

鉛直加振した2次元粉粒体粒子の挙動

東京農工大学・工学教育部 金井謙一 (Kenichi Kanai)

鵜川亜希子 (Akiko Ugawa)

佐野 理 (Osamu Sano)

Tokyo University of Agriculture and Technology

1 はじめに

容器内の粉粒体薄層を鉛直方向に加振すると、その条件により粉粒層に様々なパターンが形成される。我々は以前、鉛直加振によって引き起こされる粉粒体薄層の準2次元パターン (ripple, undulation) のいくつかの実験的特性を示し、それらと連続体モデルの比較を行ってきた [1]-[3]。このときパターンの観測に用いた容器のサイズは、粒径に対して横方向に十分大きく、奥行き方向に粒子数個分の大きさを持っていた。これによって、粒子が3次元的に運動する可能性があった。そこでこのあいまいさを取り去るために、奥行き方向の容器壁の間隔と粉粒体パターンの影響を調査する実験を行った。本研究では2次元容器において粉粒体パターンが形成される最小の奥行き層数を調べ、そのときのパターンの特性を実験的に調べることを目的とした。

2 実験

実験装置を以下に示す (Fig1 参照)。粉粒体は粒径 $d=1\text{mm}$, 2mm の鉛球を用いた。粉粒体をアクリル製容器に敷き詰め、奥行き方向の容器の大きさ W を $\tilde{d} \equiv d + \varepsilon$ から $3d$ の間に設定した。ここで $\varepsilon \approx 0.1d$ とした。これは粒子が奥行き方向の容器壁に挟まれて動けなくなることを避けるように考慮したためである。容器のもう一方向の幅 L は十分大きく、アスペクト比 L/W は 30 から 90 である。鉛直層厚 h は $5d$ から $10d$ の間に設定した。また、全ての実験を大気圧下で行った。加振器に取り付けられた容器をファンクションシンセサイザーとアンプにより鉛直方向に $z = a \sin(2\pi ft)$ で加振させ、ハイスピードビデオカメラで粉粒体の運動を撮影し、解析した。

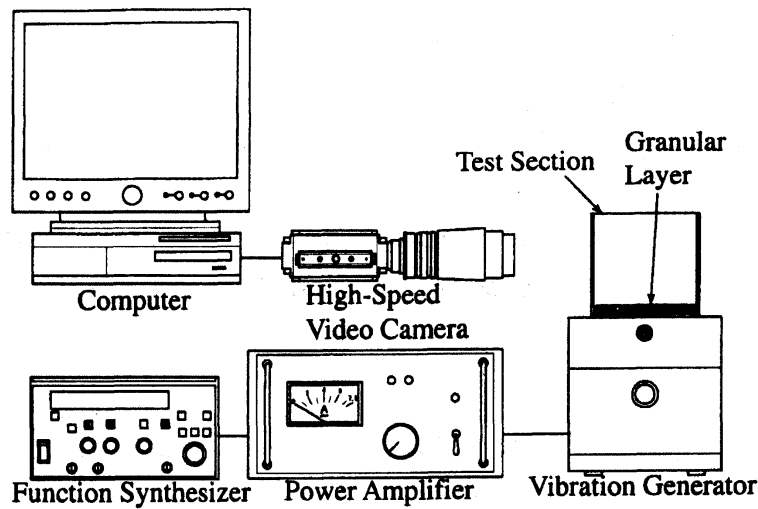


Fig 1: 実験装置概略図.

3 結果

3.1 代表的なパターン

鉛直層厚 h が一定の下で、振動数 f と振幅 a を変化させてパターンを観測した。このとき、奥行き層厚を $3d$, $2d$, \bar{d} とした。それぞれの奥行き層厚において、低振動数かつ高振幅で、外部振動周期の2倍の周期を持つ ripple パターン “ $f/2$ -ripple” を観測した (Fig2(a) 参照)。振動数を大きくし、振幅を小さくすると、外部振動周期の4倍の周期を持つ ripple パターン “ $f/4$ -ripple” を観測した。粉粒層の ripple は水の表面における定在波と似ている。しかし粉粒体が流体の場合と異なる点は、波長に対する波高の割合は同じオーダー以上になり得ることと、層の下部と容器底面の間に大きな空隙領域が周期的に現れることである。さらに振動数を大きくし、振幅を小さくすると、弾性板の曲げのような、外部振動周期の2倍の周期を持つ定常的なパターン “undulation” が観測された (Fig2(b) 参照)。この場合には、層の下部と容器底面の間の空隙領域は ripple パターンの場合より小さい。

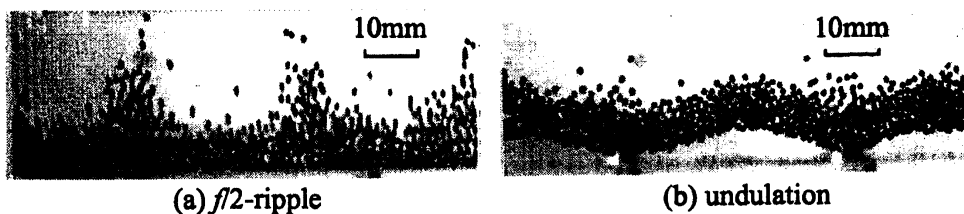


Fig 2: 代表的なパターン.

3.2 奥行き方向の大きさ W の依存性

奥行き方向の容器壁の影響を調べるために $f/2$ -ripple, $f/4$ -ripple, undulation パターンが発生した条件を Fig3 に示す. Fig3 より, $W/d=3, 2, 1$ それぞれにおいてパターンが発生する f と a の領域が重なっていることがわかった. さらに Fig4 より, $W/d=3, 1$ における ripple パターンの波長の大きさを比較すると, それらの値はほぼ同じ範囲に分布していることがわかった. 以上の結果から, 容器奥行き方向 W の大きさに関わらず, 粉粒体は同様の運動をしていると言える.

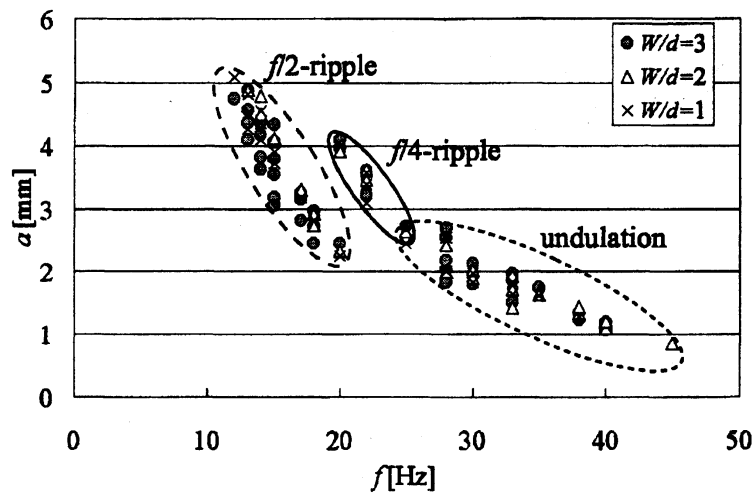


Fig 3: 容器奥行き方向におけるパターンダイアグラム.

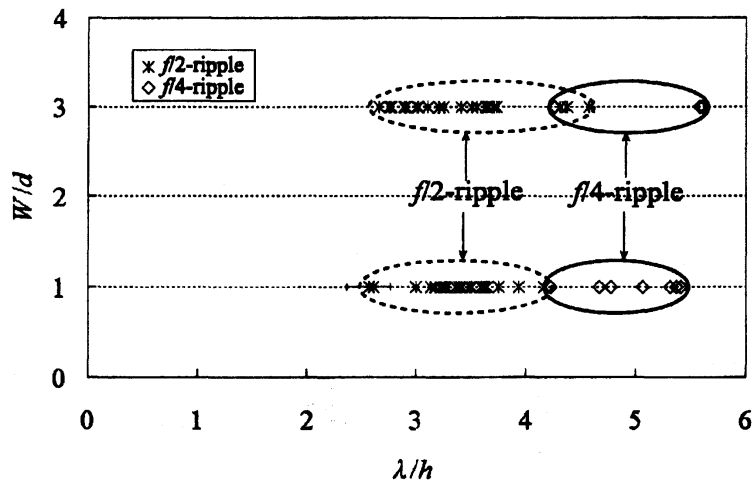


Fig 4: 容器奥行き層数と波長の関係.

3.3 鉛直層厚依存性

Fig5に $W/d \approx 1$ における ripple パターンの鉛直層厚 h 依存性を示す. $f/2$ -ripple の発生領域は $3 \leq \Gamma \leq 4$ であり, $f/4$ -ripple の発生領域は $6 \leq \Gamma \leq 8$ であった. f , a と N がほぼ同じ値で粒径が2倍の ripple は, 横座標の値の範囲も2倍にシフトしている. すなわち, $d=2\text{mm}$ のデータ ($\diamond, \square, \triangle, \nabla$) は $d=1\text{mm}$ のデータ ($\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle, \blacktriangledown$) に対し, 2倍だけ $f^2(h/g)$ の範囲が移動している. また, \oplus ($d=1\text{mm}, N=10.1$) と \odot ($d=2\text{mm}, N=5.5$) は鉛直層厚がほぼ等しいので ripple の出現領域が重なっている. これらは, 鉛直方向の層数よりも鉛直層厚 h の重要性を示しているようである.

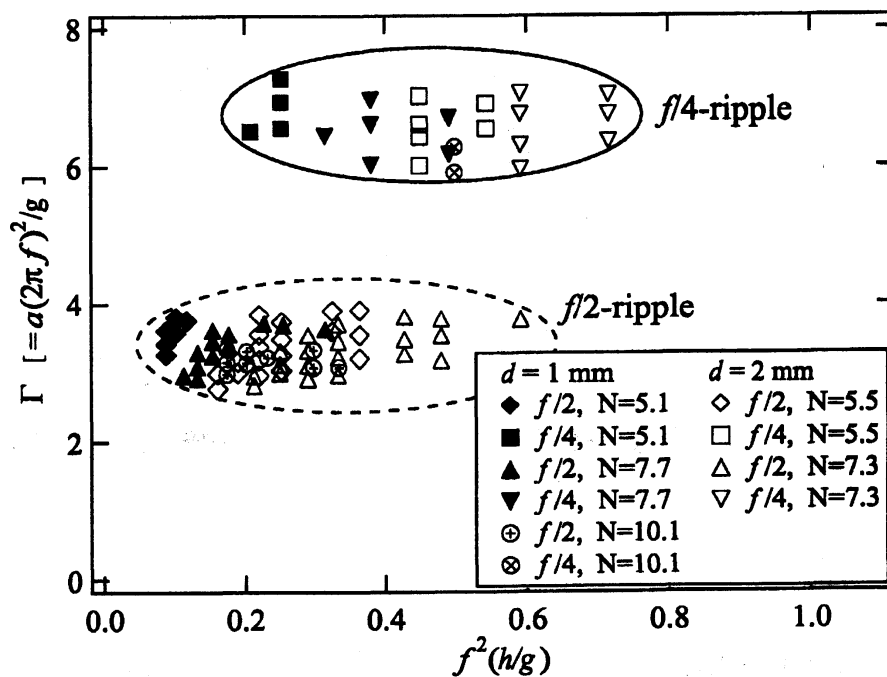


Fig 5: 鉛直層厚の依存性.

3.4 $f/2$ -ripple における粒子の軌跡

$W/d \approx 1$ における $f/2$ -ripple の粒子の軌跡を Fig6 に示す. 撮影に用いたハイスピードビデオカメラのフレームスピードは $1/1000$ であり, Fig6 の (a) から (h) のそれぞれの画像はその4フレームを重ね合わせたものである. つまり, $3[\text{ms}]$ 間の静止画像である. (a) 層全体が下降し, 容器底面に衝突する. (b) 山の部分の粒子は水平方向に動きながら下降する. (c) 層全体が容器底面に持ち上げられ, 層の下部と容器底面の間に空間ができる. 下

降領域と上昇領域があるが、層の厚さはほぼ一定に見える。(d) 谷を形成していた位置に粒子が移動して山となり、層全体の上昇は止まる。(e) 山と谷が入れ替わった後、(a) と同様に層全体が下降し、容器底面に衝突する。(f), (g), (h) はそれぞれ波の山と谷が入れ替わった(b), (c), (d) に相当し、これらの過程は外部振動周期 T の2倍の周期で繰り返す。

粉粒体は、山もしくは谷の領域の粒子は鉛直方向に周期的な上下運動を繰り返し、その中間領域では“8”の字を描き、水平方向と鉛直方向を伴う運動を外部振動周期 T の2倍の周期で繰り返すことがわかった (Fig7 参照)。

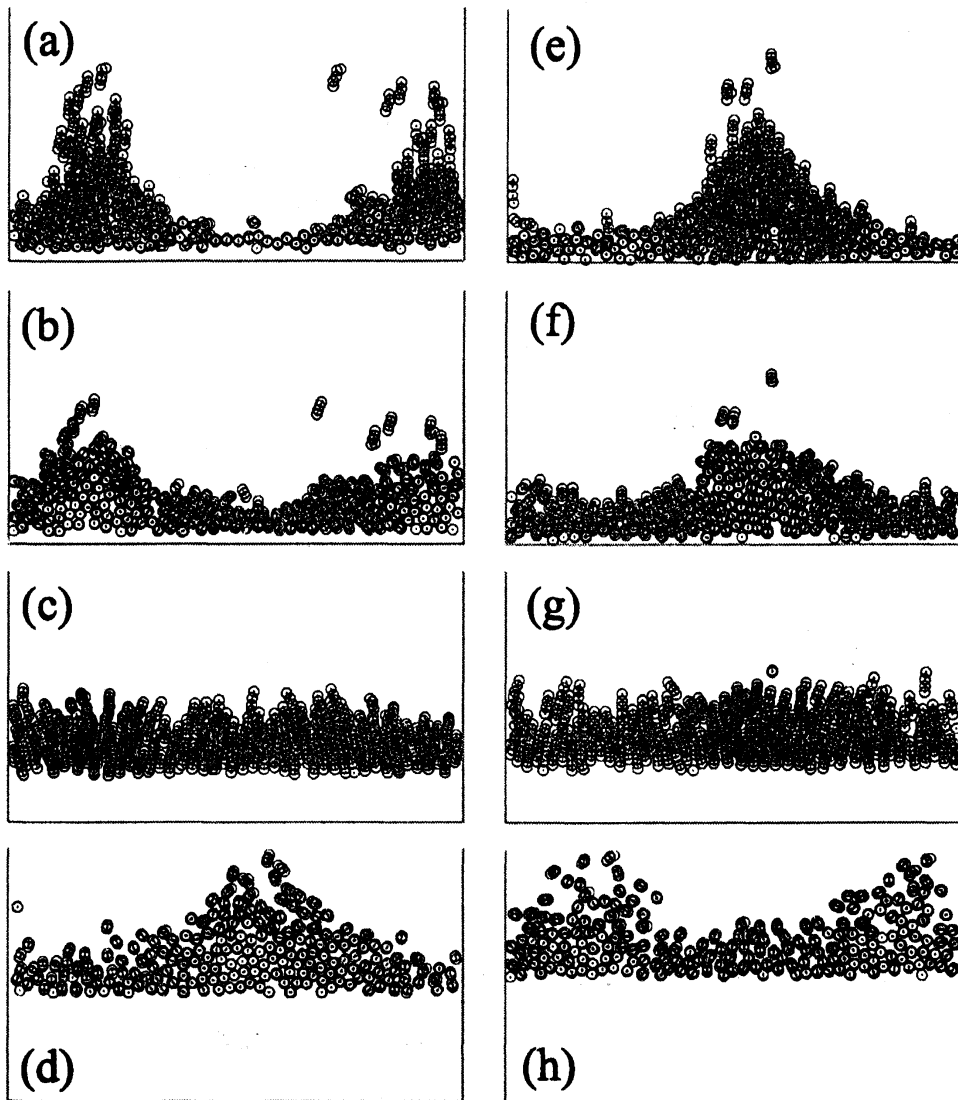


Fig 6: $f/2$ -ripple における粒子の軌跡 ($f=14\text{Hz}$, $a=4.6\text{mm}$, $h=8.7\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$).



Fig 7: 容器に相対的な粒子の軌跡 ($f/2$ -ripple).

3.5 undulation における粒子の軌跡

$W/d \approx 1$ における undulation の粒子の軌跡を Fig8 に示す. 撮影に用いたハイスピードビデオカメラのフレームスピードは $1/1000$ であり, Fig8 の (a) から (f) のそれぞれの画像はその 6 フレームを重ね合わせたものである. つまり, $5[\text{ms}]$ 間の静止画像である. (a) 層の中心部は稠密に集合した粒子が垂直に落下する. 隣り合う粒子の中心を結ぶ線の 1 つは垂直方向になっている. (b) 容器底面に衝突した粒子は容器底面に沿って一列に整列するが, 稠密配置は保ったままである. しかし, 稠密に隣り合う粒子の対角線は斜め方向に変化する. (c) これによって “dilatancy” が生じ, 水平方向への密度波の伝播の原因となるが, 容器壁によって水平方向の距離は制限されているため, 粉粒層は鉛直方向に持ち上げられ, アーチのような構造になる. (d), (e), (f) はそれぞれアーチの山と谷が入れ替わった (a), (b), (c) に相当し, これらの過程は外部振動周期 T の 2 倍の周期で繰り返す.

この場合には, 粉粒体は位置に関わらず鉛直方向に上下運動をすることがわかった (Fig9 参照).

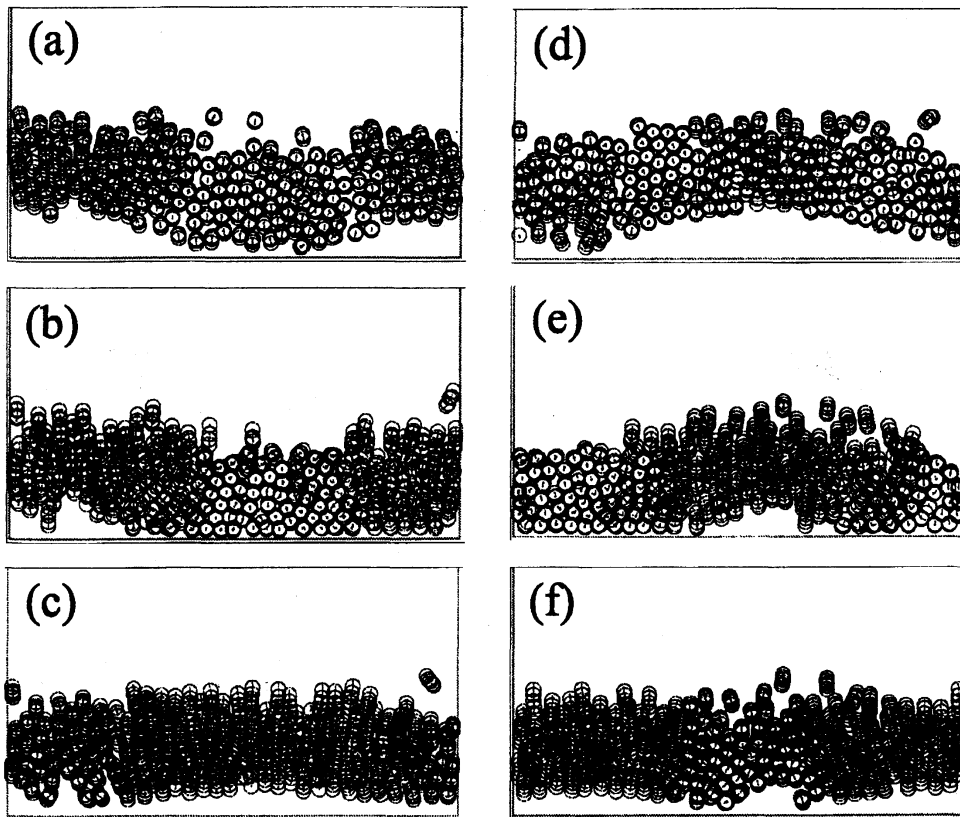


Fig 8: undulation における粒子の軌跡 ($f=40\text{Hz}$, $a=1.2\text{mm}$, $h=5.6\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$).

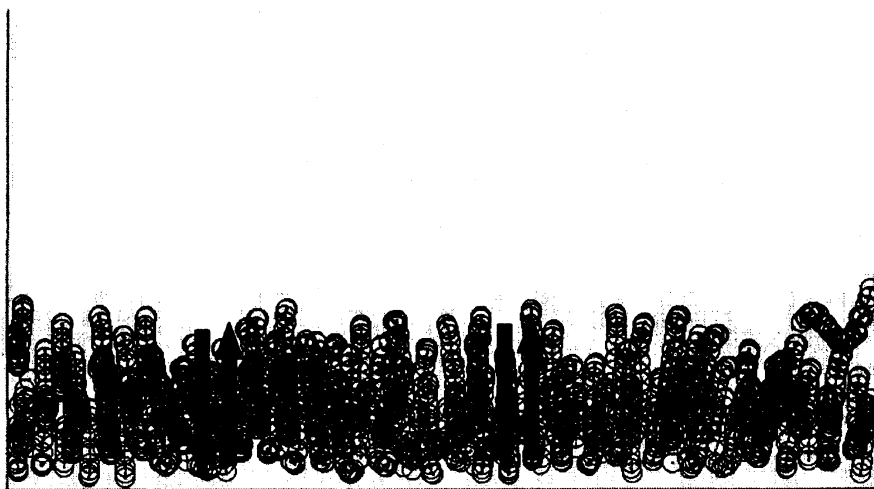


Fig 9: 容器に相対的な粒子の軌跡 (undulation).

4 結論

奥行き層数が1層においても ripple と undulation の粉粒体パターンが観測できた。準2次元容器を用いて行ってきた過去の研究結果と今回の結果を比較すると、同様の条件で同様のパターンが発生するとの結論を得た。これにより、粒子の2次元運動による2次元パターンの形成が確認された。

奥行き層数が1層において ripple パターンが発生するときの Γ の条件は $f/2$ -ripple では $3 \leq \Gamma \leq 4$ であり、 $f/4$ -ripple では $6 \leq \Gamma \leq 8$ であることがわかった。これは3次元容器を用いたときの2次元パターンを観測したときの条件とほぼ同様の結果を得ることができた。

ripple パターンの粒子の軌跡は鉛直方向だけでなく水平方向の運動も伴っており、undulation パターンの粒子の軌跡は主に鉛直方向の運動を伴っていた。

5 今後の課題

奥行き層数1層におけるパターン形成が確認されたことから、その特性を活かした課題に取り組むことが重要である。そこで2次元的なパターンの粒子個々の動きを追跡し、速度分布を定量的に導出することが興味深い。速度分布の導出により、エネルギー分布の導出も期待できる。

また奥行き方向だけでなく、鉛直方向の層厚にも注目していきたい。つまり鉛直方向の層厚を小さくし、パターンが発生する限界の鉛直層数を調べることである。これにより奥行き方向と鉛直方向の2方向の臨界条件が決まる。

本研究では粉粒体として用いた材料は鉛であったが、その他の粉粒体についても調べ、パターン形成に共通したメカニズムを明らかにすることも必要である。

参考文献

- [1] A. Ugawa & O. Sano : *J.Phys.Soc.Jpn.* **71** (2002) 2815.
- [2] A. Ugawa & O. Sano : *J.Phys.Soc.Jpn.* **72** (2003) 1390.
- [3] 鶴川 亜希子 : 鉛直方向に加振した粉粒体薄層のパターン形成, 東京農工大学博士論文 (2003).