

粒子径と粒子密度の双方を考慮した偏析現象の解析

松崎 眞六*・田口 善弘*²

Analysis of Segregation Property of Burden Using 2-Dimensional Discrete Model

Shinroku MATSUZAKI and Yoshihiro TAGUCHI

Synopsis : A segregation phenomenon observed when particles having different density and shape as well as particle diameter have been charged by mixing them were examined with the use of model experimental apparatus and a discrete simulation model. In consequence of it, it has come out that the segregation phenomenon of mixed particles depends on both of the particle diameter ratio and density ratio with a base particle and dependency can be estimated with a theoretical model.

Key words : blast furnace; burden distribution; mathematical simulation; discrete model; model experimental; particle size; particle density; segregation.

1. 緒言

高炉の燃料比を下げ、生産効率を高め、さらには発生CO₂の低減を図るためには、高炉内での通気、還元、溶解の各機能を改善することが必要である。これらの機能改善には配合技術により、焼結鉱石やコークスの強度、反応性を改善することも手段の一つであるが、他方、通常のコークス・鉱石の層状装入に加え、コークスと鉱石を混合して装入することにより機能改善を図る技術が開発されている。例えば、焼結鉱石に反応性の高い小塊コークスを混入することにより、シャフト効率の改善を図る¹⁾、あるいは還元鉄を鉱石に混合することにより、単に熱物質収支上の燃料比の低減にとどまらず、鉱石層の還元溶け落ち性状の改善による更なる燃料比の低減や出鉄比の増加が期待される^{2,3)}。このような混合装入の効果を最大限に発揮するためには、粒径だけでなく密度や形状も異なった装入物を、必要な部位に必要な量だけ装入するような装入方法を開発することが重要な課題である。しかるに、粒度偏析現象については定量的に整理されたモデルが報告されており^{4,5)}、密度偏析についても、小型の模型実験結果が報告されている^{6,7)}。また、密度と粒度の方の偏析現象を取り扱ったモデルについても報告されている⁸⁾。しかし、対象となる装置、装入物がある程度限定されており、より汎用的なモデルが望まれる。このため、小型の模型実験装置を用いて、種々の装入物および装入方法について粒子の偏析状態の挙動を明らかにした。さらに離散要素法の考え方を用いて、粒度および密度の双方の偏析現象を同時に考慮可能なミュレーションするモデルを開発した。

2. 模型実験による偏析現象の解析

粒子径と粒子密度の双方を変えたときの偏析現象を1/10スケールの小型模型実験装置にて調べた。

2.1 実験装置および実験方法

実験装置は実際の高炉の約1/10サイズで、原料装入部分は矩形である(幅500mm、高さ約2000mm、奥ゆき100mm)(Fig. 1)。試料は原料ホッパーに装入後、供給バルブを開く

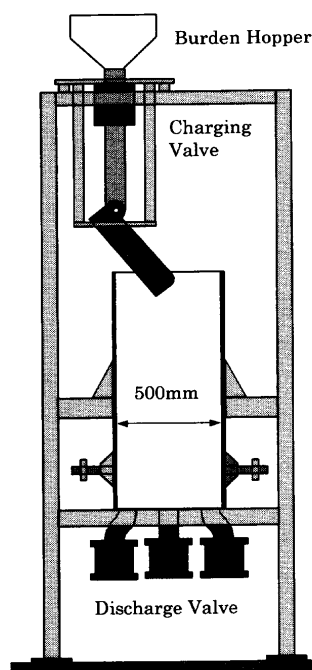


Fig. 1. Experimental apparatus.

平成14年7月30日受付 平成14年9月14日受理 (Received on July 30, 2002; Accepted on Sep. 14, 2002)

* 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

* 2 中央大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Chuo University)

Table 1. Properties of mixed particle.

Base particle	Mixed particle	Mean diameter (mm)	Apparent bulk density (t/m ³)	Particle diameter ratio (-)	Particle density ratio (-)
Sinter	Coke	4.0	1.9	1.60	0.43
	Small coke	2.5	1.9	1.00	0.43
	Reduced iron	5.0	5.4	2.00	1.25
Coke	Sinter	2.5	4.3	0.63	2.31
	Reduced iron	7.0	5.4	1.75	2.88

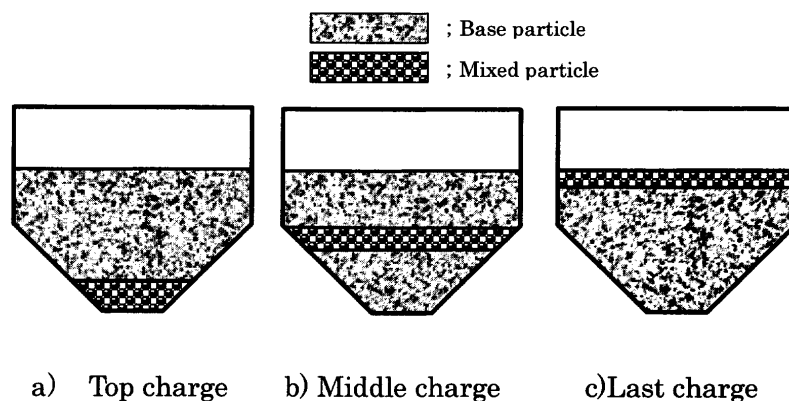


Fig. 2. Charging method into hopper.

ことにより炉内に落下・堆積させる。装入シュートの出口、あるいは装入後の堆積層で、試料をサンプリングし、定量的な解析を行う。

(1) 実験に用いた試料

試料は実際に高炉で使用する装入物を、ほぼ1/10のスケールに篩って使用した。ベース試料として焼結鉱石、コークスを用い、その中に1割程度のコークス、焼結鉱石、還元鉄をTable 1に示すような組み合わせで混合して装入し、偏析状態を調べた。

(2) 実験方法

実験は試料の種類だけでなく、装入方法も変えて行った。原料ホッパーへの装入方法を3種類、シュートからの排出方法を2種、合計6種類の組み合わせについて行った。

原料ホッパーへの混合粒子の装入方法は、Fig. 2に示すように、ベルトコンベア上への先頭切り出し、中間切り出し、最終切り出しを想定し、ホッパーの底部、中間部、層頂部に水平に装入した。

シュートからの排出方法は、一括装入と分割装入の2種類である。本装置は矩形であるため、シュートは回転できない。したがって、通常は1箇所に装入物が連続して装入されるため、装入装置は見掛けはベルレスではあるが、実質的な装入特性はベルに近くなると考えられる（この場合を一括装入と記す）。実際のベルレス装入装置は1箇所に連続して装入されるのではなく、回転することによってその投入位置が変化する。このため、任意の方位の縦断面で装入過程を観察すると、装入物は間歇的に装入されるように見える。したがって、ベルレスの挙動を模擬するため、

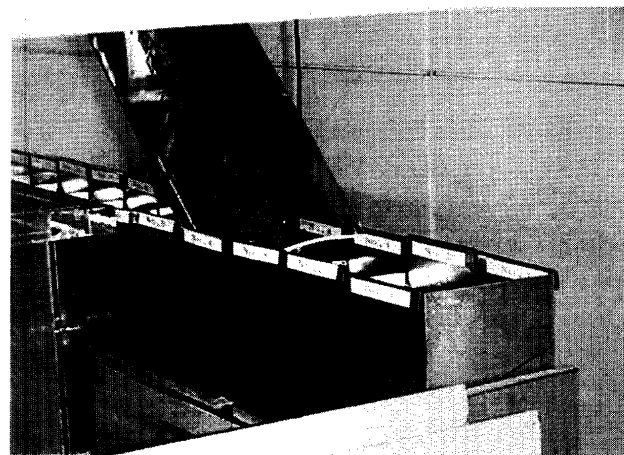


Fig. 3. Sampling method from chute.

次のような装入方法を考案した。まず、原料ホッパーから排出される原料を、Fig. 3に示すようなシュート先端で移動式のサンプリングボックスにより18組に分割してサンプリングし、構成比を調べる。次にその18組の原料を18回に分けて原料ホッパーに装入し、シュートから排出する。このように、分割して装入・排出することによりベルレス装入装置の特性を模擬した。今後このような装入方法を分割装入と呼ぶ。

シュートから排出されて層表面に堆積した試料は、層の上下と炉半径方向10分割の計20区分に分割し、サンプリングを行った。サンプリングは吸引機で炉壁部の層表面から順に吸い取るにより行う。層の乱れによる再偏析を防ぐため、仕切り板等はいない。サンプリング後、試料

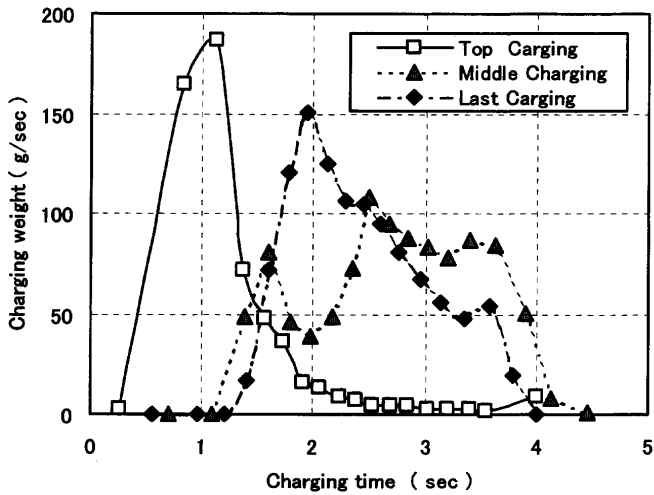


Fig. 4. Charging time trend of mixed particle weight from charging hopper. (In case of nut coke)

はベース粒子と混合粒子に分離し重量割合を測定する。

2.2 実験結果

まず実験結果の一例として、焼結鉱石に小塊コークスを想定した粒度のコークスを混合して装入した場合の実験結果を示す。さらに、さまざまな試料を混合した場合について解析結果を示す。

2.2.1 小塊コークスと焼結鉱石の混合装入の実験結果

(1) 原料ホッパーからの切り出し特性

原料ホッパーからの小塊コークスの排出量の時間変化を、Fig. 4 に示す。先頭切り出しと最終切り出しの場合には、排出前半に排出量のピークがあるが、中間切り出しは比較的平らな排出量推移となっている。最終切り出しと中間切り出しの排出量のピークが逆転するのは、ホッパー形状の関係でファネルフローとなり堆積層表面の装入物が先に排出されるためである。

他の試料同士を組合わせた場合でも、概ね類似の排出パターンとなる。

(2) 炉内での堆積状態

コークス層を定常になるまで装入し、その後に焼結鉱石と小塊コークスを所定の方法で原料ホッパーに装入し、シュート角度45度で炉内に装入した。堆積状態の例をFig. 5 に示す。

(3) 炉半径方向での小塊コークスの偏析状態

炉内のサンプリング結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。Fig. 6 は、原料ホッパーから一括して装入した場合、Fig. 7 は原料ホッパーから分割して装入した場合である。図の横軸は炉中心からの相対距離、縦軸は相対偏析指数である。相対偏析指数は、式(1)に示すように、サンプリング位置での混合試料の割合を、全サンプリング試料中の混合試料の割合で割った値として定義する。この指数が炉半径方向にわたって1のときは、混合粒子の部分的な偏析がないことを意味する。

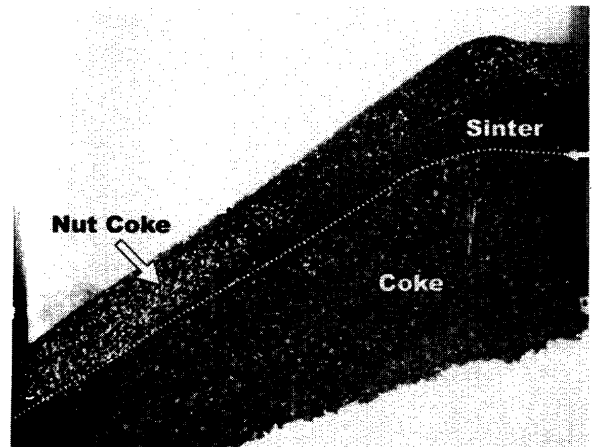


Fig. 5. Example of stack profile which nut coke mixed into sinter using last and division charge.

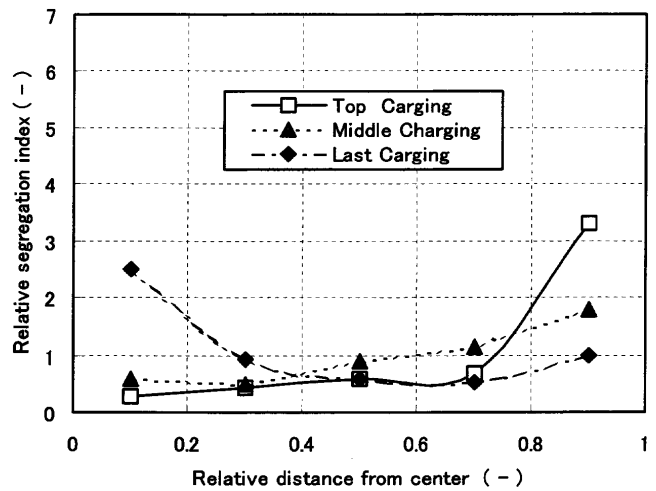


Fig. 6. Relative segregation index distribution of nut coke. (Lump charge; Bell like charge)

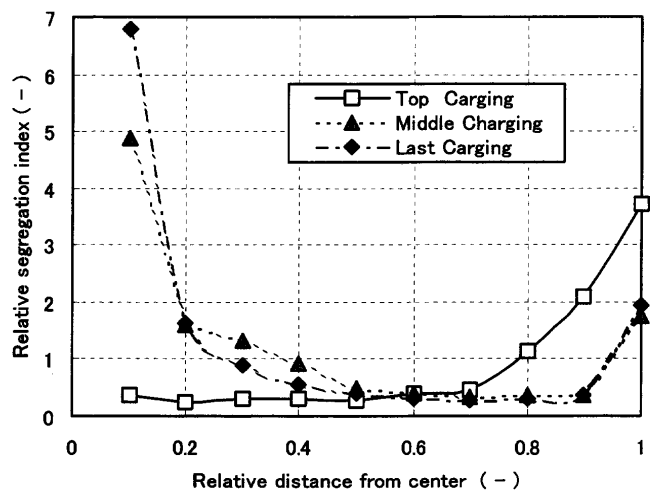


Fig. 7. Relative segregation index distribution of nut coke. (Division charge; Bell-less like charge)

$$S_{index} = \frac{W_i(\text{mixed_particle})/W_i(\text{Base_particle})}{W_{total}(\text{mixed_particle})/W_{total}(\text{Base_particle})} \dots\dots(1)$$

ここで、W; サンプリング試料重量 (kg), Base_particle ;

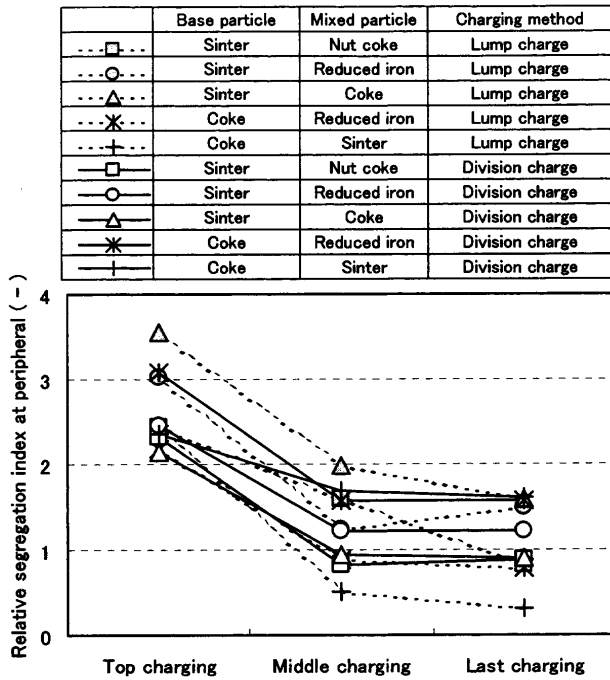


Fig. 8. Effects of a kind of mixed material and charging method into hopper and charging method from hopper on relative segregation index of mixed particle at peripheral.

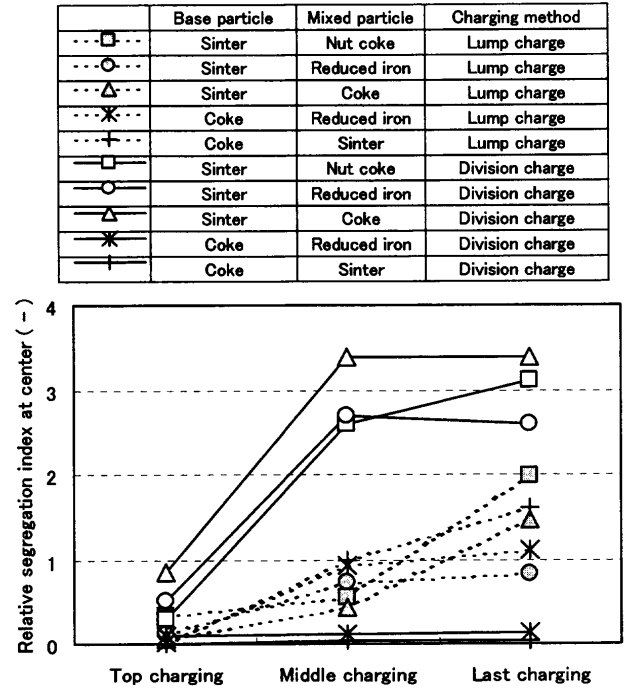


Fig. 9. Effects of a kind of mixed material and charging method into hopper and charging method from hopper on relative segregation index of mixed particle at center.

ベースとなる試料，本実験では焼結鉱石，mixed_particle；混合する試料，添字*i*；サンプリング位置番号，total；全試料。

一括装入した場合，先頭切り出し時には原料ホッパーからの排出順序を反映し，混合粒子は炉壁にほぼ堆積し，中心への偏析は少ない。しかし，中間切り出し時には混合粒子の排出ピークは，Fig. 4 に示したように最終切り出しより後半であるにもかかわらず，Fig. 6 から炉中心への流れ込みは少ないことがわかる。これは，装入物の傾斜角が装入前半には安定しないため焼結鉱石とともに混合粒子も流れ込みやすいが，装入後半では傾斜角が粒子本来の安息角に近づき，粒子の流れ込みが減少するためと考えられる。

ベレレス装入を模擬した分割装入時には，先頭切り出しの場合，一括装入時と似ているが，その他の切り出し方法では，炉中心の流れ込み状態の点では大きく異なり，小塊コークスがかかり炉の中心部に流れ込む。これは分割装入の場合には1回の装入量が少ないため流れ込みの層が薄く，軽くて大きい粒子が層の上に浮き上がりやすくなっているためと考えられる。

2.2.2 さまざまな試料の混合装入の実験結果

Table 1 に示した混合試料の組合わせに対し，ホッパーへの装入方法，ホッパーからの装入方法を変えて実験したときの，相対偏析指数を Fig. 8, Fig. 9 に示す。

Fig. 8 は炉壁部での相対偏析指数を示したものであるが，炉壁部における偏析状態に及ぼす影響は，原料ホッパーへの装入方法が支配的であることがわかる。これは，

炉壁部では粒子の流れ込む距離が短いため偏析する機会が小さいためと考えられる。

炉中心部での相対偏析指数を Fig. 9 に示す。炉の中心部においても，炉壁部同様に原料ホッパーへの装入方法が偏析状態に大きく影響を及ぼすことがわかる。しかしながら，その他に，原料ホッパーからの装入方法，あるいはベース試料と混合試料の粒径比，密度比も大きく影響している。例えば，一括装入（点線）と分割装入（実線）とを比較すると，分割装入の相対偏析指数が一括装入に比べて倍程度大きい。また焼結鉱石にコークスなど密度の小さい装入物を混合した場合（□，△）と，コークスに焼結鉱石など密度の大きい装入物を混合して装入した場合（✱，+）の相対偏析指数の相違は分割装入（実線）で顕著である。これは，分割装入の方が少量ずつ装入されるため，偏析する機会が多いためと考えられる。

以上のように，定性的には大きくかつ密度の小さい粒子の方が炉の中心部に流れ込みやすいことが確認されたが，実験結果では装入方法の影響が大きく，今回の実験に用いた混合粒子はベース粒子と粒度比，密度比が大きく異なるにもかかわらず，その影響は必ずしも明確ではなかった。

3. 離散要素法によるモデル構築の考え方

以上のように，模型実験では装入方法による影響が大きく，粒子径や粒子密度比による偏析状態を定量的に解析することは必ずしもできなかった。このため，離散要素法を

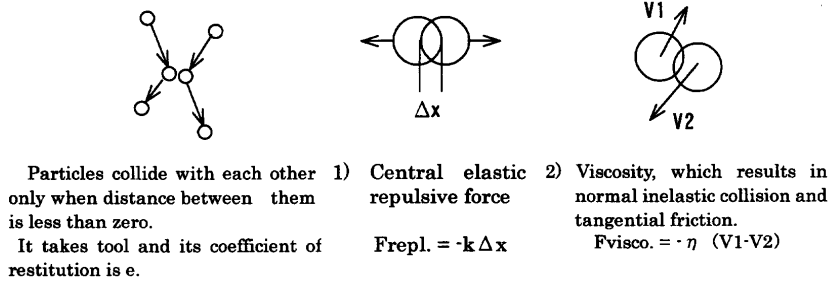


Fig. 10. Basic concept of discrete model.

用いた計算を用いて、理論的に偏析状態を調べた。

従来、化学工学的解析手法をベースとした高炉装入物分布予測モデルが開発され、高炉の装入物分布の設計、予測に用いられてきた^{5,9-11)}。化学工学的手法をベースにしたこのモデルは、粉粒体を連続体と仮定して構築されているため、安息角、篩理論による粒度偏析など、マクロな物性値が測定可能な現象については定量化が可能であり、実炉の分布推定に有効であった。しかしながら、物性値の異なる粉粒体が混在する場合のホッパーからの排出挙動、堆積時の粒度、密度偏析現象を定量的に記述することは難しい。物性値の異なった銘柄の粒子を混合して装入する際の、銘柄偏析、粒度偏析などの層の内部構造に関わる現象に関するシミュレーションは、粒子1個1個について運動方程式を解くいわゆる離散要素法の考え方をいれれば統一的に記述できると考えられる¹²⁻²⁰⁾。

離散要素法とは、粒子1個1個について運動方程式をたて、粒子相互の運動を解く方法である。基本的な考え方はかなり古くからあり、最近の計算機の発展により実用的な計算が可能となってきた。

ここでの離散要素法では、個々の粉粒体粒子を球（または円）として扱う。粒子が相互に接触していないとき、粒子は重力下で自由に運動する。一方粒子が相互に接触しているときには、粒子は仮想的にオーバーラップしているときとみなし、このオーバーラップした量に比例した反発力を受ける。また粒子相互の摩擦と衝突の非弾性を考慮するため、接触している間、粒子は速度差に比例した摩擦力を受けると仮定する。さらに、個々の粒子の回転は無視できると仮定する。

以上の関係を数式で表すと次式のようなになる¹⁷⁾。

$$\ddot{x}_i = -\sum_{j \neq i}^N \theta(d - |x_i - x_j|) \left[k \left\{ x_i - x_j - d \frac{x_i - x_j}{|x_i - x_j|} \right\} + \eta (v_i - v_j) \right] - g$$

.....(2)

N は総粒子数、 x_i は i 番目の粒子の重心の位置、 $\theta(x)$ は x が正のときは 1、それ以外は 0 となる関数である。 d は粒子の直径、 g は重力加速度、 v は粒子の速度、また、 k と η は各々相対加速度と相対距離、相対加速度と相対速度との

比例係数であり、物理的な意味としては弾性定数や粘性係数に相当する。

式(2)は、粒子の質量を m とすると $t = \tilde{t}/t_0$, $k = \tilde{k}t_0^2/m$, $\eta = \tilde{\eta}t_0/m$, $x = \tilde{x}/x_0$, $g = \tilde{g}t_0^2/x_0$ 、として無次元化した。ここで、 $\tilde{t}, \tilde{k}, \tilde{\eta}, \tilde{x}, \tilde{g}$ は実際の単位系で、 t_0, x_0 は任意の時間スケール、空間スケールである。

本モデルでは、 k, η を決めることは正面衝突のときの反発係数 e と衝突に要する時間 t_{col} を決めることに相当し、これらのパラメータの間には $e = \exp(-\eta\pi/\omega)$, $t_{col} = \pi/\omega$, $\omega = \sqrt{2k - \eta^2}$ の関係がある。数値シミュレーションはこれを数値的に積分することで行う。

4. 周期境界条件を仮定した樋上の流れにおける偏析現象の解析

上記のような基本的な仮定に基づく離散要素法を用いたモデルで、粒度および密度差によって生じる偏析現象のシミュレーションが可能かどうかを調べた。実際の高炉装入装置を想定したモデルでは本質的な挙動を調べるのが難しいので、本論文では周期境界条件を用いた無限斜面、粒度構成を二成分系にするなど、実際の装置に比べて簡素化した系についてモデル化を行った。

4.1 モデルの概要

粒子の初期状態は、2種の粒子を各々交互に接触しない状態で縦積みして詰め込んだ状態である。計算開始と同時に左端を開放する。左端から流出した粒子は直ちに右端からこの樋に流入し、計算を終了させるまで繰り返し流れつづける。これがすなわち「周期境界条件を仮定した無限流れの計算」である。

計算空間は二次元で粒子の形状は円。ベース条件は、粒子数 1024 個、粒子の半径が 1、密度が 1 で、細粒と粗粒の粒径比 (= 細粒径/粗粒径)、密度比 (= 細粒密度/粗粒密度) を変えて装入した。ただし、すべての粒子を同一粒径比にすると、すべり線が発生せず、粒子の移動がほとんどなくなる現象が生じるため、上下 1 割程度のばらつきをランダムにもたせた。混合粒子の割合は粒径比により異なるが、面積比で 1 割から 2 割程度である。反発係数、衝突時間は各々、0.5, 0.1 とした。反発係数は粒子の流動状態

Table 2. Condition of calculation.

Particle number	1024
Radius of base particle	1
Radius of mixed particle	0.2~2.0
Density of base particle	1
Density of mixed particle	0.25~2.5
Mixed ratio of base particle and mixed particle	10%~20%
Coefficient of restitution	0.5
Collision time	0.1

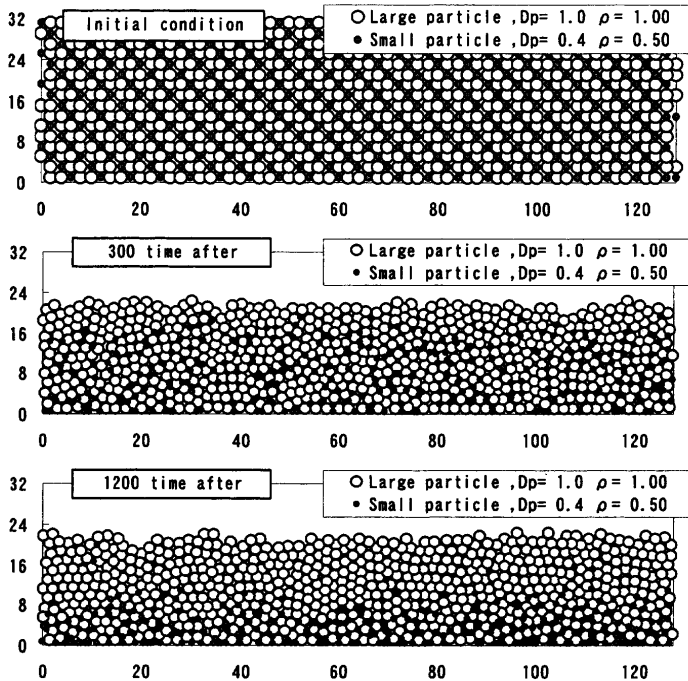


Fig. 11. Example of calculation results.

から、衝突時間はモデルの収束性から決定した¹⁸⁾。なお、本モデルは式(1)で説明したように無次元化した式を使用しており、重力の加速度としては1.0を用いている。

4.2 計算結果

(1) 計算例

計算結果の例を Fig.11 に示す。図の横軸は堆積層の水平方向の広がり、縦軸は層の高さ方向の広がり、計算条件は、粒径比が 0.4、密度比が 0.5 である。計算は次の手順で行う。まず、樋上で粒子を初期堆積させる。すなわち、粗い粒子と細かい粒子を各々交互に縦積みした状態で詰め込んでおく。次に計算開始と同時に左端の境界を開放し、左端から粒子を流出させる。ただし流出した粒子は直ちに右端からこの樋に流入するものとする。この過程を一定時間継続すると粒子の再配列が進行し、やがて定常状態に至る。

Fig.11 には初期状態だけでなく、無次元時間で 300 時間後、1200 時間後の計算結果を示してあるが、図から計算の経過、すなわち時間の経過に従い、細粒の層の下方への偏析が進行していることがわかる。

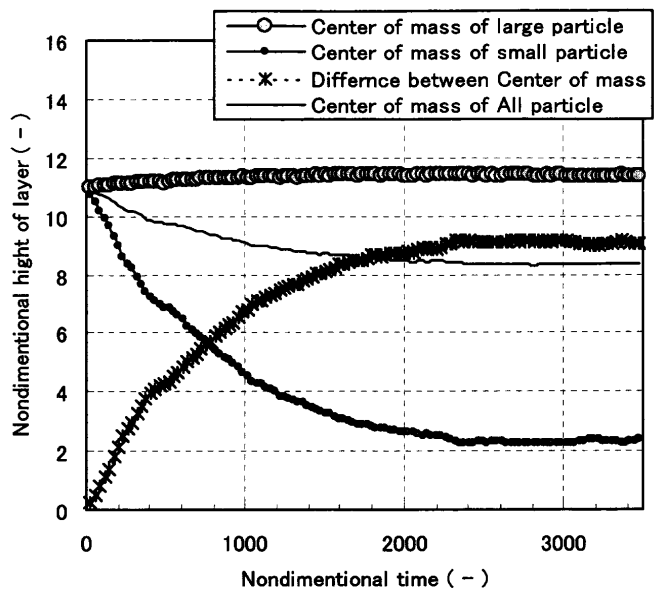


Fig. 12. Convergence status of non dimension height of particle.

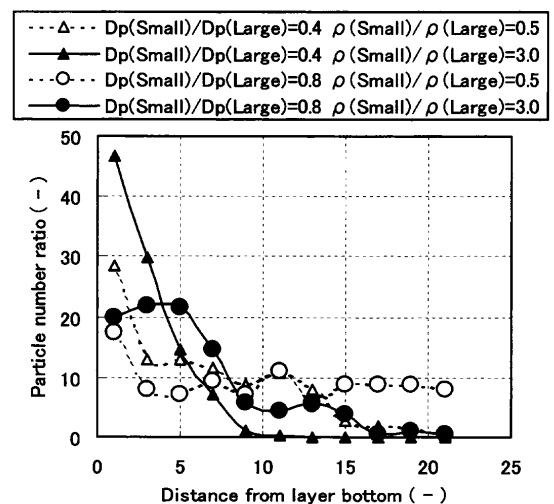


Fig. 13. Effects of particle diameter ratio and density ratio on small particle number ratio distribution from layer bottom.

(2) 収束状況

すべての細粒とすべての粗粒の平均位置、すなわち重心位置の時間変化を調べると (Fig.12)、計算当初、細粒は急激に下方に移動するが、計算時間が進むにつれて次第に収束し、ほぼ同じ位置にとどまることが確認された。収束状況から、以下の解析では無次元時間で 3500 時間後の計算結果を使用した。

(3) 粒径比、密度比を変えたときの偏析状態の変化

細粒と粗粒の密度比を 0.5, 3.0、細粒と粗粒の粒径比を 0.4, 0.8 と変えて偏析状態の変化を調べた。

Fig.13 に、粒径比、密度比を変えたときの層の底面からの細粒の個数分布を示す。これから、細粒と粗粒の粒径比が 0.4 の場合は、密度によらず細粒は堆積層の下部に偏析することがわかる。しかしながら、粒径比が 0.8 と細粒の

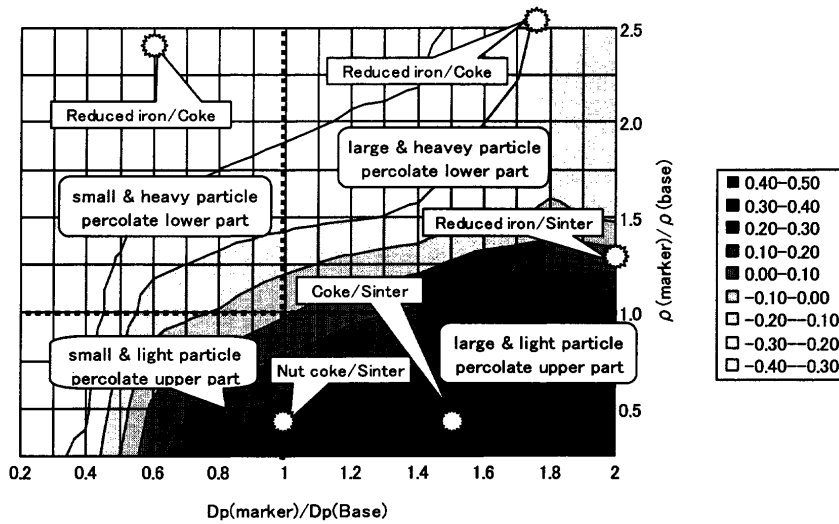


Fig. 14. Effect of particle diameter ratio and density ratio on segregation index.

粒径が粗粒に近づくと、密度が大きい場合は層の底面に偏析するが、密度比が小さい場合、つまり軽い場合には層の上方にかなり浮き上がる事わかる。

このように、本モデルで粒子径や密度による偏析現象が表現できることが判明したので、粒径比、密度比をさらに多数のケースで変えて計算を行い整理した。

Fig.14 は密度比、粒子径比をパラメータとし、装入粒子全体の重心位置と混合粒子の重心位置の差を示したものである。この重心位置の差を平均層高さで割ったものを、本シミュレーション計算における“相対偏析指数”と定義する。数字が正の場合は堆積層の上部に、負の場合には堆積層の下部に偏析することを表す（ここで+0.5が最上層、-0.5が最下層に位置することになる）。横軸は、混合する粒子と、混合される粒子の粒子径比を、縦軸は、混合する粒子と、混合される粒子の密度比を表している。したがって両軸の1が交わる点は同一粒子同士を混合した場合で、値は0、つまり偏析しないことになる。また、混合粒子として相対的粗粒を混合した場合も計算したので、混合粒子をmarker粒子と記載した。

また、Fig. 8, Fig. 9の実験結果に対応する点を星印(⊙)で示した。これから、焼結鉍石に小塊コークス、コークス、還元鉄を混合した場合、粒径比、密度比はそれぞれ異なるが、Fig.14に示したように、計算における相対偏析指数はいずれも0.1~0.3近傍とわずか層の上方の浮き上がるケースとなり、模型実験で装入方法などの外乱の大きい場合には偏析状態の差を検出することが困難であったものと説明できる。

次にモデル計算での混合装入物の相対偏析指数と、実験で求めた中心部での相対偏析指数を比較した図を Fig.15に示す。これから、定義は異なるものの、実験結果と計算結果の相対偏析指数はほぼ直線関係となる事がわかる。また、計算に対し、実験結果では一括装入と分割装入で相

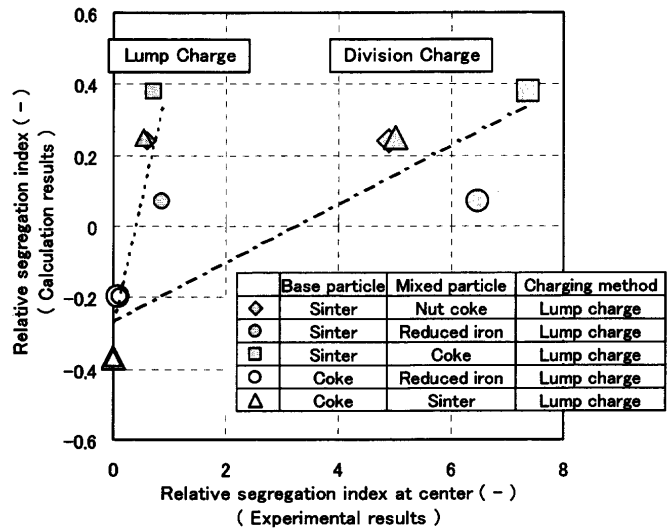


Fig. 15. Comparison experimental results and calculation results of relative segregation index.

Table 3. Effect of particle diameter ratio and particle density ratio on partial regression coefficient.

		Effect of Particle diameter ratio (A)	Effect of Particle density ratio (B)	A/B
Experimental results	Lump charge	0.346	-0.249	1.387
	Division charge	2.097	-2.630	0.797
Calculation results		0.170	-0.254	0.670

対偏析指数が異なる。

さらに、相対偏析指数に及ぼす粒径比、密度比の影響を、重相関解析²¹⁾を行って比較した。実験結果については、原料ホッパーへの装入方法が中間装入の場合の中心相対偏析指数について解析した。離散シミュレーションモデルの計算結果については、実験条件に対応する粒径比、密度比の計算結果の相対偏析指数について解析した。この結果を Table 3 に示す。Table 3 にはそれぞれの条件での偏回帰係数²¹⁾を示した。例えば、一括装入時に粒径比が相対偏析

指数に及ぼす影響は 0.346 であり、密度比が相対偏析指数に及ぼす影響は -0.249 である。したがって、この場合は粒径比と密度比が相対偏析指数に及ぼす影響はほぼ同じレベルになることがわかる。分割装入時は相対偏析指数に及ぼす影響は、各々 2.097, -2.630 と一括装入時より 1 桁程度大きくなり、偏析に及ぼす影響が大きいことを表している。離散シミュレーションモデルでは相対偏析指数に及ぼす影響は一括装入時と同レベルになっているが、相対偏析指数の定義が異なるので直接比較はできない。

粒径比が相対偏析指数に及ぼす影響と、密度比が相対偏析指数に及ぼす影響の比を A/B と定義すると、一括装入時、分割装入時、離散シミュレーションモデルの計算値の順に低下している。離散シミュレーションモデルの計算値は偏析の極限状態であると考えれば、より偏析させるような装入方法ほど、 A/B は低下する、つまり粒径比の影響が相対的に低下し密度比の影響が顕在化することがわかる。

したがって、ベルなど一時に大量に装入する場合は、炉内での流れ込む際の偏析する機会が相対的に小さいため、ホッパーへの堆積状態が炉内の偏析状態に反映され、かつ密度比が偏析に及ぼす影響も大きくないと考えられるが、ベルレスなど少量に分割して装入する場合は、相対的に装入方法の影響は小さく、密度比による偏析つまり銘柄偏析も大きくなる。したがって、混合試料を炉周辺部にとどめるためには、先頭切り出しし、かつコークスのテラス長さを十分とるなどの方法が必要になると考えられる。

5. 結言

粒度だけでなく密度や形状も異なった装入物を混合して装入したときの炉内での偏析状態を、模型実験および離散

要素法を用いたシミュレーションモデルで検討した。その結果、混合粒子の偏析現象は、ベース粒子との粒径比、密度比の双方に依存し、理論的なモデルにより、その依存性は予測可能なことを見出した。

文 献

- 1) M.Naito, A.Okamoto, K.Yamaguchi, T.Yamaguchi and Y.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 357.
- 2) K.Kunitomo, Y.Takamoto, T.Nishimura, K.Yamaguchi, Y.Fujiwara and T.Onuma: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 140.
- 3) T.Onuma, Y.Fujiwara, K.Kunitomo, Y.Takamoto and T.Nishimura: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 141.
- 4) M.Kondo, H.Kosaka, K.Okabe, H.Marushima, H.Takahashi and J.Kurihara: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), S593.
- 5) Y.Okuno, S.Matsuzaki, K.Kunitomo, T.Isoyama and Y.Kusano: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 91.
- 6) R.Nakajima, T.Sumigama, A.Maki, K.Wakimoto and M.Sakurai: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S3.
- 7) R.Nakajima, T.Sumigama, A.Maki, K.Wakimoto and M.Sakurai: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), S752.
- 8) K.Sunahara, C.Kamijo and T.Inada: 55th Ironmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (1996), 3.
- 9) Y.Okuno, K.Kunitomo, S.Matsuzaki, M.Matsui and A.Suzawa: Proc. 44th Ironmaking Conf., ISS, Warrendale, PA, (1985), 543.
- 10) Y.Okuno, K.Kunitomo, T.Irita and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 783.
- 11) S.Matsuzaki and T.Sugiyama: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1033.
- 12) T.Tanaka, Y.Kajiwara and T.Inada: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 2262.
- 13) Y.Kajiwara, T.Inada and T.Tanaka: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 235.
- 14) P.A.Thompson and G.S.Grest: *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991), 1751.
- 15) T.Poeschel: *J. de Phys. II*, **3** (1993), 27.
- 16) J.Kano, A.Shimosaka and J.Hidaka: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **30** (1993), 188.
- 17) Y.Taguchi: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **30** (1993), 173.
- 18) Y.-H.Taguchi: Proc. Dynamics of Pattern Formation in Complex Dissipative Systems, World Scientific, Singapore, (1992), 341.
- 19) Y.Taguchi: *Bussei Kenkyu (Kyoto)*, **61** (1993) Jan., 1.
- 20) S.Matsuzaki and Y.Taguchi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 127.
- 21) 河口至商: 多変量解析入門 I, 森北出版, 東京, (1988), 17.