

粉体振動層における現象 ～ 最近の実験より ～

静岡大学工学部 青木圭子, 秋山鐵夫, 大石剛之

粉粒体に振動を加えると様々な興味深い現象が現れることは古くから知られている [1]。その中でも粉粒体が対流を伴って山を形成する現象は、実験 [2] およびシミュレーション [3] により研究されているが、その基本的メカニズムに関してまだ完全な合意に至っていない。

粉粒体に垂直振動を加えるという単純な動作が上述の山形成以外にどのような現象を引き起こすかを粒径 0.1mm、振動数 50Hz、常圧下での相図 (図 1) を例にして説明する。粉体振動層においては、粉体に対して重力に逆らってどの程度の振動を加えるかという意味から、一般的に振動の強さを振動加速度 $\Gamma = A(2\pi f)^2$ を重力で割った無次元量 Γ/g で表す。図 1 における横軸はその振動加速度比 Γ/g であり、縦軸は粉体層の厚み H である。

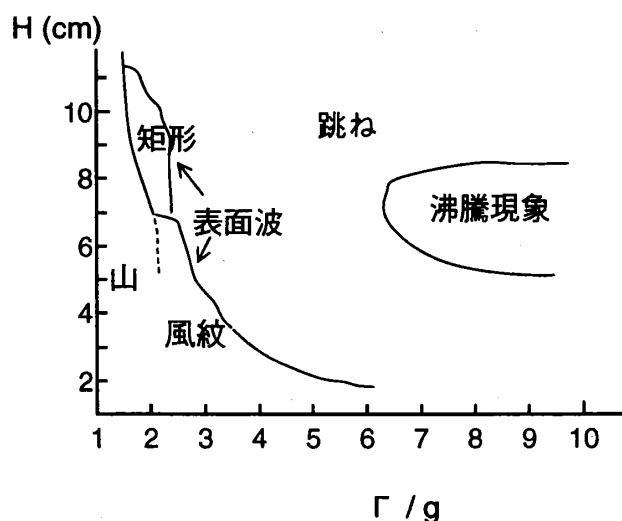


図 1: 粉体振動層における様々な現象 振動加速度比 Γ/g 対層厚 H (平均粒径 0.1mm のガラスビーズ, 振動数 50Hz, 常圧下, 容器は幅 10cm 奥行き 3cm)

粉粒体に加える振動を徐々に強くしていくと Γ/g が 1 を少し越えたところで流動化が起り始め、対流をとまって山が形成される。さらに振動を加えていくと表面波が現れる。粉体層が薄いところ ($H < 5\text{cm}$) では、山の表面に砂漠にできる風紋のような模様が現れる。ここでは、 Γ の上昇とともに山の斜面は徐々に平らになり風紋上の表面波だけ残るが、山が消える Γ は必ずしもはっきりしていないため、図 1 では境界を示していない。さらに Γ を上昇させると表面波が消え表面の粒子が跳ね始める。その表面が跳ねた状態がさらに激しくなると粉体層全体が左右に揺れ始め、粉体層の下から気泡がわき上がってくる現象が起きる。これは加熱による液体の沸騰に様子が似ていることから沸騰現象と呼ぶ。

図 1 からわかるように粉体層の厚み H と加える振動の振幅 A を変えただけでも粉体振動層には様々な現象が現れる。上述したパラメータ以外に粉体挙動の重要なパラメータとして粉粒体の粒径 d がある。この他にも粉粒体の密度、形状、表面物性など粉粒体の集団としての物性を大きく変える可能性のあるパラメータは数多く存在する。これらの影響を調べることは意味深いですが、例えば実際の実験では表面物性を変えずに密度を変えるということは困難なため

シミュレーションとの連携による研究が不可欠である。しかし、我々のガラスビーズの実験から言えることは、粉粒体の粒径 d と 層厚 H および 加える振動を変化させただけでも驚くほど豊富な現象が現れることである。以下にそのひとつである複数の対流ロールが現れる谷対流モードについて報告する。

山が形成される現象については、すでに述べたが、ここで起こる対流は容器の側壁に沿って下降、容器中央で上昇していることが知られている [4]。(円錐容器など容器側壁が外側へ傾きを持っている場合は、逆方向に対流が起きることが知られている [5]。) この山対流モードは、安定性に欠け、山の位置が中央からずれ、最終的には斜面となってしまうことがしばしばある。振動加速度をさらに増加していくと山の高さは低くなりついには平らになる。しかし、この場合でも同じ方向に対流は起きている。粉体が側壁に沿って下降する山対流の領域より振動加速度をさらに大きくしていくと、あるしきい値 Γ_c 以上で対流の方向が逆転する転移が起こる条件を我々は発見した [6]。ここでは、粉粒体は壁付近を上昇、中央で下降、谷を形成する。特に二次元的な対流が観察可能な角形容器 (幅 10cm, 15cm, 20cm, 奥行き 3cm) では、転移の様子は明瞭に観察できる。この転移は、対流の方向が変わったという以上に重要な意味を持つ。このモード内で生ずる対流ロールの形状は非常に安定しており容器幅を倍にすればロールの数も倍になる。しかも、粒子の対流スピードは速く、しきい値の前後で十倍以上違う。容器幅が一定の場合でも山対流-谷対流転移が生ずる Γ よりさらに振動を強くしていくと対流ロールの数が増える転移が起こる。この谷対流モード内で起こるロール数増加の転移は、振動加速度を増加、あるいは減少させるかでしきい値が大きく異なりヒステリシスをもつ。これは、ほとんどヒステリシスの現れない山対流から谷対流転移とは対照的である。

谷対流モードが現れるときの相図の一例 (図 2) を紹介する。平均粒径 0.78mm のガラスビーズについて、横軸に層厚 H 、縦軸に振動加速度 Γ を (a) 増加させたとき (b) 減少させたときにそれぞれ 2(○), 4(□), 6(△), 8(◇) ロールが (a) 現れるときと (b) 消えるときのしきい値を示した。ここでは振動数を 50Hz に固定している。 D は粒子の流れが壁付近で下向きの領域を、 U は上向きの領域をそれぞれ示しており、 U の後の数字はロールの数を示す。谷対流モードは、 $H > 5\text{cm}$ では、 $\Gamma < 10g$ の条件においては現れない。この相図から、一般的に山対流から谷対流 (D から U) への転移ではヒステリシスは小さいが、ロール数増加の転移ではヒステリシスは大きく、層厚とともに減少することが読みとれる。この相図において $U4$ が $H \simeq 42\text{mm}$ で消滅するが、これはロールが縦長になれる限界を示している (図 3 でも同様)。つまり対流ロールは、異方性が 1.68 を越えては縦長にはなれない。 $U6$ や $U8$ についても同じように相図上の消滅点が存在すると思われるが、実験条件の限界 ($\Gamma < 10.5g$) から確認はできない。一方、これらの対流ロールは横方向にはさらに異方的になれるように相図上は見えるが、特に横長のロールができてしまう。その場合には壁付近やロール対の間に粉粒体が動かない領域ができてしまう。

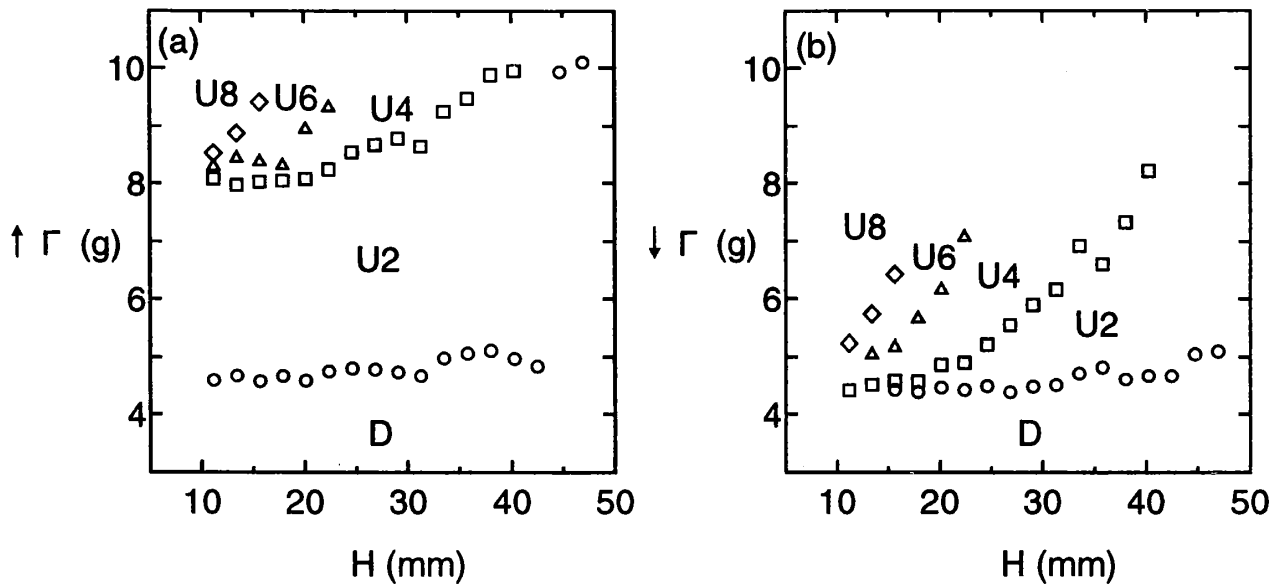


図 2：平均粒径 0.78mm のガラスビーズの相図。振動加速度 Γ を (a) 増加させた場合と (b) 減少させた場合。(振動数 50Hz, 容器幅 10cm)

以上では、山対流が谷対流に直接転移する場合を説明した。粒径をさらに大きくした場合、対流が起きていない乱れた状態を経て谷対流モードに転移する間接転移が起きる。図 3 に平均粒径 0.93mm のガラスビーズの 50Hz における相図を示す。

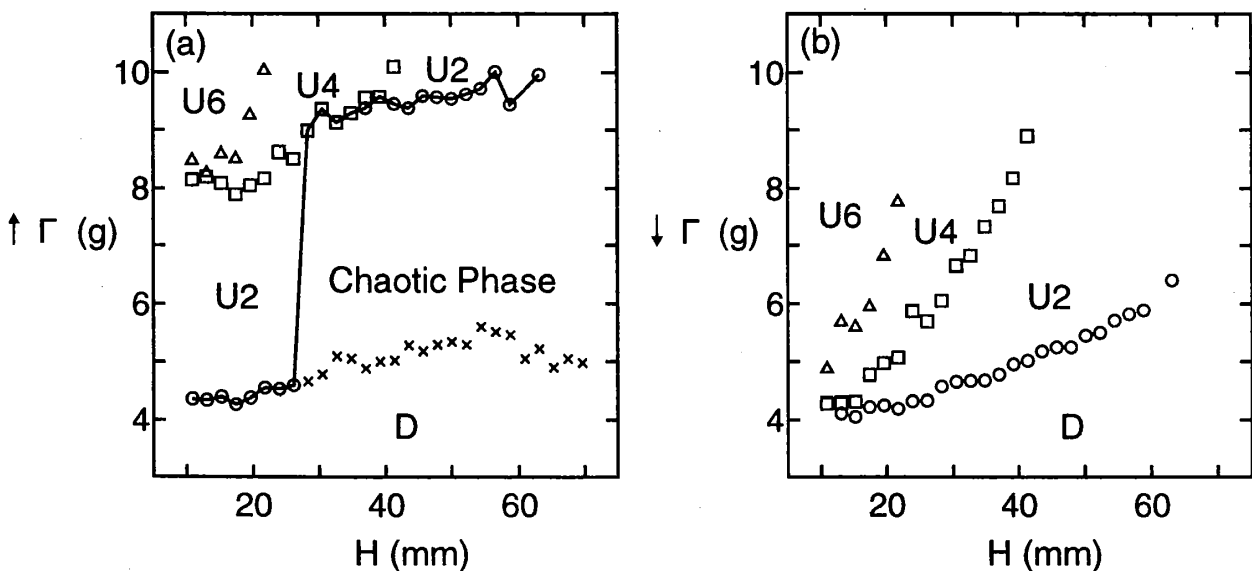


図 3：平均粒径 0.93mm のガラスビーズの相図。振動加速度 Γ を (a) 増加させた場合と (b) 減少させた場合。(振動数 50Hz, 容器幅 10cm)

記号は図 2 と同じものを用いる。ただし、 $\times$ は対流のない乱れた中間相への転移のしきい値を示す。間接転移は、 $H > 28\text{mm}$ 以上で振動加速度 Γ を増加させた場合のみ現れ、いったん

谷対流モードが現れると Γ を下げていった場合、山対流モードに直接転移する。間接転移の際に生ずる中間相は、対流などの規則的な粒子の流れは見られず、前後に現れる対流現象と比べ粉体層から発する音が大きいという特徴を持つ。

さらにガラスビーズの粒径や容器幅、振動数を変えて様々なパラメータ依存性を調べた。粉体層の厚み H が粉体振動層における現象を記述する上で重要なパラメータであることは、図 1-3 からわかるが、残念ながら H を粉粒体の特徴長さ d でスケールするというような単純なことではこれらの系を記述できない。以下のような結果にまとめられる。

1. 谷対流モードへの転移のしきい値 Γ_c は、(容器幅ではなく) 粉体層厚 H に依存する。
2. Γ_c は、粒径が大きくなるに従い小さくなる。しかし、 H/d によってスケーリングされない。
3. Γ_c は、粒径 d が 0.61 mm 以上では振動数依存性をほとんど持たないが、谷対流モードの現れる振動数の範囲は限られる。

安定な対流ロールが現れる条件を横軸を振動数 f 、縦軸を粒径 d にとって示すと図 4 のようになる。ここでは幅 10cm の容器において粉体層の厚みが 2cm, 3cm, 4cm の場合を示し、

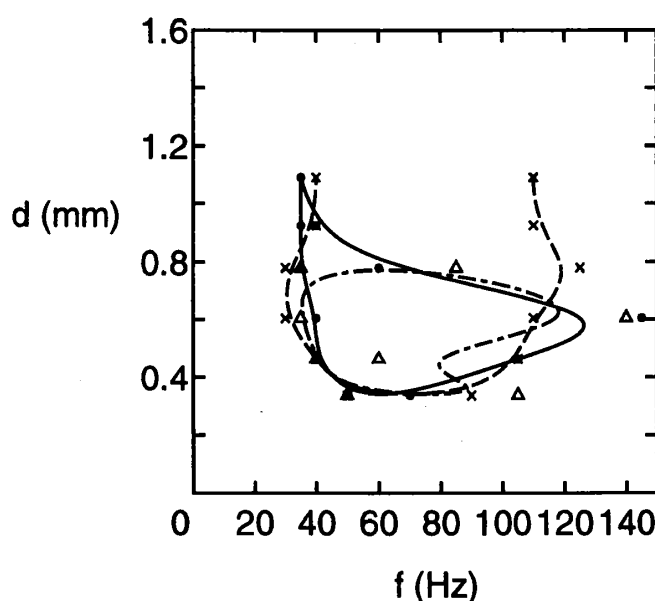


図 4: 安定な対流ロール(谷対流モード)が現れる条件。(層厚 $H = 2\text{cm}$ ($\times$, dot-dash line), 3cm ($\bullet$, solid line), 4cm ($\triangle$, broken line), 容器は幅 10cm 奥行き 3cm)

線で囲まれた内部が安定条件の領域である。これらの領域より高い振動数では、粒子の動きが極端に鈍くなり、低い領域では、層全体が飛び跳ねるためロールが左右非対称になってしまう。層厚が高くなるほど安定な谷対流ロールができる領域は狭まってくるのが図 4 からわかる。常圧下では粒径 $d \geq 0.34\text{ mm}$ でしか谷対流モードは観測されなかったが、減圧下では、さらに小さい粒径 ($d = 0.1\text{ mm}$) でも谷対流モードは観測されている。

以上述べてきたように谷対流モードは、過去に知られてきた粉体の対流現象とは異なり、複数の対流ロールを生じるほど安定で特異な性質を持つ。

粉体振動層において生ずる現象の一部をここでは紹介してきた。これらの実験が、粉体挙動のメカニズムを解明する上で、また、粉粒体を記述する理論的な体系を作る上で一石を投じることができればと願っている。

参考文献

- [1] M. Faraday, Philos. Trans. R. Soc. London **52**, 299 (1831)
- [2] C. Laroche, S. Douady, and S. Fauve, J. Phys. (Paris), **50**, 699 (1989); P. Evesque and J. Rajchenbach, Phys. Rev. Lett. **62**, 44 (1989); J. Rajchenbach, Europhys. Lett. **16**, 149 (1991); E. Clément, J. Duran, and J. Rajchenbach, Phys. Rev. Lett. **69**, 1189 (1992); H. K. Pak, E. Van Doorn, and R. P. Behringer, Phys. Rev. Lett. **74**, 4643 (1995)
- [3] Y-h. Taguchi, Phys. Rev. Lett. **69**, 1367 (1992); J. A. C. Gallas, H. J. Herrmann, and S. Sokolowski, Phys. Rev. Lett. **69**, 1371 (1992); J. Lee, J. Phys. A:Math. Gen **27**, L257-262 (1994)
- [4] E. E. Ehrichs, H. M. Jaeger, G. S. Karczmar, J. B. Knight, V. Yu. Kuperman, S. R. Nagel, Science **267**, 1633 (1995)
- [5] J. B. Knight, H. M. Jaeger, and S. R. Nagel, Phys. Rev. Lett. **70**, 3728 (1993)
- [6] 容器の側壁が垂直でも (転移としてではないが) 逆方向の対流は, 観測されている。
 - (a) 山星浩樹, 静岡大学工学部修士論文 (1990)
 - (b) S. Tamura, T. Aizawa, and J. Kihara, Int. J. Mod. Phys. **B7**, 1829 (1993)(a) の場合, 粉体層が湿度をかなり含んでおり粉体の表面物性が変化したことにより通常と反対方向の対流が観測されたものと思われる。この場合, シミュレーションで (粉体間の摩擦係数 > 粉体と壁との摩擦係数) のときに逆方向の対流が起こるのと同じような解釈ができるのではないだろうか。