

粉粒体堆積層における偏析の基本機構と対策

篠原 邦夫*

Basic Segregation Mechanism of Solids Bed and Its Reduction

Kunio SHINOHARA

Key words : particle ; segregation ; modelling ; solids bed ; flow.

1. 緒言

粉粒体の流動現象を取り扱う装置や操作にはいろいろあるが、大別すると、混相系の接触操作を目的とした種々の形式の反応装置と粉粒体の流動操作を目的とした最も単純な半連続操作型の貯蔵・供給装置がある。中でも移動層は、主に連続操作型の気固系接触反応装置として古くから用いられており、気固液三相系の伝熱・物質移動・反応操作が重畳した最も複雑な応用装置として高炉が挙げられる。

一方、粉粒体は、一般には例え粒子径が異なっても多成分の混合物であるから、運動する限り、粒子物性の違いにより分離現象としての偏析を生じる。そのため、充填むらや偏流により、滞留時間分布や温度分布などを生じ、接触効率の低下や不均一な品質の材料を生産したり再現性に乏しいプロセスとなり、偏析は好ましからざる特性である。また、上記の種々の移動現象は、その骨格をなす粉粒体の挙動を基礎にして記述されるから、流動特性としての偏析現象の把握は重要になる。

しかしながら、混合物の流動挙動の複雑さ故、昔から現場泣かせの現象で多量の経験的知識が蓄積されてきたにもかかわらず、解析的な研究は広範にはなされていない。ここでは、広く粉粒体の単位操作に関連する流動現象としての観点から、関連する偏析機構の基本的特性を分類整理し、それに基づく低減対策について言及する。

2. 種々な場の偏析現象

粉粒体の取り扱われる場として、一般に重力場、遠心場、振動場、通気場などがあるが、ほとんどの粉体単位操作や反応装置内でも多かれ少なかれ、これらの作用力を内包している。以下にその例を挙げ、含まれる偏析の基本機構について考察する。

2・1 重力場の偏析

移動層や貯蔵容器の上部では、中央からの一点供給により粉粒体の野積みの状態と同様に、Fig. 1のような円錐状の堆積物を形成する。その際、流動性に乏しい小粒子や、密な粒子、角ばった粒子などのいわゆる偏析成分は、供給点付近に逆円錐状堆積部分を形成し、その他の成分がその周辺に流下する。その後、底部の中心からの排出に伴い、中央偏析成分領域が優先的に流出し、排出物の時間による偏析が顕著になる可能性がある¹⁾。また、貯槽内では、Fig. 2

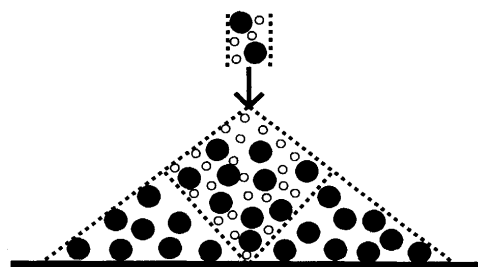


Fig. 1. Segregation of particle mixture in heaping over a plane.

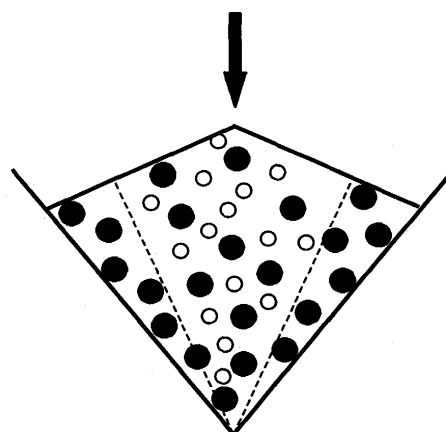


Fig. 2. Segregation of particle mixture by central filling of a conical vessel.

平成6年9月9日受付 平成6年11月4日受理 (Received on Sep. 9, 1994; Accepted on Nov. 4, 1994) (依頼解説)

* 北海道大学工学部 (Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13-jo, Nishi 8-chome, Kita-ku, Sapporo 060)

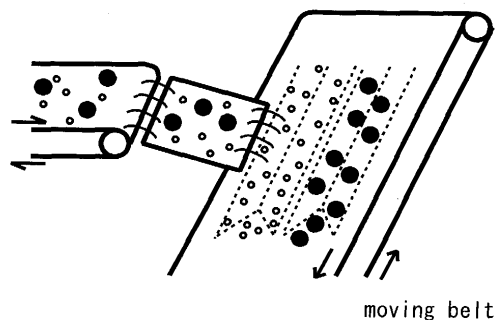


Fig. 3. Particle segregation in conjunction of belt conveyors.

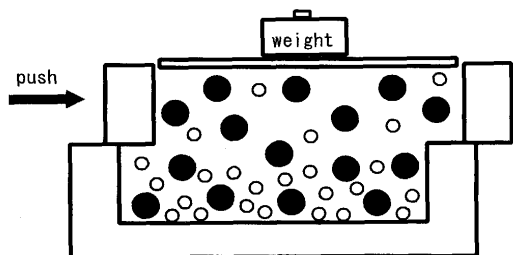


Fig. 4. Particle segregation under shearing.

に示すように、中央からの連続供給により容器の形状と同じ偏析成分領域が内部に形成され、排出時には同様に成分偏析が強調される場合がある²⁾。

さらに移動層内部においては、通常低速で充填と排出の同時操作が行われていることになり、上述と同様の偏析現象を生じる。この応用例として、容器内の不動域、例えば底部側壁や高炉炉芯部の表層付近で起きる³⁾。ただし、その際には堆積斜面全体にわたり混合粒子が供給されるため、偏析領域は周辺部まで拡がる。

また、傾斜面を流下する混合粒子は、例えばシュートの下部で直交するベルトコンベアの上では、Fig. 3 に示す様に、小粒子がベルトの近い側に落下し横方向で偏析を生じる⁴⁾。しかしながら、単一粒子の場合は、摩擦係数さえ同じならば大きさや密度によらず同一距離滑り落ち分離は起きないが、回転すると小粒子や丸い粒子はより遠くへ落下し逆になることが計算により判っている⁵⁾。

剪断試験器内では、Fig. 4 に示すように、小粒子は大きな剪断歪みで変形した粉体層を通り抜けて底付近に集まり偏析する⁶⁾。

2・2 遠心場の偏析

キルンや乾燥機、ボールミルなどの傾斜回転円筒内では、Fig. 5 の様に細粒成分が横断面の軸付近に集まり、軸方向では過剰な細粒が存在するとその成分のみの縞模様を混合物と交互に発生し、偏析が起きる⁷⁾。また、造粒用の水平回転円錐容器の場合は、Fig. 6 の様に低速回転により大きな開口部の方により高い堆積面が形成されるため、細粒が集まる⁸⁾。V型回転混合機の内部では、Fig. 7 の様に密な粒子成分が比

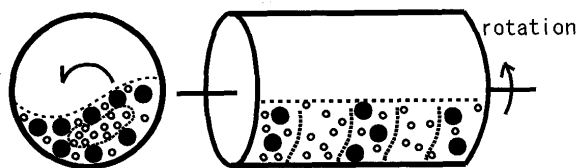


Fig. 5. Segregation inside a horizontally rotating cylinder.

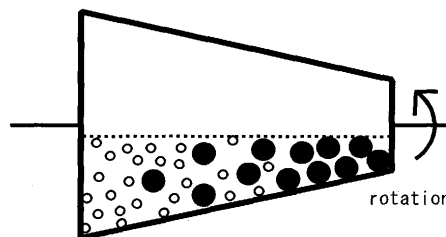


Fig. 6. Segregation inside a horizontally rotating cone.

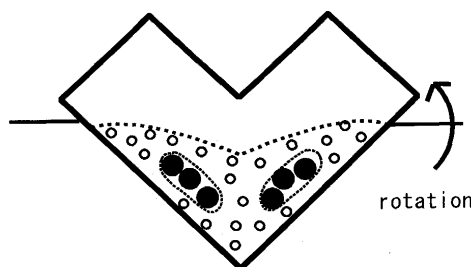


Fig. 7. Segregation inside a V-shaped mixer.

較的停滞する粉体層内部に集まる⁹⁾。

粉粒体供給時の回転分散機や上昇攪拌翼などで、堆積面上の粉粒体に遠心力が作用すると、安息角が動的に絶えず更新され流下するため、同様の偏析現象を生じる可能性がある。

2・3 振動場の偏析

タッピングを与えた円筒容器¹⁰⁾や振動糶¹¹⁾などではFig. 8 の様に、小粒子の相対透過運動により混合層から大粒子が表層に浮き上がってくる。このような偏析特性を利用すると、篩上の積層過程で小粒子が絶えず篩面に供給され篩分け効率を増大する効果が得られる¹²⁾。

移動層内での粉粒体の降下挙動は粉粒体の摩擦特性や操作のため必ずしも滑らかではなく、たえず脈動や振動が起きていると考えられる。そのような場では、小粒子の沈下と相対的に大粒子が上層に浮き上がってきて偏析が増進する可能性がある。

2・4 通気場の偏析

向流式の気固接触操作では、移動層内でも、何らかの流動化および噴流化の影響を示すであろう。その際、Fig. 9 の様に小粒子は逆に上昇し大粒子や密度の高い成分が沈下し

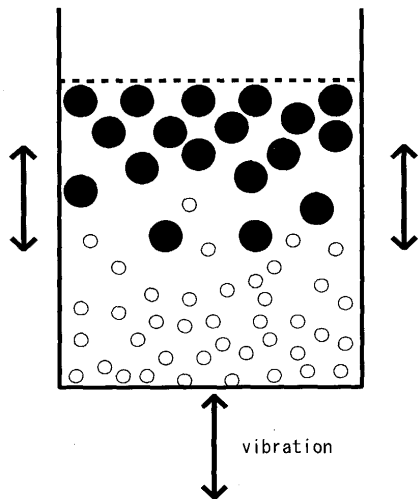


Fig. 8. Segregation under vibration.

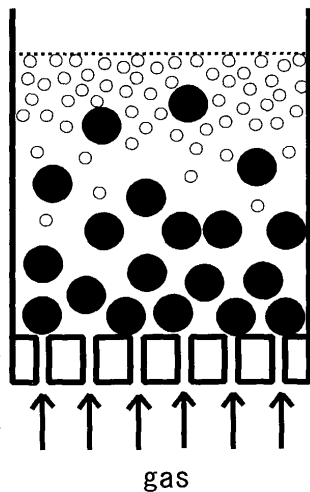


Fig. 9. Segregation under fluidization.

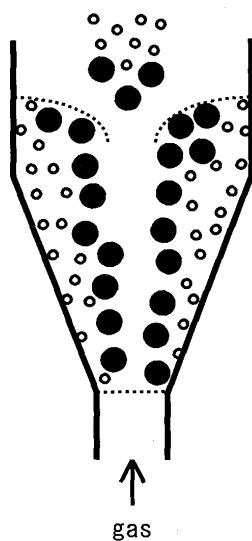


Fig. 10. Segregation under spouting.

偏析を起こす。流動層では、密度差の方が粒度差より偏析を生じ易い¹³⁾。噴流化の場合、Fig.10に示す様に、高風速

では小粒子が吹き飛ばされて壁面近くに集まるが、比較的
低風速では回転場と同様、環状部の粒子の動きの遅い停滞
域に偏析成分が集まる傾向がある¹⁴⁾。空気輸送管の内部でも
同様な偏析が粒子密度や形状差により生じる。

3. 偏析の定義と分類

偏析は、微視的には拡散、対流、剪断などの混合と同じ
基本過程を含んでいるが¹⁵⁾、混合が局所的均一性の度合やそ
の速度に着目するのに対して、着目成分粒子の混合率の容
器内位置あるいは容器からの排出時間による変化として偏
析模様により捉える点が異なっている。ここでは、重力場
での粒子偏析に限定して、上記の現象を分類する。

粒子物性による流動性の違いから、粒度偏析、密度偏析、
形状偏析などと呼ばれる。中でも、粒度偏析が一般に最も
顕著と言われるが、粒子径の差が他の因子に比較して容易
に大きくなる場合が多いからである。これらの偏析は、状
況に応じてあたかも異なる原理による偏析模様を呈するが、
より流動性の低い粒子を偏析成分として定義することによ
り統一的に取り扱うことが可能になる。

操作形態から、移動層の充填・供給時における堆積面上
の表層偏析、排出時の堆積層内部における層内偏析、およ
びそれらの組み合わせ偏析が最も一般的である。前述の重力
のみの場と異なる場での偏析現象も同様な原理で分類でき
るであろう。

4. 偏析の基本機構

偏析は、巨視的には混合と反対の現象に見えるが、上記
のごとく微視的には混合と同じ基礎過程を含む。しかしな
がら、工学的には粒子物性、容器の寸法および操作条件に
より記述される必要がある。ここでは、操作条件に対応し
て、いくつかの偏析の基本機構について従来の研究を紹介
する。

4・1 表層偏析

(1) 飛翔効果¹⁶⁾

Fig.11の様に粒子を粘度 μ の流体中で水平方向速度 V_h で
投射すると、Eq.(1)により流体抗力の違いから粒子径 d や
密度 ρ の大きい粒子はより遠い距離 L まで達する。すなわち、
充填時の粒度偏析は説明できるが、重い粒子は実際に堆積
面上では遠くまで行かないので密度偏析には当てはまらない。
これに関連しては、後述のように逆に小粒子が導入空
気に同伴して遠くに分散する可能性がある。

$$L = \frac{V_h \rho d^2}{18\mu} \dots\dots\dots (1)$$

(2) 回転効果¹⁷⁾

Fig.12に示すように単一粒子が高さ H で傾斜角 I の傾斜面

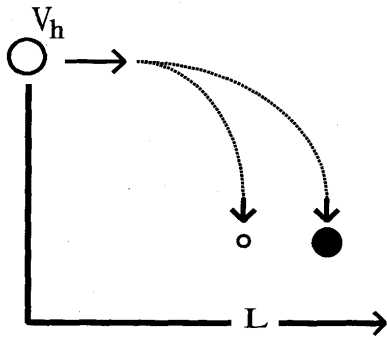


Fig. 11. Projection model in the air.

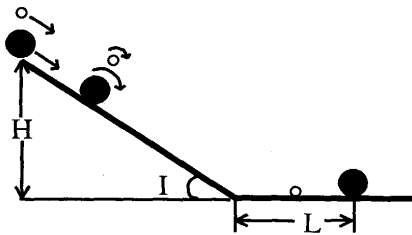


Fig. 12. Rolling model along an inclined plate.

を落下すると、回転運動ならばEq.(2)により回転摩擦係数 f_r の小さな大粒子ほど水平面上でより遠い距離Lまで達する。しかし、滑り運動なら、Eq.(3)により粒子径dや密度によらず、滑り摩擦係数 f_s の差のみにより偏析する。それ故、粒度と摩擦ないしは形状偏析は説明されるが、密度偏析は起きないことになる。

$$L = \frac{dH}{2} \cos^2 I \cdot \frac{1 - 2f_r / (d \cdot \tan I)}{f_r} \dots\dots\dots (2)$$

$$L = H \cdot \cos^2 I \cdot \frac{1 - f_s \cdot \tan I}{f_s} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 躓つき効果¹⁸⁾

Fig.13の様に、大粒子は、Eq.(4)で与えられる大きな回転角速度 w のため容易に粒子堆積面上の障害物を乗り越えられるので、より遠くまで流下できる。したがって、粒度偏析は説明できるが、密度や摩擦の効果は含まれていない。

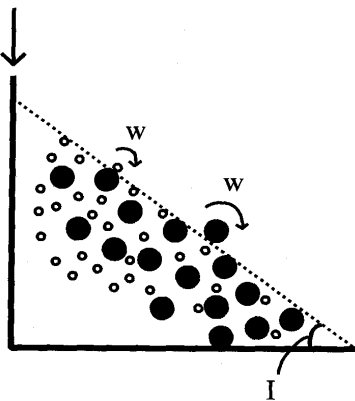


Fig. 13. Stumbling model over inclined heap surface.

$$w = \sqrt{\frac{2g[r - \sin I \sqrt{r^2 - (r-k)^2 - \cos I (r-k)}](r^2 + j^2)}{r(r-k) + j^2}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 g は重力加速度、 I は堆積面の傾斜角、 r は粒子半径で、 k は堆積面上の凹凸の度を障害物の高さとして、 j は回転半径を表す。

(4) 押し退け効果¹⁹⁾

Fig.14の様に、二次元的に二個の球の上に乗った粒径や密度の異なる一個の球は、Eq.(5)により、大きく重いものほど底部の粒子は大きな壁面滑り摩擦係数 f_s を必要とするため、滑り摩擦抵抗に打ち勝って底に沈みやすい。したがって、密度偏析は説明できるが、実際には大粒子は沈まないで粒度偏析は逆の傾向になる。

$$f_s = \frac{\tan a}{1 + 2 / \left[\left(\frac{d_t}{d_b} \right)^3 \left(\frac{\rho_t}{\rho_b} \right) \right]} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 d_t および ρ_t は、それぞれ上部の粒子の粒子径と密度であり、添え字 b は底部のそれらを示す。 a は接点を通る半径と垂直方向とのなす角である。

(5) 篩分け効果¹⁾

粒子径の異なる多成分粒子が傾斜堆積面を流下するとき、Fig.15の様に小粒子は大粒子に篩分けられ静止下層に留まる。その際、表層における残留分率 Z_{ox} は傾斜堆積面 x に沿って連続篩の式Eq.(6)により表現される。そのため、小粒子は堆積面下方で希薄になり、粒度偏析が説明される。供給流量が少なく、粒度幅が広いほど、この傾向は顕著にな

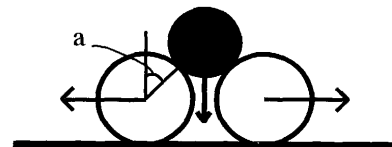


Fig. 14. Push-away model over a horizontal plane.

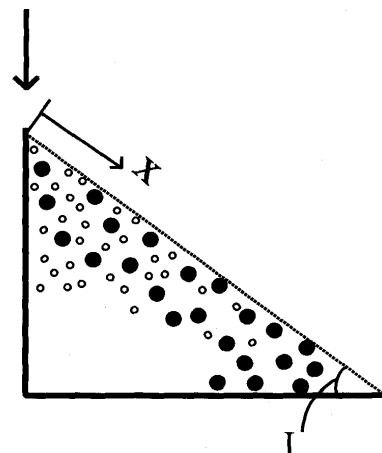


Fig. 15. Screening model over inclined heap surface.

る。しかしながら、大粒子が篩として固定され、堆積後の小粒子が流下するか逆でなければ安息角は維持できない。

$$\log \frac{Z_{ox,n}}{Z_{ox,n-1}} = \log \frac{Z_{i,n}}{Z_{i,n-1}} - (c_n - c_{n-1})x \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、cは定数で、添字のiは原料、nは篩の段数を示す。

(6) 篩層効果²⁰⁾

Fig.16に示すように、表層における偏析過程は、偏析成分が流下層内を通過分離し静止傾斜面に到達したのち骨格粒子層に引きずられて流下し、その際小粒子なら静止堆積層に充填されると考えることができる。これに基づき、流下層上部の残留層、中間の偏析層、下部の分離層、および底部の静止層の各領域における物質収支は、それぞれEqs.(7)-(10)により記述できる。その結果、粒度、密度、形状などの粒子物性の異なる偏析は統一的に扱え、偏析成分領域が粒子物性や容器寸法および供給速度などの操作条件の関数として表現できる。

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = -\frac{\partial (h_r v_r)}{\partial x} + \frac{Q \cdot \cos I}{(1-e_r)} \cdot \frac{1-M_i}{M_i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial h_{rs}}{\partial t} = -\frac{\partial (h_{rs} v_r)}{\partial x} - \frac{Q \cdot \cos I}{M_j (1-e_{rs})} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = -\frac{\partial (h_s v_s)}{\partial x} + \frac{Q-P}{1-e_s} \cos I \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial h_{sp}}{\partial t} = -\frac{P \cdot \cos I}{1-e_s} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、eは各領域層の空隙率であり、hはそれらの厚さで、流下速度vと共に傾斜面に沿って変化し、それは偏析成分の分離速度Qや充填速度Pおよび安息角Iなどの粉体物性および初期混合比率M_iや供給速度などの操作条件により左右される。この現象は、流下層により一静止層が形成されるまでは非定常現象であるが、その後は同様の分離・充填過程が繰り返される。類似のモデルがいくつか考えられるか²¹⁾、こ

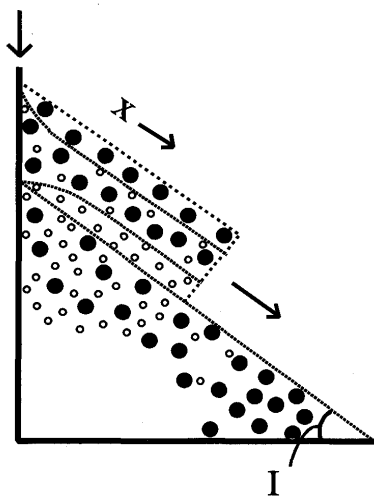


Fig. 16. Screening layer model over inclined heap surface.

れが容器内の堆積層について物性によらず偏析模様を描ける唯一のモデルであり、下記の層内偏析過程と同様の偏析成分粒子の透過機構を含んでいる。

4・2 層内偏析

(1) 拡散効果²²⁾

粒度偏析において小粒子が供給点付近に集まるのを、Fig.17に示すように、粒子層の変形や流動により大粒子間隙を通過する小粒子の半径方向の見かけの拡散現象としても、Eq.(11)により定性的に説明できる。すなわち、全小粒子数をN₀とするとある時間tに半径r_d内にある小粒子の数Nはr_dとともに増大するが、単位断面積当たりの小粒子数は次第に減少する。E_rは半径方向の見かけの拡散係数である。

$$\frac{r_d}{4E_r t} = \ln \frac{N_0}{N_0 - N} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(2) 浸透効果²³⁾²⁴⁾

Fig.18に示すように、大粒子のような骨格粒子d_rの間隙e_rをあたかもホッパー流出口d₀の集合として小粒子などの偏析成分が浸透することにより分離が生じ、その量を流量の和として見積れる。すなわち、単位断面積当たりの浸透量Qは、流出口数と単一口の流量の積として次式で表現できる。

$$Q = \frac{C_1 (D - d_0)^P \times C_2 (1 - e_r)}{\left(\frac{3 \cdot 14 d_r^2}{6} \right)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

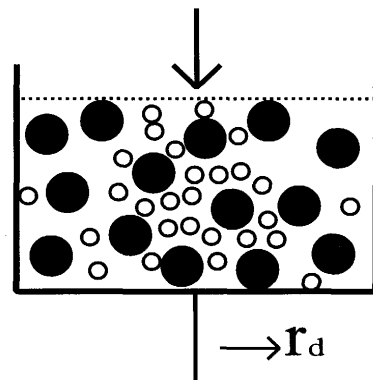


Fig. 17. Diffusion model through a packed bed.

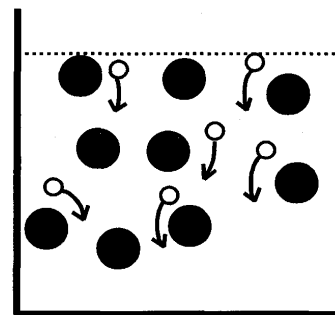


Fig. 18. Penetration model through a flowing layer.

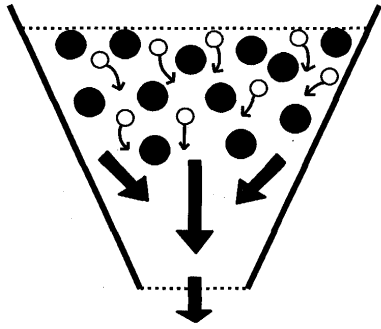


Fig. 19. Penetration model during mass-flow.

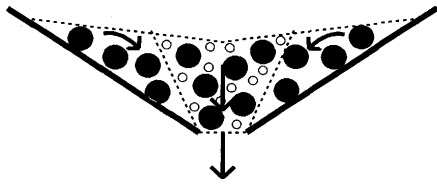


Fig. 20. Convection model during funnel-flow.

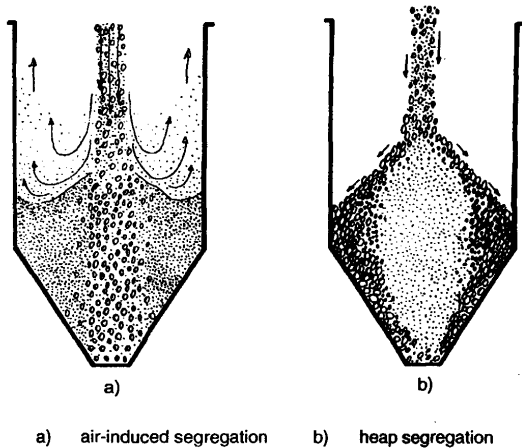


Fig. 21. Actual segregation during filling of silos.

(3) 速度分布効果²⁵⁾

Fig.19に示すように、一様降下を示すマスフローホッパーでは、単に浸透効果で分離現象を説明できるが実際には半径方向で流下速度分布を生じ対流効果がある。移動層内に不動域や大きな速度分布を持つファネルフローホッパーでは、Fig.20のように中央の流動域が最初に流出し、後で壁面付近の粒子が流出する。そのため、偏析成分の対流現象ないしは排出順序により流出時の偏析模様が大きく左右される。さらに、微粉を容器に供給するときは、Fig.21(a)に示すように、粉体が押しのけた空気の流に同伴して小粒子や軽い扁平な粒子は壁面に達し蓄積する。その結果、Fig. 21(b)に示すような発生空気流の無視できる粗粒の充填時とは逆の模様になる。

4・3 組み合わせ偏析

実際の移動層内では、上部からの混合粒子供給と下部か

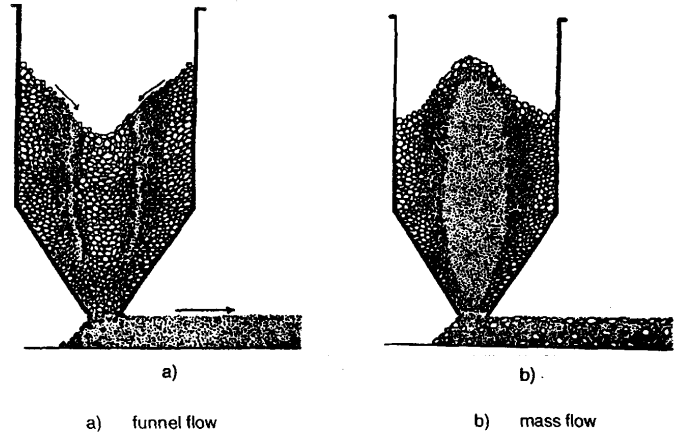


Fig. 22. Segregation in emptying a silo after filling.

らの粒子排出が同時に行われるため、充填時と排出時の偏析特性が組み合わされて偏析模様を生じる。したがって、ファネルフローによる半連続的操作では前述のごとくFig. 22(a)のように中央供給により形成された中央部の小粒子等の偏析成分が最初に流出し、その後、壁面付近に完全に分離した大粒子等の骨格成分が流出する。そのため、表層の偏析の結果が層内偏析によって増幅される可能性もある。

5. 偏析模様

偏析現象については、これまで数多くの定性的な関係が報告されているが、定量的把握に関する検討はほとんどなされていない。しかし、工学的観点からは粒子物性、容器の寸法および操作条件により記述される必要がある。その結果、着目成分の混合率の位置あるいは時間による変化として、偏析模様を描くことができる。

5・1 排出時模様

分離して堆積した二成分粒子は、前述の拡散ないしは浸透効果により、マスフローホッパーでは排出時に混合する²³⁾²⁶⁾。混合粒子は、同じ機構で分離する。また、ファネルフロー

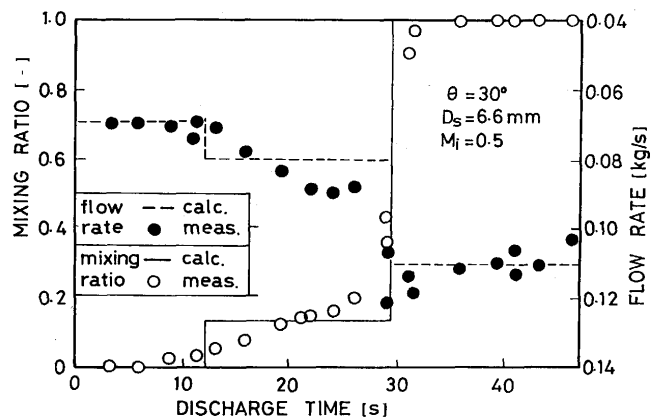


Fig. 23. Segregation pattern during emptying a mass-flow hopper²³⁾.

ホッパーでは、対流機構で主に混合し、かつ偏析する。両ホッパーからの粉粒体混合物の排出時偏析模様は、Fig.23²²⁾のように混合率と流量の経時変化として描かれる。ただし、 θ は頂角で、 D_s は二次元ホッパーの流出口のスリット幅である。

5・2 充填時模様

傾斜堆積面(全長L)に沿って流下中に起きる偏析は、Fig. 24²⁷⁾²⁸⁾のように供給点からの距離による偏析成分の混合率変化曲線として表現される。小粒子や重粒子、角粒子などの偏析成分は、中央の供給点付近に集まり、偏析曲線の変曲点を結ぶと堆積層内にV型の偏析領域を形成する。その領域は、初期混合率 M_i および供給速度Fの増加と共に増大する。ただし、図中のQ, R, Pは、それぞれ偏析成分粒子の浸透速度、相対速度および充填速度である。また、高炉の炉芯部のように静止堆積面(炉芯の降下速度 $V_d=0$)に多点供給される時は、Fig.25のように偏析成分の含まれる領域は斜面の中間部に存在し、混合率のピークが初期混合率とともに増大する³⁾。ただし、混合率は堆積表面($y=0$)から深さ $y=$

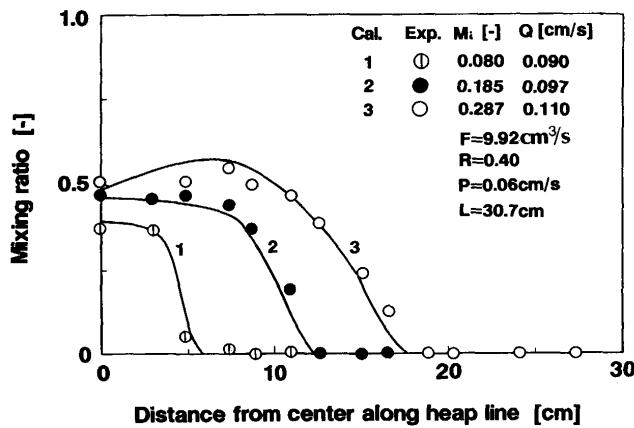


Fig. 24. Segregation pattern after filling a conical hopper²⁷⁾.

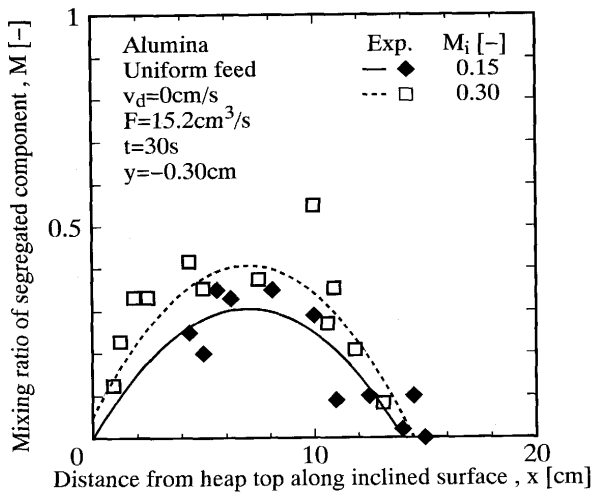


Fig. 25. Segregation pattern over a dead man in a blast furnace³⁾.

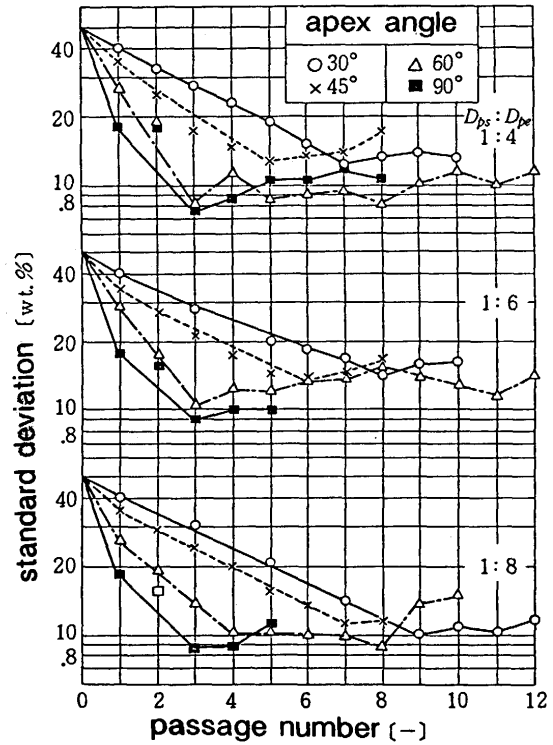


Fig. 26. Segregation and mixing by combination of funnel-flow hoppers²⁹⁾.

-0.30の所の値である。

5・3 組み合わせ模様

ファネルフローの容器では、Fig.22(a)に示すように、大、小粒子(粒子径はそれぞれ D_{p1} , D_{p2})の混合物では、充填時の偏析模様が排出時の特異な流動模様により強調され、更にFig.26に示すように多段の容器を組み合わせることによって分離現象が逆に混合作用のため緩和される²⁹⁾。ただし、縦軸はホッパーからの排出混合物中の大粒子の重量比率と初期混合率50%との標準偏差である。

6. 偏析軽減対策

粉粒体混合物を取り扱い動かす以上、偏析を完全に防止することは、大抵の場合不可能であるが、これまで述べた偏析機構の原理に基づき、適当な方法で受け入れることができる程度に軽減することは可能である³⁰⁾。すなわち、大原則は、粒子物性を偏析が避けられるように変えることであり、もう一つは装置やプロセスを偏析が最小になるように設計・選択することであり、さらに最適な操作条件で運転することである。大抵の場合、後者の二つを選択しやすいが、最初の方法もプロセスを展開する初期の段階では特別有利なこともある。偏析は実に多くの環境で起きるから、全ての場合を含むわけにはいかないが、もっとも重要な機構と思われることだけをここでは扱うことにする。

6・1 粒子物性の変更

全ての粒子を同じに作れば偏析は起きないが、それは無

理なので、いくつかの方法で粒子物性の違いをかなり減ずることができる。

(1)粗い粒子と細かい粒子があれば、粗い方を砕いて細かくして揃えたり、水分を加えて細かい粒子を粗い方にくっつける。これは、粒子の運動により発生した空気の流れに同伴することによる偏析を効果的に避けれるが、透過による表層偏析や層内偏析も低減することができるであろう。しかしながら、粉碎や加湿には重大な副作用があり、共に粒子の凝集性を増大することになる。そのため、偏析は解決しても流動性の問題が起こり、この種の反動を避ける注意が必要になる。

(2)一方、造粒は、流動と偏析問題を両方とも解決する別の方法である。もし造粒によって単一粒度の造粒物に変えることができれば、粒度および形状の点から偏析もしないし、原料の粉体より容易に流動するであろう。すなわち、造粒は粒度偏析だけでなく密度偏析や形状偏析を避けるのにも役立つ。

(3)混合と造粒を一つのプロセスに結び付けると、個々の造粒物が全ての成分を持ち合わせた良質な混合物になり、偏析を避ける極めて効果的な方法になる。加えるに、造粒物が単一粒径で同一形状、同一密度にできれば、偏析問題は全て避けられることになる。

6・2 装置の改良

大抵の場合、装置やプロセスは既存であり偏析が最小になるように合わせなければならない。したがって、解決法は実際の状況に大いに依存する。

(1)ファネルフローホッパーだけでなく、マスフローホッパーでも、多かれ少なかれ、流出口上の速度が速くなるから、適当な挿入物や仕切板を流出口上や貯槽内に設置することにより、フローパターンをマスフローに近づけ、偏析を低減させることも可能である。

(2)頂角の小さなマスフローホッパーを使えば、充填時に偏析が起きても、Fig.22(b)に示すように、分離した両成分が流出口で見かけ上再び混合するので、層内偏析は変化がないが表層偏析が改善される。

(3)傾斜堆積面の形成が避けられない時は、次善の策として、供給時の流下距離を短くするために、小さな堆積物

にする。仕切板を入れたり、頂角の小さな容器を束ねて所要体積を満たすのも良い。

(4)ベルトコンベアやシュートなどで生じた上層部の大粒子と下層部の小粒子分離は、Fig.27に示すように流出口からある距離離れた所に垂直板を設置することによりほぼ等距離に跳ね返り偏析が軽減できる。

6・3 操作の改善

(1)粉粒体試料は通常与えられるが、もし偏析成分の初期混合比が変えられるなら、混合率の高いほど偏析領域は拡がり充填時偏析は低下する。

(2)供給流量を大きくして流下層厚を厚くし偏析成分が抜け出る時間を長くするのは、実際に役立つ。

(3)表層偏析は堆積物の傾斜面で起きるので、水平方向に一樣な供給をして、堆積物の山を形成しないようにするのが、根本的対策である。同様の原理から、高炉などで採用されている分離層を交互に重ね合わせる充填方法も有効である。

(4)偏析は、粒子混合物が動く度に起きるのだから、できるだけ取り扱い操作の数を減らすことである。混合物は必要な所で調製するのがよい。

(5)浸透による偏析は避けられないので、特に振動は禁物であるから、容器に詰めて輸送時には振動をできるだけ避け、粉粒体に圧力をかけてできるだけ密な状態を保つようにする。

(6)空気による同伴偏析を避けるには、自由落下距離を短くし空気流れによって小粒子が分離されるのを避け、空気の停滞域をできるだけ形成しないようにする。

7. 結言

一般に、粉粒体は多成分であるから、種々の場での動的取り扱いにより、成分が分離するのは避けられない。そのため生じる層内の充填むらや速度分布により、種々の好ましからざる現象を呈する。特に、大型の貯蔵、反応・接触装置では、操作が加わると共に不均一さが強調される可能性がある。例えば、熱操作では、偏析により粒度の異なる領域で見かけの伝熱係数が異なるばかりでなく、気流の吹き込みを行うと充填率の低い所を反応気体が偏流し温度分布が顕著になる恐れがある。従って、上述の如き偏析の基本機構に基づき、堆積層の偏析模様を定量的に記述することによって、層内の移動現象や粉粒体操作時の偏析特性を利用したり、避けたりする工夫が可能になる。

文 献

- 1) S.Miwa : Note Res. Assoc. Powder Technol. Jpn., 26 (1960), p.1
- 2) J.F.Van Denburg and W.C.Bauer : Chem. Eng., 9 (1964), p.135
- 3) K.Shinohara and J.Saitoh : ISIJ Int., 33 (1993), p.672
- 4) J.R.Johanson : Chem. Eng., 5 (1978), p.183

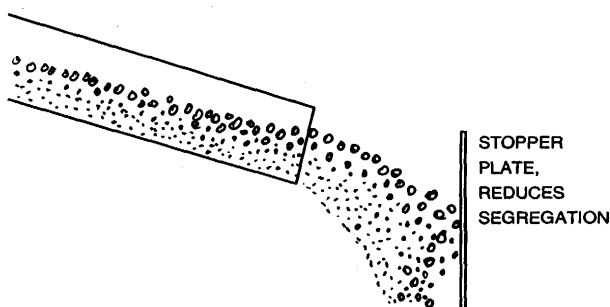


Fig. 27. Reduction of segregation on belt conveyors and chutes.

- 5) K.Shinohara : Powder Technol., **48** (1986), p.151
- 6) J.Bridgwater, H.H.Cook and J.A.Drahun : I. Chem. Eng. Symp. Ser., **69** (1983), p.171
- 7) M.Sugimoto, K.Endoh and T.Tanaka : Kagaku Kogaku, **30** (1966), p.427
- 8) M.Sugimoto and K.Yamamoto : Kagaku Kogaku Ronbunshu, **5** (1979), p.335
- 9) K.Yamaguchi : Powder Technol. Jpn., **14** (1977), p.520
- 10) T.Hayashi, M.Sasano, Y.Tsutsumi, K.Kawakita and C.Ikeda : J. Soc. Mater. Sci., **19** (1970), p.574
- 11) J.C.Williams and G.Shields : Powder Technol., **1** (1967), p.134
- 12) K.Shinohara : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **14** (1975), p.8
- 13) P.N.Rowe and A.W.Nienow : Powder Technol., **15** (1976), p.141
- 14) O.Uemaki, R.Yamada and M.Kugo : Can. J. Chem. Eng., **61** (1983), p.303
- 15) M.H.Cooke, D.J.Stephens and J.Bridgwater : Powder Technol., **15** (1976), p.1
- 16) J.C.Williams : Powder Technol., **15** (1976), p.245
- 17) H.Matthee : Powder Technol., **1** (1967/68), p.265
- 18) S.Miwa : Funryutai Kogaku, Asakura Shoten (1972), p.221
- 19) T.Tanaka : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **10** (1971), p.332
- 20) K.Shinohara and S.Miyata : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **23** (1984), p.423
- 21) K.Shinohara : Aufbereitungs Tech., **3** (1985), p.116
- 22) J.Bridgwater, N.W.Sharpe and D.C.Stocker : Trans. Instn. Chem. Engrs., **47** (1969), p.T114
- 23) K.Shinohara, K.Shoji and T.Tanaka : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **9** (1970), p.174
- 24) K.Shinohara : Aufbereitungs Tech., **31** (1990), p.482
- 25) H.Takahashi and K.Shinohara : J. Soc. Powder Technol. Japan, **22** (1985), p.701
- 26) P.Arteaga and U.Tuzun : Chem. Eng. Sci., **45** (1990), p.205
- 27) K.Shinohara, K.Shoji and T.Tanaka : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **11** (1972), p.369
- 28) K.Shinohara : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **18** (1979), p.223
- 29) S.Kawai : Bull. Fac. Eng. Kanazawa Univ., **2** (1959), p.187
- 30) H.M.Peacock : J. Inst. Fuel, **11** (1938), p.230