

粉粒体の流動化—実験からの考察と理論的記述の試み [1]

青木圭子

(株) 計算流体力学研究所

1 粉粒体の特徴・性質

1. 粉粒体とは？

- 構成粒子が比較的重く、熱揺らぎを無視できる
- 構成粒子間には付着力や吸着力が働かない
- 構成粒子間に摩擦力 (エネルギーの散逸) が働く

一般には吸湿性のない粒径 $d > 0.1\text{mm}$ の "grain"

熱平衡から遠く離れた散逸系

↓

★ 重力の下でどのように振る舞うか？

2. 性質

- 静的性質 – 外力が与えられない限り動かない
- 動的性質 – エネルギーの散逸を伴う

2 粉粒体の諸現象

1. (動的過程によって生ずる) 静的な状態

- 円錐形の砂山の底部の圧力分布 [2] (図 1)
- 貯槽 (サイロやホッパー) 内あるいは地層・地盤のストレス分布 [3]

2. 興味深い (静的な) 終状態が生ずる動的過程

- サイズ効果による偏析 [4]

- ホッパー流出口の詰まり

3. (準) 定常的に存在する動的な状態

- 粉体振動層に現れるパターン (波、oscillon) [5, 6]
- 山形成 [7]・対流ロール [8, 11]

4. 流体との相互作用による

- 砂漠における風紋の形成 [9]
- 粉体流動層 [10]

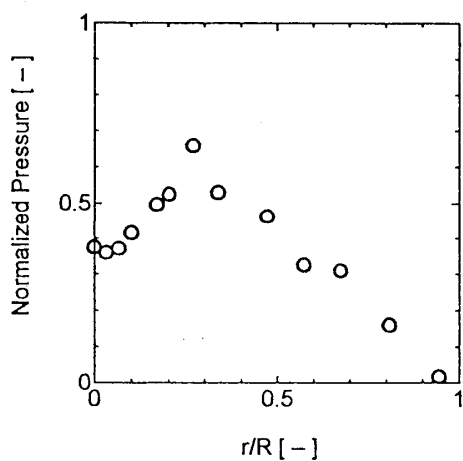


図1：円錐形の砂山の下の圧力分布

r は頂点直下からの水平距離

$d = 0.65\text{mm}$ (静岡大学秋山研提供)

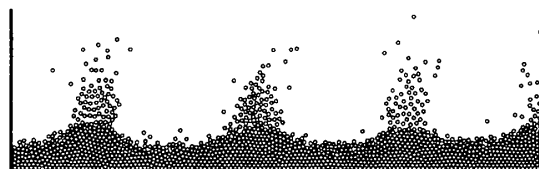


図2：粉体振動層に現れる波 [6]

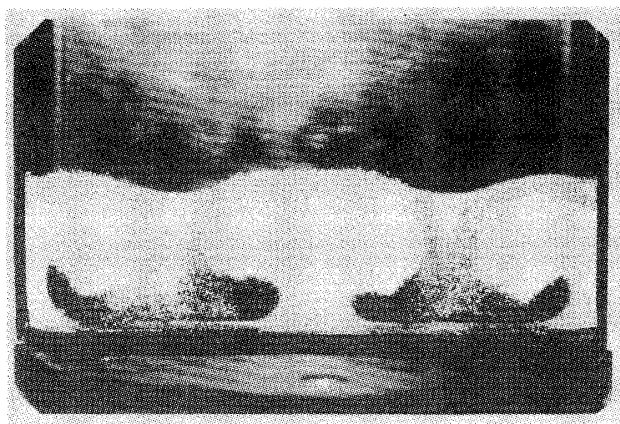


図3：粉体振動層に現れる対流ロール [8]

3 粉体挙動を理論的に捉えることの難しさ

- (空間・時間) スケールが分離できない
- (a) 流入エネルギー $\Rightarrow \begin{cases} (b) \text{運動エネルギー} \\ (c) \text{散逸エネルギー} \\ (d) \text{その他 (エネルギーの溜め込み)} \end{cases}$

時間的・空間的に (a),(b),(c) とともに一定であることはまれ

$$(c) = f(\rho, \epsilon_k, \gamma)$$

ρ : (局所的な) 密度

ϵ_k : // 運動エネルギー

γ : (粒子間の) 散逸係数

(b),(c) は互いに依存関係をもつ

$\Downarrow$

ヒステリシスの存在

- 粉体の性質をどのように記述したら良いか？
 - ★ 静的な物性 $\xleftrightarrow{\text{不連続}}$ 動的な物性
 - ★ 1 粒子 (2 粒子相互作用) の物性 $\xleftrightarrow{?}$ 多粒子の物性
- 参照系の欠如
 - c.f. 熱平衡近傍の非平衡系なら 熱平衡状態 を参照系として使える

4 物理学的記述の試み

- 定常状態 の時間平均を考えると (b) と (c) は分離できるか？

((b) と (c) は一定の関係として記述できるか？)

答え : 一般的にはまだない

$\Downarrow$

系全体の空間・時間平均 - 対流ロールに関しては O.K. [11]

★ 対流ロールパターンを再現し輸送係数を求めた

粉粒体の集団運動の性質を特徴づける量： D/α

コントロールパラメータ：

$$A = \frac{\Gamma}{(D/\alpha)} = \frac{a(2\pi f)^2 \alpha}{gD} \quad (1)$$

(不安定化させる振動力 $Ma(2\pi f)^2$ と 安定化させる力 MgD/α の比)

c.f Rayleigh 数

D : 自己拡散係数

α : エネルギー拡散係数

Γ : 振動加速度比

a : 振動の振幅

f : 周波数

M : 粉体層の有効質量

- 粒子にサイズ分散がある系: 熱平衡系固-液相転移との類似の振る舞い [12]
- 実験と縮退したシミュレーション空間の対応付け [6]
- 2粒子間の散逸係数 γ と粒子径 D の関係 [6]

5 今後の課題

- 静的な物理量と動的な物理量の関連付け
- 1粒子の性質と多粒子の集団運動の性質の関連付け
- *etc. ...*

参考文献

- [1] 青木圭子、固体物理第33巻第12号 979-985 頁 (1998); J.B.Knight, C.G. Fandrich, C.N.Lau, H.M.Jaeger, S.R. Nagel, Phys. Rev. E **51** (1995) 3957.
- [2] S.B.Savage, in *Powders & Grains 97*, edited by R.P. Behringer and J.T. Jenkins (Balkema, Rotterdam, 1997); in *Physics of dry granular media - NATO ASI Series*, edited by H.J.Herrmann, J.-P. Hovi, and S.Luding (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998); F.H.Hummel, E.J.Finnan, Proc. Instn. Civil Eng. **212** (1920-21) 369; 上滝具貞、森山龍一、粉体工学研究会誌 **16** (1979) 184; J. Smid, J.Novosad, I. Chem. E. Symposium Series **63** (1981) D3/V/1; J. Smid, Grundl.Landtechnik Bd **33** (1983) 72; R. Brockbank, J.M.Huntley, R.C.Ball, J. Phys. II France, **7** (1997) 1521; S.F. Edwards, C.C. Mounfield, Physica A **226** (1996) 1, 25; J.P. Wittmer, P. Claudin, M.E.Cates, J.-P. Bouchaud, Nature, **382** (1996) 336; M.E.Cates, J.P.Wittmer, Physica A **249** (1998) 276; H.-G. Matuttis, *to be published in Granular Matter* (1998); H.-G. Matuttis, A. Schinner, *preprint* (1998); H.-G. Matuttis, A. Schinner, K. Kassner, T. Akiyama, K.M.Aoki, J. Aoki, S. Takahashi, *in preparation* (1999)
- [3] H.A. Janssen, Z. Ver. dt. Ing. **39** (1895) 1045; 青木隆一、森芳郎、化学工学 **24** (1960) 926; 青木隆一、綱川浩、粉体工学研究会誌 **2** (1965) 189; 上滝具貞、富田侑嗣、森山龍一、粉体工学研究会誌 **10** (1973) 131; 上滝具貞、森山龍一、粉体工学研究会誌 **10** (1973) 550; 上滝具貞、森山龍一、粉体工学研究会誌 **14** (1977) 609.
- [4] M.B.Donald, B. Rosman, Br. Chem. Eng. **7** (1962) 749; J.C. Williams, Fuel. Soc. J., Univ. Shef. **14** (1963) 29, Powder Technol. **15** (1976) 245; J.A. Drahn, J. Bridgwater, Powder Technol. **36** (1983) 39; A. Rosato, K.J. Strandburg, F. Prinz, R.H. Swendsen, Phys. Rev. Lett **58** (1987) 1038; P.K. Haff, B.T.Werner, Powder Technol. **48** (1986) 239; R. Jullien, P. Meakin, A. Pavlovitch, Phy. Rev. Lett. **69** (1992) 640, *ibid*, **70** (1993) 2195; J. Duran, J. Rajchenbach, E. Clément, Phys.Rev. Lett. **70** (1993) 2431; T. J. Fiske, S.B. Railkar, D.M. Kalyon, Pow-

- der Technol. **81** (1994) 57; M. Nakagawa, Chem. Eng. Sci. **49** (1994) 2540; T. Pöschel, H.J. Herrmann, Europhys. Lett. **29** (1995) 123; G. Metcalfe, M. Shattuck, Physica A **233** (1996) 709; K.M. Hill, A. Caprihan, J.Kakalios, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 50; L. Vanal, A. D. Rosato, R. N. Dave, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 1255; J. A. C. Gallas, H.J. Herrmann, T. Pöschel, S. Sokołowski, J. Stats. Phys. **82** (1996) 443; 大山恭史、内館いずみ、粉体工学会誌 **35** (1998) 218; S. Sakamoto, J. J. Phys. Soc. (1998)
- [5] 古くは、M. Chladni の行った実験として M. Faraday が紹介している。Phil. Trans. R. Soc. London **52** (1831) 299; S.Douady, S. Fauve and C. Laroche, Europhys. Lett **8** (1989) 621; A. Goldshtein, M. Shapiro, L. Moldavsky, M. Fichman, J. Fluid. Mech. **287** (1995) 349; F. Melo, P.Umbanhowar, H.L. Swinney, Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 172, *ibid*, **75** (1995) 3838; E. Clément, L. Vanel, J. Rajchenbach, J. Duran, Phy. Rev. E **53** (1996) 2972; P.B. Umbanhowar, F. Melo, H.L. Swinney, Nature **382** (1996) 793; S. Luding, E. Clément, J.Rajchenbach and J.Duran, Europhys. Lett. **36** (1996) 247; T. H. Metcalf, J.B. Knight, H.M. Jaeger, Physica A **236** (1997) 202; 佐野理、京大数理研講究録 **1030** (1998) 63; P. B. Umbanhowar, F. Melo, H.L. Swinney, Physica A **249** (1998) 1; D.C. Rapaport, Physica A **249** (1998) 232.
- [6] K.M. Aoki, T. Akiyama, Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 4166; *ibid*, **79** (1997) 4714
- [7] 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); Y-h. Taguchi, Phys. Rev. Lett. **69**, 1367 (1992); J. A. C. Gallas, H. J. Herrmann, and S. Sokołowski, Phys. Rev. Lett. **69**, 1371 (1992); J. Lee, J. Phys. A:Math. Gen **27**, L257-262 (1994). T. Akiyama, K.M.Aoki, K.Yamamoto, T.Yoshikawa, Granular Matter **1**, pp.15-20 (1998)
- [8] K.M.Aoki, T.Akiyama, Y. Maki and T. Watanabe, Phys. Rev. E **54** (1996)

- 874; K.M.Aoki, T. Akiyama, K.Yamamoto, T.Yoshikawa, Europhys. Lett. **40**, 2 (1997) 159.
- [9] K.M.Aoki, T.Akiyama, Prog. Theor. Phys. Supplement **130** (1998) 45; Phys. Rev. E **58**, 4(1998) 4629.
- [10] H. Nishimori, Y. Ouchi, Int. J. Mod. Phys. **B7** (1993) 2025, Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 197; R. S. Anderson, K.L. Bunas, Nature **365** (1993) 740.
- [11] 粉体工学便覧, 粉体工学会編 (日刊工業新聞社、昭和 6 1 年) ; Y. Tsuji, T. Kawaguchi, T.Tanaka, Powder Technol. **77** (1993) 79; 小松輝久、物性研究 60 (1993) 103; J.G. Yates, D.J. Cheesman, Y.A. Sergeev, Chem. Eng. Sci. **49** (1994) 1885; Yu.A. Buyevich, Sh. K. Kapbasov, Chem. Eng. Sci. **49** (1994) 1229.
- [12] K.M. Aoki and N.Ito, Phys. Rev. E **54** (1996) 1990.