

論 文

焼結機給鉱部での原料粒度偏析の検討

深水 勝義*・板谷 宏*²・荒谷 復夫*²中西 恭二*²・西村 博文*³

A Study on the Particle Size Segregation in the Sintering Bed Formed at the Feeding Stage of a Sinter Machine

Katuyoshi FUKAMI, Hiroshi ITAYA, Fukuo ARATANI,
Kyoji NAKANISHI and Hirofumi NISHIMURA

Synopsis :

A sinter mix fed into a pallet produces particle size segregation and hence, coke segregation through the thickness of the piled-up layer, which affects heating rate, gas permeability and productivity.

By using chutes of various types, the authors have investigated segregation phenomena in the sinter bed formed at feeding stage. Experimental results are summarized as follows :

A positive segregation of finer particles at the upper portion of the sinter bed is caused by ;

- (1) the increase of the horizontal velocity V_x of the falling material,
- (2) the decrease of the vertical velocity V_y of the falling material,
- (3) the promotion of the positive segregation of finer particles at the bottom region of the falling stream on the chute, and
- (4) the suppression of the turbulence in the falling stream from the chute to the pallet.

The above mentioned items (1)-(4) are attained by choosing a proper chute.

Furthermore, the difference of the segregation caused by various chutes are interpreted in terms of the ratio V_x/V_y .

1. 緒 言

焼結機パレット上への原料装入時に生ずる層円高さ方向の粒度と炭材量の偏析は層内温度や、通気性に多大な影響を与える^{1)~10)}。したがって、燃料原単位の削減や生産性向上の観点からは給鉱部で生ずる偏析現象を正確に把握し、これを適正に制御する必要がある。しかし、原料給鉱部での偏析現象に及ぼす操業条件、シュート形状の影響等には不明な点が多い。そこで種々の形状のシュートを使用し、原料給鉱部で生じる偏析現象について実験的な検討を行った。以下にその結果について報告する。

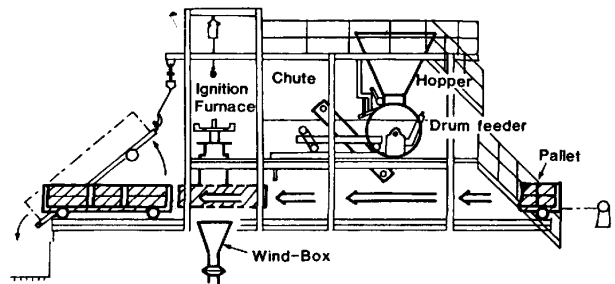
2. 実験装置および方法

2.1 鉄板シュートによる検討

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。大きさは水島第 4 焼結機の給鉱部を幅方向のみ 1/5 に縮小したもので、鉄板シュート、ベルトシュート等の種々のシュートを取付

可能な構造としている。本装置には点火炉と風箱を設置してあり、給鉱部での原料堆積状態のまま焼結実験が可能である。実験には、実機原料を装入コンベヤから直接実験用ホッパーに採取して使用した。

まず、鉄板シュートを用いて、パレット上での原料偏



- 1) Hopper : 3m³
- 2) Drum feeder : 1 200L×1 300φ
- 3) Sloping chute : 1 200W×2 100L
Angle : 30~60°
- 4) Pallet : 700H×1 000W×3 500L
- 5) Ignition furnace : Slit type burner

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 12 月 20 日受付 (Received Dec. 20, 1984)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

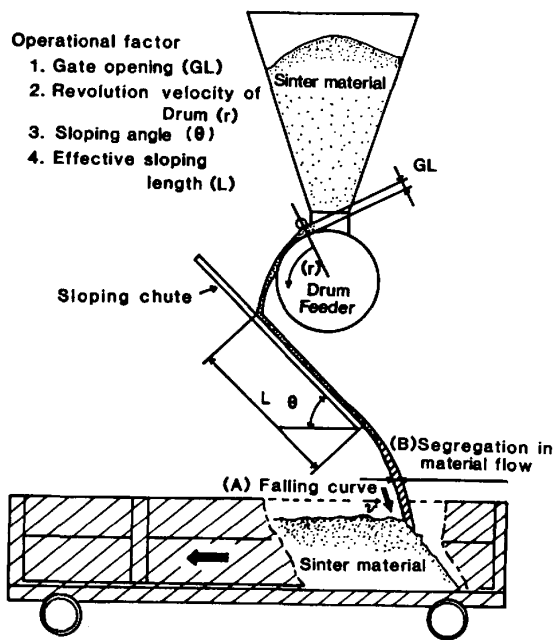
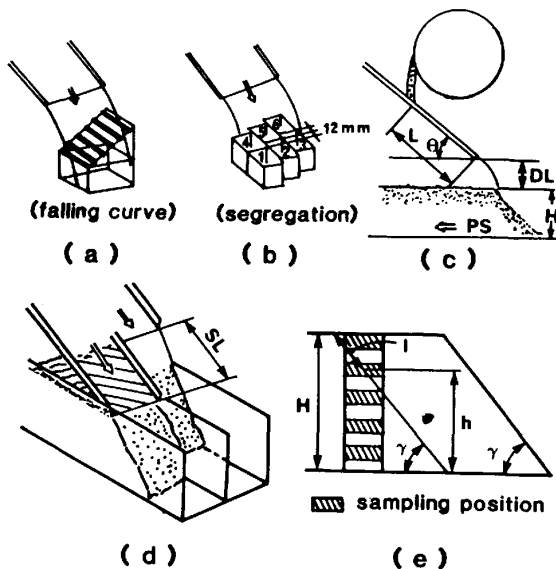


Fig. 2. Parameters influencing the particle size segregation in a sinter bed.



I) Investigation of
 1. Falling curve
 2. Segregation in falling flow
 II) Investigation of segregation on the pallet
 Fig. 3. Experimental conditions.

析におよぼす各種要因の影響を調査した。Fig. 1 の実験設備の中で、本研究の目的から最も重要と考えられる原料給鉱部を模式的に Fig. 2 に示した。

パレット上原料の偏析には原料の落下軌跡、落下流厚さ方向の粒度分布が大きく影響すると考えられる。そこで Fig. 2 に示すロールゲート開度 (GL)、ドラムフィーダー回転数 (r)、シュート角度 (θ)、シュート上転動距離 (L) などを変えて、原料落下軌跡、落下流内の粒

度分布およびパレット上層厚方向での偏析などを調査した。その際、原料層厚とパレットスピードは一定とし、粒度はすべて擬似粒子 (調平均径) の値とした。より具体的な測定方法を列挙すれば以下のとおりである。

(1) 原料落下軌跡

シュートを離れた後の原料の落下軌跡は自由落下を仮定して Fig. 3(a) に示すように高さ方向 10 箇所紙テープへの原料当たり面を実測して求めた。

(2) 落下流厚み方向の粒度偏析

落下流厚み方向の粒度偏析は Fig. 3(b) に示すように原料落下部に 6 個のサンプリングボックスをずらして設置し、採取原料の重量と粒度分析値とから求めた。

(3) パレット上の原料装入偏析

パレット上での偏析は Fig. 3(e) に示すように、パレット上の高さ方向 5 箇所からサンプリングした原料の粒度分析から求めた。また、この実験では、Fig. 3(d) に示すようにシュート高さの影響についても調べた。

2.2 各種シュート形状と偏析現象

つぎに、鉄板シュートに変えて各種シュート形状と偏析現象について調査した。

実験装置は前記した同一の装置を用い、シュート形状は 4 種類を対象とした。すなわち、ベルトシュート、振動シュート、ドラムシュート、およびスリットシュートである。

ベルトシュートは、回転方向と回転速度を変化させることで原料速度に変化幅をもたせることができる。実験条件はシュート角度 ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)、回転方向 (正転、逆転)、および回転速度 ($0, 10, 15, 20 \text{ m/min}$) である。

振動シュートは、鉄板シュートにバイブレーターを取付振動を与えるもので、振動による篩分けの促進とシュート摩擦係数の低減効果が期待できる。実験条件はバイブレーターの振動量 ($0, 40, 100, 300, 430, 2560 \mu.p.p.$) である。

ドラムシュートは、ドラムフィーダーからの切り出し原料をドラムに反発させ、その当たり面により、水平対垂直速度比 (V_x/V_y) を直接変化させるものである。実験条件は原料の落下距離を 1205 mm に固定し、原料落下流とドラムとの衝突幅を 30 mm きざみで $0 \sim 180 \text{ mm}$ まで変化させた。

スリットシュートは、鉄板シュートの先端にスリットを取り付けたもので、シュート上で分級偏析した原料を篩分け、細粒を堆積層の上層部に堆積させるものである。実験ではスリットの目開き、スリットの全長を変化させて偏析状況を調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 鉄板シュートによる検討

Fig. 4 に鉄板シュートからの原料落下軌跡から求めたシュート先端での原料の初速度を示す. シュート角度と原料転がり距離の増加につれて, シュート先端初速度も増大し, ドラムフィーダー回転数, ゲート開度などによる給鉱量の影響は小さい. したがって, 原料落下軌跡は両者を組み合わせることにより制御することができる.

Fig. 5 に落下流厚み方向での +4.76 mm 粒子の存在比率を示すが, 落下流内でも大きな分級偏析が生じている. Fig. 5 において, 無次元距離 x との回帰直線を求

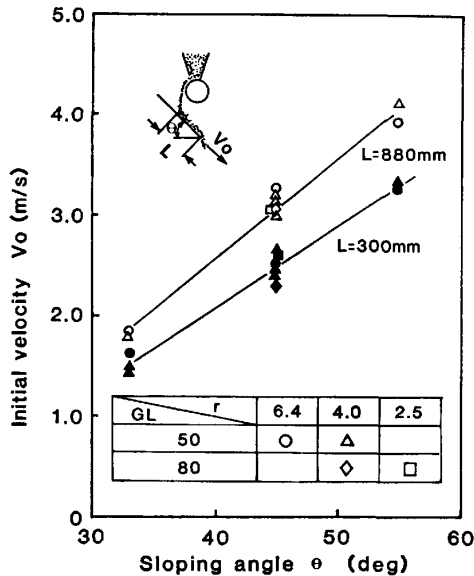


Fig. 4. The relation between the sloping angle of a chute and the initial velocity of the falling material (r : Rotation speed of the drum feeder (r.p.m.), GL : Opening of the gate (mm)).

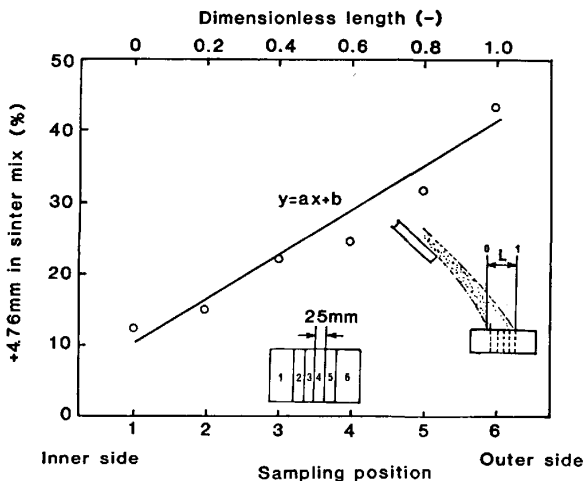


Fig. 5. Distribution of the coarse particle through the thickness of a falling sinter mix from a chute.

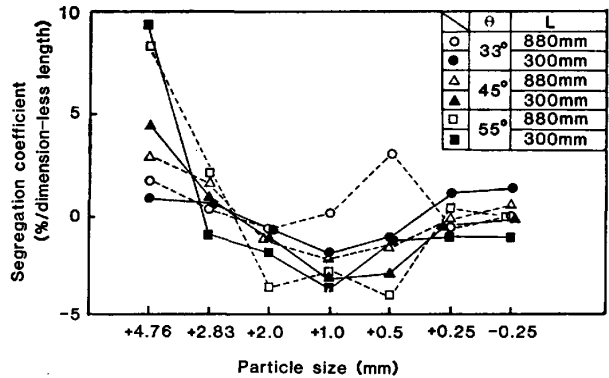


Fig. 6. Relation between particle size and segregation coefficient in a falling stream of the sinter mix.

めれば勾配 a が決まる. a は粒度偏析の尺度となり得るので, これを偏析係数と呼び以下で利用する. +4.76 mm ~ -0.25 mm までの各粒度について落下流偏析係数 a を求め Fig. 6 に示す. 粒径 2.83 mm 以下の粒子では偏析はあまり大きくない. しかし, 2.83 mm 以上の粗粒では偏析が大きく, シュート長さ L と角度 θ へ大きいほど偏析が大きくなる傾向が認められる.

一方, 粉体が流動する際の粒度偏析は粗粒が篩網効果をもつために生ずると考えられており, 三輪¹¹⁾らは隣接する粒径粒子の偏析の過程を次式で示した. (1)式は篩分け過程の式であるが, 三輪らはこの式が原料が斜面を流動落下する際の粒度偏析過程にも適用できることを示している.

$$\log\left(\frac{x_{ol(n)}}{x_{ol(n-1)}}\right) = \log\left(\frac{x_{f(n)}}{x_{f(n-1)}}\right) - \alpha \cdot l \quad \dots\dots (1)$$

ここに,

- x : 篩による粒度測定値
- l : 篩分け長さ
- α : 篩分け条件によつて決まる粒度指数
- サフィクス
 - o : 網上の粉体
 - f : フィード
 - n : 篩成分の番号で大きいほど細粒となる.

したがって(1)式の α は偏析の程度を示す偏析指数とみなすことができる.

また, Fig. 3(e) に示した方法で採取した原料の粒度分析値から層厚方向の $\log(x_{ol(n)}/x_{ol(n-1)})$ を求め, 転がり距離 $l(= (H-h)/\sin \gamma)$ で最小 2 乗近似すれば, 粒度が n と $n-1$ の偏析指数が求まる. この方法で求めた偏析指数 α と粒度の関係を Fig. 7 に示すが 2.83 mm 以上の粗粒が篩の働きをして粒度偏析を生じていることがわかる.

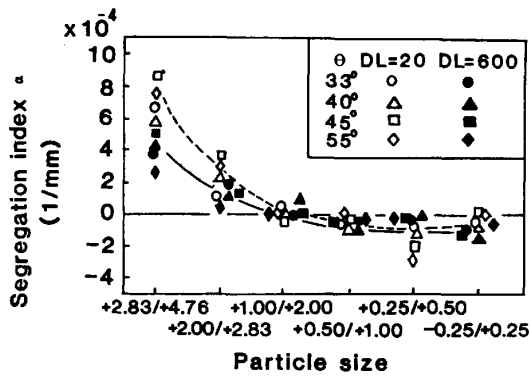


Fig. 7. Relation between particle size and segregation index (α) in a sinter bed.

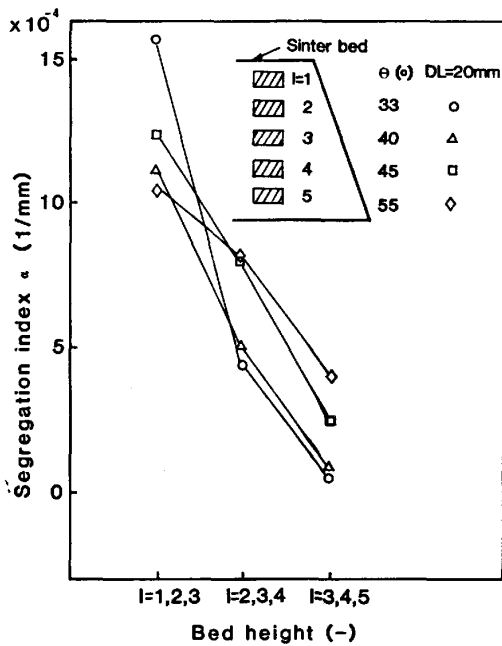


Fig. 8. Change of the segregation index in a sinter bed height.

焼結層内の偏析は層厚が極端に大きい場合を除き上中、下層で考える場合が多い。そこで、1, 2, 3 層目、2, 3, 4 層目、3, 4, 5 層目を対象として求めた上、中、下層の偏析指数 α を Fig. 8 に示すが、偏析指数 α は表層側の方が大きい。この結果は、原料が斜面を落下堆積する際の分級現象は原料が中層に達するまでが主体となり、下層ではほとんど分級が起こらないことを意味する。

一方、定性的には落下原料の水平速度成分が大きい場合には、運動量の大きな粗粒は斜面の表層側に分配されるため偏析も大きくなると考えられる。前述のように、原料の初速度は落下軌跡から計算により求まる。この初速度を用いて原料がパレット堆積層表面に到達した点での水平、および垂直速度成分 V_x , V_y を計算することができる。

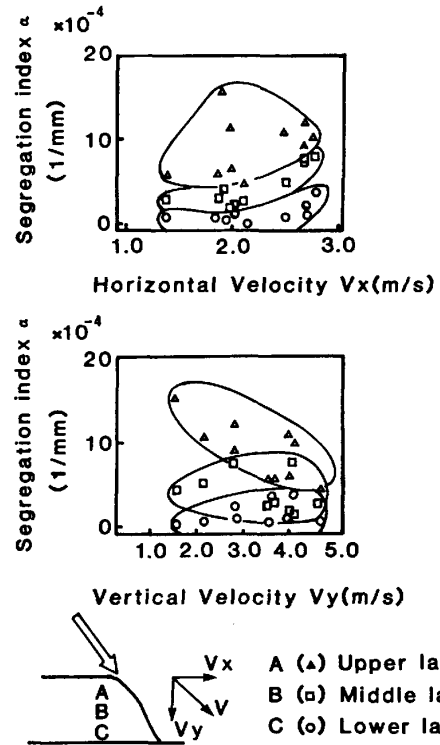


Fig. 9. Relation between the falling velocity of sinter mix and the segregation index in a sinter bed.

Fig. 9 は、こうして求めた V_x , V_y と偏析指数 α † の関係をパレット上層、中層、下層別に示している。図から明らかなように、 V_x は全層厚にわたって粒度偏析に影響を与え、 V_x が大きいと偏析も大きくなっている。これに対して V_y は上層の偏析に影響を与えるものの、中、下層にはほとんど影響せず、上層の偏析は V_y の増大とともに著しく低下する。この V_x の影響は前述の慣性力の大きな粗粒を表面側に分配する効果で説明できるが、 V_y の効果は単純に落下原料が斜面上に供給されるとする考えでは説明できない。

しかし、このような速度成分の影響は Fig. 10-a, b に示した原料層表面に形成される不安定な堆積層の存在により説明できる。すなわち、焼結原料がパレット上に給鉱される状態を観察すると、シュートから給鉱された原料は定常状態を保って斜面を落下しておらず、Fig. 10-a, b に示すように斜面の上端部に一度堆積し、この堆積層がある程度の大きさになるまで堆積した後崩壊し、斜面を流下して新しい原料傾斜面を形成している。このように給鉱原料は不安定な堆積層の形成と崩壊を間欠的に繰り返してパレットに堆積していく。したがって、 V_x が大きいと慣性力の大きな粗粒は Fig. 10-a に示すように不安定な堆積層の外側に分配されるため堆積

† 粒径が 4.76 mm(n-1) と 2.83 mm(n) について算出した α 値

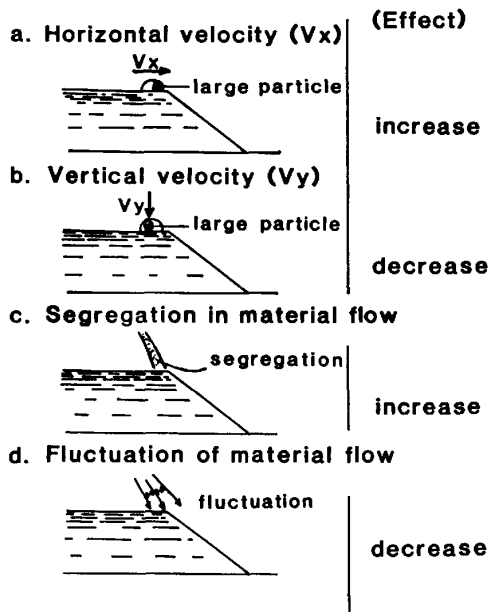


Fig. 10. Factors which affect on the segregation in a sinter bed.

層が崩れたときに下層まで粗粒を分配すると考えられる。これに対して、 V_y が大きい場合には、Fig. 10-b に示すように粗粒は堆積層の中に埋没するため、粗粒と細粒が混在した状態で堆積層が崩落し、偏析が小さくなるものと考えられる。

一方、シュートからの落下流厚み方向での偏析とシュート先端と原料層表面までの距離 DL もパレット上原料層内の粒度偏析に影響を与える。すなわち、シュートからの落下流厚み方向での偏析が大きいと Fig. 10-c に示すように粗粒は斜面側に分配されるため V_x が大きい場合と同様に原料層内の偏析が大きくなる。また、シュートからの落下流は常に Fig. 10-d のように変動しており、 DL が大きいとその振幅も大きくなり V_y を大きくすると同様に偏析を小さくすることになる。これは Fig. 7 の DL の大きさの影響として明確に現れている。

以上のようにパレット原料の偏析には原料層表面に形成される不安定な堆積層の存在が大きな影響を及ぼしており、落下原料の速度成分、落下流厚み方向での偏析、原料の安定した供給等を調整することにより偏析を制御することが可能と考えられる。

3.2 各種シュート形状と偏析現象

(1) ベルトシュート

Fig. 11 はベルトシュートの調査結果である。ベルトシュート角度 (45° , 60°)、およびパレット上原料高さを上層 (A)、全体層 (B) で整理した。図から回転速度が大きくなるほど偏析は大きくなり、また角度 45° と 60°

とでは 45° の方が明らかに偏析が大きい。さらに、角度 45° で十回転の場合にもつとも偏析が大きくなっている。

(2) 振動シュート

Fig. 12 は振動シュートの調査結果である。転がり距離 L が 880 mm では振幅量により偏析の大きさが変わらないのに対し、転がり距離 L が 1700 mm ではかなり偏析指数 α が変化している。とくに、振幅量 $2530\ \mu\text{p.p.}$ のところでは、他の振幅量に比較して顕著に偏析が大きくなっている。したがって、本実験結果では $2530\ \mu\text{p.p.}$ のところでは他の振幅量に比較して篩分け能力があつたとみられる。また、図中 $L=1700\text{ mm}$ に対して、 $L=880\text{ mm}$ の偏析が振幅量を変化させても変わらないのは、シュート上で篩分けが促進されても落下距離 (DL) が大きくなるため、原料が堆積層に落下する間の軌跡の乱れにより偏析が消滅したものと推察される。

(3) ドラムシュート

Fig. 13 はドラムシュートの調査結果である。原料落下流厚みは 90 mm で、ドラムへの衝突幅は 30 mm き

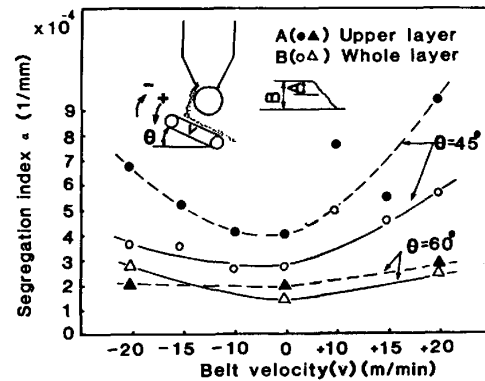


Fig. 11. Relation between belt velocity and segregation index in a sinter bed (+ : forward, - : reverse).

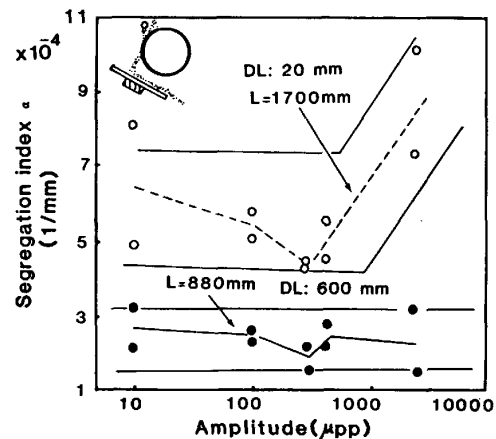


Fig. 12. Influence of the amplitude of vibrating chute on the segregation index in a sinter bed.

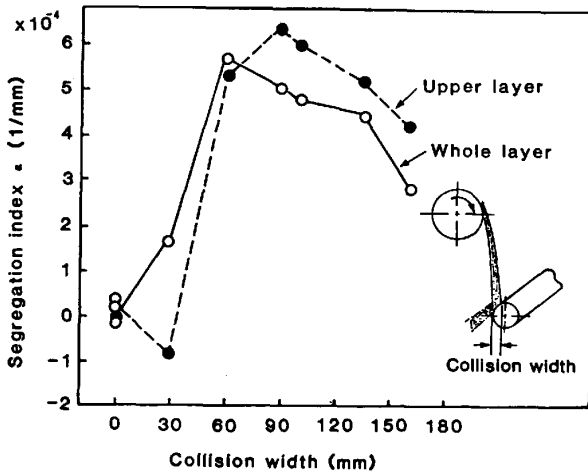


Fig. 13. Influence of the collision width of the falling stream to a drum chute on the segregation index in a sinter bed.

Table 1. Comparison of the segregation index and segregation of the carbon content in a sinter bed for the slit-chute and the slopping chute. (Direction of slit : Crossing to the falling stream.)

(a) Segregation index.

Type of chute	Exp.No	1	2
Slit-chute		$a = 8.39 \times 10^4$	$a = 7.13 \times 10^4$
Slopping-chute		$a = 4.88 \times 10^4$	$a = 5.66 \times 10^4$

a = Segregation index a (1/mm)

(b) Segregation of the carbon content.

Sampling position	Exp.	Top layer ← → Bottom layer				
		1	2	3	4	5
Slit-chute	Exp.1	3.40	3.16	2.94	2.76	2.68
	Exp.2	3.38	2.82	2.90	2.86	2.68
Slopping-chute	Exp.1	3.32	2.60	3.04	2.94	2.94
	Exp.2	3.28	3.12	3.48	2.96	3.12

C = Carbon content in sinter bed

ざみでずらしている。図中、90 mm の位置では全量ドラムから反発される場合で、0 mm の位置では全量ドラムに当たらず落下する場合である。偏析指数が大きいのは衝突幅 90 mm の位置である。一方、偏析指数が小さいのは、衝突幅 0 mm の位置で本シュートは偏析のコントロール範囲が広い。

(4) スリットシュート

Table 1 にスリットシュートの調査結果を示す。スリットシュートは鉄板製でスリットの目開き 50 mm, スリット全長 150 mm である。鉄板シュートと対比して偏析指数はスリットシュートの方が大きい。また、同表に高さ方向の炭材の分布を鉄板シュートと対比して示したが、スリットシュートの方が炭材の濃度勾配が大きい。

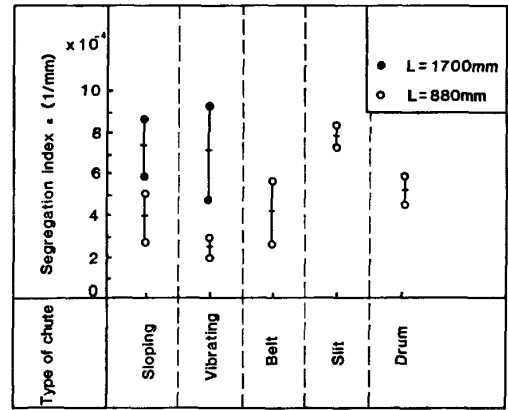


Fig. 14. Comparison of the segregation index in a sinter bed for the various type of chute.

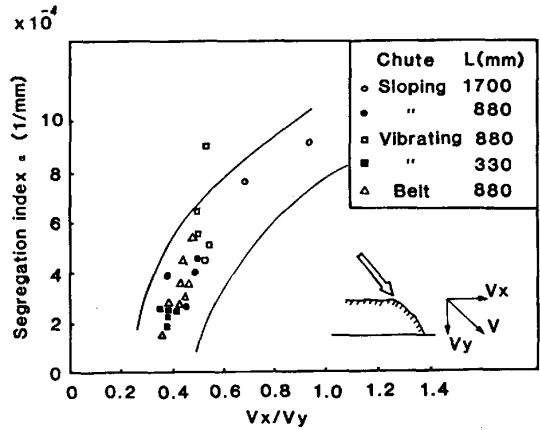


Fig. 15. Influence of the ratio of U_x/U_y on the segregation index in a sinter bed.

Fig. 14 に各形状のシュートの偏析指数の比較を示す。実験条件により偏析指数は相当変化するが、いずれのシュートでも原料の転がり距離の寄与が大きいことが分かる。

また、Fig. 15 は各形状のシュートについて偏析現象を速度成分で整理したものである。横軸は原料層上の原料給鉱速度 (V) の水平方向速度成分 (V_x) と垂直方向速度成分 (V_y) の比で、縦軸は偏析指数 a である。図から偏析指数は V_x/V_y によつて整理でき、 V_x/V_y を大きくすることで偏析を強化することが可能なが分かる。

4. 実機との対応

以上の知見から偏析を促進させるには、

- ① 水平方向速度成分 (V_x) の増大、および
- ② 垂直方向速度成分 (V_y) の減少による a の増大、
- ③ 原料落下流厚み方向内の偏析強化による a の増大、
- ④ 原料落下位置の乱れ防止による a の保存

が有効である。①～④を実機にあてはめ、偏析の制御範囲を拡大するには各シュートともそれぞれに特徴を有するが①、②を同時に達成しようとするればシュート長さを延長することが必要である。③は振動シュートの適用が効果的であると考えられる。

Fig. 16 は、鉄板シュート、ベルトシュート、スリットシュート、およびドラムシュートで給鉱した場合の焼結実験結果で、偏析指数と生産率、歩留り、および T_{200} との関係である。 T_{200} は焼結時の排ガス温度が 200°C に到達するまでの時間を示し、原料層の通気性を評価し得るもので、偏析指数の増大により生産率の向上、歩留りの改善がなされている。

5. 結 言

パレット上原料の偏析現象を解明するため、実機の幅

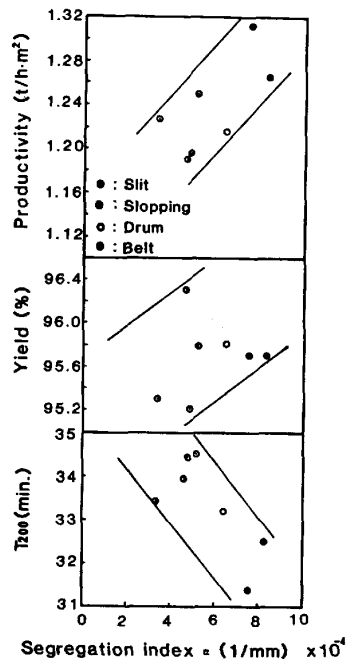


Fig. 16. Influence of the segregation index on the sintering.

方向 1/5 のモデルを用いて、現象の定量的な評価、偏析機構の解析、および各形状シュートの偏析調査を行い以下の知見を得た。

1) 焼結原料高さ方向では、 2.83 mm 以上の粗粒が偏析を生ずる。

2) 焼結原料高さ方向の偏析は、原料が原料層上面に衝突する位置に形成される不安定な堆積層中の粗粒の分布状態で決定される。偏析を促進するには、

- ① 水平方向速度成分 (V_x) の増大
- ② 垂直方向速度成分 (V_y) の減少
- ③ 原料落下流厚み方向の偏析の促進
- ④ 原料落下流位置の変動防止

が効果的である。

3) 各形状シュートで起こる偏析は V_x/V_y によつて整理することができる。

4) パレット上の原料粒度を適正に偏析させることにより焼結性は著しく改善される。

文 献

- 1) 安本俊治, 田中 周: 川崎製鉄技報, 13 (1984) 4, p. 533
- 2) 奥山雅義, 井山俊司, 田中 周, 嶋村鉄郎, 岡部 俠児: 川崎製鉄技報, 13 (1984) 4, p. 526
- 3) 門司和夫, 花木幸男, 柳沢一好, 山本一博: 鉄と鋼, 64 (1978), S 86
- 4) 井 裕 弘, 前花忠夫, 阿野浩二, 水上俊一: 鉄と鋼, 69 (1983), S 111
- 5) 井 裕 弘, 前花忠夫, 阿野浩二, 水上俊一: 鉄と鋼, 69 (1983), S 112
- 6) 佐々木三千夫, 上川清太, 須賀芳成, 福田 一: 鉄と鋼, 66 (1984), S 86
- 7) 磯崎成一, 菅原欣一, 野坂庸二: 鉄と鋼, 66 (1984), S 87
- 8) 栗原淳作, 田中 周, 安本俊治, 西村博文, 深水勝義: 鉄と鋼, 70 (1984), S 20
- 9) 深水勝義, 荒谷復夫, 中西恭二, 西村博文, 安本俊治: 鉄と鋼, 70 (1984), S 21
- 10) 樽本四郎, 福田富也, 石井晴美: 鉄と鋼, 70 (1984), S 22
- 11) 三輪茂雄: 粉体工学研究会, No. 26 (1960)