微小重力下における横振動箱内微粒子群の運動特性

Motion Characteristics of Fine Particle Assembly in Laterally Vibrated Box under Microgravity

大 山 恭 史*, 武 内 洋*, A. T. ピアテンコ*,
Yasushi OHYAMA, Hiromi TAKEUCHI, A. T. PYATENKO,
千 葉 繁 生*, 内 館 い ず み*, 篠 原 邦 夫**
Shigeo CHIBA, Izumi UCHIDATE, Kunio SHINOHARA

This paper describes behavior of fine particles in a laterally vibrated box under microgravity and shows the effects of vibrating conditions and particle concentration on the behavior. A drop capsule yielded microgravity for 10 seconds. Particles of 51 μ m in mass median diameter flew upward along with each side wall vibrating at 75-150Hz and were dispersed into the central part of the box. The propagation rate of momentum in the particles from the vibrating walls was determined by the frequency and the particle concentration in the dispersed phase. For a small loading mass, static clusters were formed due to restricted propagation of momentum. However, the propagation was enhanced to generate dynamic clusters which were transitional assemblies of the moving particles at a high particle concentration or at a high frequency. It was found that there exists a saturating concentration of dispersed particles in a fully developed vibrating state. High particle concentration leads to a supersaturation and therefore bed reformation from the dispersed particles.

Key Words : Microgravity, Solids Dispersion, Particle Collision, Lateral Vibration

1. 緒 言

微小重力場における粉体の、外力に対する挙動等の諸現象を明らかにし、その操作法を検討することは、将来宇宙環境を産業的に利用するために重要といえる。さらに微小重力場は、例えば地上では常に重力と共存する付着力等の効果を独立して観察することが可能であるなど、地上の粉体现象に対する基礎研究の場としても有効であると考えられる。著者らは既報¹⁾において、微小重力下で横振動を受ける容器内粗粒子群の分散構造について検討した。その結果、微小重力振動場において粗粒子群は単一粒子同士の衝突反発運動

を繰り返し、容器内縦方向に鞍型の濃度分布を形成することが分った。一般に粒子径 100 μ m 以上の粗粒子は、付着力に比較して分離力が圧倒的に大きいために剛体球に近い運動をするが、微粒子は、付着性や摩擦など粒子間の相互作用の寄与のために、粗粒子とは異なる挙動を示すことが予想される。振動壁面上の微粒子の挙動については、これまで実験^{2, 3)}やシミュレーション⁴⁾によって様々な知見が得られているが、重力の影響下での粒子運動に関するものが多く、微小重力下で振動する容器内微粒子の挙動は分っていない。微小重力下の微粒子運動特性を解明することは、宇宙環境下での工業原料操作、軌道機内粉塵等の環境微粒子処理、惑星資源処理などの様々な微小重力工業技術の基礎となるほか、空気輸送や流動層など高濃度分散系を利用する地上技術にも有用な知見を提供できる可能性がある。そこで、本報では、落下カプセル式の微小重力環境を用いて振動箱内微粒子の挙動を観察し、粒子層の運動特性、粒子の分散・集合特性などと粒子濃度および振動パラメタとの関係を実験的に検討する。

1999年3月8日受付

* 北海道工業技術研究所
(〒062-8517 札幌市豊平区月寒東2条1丁目2-1)
TEL 011-857-8465
Hokkaido National Industrial Research Institute
(2-17-2-1, Tsukisamu-Higashi, Toyohira-ku, Sapporo,
062-8517)

** 北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
Division of Materials Science & Engineering,
Hokkaido University
(Kita 13-jo Nishi 8-chome, Kita-ku, Sapporo, 060-8628)

Fig. 1 Schematic drawing of vibrating box

2. 実験装置および方法

実験には既報¹⁾と同様の装置と、微小重力環境(約10秒間。地下無重力実験センター、北海道砂川町)を用いた。Fig. 1に示すガラス製の観察箱(幅20mm、奥行20mm、高さ28mm)に試料を装填し、加振器の振動台に固定した。振動を横方向に与えているため、前面の観察方向から見た左右の側壁を振

動壁と呼ぶことにする。試料には、質量基準中位径 $51\mu\text{m}$ のシリカ-アルミナ粒子(タッピングかさ密度 516kg/m^3)を用いた。実験は、所定の条件で観察箱に対する加振を開始した後、カプセルの落下によって微小重力状態に移行する手順で行った。微小重力状態において、スチルカメラによる撮影間隔 $1/3$ 秒の連続撮影およびビデオカメラによる撮影を行い、粒子の分散状態や運動の様子を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 粒子の分散パターンと粒子層の変形

代表的な分散パターンの例として、周波数 $f=75\text{Hz}$ 、変位振幅 $A_d=300\mu\text{m}$ および仕込粒子量 1.2g における観察結果を、Fig. 2に連続写真で示す。常重力下では、粒子は横方向の振動を与えられながら、容器底部に粒子層を形成している($t=0\text{s}$)。微小重力状態が開始するとともに粒子層の振動壁に接した部分から上方への粒子の移動が起る($t=1.4\text{s}$)。層から移動した粒子群は振動壁に沿って上昇した後、天井部分で進路を変え、ほぼ中央部の位置を下降している($t=2.7\text{s}$)。 $t=2.7\text{s}$ における上部右側の拡大写真をFig. 3に示す。ここでは、粒子の分散状態の位置による違いが観察できる。層から飛び出した直後の位置

Fig. 2 Typical pattern of particle dispersion under microgravity : $f=75\text{Hz}$, $A_d=300\mu\text{m}$ and $M=1.2\text{g}$

Fig. 3 Static cluster formation in dispersed particles :
 $t=2.7\text{s}$, $f=75\text{Hz}$ and $A_d=300\mu\text{m}$. A and B :
 moving particles, C : static clusters

(図中A)や、振動壁近傍の位置(B)では粒子はよく分散しているが、振動壁から遠い位置(C)では粒子は集合し、クラスターを形成していることが分る。ビデオ映像によると、振動壁に近いAおよびBの位置では、粒子はランダムな局所運動をしながら移動しているのに対し、Cで見られる粒子およびクラスター群に局所運動はなく、緩やかな速度で振動壁から遠ざかっていた。一般に、微小重力状態において粒子に働く外力が小さくなると、重力の影響を受けない付着力の効果が結果的に現れやすくなると考えられる。粒子層から飛び出した直後の粒子や、振動壁の近傍で連続的に運動エネルギーを与えられて衝突運動している粒子は、単一粒子として運動できる十分なエネルギーを持っているため、分散状態を維持できる。これに対し、振動壁から遠い位置では、粒子間衝突の非弾性により衝突運動伝播が緩和され、ついには付着力により粒子が凝集する。この運動の沈静化と付着力により生じるクラスターを静的クラスターと呼ぶことにする。Fig. 2では、粒子群が振動壁に沿って分散するほかに、分散せずに残った粒子層が静止したままではなく変形を起こす現象も観察できる。変形の様子を追跡するために、Fig. 2における粒子層部分を抽出してFig. 4に示す。粒子層は中央で分かれ($t=2.7\text{s}$ 以降)、時間の経過とともに振動壁を這い上がるように移動した。横振動による層変形および粒子分散様式の機構は、以下の

Fig. 4 Transformation of particle bed :
 $f=75\text{Hz}$, $A_d=300\mu\text{m}$ and $M=1.2g$

ように考えることができる。左右の振動壁の一つについて考えると、強制振動する壁面はその1周期において粒子層を横方向に圧縮する。この圧縮の繰り返しにより粒子層は壁面に沿って上方に変形し、さらに振動壁近傍の層表面では振動により粒子が層から離脱し、分散する。この分散粒子が振動壁に沿って上昇するのは、以下の理由によると考えられる。粒子群は互いに衝突し合うため、理想的には流出箇所すなわち層表面と振動壁の接触部を中心に、分散によって生じた粒子濃度分布を均一化するように等方的に拡散しようとする。しかし、衝突が伝播する過程で、空気抵抗や衝突の非弾性により、濃度分布が解消される前に運動が沈静化する。このとき、振動壁のごく近傍に関しては、壁面に衝突反発した粒子が他の粒子に衝突することで運動量が伝播するため、拡散が持続すると考えられる。したがって、振動壁上では粒子は移動しやすくなり、層表面から離脱した粒子は振動壁面に沿って上昇する。

変位を小さくすると、層はマクロな変形を起こさずに内部の粒子間摩擦で振動を吸収できる。このような場合における粒子群の観察結果をFig. 5に示す。約10秒の実験時間中、層はほとんど変形せず、水平な層表面を保持した。振動壁近くの層表面からわずかに粒子が分離しているが、Fig. 3の場合に比べると、分離直後の状態がより大きな粉体塊になっていることが分る。微小重力下において、粒子層は弱い接触により維持された充てん状態にあると予想され、層表面付近の局所的な充てん構造によっては、振動により周囲との接触をすべて同時に失う部分があると考えられる。Fig. 5における粉体塊は、このように周囲との接触を

Fig. 5 Dispersion behavior in small displacement amplitude : $t=8.7\text{s}$, $A_d=84\mu\text{m}$, $f=75\text{Hz}$ and $M=1.2\text{g}$

失った部分が離脱した結果であると考えられる。

3. 2 粒子層の破壊におよぼす周波数の効果

微小重力下においても粒子層は振動による圧縮に対して変形し、集合体を形成しようとするのが分った。したがって、粉体を分散させるためには、初期充てん構造をいかに破壊するかが重要となる。粒子層が外からの圧縮応力を変形によって緩和するならば、振動周期を短くすることにより、緩和が終了しないうちに再圧縮を行うと、層はもはや変形できずに破壊する

Fig. 6 Frequency effect on bed collapse :
 $t=7.4\text{s}$, $A_d=86\mu\text{m}$, $f=150\text{Hz}$ and $M=1.2\text{g}$

ことが予想される。このような考えに基づき、周波数を2倍の $f=150\text{Hz}$ にして観察した結果を Fig. 6 に示す。変位振幅 A_d が Fig. 2 より小さいにもかかわらず、粒子層が振動壁との全接触部分において崩壊しており、高い周波数が粒子層の破壊に効果的であることを裏付けている。崩壊後、粒子層と振動壁の間に間隙が生じているにもかかわらず、層側面は少しずつ崩壊を続け、粒子の分散が持続した。これは、間隙内部の分散粒子が振動壁から粒子層側面に衝突することで、新たな粒子の離脱を誘発しているためと推察される。

3. 3 動的クラスターの発生

静的クラスターの形成は、分散粒子の振動伝播が途絶え、粒子運動が沈静化することで起こると考えられるが、このような現象を抑制することで、均質な分散状態が得られるかどうかを調べた。良好に振動を伝播

Fig. 7 Dispersion and formation of particle bed in high concentration : $f=75\text{Hz}$, $A_d=300\mu\text{m}$, $M=3\text{g}$, (a) photograph at $t=9.5\text{s}$ and (b) illustrated bed motion in $t=0-8.0\text{s}$

Fig. 8 Cluster and bed-reforming under high concentration : $t=7.4s$,
 $f=75Hz$, $A_d=300\mu m$, (a) $M=0.6g$, $D_w=5.6mm$, (b) $M=0.25g$, $D_w=5.0mm$
 and (c) $M=0.05g$, $D_w=5.0mm$

する方法として、一つには分散している粒子群の濃度を上げて、衝突頻度を高くすることが考えられる。そこで、高濃度系での粒子分散状態を観察した。Fig. 2の状態に対し仕込量を2.5倍に増やした結果をFig. 7(a)に示す。中央の空間が分散粒子でほぼ満たされており、仕込量を増大させることで容器内の分散性は巨視的には向上していることが分る。これは、粒子間距離が小さくなり衝突伝播過程における空気抵抗の寄与が小さくなったため、および衝突頻度が増大したことで振動壁から離れた位置にも十分な運動量が供給されるようになったためと考えられる。ここで細部に注意すると、分散状態は一様ではなく、粒子が樹枝状に集合していることが分る。ビデオ観察では、この樹枝状集合体のそれぞれの枝が、蛇行しながら周囲の枝と合体や分離と思われる激しい動きを繰り返していた。したがって、これらの集合体では、静的クラスターの場合とは明らかに異なり、粒子の出入りが活発に行われているものと推察できる。すなわち、この集合体は、静的クラスターのように粒子同士が静的に接触している状態ではなく、密集してはいるが粒子間の衝突反発を維持している圧縮状態と考えられる。そこで、この集合体を動的クラスターとよび、静的クラスターと区別することにする。

3.4 飽和粒子濃度と新粒子層形成の関係

次に、粒子層の挙動に注目する。Fig. 7(a)で、容器左側に存在する縦長の粒子層は、いったん分散した

粒子群の中から新たに生成したものである。粒子層形状の経時変化を、Fig. 7(b)に示す。微小重力開始後、左右に分割した初期粒子層のうち左側は消失したが、その後、容器の左上隅および左下隅に新たな粒子層が生成した。これらは成長して結合し、左の振動壁との間に隙間を持つ縦長の粒子層になった。この新たに生成した粒子層は、位置や傾きおよび表面形状を少しずつ変えながらも安定に存在し、その周囲では動的クラスターが激しく運動していた。粒子層がどの程度の奥行きを持つかについては確認できなかった。ここで便宜上、系内の既存粒子層と新粒子層以外の空間を分散相と呼ぶことにする。時間の経過とともに既存粒子層の崩壊が続いているので、分散相内の粒子濃度が上昇していることは明らかである。理想的には、分散相粒子濃度は、無粒子状態から系内の全粒子を均等配置した完全分散濃度まで、任意の値をとりうる。しかし、実験結果は、分散相粒子濃度があるところまで上昇すると、分散相から新粒子層が形成され始めることを示している。

そこで次に、初期粒子層の破壊が迅速に行われるように、振動壁の間隔 D_w を5.0~5.6mmに狭めた容器を用いて、分散相粒子濃度が粒子分散状態におよぼす影響を調べた。その結果をFig. 8に示す。仕込量(a) 0.6gおよび(b) 0.25gについては、粒子層高が、微小重力開始からおよそ5秒間、分散によって減少したが、その後はほぼ一定の高さとなった。(c)の仕込量

Fig. 9 Supersaturation of dispersed particle :
 $A_d = 300\mu\text{m}$, $f = 75\text{Hz}$ and $M = 3g$

0.05g については、全ての粒子が分散し、粒子層は消失した。図より、(a) および (b) では樹枝状の動的クラスターが生成しているのに対し、(c) では粒子が一樣に分散していることが分る。ここで、分散相の単位体積あたりの粒子重量である質量濃度 $\rho_d (\text{kg}/\text{m}^3)$ で分散相粒子濃度を評価する。粒子層の縦断面面積は奥行き方向で変化せず投影面積に等しいと仮定し、容器の縦断面面積および各時刻における粒子層の投影面積から求めた分散相体積と分散粒子量より ρ_d を算出した。層高の変動がほぼ定常になってから微小重力終了までの $t = 7.4 \sim 10.0\text{s}$ における ρ_d の平均値は、それぞれ、(a) $58\text{kg}/\text{m}^3$ 、(b) $56\text{kg}/\text{m}^3$ および (c) $19\text{kg}/\text{m}^3$ となり、層が完全に分散してしまう前に層高の減少が停止した (a) と (b) は、仕込量が異なるにもかかわらず、共にほぼ同じ ρ_d になっている。これは、分散粒子群には分散を維持できる限界、すなわち飽和粒子濃度が存在することを示唆している。分散相内の粒子群は、互いに衝突反発を繰り返すと同時に粒子層表面にも衝突し、一部は層表面に堆積する。これは、層の崩壊による新たな粒子の離脱を抑制する効果を持つと考えられる。したがって、層の崩壊が進行して分散相粒子濃度が増大すると、やがて表面での粒子の離脱と衝突・突入がバランスするようになり、層高の変化が止まると考えられ、これが分散相と粒子層からなる系における飽和状態といえる。この飽和状態を与える粒子濃度は、厳密には振動条件によって変化するものと思われるが、ここでは詳細な議論を避け、振動条件によらず (a) と (b) の平均値 $57\text{kg}/\text{m}^3$ を飽和時における ρ_d すなわち飽和粒子濃度 ρ_{ds} として取扱い、分散挙動との関係を調べてみる。Fig. 7 の場合につい

Fig. 10 Conceptual formation of preliminary particle bed in supersaturating particles

て、分散相粒子濃度 ρ_d の微小重力開始後の経時変化を Fig. 9 にプロットした。図中の点線は、仕込量がすべて分散したものとして算出される完全分散濃度である。微小重力開始とともに分散相粒子濃度は上昇するが、およそ 2 秒を過ぎると上昇速度は鈍化し、5.4 秒をピークに下降する。その後は不規則な上下変動が見られる。このような粒子濃度変化の履歴は、図中に実線で示した飽和粒子濃度 ρ_{ds} により、以下のように説明できる。粒子層は、微小重力開始時にこれまで考察してきたような機構によって崩壊し、完全分散濃度に近づこうとする。この条件のように、仕込量が多い、すなわち完全分散濃度がパッキングかき密度に近い場合、微量の粒子層崩壊によっても分散相粒子濃度は急激に増加しやすい。このため、分散相の粒子群は、微小重力開始直後に飽和粒子濃度を大きく越えた過飽和状態になり、互いに非常に近接した状態で衝突反発を繰り返すことになる。分散相での強い衝突反発は層表面からの粒子の離脱を抑制し、分散相粒子濃度の上昇は鈍化する。さらに、過飽和状態の粒子群から新粒子層の形成が起ることで分散相から粒子層側へ粒子が移動し、分散相粒子濃度は低下する。Fig. 9 中に、新粒子層の形成開始が観察された時刻を太矢印で示した。この時刻以後、分散相粒子濃度は低下し飽和濃度の周囲で変化しながら減衰しており、ここでの考察に対応している。新粒子層が形成する機構、特に運動エネルギーが投入されている振動壁近傍で発生する機構については、今のところ明らかではない。過飽和粒子群の中に接触粒子群が発生すると、既存粒子層と同じように分散相側からの粒子の堆積が起り成長に至る可能性がある。接触粒子群が振動壁上に生じるのは、Fig. 10 のモデル図で示すような場合が考えられる。振動壁近傍の粒子濃度が高いとき、壁の移動によって強制的に圧縮された、極めて近接する粒子群が発生する。その結果、衝突頻度が非常に高くなるために粒子群は膨張しようとするが、周囲の濃度によっては迅速に膨張できない場合がある。このような粒子群は、高

Fig. 11 Particle behavior at high frequency :
 $A_d = 300\mu\text{m}$, $f = 95\text{Hz}$ and $M = 3\text{g}$

い衝突頻度のために急速に運動エネルギーを失う。すなわち、振動壁上に存在する粒子群において、エネルギーの消散速度が膨張速度を上回るような場合に接触粒子群が発生し、これが新粒子層形成のきっかけとなる可能性がある。

3. 5 動的クラスター形成におよぼす周波数の効果

3. 3項で、仕込量を増大させた高濃度場によって衝突頻度が増大し、動的クラスターの形成に至ることが分った。これに対し、仕込量一定のものとは、振動周期を短くすることによって、同じく衝突頻度が増大するために粒子群は同様の挙動を示すものと予想される。Fig. 2では、 $f = 75\text{Hz}$ において容器中央部で静的クラスターが発生し、壁からの運動が容器全体に充分伝播していなかった。これに対し、 $f = 95\text{Hz}$ に高めて観察した結果をFig. 11に示す。予想通り粒子は分散相全体に行き渡り、樹枝状の動的クラスターが発達している。これら $f = 75\text{Hz}$ および 95Hz の両者について、分散相粒子濃度の変化を比較した結果をFig. 12に示す。なお $f = 75\text{Hz}$ において $t = 4.0\text{s}$ 以下のデータは画像解析の結果、0付近で変動しており、負の値を与えることもあったため図上から除いた。これによると、 $f = 75\text{Hz}$ では振動による層の崩壊が遅く濃度上昇速度が小さいのに対し、 95Hz では飽和粒子濃度まで到達していることが分る。しかし、この仕込量の場合、完全分散濃度が低いいため、粒子の崩壊速度に対して分散相粒子濃度の上昇速度は小さい。このため、飽和粒子濃度を越えたおよそ $t = 4.5\text{s}$ 以後は勾配が小さくなり、Fig. 9で見られたように分散相粒子濃度が大きく飽和濃度を越えることはない。粒子層の挙動に関する観察結果では、一時的に壁面上に小さな新粒子層が発生することはあっても継続して存在することではなく、新粒子層が時間とともに成長したFig. 7の

Fig. 12 Frequency effect on particle dispersion :
 $A_d = 300\mu\text{m}$ and $M = 1.2\text{g}$

場合とは相違が見られた。この相違は、過飽和状態の有無によるものと考えられる。また、 95Hz において分散相全体におよぶ動的クラスターの発達が見られるのは、約 $t = 4.0\text{s}$ 以降であった。これは、Fig. 12において濃度履歴が飽和量に到達した時刻におおむね対応している。したがって、新粒子層と同様に、動的クラスターについても、飽和粒子濃度への到達が形成のための一つの条件であることを示唆している。

4. 結 言

微小重力下において横振動を与えられた角型容器内の微粒子（質量基準中位径 $51\mu\text{m}$ 、シリカ-アルミナ）層および分散粒子を観察し、振動条件や分散相粒子濃度による粒子運動挙動について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 微粒子層は、周波数 75Hz では振動壁面上で流動変形するが、 150Hz では変形できず振動壁面近傍で破壊する。
- (2) 微粒子群は、粒子層の振動壁接触部分から離脱し、振動壁を沿面分散したのち、容器内部に分散する。周波数 75Hz において、小仕込量では分散相粒子濃度が低く、振動壁から離れた位置では付着力による静的クラスターが発生し、粒子群の運動が沈静化する。これに対し、大仕込量では粒子は衝突反発を行いながら容器内全体に分散し、樹枝状の動的クラスターが発生する。また、小仕込量でも周波数を 95Hz まで高くすると、衝突反発が促進されて動的クラスターの発生に至る。
- (3) 容器内部に振動が充分に伝播している状態では、分散相の粒子濃度には飽和量が存在し、この飽和濃

度を越えると分散相から粒子層への粒子の取り込みが起る。特に、過飽和状態が生じると分散相内に新粒子層の生成が起る。

〔謝辞〕 本研究の遂行にあたり川崎重工業(株)岐阜技術研究所の大嶋政弘氏はじめ諸氏のご協力をいただきました。記して感謝いたします。

Nomenclature

A_d : displacement amplitude	(μm)	ρ_d : particle concentration of dispersion phase	
D_w : distance between vibrating walls	(mm)		(kg/m^3)
f : frequency	(Hz)	ρ_{ds} : saturating particle concentration of dispersion phase	(kg/m^3)
M : loading mass of particle	(g)		
t : microgravity time	(s)		

References

- 1) Ohyama, Y., H. Takeuchi, A. T. Pyatenko, S. Chiba and K. Shinohara : "The Dispersion Behavior of Coarse Particles by Lateral Vibration under Microgravity", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34**, 834-839 (1997)
- 2) Matsusaka, S., K. Yamamoto and H. Masuda : "Micro Feeding of a Fine Powder Using a Vibrating Capillary Tube", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **32**, 83-88 (1995)
- 3) Matsusaka, S., S. Nakamura and H. Masuda : "Behavior of Fine Particles on a Plate under Ultrasonic Vibration", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **36**, 16-22 (1999)
- 4) Matsusaka, S., M. Furutate and H. Masuda : "Distinct Element Simulation of Vibrating Behavior of Adhesive Powder", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **35**, 168-173 (1998)