

東京大学理学部物理学科

五月祭企画展示

Physics Lab. 2011

2011/5/28(土)、29(日)

粉体班

Granular Physics



編集者: 日向 理彦

目次

■ 粉体力学とパターン形成 — 中口 悠輝	5
1 粉体の意義 *	5
1.1 ミクロとマクロ	5
1.2 平衡状態を超えて	5
1.3 マクロ粒子、つまり“粉”	6
2 パターン形成とは *	6
2.1 パターンの種類	6
2.2 物理的共通点	7
3 粉体におけるパターン形成の歴史 **	7
3.1 heaping	7
3.2 パターンとオシロンの発見	7
3.3 理論	8
4 パターン形成 実験 *	8
5 パターン形成 シミュレーション **	9
参考文献	10
■ ブラジルナッツ効果: 研究の現状と粉体班での実験 — 白石 直人	14
1 ブラジルナッツ効果・概説 *	14
1.1 現象の説明	14
1.2 名前の由来	14
2 既存研究の現状 *	14
2.1 既存研究では何を調べているか①: 実験によるアプローチ	14
2.2 既存研究では何を調べているか②: ブラジルナッツ効果のメカニズム	15
2.3 既存研究では何を調べているか③: 理論によるアプローチ **	15
2.4 既存研究の現状・まとめ	15
3 粉体班での実験内容 *	16
3.1 調査対象	16
3.2 実験のセットアップ	16
3.3 実験結果	17

4	実験結果の考察 **	17
4.1	考察の方向性	17
4.2	境界 C の変化の要因	18
4.3	境界 B の変化の要因	18
4.4	まとめ	18
■ 粉体のマクスウェルの悪魔と粉体時計 — 唐木田 亮		19
1	イントロ *	19
2	粉体のマクスウェルの悪魔 *	19
2.1	現象の説明	19
2.2	実験結果	20
2.3	部屋が3つ以上のときの悪魔	21
3	粉体時計 *	21
3.1	現象の解説	21
3.2	実験結果	22
3.3	粉体や部屋の数が多い場合	24
4	理論の解説 **	25
4.1	粉体のマクスウェルの悪魔	25
4.2	粉体時計	26
4.3	〈コラム〉交通のマクスウェルの悪魔?	27
■ 粉体力学のコンピュータシミュレーション — 日向 理彦		28
1	コンピュータシミュレーションと粉体力学 *	28
1.1	シミュレーションの実験に対する優位性	28
1.2	シミュレーションの限界	28
2	分子動力学法 **	29
2.1	容器の形状の設定	29
2.2	初期値の設定	30
2.3	力とトルクの計算	30
2.4	Δt 秒後の状態の計算	32
2.5	効率的な計算法	32
3	様々な計算法 *	33
3.1	イベント駆動	33
3.2	モンテカルロ法	33

3.3	セル・オートマトン	34
3.4	理論式を用いる方法	34
	参考文献	35
	■ 粉体の応用例 — 西口 大貴	36
1	様々な応用例 *	36
1.1	家庭に潜む粉体物理学	36
1.2	ロボット工学への応用	36
1.3	地球物理学的応用	38
1.4	宇宙物理学的観点	39
1.5	ナノスケールの粉体物理学	39
1.6	自己駆動粒子系	40
2	参考文献・図引用元	41
3	謝辞および班員紹介	41

粉体力学とパターン形成

中口 悠輝

1 粉体の意義*

1.1 ミクロとマクロ

通常の力学では、エネルギーは保存します。例えば、ボールが坂を転がり落ちれば、高さが下がっていく代わりに加速していきます。これは「位置エネルギーが運動エネルギーになった」結果である、と習ったかもしれません。

一方、やりとりされるエネルギーの形には、我々のマクロ（巨視的）な視点から見ると、ミクロ（微視的）すぎてすぐにはよく分からない形もあります。そのようなものは「熱エネルギー」と呼ばれています。マクロなエネルギーがミクロなエネルギーへと格が下がってしまうと、本当はエネルギーが保存しているのに、我々の眼には一見エネルギーが失われて見えます。このことを物理では「散逸」と言います。例えば、ボールを2つ衝突させるとボールは遅くなってしまい、マクロには一見エネルギーが減って見えます。しかし、ボールやまわりの空気の温度がわずかに上がっていたりと、ミクロにはエネルギーはきちんと保存しているのです。

このようなミクロなエネルギーとマクロなエネルギーの関係を定量的（数式を用いて具体的）に扱ったのが「熱力学」です。熱力学によって、「ミクロなエネルギーをマクロなエネルギーに格上げするのは難しい（熱力学第二法則）」と分かりました。これは、マクロなエネルギーがミクロなエネルギーへと格を下げると、我々にとってよく分からなくなるので、その分だけ「情報」が失われてしまう、ということが本質です。このように、熱力学は「世界は不可逆であり、未来と過去は対称でない」ことを主張します。この事実、力学（や量子力学）のようなミクロな理論ではいまだにうまく説明できていません。

1.2 平衡状態を超えて

いかなる物も、隔離して放置しておくとも情報がどんどん失われていきます。情報が可能な限り失われ、それ以上情報が失われなくなると、マクロには変化が無くなったように見えます。このような状態を「平衡状態」と言います。例えば、水槽の水の右側だけ熱湯にしておくと、「右側の方が熱い」という情報が失われていき、そのうち、全体がぬるま湯であるという平衡状態に落ち着きます。ミクロには、ぬるま湯であろうと粒子の運動によって時間変化しているのですが、マクロには情報が少なすぎて時間変化が見られないのです。

このような平衡状態については、熱力学は力学（や量子力学）のようなミクロな理論からうまく説明されました。その説明は「統計力学」と呼ばれています。しかし、平衡状態でない状態や、なぜどのようにして平衡状態に達するのか、についてのミクロからの理解は、いまだ完全ではありません。それらについて理解しようという試みは、物理学の最先端の分野の一つとなっています。

余談ですが、自然はなぜか階層性を持って現れ、ある階層をより基本的な階層から説明することは（もし原理的には可能であるとしても）人間にはなかなか難しいため、その階層間のギャップを埋めようという試みはいろいろな分野で最先端となっています。例えば、認知脳科学における心理学と大脳生理学のギャップ、経済

学におけるマクロ経済学とミクロ経済学のギャップなどがその例です。物理学においても、未だに化学（高分子のふるまい、等）は物理学から完全には説明できていませんし、そもそも原子核物理は素粒子論から完全には説明できてはいません。

1.3 マクロ粒子、つまり“粉”

一口に非平衡といっても、その範囲はあまりに膨大です。流体や生命、気象や天体など世の中の何もかもが非平衡で、どれもかなり複雑です。その中で、粉体力学は扱う範囲を現実的に絞った分野です。

粉体は、他の非平衡なシステムよりも扱いやすいシステムです。使う粒子をマクロにただけであり、従来の物理学における気体分子運動論や流体力学の、自然な延長として解釈できます。他の多くの非平衡なシステムと違い、化学や生物学といった他分野の知識を必要としません。

粉体力学は“散逸粒子系の力学”とも言い換えられます。マクロな粒子つまり“粉”を集めると、摩擦や衝突によって散逸が強く現れます。マクロな粒子“粉”にとってはエネルギーは時間とともにどんどん失われていくので、粒子を運動させ続けるには、（振動を加え続けるなど）エネルギーを外部から与え続ける必要があります。

その場合、粉たちはつねに散逸し続けるので、平衡に達することはありません。摩擦や衝突ですら解析の難しい複雑な現象であり、ましてや粉を集めたときに集団としてどのように振舞うかについての統一的な理論は未だに得られていません。

まとめれば、対象である粉は単純に見えますが、非平衡の手頃な例であるとともに、興味深く目新しいふるまいや構造が数多く見られる分野なのです！

2 パターン形成とは*

2.1 パターンの種類

パターンとは、「模様」のことです。自然界にはたくさんのパターンがあります。例を挙げればキリがありませんが、幅広い研究対象を持つことを示すために、例示してみます：

- 砂漠の風紋や、土の道の上のできるしま模様
- 対流する液体の表面の模様 (Rayleigh-Bénard 対流など)
- 化学反応の表面の模様 (BZ 反応が有名)
- 熱帯魚やヒョウなど、動物の模様 (Turing パターンや、GrayScott 模型など)
- 葉や花、果実の模様の配列 (葉脈や、メロンの模様など)
- 神経細胞の配列
- 卵割
- 前後軸の形成 (ショウジョウバエでよく研究された)
- バクテリアの集団のなす模様
- 植物の分布 (タイガーブッシュなど)
- 雪の結晶 (一般に、結晶成長や液晶、泡のなす模様も)
- 雲の形成 (すじ雲、うろこ雲など)
- つらら上の模様

・・・ちょっと、欲張りすぎですね！どれも複雑であり、起こるメカニズムが詳細には分かっていないものも少なくありません。一方で、理論的なモデルが立てられている模様の中では、同じ方程式で統一的に記述でき、それなりに普遍性のありそうな模様もあることが分かってきました。

2.2 物理的共通点

これだけ広範囲の模様の種類を見て、いったいどこが物理なんだ？と思われるかもしれません。しかし、これらの多くに共通し、それなりに本質的である物理的共通点の一つとして、「粉体の意義」で述べたように、散逸しながら (=エネルギーを使いながら) 生じる、というものがあります。予め決められたように衣類にプリントされるような静的な模様ではなく、供給されたエネルギーを消費するような複雑な相互作用の中で、動的に生き生きと形成されていく模様なのです。

今回、我々粉体班では、「粉体の意義」で述べたように、粉という手頃な非平衡システムを使ってパターン形成を見てみました。

3 粉体におけるパターン形成の歴史 **

3.1 heaping

粉を振動させる実験の歴史は古く、Chladni(1787) や Faraday(1831) までさかのぼることができます。彼らは薄い粉の層を板に載せ、バイオリンの弓で振動させることで粉を垂直に振動させ、粉が勝手に山を作る効果 (heaping) を発見しました。Faraday は、これは板の振動で対流を起こした空気が粉を運んでいるせいであると突き止めました。

その後、物理学ではこの題材は忘れ去られていたのですが、1960 年代になって再び日の目を見ました。一連の研究の後、ついに Pak ら (1995) によって、まわりの空気を取り除くか粒子のサイズを大きくすることで heaping は実際に消えることが示されました。これは、1992 年からなされていた分子動力学 (MD) シミュレーションの結果とも一致していました。その後、Jia ら (1999) によって heaping についての理論的なモデルも提案されるに至りました。

3.2 パターンとオシロンの発見

一方で、heaping の有無に関わらず、薄い粉の層を強く上下振動させると加振の振動数の半分の振動数を持つ定在波が立つということが、Douady や Fauve ら (1989) によって見つかりました。

これに触発され、heaping に邪魔されないように容器を真空に引くことで、1994 年から 1999 年にかけて、しま模様や四角形模様、六角形模様など、様々なパターンが観察、研究されるに至りました。これらのパターンは振動数と最大加速度によって定まり、また、流体における Rayleigh-Bénard 対流と多くの共通点を持つ、ということが分かりました。

このパターン研究の流れの中で、Umbanhowar ら (1996) によって、孤立した定在波が発見され、オシロンと命名されました。オシロンの振動数も加振の振動数の半分であるため、山の状態のオシロンと谷の状態のオシロンは共存できます。オシロン同士は相互作用し、特に、山と谷のオシロンはひきあって束縛状態を作りま

す。山と谷一個ずつの”双極子”や、山と谷が交互に並んだ”チェーン”、アンモニアのように谷3つが山1つを取り囲んだ”テトラマー”(1周期後には、山3つが谷1つを取り囲む)など、オシロンはまるで分子を構成する原子のように振舞いました。

さらに実験によれば、しま模様はオシロンのチェーンが軸に水平に伸びたものだとして解釈でき、四角形模様は山のオシロンと谷のオシロンがイオン結晶のように並んでいるものだと解釈でき、六角形は山同士(あるいは谷同士)のオシロンの結晶であると解釈できたりと、従来のパターンもオシロンによって解釈できました。

二次元において、このようにパターンを形成するような相互作用をし、かつ安定な孤立波はこれが初めてでした。

3.3 理論

粉体は流体と類似する点も多いものの、Navier-Stokes 方程式のような統一的な枠組みのある流体とは異なり、粉体には未だ統一的な理論がありません。そのため、これらのパターンを記述しようとする理論がいくつも立てられることとなりました。

少なくとも、Bizon ら (1998) の分子動力学 (MD) シミュレーションによれば、しま模様以外の四角形模様や六角形模様が出るためには粉同士の摩擦が必要であると分かりました。彼らのシミュレーションは、多くの模様と相図を再現しました。

今回、我々粉体班では、それらの理論の中で最もうまく行っていると思われる、Crawford と Riecke による理論 (1999) を採用し、シミュレーションを行って実験と比較しました。

この理論は、もともとは流体の Rayleigh-Bénard 対流において表面に生じる温度のパターンを説明するために Swift と Hohenberg (1977) が導入した Swift-Hohenberg 方程式をもとにしたものであり、粉体を連続媒質として扱うこととなります。このような、粉体であることをあらわに用いない理論でオシロンが再現されたことから、オシロンは粉体という媒質に拠らない普遍的な現象であると予想されました。この理論的予想を受けて、Lioubashevski ら (1999) によってめでたく液体で実際にオシロンが発見されるに至りました。

Swift-Hohenberg 方程式は場の量子論的な手法を用いて導出されており、今回、より一般的に非平衡統計力学における場の量子論的な手法についてここに書きたかったのですが、時間切れになってしまったので、悔し紛れに参考文献のみ挙げておきます。

4 パターン形成 実験 *

- 直径 0.2mm のガラスの砂を、密閉できる容器に入れます
あまり直径が小さいと空気の影響を受けやすく、heaping が起きやすいので適しません。しかし、あまり直径が大きいと模様のスケールが大きくなり、模様になっていることが分かりづらくなります。
- 容器を真空ポンプで真空引きします ($\sim 10^2$ Pa)
これは、前節で説明した heaping 現象を起こさないようにするためです。
- 容器を振動装置に固定し、振動装置で上下に振動させます (10 ~ 100 Hz, ~ 15 G)

あまり振動数が小さいと、振動装置の性能上大きな振幅を出せないため、砂を動かすことができません。逆に、あまり振動数が大きいと、パターンが小さくなっていくため、パターンが見づらくなります。振動の最大加速度は、振動装置による力の上限で制限されます。

- 生じたさまざまなパターンを写真や動画として撮ります
ストロボの周波数を調整することで、パターンが見やすくなると同時に、そのパターンの周波数が分かります。しかし、写真や動画として撮ろうとすると、ストロボやパターンの周波数がカメラのフレーム周波数 (29.97 Hz) と合わずにうまく取れないため、適宜ハイスピードカメラで 1000 fps 程度の動画も撮ります。

以上により、ポスターに展示したような結果を得ました。

5 パターン形成 シミュレーション **

Swift-Hohenberg 方程式は次のような形をしています:

$$\dot{\psi} = R\psi - (\Delta + 1)^2\psi + N(\psi)$$

$\psi = \psi(x, y)$ は場であり、元の文脈であれば流体表面での温度場、粉体ならばパターンの振動の振幅の場を意味します。

R は定数であり、直感的には、この第一項は供給されるエネルギーを意味します。

第二項は、拡散方程式を思い出せば分かるように、エネルギーの散逸を意味します。 $(\Delta + 1)$ は、Fourier 変換すれば $(-k^2 + 1)$ となることから分かるように、ある特徴的な波数以外を散逸させることを意味します。特徴的な波数は、うまく次元を調節すれば 1 と置けるので、シミュレーションを簡単にするため、ここでは 1 としています。

第三項 $N(\psi)$ は ψ の複雑な関数であり、具体的な物質や振動の仕方を反映する非線形な項です。

$N(\psi)$ もしばしば ψ の空間微分を含むので、この形の方程式のシミュレーションでは、大量の空間微分を処理する必要が出てきます。そのため、微分を差分として近似してそのまま計算すると計算機誤差がたまりやすく、シミュレーションが発散します。

これに対処するため、空間微分はいったん ψ を Fourier 変換して波数空間において処理し、逆 Fourier 変換して実空間に戻す、という手法をとりました。計算量は膨大になりますが、Fourier 変換には「高速 Fourier 変換」という素早く計算できるアルゴリズムがあるので、それをを用いることでなんとか我慢できるレベルの速度でシミュレーションを実行できました。

我々は、この方程式のシミュレーションにおいて文献を参考に R や $N(\psi)$ を調整することで、しま模様、六角形、四角形、オシロンを観察し、それらが実験における模様をよく再現していることを確認しました。また、模様の時間的変化の仕方も、実験をよく再現していました。(詳しくは、ポスターの方をご覧ください)。例えば、次のようなパラメータで再現できます：

$$\text{しま} : R = 0.3, \quad N(\psi) = -\psi^3$$

$$\text{六角形} : R = 0.1, \quad N(\psi) = \psi^2 - \psi^3$$

$$\text{四角形} : R = 0, \quad N(\psi) = \psi^3 - \psi^5 + \nabla \cdot (\nabla\psi)^3$$

$$\text{オシロン} : R = -0.5, \quad N(\psi) = \psi^3 - \psi^5 + 0.75\nabla \cdot (\nabla\psi)^3 - 2\psi(\nabla\psi)^2 - 2\psi^2\Delta\psi$$

参考文献

熱力学・統計力学・情報理論などの基礎理論については

- [1] 清水明 『熱力学の基礎』 (東京大学出版会, 2007 年)
- [2] 田崎晴明, 『熱力学 現代的な視点から』 (培風館, 2000 年)
- [3] Elliott H. Lieb and J. Yngvason, "The mathematical structure of the second law of thermodynamics", math-ph/0204007v1 (2002).
- [4] 田崎晴明, 『統計力学 I,II』 (培風館, 2008 年)
- [5] 早川尚男, 『非平衡統計力学』 (サイエンス社, 2007 年)
- [6] 岩垂好裕, 『情報伝送と符号の理論』 (オーム社, 2000 年)
- [7] E. T. Jaynes, "Information Theory and Statistical Mechanics", Phys. Rev. 106, 620 (1957).

パターン形成については

- [8] M. C. Cross and P. C. Hohenberg, "Pattern formation outside of equilibrium", Rev. Mod. Phys. 65, 851 (1993).

粉体のパターン形成については

- [9] I. S. Aranson and L. S. Tsimring, "Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts", Rev. Mod. Phys. 78, 641 (2006).
- [10] Harry L. Swinney, E. C. Rericha, "Pattern formation and shock waves in granular gases", cond-mat/0408252v1 (2004).
- [11] P. Umbanhowar, F. Melo, and H. L. Swinney, "Localized excitations in a vertically vibrated granular layer", Nature 382, 793 (1996).

ただし、heaping など空気によるパターンの妨害については

- [12] H. K. Pak, E. Van Doorn, and R. P. Behringer, "Effects of Ambient Gases on Granular Materials under Vertical Vibration" Phys. Rev. Lett. 74, 4643 (1995).
- [13] L.C. Jia, P.Y. Lai, and C.K. Chan, "Empty Site Models for Heap Formation in Vertically Vibrating Grains", Phys. Rev. Lett. 83, 3832 (1999).
- [14] A. Garcimartin, D. Maza, J. L. Ilquimiche, and I. Zuriguel, "Convective motion in a vibrated granular layer" Phys. Rev. E 65, 031303 (2002).

シミュレーションに用いた理論については

- [15] J. Swift and P.C. Hohenberg, "Hydrodynamic fluctuations at the convective instability", Phys. Rev. A 15, 319-328 (1977).

- [16] C. Crawford and H. Riecke, "Oscillon-type structures and their interaction in a Swift–Hohenberg model", *Physica* 129D, 83 (1999).

非平衡統計力学で用いる場の量子論的手法については

- [17] P. C. Martin, E. D. Siggia, and H. H. Rose, "Statistical Dynamics of Classical Systems" *Phys. Rev. A* 8, 423 (1973).
- [18] E. Smith "Quantum-classical correspondence principles for locally non-equilibrium driven systems" *Phys. Rev. E* 77 021109 (2008).

液体でのオシロンの発見については

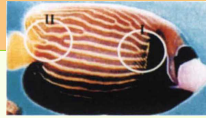
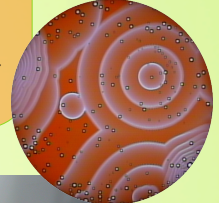
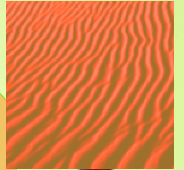
- [19] O. Lioubashevski, Y. Hamiel, A. Agnon, Z. Reches, and J. Fineberg, "Oscillons and Propagating Solitary Waves in a Vertically Vibrated Colloidal Suspension", *Phys. Rev. Lett.* 83, 3190 (1999).

パターン形成

実験編

パターンって？

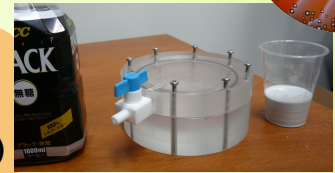
パターンとは、“模様”のことです。砂漠の風紋や雲の形、熱帯魚の模様やシマウマの模様、味噌汁の表面や化学反応の表面など、幅広い研究対象を持ちます。これらの模様の物理的共通点の1つとして、エネルギーを使い続けて生じる、というものがあります。今回、われわれ粉体班は、「砂」という摩擦や衝突でエネルギーを消費する対象で模様を見てみました。



Kondo, S. & Asai, R. Nature 376, 765-768(1995)

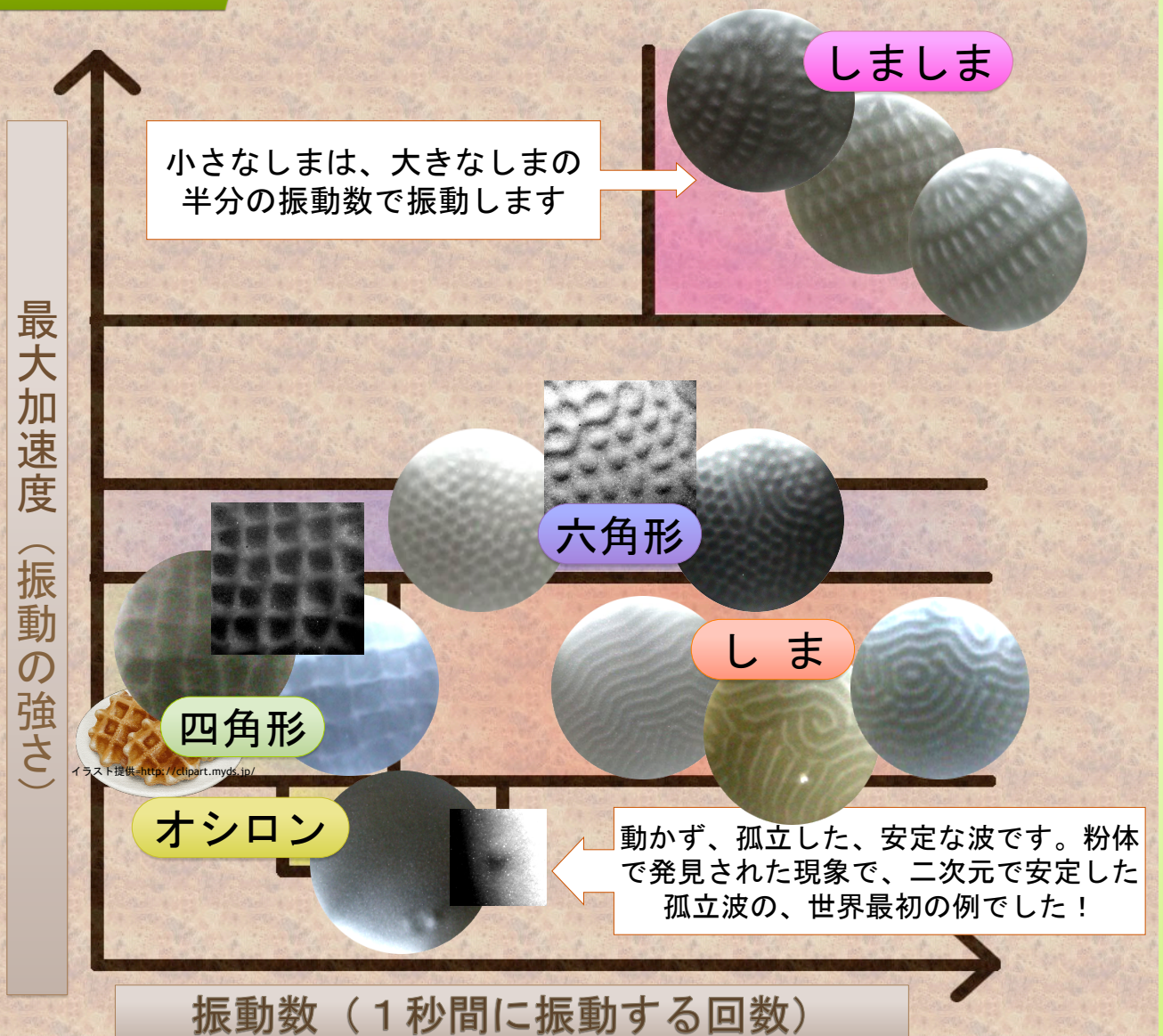
実験内容

- ・直径0.2mmのガラスの砂を真空容器につめる
- ・真空ポンプで容器内の空気を吸い出す($\sim 10^2$ Pa)
- ・容器を振動装置にのせ、上下に振動させる($10 \sim 10^2$ Hz, $\sim 15G$)



右から、砂、真空容器、カフェイン。どれもこの実験で重要な要素です。

実験結果

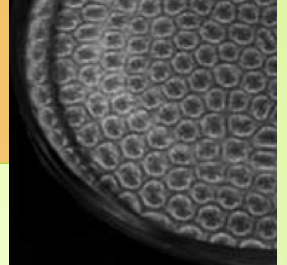


パターン形成 理論編

粉体は、流体に似ている

- ・衝突や摩擦はとても複雑なので、粉体の統一的な理論はできていない・・・
- ・しかし、流体と似ているところが多く、流体力学の概念が輸入できるのではないかな？
- 実は、今回のパターン形成はそのいい例になっている！

- ・流体でも、底を加熱すると表面に模様が出る
- 砂は分子よりはるかに大きい、砂の加振は”加熱”に相当



上面が空気に接しているシリコン油(0.5cm²/s)で温度勾配5°C(槽の径30cm, 深さ0.5cm).
(出典:理化学事典第5版)

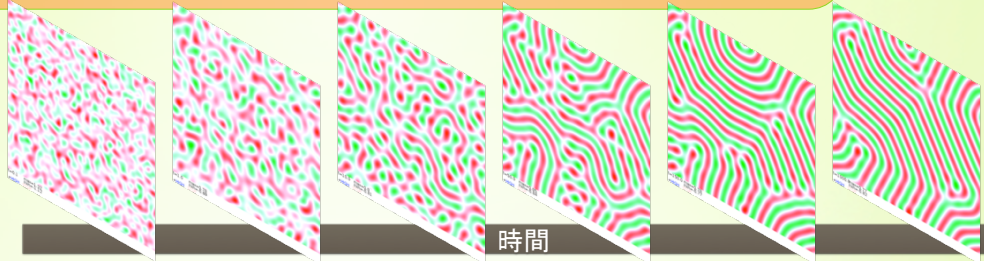
Swift-Hohenberg方程式

$$\partial_t \psi = R\psi - (\Delta + 1)^2 \psi + N(\psi) \quad (N(\psi): \text{非線形項})$$

- ・もともとは、熱対流で生じる流体表面の模様を記述するために考案された
- ・多くのパターンを再現し、パターン形成の分野で広く使われるようになった
- この方程式をシミュレーションし、実験と比べてみよう！

しま

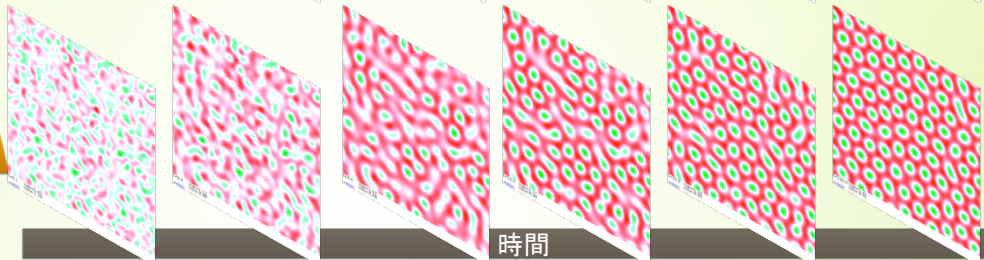
$$R=0.3, N(\psi)=-\psi^3$$



どれも実験での模様をよく再現している！

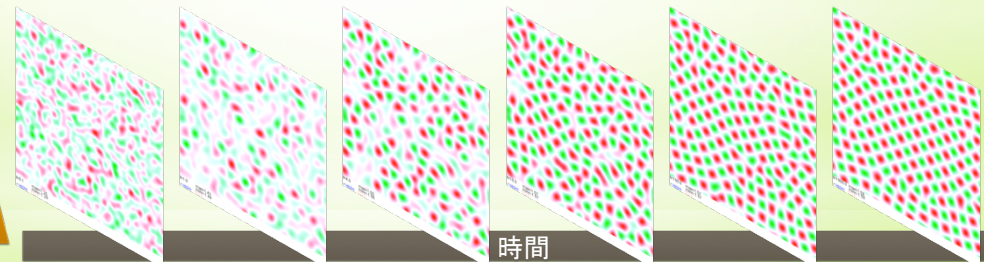
六角形

$$R=0.1, N(\psi)=\psi^2 - \psi^3$$



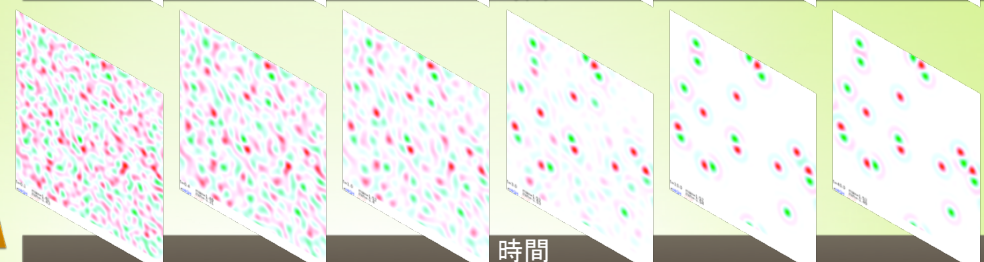
四角形

$$R=0, N(\psi)=\psi^3 - \psi^5 + 1.5 \nabla \cdot (\nabla \psi)^3 - 2\psi (\nabla \psi)^2 - 2\psi^2 \Delta \psi$$

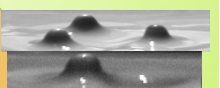


オシロン

$$R=-0.5, N(\psi)=\psi^3 - \psi^5 + 0.75 \nabla \cdot (\nabla \psi)^3 - 2\psi (\nabla \psi)^2 - 2\psi^2 \Delta \psi$$



粉体であることを本質としない式からオシロンが出たため、オシロンは粉体という媒質によらない普遍的な現象であると予想されました。この結果を受け、流体でもオシロンが実際に発見されるに至りました。粉体と流体の類似を如実に示すエピソードであり、流体の考え方が粉体にも使えることを強く示唆しています！



O. Lioubashevski, Y. Hamiel, A. Agnon, Z. Reches, and J. Fineberg, Phys. Rev. Lett. 83, 3190 (1999).

ブラジルナッツ効果: 研究の現状と粉体班での実験

白石 直人

1 ブラジルナッツ効果・概説*

1.1 現象の説明

通常の物質では、重いものが下に、軽いものが上に行きます。例えば、水に石を投げ入れたら、石は水より重いので沈み、逆に水より軽いピンポン玉を入れたら、ピンポン玉は水に浮きます。しかし、粉体においてはこの逆のことが起きるのです。「大きくて重いもの(鉄球)」を容器の底に置き、「小さくて軽いもの(ビーズ)」で埋めて振動させると、重いはずの鉄球がビーズ層の表面に浮上してくるのです。これを「ブラジルナッツ効果」と言います。なお、振動数や加速度等によっては逆に沈むこと(リバース・ブラジルナッツ効果: RBN)も起こりえます。このメカニズムについてはきちんとはまだ分かっていません。

なお、「重い大きいもの」「軽い小さいもの」に限らず、「(軽い)大きいもの」「(重い)小さいもの」についても同様の現象は見られ、これについてもブラジルナッツ効果と呼ばれています。ただし、この場合には通常の浮力と同様の効果も働くので、この意味での「ブラジルナッツ効果」の研究では、浮力の寄与も含めて分析します。この意味での「ブラジルナッツ効果」の研究も多く存在します。今回粉体班では、「一つの大きくて重いもの」と「たくさんの小さくて軽いもの」を用いましたが、「たくさんの大きくて重いもの」と「たくさんの小さくて軽いもの」でも同様に大きいものが上にいく現象がみられ、それも同じくブラジルナッツ効果と呼ばれています。リバース・ブラジルナッツ効果も同じく観測されています。この意味での「ブラジルナッツ効果」の研究も多数存在します。

1.2 名前の由来

昔、ブラジルのアマゾンの奥ではナッツがたくさん採れて、それを輸出していました。しかし輸出するためには、ナッツをアマゾンの奥から港のある海辺まで運ばなければいけません。そこでアマゾンの奥からたくさんのナッツを積んだトラックが走っていたのですが、アマゾンの道はデコボコしていたので、トラックの荷台は運んでいる間はガタガタと振動していました。さて、港について荷台を見てみるとあら不思議、荷台の上の方には大きなナッツばかりが集まっており、小さなナッツは皆荷台の下の方に動いていたのです。こうした経緯で見つかった現象なので、この現象は「ブラジルナッツ効果」と呼ばれているのです。

2 既存研究の現状*

2.1 既存研究では何を調べているか①: 実験によるアプローチ

既存の研究では、入れる粒子の大きさ・密度・材質・振動数・振幅などの条件を変えて、「大きいものが上がるか下がるか(BNかRBNか)」と「上がってくるまでの時間の測定」を見るものが非常に多いです。逆に、壁際での挙動や摩擦などを追った研究は非常に少ないです。多くの研究では、壁際での細かな動きや摩擦は「ノイズ」とみなして、なるべくその影響が無視できるような実験環境で調べようとしているようです。影響

を与えるパラメータが数多く存在することも、難しさの要因の一つとなっています。すべてのパラメータを変化させて網羅的に調べることは難しいので、着目したパラメータのみを変化させ、その他のパラメータは決めたある一種類のものを用いるということが多くなっています。そのため、複数の実験が存在していても、それぞれ実験環境が大きく異なるので、その実験結果を比較しづらいという状況があります。

2.2 既存研究では何を調べているか②: ブラジルナッツ効果のメカニズム

ブラジルナッツ効果のメカニズムとしては、大きく分けて「対流 (convection)」と「下にビーズが入り込む (void filling)」との二つが有力な説とされています。それぞれのメカニズムを支持するような実験もそれぞれ存在し^{*1}、実験環境によって大きく変わるであろうことが予想されます。両者の違いとしては、前者が鉄球と一緒に周りのビーズも上昇するのに対し、後者は鉄球のみが押しあがる点が挙げられます。また、前者はビーズの層全体が動く (対流するので) に対し、後者はそうではないという点も差異の一つでしょう。

2.3 既存研究では何を調べているか③: 理論によるアプローチ **

理論の研究については、あまりいいものは提唱されていません。なぜかという、このように粉体がぎっすり詰まっている状態においては、粉体同士の摩擦が非常に重要になってくるのですが、この摩擦を理論的に取り扱うのが非常に難しいからです。摩擦はもちろん接していなければ動きませんし、摩擦の強さはどの程度の圧力がかかっているかに依存しています。しかし、ぎっすり詰めた粉体は、「ぎっすり」とは言っても最密充填構造をしているわけではなく、ところどころ隙間は開いており、随所でアーチやブリッジのようなバランスを取って支えあっています。なので、どこでどのようにどの程度の強さで摩擦が働くか、というのは非常に難しい問題になります。もちろん、局所的にみればこのように一様でなかったとしても、全体としてみればほぼ同じ状態の繰り返しとみなせるならば、マクロな理論も立てやすいでしょう。実際、気体や液体の熱力学・統計力学は、数の膨大さによってこのようにみなせることを利用し、体系だったマクロな理論を成り立たせています。ところが、粉体の場合は、ビーズの数は多いといってもアボガドロ数とは比べ物にならないほど少ないので、このような粗視化はうまくいきません。また、熱力学においては境界のことはほとんど考慮しなくて大丈夫でしたが、粉体の場合はビーズの数が少ないので、境界の影響、具体的には壁の摩擦の大きさや容器の形状まで気にしなければなりません。これらの要因により、ブラジルナッツ効果の理論構築は非常に難しくなっています。現状では、非現実的であり本質を逃している可能性も大いにあるのですが、摩擦を無視したり、粉体の状態が壁際と中央とで変わらないと仮定したりして、荒い理論を作っているのが現状です。

2.4 既存研究の現状・まとめ

以上のような理由により、ブラジルナッツ効果の研究は、実験・理論ともになかなか難しい状況にあるといえます。そのため、ブラジルナッツ効果の研究はシミュレーションが先行しています。シミュレーションでは摩擦も自由に操れ、観察では分かりにくい細かな状況 (例えば、個別のどのビーズがどのビーズとどのくらい力で接しているか、など) も調べやすくなっています。実際、まずシミュレーションで発見されてから、その後実験的に確認されたという現象も多数存在します。例えば、「たくさんの大きいもの」と「たくさんの小

^{*1} ともに多数あるが、前者の例としては M. A. Naylor, Michael R. Swift, and P. J. King "Air-driven Brazil nut effect" 2003、後者の例としては J. Ellenberger, C. O. Vandu, R. Krishna "Vibration-induced granular segregation in a pseudo-2D column: The (reverse) Brazil nut effect" 2006

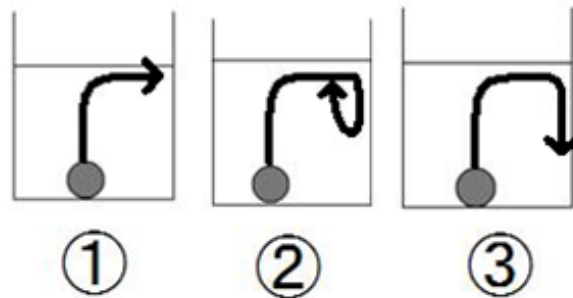


図 1

さいもの」を用いた場合のリバース・ブラジルナッツ効果は、まずシミュレーションで発見されてから^{*2}、その後実験的に確認されています^{*3}。

3 粉体班での実験内容 *

3.1 調査対象

既存研究の現状を踏まえ、粉体班では、既存の研究が存在しない「摩擦の影響するような壁際での挙動」を調べることにしました。具体的には、中央で上がってきた鉄球は壁際に移動すると

1. 上がったまま沈まない
2. 端へ動いて沈み、再び上がってくる
3. 端へ動いて沈み、上がってこない

という3通りの振舞いを示したので、振動数、加速度、壁の摩擦を変えて、鉄球がどのように振る舞うかを調べました (図 1)。

3.2 実験のセットアップ

06 アクリルビーズ (直径 0.5 ~ 0.71mm、密度 2.5g/cm³)、鉄球 (直径 23mm、密度 7.79g/cm³) を使用しました。使用したビーズは 545g。容器はアクリルの円柱形のもので、質量 173g。加振器は上下動で正弦波を出すものを使用しました。壁の摩擦を変える際は、壁にいろいろなものを巻いて摩擦を変えました。具体的には、摩擦が大きい順に、ポリスチレン、紙、何もまかない (アクリル)、アルミホイル、の4つのものを巻きました。

^{*2} Daniel C. Hong and Paul V. Quinn "Reverse Brazil Nut Problem: Competition between Percolation and Condensation" 2001

^{*3} A. P. J. Breu, H.-M. Ensner, C. A. Kruehle, and I. Rehberg "Reversing the Brazil-Nut Effect: Competition between Percolation and Condensation" 2003

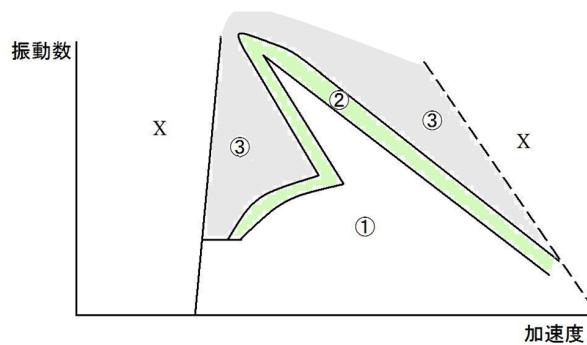


図 2

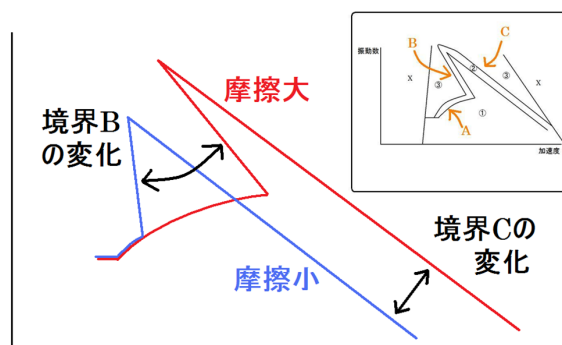


図 3

3.3 実験結果

振動数と最大加速度を変えた相図を取ると、その概形は壁の摩擦によらず以下のようにになりました。なお、図中の「X」は中央で鉄球が浮上しなかったことを表しています(図 2)。

また、摩擦を変えた場合に、境界がどのように変化するかをまとめると、以下のようにになりました(図 3)。

4 実験結果の考察 **

4.1 考察の方向性

2.2 節で述べたように、ブラジルナッツ効果のメカニズムとしては主として2つの説が唱えられています。また、図3のように、境界はBとCでそれぞれ大きく特徴的な変化を起こしています。そのため、「働いている(ブラジルナッツ効果の)メカニズム」と「壁際での鉄球の振る舞いの変化(境界の変化)」とは対応関係があるのでは、と考えられます。そこで、以下では境界の変化をどのようにしたら説明できるか、その際にどのようなメカニズムがありえそうか、という方向で考察を行いたいと思います。

4.2 境界 C の変化の要因

まず、既存の研究により、壁との摩擦が大きいほど対流が起きやすいという点が指摘されています*4。そのため、摩擦が大きい場合には、振動数や加速度が小さくても大きな対流が起きると考えられます。さて、対流が強ければ、壁際でのビーズの流れも激しくなり、それだけ鉄球が端で飲みこまれやすくなると考えられますので、境界 C の変化はこのような形で説明出来ると考えられます。

4.3 境界 B の変化の要因

ここでは、「沈み込みを起こす要因」と「浮き上がりを起こす要因」のバランスという観点から考えたいと思います。まず、沈み込む要因です。鉄球の方がビーズより重いので、非常に緩やかに揺すった場合、ずるずると鉄球は沈んでいくと考えられます。粉の上におもりを置いたときに、その上から手で押し込む(力をかける)とおもりはさらに粉にめり込むことから、この点はわかるかと思います。この効果はビーズが動きやすければ動きやすいほど起きやすいと考えられるので、壁の摩擦が小さい(=ビーズは動きやすい)ほど沈み込みやすいと考えられます。他方、浮き上がる要因です。これは「ビーズが下に入り込む」という効果だと考えられます。この効果は、鉄球が上に高く跳ね上がれば跳ね上がるほど起きやすいと考えられるので、加速度が大きければ大きいほど、鉄球は沈み込みにくいと考えられます。この二つのバランスが、B の境界の変化を決めているのだと考えられます。

4.4 まとめ

以上の考察により、境界 B の領域では「ビーズが下に入り込む」のメカニズムが、境界 C の領域では「対流」のメカニズムが働いているのだと考えられます。(なお、境界 B と C は高い周波数では交わってしまいます。この理由は、詳細は分かりませんが、高い周波数領域ではこの二者のメカニズムの違いがほとんどなくなってしまうのではないかと考えられます)

*4 J. B. Knight, H. M. Jaeger, S. R. Nagel “Vibration-Induced Size Separation in Granular Media: The Convection Connection” 1993

粉体のマクスウェルの悪魔と粉体時計

唐木田 亮

1 イントロ *

粉体の密度が小さく、ある程度は粒子が何とも衝突せずに自由に飛び跳ねることができる状況を考えましょう。このような粉体は、希薄な粉体と呼ばれます。希薄な粉体は、ぶつかり合うことで集まり、クラスターをつくる傾向があります。この章で説明する“粉体のマクスウェルの悪魔”と“粉体時計”は希薄な粉体の振る舞いのうちの一つであり、1990年代後半から実験、理論、シミュレーションが進められている、粉体の中でも新しい現象です [1]。

2 粉体のマクスウェルの悪魔 *

2.1 現象の説明

敷居で区切られた容器に、粉体を入れます。実験で用いられたのは、直径数ミリのガラスビーズ 100 から 1000 コほどです。これを細かく上下に振動させます。

振動が強いときには、粉体は容器の中を飛び回っており、敷居の左右で粒子の分布に違いは見当たりません。しかし、振動がある程度弱くなると急速に、粉体が一方の部屋に片寄って集まります。左右対称の容器を上下に振っているだけなのに、勝手に粉体が片寄るといふ、そんなひねくれ者が、粉体の悪魔と呼ばれるものです。

粉体は米や植物の種、プラスチックのビーズでも構いません。また、振動台はスピーカーで十分なので、自宅でも簡単に実験することができます*5。

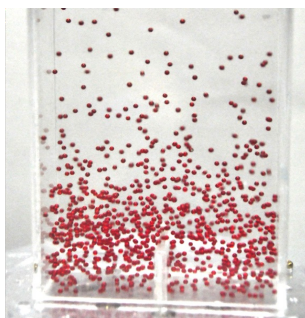


図 4 振動が強いときの一様状態



図 5 振動が弱いときの片寄った状態

*5 ただし、粒子や容器に静電気が発生し、現象を観察できない場合が多いので、市販の静電気対策スプレーなどで対処してください

”マクスウェルの悪魔”と呼ばれる理由 19世紀の物理学者マクスウェルは、熱力学の第2法則を一見破ってしまいそうな装置(悪魔)を考えました。“本来の”マクスウェルの悪魔が何者であるかは、展示パンフレットのインタビュー記事をご覧ください。

“粉体の”マクスウェルの悪魔では、粉体の激しく動き回っている部屋と粉体が集まって運動が制限されている部屋が生じています。前者を温度の高い部屋、後者を温度の高い部屋と考えれば、本来のマクスウェルの悪魔と似ています。そこで粉体が片寄るこの現象は、粉体のマクスウェルの悪魔と名付けられました。

ただし、粉体の悪魔の場合は、振動が絶えず加えられ、非弾性衝突によってエネルギーが散逸していく系なので、本来のマクスウェルの悪魔とは、パッと見の外見しか似ておらず物理的に別ものといえます。

2.2 実験結果

図6の青点が測定点、赤線が理論線です。両者はよく一致しています。なお、理論に関わる内容は、理論の解説の章にまとめました。

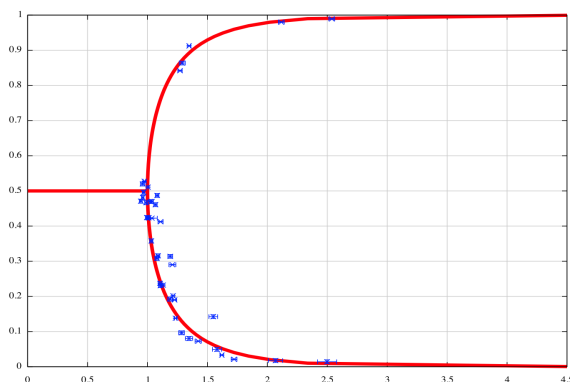


図6 横軸：振動の強さ、縦軸：1部屋の粉体の密度

横軸を右に進むことが、振動の強さを弱めることに対応しています。ある点で急速に曲線が上下に分かれています、これは粉体が片方の部屋に集まることを意味しています。

なお、私たちはシミュレーションも行いました(図7)。オリジナルのシミュレータがこのDVDに収録されているので、興味のある方は是非遊んでいただきたいと思います。

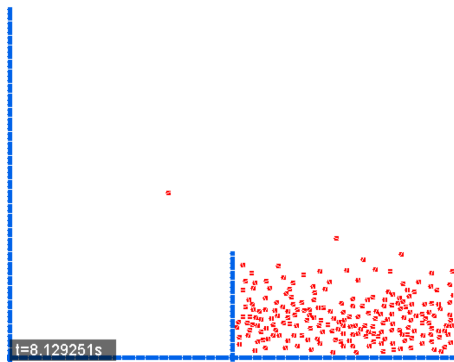


図7 シミュレーションによる片寄り状態

2.3 部屋が3つ以上のときの悪魔

部屋を増やした場合も、ある程度振動を弱くすると、最終的に1つの部屋に粉体が集まることが実験・理論から明らかになっています [2] (図8)。このとき、集まった状態から振動を強く戻していても、なかなか集まりが散りません。(つまり、3部屋以上のときの粉体の集団は、ヒステリシス(履歴)をもっています。この性質は実験、理論で実証されています [1])

さらに変わった例ですが、敷居の入れ方を変えることで、粉体の集まり方を操作することができます [2] (図9, 図10)。

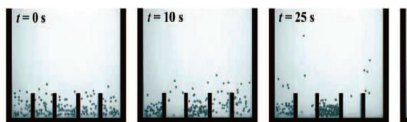


図8 時間とともに1つの部屋に集まる様子

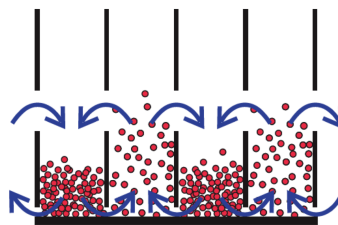


図9 粉体が集まる部屋と吹き出す部屋の発生

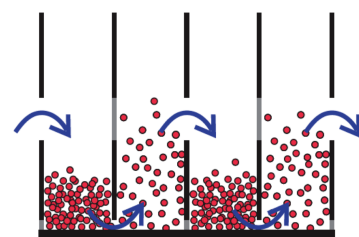


図10 粉体の横運動の取り出し

3 粉体時計*

3.1 現象の解説

粉体時計は、大きくて重い粉体と小さくて軽い粉体の2種類で、粉体のマクスウェルの悪魔の実験を行ったものです。これは、集まった粒子の集団が左右の部屋を交互に往復するという不思議な現象です。2005年に実験で発見されたばかりで、理論やシミュレーションによる検証が今でも発展途上です。

まず、粉体の悪魔と同じように粉体の集まりができます(図3.1)。続いて、小粒子(緑色)が隣の部屋に集

まりだします(図 3.1)。これは、小粒子が大粒子(赤色)にはじき出されているためです*6。そして、はじきだされた小粒子が隣の部屋でつくった集団に、大きい粒も捕まってしまう(図 13)。こうして、粉体の集団が隣の部屋に動きます。

集まっては、はじき、集まっては、はじくことで粉体時計は振動します。

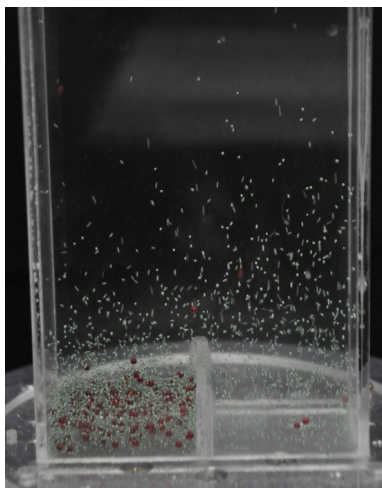


図 11 集まっている状態(右の部屋から大粒子が飛び込み終わったところ)

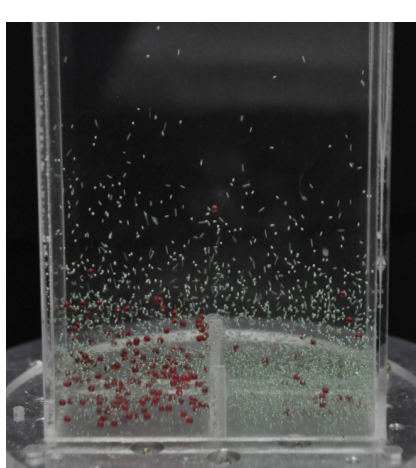


図 12 小粒子がはじき出された状態

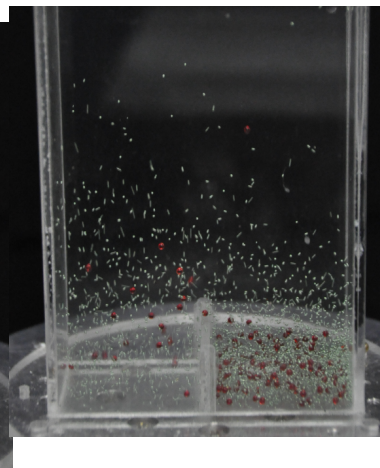


図 13 大粒子が小粒子の中に跳び込む状態

3.2 実験結果

ある部屋の中でどのように大小の粒子数が変化しているかを調べた結果が、図 14 です。5 秒おきに台の振動を止め、一部のなかの粒子の重さを測ることで、粒子の量を見積もりました。大きな粒子の数は 1000 コ、小さな粒子の数は 100 コ程度です。

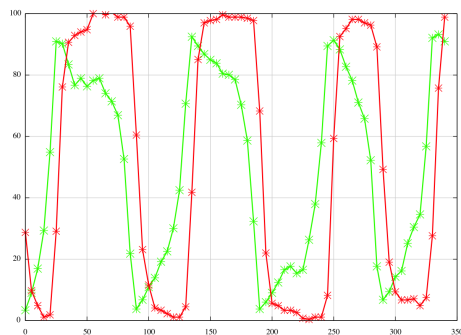


図 14 粒子数の時間変化(実験)

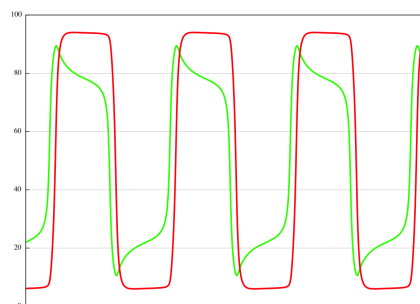


図 15 粒子数の変化(理論式の数値計算)

粉体時計は、どんな条件下でも生じる現象ではありません(相図 16)。振動が強すぎると一様状態になり、

*6 大小の粒子が衝突したとき、大粒子の方が重いので、小粒子が大きな運動量を得やすく、勢いよく飛び出しやすい

弱すぎると全粉体が一方の部屋に片寄ります。全粒子が片方の部屋に集まりたがりつつも、大粒子が小粒子を隣にはじきだせる、ほどよい振動の強さと大粒子と小粒子の数のときにのみ、粉体時計は起こります^{*7}。

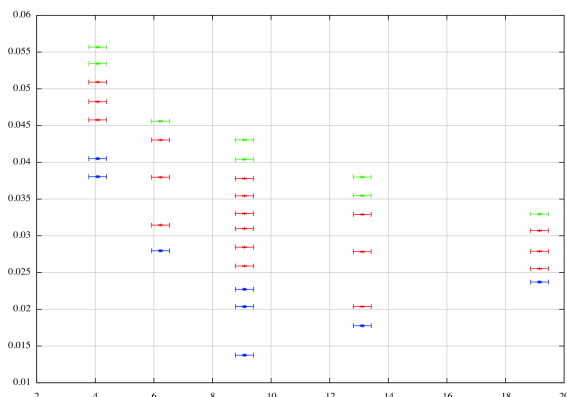


図 16 横軸：重い粒子のパーセント率（ただし、粉体の体積は一定）、縦軸：台の振動の強さ

なお、シミュレーションによって粉体時計を再現することにも成功しました（図 17；大粒子が小粒子をはじき出すところ）。

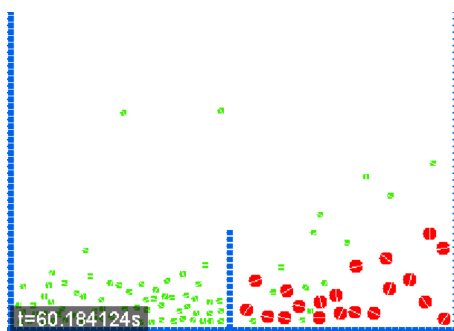


図 17 シミュレーションで再現された粉体時計

また、2次元で粉体時計のシミュレーションをおこなったところ、振動の強さに対して周期の変化が図 18 のようになりました。これは、片寄った状態（=周期が無限に発散する）と一様状態（周期が0になる）の間で、粉体時計の周期が（双曲的に）減少していく様子を示しています。

^{*7} 実は、上の3つの相以外にも、大きい粒子だけ片寄って小さい粒子は両部屋を一樣に飛びまわる状態など、粒子の種類や大きさによって、さらに相が細かく分かれるという実験、理論の研究もあります。しかし、私たちの用いた粉体では観察できなかったため、3つの相だけに議論をしばっています

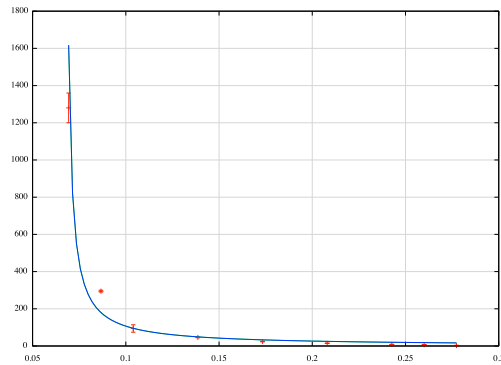


図 18 台の振動の速さ (m/s) vs 周期の長さ (秒) (シミュレーション)

3.3 粉体や部屋の数が多い場合

粒子の種類が3つ以上のとき

適切なパラメータをとれば、軽い粉体から順番に隣の部屋に飛び込み、集団が移動していくと考えられています。簡単な3種粒子系では、実験、理論、シミュレーションで実証されています [3]。

部屋の数が多いとき

直方体状の容器と、円筒状の容器（部屋がドーナツ状に並んでおり、粉体が周回できる容器）で、異なる結果になると信じられています。[4]によれば、直方体容器では、粉体の集団が隣の部屋へ方向に移動していき、隅の部屋までくると、折り返してふたたび一方向に移動していきます。円筒形容器では、粉体の集団はどの部屋（隣とは限らない）にも同じ確率で移動でき、また時々集団が散って、粉体が一様状態になります。しかし、実験による検証が十分に行われておらず、議論の余地があります。

我々が実験したところ、どちらの容器も、振動が強い場合は、集団はできるだけ遠くの部屋に移動し、粉体時計のように周期的に行き来していました。また、振動が弱い場合は、隣の部屋に移動する確率が高いことが分かりました。さらに、細かく集団の動きを区別することもできそうではありましたが、明確な実験結果を出すことはできませんでした。

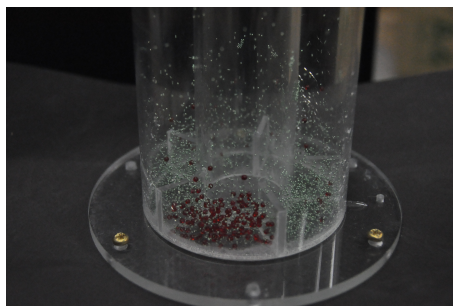


図 19 5部屋の円筒容器で、大粒子が小粒子をはじき出しているところ

4 理論の解説 **

4.1 粉体のマクスウェルの悪魔

粉体の悪魔では、粉体を気体とアナロジーし、現象をある程度定量的に説明する理論があります。これは、ここで考えている粉体が希薄であるため成り立ちます。以下、理論式の形が気になる方のために、簡潔に紹介したいと思います。一般に K コの部屋で粉体のマクスウェルの悪魔を考えると、その部屋から隣の 1 つの部屋に流れ出る粉体の流束 (単位時間単位面積あたりに飛び出る粒子数; 以下、Flux と書く) は、

$$\text{Flux}(n) = An^2 \exp(-Bn^2)$$

ただし、

$$A = \sqrt{2\pi}(1 - e^2)gr^2S/(W^2v)$$
$$B = \frac{4gh}{\pi v^2}(1 - e^2)^2(\pi r^2N/(KW))^2$$

ここで、それぞれの変数は、

- n : 注目している部屋の粒子密度
- e : はね返り係数
- g : 重力定数
- r : 粒子半径
- S : 部屋同士をつなぐ窓の面積
- W : 1 部屋の床の面積
- h : 敷居の高さ
- N : 全粒子数
- K : 部屋の数
- v : 台の振動の速さ

を表しています。

Flux の導出自体は比較的簡単で、気体分子の状態方程式や、熱伝導の式と似たものから導かれます。しかし、専門的な話題なので、ここでは割愛します。図 20 のように、Flux を描いてみると、たしかに、部屋の中の粉体が多くなるほど Flux が小さい、つまり粒子が飛び出しにくいことが分かります。

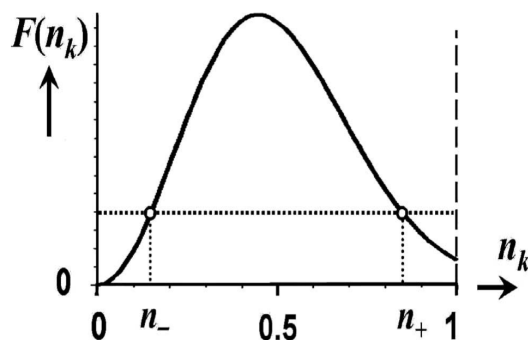


図 20 1部屋の粉体密度 vs 流束 (Flux)

4.2 粉体時計

粉体の悪魔の Flux モデルを拡張し、粉体時計を説明する理論が研究されています [5]。しかし、定量的に粉体時計を説明できる理論はまだ存在しません。ただし、不定なパラメータをうまく決定すると、定性的に実験と一致する理論は存在します (図 15)。

この理論によると、粉体時計では体内時計や心臓の脈拍をモデル化した数式と同じ挙動を持つことがわかります。図 21 は振動の様子を粒子数の変化で描いたもので、横軸が小粒子数、縦軸が大粒子数をそれぞれ表します。粉体時計は、サイクル状の軌道を半時計回りにまわります。なお、黒い点から始まる青線がサイクルに巻き込まれていますが、これは黒い点に対応する粒子数から台の振動を始めると、サイクルの表す粉体時計に落ち着くことを意味しています。言い換えれば、粉体時計の振動は、粒子の流れに多少のゆらぎがあり、サイクルからずれても元の振動に戻っていく安定な振動である、といえます。

また、振動の強さを大きくするにつれて、片寄った状態 (図 23) 粉体時計 (図 21)、一様状態 (22) の順に粉体の状態が変化することを数値計算からも再現することに成功しました。

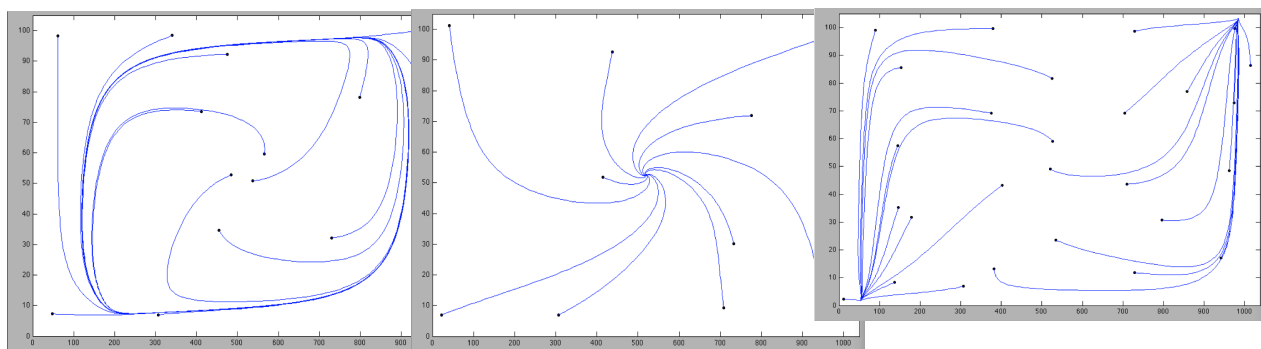


図 21 粉体時計：軌道は反時計回りにサイクル上を動く

図 22 一様状態：軌道は中心 (粒子数半々) に向かって沈んでいく

図 23 片寄った状態：軌道は粒子がほぼ全てなくなるか、ほぼ全て集まるかの一方の点に沈む

4.3 〈コラム〉交通のマクスウェルの悪魔？

意外に思われるかもしれませんが、車一台を一粒の粒子と考えることで車の渋滞を説明しようとする議論があります [1]。粉体のマクスウェルの悪魔で粒子が集まったのと同様に、車が渋滞すると考えます。というのも、道路に車がたくさんいる場合、他の車と衝突しないように速度を落とすのが運転手の心理です。これは、ぶつかった粉体粒子が (相対) 速度を落とすのに似ています。たしかに、図 20 と図 24 を比べてみると、形がそっくりです。

さらに類似点をいうと、容器を敷居で部屋分けしたように、道路を一定の間隔で区別して考えればよいことが分かります。また、隣り合う部屋をつなぐ窓の大きさは道路の幅に対応しており、粒子の大きさは車の種類に対応づけることができるでしょう。厳密に車の流れを計算できるかは定かではありませんが、粉体のモデルで交通の流れを研究するという、おもしろい試みであるといえます。

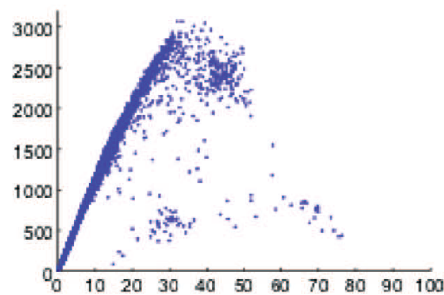


図 24 横軸：道路上 1km あたりの車の密度、縦軸：1 時間に 1km の区間から出て行く車の台数

参考文献

- [1] Ko van der Weele, Contemporary Physics(2008), Vol.49, No.3, 157-178
- [2] Devaraj van der Meer, Ko van der Weele, Peter Reimann and Detlef Lohse, J.Stat.Mech.(2007) P07021
- [3] Chau-Shiung Yeh et al, JPSP(2008), Vol.77, No.8, 084403
- [4] Yuan Liu, Qing-Song Mu, Tian-de Miao, Jiang-Hai Liao, EPL,84(2008) 14004
- [5] Meiyang Hou, Yinchang Li, Rui Liu, Yin Zhang, Kunquan Lu, Phys. Status Solid A 207 (2010),No.12, 2739

粉体力学のコンピュータシミュレーション

日向 理彦

1 コンピュータシミュレーションと粉体力学 *

近年の目覚ましいコンピュータの発展により、膨大な数の粉体をコンピュータによってシミュレーションすることが可能になってきました。しかしながら「実際に実験をしてみれば分かることを、なぜわざわざシミュレーションしようとするの？」と疑問を持たれる方もおられるかもしれません。そこでこの節ではシミュレーションを行うことは実験を行うことに対してどのような利点、および欠点があるのかを紹介していきます。

1.1 シミュレーションの実験に対する優位性

粉体は非常に身近なものであり、工場などでも頻繁に使われています^{*8}。粉体を用いる装置を開発する場合にシミュレーションを用いれば、実際に装置を作ってみることなく装置の挙動を検証できるため手間もお金もかけることなく装置の開発を行うことができます。

粉体は通常、透明ではないためその内部の状況まで実験によって知ることは非常に困難であり、また個々の粉体の位置や速度をリアルタイムに正確に知ることも困難です。しかしながらシミュレーションにおいてはそもそも個々の粉体の位置や速度がどのように変化していくのかをコンピュータによって調べているため、そのような困難は発生しません。

実験においては粉体の持つ物理的な性質、例えば大きさや固さや形状を簡単に変えることは困難です。シミュレーションにおいては粉体の持つ物理的な性質というのはパラメータを変化させるだけで簡単に調整できるため、様々な材質の様々な大きさの様々な形状の粉体を用意して実験するという作業から解放されます。また、現実の物質にはないような性質を持った仮想的な粉体^{*9}も用意できます。

1.2 シミュレーションの限界

前小節でシミュレーションが実験に比べてどれほど便利なものか理解されたことと思いますが、これほどシミュレーションが実験に比べて優れているのであれば「もはや実験を行う必要性はないのでは？」と思われることでしょう。しかしながら世の中というのはそこまでうまく回っておらず、シミュレーションにはいくつかの限界があります。

最も問題になるのはおそらく「計算時間」でしょう。粉体の数が非常に多くなるとその分行わなければならない計算は増えてしまいますから、実際の時間で一秒間のシミュレーションを行うのに何日もコンピュータを走らせなければいけないということが起こり得ます。

もう一つ重要な問題は、シミュレーションでは粉体の動きを「厳密に」計算することは不可能であるということです。シミュレーションでは主に、粉体同士がぶつかり合ったときにどのような力を受けてはじき返され

^{*8} 例えば食品加工場では小麦粉や砂糖などが使われているでしょう

^{*9} ここでいう「仮想的な」というのは現実ではとてもあり得ないような物質を用意できる、ということではなくて、例えば「鉄球と銅球の中間ぐらいの性質を持つ粉体」といった、何か中間的な性質を持った粉体を用いてシミュレーションができる、ということを表しています

るのかを計算するのが主要な仕事になりますが、現実の粉体がぶつかり合ったときにかかる力を正確に知るとは困難であるためシミュレーションでは「適当な」仮定をおいて粉体にかかる力を計算する、ということを行っています。またシミュレーションではいわゆる「数値積分」と呼ばれる計算を行っていますが、この計算の過程で数値に誤差が生じてしまうことが知られています。以上のような困難を改善するためにいくつかの計算手法や考え方が提唱されています。

2 分子動力学法 **

本節では粉体シミュレーションの一つの方法として私たちが用いた分子動力学 (Molecular Dynamics; MD) 法という計算手法を紹介します。

大きさを持った物体は Newton の運動方程式:

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \mathbf{M}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \varphi_j, \omega_j) \quad (2)$$

に従うことが知られています。ここで $\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i, \varphi_i, \omega_i, m_i, J_i, \mathbf{F}_i, \mathbf{M}_i$ はそれぞれ i 番目の位置、速度、向き (Euler 角)、回転角速度、質量、慣性モーメント、力、トルクを表しています。最も原始的な方法はこの微分方程式を直接数値的に解くことであり、そのような方法を分子動力学法^{*10}といいます。

分子動力学法ではおよそ次のような手順で逐次的に粉体の運動を計算していきます:

1. 容器の形状 (壁) を設定する
2. 各粒子の初期値 (計算開始時の位置や速度) を設定する
3. 粒子の位置や速度を元に、各粒子にかかる力およびトルクを計算する
4. 計算された力とトルクをもとに Δt 秒後の状態を近似的に求める
5. 3. に戻る

分子動力学法に限らず、微分方程式の数値計算においては殆どの場合においてこのような手順を踏んで計算を進めていきます。一連の処理が終わった際には各粒子の位置や速度などの値は Δt 秒後の状態に置き換えられます。 T 秒間のシミュレーションを行うためには上の一連の処理を $T/\Delta t$ 回だけ繰り返せば望んだ結果が得られます。それでは各ステップにおいて実際にどのように処理を行えばよいのかを見ていきましょう。

2.1 容器の形状の設定

容器の形状を設定するためには、通常の粒子とは別の特別な粒子として「壁粒子」というものを用意するのが最も簡単です。通常の粒子は力を受けるとそれによって空間上を運動しますが、壁粒子はたとえどんな力を受けたとしても位置が変わらないものとして取り扱います。この特別な粒子を容器の形状に沿うように並べていくことで、容器の形状を表すことができます (図 25)。

^{*10} 分子動力学法はもともと、「分子」の名が冠するとおり多数の原子や分子の動きをシミュレーションする方法として開発された計算手法です。粉体シミュレーションでは取り扱う対象が分子ではなく粉体になるだけですので、この方法を輸入することでシミュレーションを実現しています

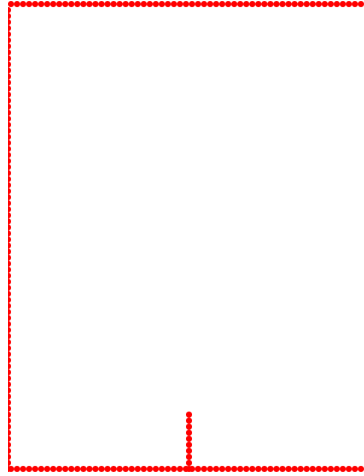


図 25 粉体の Maxwell の悪魔の容器を「壁粒子」で表現したもの。多数の赤色の壁粒子によって容器の形状が表現されていることが分かる

2.2 初期値の設定

初期値の設定は、各粒子の位置や速度などの値を適切な変数に代入するだけですから、特筆すべきことはないと思われるかもしれませんが。しかしながら「そもそもどのような値を初期値として与えればよいのだろうか?」ということが問題になることがあります。例えば多数の粉体が容器内に詰め込んである状況を考えると、各粒子の速度などはすべて 0 にすれば良いと分かりますが、その位置は容器内に「ランダムに」位置しているために、容器内の粉体の位置をきちんと指定するのは困難です。そこでこのような場合には初期条件として「容器内に粉体が入っている」状況を設定するのではなく、「粉体を容器内に落とす」状況を設定するのが最も簡単な方法です (図 26)。このようにしてしばらくシミュレーションを行えば、粉体が積もった状態を実現することができます。

2.3 力とトルクの計算

粉体同士 (もしくは通常の粒子と壁粒子) が接触している場合には力がかかります。粉体にかかる力は大きく分けて、「接触 (法線, normal) 方向の力」と「水平 (接線, tangential) 方向の力」があります。それぞれの力の計算方法として様々なモデルが提唱されています。以降ではこれらを具体的に見ていきましょう。

- 法線方向の力

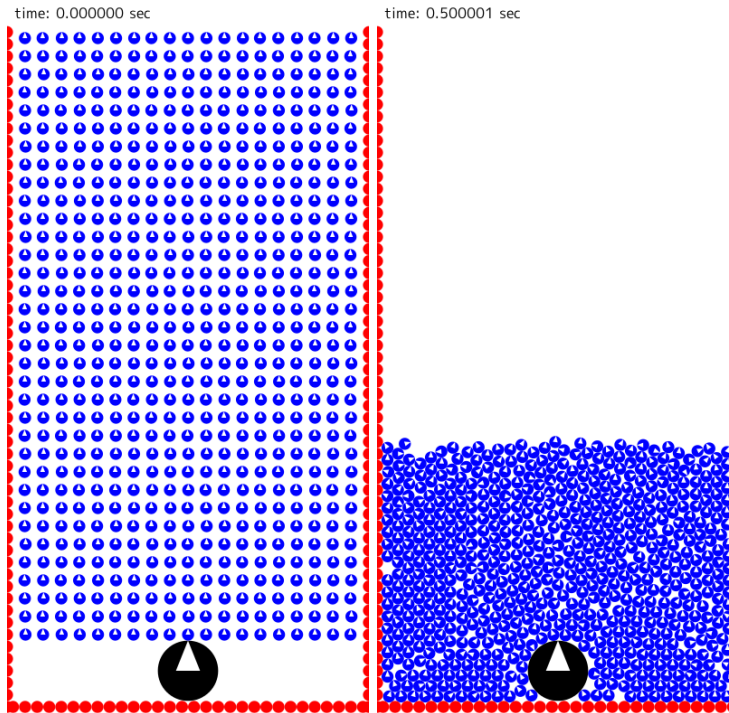
- 線形な力

法線方向の力として最も単純なモデルは、次のように粉体の近さと相対速度に比例する力を受ける、というものです:

$$F_n = Y\xi + \gamma^n \frac{d\xi}{dt} \quad (3)$$

ここで Y はバネ定数 (Young 率)、 γ^n は散逸の大きさを表す定数です。

- 粘弾性球の力



(a) 初期条件として「粉体が降り積もる前の状態」を選んだところ
 (b) しばらく (0.5 秒) シミュレーションを進めたところ

図 26 粉体の「降り積もった」状態を表現するためには (a) のような状態からシミュレーションを始めればよい

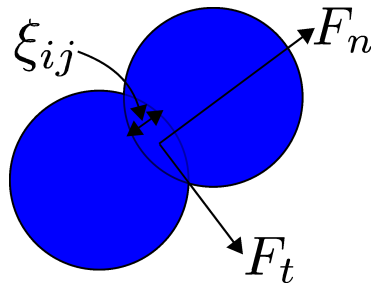


図 27 粉体同士が接触したときには法線方向の力 (F_n) と接線方向の力 (F_t) に分けることができる。接触時の力は粉体同士の近さ ξ_{ij} や相対速度 v_{rel} などをもとに計算を行う

粉体を粘弾性体だとみなしたときにかかる力は次のように与えられることが知られています:

$$F_n = \frac{2Y\sqrt{R_{eff}}}{3(1-\nu^2)} \left(\xi^{3/2} + A\sqrt{\xi} \frac{d\xi}{dt} \right) \quad (4)$$

ここで ν は Poisson 比、 A は散逸係数であり、 R_{eff} は以下の式で定義される有効半径です:

$$\frac{1}{R_{eff}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (5)$$

- 接線方向の力

– Haff と Werner のモデル

接線方向に受ける力は、粉体同士が「擦れる」ことによって生じる摩擦力です。このモデルでは、摩擦力は接している面の相対速度に比例した速度を受けますが、その最大摩擦力はクーロンの法則によれば摩擦係数を μ として、

$$|F_t| \leq \mu |F_n| \quad (6)$$

となります。従ってこれらを考慮に入れた場合の接線方向の力は、

$$F_t = -\text{sgn}(v_{\text{rel}}^t) \min(\gamma^t |v_{\text{rel}}^t|, \mu |F_n|) \quad (7)$$

となります。

2.4 Δt 秒後の状態の計算

このステップでは前ステップで求めた各粒子の力やトルクの値をもとに、微小時間 Δt 秒後の各粉体の位置や速度を近似的に計算します。この「近似的に」ということが重要で、この計算をどれだけ正確にできるのかというのがシミュレーションの大きな課題の一つとなっています。計算方法としては様々なものが提案されていますが、勝手な計算方法を採用すると粒子の速度が計算誤差の蓄積により無限に大きくなってしまふこと*11などがありますから、このような非物理的でありえない計算結果*12を出さないようなアルゴリズムを用いなければなりません。分子動力学法において、そのような「性質の良い」計算方法はいくつかの方法が知られており、例えば Gear の予測子・修正子法 (Gear predictor-correcter) とか Störmer-Verlet 法などがあります。ここではこれらの計算方法の具体的なアルゴリズムはここでは紹介しません。

2.5 効率的な計算法

分子動力学を用いた粉体力学のシミュレーションは、一般的に非常に時間がかかることが知られています。そこでより速く、より効率的に計算をする手法が開発されています。

分子動力学によるシミュレーションでは、各粉体にかかる力を計算するのにすべての粉体のペアに対して衝突判定を行う必要があります。しかしながら粒子数を N とするとこの計算には ${}_N C_2 = N(N-1)/2 = O(N^2)$ もの計算量がかかってしまいます。従って粒子数の増加に伴って衝突判定の計算量が非常に大きくなってしまふことが分かります。そこでこの節ではこの衝突判定の計算量をいかに減らすか、ということを考えていきましょう。

- Verlet のリスト

粉体の速度がさほど速くない場合には数～数十ステップ程度ではある粉体に対して「近い粉体」がどれであるのかはさほど変わりません。そこである時点で各粉体に対して「近い粉体のリスト」を計算しておき、数～数十ステップ間はこのリストを用いて衝突判定を行えば良いことが分かります。あるステップ数が経過すると、「近い粉体のリスト」がだんだんと意味をなさなくなるので、そうなった場合には当該リストをもう一度作り直します。

*11 このことをよく「(計算結果が) 発散した」と表現することがあります

*12 計算結果が発散してしまうような計算方法は「数値的に不安定である」などといいます。逆にそのような発散がおきないものは「数値的に安定である」といいます

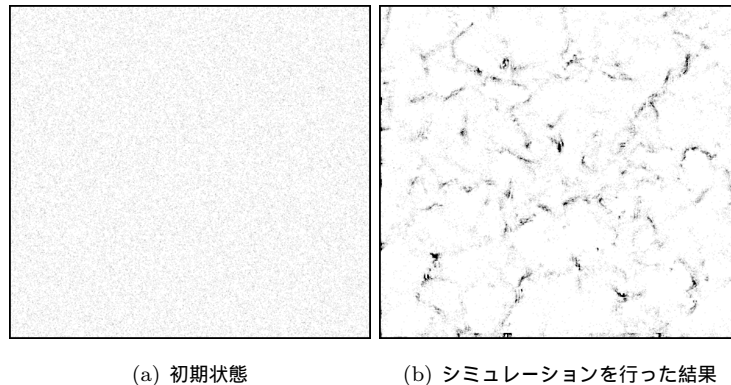


図 28 モンテカルロ法を用いた計算例。五万個のガス状の粉体が二次元平面上を動き回る粉体が互いに衝突しエネルギーが失われていくことで自己組織化が起きる様子が分かる

- リンク・セル アルゴリズム

この方法では空間を格子状に分割し、各粉体がどの格子に位置しているのかを計算しておきます。こうすることである粒子の衝突判定するときにはその粒子の属している格子に隣接している格子の粒子のみを考慮すれば良いことが分かります。

3 様々な計算法 *

前節では粉体シミュレーションの一つの方法として分子動力学法という計算法を簡単に紹介しましたが、これ以外にも様々な計算法が提案されています。本節ではそれらのうちいくつかを紹介していきます。

3.1 イベント駆動

粉体を強く振動させるなどして粉体が「ガス状」になったときには粉体同士の衝突は非常に少ないです。粉体は互いに接触していなければ等速直線運動するか、もしくは重力がある場合には放物線を描きながら自由落下するだけですから、簡単に計算できます。そこで粉体が衝突したときのみを考えることで計算を簡略化しよう、というのがイベント駆動 (event-driven) と呼ばれる方法です。この手法は粉体の衝突が少ない場合には高速に計算できますが、粉体が接触したままの状態は計算ができないなどの欠点もあります。

3.2 モンテカルロ法

粒子数が非常に多い場合には衝突判定に非常に時間がかかります。そこで近い粉体同士で適当にペアを作り、そのペアがある簡単な条件を満たしたときにはその粉体は「衝突した」と判定する、というアルゴリズムがあります。この計算法では「近い粉体同士で適当にペアを作る」という過程で確率的にペアを選んでおり、このように確率 (乱数) を用いた計算法を一般的に「モンテカルロ法」といいます。衝突判定を適当に「ごまかす」ことで多数の粒子のシミュレーションを非常に高速に処理することができます。この計算法を用いて計算をした例を図 28 に示します。

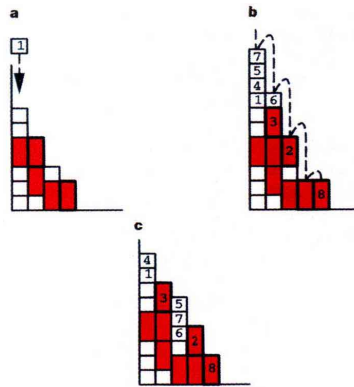


図 29 粉体を一番左から次々に落としていき、ある条件を満たす高さまで積み上がったら一つ右に移動する、という操作を適用していく [2]

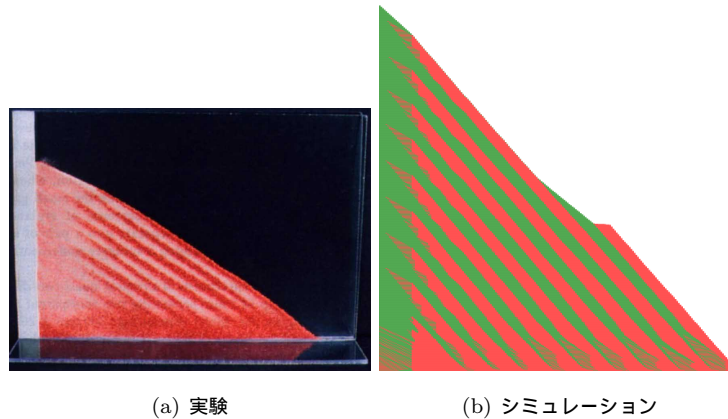


図 30 セル・オートマトンを用いて二種類の粉体を落としたときの様子。二種類の粉体が交互に振り重なり、階層構造を形成することが分かる。実験 [2] とシミュレーションがよく一致していることが分かる

3.3 セル・オートマトン

粉体を上から落とし降り積もった様子を表現する方法として、空間を格子状に分割し、各格子に粉体を割り当てるといった方法があります。この方法をセル・オートマトンといいます。一種類、もしくは複数種類の粉体を交互に一粒ずつ一番左から落としていき、ある条件が成り立つまで積み上がったら一つ右へ崩れる、という操作を繰り返し適用することでシミュレーションを行います (図 29)。このアルゴリズムを適用することで、例えば図 30 に示すように粉体を降り積もらせた場合にできる階層構造をシミュレーションによって再現することができます [3]。

3.4 理論式を用いる方法

粉体力学は多数の粉体が織りなす構造を解析する学問です。今までのシミュレーションではどれも一つ一つの粒子の位置や速度などを取り扱っていましたが、粉体を連続化するなどして解析をしたい系を簡略化した

モデルをたてることで、単純な方程式に帰着させることができます。例えば粉体を振動させたときの表面のパターンを記述する方程式である Swift-Hohenberg 方程式や、粉体の Maxwell の悪魔 (や粉体時計など) を記述するフラックス・モデルなどがあります。これらの理論的なモデルにより得られた方程式を数値的に解き^{*13}、実験と比較することによって、それらのモデルの妥当性を検証したり、様々なパラメータを調整することで実験をすることなく結果を予言することができます。

参考文献

- [1] T. Pöschel, T. Schwager, 2005, *Computational Granular Dynamics*, Springer
- [2] H. Makse, S. Havlin, P. King, H. Stanley, 1997, *Spontaneous stratification in granular mixtures*, Nature
- [3] H. Makse, P. Cizeau, H. Stanley, 1996, *Possible Stratification Mechanism in Granular Mixtures*, Phys. Rev. Lett.

^{*13} もちろん解析的に解ければ良いのですが、ここで例としてあげた方程式はどれも複雑で、一般的に解析的に解くことは非常に困難です。そこで数値的に解を求める、ということを行います

粉体の応用例

西口 大貴

1 様々な応用例 *

粉体の理論は様々な方面に応用されています。粉体のマクスウェルの悪魔の記事や配布したパンフレットで触れた、粉体のマクスウェルの悪魔の理論である粉体の Flux モデルと交通流の関連を指摘した研究はその例の一つです。ここではその他の応用のうちのいくつかに絞って紹介します。数多くの応用を見ていただければ、粉体という分野がいかに重要か実感していただけたかと思います。まずは身近なものから始めていきましょう。

1.1 家庭に潜む粉体物理学

米やゴマなどは粉体の代表例であるということは当日展示やパンフレットで少々申し上げてきました。そのような身近な存在である粉体であるからこそ、よくよく観察すれば粉体物理学的に考えてうまく作られているものがたくさんあります。この項では、筆者の経験を交えながらフランクに語らせていただきたいと思います。

赤飯を食べるときに欠かせないものと言えば、そう、ごま塩である。しかし家にごま塩がなかったらどうするか？ゴマはある。食塩もある。しかし、ごま塩がない。普通に考えると混ぜればよい。やってみよう…。混ざらない。うまく混ざらないのである。混ぜようと容器に入れて振ってみても、なぜか分離してしまう。これは我々が主に研究した3つのテーマのうちの一つである“ブラジルナッツ効果”のために、大きなものが上に浮いてしまうからである。市販されているごま塩の塩をよく観察すると、調理用の食塩などとは違い、粒状になっていることに気付くだろう。さらによく観察すると、ゴマとほぼ同程度の大きさの粒になるように揃えられている。このように粒子径をそろえることにより、“ブラジルナッツ効果”を抑え込んでいるのである。

さらに他の例もある。お菓子の柿の種。よくピーナッツ入りのものが売られている(図 31)。いわゆる柿ピーである。人によってピーナッツが好きな人、柿の種が好きな人、いろんな人がいるだろう。ピーナッツだけ、もしくは柿の種だけが食べたいと思ったとき、混ざっているのは不便に感じてしまう。その時、思いつくのが“ブラジルナッツ効果”を利用してやればよいのではないだろうか？ということである。柿ピーの混合物を揺すってやれば、柿の種とピーナッツが上下に分離するのではないか？そんな予想が立つ。やってみた。…分離しない。なるほど、これもごま塩と同様、なかなか分離しないように考えてあるのであった。やりおるな、亀 製菓。

1.2 ロボット工学への応用

ロボット工学の夢といえば「ドラえもん」をつくることと言えるのではないのでしょうか。そんなドラえもん、なんといっても不思議なのは手でしよう。丸い形であるにもかかわらず、何でも吸いつけてしまう。人間の手のような形やはさみのような形のロボットアームでは、なかなか細かい物や複雑な形状のものなど、あらゆる物を持ち上げることはできませんでした。どんな形の物でも掴むことのできるロボットアームの開発を目



図 31 柿ピー (wikipedia より)

指して、多くの人が日夜研究に励んでいきます。

こんな中、2010年に発表され、粉体屋さんたちの間で話題になったのが、粉体の Jamming(ジャミング) 転移を応用して作られたのが “Jamming Gripper” (ジャミンググリッパー) です。物をつかむ様子が図 32 と図 33 です。いかにもドラえもんの手と見違えるようなロボットアームですね^{*14}。まだあんまりイメージがわからないかもしれないので、百聞は一見にしかず、以下の URL から動画がダウンロードできますので、ぜひ一度ご覧になってみてください。

<http://www.pnas.org/content/suppl/2010/10/19/1003250107.DCSupplemental/SM01.wmv>

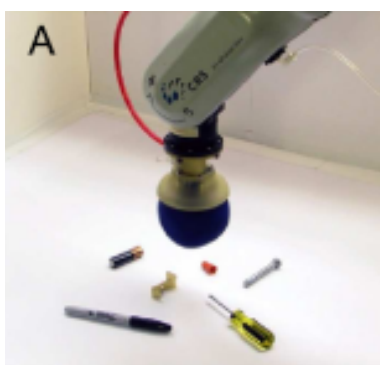


図 32 つかむ前



図 33 ダンパーをつかんでいる

粉体は密度が低いと動き回れますが、たくさん集まって密集すると動けなくなってしまいます。これが Jamming 転移と呼ばれる現象です。この Jamming Gripper ではゴムの中に粉体を入れます。最初はそれほどぎっしり入れないで、自由に形が変われる程度にしておきます。そして、その Jamming Gripper をつかみたいものに押し当てます。すると、ゴムが変形して、つかみたいものにフィットします。この状態で、ゴムの中の空気を抜いてやると、粉体が大気圧によって押しつぶされてしまい、ゴムがの中の粉体が Jamming 転移を起こし、ガチガチに固まってしまいます。するとゴムはつかみたいものにフィットしたまま堅くなるので、しっかりとくっついて持ち上げられるというようになっています。一連の流れを示したのが図 34 です。

しかもなんと親しみやすいことに、実際にこの Jamming Gripper を作った人々がいろいろ試した結果、ゴムの中に入れる粉体としては挽いたコーヒー豆が良かったそうです。驚きですね。

そこで、私たちもこの Jamming Gripper を手作りしてみました。図 35 がそれです。コーヒー豆を挽くのは面倒なので、インスタントコーヒーで済ませました。インスタントコーヒーをゴム風船に入れ、ゴム風船からチューブでピストンにつなぎ、ピストンで空気を抜きます。ペットボトルは風船をつかみたいものにしっか

^{*14} 青だし、まさにドラえもん！と思うかもしれないが、要注意。ドラえもんの手は白色である。

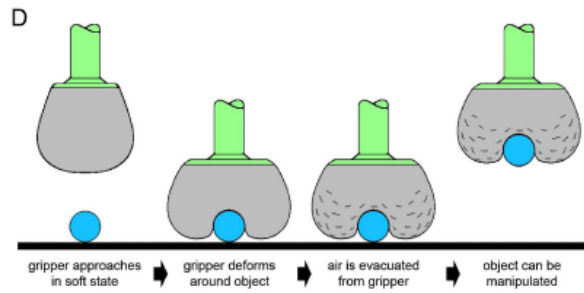


図 34 Jamming Gripper が物をつかむ手順

り押さえつけるために取り付けました。こんな簡単なつくりでも、いろんなものを持ち上げることができました (図 36)。ぜひ一度皆さんも作ってみてください。



図 35 自作 Jamming Gripper



図 36 ペットボトル (飲みさし) をしっかり持ち上た

1.3 地球物理学的应用

砂や土も粉体の一つであるということから容易に想像がつくでしょうが、粉体が織りなす不思議な現象として、様々な地形の形成やその運動などがあります。具体的には、砂漠の砂丘の移動 (図 37) や雪崩と言ったものがあげられます。一粒一粒の粉体は非常に単純なものであるにも関わらず、たくさん集まり全体として流れて運動すると、どのように相互作用を及ぼしあい、また、どのように互いに力がかかり運動量のやり取りがなされているのか理解するのは非常に難しくなります。

砂丘の研究に関しては興味深い結果が出ており、風により流された砂丘が他の砂丘に追いつくと、一度は合体してしまうが、再び分離し、まるで何事もなかったかのように追い越していくということが知られています (図 38)

雪崩研究の重要性に関しては言うまでもないでしょう。数々の実験とシミュレーションにより、様々な知見が得られています。セル・オートマトンによるシミュレーションは我々でも再現することに成功しました。(シミュレーションの記事参照)

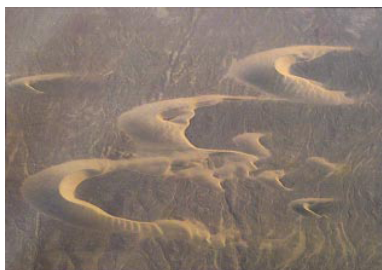


図 37 三日月型のバルハン砂丘

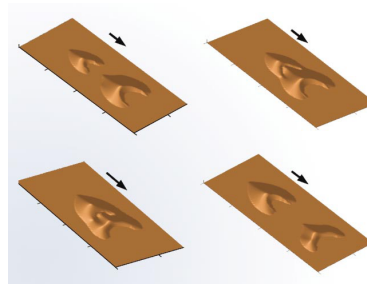


図 38 砂丘の追い越し

1.4 宇宙物理学的観点

粉体の特徴は、粒子同士の衝突によりエネルギーが散逸するという点にあります。そのため、激しく動き回っている粉体（気体とのアナロジーからしばしば粉体ガスと呼ばれる）を放っておくと、衝突によりエネルギーが失われていき、次第にいくつかの粒子同士が集まって塊を形成（clustering）していきます。これは粉体ガスの自由冷却と呼ばれています。なんだか難しいことを言っているようですが、箱などの容器の中にたくさんのビー玉や BB 弾などを入れて揺すってわしゃわしゃ運動させた後、しばらく放っておくと次第に塊となっていく様子が容易に観察できるので、ぜひやってみてください^{*15}。これも我々はシミュレーションにより再現することに成功しています。

一口に“粉体”といっても、見るスケールを変えると様々な物を粉体として扱うことができます。ここでは非常に大きなスケールで見てみましょう。宇宙物理学的視点から考えると、星の形成過程では数多くの塵や小惑星などが衝突を繰り返して、だんだんエネルギーを失って集まっていき、各々の重力のためにより一層凝縮をするという過程を経ていきます。これはまさに粉体の自由冷却そのものです。重力による相互作用が支配的であるために、今までの理論に若干の修正を加えなければいけません。宇宙における天体の形成といった非常に大きなスケールでも粉体の理論は有用です。

1.5 ナノスケールの粉体物理学

家庭の中の粉体から始まり、ロボット、地球物理学、宇宙物理学とどんどん大きくなってしまったので、今度は小さい方に着目してみましょう。製薬業などの製造業においては、どんどん小さい構造を持った粉体を製造する必要に迫られています。粉体のマクスウェルの悪魔やパターン形成の実験において粉体が自発的に集まったり構造を形成したりするのをご覧いただきましたが、そのような粉体の性質を利用してナノ構造を作ることが出来ないかとの取り組みもなされています。しかし、粉体が大きいうちは重力や衝突、摩擦といった力が粉体の運動を支配していますが、粉体が細くなればなるほど、電磁相互作用が支配的になってきます。（これはより細かいガラスビーズを利用したほうが静電気の影響が大きかったということで、我々も経験済みです！）しかし、従来扱われてきたような粉体物理学の手法や理論はミクロな粉体に適用することにある程度成功しています。今後の発展が期待されている分野です。

^{*15} このように自宅ですぐに試すことができるというのが粉体物理学の良いところです。かといって、実験及び解析が非常に簡単かというところというわけではなく、誤差や揺らぎに対処するのは非常に困難です

1.6 自己駆動粒子系

自己駆動粒子 (self-propelled particles) とはその名の通り、自ら動きまわる粒子のことです。自己駆動粒子系と言った場合は、それらの粒子の集合体のことを指します。具体的には、以下のようなものがあります。

- 人や車の交通流
- バクテリアの集団
- 魚の群れ
- 鳥の群れ
- 筋肉などのアクチン繊維

このような自己駆動粒子系と粉体には多くの共通点があり、研究が進められています。これらの振る舞いを思い浮かべてみましょう。例えば鳥の群れであれば、鳥同士はぶつかることなく互いに適切な距離を保とうとします。このとき互いの距離を調整する作用が粉体での衝突による相互作用に相当します。また交通流における渋滞は先ほど紹介した粉体のジャミング転移と類似の特徴を持っています。自己駆動粒子系は粒子間で複雑な相互作用をする結果、非常に興味深い挙動を示すことが知られており、良く研究されています。例えば図 39 は魚の群れが自発的に渦状の運動をする例であり、図 40 は人の集団が勝手に列を形成する例です。人は意識せずとも混雑した通路などでは前の人につき従って進むために、列を形成します。駅のコンコースや渋谷のスクランブル交差点を思い浮かべると分かりやすいのではないのでしょうか。駅のコンコースなどでは自ずと右側通行になったり、いつのまにか左側通行になったりと、列が自ずと形成されます。これらも一種のパターン形成と言えます。



図 39 魚の群れが渦を形成している



図 40 人の列

今まで挙げた自己駆動粒子系は生物や生体に関する物ばかりでしたが、実際の研究では生命体でないものを使ったものも行われています。例えば、シリカ (二酸化ケイ素) でできた $1 \mu\text{m}$ (0.001mm) 球の表面の半分を金でコーティングして作ったヤヌス粒子よばれる粒子を水に沈め、外部から交流電場をかけると、球の表面で熱輸送が生じ、球が自発的に動き始めます (図 41)。また、ペンタノールというアルコールを水の上にたらし、ペンタノールが水に溶けようとするにより走り回ることが知られています。走り回る過程で壁にぶつかると分裂を繰り返すなど、興味深い挙動が見られます。近年、このような自己駆動粒子系で一般化揺動散逸定理の検証がなされるなど、非平衡物理学の最先端で研究が進められている分野でもあります。

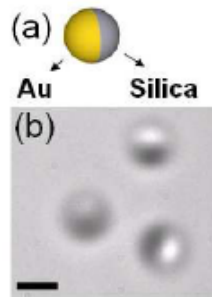


図 41 ヤヌス粒子 (b) のスケールバーは $1 \mu\text{m}$

2 参考文献・図引用元

1. Veit Schwammle and Hans J.Herrmann, "Solitary wave behaviour of sand dunes", 2003, Nature
2. Igor S.Aranson and Lev S.Tsimring, "Pattern and collective behavior in granular media: Theoretical concepts", 2006, Review of Modern Physics
3. Eric Brown et al, "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material", 2010, PNAS
4. Tamas Vicsek and Anna Zafiris, "Collective motion", 2010, arXiv (Submitted to Reviews of Modern Physics)
5. Hon-Ren Jiang, Natsuhiko Yoshinaga, and Masaki Sano, "Active Motion of a Janus Particle by Self-Thermophoresis in a Defocused Laser Beam", 2010, Physical Review Letters
6. Ken Nagai, "Spontaneous Irregular Motion of an Alcohol Droplet", 2007, RIMS Kokyuroku Bessatsu

3 謝辞および班員紹介

最後となりましたが、学生の自主的な活動である五月祭企画 PhysicsLab.2011 をあらゆる点で支援してくださった理学部物理学科の教職員の方々、アドバイスを下さった東京大学地震研究所の波多野恭弘先生に感謝いたします。特に粉体班に実験設備をお貸しいただき、様々なご相談にも乗ってくださった佐野研究室の方々、とりわけ佐野雅己先生と大学院生の黒田真史さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

昨年の五月祭直後から 1 年弱の間、PhysicsLab.2011 全体の運営をともに行った PhysicsLab. 正責任者・副責任者および他の班の班長たち、そしてなんといってもあらゆる苦難をともにしてきた粉体班の仲間たち、彼らなくしては今回の企画は成り立ちませんでした。感謝しています。最後に、粉体班の仲間たちを紹介して、締めくくらせていただきたいと思います。

・4 年生

班長：西口大貴

副班長：中口悠輝

唐木田亮、河村麻梨子、白石直人、高橋学、田屋英俊、西村優里、日向理彦、森井麗望

・3年生

神山翼、清水浩之、馬場俊介、前田俊輔、安居岳大