

3次元個別要素法を用いた容器内粉粒体の力学的挙動解析

吉 田 順

(技術研究所)

§1. はじめに

個別要素法(以下DEMと略す)は不連続体の挙動を再現するのに適した解析手法¹⁾であり、近年は粉粒体の解析に用いられることが多くなってきた。2次元DEMを用いた解析については以前に研究所報²⁾においても報告しているが、本来3次元挙動を示す粉粒体の解析を2次元モデルで行うことには無理があり、3次元モデルでの検討が望ましい³⁾。しかし、3次元モデルでは粒子数が極端に大きくなるため、解析不可能な問題の方が多いのが現状である。本研究では、粉粒体に特有な現象である偏析現象と対流現象を取り上げ、3次元DEMシミュレーションによって粉粒体の挙動を適切に表現できるとともに、これらの現象のメカニズムについて検討する。

偏析現象は、粉粒体の貯蔵あるいは輸送などの際に、粒径・密度・粒子形状などの違いにより、部分的に偏りが生じることであり、粒子流動に伴って見られる現象である。貯槽内への投入や排出あるいは輸送などの操作を行なった後に、均一な材料を得たい場合などに問題となることが多い。石炭サイロでは、投入時の偏析現象のために排出効率が排出口位置により異なる結果となり、それが遠因となって貯槽筒体の破損を招いた事例も報告されている。

偏析は、古くから知られた粉粒体に特有の現象であり、貯槽への投入に伴う偏析に関しては、1925年にGarve⁴⁾により研究報告がなされている。偏析の原因としてはパーコレーションによる浸透効果、摩擦による効果、Pushawayモデル、衝突による効果、ふるい層モデル、軌道効果、角特性効果があるとされており、実現象においてはこれらの原因の複合により偏析が生じるものと考えられる⁵⁾。近年では、従来の実験的研究に加えて、物理学者による理論的・数値的検討も報告されるようになっており、分子力学的解法^{6),7)}やセルラオートマトン法⁸⁾などの計算手法を

用いて粒度偏析現象を表すことが可能であると報告されている。しかし、これらの計算手法で取り扱われているのはほとんどが2粒径モデルの振動問題であり、多分散粒子あるいはその他の原因による偏析に関する検討はあまり見られない。最近の実験的研究として、後藤ら⁹⁾の投入時の粒度偏析現象について報告があり、本報告ではこれをシミュレートしたDEM解析を行ない、個々の粒子の動きを追跡することにより、投入時の粒度偏析のメカニズムを検討する。

粉体を容器に充填し、鉛直振動を加えた場合に対流現象が見られることはFaraday¹⁰⁾により1831年にすでに報告されており、現象としてはよく知られたものである。しかし、対流現象が生じること自体は周知の事実であるにもかかわらず、そのメカニズムの解明はあまり進んでおらず、対流とともに振動により自由表面に小山が形成されるこの単純な現象が、近年、物理学者の興味を引き、その原理が研究されるようになった^{11), 12)}。国内では田口^{13), 14)}により先駆的な数値解析的検討がなされ、秋山ら¹⁵⁾によって実験的検討がなされている。海外では、MRI (Magnetic Resonance Image) を用いて振動中の粉体層内部の挙動を観察することにより、粉体層中央の対流現象を示したEhrichsら¹⁶⁾の研究があり、粉粒体挙動のメカニズム解明の一助となることが期待される。また、この対流現象による流動に伴い、粒度偏析が生じることがよく知られており、振動時において偏析と対流は粉粒体を取扱う場合に無視することのできない現象である。

本研究では、Ehrichsらの実験に基づいたモデルにより振動時の対流現象を再現し、田口により示された対流現象のメカニズムと対照するとともに、個々の粒子挙動の追跡から対流の原因を検討する。

§2. 投入時粒度偏析現象の解析

2.1 解析対象とした粒度偏析実験の概要

解析対象とした実験はガラスビーズを用いて後藤らにより行われたものであり、図-1のような粒度分布を持つ材料をホッパーから受入容器に投入した際の偏析現象について検討したものである。

後藤らは実験結果に基づいて、以下のような仮説を立て受入容器内に生じる粒度偏析現象を説明している。

- (1) 粒子の堆積層は投入時条件により、投入初期に壁面の反発を主要因として形成される反発層(A層)と安息角により形成される斜面上部からの流動により反発層上にできる流動層(B層)に大別される(図-1参照)。
- (2) A層・B層の厚さなどの偏析の状態は投入高さ、オリフィス口径、受入容器径により異なる。
- (3) A層では受入容器の中心部ほど質量中位径が大きく、B層では壁面近傍ほど大きくなる図-2に示すような逆の傾向の粒度偏析が見られる。
- (4) A層およびB層の流動のメカニズムは図-3に示すようなものと推測され、これが偏析の原因であると考えられる。

この実験の2次元DEMを用いてシミュレーションを試みた報告¹⁷⁾では、偏析は見られたものの実験と解析で傾向が異なっていたため、3次元DEMを用いた検討を行うこととした。

2.2 3次元DEMを用いた検討

前述の2次元の検討では実験全体をモデル化した

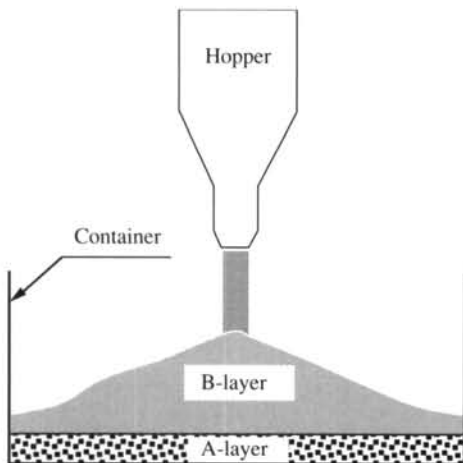
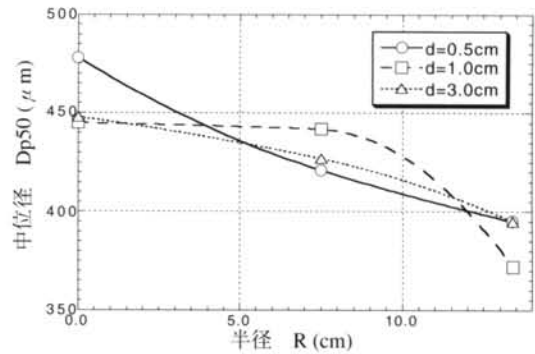
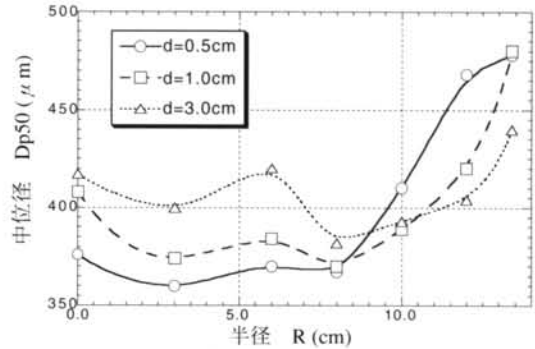


図-1 投入時粒度偏析実験の概念 (後藤ら⁹⁾)

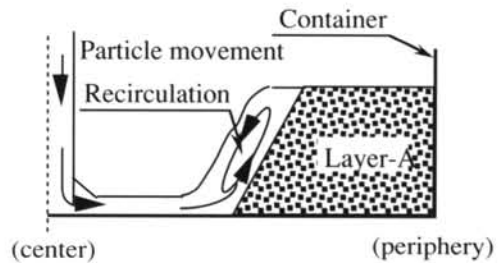


(a) A層における中位径分布

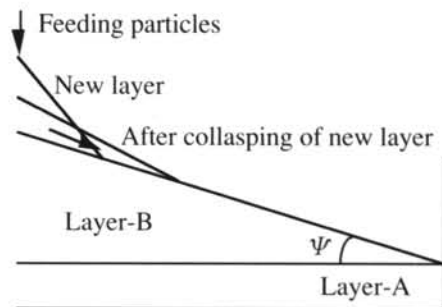


(b) B層における中位径分布

図-2 容器位置と中位径の関係 (後藤ら⁹⁾)



(a) A層形成のメカニズム



(b) B層形成のメカニズム

図-3 投入時粒度偏析のメカニズム (後藤ら⁹⁾)

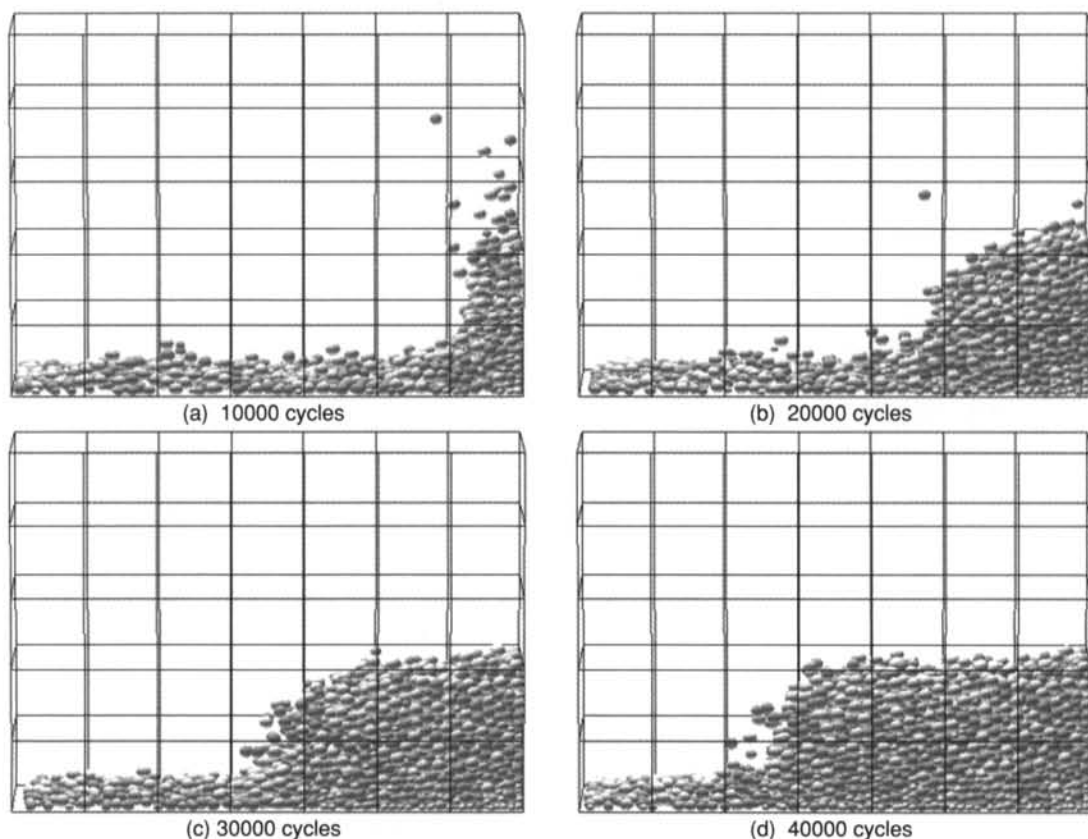


図-4 3次元DEMによる反発層の堆積状態

が、3次元モデルの現状の解析レベルでは全体を表現することは膨大な記憶容量と計算時間を要するため、検討対象を実験でA層と呼ばれた反発層に限定し、その形成メカニズム再現するような簡易なモデルで3次元シミュレーションを実施することとした。

2.2.1 解析モデルおよび条件

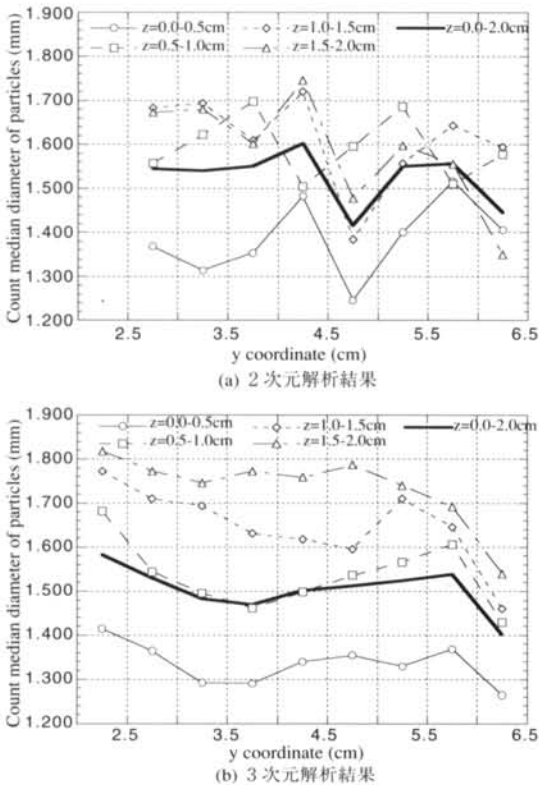
A層形成の簡易モデルを設定するため、粒子挙動を次のように仮定した。受入容器に投入された粒子は粒子間の反発により、等しい初速度で水平方向に移動し、壁面に向かう。その際、粒子間隔はほぼ等しく、底面上を一層で進むものとする。このような仮定に基づき、原点から7cmの位置に設けた壁面に向かって粒子を一定速度で次々に発生させる(図-4参照)。ここで、粒子速度は $v_p=150\text{cm/s}$ と設定したが、高さ30cmからの自由落下速度約240cm/sの約60%が水平速度に変換されるとしたものである。ただし、2次元解析で得られた水平速度より、かなり大きいものである。解析領域は、幅7cm、高さ5cmの断面に奥行き方向に一定幅2.0cmを与えたモデルとした。本

来、円筒の一部と考えれば扇型領域とすべきであるが、比較のために実施した2次元解析との整合性をとるため矩形領域のモデルとしている。

粒径は $d=1.0\sim 2.0\text{mm}$ のランダム分布とし、3次元では $N=5000$ 個の粒子を発生させ、2次元では $N=375$ 個の粒子を発生させた。入力物性等は表-1

物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	N/m	200.0
せん断バネ定数	k_s	N/m	40.0
比例減衰定数	β	sec	5.0×10^{-5}
粒子間摩擦係数	μ		0.50
壁面摩擦係数	μ_m		0.25
粒子密度	ρ_p	kg/m^3	1.0×10^3
粒子数(3-D)	N	個	5000
粒子数(2-D)	N	個	375

表-1 入力パラメータおよび解析諸元



図一五 容器位置による個数中位径分布 (2次元・3次元の比較)

に示すとおりである。

2.2.2 解析結果および考察

図一四に時刻歴の堆積状況を示す。この挙動は底面に平行に供給された粒子が壁面および他の粒子との接触により上昇し、堆積層前面に押し出されていくという実験結果の粒子挙動を再現したものである。層厚はほぼ一様になっており、堆積前面の傾斜等も外観はほぼ同様である。堆積層厚の約2cmは実験結果(約1cm)と比較すると大きい。解析の粒径が2倍以上であり、さらに粒子に与えた水平速度が大きいことによるものと考えられる。粒子挙動に関しては、壁面反発後の鉛直方向の跳ね上がりが3次元では4cm程度に対して2次元では14cmと異なっている。

図一五には個数中位径分布を示す。2次元(図一五(a))では最下層が小さい粒径を示している以外は高さ方向に一定の傾向は見出せず、水平位置でも全体的に壁面近傍が小さな粒径となっているものばらつきが大きい。これに対し、3次元の結果(図一五(b))では壁面からの位置あるいは高さによって明らかに個数中位径が異なる傾向が見られ、下層ほど小さくまた壁面に近いほど小さい傾向が見られる。こ

の差の原因は2次元では壁面に衝突したときの力が面内の上下・水平加速度に変わるのに対して、3次元では面外方向にも力が分散されることや粒子間の衝突確率が3次元に比べて2次元の方が大きいことが考えられる。表一は壁面からの跳ね返りについて粒径の範囲毎に最大距離・平均距離および距離毎の粒子個数で示したものであり、2次元と3次元で定性的傾向は類似しているが、反発距離自体は前述の跳ね上がり高さと同様に2次元の方が大きい。また、3次元では粒径の大きい方が反発距離が大きいという傾向を示しているのに対し、2次元では全体的な傾向は一致しているものばらつきが認められる。ただし、これら一連のばらつきは2次元モデルの粒子数が同規模の3次元モデルに比べて1桁以上小さいことが一因と考えられ、一概に挙動の違いだけを示しているとは言えない。

実験と比較すると3次元の解析結果はA層の堆積過程を再現していると共に個数中位径分布に対応した結果となっている。これに対し、2次元ではその傾向から極端にはずれた結果にはなっていないものの、少なくとも今回の粒子数程度の2次元モデルではばらつきが大きく、定量的に評価することは困難と考えられる。ただし、実験との比較の意味では3次元モデルは全体モデルにした場合には平面的な広がりが与えられるため、粒子運動の自由度が増すのに対し、2次元モデルではこの簡易モデルを側方に拡張したモデルとなるだけであり、前章でも示したように今回のような円筒形モデルの実験あるいは実現現象を2次元DEMで捉えようとした場合にある程度の定性的な傾向は表現できるが、定量的な評価までは非常に

粒径	最大距離	平均距離	壁面反発後の跳ね返り距離 (cm)			
			0.0-0.01	0.01-0.1	0.1-1.0	1.0-
d (mm)	D _{max} (cm)	D _{ave} (cm)				
(a) 2次元解析						
1.0-1.2	3.126	0.227	34	20	6	4
1.2-1.4	2.882	0.175	40	21	12	5
1.4-1.6	4.895	0.383	29	19	19	6
1.6-1.8	3.171	0.280	45	14	15	8
1.8-2.0	4.170	0.459	38	16	11	13
(b) 3次元解析						
1.0-1.2	3.021	0.018	880	113	19	4
1.2-1.4	2.478	0.026	829	110	29	7
1.4-1.6	3.055	0.043	839	115	60	11
1.6-1.8	4.351	0.134	727	131	90	36
1.8-2.0	4.076	0.194	619	150	165	66

表一 壁面反発後の移動距離

難しいと考えられる。

2.3 反発層の偏析メカニズムについての考察

実験結果から推定されたA層形成の基本的メカニズムは、3次元解析結果と良い対応を示しているが、粒径や粒子速度などの条件が解析と実験で異なっているため、解析結果を分析し、偏析のメカニズムについて考察する。

今回の解析で新たに明らかになったこととして、A層内でも高さ方向に粒径分布が異なり、下層ほど粒径が小さい傾向が見られた。これは粒子が一層で底面上を進むモデルであるため、図-6に示すように衝突時に上方へ持ち上げられる粒子は大きい粒子ということになる。すなわち、回転による跳ね上がりを見れば粒子はそれより小さい粒子と衝突しないかぎり上向き速度は得られない。これは壁面近傍についても共通する傾向であり、解析結果で壁面近傍の個数中位径が小さい原因と考えられる。そして、底面・壁面に小粒子が偏ることを考えると、堆積過程において動きが比較的自由な上層あるいは堆積の前面に大きい粒子があることとなり、実験で述べられた大粒子ほど循環しやすいことに対応する。しかし、このメカニズムは2次元解析でもある程度追従できるはずであり、今回の解析でうまく表現できなかった原因としては先にばらつきの原因とした粒子数の少なさの他に、面外移動の自由度および力の分散そして間隙を通過する容易さといった前章で示した2次元モデルと3次元あるいは実現現象との基本的な差が考えられる。

しかし、3次元解析に計算機能力的な限界があるかぎり、現象解明のために2次元解析を併用することは不可欠であり、2次元で間隙通過や運動の自由度を表現するために、実際よりも粒度分布を広くとったり、剛性を小さくして重なりを許容したりするようなモデル化の工夫が必要と考えられる。

2.4 まとめ

本章では、粒子投入時の粒度偏析現象についてガ

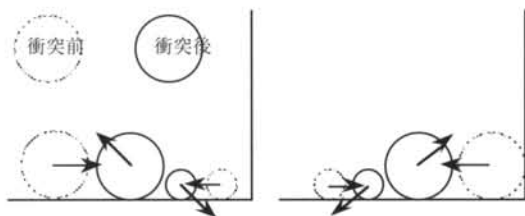


図-6 衝突前後の粒子挙動の模式図

ラスビーズを用いて行われた実験を、2次元および3次元モデルを用いてシミュレートすることを試みた。以下に得られた知見および今後の課題を示す。

- 1) 簡易モデルを用いた3次元解析では実験で示された反発層(A層)の堆積過程を再現すると共に、粒度偏析の傾向についても一致した結果が得られた。
- 2) 2次元解析では、実験結果や3次元解析に対応した粒径分布は得られず、今回対象とした実験で示された粒度偏析現象を2次元モデルで表現することは困難と考えられる。
- 3) 反発層形成のメカニズムは実験で観察されたような粒子の循環によるものであることが解析結果から確認され、さらに解析結果の反発層内には鉛直方向にも粒度偏析が見られた。
- 4) 反発層内の鉛直方向の粒径分布は、下の方が個数中位径が小さい形となっており、実験で推定された大粒子が上に持ち上げられるため循環しやすいという仮説が正しいことを示唆している。
- 5) 投入時の粒度偏析現象の解析的解明には、今回検討した反発層についても未解明の課題があり、流動層(B層)に関してはほとんど未着手である。これらの解明のためには、現象の分析による素過程の抽出と適切なモデル化が必要である。

§3. 振動時対流現象の解析

振動時の容器内の対流現象についてはFaraday以来様々な検討がなされてきた。田口は2次元解析を用いて対流現象が表現できることを示したが、粒子層

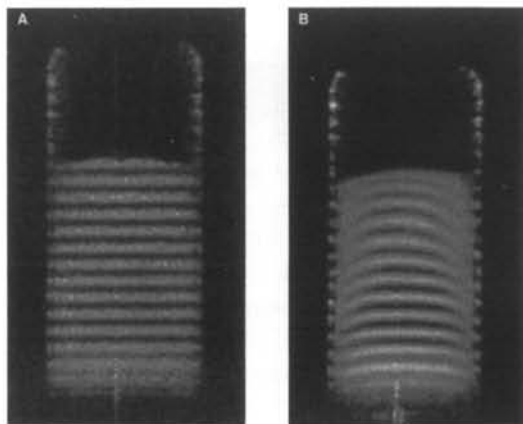


図-8 Ehrichsら¹⁰⁾のMRIを用いた実験結果

物性	記号	単位	数値
垂直バネ定数	k_n	N/m	5.0×10^5
せん断バネ定数	k_s	N/m	1.0×10^5
比例減衰定数	β	sec	2.0×10^{-5}
粒子間摩擦係数	μ		0.50
壁面摩擦係数	μ_m		0.50
粒子密度	ρ_p	kg/m ³	1.7×10^3
粒子数	N	個	6000

表一 3 入力パラメータおよび解析諸元

表面の小山上の盛り上りを表現できなかった。実験的には容器中央断面の粒子の挙動を画像処理によって表示する手法 (MRI) が開発され、Ehrichsらは円筒容器内に詰めた粒子の振動時の中央断面の画像を示している (図-8)。本章では、この実験条件に従った解析を3次元DEMを用いて行ない、対流現象の再現を図るとともに、粒子挙動を詳細に検討することにより、対流のメカニズムを明らかにする。

3.1 3次元DEMシミュレーション

Ehrichsらの実験はほぼ球形のポビーの種を用いたものであり、図-8のような振動前と振動後の堆積層中央断面の断層写真を示している。この写真では、全層の盛り上がりははっきりと示されており、対流現象および表面の小山形成がその延長として考えられる。

本章では、実験の諸元を考慮した解析を実施し、Ehrichsらの実験結果と比較検討を行なうことにより、3次元DEMで実験に対応した対流現象が再現できることを示す。

3.1.1 解析条件

解析モデルでは、実験の諸元に準拠した形で、粒子は等粒径で粒径 $d=1.0\text{mm}$ 、そして容器径 $D=16.5\text{mm}$ としたが、入力物性については実験材料 (ポビーの種) の剛性等についての情報を得ることが困難であったため、ガラスビーズの物性に近いものを採用した。入力物性等の解析条件を表-3.1に示す。また、粒子数については、実験での層高 $h=27\text{mm}$ に近い堆積層を作成するため、 $N=6000$ 個とした。

3.1.2 解析方法

解析は3次元DEMを用いて行なったが、まず初期条件を作成するため、空間にランダムに配置した6000個の粒子を重力落下させて容器内で粒子の動きがある程度収束するまで解析を行なう。ここでは時

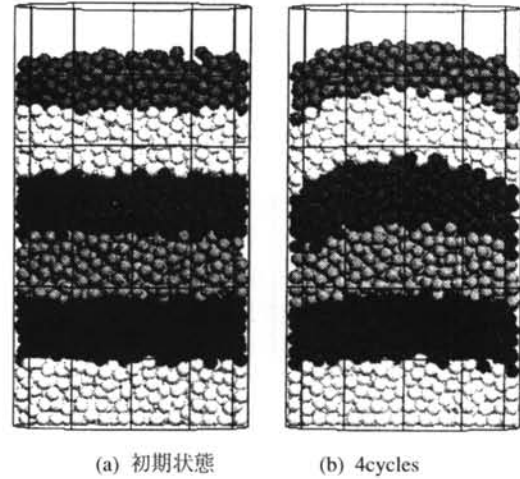


図-9 中央断面の粒子挙動 (初期からの変化)

間増分 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}\text{s}$ で、 $N_s=10,000\text{cyc}$ の解析を実施した。こうして作成した初期状態から容器を上下加振する振動解析を行なう。入力した変位振幅 $\lambda=2.0\text{mm}$ 、周期 $\omega=0.05\text{s}$ で、入力波形は三角波 (ランプ波) とした。解析の1cycあたりの時間増分は初期解析と同様に $Dt=1.0 \times 10^{-5}\text{s}$ で、 $N_s=700,000\text{cyc}$ すなわち実時間で $t=7.0\text{s}$ 、振動回数で $N_{\text{cyc}}=140\text{cycles}$ に当る解析を実施した。

3.1.3 解析結果

(1) 中央断面の挙動

図-9に初期状態から $N_{\text{cyc}}=4\text{cycles}$ までの中央断面の挙動を示す。縞模様の変化の状態は中央部が盛り上がり、壁面近傍が下がって山型となり、図-8と比較すると実験結果とよい一致を示すことがわかる。このように振動初期の段階から明らかに対流現象の兆候が認められ、初期にランダムな形であった層表面が小山状に盛り上がっている。

次に、図-10に20cycles (1.0s) 毎の中央断面の挙動を示す。最終状態ではブルーに着色した最下部の粒子が中央部を柱状に下から20mm程度まで上昇すると同時に、最上部のグリーン粒子が側壁近傍を底面まで下降してきている。すなわち、中央部の粒子が下部から徐々に持ち上げられると同時に、上部の粒子が壁面方向に移動して、壁面近傍の粒子が下降するという対流現象を明確に表したものである。

振動途中の粒子の動きを把握するために、100cyclesを初期状態 (平行な縞) として $N_{\text{cyc}}=100 \sim 104\text{cycles}$ の変化を図-11に示した。これを図-9と比較すると表面の形状はすでに小山を形成している

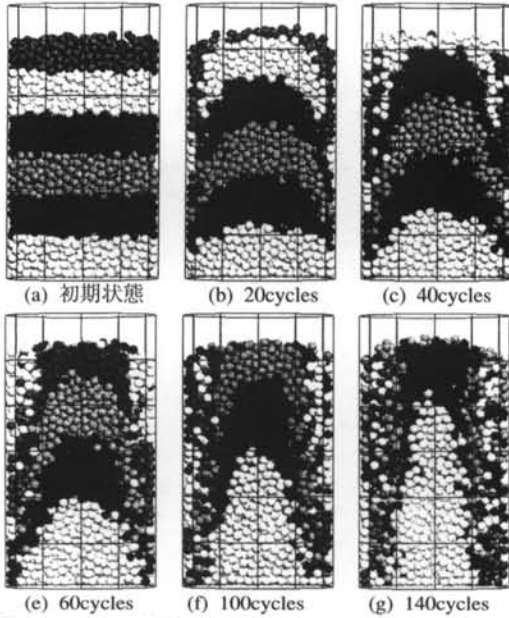


図-10 中央断面の粒子挙動 (0~140サイクル)

ため、初期の場合と少し異なるものの、縞模様は全く同様な変化を示しており、図-10で全体的な挙動を示した対流現象は、実験結果の図-3.1あるいは解析結果の図-9および図-11に示したような1cycle単位の微小な変化の繰り返しであり、その積み重ねによって対流現象が構成されていることがわかる。

図-9および図-11に示したような初期状態の時間を任意に設定する検討は、実験ではほとんど不可能であり、現象のメカニズム解明における数値解析の長所を示したものである。

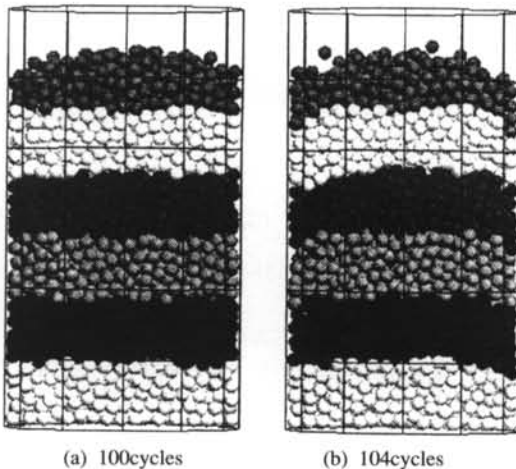


図-11 中央断面の粒子挙動 (100サイクル後)

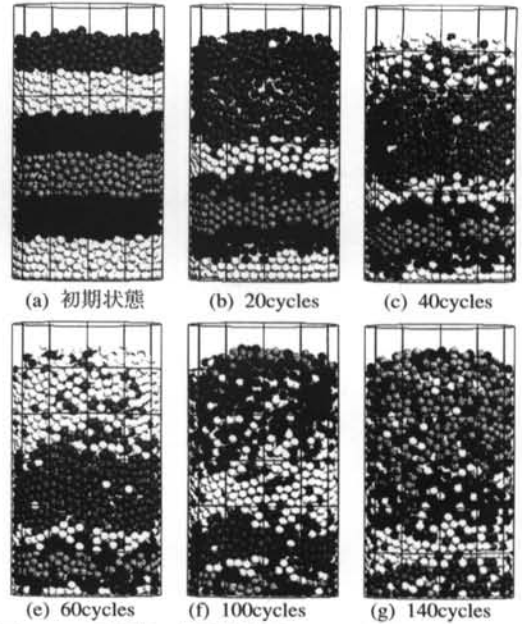


図-12 周辺部の粒子挙動 (0~140サイクル)

(2) 周辺部の挙動

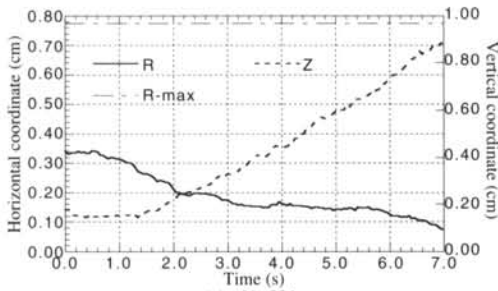
図-12に20cycles毎の周辺部挙動を示す。通常の実験では容器周面からの観察によりこのような図が得られることとなり、実験条件は少し異なるが秋山ら¹⁹⁾によって示された実験結果の写真は上部の着色した粒子が壁面近傍に薄く広がるような傾向を見せており、この図で示されている壁面近傍を上部の粒子が下降する傾向と対応している。

周辺部の粒子が下方に移動することにより、下部の粒子が中心方向に押し込まれ、最終ステップでは最下部の青い粒子がほとんど見えなくなっている。これは中央断面で示した挙動と完全に対応するものであり、対流現象を明確に表している。

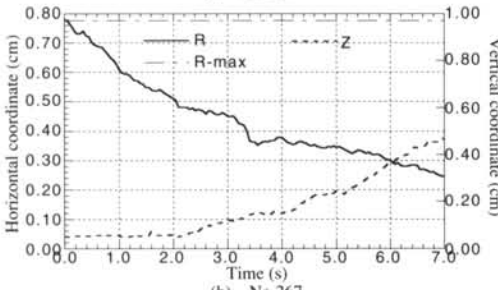
このように、数値解析結果では中央断面の挙動と同時に周辺部の挙動も図示可能であり、先に示した時間断面と同様に空間的にも任意の部分の粒子挙動を把握でき、これも数値解析の大きな長所の一つである。

(3) 粒子の変位

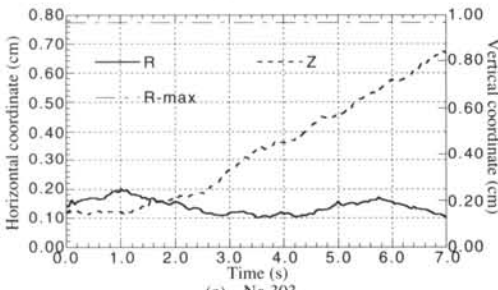
図-8~図-12で視覚的に示した粒子の挙動を水平円周方向座標Rと鉛直方向座標Zの変化で示したのが図-13~図-15である。図中に示した番号は粒子の要素番号であり、初期配置において下から順番にナンバリングされている。初期に最下部にあった粒子の挙動を示したのが図-13であり、中間部の底面からの高さ1.6~1.8cmの粒子について示している



(a) No.224



(b) No.267



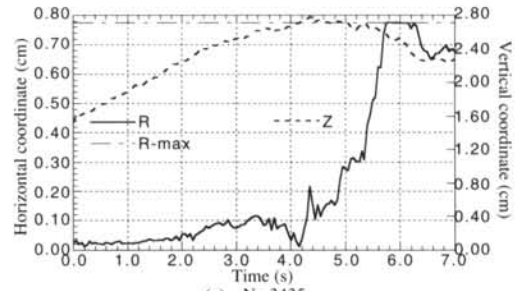
(c) No.303

図-13 最下層粒子の時刻歴変位

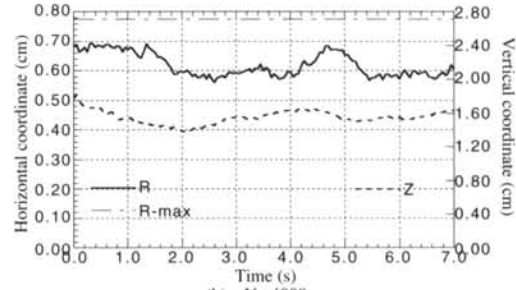
のが図-14、それより上部の粒子を任意に選び、挙動を示したのが図-15である。

これらのグラフから読み取れる一般的傾向として、底面近傍の粒子は中心方向に移動し、中心部に近づくともち上げられる傾向がある。また、上層の粒子は持ち上げられて表面まで達した後に急激に周辺部へ押し出され、周辺部の粒子は下方に移動するが下降している間は水平方向の移動は小さい。今回の解析では、そこまでの結果であるが底面に達した粒子は中心方向に移動することになると予想され、対流現象の一連の動きを示している。

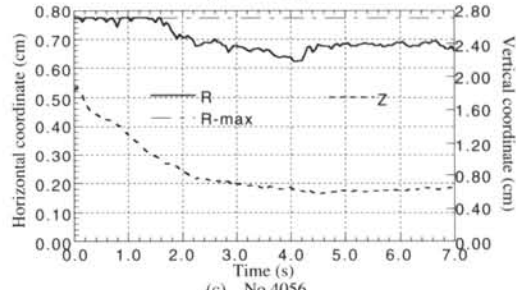
下降速度は壁面に接したときに最も大きく、上昇速度は中心に近いほど大きい傾向があるが、中間層に粒子が来たときの上昇および下降の速度は中心から0.6cm程度のところで小さくなる傾向にあり、今回の解析条件ではその周辺が遷移領域と考えられる。この位置は容器半径が0.825cmであり、粒径 $d =$



(a) No.3435



(b) No.4000



(c) No.4056

図-14 中間部粒子の時刻歴変位

1.0mmということから、容器中間部では壁面から粒子1~2個分の下降領域があり、その内側に1~2個分の遷移領域を挟んで上昇領域があるという構成になっていると考えられ、この領域がいわば対流の渦の中心である。

全体的な対流挙動の中で、表面の粒子の側方への移動が非常に早いことに関しては小山が形成された後には、安息角以上の角度に持ち上げられた粒子が中央から側方に転がり落ちるためであり、堆積層内で移動する他の粒子の速度に比べて非常に大きいものとなっていると考えられる。

3.2 対流現象のメカニズムの検討

3.1に示した3次元DEMの解析結果は、全体的に実験で示される対流現象を再現しており、対流現象は1cycle毎の粒子の移動の繰り返しによって生じていることが明らかになった。そこで、本章では解析途

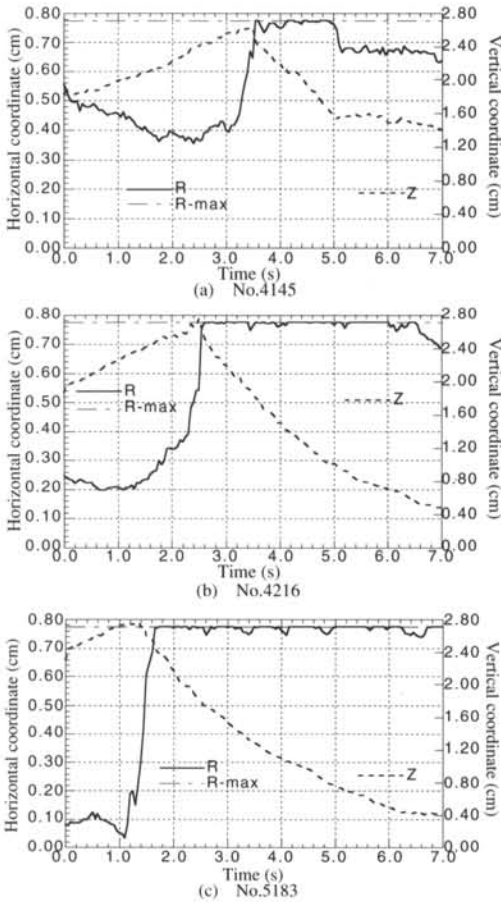


図-15 上層部粒子の時刻歴変位

中段階（100cycles後）の1サイクルを取り出し、詳細に検討することにより、対流現象のメカニズムを明らかにすることを試みる。

3.2.1 粒子層の全体挙動

中央断面における粒子の挙動を0.01s単位で示した図-16において、容器が上向きに移動するとき粒子層全体が縮み、下向きに移動するとき伸びるあるいは元の層厚に戻る事がわかる。そして、上向き入力では底面によって粒子が拘束されるため一様に層下面が上昇するが、下向きに変わる時に粒子が慣性で更に持ち上げられようとするため、底面と層下面の間に空隙ができる。粒子が落下し始めてからの挙動は壁面近傍が中心部の粒子に比べて早く下降する傾向にあることが認められる。これは壁面近傍の粒子と内部の粒子の拘束度の違いによって生じる挙動の差と考えられ、田口により示された対流のメカニズムと対応した結果である。

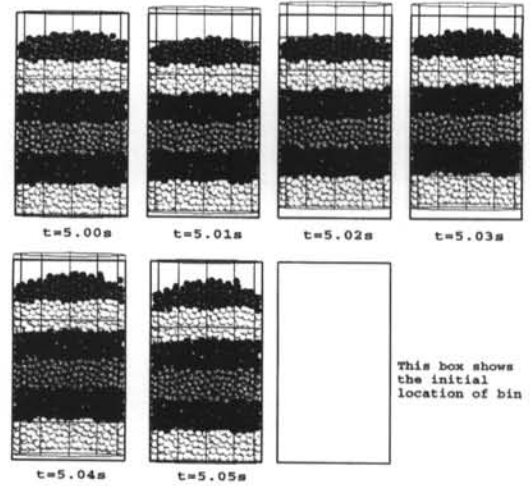
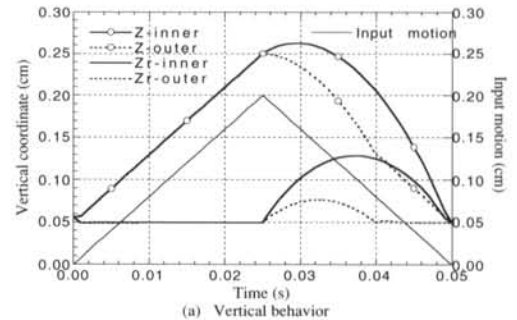


図-16 中央断面の粒子挙動（101サイクル）

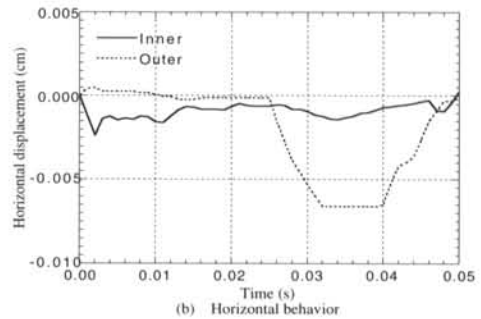
3.2.2 個々の粒子挙動

図-17に底面位置の壁面近傍および中心部の粒子粒子を選び、鉛直および水平変位波形を示す。ここで、鉛直変位の実線は絶対座標を表しており、波線は入力変位量を除いた相対座標を示している。

内側の粒子、外側の粒子とも上向きの振動入力と鉛直変位はほぼ一致しており、入力が下向きになったところで挙動に差が生じる。内側の粒子は入力方向が転換してから、少しの間上昇を続けるため、上



(a) Vertical behavior



(b) Horizontal behavior

図-17 底面近傍粒子の時刻歴変位

向き入力による上昇量が大きく、相対変位では外側の粒子と比べて3倍程度の変位を示していることがわかる。この原因は側壁近傍の粒子は側壁の拘束を

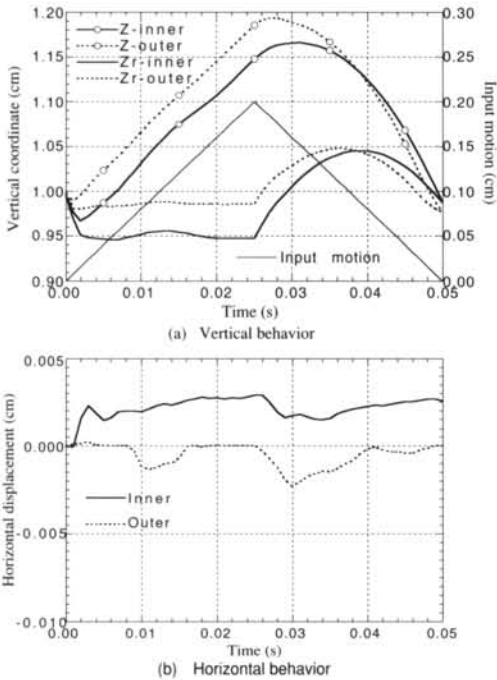


図-18 中間層粒子の時刻歴変位

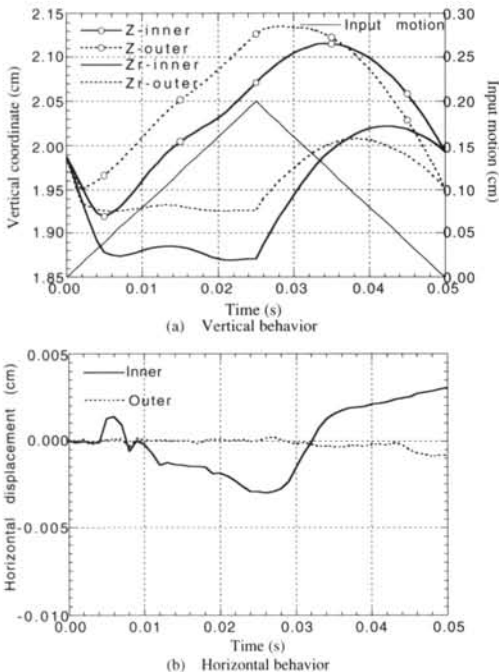


図-19 上層層粒子の時刻歴変位

受けるために、容器の動きに連動して挙動するのに対し、内側の粒子は拘束が弱く、上向き慣性力が重力により減衰するまで上昇するためと考えられる。

そのため、挙動の周期も異なり、外側の粒子が0.15sほどで底面位置に戻るのに対し、内側の粒子は0.25sすなわちほとんど振動の半周期を要して底面位置に戻っている。この時間差が底面近傍で外側の粒子が内側粒子の下に潜り込む原因と考えられるが、水平変位を見ると外側の粒子の中心方向への変位が顕著に現われているものの、この1cycle内では元の位置に戻っていることがわかる。鉛直と水平の対応で見ると、入力方向が下向きに変わったときに内側と外側の粒子の鉛直変位(鉛直位置)に差が生じ、外側の粒子に中心方向への水平変位が現われている。

すなわち、現象的には内側の粒子が底面に達するまでの間は外側の粒子の内からの拘束がなくなることになり、そのため外側の粒子に内向き変位が生じていることをはっきりと表している。上載荷重により壁面に押しつけられていた粒子が内側の粒子の支えがなくなることにより内側へ移動しようとするのが対流現象の底面位置でのドライビングフォースとなっていると考えられる。

図-18および図-19に底面からの高さ $H_1=1.0\text{cm}$ および $H_1=2.0\text{cm}$ の内外粒子の変位波形を示した。鉛直変位に関しては、底面位置の粒子と比べると位相遅れはあるものの同様な挙動を示しており、入力により持ち上げられる相対高さはどの層でも内側の方が大きいことを示している。したがって、ここで生じた底面と粒子層の空隙に周辺の粒子が流れ込むことにより、周辺部が低く、中心部が高くなるような小山が形成されるものと考えられる。水平変位に関してはほぼ中間高さとなる $H_1=1.0\text{cm}$ では内外の粒子とも一定の傾向は示しておらず変位量も小さい。これに対し、表面に近い $H_1=2.0\text{cm}$ では外側の粒子にほとんど変位が見られず、内側の粒子は外向きに移動しようとする傾向が見られる。これは表面近くまで持ち上げられた内側の粒子が壁面方向に移動する傾向を示し、外側粒子は下向きに移動する鉛直変位成分を持つだけで水平変位成分が小さいことを表している。

以上のような個々の粒子挙動は田口が推定した対流現象のメカニズムと対応するものであり、数値解析という手段を用いて、粒子挙動の任意の時間・空間断面を表現することにより現象の詳細なメカニズムを示すことができた。

このように数値解析と最近の計測技術・画像処理

技術を用いた実験等を併用することにより、メカニズムの未解明な粉体現象が明らかになるものと期待される。

3.3 まとめ

3次元DEMを用いて Ehrichs らの実験に準拠した容器内粒状体の振動解析を実施し、対流現象を適切に再現できることを示すとともに、微小時間の挙動を詳細検討することにより、対流現象のメカニズムを明らかにした。以下に得られた知見を示す。

- 1) DEMの解析結果は Ehrichs らの実験結果とよい一致を示しており、定性的に秋山らの実験結果とも対応しており、粒子層表面の小山状の盛り上がりについてもうまく表現できている。
- 2) 時間断面を変えた表示により、対流現象は1サイクル毎の粒子層の移動の繰り返しであり、その蓄積として表されるものであることがわかった。
- 3) 振動途中の1サイクルの詳細検討により、容器内外の粒子挙動の差は主に入力が上向きから下向きに変化した後に生じ、壁面近傍では粒子が拘束を受けるため早く下降するが、中央部では拘束が小さいため上昇量が大きく下降が遅くなることがわかった。
- 4) 対流の原因となるメカニズムは、下降時に内側粒子が外側粒子に比べて遅れ、内側の粒子の拘束がなくなり、底面近傍の粒子の水平方向の移動のドライビングフォースとなることであり、壁面近傍の粒子が中心方向に押し出される。そして、外側の粒子が内側に入り込むことにより、中央部が盛り上がり、小山を形成することとなる。
- 5) 堆積層表面まで上昇した粒子は安息角以上の勾配になった段階で中央部から側壁に向かって層表面を転がるものと考えられ、表面に達した後の粒子の移動速度は速い。
- 6) 粒子個々の動きを追跡することにより、対流現象における粒子挙動は田口の推定したメカニズムに従うことが明らかとなった。

§4. おわりに

本研究では、粉粒体に特有な現象のうち、粒度偏析と対流を取り上げ、3次元DEMを用いてこれらの現象が適切に再現可能であることを示した。解析結果の検討で示したように数値解析においては、任意の

空間・時間断面を示すことは容易であり、実験等では得られない側面からの検討が可能である。今後、粉体諸現象のように複雑な系を取り扱う場合には、実験結果等の本質を捉え、適切な数値シミュレーションを行なうことにより、現象の理解がより深まるものと考えられる。

また、粒子の偏析、対流というよく知られた現象を3次元DEMを用いてシミュレートしたが、ここで対象としたような比較的少粒子数のモデルであれば、DEMを用いることが可能であり、このような少粒子の問題に対するシミュレーションから徐々に枠を広げていくことあるいは粒子挙動のミクロなメカニズムの検討を行なうことが今後のDEMを用いた研究の一つの方向性であると考えられる。

使用記号

Δt :	1ステップあたりの時間増分	(s)
N_s :	解析ステップ数	(cyc)
d :	粒径	(mm)
N :	粒子数	(個)
D_o :	供給口径	(cm)
h_f :	供給高さ	(cm)
D :	受入れ容器径	(cm)
ρ_p :	粒子密度	(kg/m ³)
k_n :	垂直バネ定数	(N/m)
k_s :	せん断バネ定数	(N/m)
β :	比例減衰定数	(s)
μ :	粒子間摩擦係数	(-)
μ_w :	壁面摩擦係数	(-)
H_A :	A層の層厚	(cm)
d_c :	個数中位径	(mm)
v_p :	粒子速度	(m/s)
D_{max} :	壁からの反発距離の最大値	(cm)
D_{ave} :	壁からの反発距離の平均値	(cm)
h :	堆積層厚	(mm)
λ :	入力変位の振幅	(mm)
ω :	入力変位の周期	(s)
t :	経過実時間	(s)
N_{cyc} :	振動数	(cycles)
R :	水平面内の半径方向座標	(cm)
Z :	鉛直方向座標	(cm)
Zr :	入力変位に対する鉛直方向相対座標	(cm)
Hi :	粒子の初期高さ(容器底面から)	(cm)

<参考文献>

- 1) Cundall, P.A.: "The measurement and analysis of accelerations in rock slopes", Ph.D. thesis, Imperial College, London (1971)
- 2) 吉田 順: "個別要素法によるサイロ内粒状体の挙動に関する研究", 清水建設研究報告, 第53号, 33 (1991)
- 3) 吉田 順: "個別要素法を用いた粒状体解析の3次元性に関する検討", 粉体工学会誌, Vol.32, 16 (1995)
- 4) Garve, T.W.: "Segregation in Bins", J. Am. Cer. Soc., Vol.8, 666 (1925)
- 5) 津々見雄文: "11. 偏析, III. 粉体諸現象", 粉体工学便覧, 粉体工学会編, 374 (1986)
- 6) Rosato, A., K.J. Strandburg, F. Prinz, and R.H. Swendsen: "Why the Brazil Nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking", Phys. Rev. Lett., Vol.58, 1038 (1987)
- 7) Ohtsuki, T., D. Kinoshita, Y. Takemoto and A. Hayashi: "Segregation by shaking in cohesionless granular mixtures - Effects of particle size and density", J. Phys. Soc. Jpn., Vol.64, 430 (1995)
- 8) Sakaguchi, H., A. Murakami and T. Hasegawa: "Connected lattice cellular-automaton particles: a model for pattern formation in vibrating granular media", Soils & Found., Vol.36, 105 (1996)
- 9) 後藤邦彰, 横孝政, 増田弘昭: "供給に伴う多分散粒子の偏析現象", 粉体工学会誌, 31, 842 (1994)
- 10) Faraday, M.: "On a peculiar class of acoustical figures and on certain forms assumed by particles upon vibrating elastic surfaces", Philos. Trans. R. Soc. London, 52, 299 (1831)
- 11) Gallas, J., H. Herrmann and S. Sokolowski: "Convection cells in vibrating granular media", Phys. Rev. Lett., Vol.69, 1371 (1992)
- 12) Homes, P.: "The dynamics of repeated impacts with a sinusoidally vibrating table", J. of Sound and Vibration, Vol.84, 173, (1982)
- 13) Taguchi, Y-h: "A new origin of a convective motion: elastically induced convection in granular materials", Phys. Rev. Lett., Vol.69, 1367, 1992
- 14) 田口善弘: "粉粒体の対流運動の数値モデル", 粉体工学会誌, Vol.30, 173 (1993)
- 15) 秋山鐵夫, 井口達三郎, 鴻野成夫, 太田篤: "二次元粉体振動層における粒子循環速度の垂直成分", 粉体工学会誌, 31, 80 (1994)
- 16) Ehrichs, E.E., H.M. Jaeger, G.S. Karczmar, J.B. Knight, V.Y. Kuperman and S.R. Nagel: "Granular convection observed by magnetic resonance imaging", Science, Vol.267, 1632 (1995)
- 17) 吉田 順: "粒度偏析現象のDEMシミュレーション", 粉体工学会 1993年度秋期研究発表会講演要旨集, 102 (1993)