液中分散粒子の沈降界面形成過程の解析

Analysis of Settling Interface Formation Process in Suspension

杉本 理充, 廣瀬 仁嗣, 森 英利, 椿 淳一郎

Tadamitsu Sugimoto, Hitoshi Hirose, Hidetoshi Mori, Junichiro Tsubaki

The present paper deals with the formation process of settling interface. Settling experiments and settling simulations showed that the settling interface is caused by the horizontal percolation of settling particles. In the case of low solid content, dispersed particles and/or agglomerates repeat collisions in the initial stage of settling, and form a settling interface. In the case of high solid content, particles form a network structure immediately after the settling starts, causing the zone settling.

Key Words : Settling interface, Particle percolation, Slurry, Particle sedimentation

1. 緒 言

固液系スラリーの濃縮過程は、ファインセラミックス成形プロセスや污水浄化システムなど様々な工業プロセスに含まれている。製品のさらなる高機能化および分離の高度化が要求される現在、対象となる粒子の大きさはますます小さくなり、粒子挙動は複雑なものになってきている。粒子の沈降挙動は、沈降中の粒子の集合状態と密接な関係がある。沈降中の粒子の集合状態は、粒子特性やスラリー調製条件に支配される。粒子の沈降挙動は、堆積層の構造に影響を及ぼすが、沈降中の粒子の集合状態が十分に把握されていないことも原因となって、固液系スラリーの調製は、技術者の試行錯誤で行われていることが多い。

そこで本研究では、液中に分散した粒子が連続体化するまでに関し、粒子径分布、初期粒子濃度および付着性が沈降挙動に及ぼす影響を把握することを試みている。従来のシミュレーションは、粒子あるいはあらかじめブラウン運動により生成した凝集体を、個々に沈降場上部のランダムな位置より順次沈降させて充填層を構成する方法を用い、充填層構造に及ぼす粒子径分布および粒子同士の付着性の影響について考察された¹⁻⁵⁾。しかしながら、この方法では沈降途中におけ

る粒子の沈降挙動や集合状態を把握することは困難である。そこで、本研究では、沈降場中に粒子を必要な数発生させ、一斉に沈降させるシミュレーションを使用した。現在まで、単分散で高分子添加剤による架橋凝集を考慮したシミュレーション⁶⁾および、大小2粒子を用いた沈降シミュレーション⁷⁾を行った。これらの結果より、沈降速度差により生ずる沈降途中での粒子同士の衝突・凝集が、沈降挙動に影響を及ぼし、連続体の構造や充填率に影響を及ぼすことが示された。

いままでの固液分離の研究では、いかに効率良く液体を得るかに重点をおいていたため、沈降する粒子の挙動は、マクロな沈降様式で分類されているに過ぎない⁸⁾。沈降様式の分類は、初期粒子濃度と付着性の関係より定性的に行われている。また、観測された沈降様式および観測された沈降界面の沈降速度より、沈降中の粒子の状態の予測を試みているが⁹⁾、沈降様式の違いが発生する機構や沈降界面の形成機構に関しては検討されていない。

そこで本報では、沈降界面の形成過程に着目し、粒子の粒径比や組成比、および初期粒子濃度が及ぼす影響を把握することを目的とし、沈降実験および沈降シミュレーションにより検討を行った。

2. 実験およびシミュレーション方法

2.1 沈降実験

固液分離の研究では、沈降様式の違いを初期粒子濃度と粒子同士の付着性との関係で整理しているため⁸⁾、あらためて、確認のための沈降実験を行った。

2000年8月31日受付
第36回夏期シンポジウム(2000年7月、葉山)にて発表
名古屋大学工学研究科物質制御工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) TEL 052-789-2574
Department of Molecular Design and Engineering,
University of Nagoya
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603)

Table 1 Simulation condition of binary dispersion

d_{pL}/d_{pS}	$f_L:f_S$	Solids content (area %)				
		0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
1.4	2:8	○	○	○	—	—
1.4	8:2	○	○	○	—	—
2.0	2:8	○	○	○	—	—
2.0	8:2	○	○	○	○	○

粒子同士の付着性を変化させるため、凝集剤を使用して調製した粒子径 $5.5\mu\text{m}$ および $3.0\mu\text{m}$ のアルミナ研磨剤 (WA2500, WA4000 フジインコーポレーテッド(株)製) を体積割合 4:6 で混合し、超音波浴槽で 5 分間分散操作を行い、スラリーを作製した。初期粒子濃度は 5, 7, 10, 14, 20, 40vol% とし、凝集剤にはカリウムミョウバン (キシダ化学(株)製) を使用し、添加量は 0, 5, 10, 25, 50mg/100g-alumina とした。

沈降実験では、内径 20mm、高さ 160mm のアクリル製円筒を使用し、スラリーの仕込み高さを 150mm とし、媒液とスラリーとの沈降界面形成の有無を観察した。沈降界面の形成が観測された場合、沈降界面の深さの経時変化を観測した。

2.2 シミュレーション

本シミュレーションは、沈降途中の粒子同士が衝突・凝集を繰り返すことにより、凝集体が成長し、沈降界面を形成する過程を模擬するため、衝突を起こすためのパラメータとして粒子径分布、粒子同士の衝突頻度を表すパラメータとして初期粒子濃度、そして、凝集体の作りやすさを表すパラメータとして付着性を用いた。本報では、粒子径分布に関しては、もっとも単純な場合である大小 2 粒子の粒径比および組成比を変化させ、付着性に関しては、粒子同士が衝突した場合必ず凝集し、凝集体は衝突時の形状を保ちながら沈降するとして取り扱った。また、シミュレーションでは、簡単化のために、沈降中の粒子は回転やブラウン運動をしないと仮定した。

シミュレーションは、2 次元で行った。小粒子の粒子径 d_{pS} を基準にし、大粒子を $d_{pL}/d_{pS}=1.4$ および 2.0、沈降場の鉛直方向長さを $10,000d_{pS}$ 、水平方向長さを $500d_{pS}$ とした。沈降場中に大小 2 粒子の粒径比や組成比および初期粒子濃度を変化させ、アルミナ粒子を水媒体中で重力沈降させた場合を想定して行った。全ての粒子は同一平面上にあり、濃度および組成比は、沈降平面と粒子の断面積の比で取り扱った。沈降場側面には、周期境界条件を適用した。Table 1 の

Fig. 1 Schematic diagram for simulating settling interface formation process

○印で示した条件でシミュレーションを行った。

粒子の沈降は、Stokes の沈降速度式に従うとし、粒子同士が完全に接触して凝集体を形成した場合は、凝集体を構成する全粒子の球体積相当径に換算し、沈降速度を求めた。小粒子 1 個の沈降速度 v_{IS} を基準とし、粒子径 d_{pL} および d_{pS} の大小粒子が、それぞれ m および n 個で構成される凝集体の沈降速度を便宜的に

$$v_{m,n} = \frac{(m \cdot d_{pL}^3 + n \cdot d_{pS}^3)^{\frac{2}{3}}}{d_{pS}^2} v_{IS} \quad (1)$$

と表わした。

シミュレーションでは、Fig. 1 に示すように、まず、乱数により粒子座標を設定し、各粒子が接触せず、重ならないように所定の初期粒子濃度 ϕ_0 (area %) になるまで、沈降場中に発生させる。次に沈降速度の最も速い粒子あるいは凝集体を検索し、設定した最大沈降距離 ($=0.5d_{pS}$) をその速度で割り、時間を求め沈降させる。その際、粒子同士が重なったものが

ある場合は、それら粒子が衝突する時間を求め、この時間で沈降し直し、接触・凝集判定を行い、全粒子が沈降を終えるまで繰り返した⁷⁾。

3. 結果および考察

3.1 沈降実験

Fig. 2は、沈降界面形成の有無を示す。この図では、‘○’はスラリー層と清澄層との明確な沈降界面が観測された場合である界面沈降、‘◇’はスラリー層中に濃淡による沈降界面が観測された場合である成相沈降、‘△’は明確な沈降界面が観測されなかった場合、‘×’は流動化しなかったためスラリーとして調製できなかった場合を示す。また、‘□’は、沈降開始時では成相沈降のように挙動するが、数cm沈降した後に沈降界面が明確になり、更に沈降した後上部の懸濁層が沈降界面に追いつき、界面沈降と同様な沈降挙動を示した場合である。この図から、一般的な沈降様式の違いが確かめられた。

そこで、沈降界面が観測された条件のうち、付着性が強いと思われ、粒子濃度により全ての沈降挙動が観測された、凝集剤添加量 50mg/100g-alumina の場合に着目し、粒子濃度 10vol.% 付近での沈降様式の違いについて検討を行った。

3.2 シミュレーション

沈降挙動を検討するために、微粒子の集合状態として、粒子濃度比 ϕ/ϕ_0 、配位数 k および分散指数 a の適用を試みた¹⁰⁾。粒子濃度比 ϕ/ϕ_0 は、初期仕込み濃度に対する比、配位数 k は接触点数の2倍を1次粒子数で割った値、分散指数 a は次式のように与えた。

$$a = \frac{n-1}{N} \quad (2)$$

ここで、 N は1次粒子数、 n は凝集体を一つの粒子とみなした場合の粒子個数で、全ての粒子が一つの凝集体となり、連続体を形成した時点で $a=0$ となる。

また、同一条件で比較を行うため、Fig. 3に示す単位深さを定義した。ここでは、水平方向への粒子のパコーレーションが沈降界面を形成すると考え、以下のように単位深さを考えた。まず、Fig. 3 (a) に示したように2次元の場合は、粒子がパコーレーションするためには、幾何学的に粒子の投影長さの総和が沈降場の幅と一致する必要がある。その条件が満たされる深さを H'_u とし、次のように導いた。まず、沈降場の任意の位置に存在し、沈降場の幅に等しい長さをもつ

Fig. 2 Dependency of amount of flocculant and initial solids content on the settling process : ○ is zone settling, □ is phase subsidence to zone settling, ◇ is phase subsidence, △ is free settling and × is not able to prepare as slurry

Fig. 3 Estimation model of unit height, H_u , and unit time, T_u

水平線分 L 上に粒子径 d_p の n 個の粒子を投影した場合を考える。線分 L 上にある微小長さ dl の範囲に存在する粒子が形成する投影長さ dL_d は、

$$dL_d = n \cdot d_p \frac{dl}{L} \quad (3)$$

となる。ここで、 i 成分の粒子の粒子径を d_{pi} 、濃度を ϕ_i としたときの粒子個数 n_i は、

$$n_i = \frac{\phi_i \frac{\pi}{4} d_{pi}^2}{L \cdot H}$$

より

$$n_i = \frac{4\phi_i L \cdot H}{\pi d_{pi}^2} \quad (4)$$

(a) Effect of solids content
($d_{pL}/d_{ps}=2.0, f_L:f_S=8:2$)

(b) Effect of particle diameter
fraction and solid fraction
($\phi_0=0.5$ area %)

Fig. 4 Time change in characteristic values of a, k and ϕ/ϕ_0
in the range $1.0 \leq H/H_u \leq 2.0$

となる。Eqs. (3), (4) より期待長さ L_d は、

$$\begin{aligned} \int_0^{L_d} dL_d &= \int_0^L \sum_i \frac{4\phi_i L \cdot H}{\pi d_{pi}^2} d_{pi} \frac{dl}{L} \\ L_d &= \frac{4H}{\pi} \sum_i \frac{\phi_i}{d_{pi}} \int_0^L dl \\ &= \frac{4H}{\pi} \sum_i \frac{\phi_i}{d_{pi}} L \end{aligned} \quad (5)$$

と導かれ、粒子の投影長さ $L_d=L$ のとき、 $H=H'_u$ と定義したことにより

$$H'_u = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\sum_i \frac{\phi_i}{d_{pi}}} \quad (6)$$

となる。大小2粒子の場合、Fig. 3-(b) で示すように、深さ H'_u の上部にある速度 v_L の大粒子が、深さ H'_u の下部にある速度 v_S の小粒子に衝突するまでには、深さ H_u および時間 T_u を必要とするので、次式

で与えられる H_u, T_u をそれぞれ単位深さ、単位時間と定義した。

$$H_u = v_L T_u = H'_u + v_S T_u \quad (7)$$

比較区間は、Fig. 3-(c) で示すように沈降場上部より H_u で分割し、比較は沈降場上部より数えて同じ区間同士で行った。

Fig. 4 は、微粒子の集合状態を表す3パラメータの経時変化の1例を示す。この図は、上から2番目の区間の結果であり、(a) は粒径比 $d_{pL}/d_{ps}=2.0$ 、組成比 $f_L:f_S=8:2$ における粒子濃度が変化した場合、(b) は初期濃度 $\phi_0=0.5$ area % における粒径比および組成比が変化した場合である。

Fig. 4-(a) および (b) とともに、 $t/T_u \leq 1.0$ では、 a が減少し、 k が増加することより、粒子同士が衝突し凝集することを示す。また、 ϕ/ϕ_0 が増加または変化しないことから、上部の区間から粒子や凝集体が供給されていることを示す。 $1.0 < t/T_u \leq 2.0$ では、 a が

Fig. 5 Simulation result for the formation process of the settling interface

増加し、 k が減少したことから、凝集体が減少したことを示す。また、 ϕ/ϕ_0 が減少したことより、粒子や凝集体が下部の区間へ排出されていることを示す。 $t/T_u > 2.0$ における $a=1.0$ かつ $\phi/\phi_0 \neq 0$ の範囲は、衝突に関与しなかった小粒子の自由沈降を示す。この沈降挙動が大きく変化する t/T_u の値は、比較区間に依存する。この場合、比較区間が上から2番目であるため、 $t/T_u=2.0$ を境に粒子挙動が大きく変化した。

Fig. 4-(a) より、すべての曲線がほぼ一致していることから、濃度の影響がなく、同一沈降挙動であることがわかった。これは、単位深さ H_u で分割した区間を考えることより、濃度が変化しても、 H_u および T_u 単位で粒子状態や沈降挙動に相似性があることを示している。

Fig. 4-(b) では、組成比および粒径比の影響が見られた。組成比に関しては、大小粒子の個数比すなわち、 $f_L:f_S=2:8$ では、 $d_{pL}/d_{pS}=2.0$ の場合の個数比 $f_{NL}/f_{NS}=0.06$ 、 $d_{pL}/d_{pS}=1.4$ の場合の個数比 $f_{NL}/f_{NS}=0.13$ と大粒子が小粒子に比べ粒子個数が非常に少なく、 $f_L:f_S=8:2$ では、 $d_{pL}/d_{pS}=2.0$ の場合の個数比 $f_{NL}/f_{NS}=1.0$ 、 $d_{pL}/d_{pS}=1.4$ の場合の個数比 $f_{NL}/f_{NS}=2.0$ と、大粒子と小粒子の粒子個数が等しいか大粒子の粒子個数が多いことが影響していると考えられる。まず、 ϕ/ϕ_0 に関しては、 $f_L:f_S=2:8$ では大粒子によってトラップされる小粒子が少ないために、上部の区間にも未凝集の小粒子が多く残っており、大粒子や凝集体は小粒子よりも短い時間で下部の区間へ排出され、いったん値は減少するが、未凝集の小粒子が上部の区間から供給されるため、 $t/T_u=1.5$ 付近から、値が一定あるいは増加する傾向を示した。これに対し、 $f_L:f_S=8:2$ では、大粒子によってほぼ総ての小粒子がトラップされるため、上部の区間にも未凝集の小粒子がほとんど残っておらず、大粒子や凝

集体の下部の区間への排出量が小粒子の上の区間からの供給量より上回っていることから、値が減少する傾向を示した。また、同一粒径比で組成比が a および k に及ぼす影響を見てみると、 $f_L:f_S=8:2$ では、大粒子の個数が小粒子の個数と等しいあるいは多いことから、未凝集の1次粒子が減るため、 a の値は小さく、 k の値は大きくなった。さらに、同一組成比で粒径比が a および k に及ぼす影響を見てみると、粒径比が大きいほど衝突頻度が大きくなるため、 a の値は小さく、 k の値は大きくなった。

他の区間においても、同一粒径比および組成比の場合では、粒子濃度によらず同一の粒子集合状態を得られたため、粒子が完全に分散し、衝突した粒子同士は必ず凝集する場合には、粒子濃度によらず H_u および T_u により沈降挙動を整理可能であることが示された。

また、シミュレーションでは 10area % の場合のみ沈降途中で、粒子の水平方向へのパーコレーションが観測された。形成過程を Fig. 5 に示す。時間は、 $1\mu\text{m}$ のアルミナ粒子が水中を沈降すると想定した場合の値である。重力方向の座標のみ $1/10$ に縮小した。粒子の色が薄いものは1次粒子、中間のものは凝集体、濃いものは堆積層を示す。図より沈降中の粒子が衝突・凝集を繰り返し、凝集体が成長し、パーコレーションする過程が模擬された。

この結果より、パーコレーションした位置は、 $236 H_u$ であった。この結果と実験結果との比較を試みた。

3. 3 沈降界面形成過程

沈降実験結果を2次元のシミュレーション結果と比較するため、3次元の場合の単位深さ H_u および単位時間 T_u を求めた。ここでは、3次元の沈降界面は、沈降場断面の全てを覆うような粒子の水平方向への

Fig. 6 Simulated solids content distribution

Table 2 Relation of solids content to unit height, H_u

ϕ_0 (vol. %)	H_u (μm)	$236H_u$ (mm)
5.0	70	16.5
7.0	50	11.8
10.0	35	8.3
14.0	25	5.9
20.0	17	4.0

パーコレーションにより形成すると考えた。3次元の場合、沈降断面の全てを覆うように粒子がパーコレーションをするためには、幾何学的に粒子の投影面積の総和が沈降場の断面積と一致する必要がある。その条件を満たす深さを H'_u とし、2次元と同様の方法より、

$$H'_u = \frac{2}{3} \frac{1}{\sum \frac{\phi_i}{d_{pi}}} \quad (8)$$

と導かれた。ここでは、粒子の沈降速度には、Steinour 式による沈降速度を用い、各粒子の沈降速度、粒子径および濃度を Eqs. (8), (7) に代入し、実験結果の H_u および T_u を求めた。Table 2 に H_u の値を示す。また、2次元のシミュレーション結果から得られた粒子のパーコレーションが観測された位置である $236H_u$ の値も示す。パーコレーションが観測される $236H_u$ の値と Fig. 2 の沈降挙動とを比較すると、粒子濃度 5, 7vol.% では、数 cm 沈降した後に明確な沈降界面を形成したことから実験結果と本シミュレーション結果とが定性的に合っていると考えられる。このことから粒子濃度が違う場合においても、投影面への粒子の投影状態が同じ場合では、粒子の沈降挙動が等しくなることが示唆される。したがって、粒子濃度

が低い場合、高い場合と比べ粒子の投影状態が等しくなるまでの距離は、長くなることから、粒子濃度が低く、明確な沈降界面が観測されない場合は、沈降場の長さが沈降界面形成を示す投影状態の長さに達していない。このことから、粒子濃度が低い場合でも、沈降場の長さを十分長くすることにより、沈降界面を形成することが示唆される。これに対し、10vol.% 以上では、1mm も沈降しないうちに沈降界面の形成を観測したため、本シミュレーションとは異なる界面形成機構であることが考えられる。

粒子濃度 5, 7vol.% の場合では、沈降初期には明確な沈降界面は観測されず、時間とともに沈降界面が明確になってきたことから、シミュレーションにおいても同様な傾向を示すか否かを確認するため、Fig. 5 の濃度分布を求め、Fig. 6 に示す。図より、沈降界面の濃度が一番高く、沈降界面の直上部分では濃度が低く、沈降場上部に近づくにつれ濃度が増加し、また、沈降界面より下の領域において、堆積層付近まで徐々に濃度が低下している。沈降界面が時間とともに明確になることを本シミュレーションで模擬できたと考えられる。しかしながら、数%以上のスラリー濃度で光の透過率が 0 に近づき、数%以上の濃度の違いを観測することは困難であるため、実験結果との対応は難しい。また、実際の沈降では、スラリーの密度分布や置換流の影響によりスラリーが対流し、スラリーの濃度が一樣になるように作用すると考えられる。本シミュレーションをこのような液体の流れの影響を考慮したものに改善したならば、実験で観測されたような濃度分布により近づくと期待される。

粒子濃度 10vol.% 以上の場合では、高濃度になるにつれ粒子間距離が小さくなり、粒子同士の相互作用による引力が働きやすくなる。そのため、凝集しやすくなり、沈降の初期段階で連続体化したと推測され

る。このような完全に粒子同士が接触しなくても凝集する挙動は、高分子添加剤による架橋凝集の影響を考慮したシミュレーションで行われた⁶⁾。架橋凝集モデルのシミュレーションでは、沈降直後に初期粒子濃度を保ったまま連続体化する結果が示されたことから、この実験の挙動と合っていることがわかった。今後は、本シミュレーションに粒子間ポテンシャルの影響を考慮し、架橋凝集距離が及ぼす沈降挙動への影響に関して解析を行う予定である。

4. 結 言

大小2粒子系混合スラリーにおける沈降実験および沈降シミュレーションより以下のことが明らかとなった。

1. 粒子の衝突挙動より定義した単位深さ H_u および単位時間 T_u により、シミュレーションによる粒子の集合状態を濃度によらず整理することができた。
2. 粒子濃度が 10vol.% 未満の場合では、分散粒子が沈降過程において衝突し凝集体を形成し、凝集体の成長により粒子がパーコレートし、沈降界面を形成することが示唆された。
3. 1., 2. より、粒子濃度を低下させても、沈降場の長さを十分長くすることにより、沈降界面を形成することが示唆される。
4. 粒子濃度が 10vol.% 以上の場合では、低い場合と異なり、沈降直後に連続体化することにより沈降界面を形成することがわかった。

Nomenclature

a : dispersion index	(-)	H_u : unit height	(m)
d_{pi} : particle diameter of i th particle	(m)	k : coordination number	(-)
d_{pl} : diameter of large particle	(m)	m : number of agglomerate-construction large particles	(-)
d_{ps} : diameter of small particle	(m)	n : number of agglomerate-construction small particles	(-)
f_L : solid fraction of larger particles in binary dispersion (area fraction in 2-dimension, volume fraction in 3-dimension)	(-)	T_u : unit time	(s)
f_{NL} : number fraction of larger particles in binary dispersion	(-)	v_{ls} : terminal velocity of one small particle	(m/s)
f_{NS} : number fraction of smaller particles in binary dispersion	(-)	v_L : terminal velocity of large particle	(m/s)
f_S : solid fraction of smaller particles in binary dispersion (area fraction in 2-dimension, volume fraction in 3-dimension)	(-)	v_s : terminal velocity of small particle	(m/s)
		ϕ : solids content in slurry	(-)
		ϕ_0 : initial solids content in slurry	(-)
		ϕ_i : solids content of i th particle in slurry	(-)

References

- 1) Sunada, H.: "The Structure of the Sedimentation Bed", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **7**, 3-14 (1970)
- 2) Suzuki, M., A. Yagi, T. Watanabe and T. Oshima: "Estimation of Void Fraction in Three Component Random Mixture of Sphere", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 721-727 (1984)
- 3) Suzuki, M., H. Ichiba, I. Hasegawa and T. Oshima: "Void Fraction of Multicomponent Randomly Packed Beds with Size Distribution", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **11**, 438-443 (1985)
- 4) Suzuki, M. and T. Oshima: "The Estimation of the Void Fraction in a Cohesive Sphere Bed with Size Distribution", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **22**, 612-617 (1985)
- 5) Kamiya, H. and G. Jimbo: "Simulation of Aggregate Packing and Analysis of Aggregating Process of Ultra-Fine Powder by Brownian Dynamics Method", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **17**, 837-845 (1991)
- 6) Tsubaki, J., H. Mori and T. Sugimoto: "Network Formation Mechanism of Fine Particle in Suspension-Simulation on the Influence of Particle Bridging-", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **37**, 92-99 (2000)
- 7) Sugimoto, T., H. Mori and Tsubaki J.: "Network Formation Mechanism of Fine Particle in Suspension-Simulation on the Structure Formation in Binary Dispersions", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **37**, 100-106 (2000)
- 8) Suzuki, N.: "Kagaku Kogaku Benran", pp. 733-738, Maruzen (1988)
- 9) Sanbuichi, M., H. Nakakura and K. Osasa: "Zone Settling Rates of Slurries and Effect of Initial Height", *J. the Mining Institute of Japan*, **103**, 109 (1988)
- 10) Tsubaki, J.: "A discussion of how to describe the assembled fine particles", *Preprint of the 37th Symposium on Powder Science and Technology*, 58-61 (1999)