

パイプ中を流れる粉体流の空間構造の解析

日本大学理工学部・一般教育物理教室

中原明生

粉粒体は状況に応じて固体と液体の両面の性質を示す。例えば、鉛直にガラス・パイプをたて、その上部に取り付けたホッパーから粉粒体（砂）を流すと、砂は一樣には流れずある条件下では高速道路の渋滞に似た密度波を生じる¹⁾。また、高速道路や粉粒体のパイプ流では $1/f$ ゆらぎが発生する事も報告されている²⁻⁴⁾。本研究では、パイプ中の粉粒体の流れにおいて密度波や $1/f$ ゆらぎが形成される条件を調べるために、パイプ中の粉粒体の体積比（packing fraction） p を連続的に変化させる実験をおこない、粉粒体の流れの変化を調べる。

実験装置としては、ガラス・パイプ（長さ 700mm、内径 9mm）を鉛直に立て、上部にはホッパーを取り付け、下部は三角フラスコに直接差し込んだ。実験には大きさのそろった金属球（直径 1.7mm の鉛玉）を粉粒体として使用した。金属球を使用したのは、粉粒体の大きさをそろえるため、粉粒体の形を単純に球にするため、それに、粉粒体間の摩擦を極力おさえるためである。パイプや三角フラスコ中は液体（水や粘性の異なるシリコン・オイル）でみたし、液体の粘性を変える事によって粉粒体の周りに存在する流体の動きを制御しやすくした⁵⁾。

パイプ中を占める金属球の体積比 p を変化させるため、もともと備え付けられているホッパーの上に内径のさらに小さい第二のホッパーをのせ、第二のホッパーの内径を変化させる事によって体積比 p を調節した。実験の測定の際には、高速度ビデオカメラを使った画像取り込み以外にも、パイプの両側にレーザーと光センサーを水平に取り付け、透過光の強度の時間変化を記録しその時系列データをフーリエ解析（FFT）した。

図 1 は体積比 p を変化させた時の粉粒体の流れの時空パターンの変化である。鉛直下向きの軸 x はホッパーからの距離 $x(\text{mm})$ を、水平右向きの軸 t は時間を表している。各金属球は重力によって落下するから、図 1 においてはすべての粉粒体は左上から右下へと移動している。体積比 p が小さい時 ($p < 0.18$) は粉粒体は自由に一樣に流れるが、体積比 p を上げていくと流れは自由流から渋滞流へと変化していき、それに伴ってスラグと呼ばれる密度波が発生する ($p > 0.18$)。自由流・渋滞流転移の転移点近傍 ($p = 0.18$) では、スラグが現れるがこれらは不安定であり、生成消滅を不規則に繰り返す。

返している。

次に、高速度ビデオカメラや光センサーを使って得られた密度ゆらぎの解析結果を示す。まず、空間構造であるが、図 2 (b) では取り込んだ画像をフーリエ解析する事によって、散乱関数 $S(k)$ を波数 $k(1/m)$ の関数として表示した。

体積比が大きい渋滞流領域 ($p > 0.18$) では散乱関数 $S(k)$ は特徴的な波数でピークを持つ。この波数 k は大きさが $100 \sim 200(1/m)$ であり、この大きさは渋滞流で形成されるスラグの大きさやスラグ間の平均距離とほぼ一致している。一方、マクロな構造が形成されない自由流領域 ($p < 0.18$) では、散乱関数の関数形はピークやべき則などの特徴的な構造を全く持たない⁶⁾。

時間構造であるが、図 2 (a) は測定場所を $x=400\text{mm}$ に固定した際の密度ゆらぎの時系列データを FFT 解析したものであり、パワースペクトル $P(f)$ を周波数 $f(\text{Hz})$ の関数として表示している。 $f=100(\text{Hz})$ の縦の実線はこの実験系の解像度を表しており、これより高周波数成分は測定できない。また、低周波数領域 ($f < 0.5\text{Hz}$) ではすべての体積比 p において白色雑音が見られる。

体積比 p が小さい時 ($p < 0.18$) はパワースペクトルの波形は 1Hz 近傍では平らであり (白色雑音)、これは図 1 からわかるようにマクロには渋滞 (スラグ) が形成されておらず、そのため長時間相関もない事を表している。一方体積比が大きい渋滞流領域 ($p > 0.18$) では関数形は f に関して減少関数であり、渋滞の発生により長時間相関が存在する事がわかる。詳しく見ると 3Hz 近傍で下に凸になるように関数形が折れている。これは $0.5\text{Hz} < f < 3\text{Hz}$ 領域の低周波数成分が相対的に強い事を表しているが、スラグのサイズと速度からの計算により、この周波数領域はマクロなスラグの通過時間に対応していることがわかった。

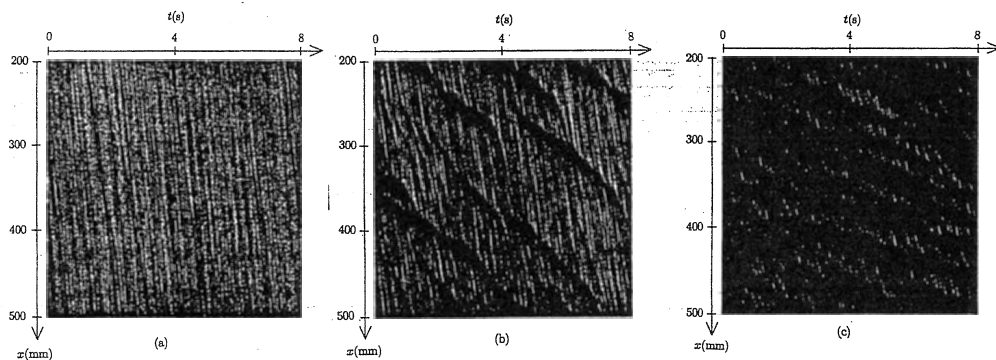


FIGURE 1. Spatiotemporal structures of granular flow with various mean packing fraction p . The value of p is 0.05 (free-fall) in (a), 0.18 (intermediate packing fraction) in (b), and 0.36 (slugging) in (c), respectively (5).

最後に、図 2 (a) より自由・渋滞転移点近傍($p=0.18$)ではパワースペクトル $P(f)$ が $1/f$ ゆらぎに従う事がわかる。ところが図 2 (b) によると散乱関数 $S(k)$ 自体はべき則には従わない。以上の結果より、粉粒体のパイプ流で現れる $1/f$ ゆらぎはの発生は自由流・渋滞流転移に関連しているが、単なる臨界現象的な時空ゆらぎではない事を表している。

参考文献

- 1) Shick, K. L. and Verveen, A. A., Nature 251, 599-601 (1974).
- 2) Musha, T. and Higuchi, H., Jpn. J. Appl. Phys., 15, 1271-1274 (1976).
- 3) Peng, G. and Herrmann, H. J., Phys. Rev. E49, R1796-1799 (1994).
- 4) Moriyama, O., Kuroiwa, N., Matsushita, M., and Hayakawa, H., Phys. Rev. Lett. 80, 2833-2836 (1998).
- 5) Nakahara, A. and Isoda, T., Phys. Rev. E55, 4264-4273 (1997).
- 6) Nakahara, A., AIP Conference Proceedings 519, 182-184 (2000).

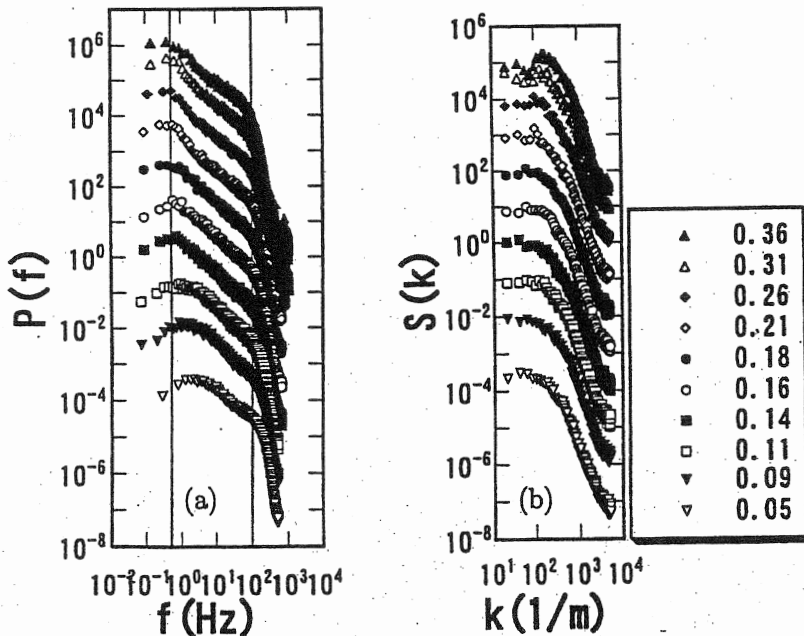


FIGURE 2. (a) Power spectra of the density fluctuation, $P(f)$, as functions of the frequency f with various packing fraction p . (b) Structure factor of the density fluctuation, $S(k)$, as functions of the wave vector k with various packing fraction p . In (a) and (b), the data are shifted vertically for clarity.

