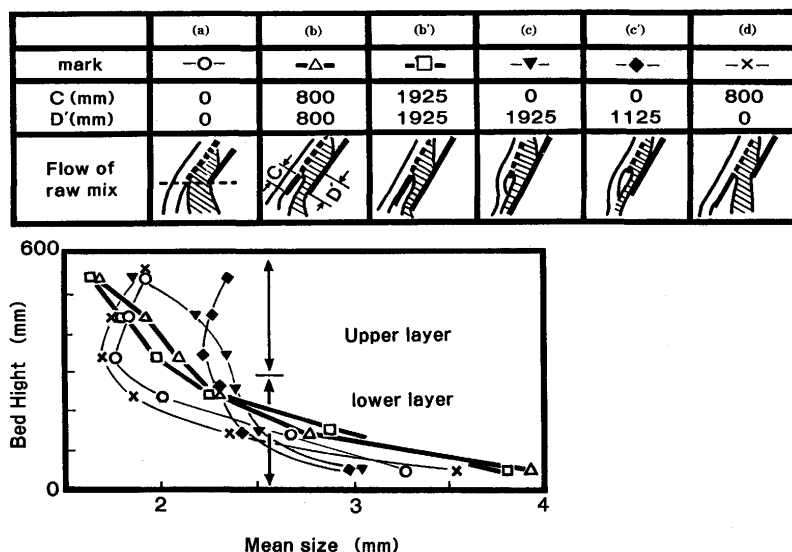


Fig. 8. Influence of the lower part of slit-bar on size segregation [1/5 model test].

入に際して本法(1/5模型実験)を適用し,装置諸元を決定した。

### 記号

BH	: 最上層および最下層の距離(m)
C	: スリットバーの助走板の長さ(mm)
D	: スリットバーのデフレクターシュートの長さ(mm)
$d_{max}$	: 原料最大直径(m)
$g$	: 重力加速度( $kg/m^2$ )
$H_{max}$	: 安息角測定時の円錐の体積高さ(m)
$h_1, h_2$	: 反発係数測定時の落下高さと反発後高さ(m)
L	: 安息角測定時の円錐底面の円周(m)
$\varnothing$	: 長さの代表値(m)
$\varnothing_2$	: 反発係数測定時の移動距離(m)
$MS_{top}, MS_{bottom}$	: 最上層および最下層の原料平均粒度(m)
SG	: 偏析度(-)
$\varepsilon$	: 反発係数(-)
$\mu$	: 摩擦係数(-)
$\rho$	: 密度の代表値( $kg/m^3$ )
$v$	: 速さの代表値(m/sec)
$\theta$	: 安息角(deg)
suffix (less), '(prime), *(star)	: 模型, 実機, 相似比を表す

### 文 献

- 1) 花生浩多, 伊藤良二, 阿野浩二, 水上俊一, 西川恒明: 鉄と鋼, **71** (1985), S25.
- 2) 山本亮二, 谷中秀臣, 服部道紀, 小松 修, 長野誠規, 高木 昭: 鉄と鋼, **71** (1985), S808.
- 3) 清水三郎, 竹内紀政, 尾内武男, 漁 充夫, 山本毅洋則: 鉄と鋼, **71** (1985), A181.
- 4) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, **77** (1991), 63.
- 5) 中島一磨, 西村博文, 田中 周, 板谷 宏, 深水勝義: 鉄と鋼, **71** (1985), A185.
- 6) 佐々木三千夫, 上川清太, 須賀芳成, 福田 一: 鉄と鋼, **66** (1980), S86.
- 7) 福田隆博, 姫田昌孝, 前洪栄一, 吉田 均, 佐々木望, 佐藤 守, 奈須野孝洋, 阿蘇辰二, 芳賀良一: 鉄と鋼, **70** (1984), S30.
- 8) 稲角忠弘, 藤本政美, 笠間俊次, 佐藤勝彦, 下沢栄一, 具島 昭: 材料とプロセス, **1** (1988), 970.
- 9) 中島龍一, 服部道紀, 福与 寛, 原田敏敬, 飯野文吾, 松永吉史, 和田 隆: 材料とプロセス, **4** (1991), 116.
- 10) 藤本政美, 鈴木 悟, 佐藤勝彦, 下村泰人: 鉄と鋼, **71** (1985), S806.
- 11) 江守一郎: 模型実験の理論と応用(第2版), 技報堂出版, (1973), 24.
- 12) 武田悦次郎: 科学, **23** (1953), 362.
- 13) 肥田行博, 佐々木稔, 榎戸恒夫, 梅津善徳, 飯田孝司, 宇野成紀: 鉄と鋼, **68** (1982), 400.
- 14) 吉永志郎, 富井良和, 中野正則, 井手英治, 堀 純啓: 鉄と鋼, **73** (1987), S846.