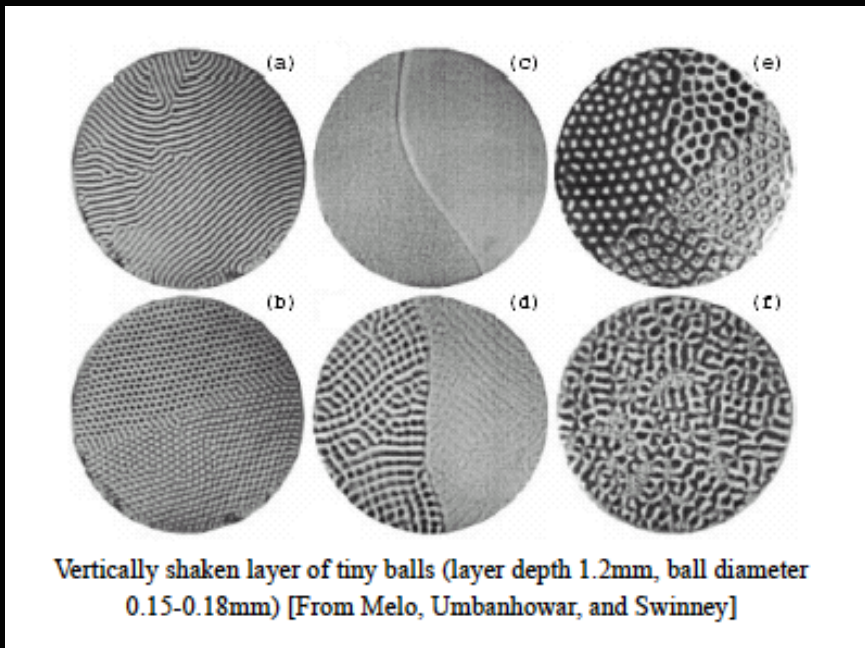


# 粉体の球殻対流

阪口 秀・西浦泰介 ( 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域 )

道具はパソコンに限る



これまでに多数見出されてきた粉体対流を球殻上に見出す！

# 自己紹介と他己紹介

残念なことに、この会場の中に、私達の職を奪おうとされる方を上司に持つ方がいらっしやいます。

## 阪口 秀 (京大農学部農業工学科出身)

神戸大学農学部助手

オーストラリアCSIRO Exploration & Mining主任研究員

クイーンズランド大学地震研究所シニアレクチャラー

東京大学地震研究所客員教授

独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)

地球内部ダイナミクス研究領域チームリーダー

神戸大学大学院システム情報学研究科教授

## 西浦泰介 (同志社大学工学部化学工学科出身)

独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)

地球内部ダイナミクス研究領域ポスドク

# 二人合わせて粉体一筋35年

昨年の今頃

2009年11月

# 13日の金曜日

これは本当にあった怖い話です。  
次はアナタの番かもしれない。

ちょうど1年と10日前、

## 恐怖のスロットマシン

がインターネットによる衆人環視の下で回された。

全く科学政策的な議論もなく無造作にレバーは下ろされた

CPSのウェブにも載せてく



クルクルクル～ん

ガッシャッ

22年度予算がここから出てきます

FILE GO TO OPTIONS ACTIONS HELP HOYLE PLAYER \$4,949.50



# 恐怖の事業仕分け用スロットマシン

「二村一品イベント事業費十数億円」とか、  
確かに仕分け対象はバラエティに富んでいた。

Tutorial

第3WG 第3日目

7 7 7	1000	5,000	7 7 7
7 7 7	300	600	7 7 7
7 7 7	120	240	7 7 7
7 7 7	100	200	7 7 7
7 7 7	80	160	7 7 7
7 7 7	40	80	7 7 7
7 7 7	40	80	7 7 7
7 7 7	30	60	7 7 7
7 7 7	20	40	7 7 7

項目名      ケツ論

花嫁学校	地球内部 ダイナミクス研究	これで いいのだ!
バカ田大学	恥丘内部研究	ダメだこりゃ
海洋研究 開発機構	低脳学部	タイホだ!

COINS PLAYED: 0      CREDITS: 622      25¢      WINNER PAID: 600

CASH OUT    SPIN    PLAY MAX    BET ONE    BET MAX

来年度予算がここから出てきます

FILE GO TO OPTIONS ACTIONS HELP      HOYLE PLAYER \$4,949.50

# さあ、有識者仕分け委員がボタンを押した！！！！

博士号

<http://www.cao.go.jp/sasshin/oshirase/h-kekka/pdf/nov13kekka/3.pdf> より引用

## 第3WG 第3日目 事業仕分け 評決結果

地球内部ダイナミクス研究では、  
事業費の7割5分が人件費で、残りの2割5分が研究費。

そこで、研究費を半減し全体の1割2部5厘の縮減で予算を通した。

### 和田君、それでも十分痛かったんだぞ！

キに失業だ。

オメデトウございます！22年度予算はまったくどこからも出てきません

ACTIONS HELP \ 0.0 (人件費を含む)

今年再び

2010年11月

# 10日の水曜日

研究者全員クビしか解は無い。  
和田君、君はどう思う？

またまた、

## 事業仕分け無視・軽視

の勧告によって、

「少なくとも予算見送り又は半減」をつきつけられた！

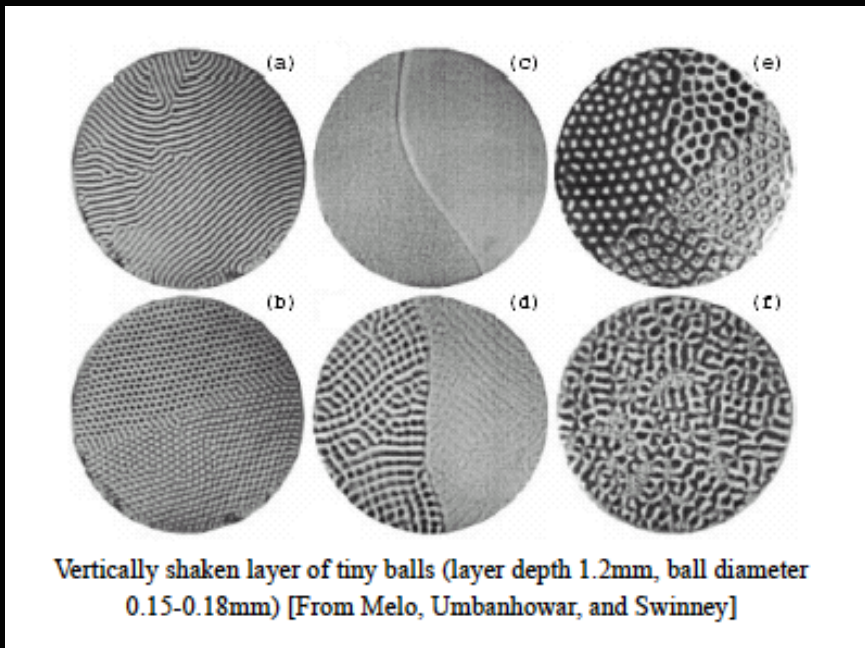
この対応にあけて、研究者でありながら管理職である私は今日の発表の準備が全くできなかった！



# 粉体の球殻対流

阪口 秀・西浦泰介 ( 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域 )

非常に古いネタである



無理やり粉体と惑星科学を結びつけてみた





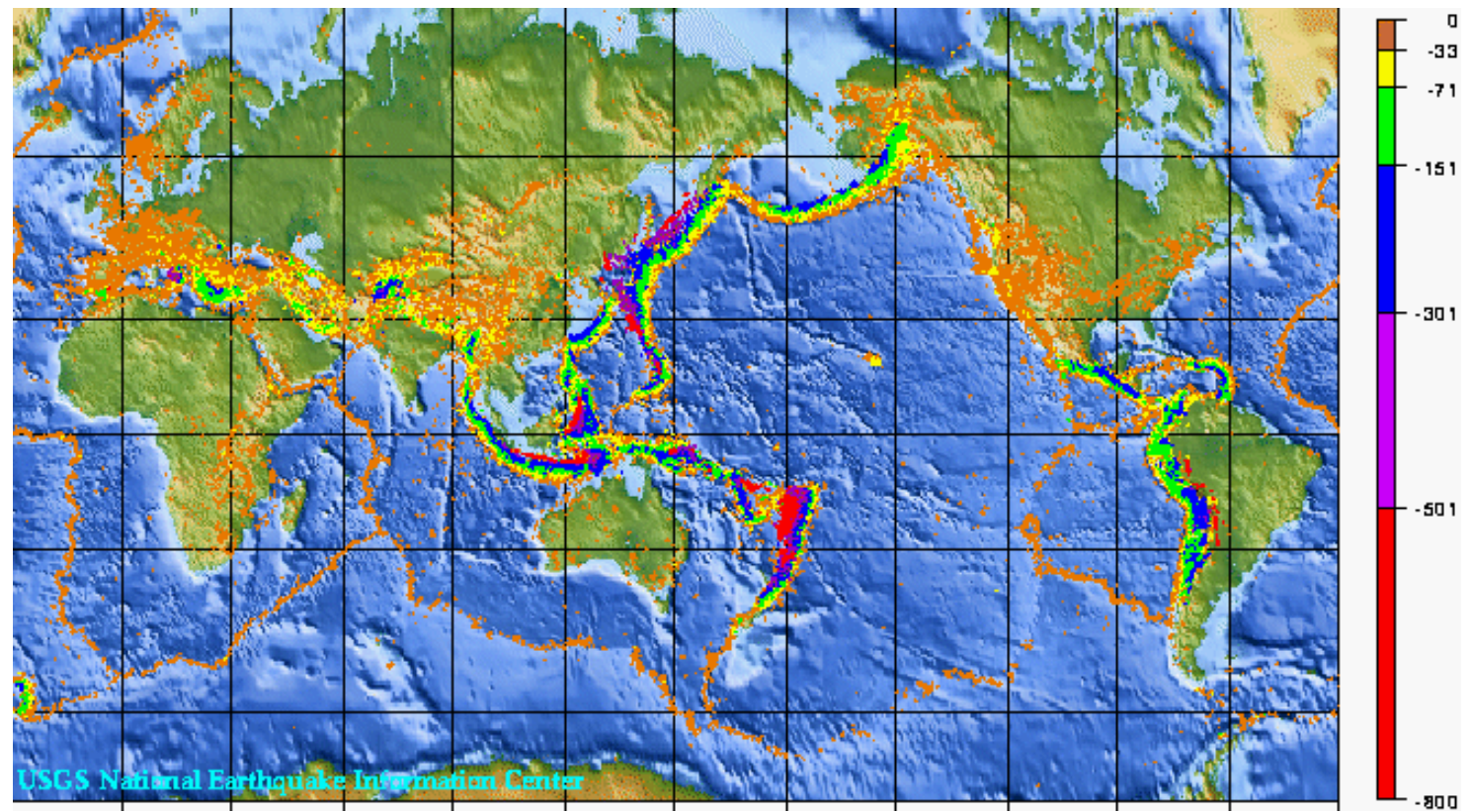
研究の動機  
この模様を数値的に再現したい

© 2007 Europa Technologies  
Image © 2007 NASA  
Image © 2007 TerraMetrics

©2007 Google™

# プレートテクトニクス理論の概略 (I)

I) 地球の表面は何枚かの固い殻(プレート)に覆われている。



世界の地震の分布(色は震源の深さを表す) USGS地震情報センター資料より引用

測定地震波と等方均質半無限完全弾性体仮説から推定

県境や国境のように、地図上に明確にプレートの境界線があるわけではない。



# プレートテクトニクス理論の概略 (II)

II) それぞれプレートは地球内部物質(マントル)の熱対流によって、それぞれ勝手な方向に動こうとしている。

つい40年前までのプレートテクトニクス理論では太平洋プレートは地球表面を剛体回転していると考えられていた。

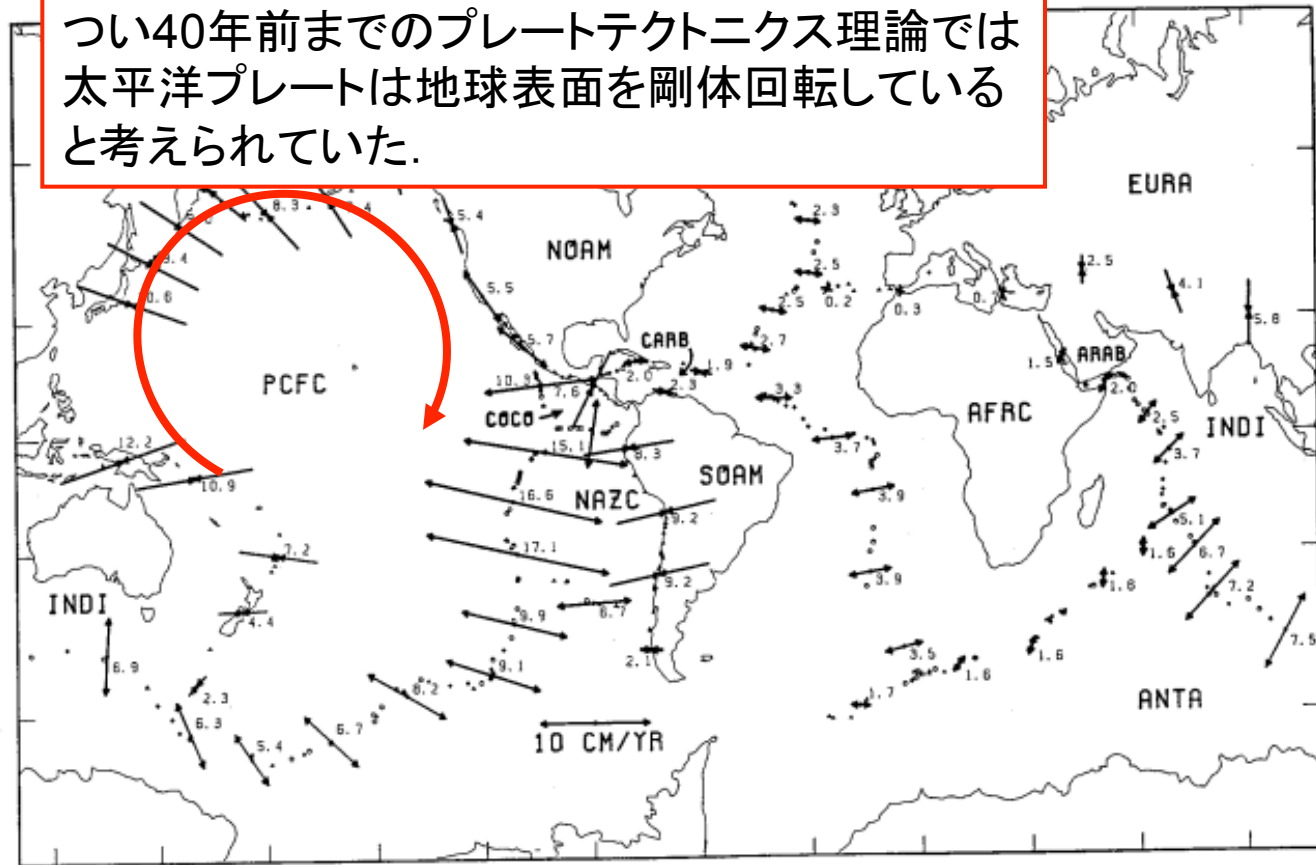


図4.14 プレートの相対運動, RM2(Minster and Jordan, 1980). プレート略号は表4.1と同じ。

この図からマントル対流を想像した人は、かなり、きてます、きてます。

# プレートテクトニクス理論の概略 (III)

III) 隣接するプレートの動きが整合的でないところでは、プレート間に

- a) 押し合う
- b) 離れてゆく
- c) すれ違う
- d) どちらかが下にもぐりこむ

がある。

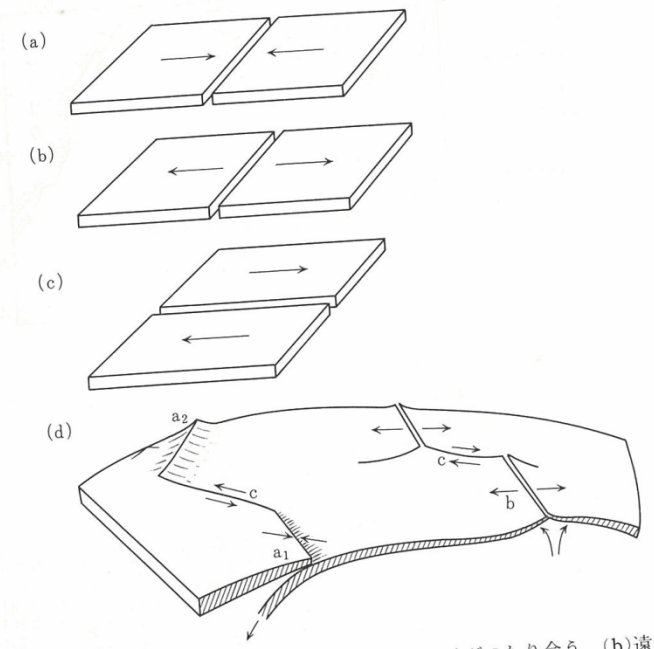


図1.3 3種のプレート境界. 二つのプレートが、(a)ぶつかり合う、(b)遠ざかる、(c)すれちがう。

(a) 収束型(convergent)境界  
(b) 発散型(divergent)境界  
(c) 平行移動型(translational)境界  
であり、現実には(a)は海溝(a<sub>1</sub>)、および造山帯(a<sub>2</sub>)、(b)は中央海嶺(拡大センター)、(c)はトランスフォーム断層である(図1.3(d)).

極めて固体の破壊に近い描像ばかりです。

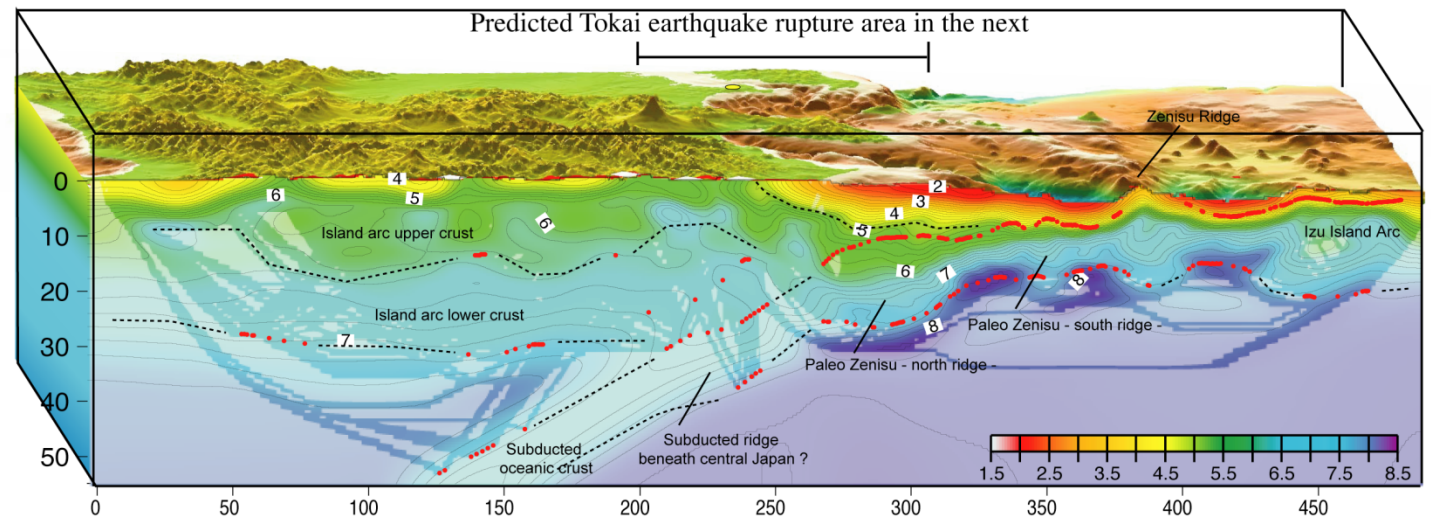


# プレートテクトニクス理論の概略 (IV)

## IV) プレート境界で地震が多く発生している。

全地球のプレート境界の総長さ(なぜか面じゃなく線と考える) = 約6万Km

約6万Kmのプレート境界のうち、2/3にあたる約4万Kmは、海底にあるプレート境界で、それも沈み込み境界(どちらかのプレートが下にもぐるタイプ)である。



エアガンによる人工地震波を使った探査による東海沖地震波速度分布

探査をして(すごい金かけて)、こういう図を沢山作る研究を「イメージング研究」というそうです。

# プレートテクトニクス理論の歴史

言われてからまだ五十年も経っていない。

1960年代後半：大陸移動説などから言われ出す。

1970年代後半：やっと日本に伝わる。

かなりいい加減な理論なので、  
「プレート適当に苦す」と揶揄される。

1980年代後半：やっと日本で信じられ出す。

## 地球物理学・地震学におけるプレートテクトニクス教育

うしん。

各プレートごとに、

**プレート名と特徴的な地名と地形名と岩石名と  
鉱物名と含有元素名と運動形態名と各地震の年代・  
規模と特徴を強制的に全部丸暗記させられる。**

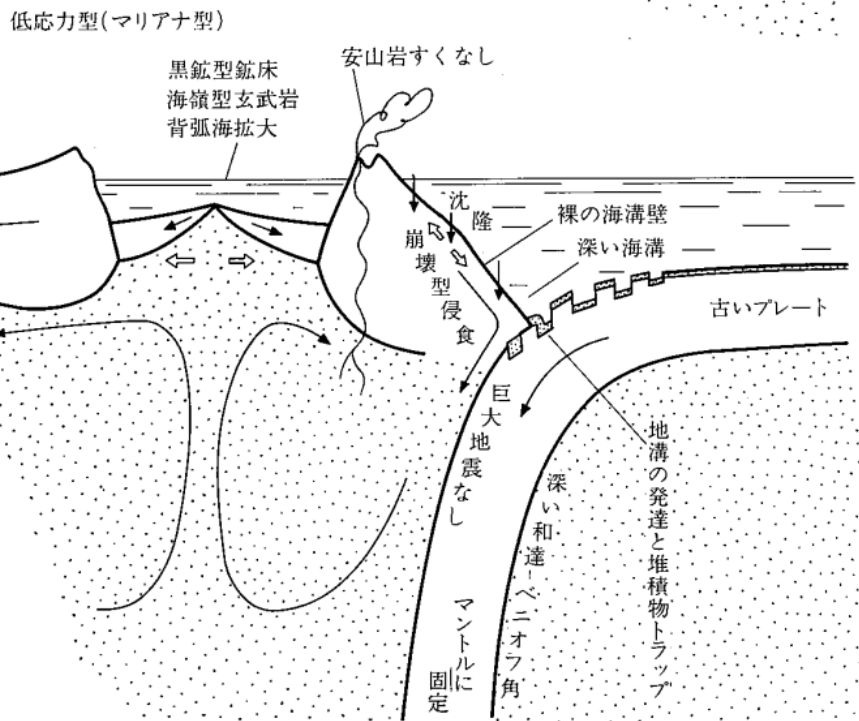
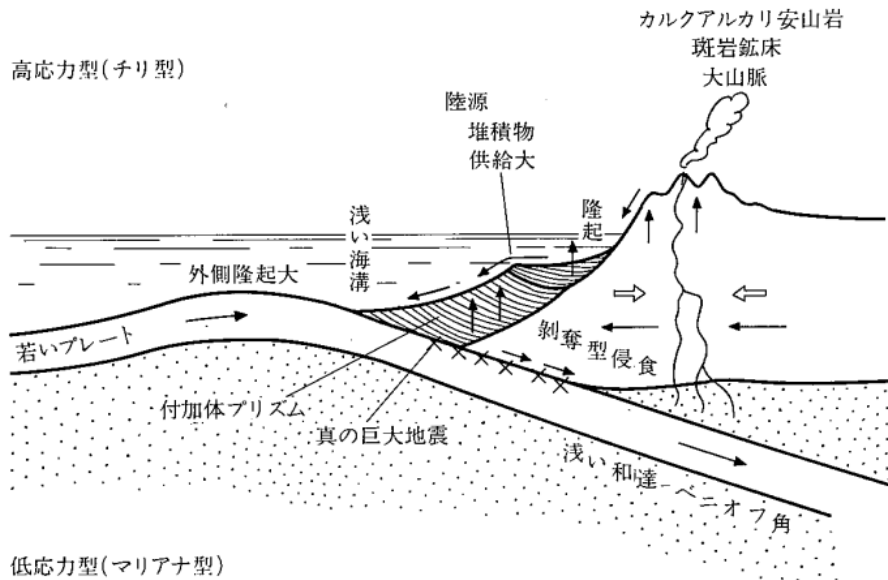


図 6.31 二つのタイプの沈み込み帯。(a) 高応力型(チリ型), (b) 低応力型(マリアナ型)。⇨はストレス, ⇦は運動の方向を示す。(Uyeda, 1984)



## 地球物理学・地震学におけるプレートテクトニクス教育



2次元じゃダメなんですか？

各プレートごとに、

プレート名と特徴的な地名と地形名と岩石名と  
鉱物名と含有元素名と運動形態名と各地震の年代・  
規模と特徴を強制的に全部丸暗記させられる。

世界は何が何でも2次元

表面から見ても2次元、深さ方向から見ても2次元。  
3次元的な運動は絶対に考えたくないらしい。

ダメに決まってるやる！

# 頑なまでに2次元

医学部教育での眼球断面図のような説明ですが、プレート運動の駆動力のマントル対流はどこに？

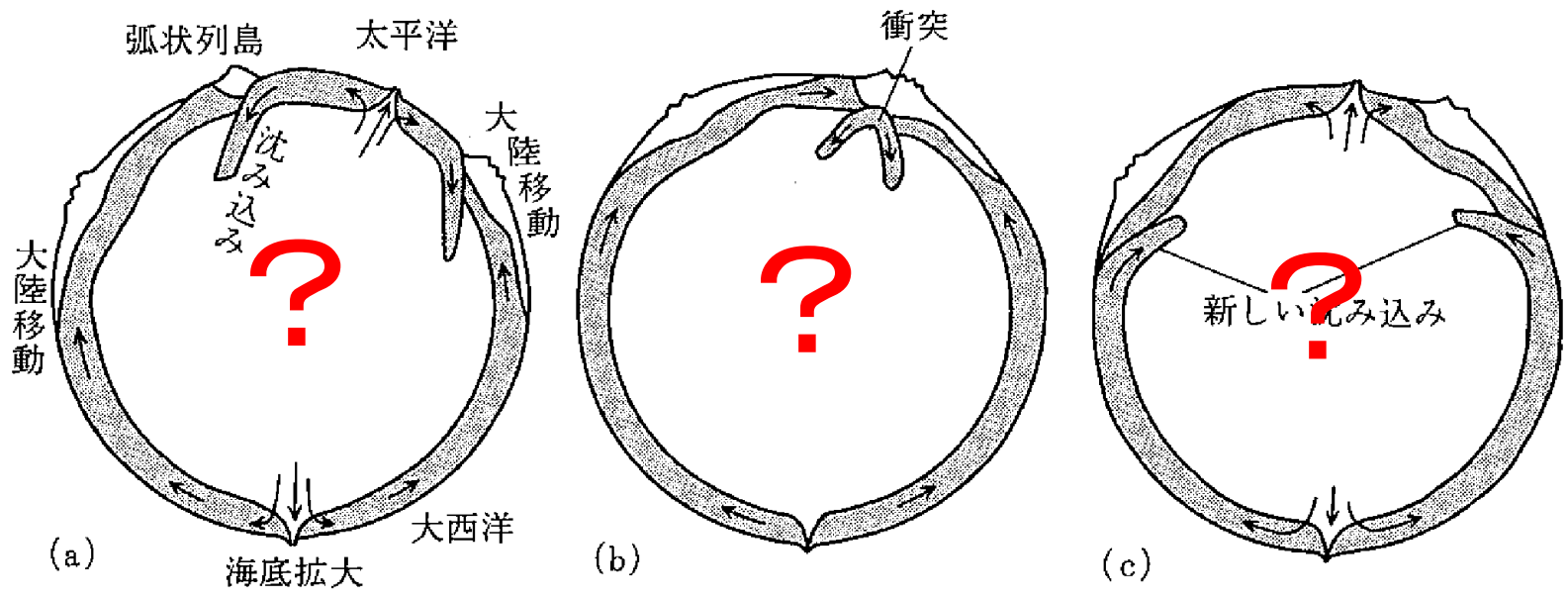


図 1.6 プレート・テクトニクス の 模式図. (a)太平洋よりも大西洋が大きくなり, (b)太平洋は閉じて, ユーラシアと北アメリカ大陸が衝突する. (c)大西洋が沈み込みを始め, 新しい太平洋が開き出す.

上田誠也著「プレート・テクトニクス」岩波書店 より引用

この複雑な球殻運動のダイナミクスを2次元断面で説明するセンスは、一体どこで養われるのか？

# 地球物理学・地震学におけるプレートテクトニクス教育

子曰学而不思則罔思而不学則殆  
子曰はく「学びて思はざれば則ち罔し。  
思ひて学ばざれば則ち殆し。」と。

各プレートごとに、

プレート名と特徴的な地名と地形名と岩石名と  
鉱物名と含有元素名と運動形態名と各地震の年代・  
規模と特徴を強制的に全部丸暗記させられる。

世界は何が何でも2次元

表面から見ても2次元、深さ方向から見ても2次元。  
3次元的な運動は絶対に考えたくないらしい。

学：先人の知恵の結果を、客観的に受け入れて理解すること

思：学んだことの内容について、主体的に考え、整理して自分のものとする

## 地球物理学・地震学におけるプレートテクトニクス教育

欧米では、アルファベット26文字で読み書きできるところを、日本では、漢字5万字＋ひらがな、カタカナ、ローマ字各50文字覚えなければならない流れを見事に踏襲したために、基礎知識を学んだ時点で、博物学的知識の多さに疲弊して、誰もプレートテクトニクスを真面目に取り組むことは無くなった。

これだけじゃないが、教育が悪すぎる！

プレートテクトニクスに面白さを感じるためには、まず、絶対に大学で習わないことが重要。



# プレートテクトニクス理論の終焉

1972: Morganらによる論文の概要

プレートテクトニクスでは、プレート境界における運動を2つのプレート間の相対運動として幾何学的に記述できることに大きな特徴があり、...

プレート運動に球面上の剛体運動を考えれば良い。...

そのためにはオイラー角を用いて、...

## 完全に道はずしている！

木村学 著 (2002) 「プレート収束帯のテクトニクス学」 より引用

プレートテクトニクス研究者さえも、ダイナミクスを考えることを完全に放棄した。

「地球は1個の巨大な非平衡開放系である。」

しかし、地球は本来、

45億年もかけて徐々に冷やされつつ、その内部と表面との間にはなお絶大な温度差があり、それがマントル対流やプルームの上昇下降など数億年スケールのダイナミクスを維持している。

非線形科学の教材である。



© 2007 Europa Technologies  
Image © 2007 NASA  
Image © 2007 TerraMetrics

©2007 Google™

ポイント 35°41'01.10" N 139°44'57.34" E

ストリーミング ██████████ 100%

上空 9989.01 km



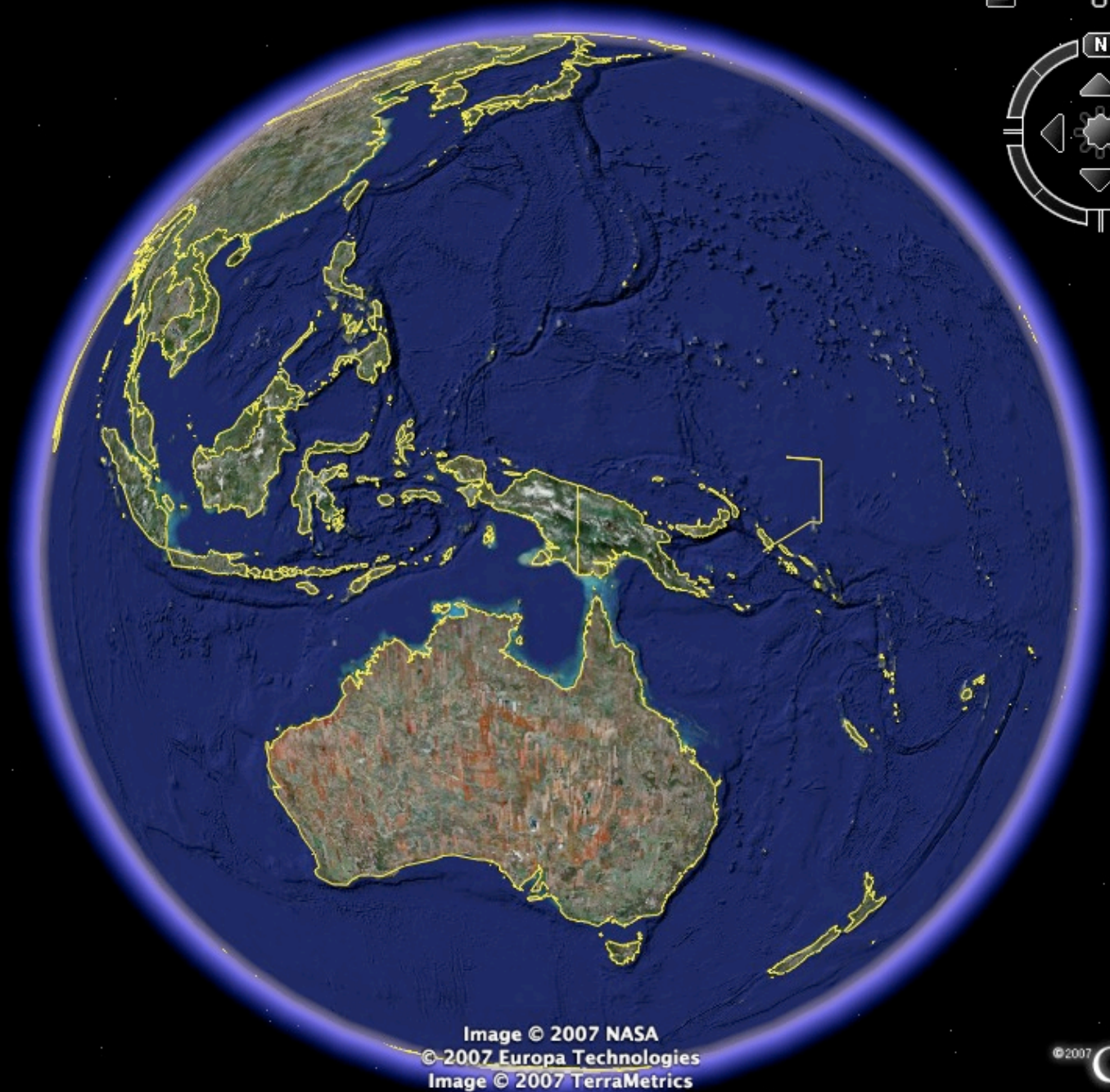


Image © 2007 NASA  
© 2007 Europa Technologies  
Image © 2007 TerraMetrics

© 2007 Google™





(瀋陽) Shenyang

(平壤) Pyongyang

(ソウル) Seoul

(デイグ) Daegu

(釜山) Busan

福岡市

広島市

神戸市

名古屋市

大阪市

日本

さいたま市  
横浜市

仙台市

Shanghai

Image © 2007 NASA

© 2007 ZENRIN

© 2007 Europa Technologies

Image © 2007 TerraMetrics

©2007 Google™

ポイント 35°40'27.01" N 136°51'46.17" E

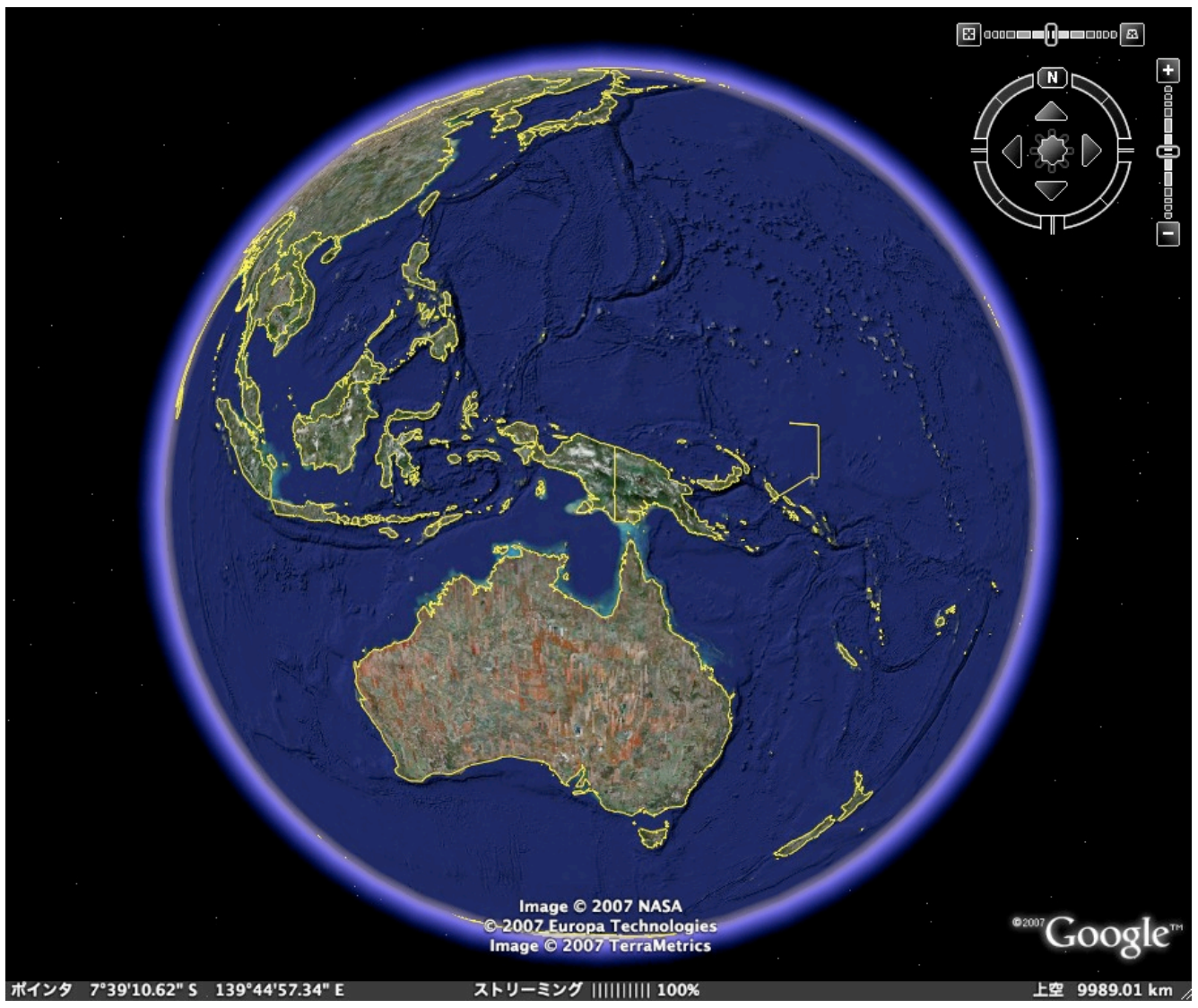
ストリーミング 100%

上空 2280.03 km



# 尋常じゃないほど複雑な地形パターンのある地球

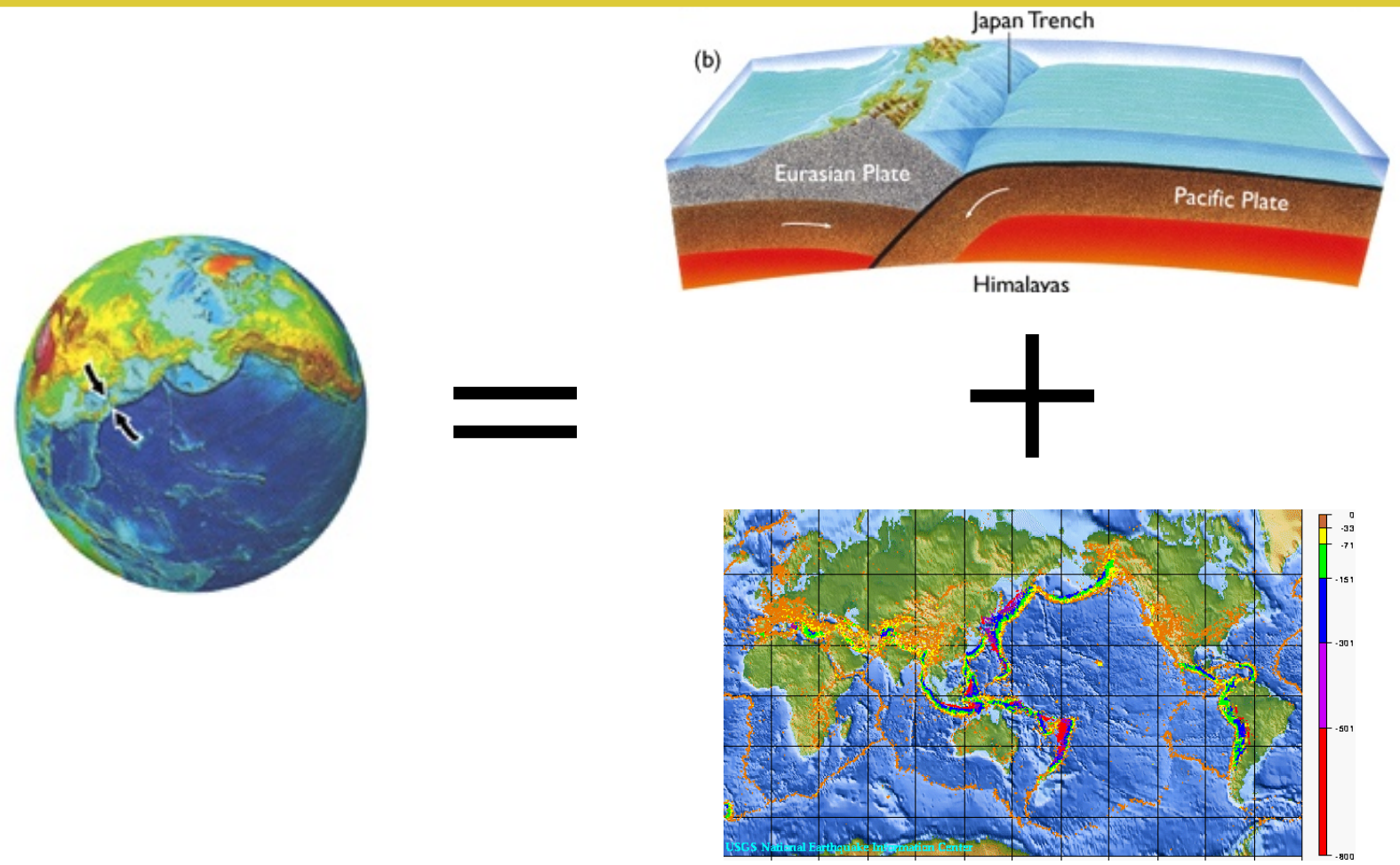
どこにも対称性が見当たらない限り、三次元球殻のダイナミクスをありのままに考えるべきである。





物理には、次元を落として考えても良いものと絶対にダメなものがある。

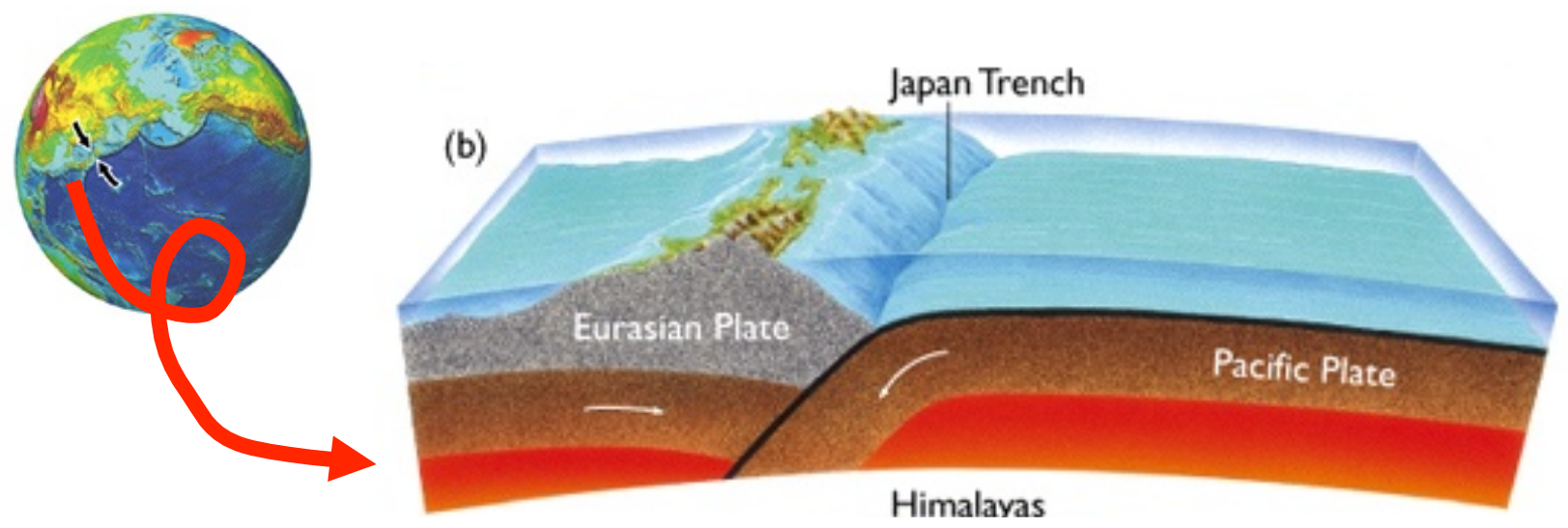
くりぬいた弁当箱三次元でもダメなのだ。



「と考える限り、永遠に何も分からない。」ことにも気がつかない。

# 都合の良いところからお話は始まる

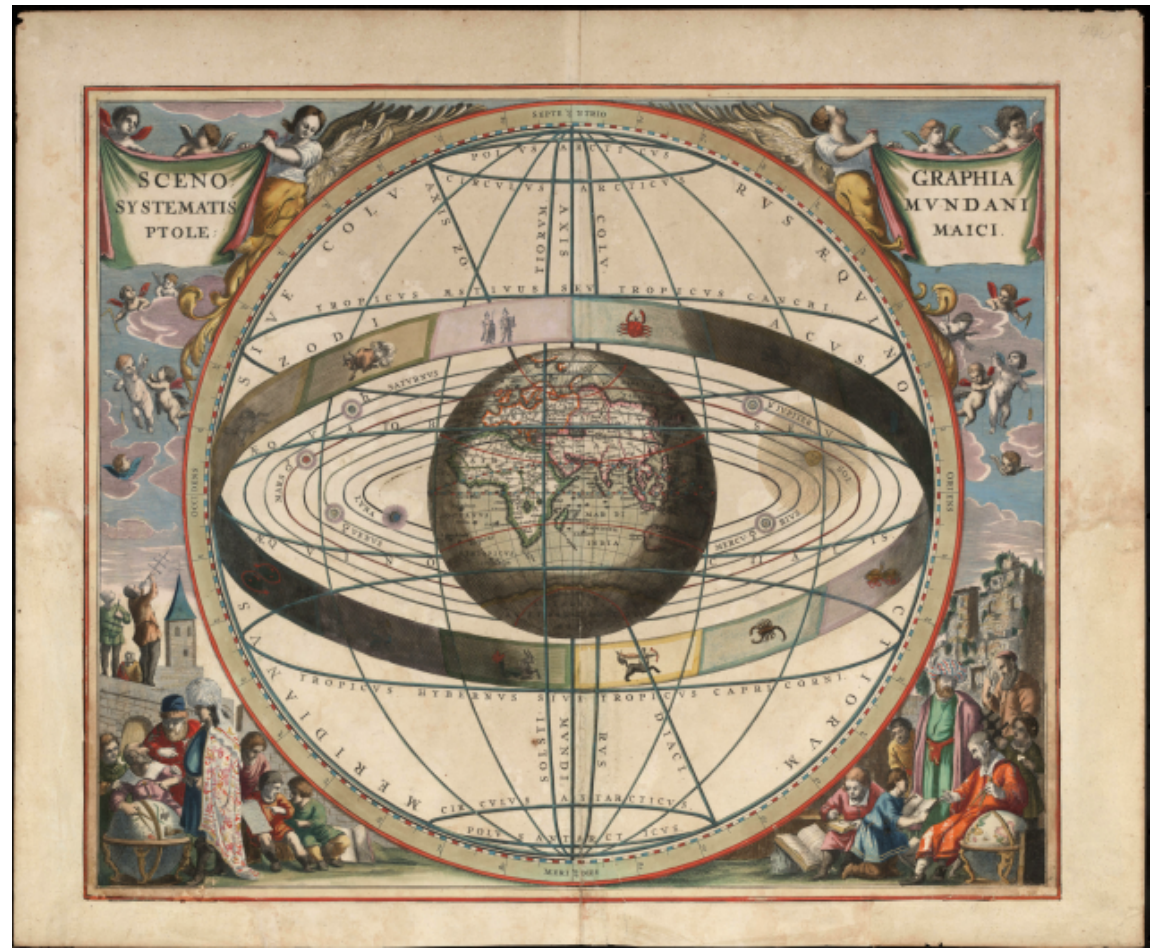
必ず火山列と沈み込み帯は並んでいる。  
火山は沈み込み帯による海水が原因で形成  
されるとあるが、何故、沈み込み帯は不明



このシステムが形成されるために数千年～数億年かかる  
と地球物理学者は言うが、誕生から46億年のうち、残りの  
40数億年間、本当にずっとこんな不安定そうなパターンを  
保ち続けていられるのだろうか？

# 天動説主流の時代

ダイナミクスを考えないと、  
こんな図で理解したつもりになってしまう。

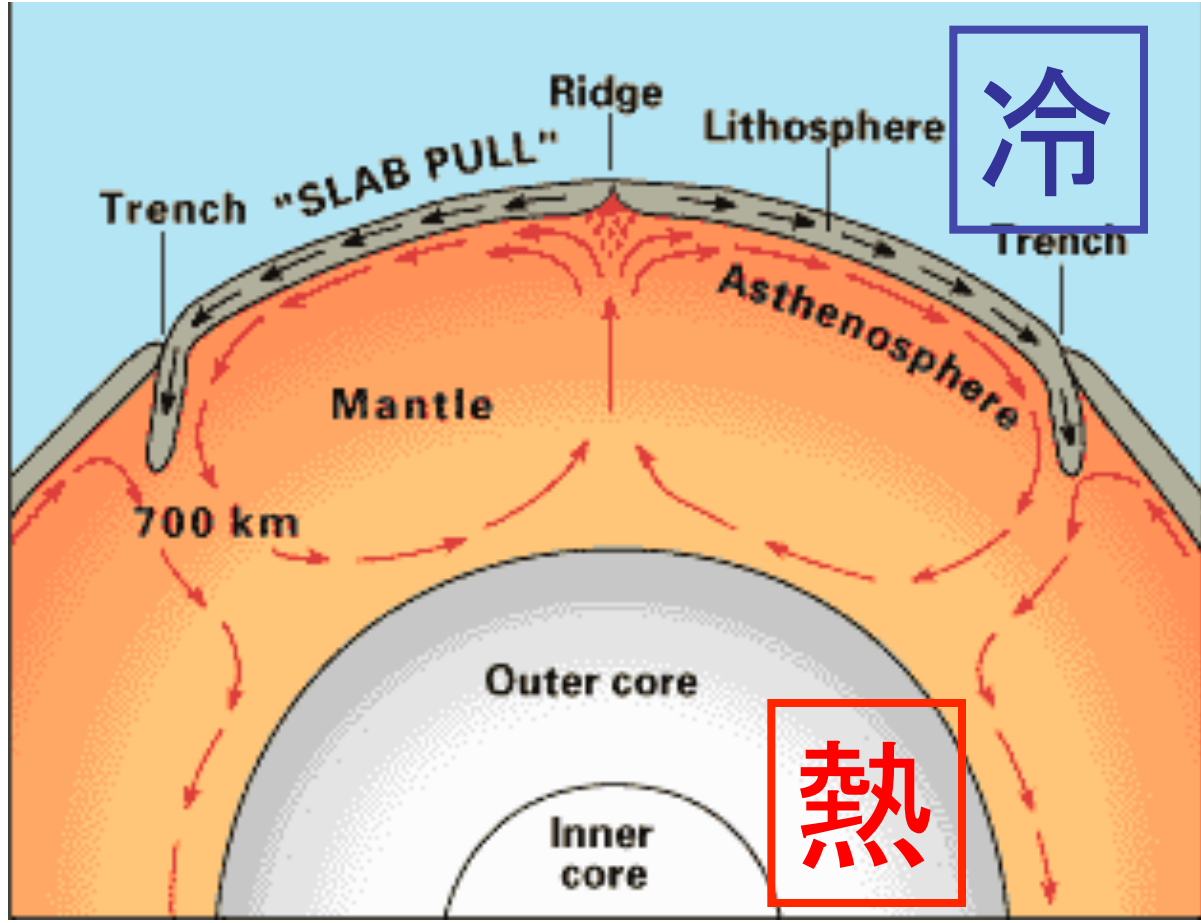


地球外部の想像図



# 2位でもダメだし、2次元はもっとダメなんですよ！

ダイナミクスを考えないでいると、  
こんな図で理解したつもりになってしまう。



地球内部の想像図



心ある地震学者は球殻としての地球内部物性を調べている。

マントルは赤いドロドロの液体ではない。  
固いカチカチの岩石のほずである。

3D Tomographic Image and Rheological Structure of the Earth's Interior

Composition	Rheology	Viscosity
Crust	Lithosphere	$10^{24}$ Pa s
	Aslhenosphere	$10^{19}$ Pa s
Mantle	Mesosphere	$10^{21}$ Pa s
	Outer Core	$10^{-2}$ Pa s
Core	Inner Core	----

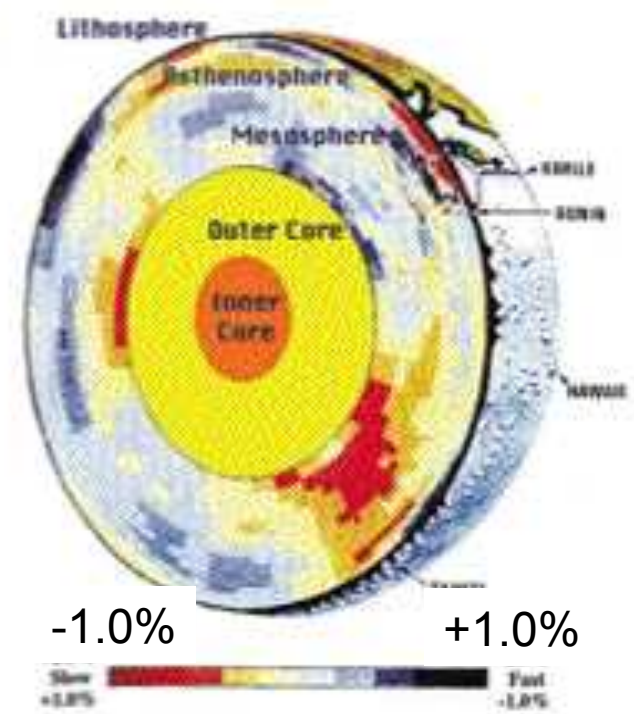


Fig. 1 A 3D tomographic image obtained from the inverted rheological structure of the Earth's interior. The tomographic image shows seismic wave velocity anomalies. The color scale indicates the percentage change in seismic wave velocity, with red representing a decrease (slow) and blue representing an increase (fast).  
1次元モデルによる地震波速度とのズレ  
rheology of

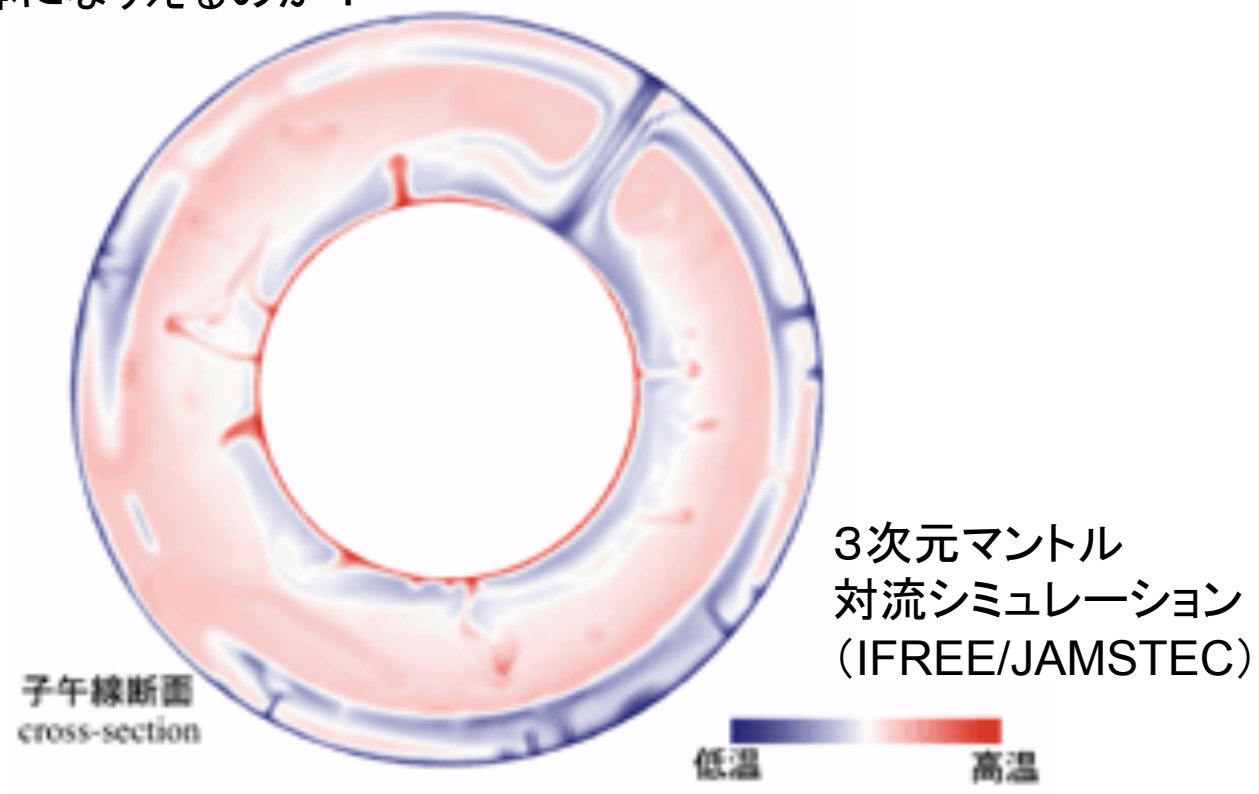
**海底下マントル内弾性波速度**  
 マントル上部（深さ30km）： P波 8km/sec, S波 5km/sec  
 マントル下部（深さ2800km）： P波 14km/sec, S波 7Km/sec



しかし、3次元球殻マントル対流シミュレーションはオール流体である。

固体が対流するというのも不思議だが。

地殻は後付けで良いのか？  
高粘性流体は固体になりえるのか？



流体には非対称沈み込みが現れない！



# そもそも流体でこんな地形のパターンが出るのか？

亀裂が長時間残っているのは固体の特徴である。



サンアンドレアス断層



四国の断層

しかし、亀裂は残っているが、殆ど閉じているのだから、流体でも良いのか？



# 粉体は条件次第で流体にも固体にもなる



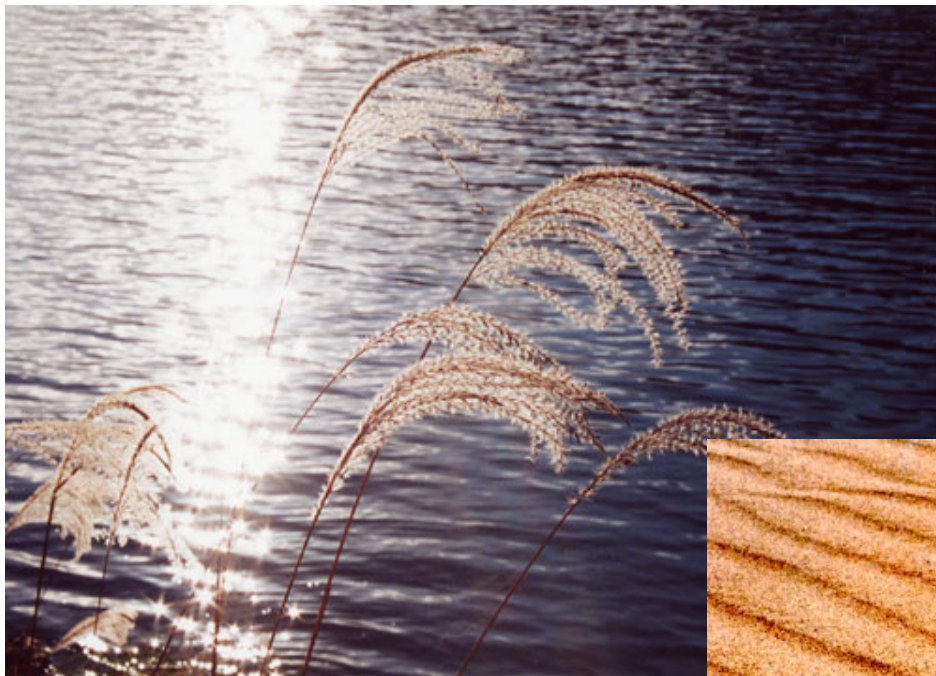
粉体

||

流れる  
固体

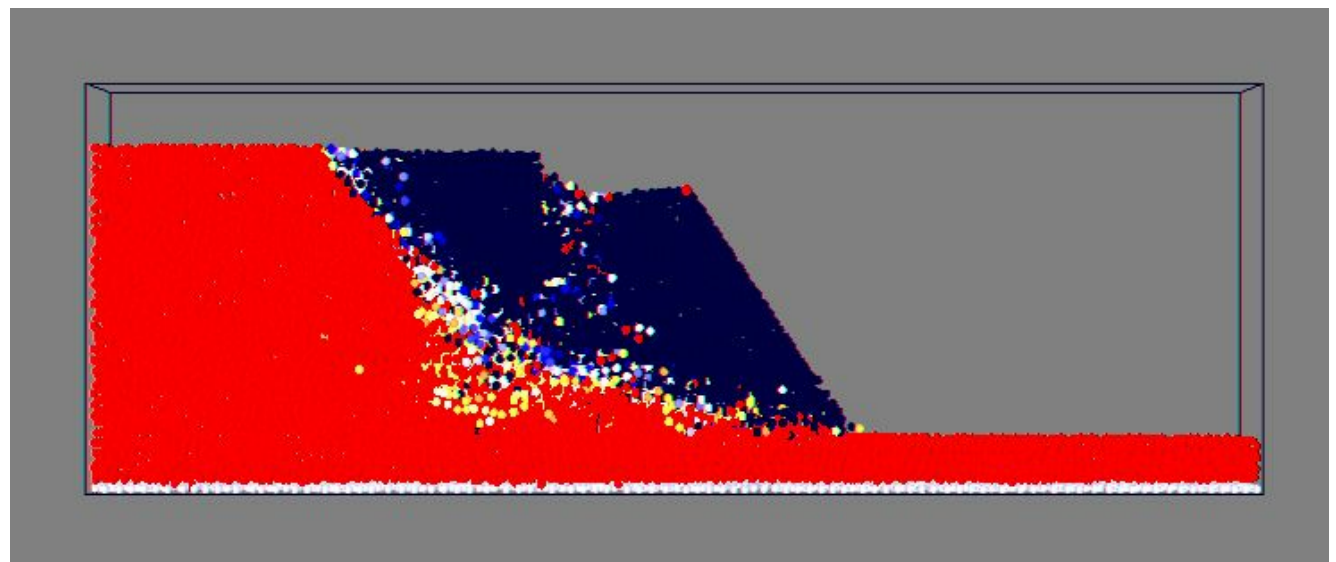
# 粉体が作る流体のパターン

粉体で流体を真似することはできるが、逆はできない。安息角、せん断破壊など。





# 粉体は固体のせん断破壊も表現できる



そもそも流体では斜面が作れないから  
かなり無理です。

# マイケル・ファラデーが行った砂の実験

粉体  
||  
流れる  
固体

1840 F. A. Taylor

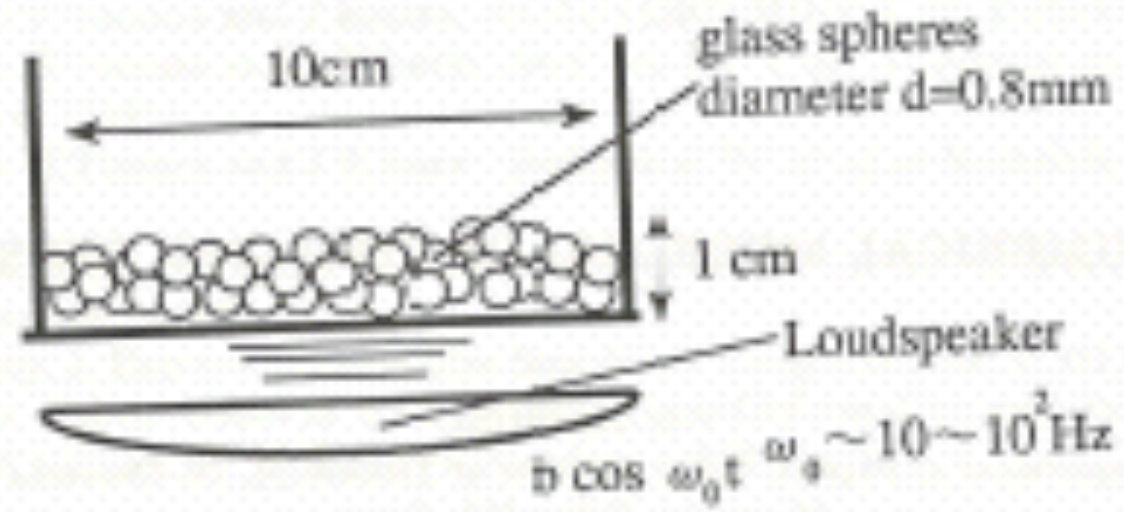


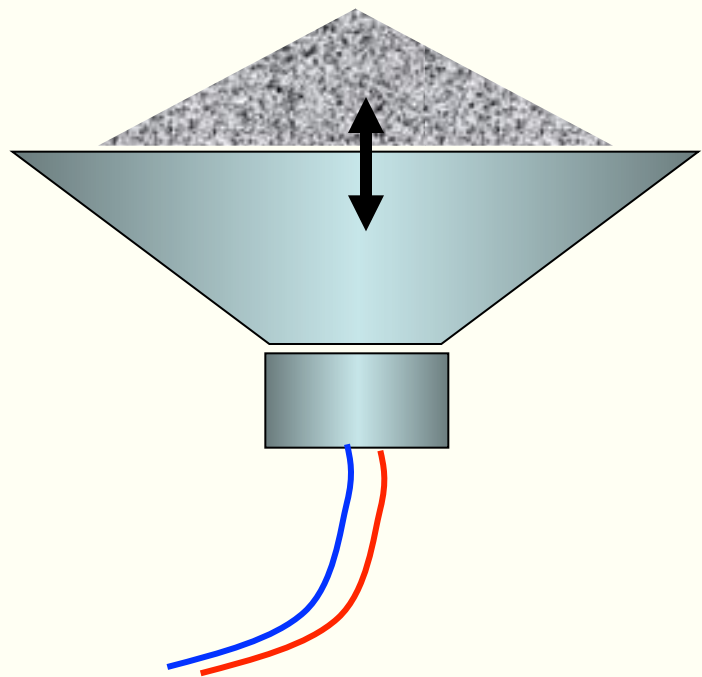
Fig. 1. A schematic of a typical experiment

田口さんの古い論文より



# マイケル・ファラデーが行った砂の実験

粉体  
||  
流れる  
固体



ラウドスピーカーの上で砂を揺する実験を行った

# マイケル・ファラデーが行った砂の実験を真似してみた

粉体

||

流れる  
固体



超高級スピーカーB&W703の上で砂を揺する実験を行った

# 砂は踊りましたが、対流なんかしませんでした。

粉体  
||  
流れる  
固体



選曲が悪かったのか？ 歌詞もスペイン語で「クソつたれ」と連呼してた。

# 手動式粉体ダイナミクス実験装置の開発

長野県信州新町化石博物館に常設展示



両サイドの太鼓を叩くと砂が踊ってパターン形成します。（設計：阪口 秀、製作：鬼工房）



# 大人もはまる粉体ダイナミクス

教育的玩具として普及活動もしています。



ポンポコポンポン、チンジャラジャラ。残念ながらスロットマシンはありません。

# 地形のダイナミクスとパターン

太鼓のリズムで色々な地形になります。



平行四辺形の大地と中央に山ができました。

# 直径30cmの円盤に2種類のガラス球を充填

回転速度次第で、  
色々な偏析パターンが出せます。



材料はビール瓶のガラスと焼酎の一升瓶のガラスから作りました。



# 渦巻き状偏析



亡霊のように写ってるのは私です。

**クルクルクル～ン！ 事業仕分け人よ、止めてみろ！**



# 円筒管とビール瓶と焼酎一升瓶

色ガラスって買うと意外に高いのです。  
空き瓶を使うのも中身の液体代がね。。。。



回転速度によって種々の3次元的な偏析パターンが出る

# 円筒管とビール瓶と焼酎一升瓶

蔵本先生、是非、この複雑な粉体運動を数学の言語で表して下さい。お願いします。



手動式なので、一度作ればこっちのもの

# 焼酎一升瓶 — ビール瓶 — 焼酎一升瓶に分離

必ずこの順番で飲んで下さい。



2次元の世界に固執する地球物理学者は是非これで遊んで欲しいです。



# 「自然は数学の言葉で書かれている。」

数理言語を用いてある知識を  
表現したときに、しばしば  
論理自身の展開によって、  
当初に意図されたことを超える  
結論が引き出される。

でなきや、わざわざクソ面倒で複雑な  
記号学を勉強するメリットはない。



# 「自然は粉体モデルでも描くことができる。」

粉体モデルを用いてある知識を  
表現したときに、しばしば  
モデル自身の時空間拡大によって、  
当初に意図されたことを超える  
結論が引き出される。

でも、電気代も一銭もかけないで、同じことを  
紙と鉛筆だけで表現できる数学は素晴らしい。

# パソコンによる粉体シミュレーション

## パソコンの定義

Personal Computer = 給料で買えること  
家計を圧迫しないこと

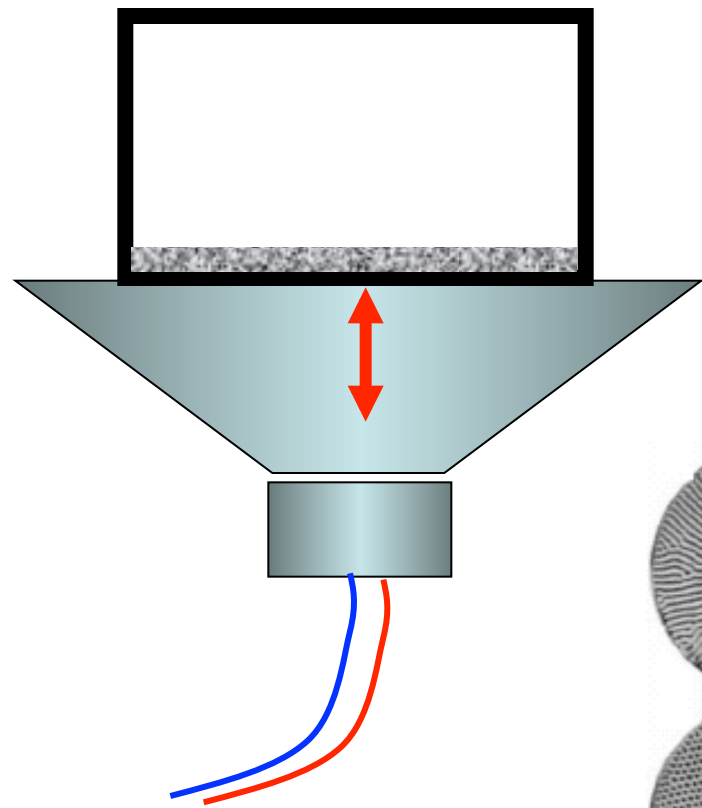
## 粒子数

100万粒子が最低単位  
600万粒子は合格

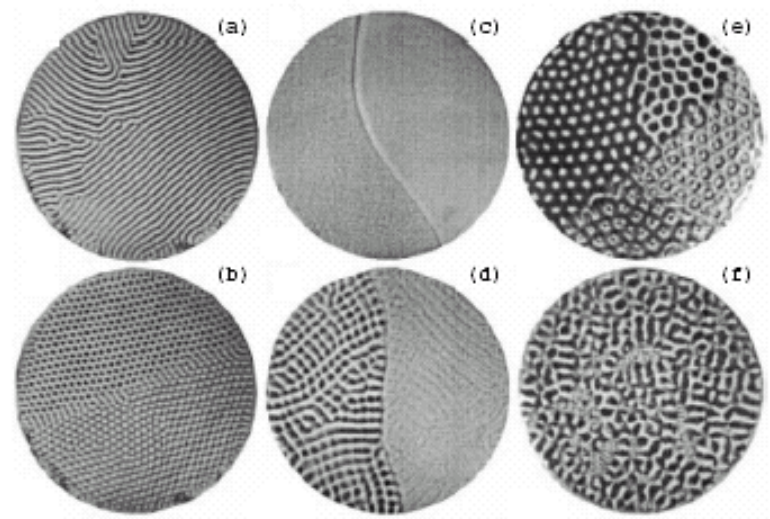
田中様、如何でしょうか。

# パソコンによる粉体シミュレーション

俺が入院しててもパソコン働いてくれた。



$$\Gamma = 4 \pi^2 f^2 A / g$$

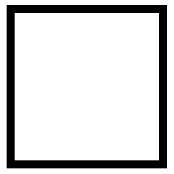


Vertically shaken layer of tiny balls (layer depth 1.2mm, ball diameter 0.15-0.18mm) [From Melo, Umbanhowar, and Swinney]



# パソコンによる粉体シミュレーション

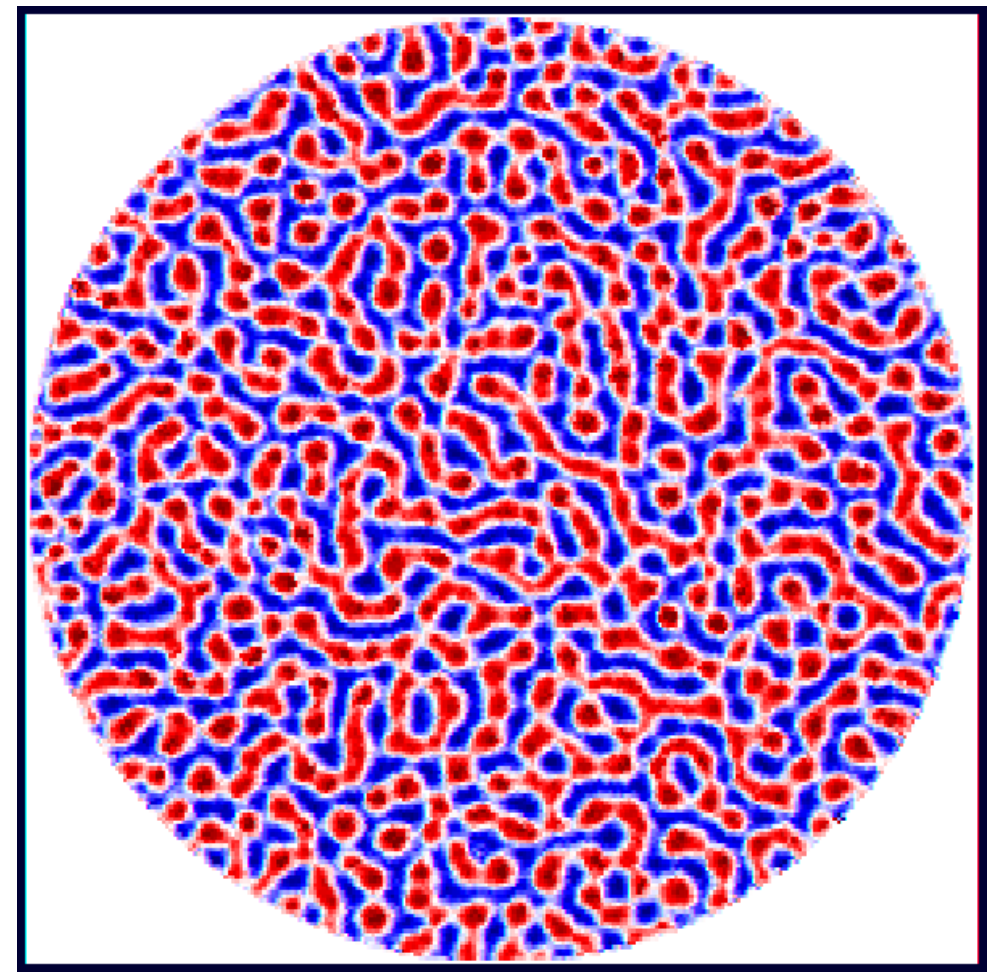
粒子数が多いことは大切です。



10d

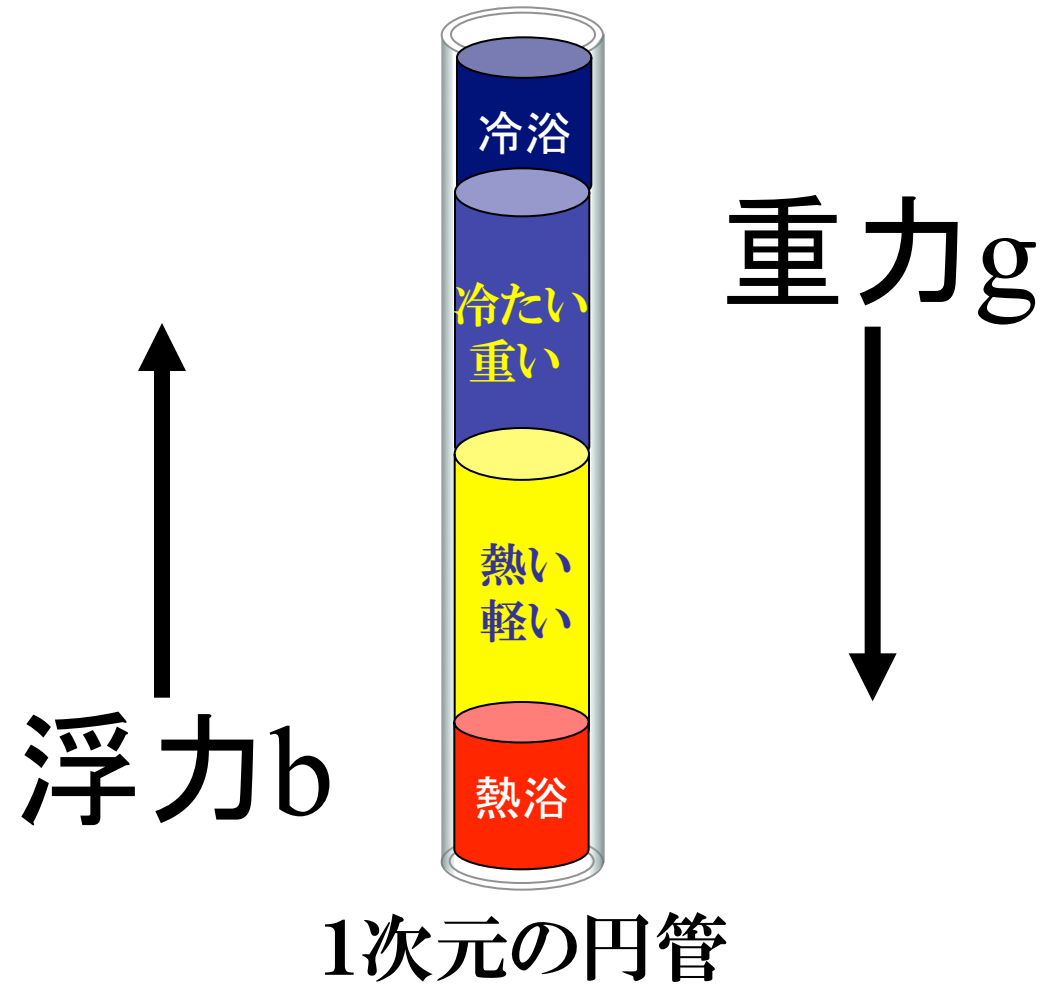
粒子のdivを色で表現

赤： 流入  
青： 流出



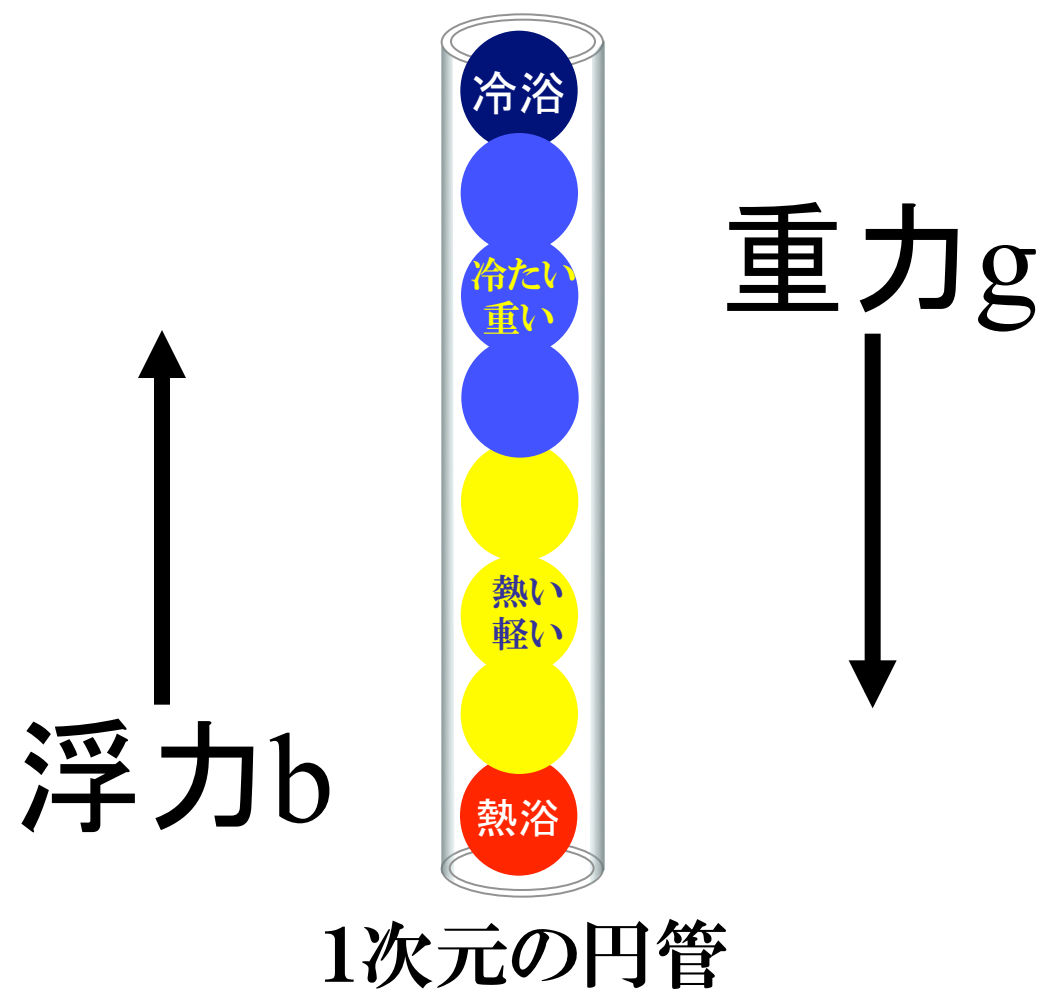
# 擾乱の無い完全1次元流れ場イメージ図

一見不安定そうだが式を眺めるまでもなく、熱だけが移動し、対流は起こりようがない。



# 1次元流れ場の粉体モデル描像

粒子が互いにすり抜けられない限り、熱だけが移動し、粒子の運動は起こりえない。

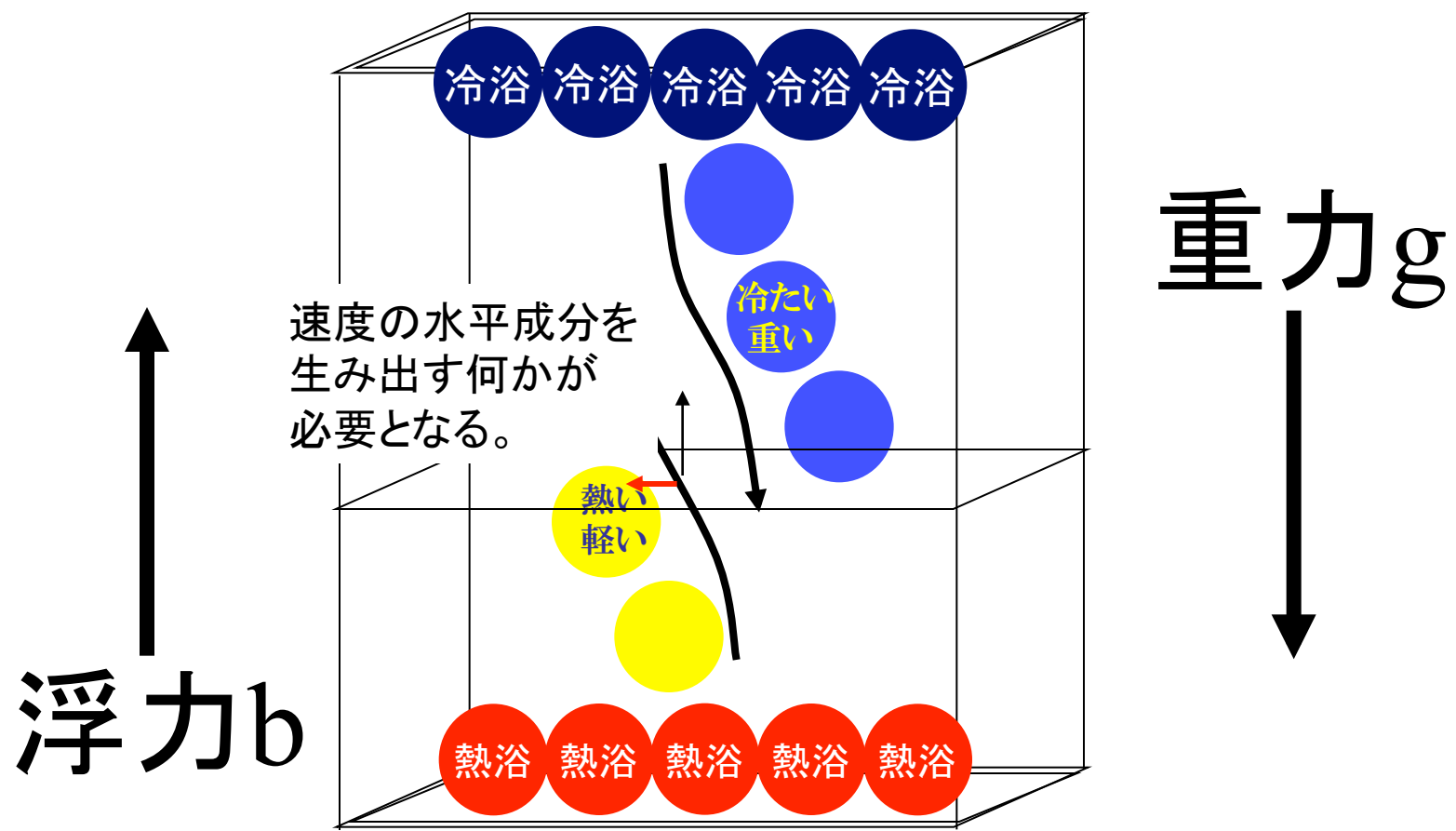


1次元の円管



# 2次元流れ場の粉体モデル描像

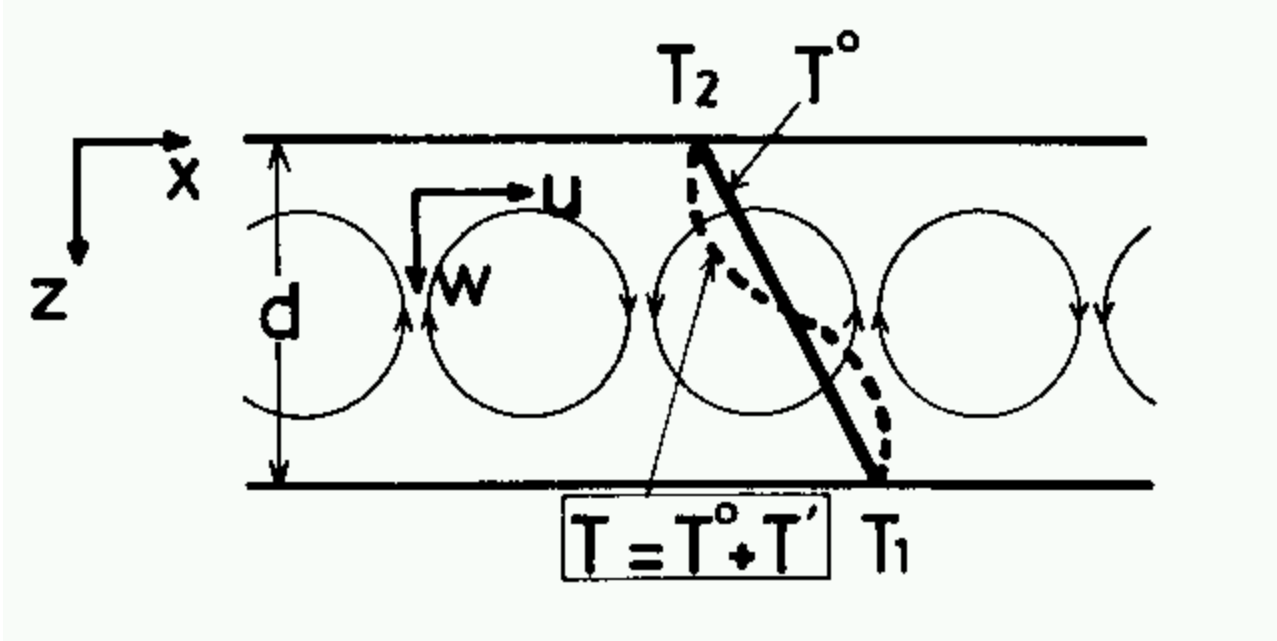
粒子がお互いを避けて運動できる空間的余裕があれば、熱いまま上昇し、冷たいまま下降できる可能性が生じる。



2次元エコー蟻の家チックな流れ場

# 例えば温度分布の擾乱 $T'$

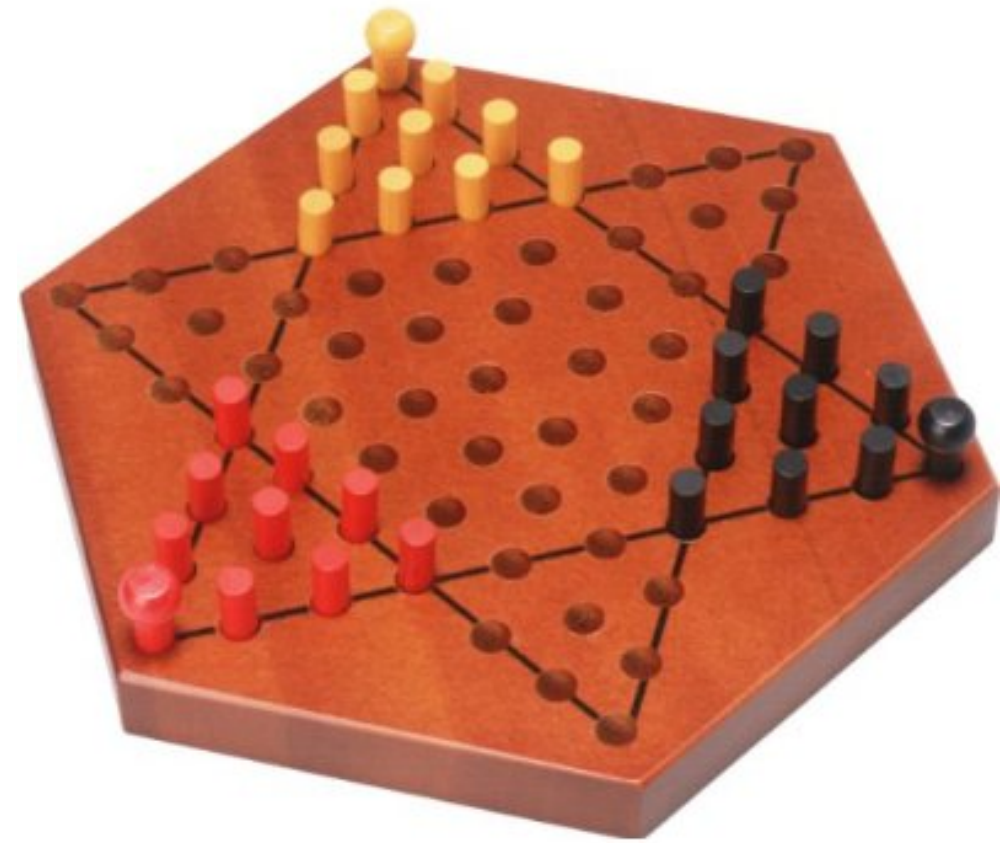
本来、非一様な状態に一様化をもたらす仕組みであるはずの拡散効果が、不安定の駆動力になる。



Rayleighのモデル

# 例えば壁面の影響も速度の勾配を生み出す

昔遊んだ二次元のダイヤモンドゲーム



穴が開いてるところに自分のコマを移動できる。

# ダイヤモンドゲームのCA

周囲六方を囲まれると動けない

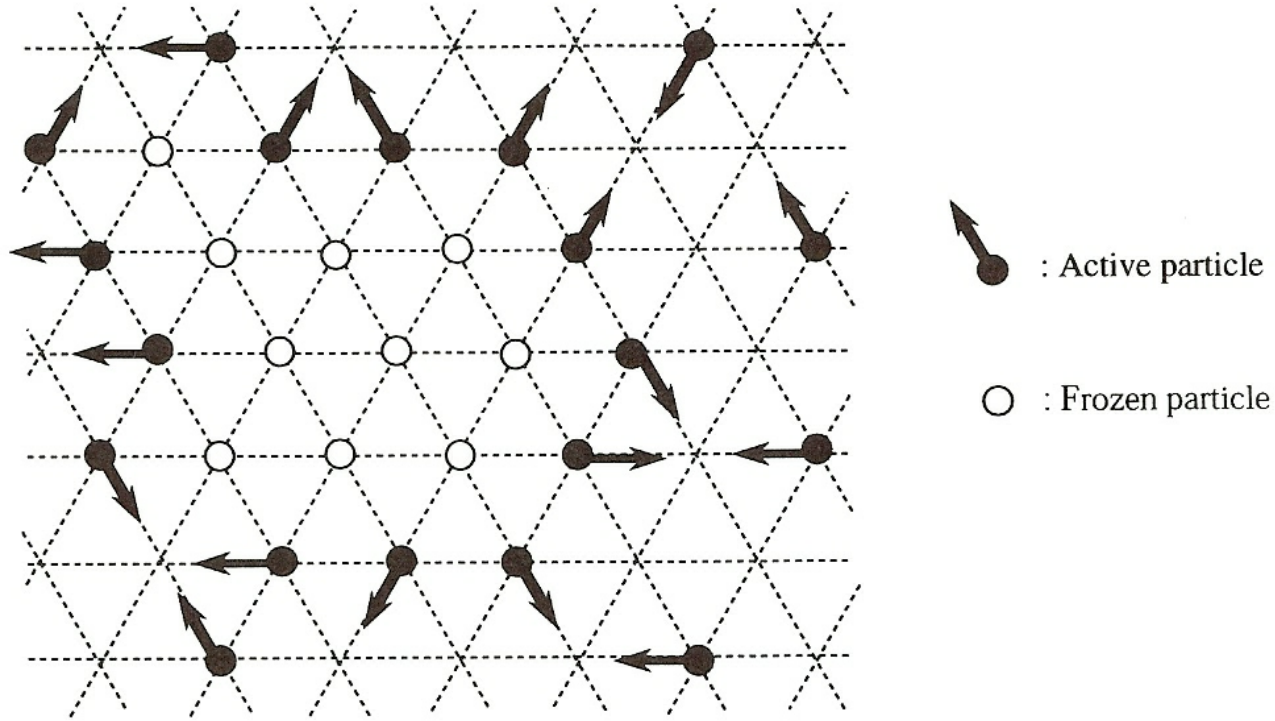


Figure 3.2 Frozen dead particles in lattice gas model



# ダイヤモンドゲームに大きさのあるコマを導入

何か論文では塩みたいな名前でした。

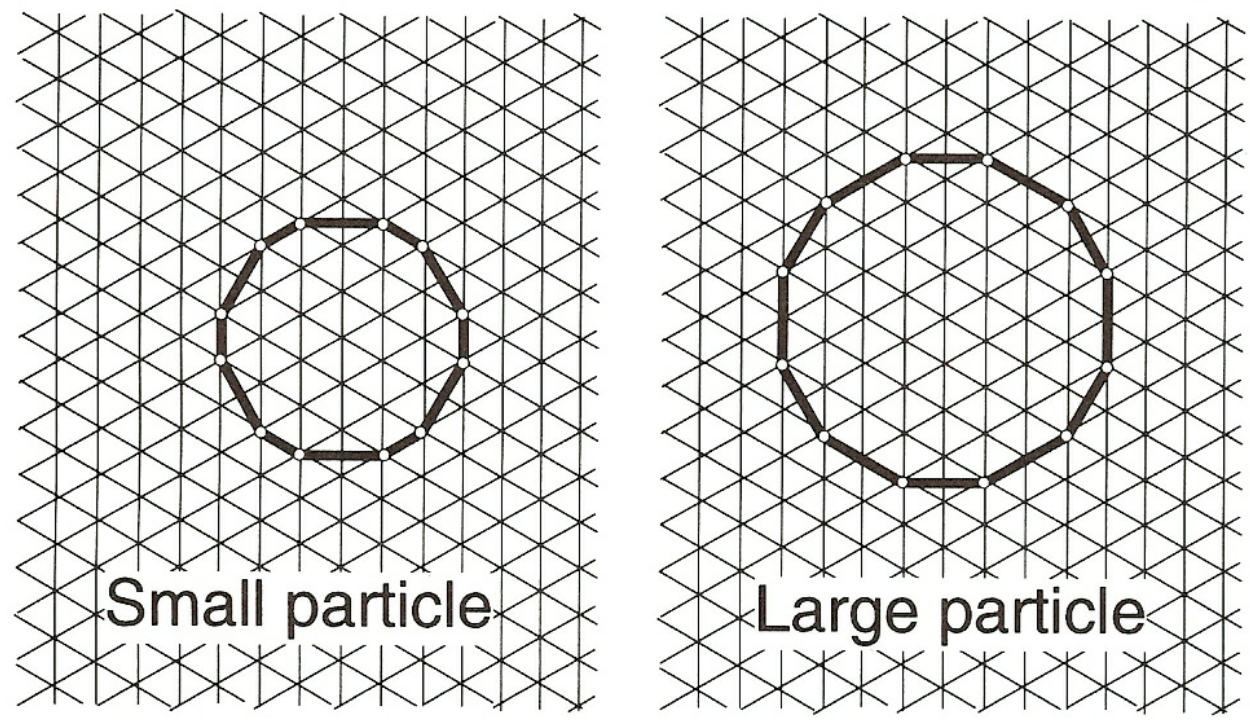
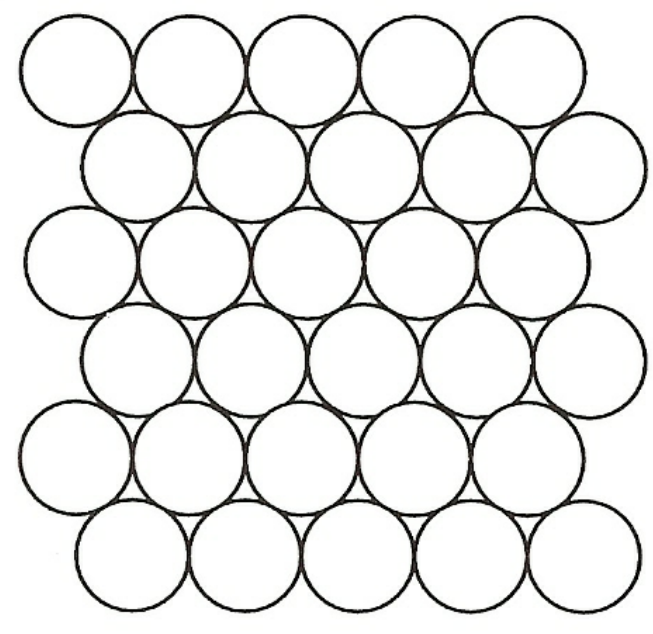


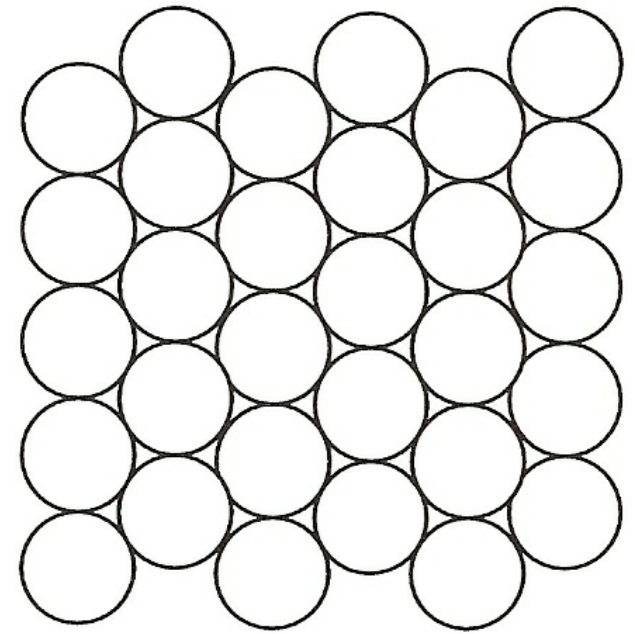
Figure 3.3 Dodecagon connected-lattice particles

# 意外に便利なCL(Connected Lattice) CA

二次元です。誠に申し訳ございません。



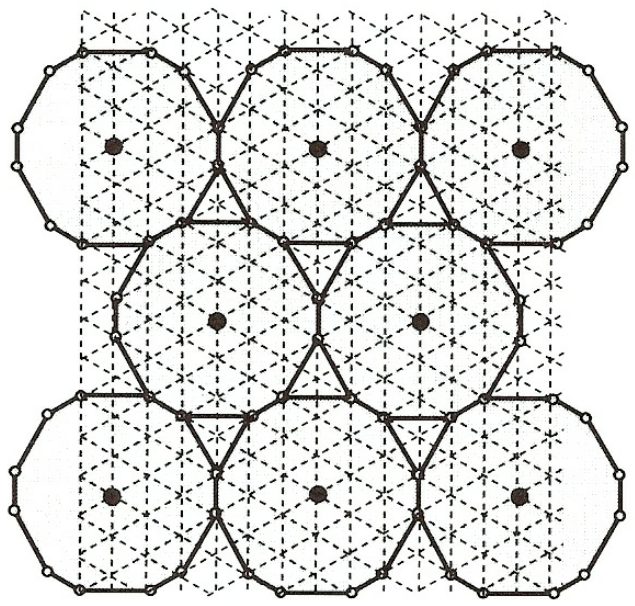
(a)



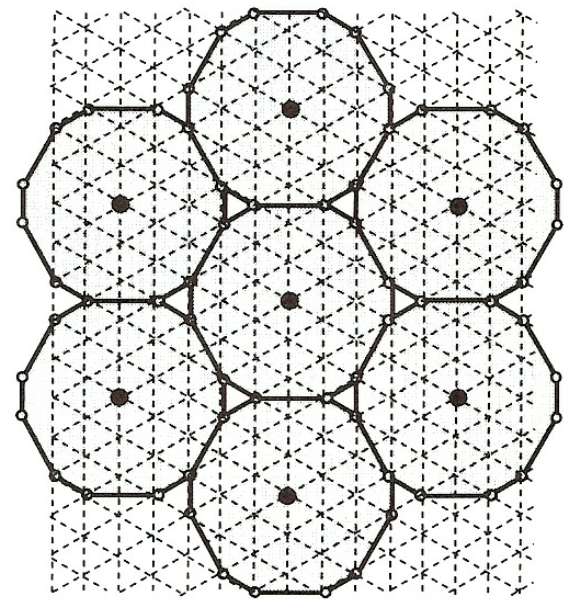
(b)

Figure 3.4 Two different regular dense packing

# 同じ格子に2種類の最密配置



Regular dense-H packing



Regular dense-V packing

Figure 3.5 Two different regular dense packing in CL-CA model

これは十五年前。止めるアナタ駅に残し  
ちあきなおみ「喝采」より



# 振動のさせ方

全て一定量持ち上げて、動ける粒子だけバラバラ落とす。真下方向が最優先です。

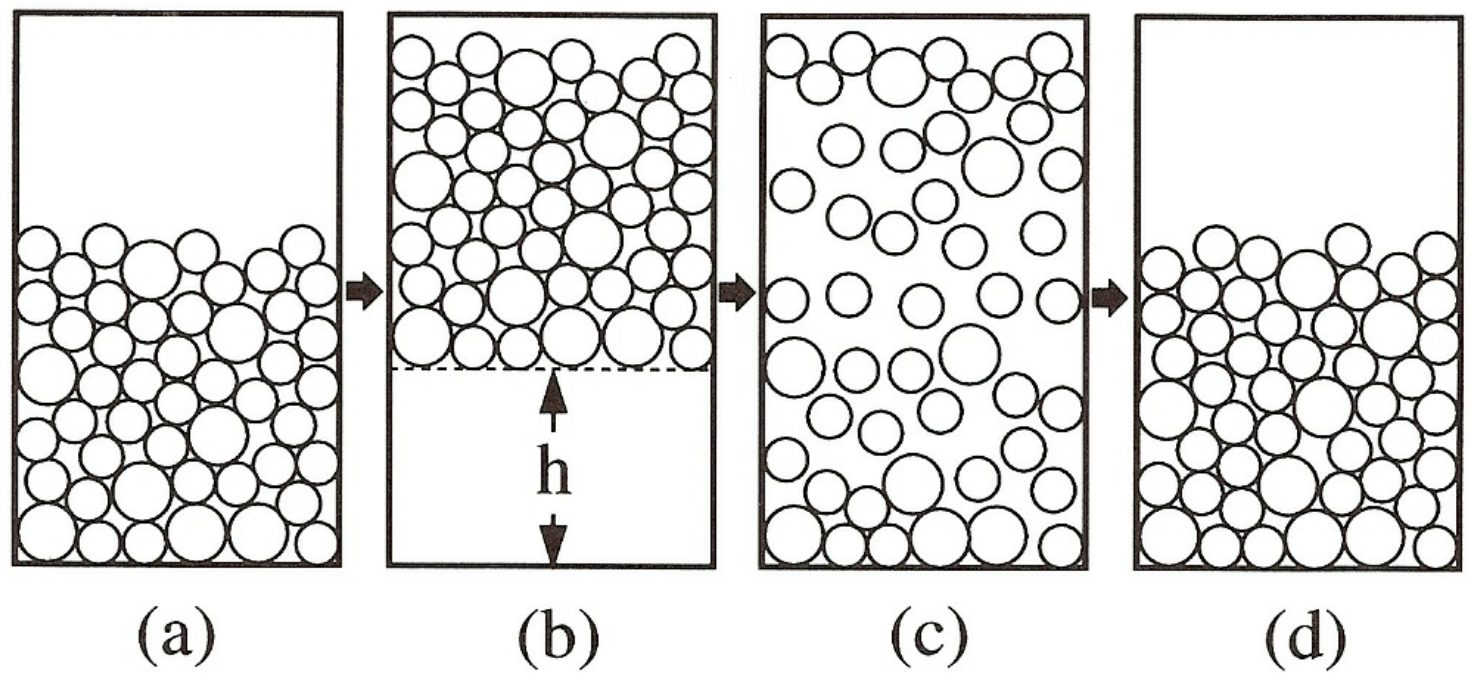
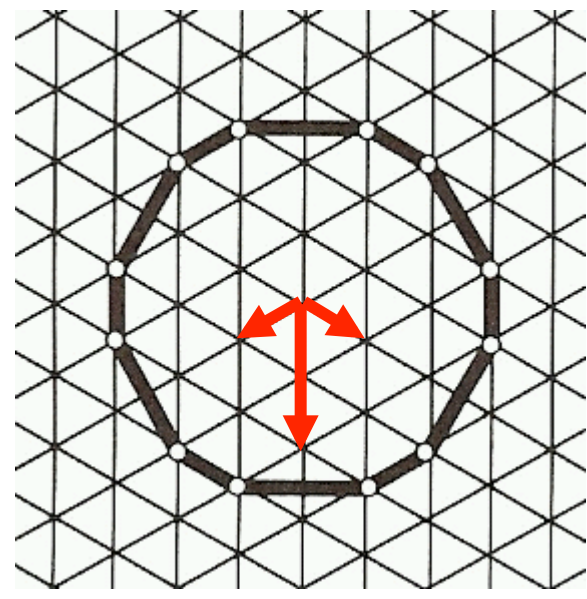


Figure 8.1 Schematic diagram of a single shake process



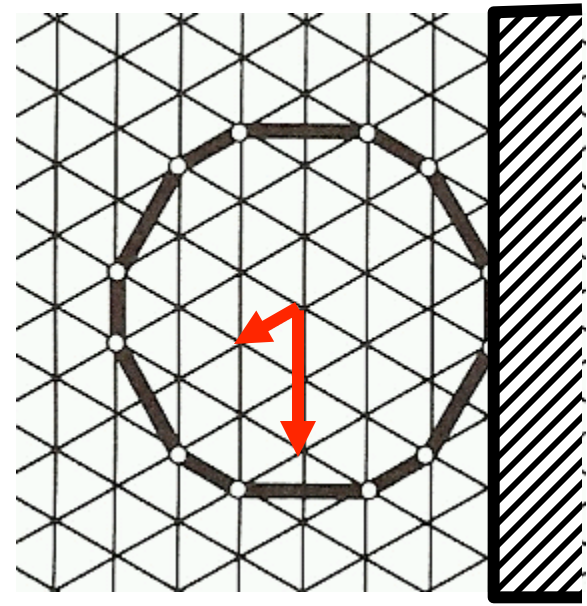
# 壁面付近での下向き速度の不均一性

壁面に近い粒子ほど確率的に真下に落ちやすい。



壁面から遠い粒子

真下に落ちる確率 = 0.5



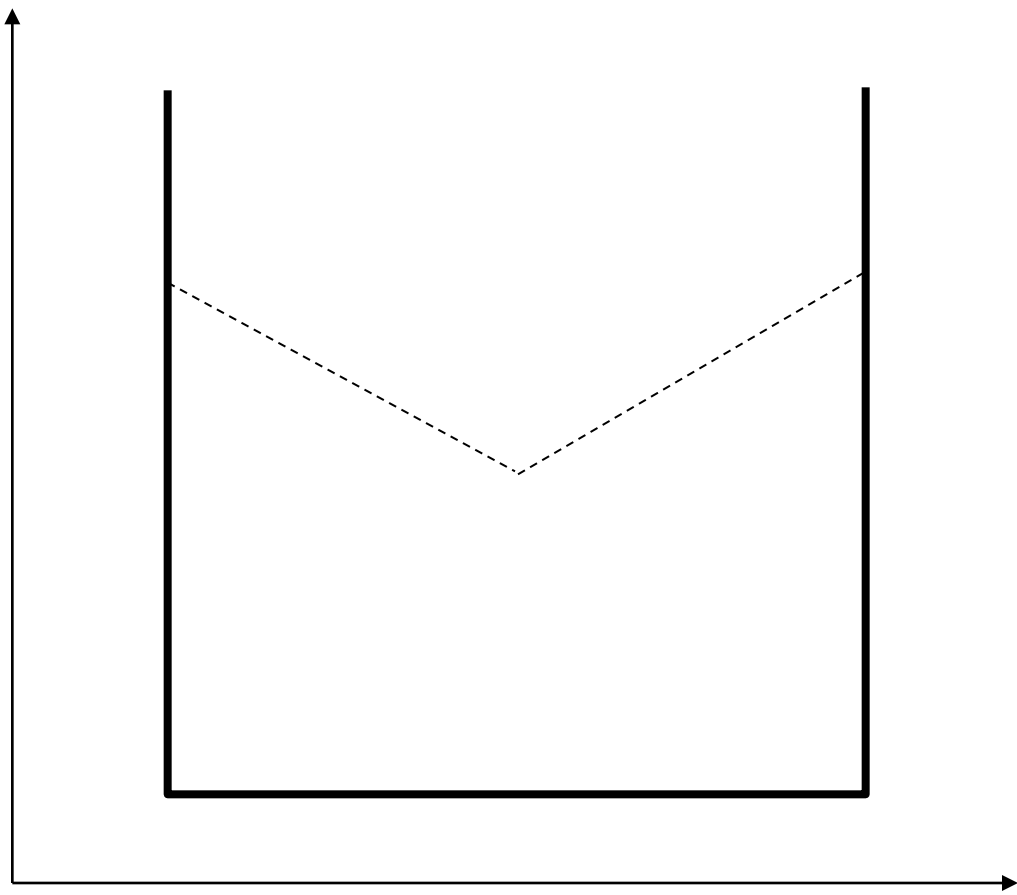
壁面付近の粒子

真下に落ちる確率 = 0.667

# 中央が盛り上がるのではなく両端が盛り下がる

密かに水平方向に速度勾配が盛り込まれていた。

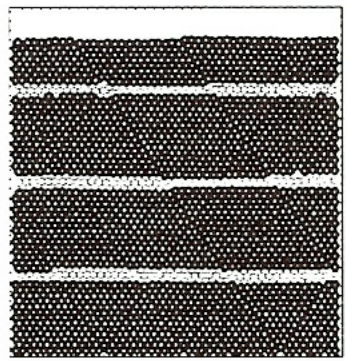
下向き速度



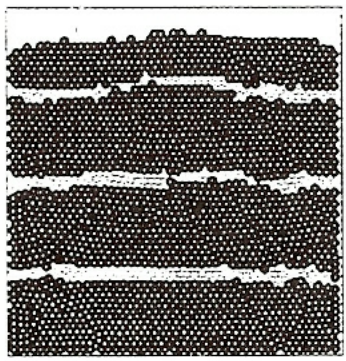
位置

# 振動サイクルとともに中央が盛り上がる

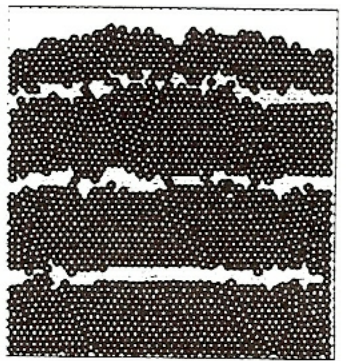
色は単なる目安です。



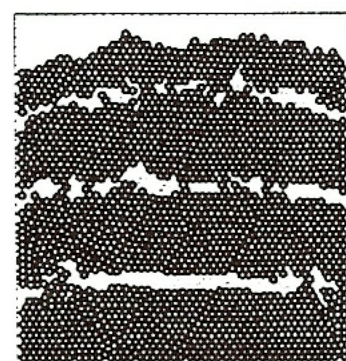
Initial state



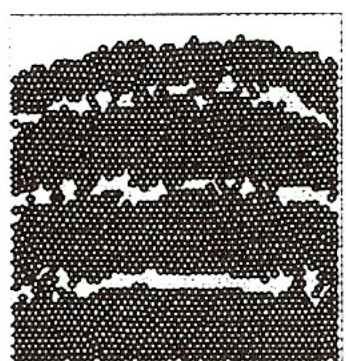
after 20 shakes



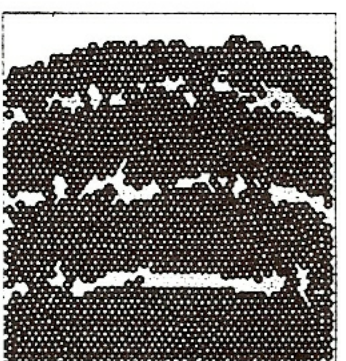
after 40 shakes



after 60 shakes



after 80 shakes



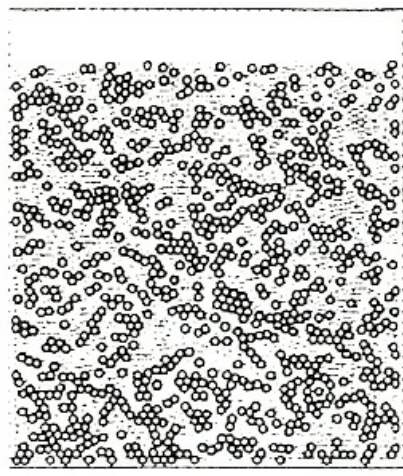
after 100 shakes

阪口(1995) D論より引用

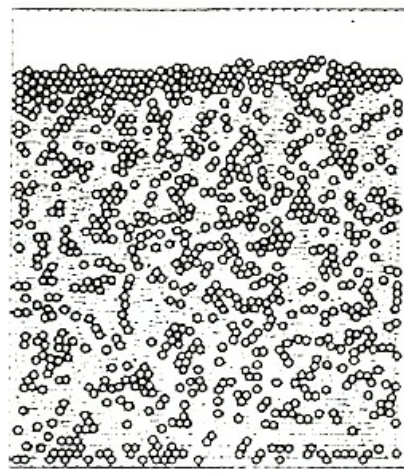


# 2種類の大さの粒子を用いたケース

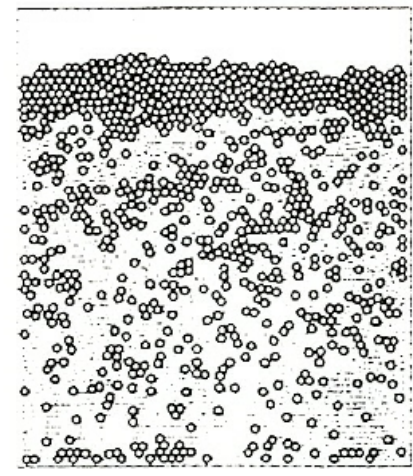
必ず大玉が上がってきます。



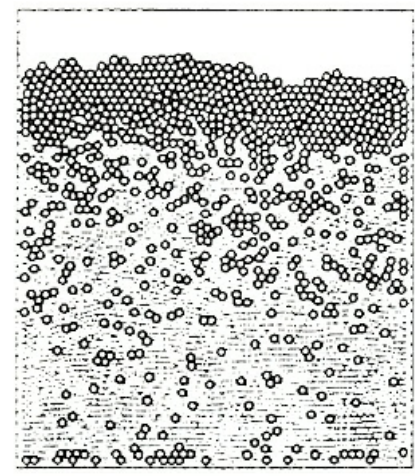
Initial state



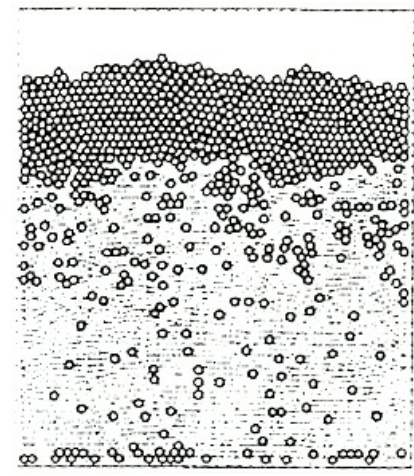
after 50 shakes



after 100 shakes



after 150 shakes

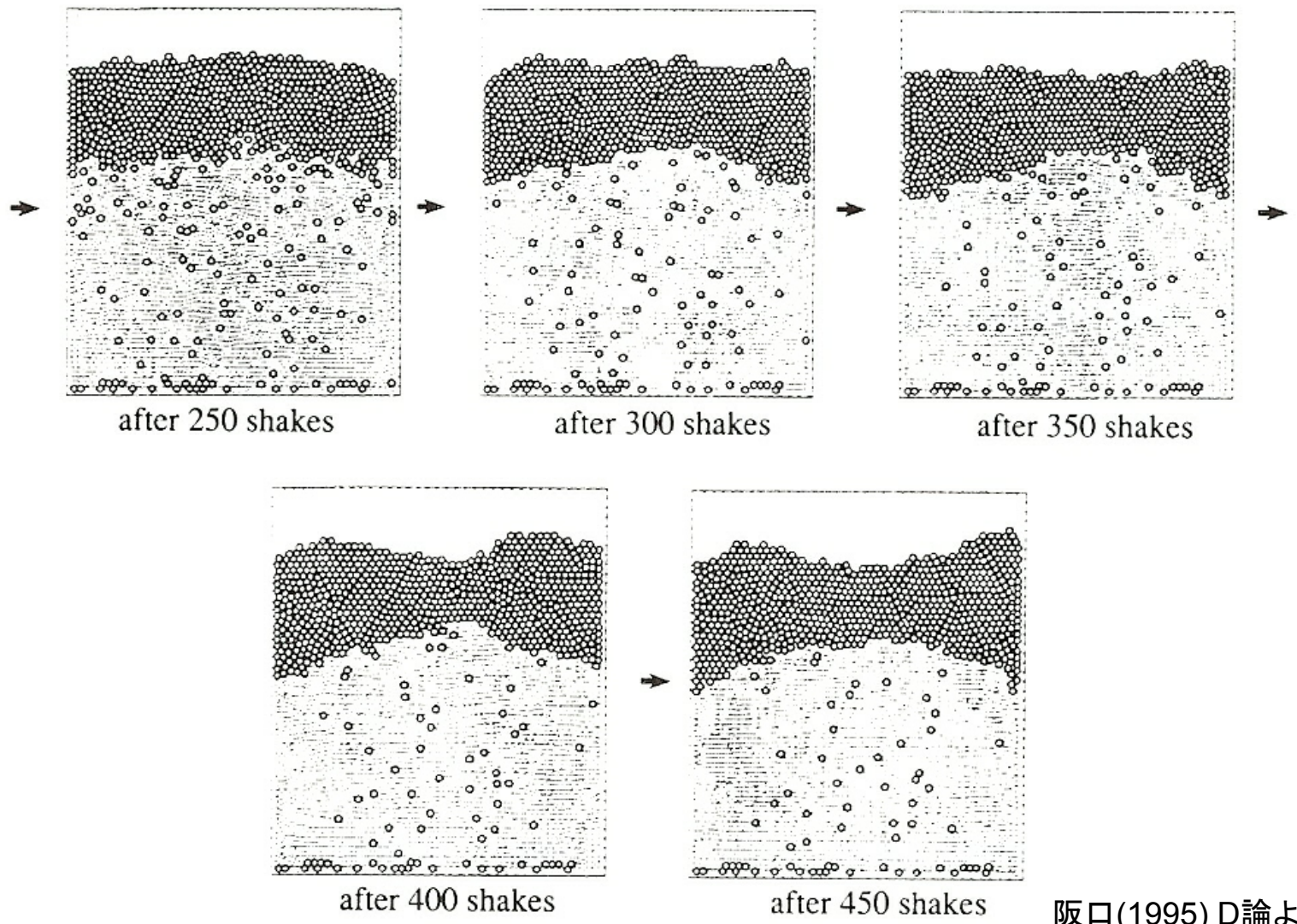


after 200 shakes



# 2種類の大きさの粒子を用いたケース

上がってくるといふよりは下がらないだけ。



# 単粒径のときの時間・空間疎視化速度

なんと幾何学だけでも対流します。

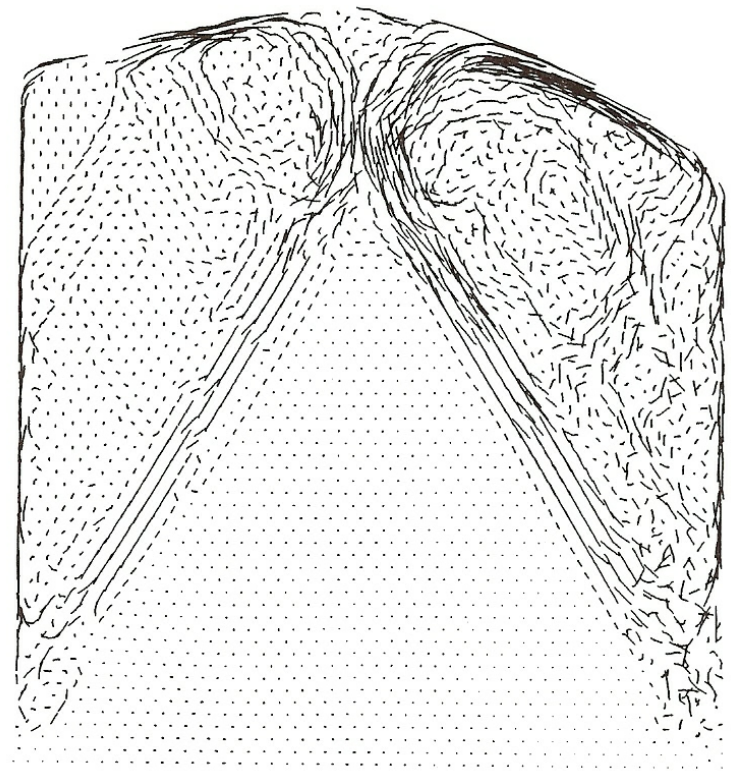


Figure 8.4 Convective motion in the trajectories- monosize packing

# 2粒径のときの時間・空間疎視化速度

当時は誰も信じなかった谷対流。

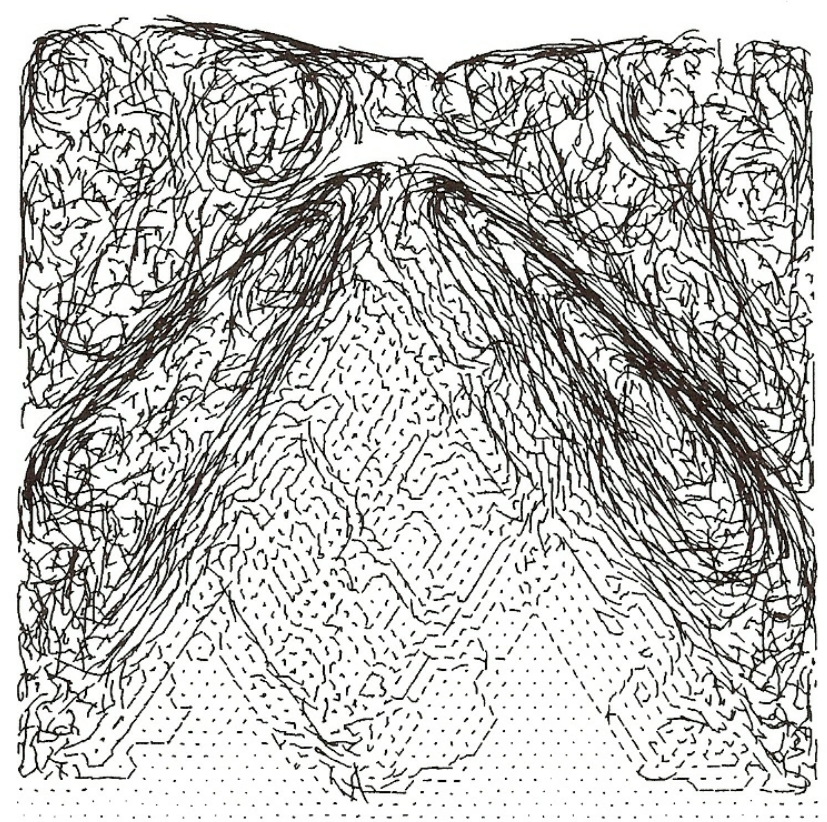
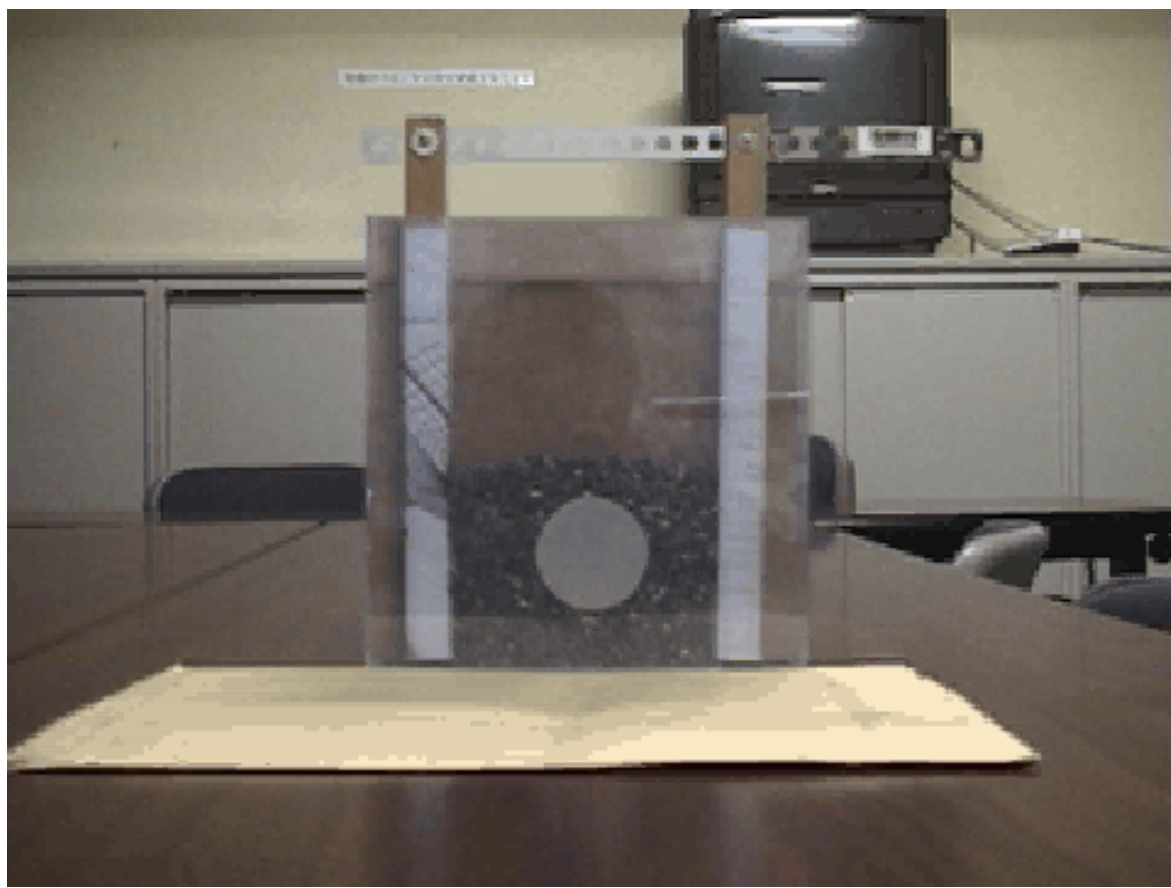


Figure 8.6 Convective motion in the trajectories- binary mixture



# 大玉浮上現象ならこいつも加えて下さい

せん断でも大玉は上がります。



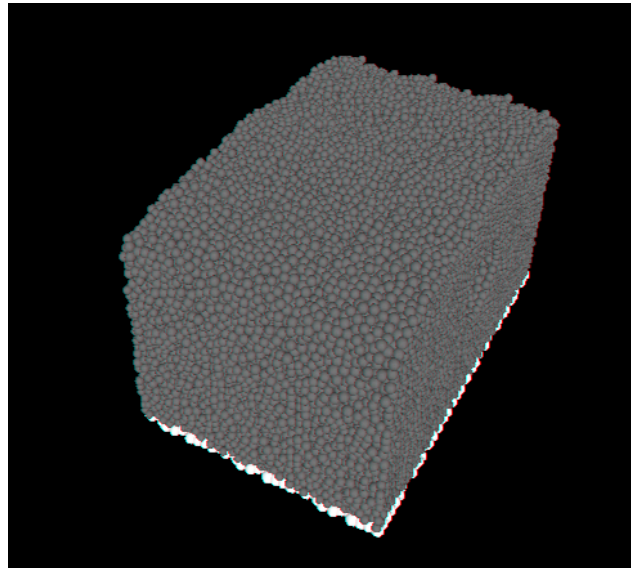
昔自分がいた神戸大学農学部の研究室



# せん断運動によるBrazil Nuts Effect

## DEMによる埋設円管の水平振動シミュレーション

1. 手法 : 球粒子3次元DEM + 円管オブジェクト
2. 粒子 : 98000粒子、粒子直径は正規分布
3. 初期配置 : 摩擦なし重カパッキング

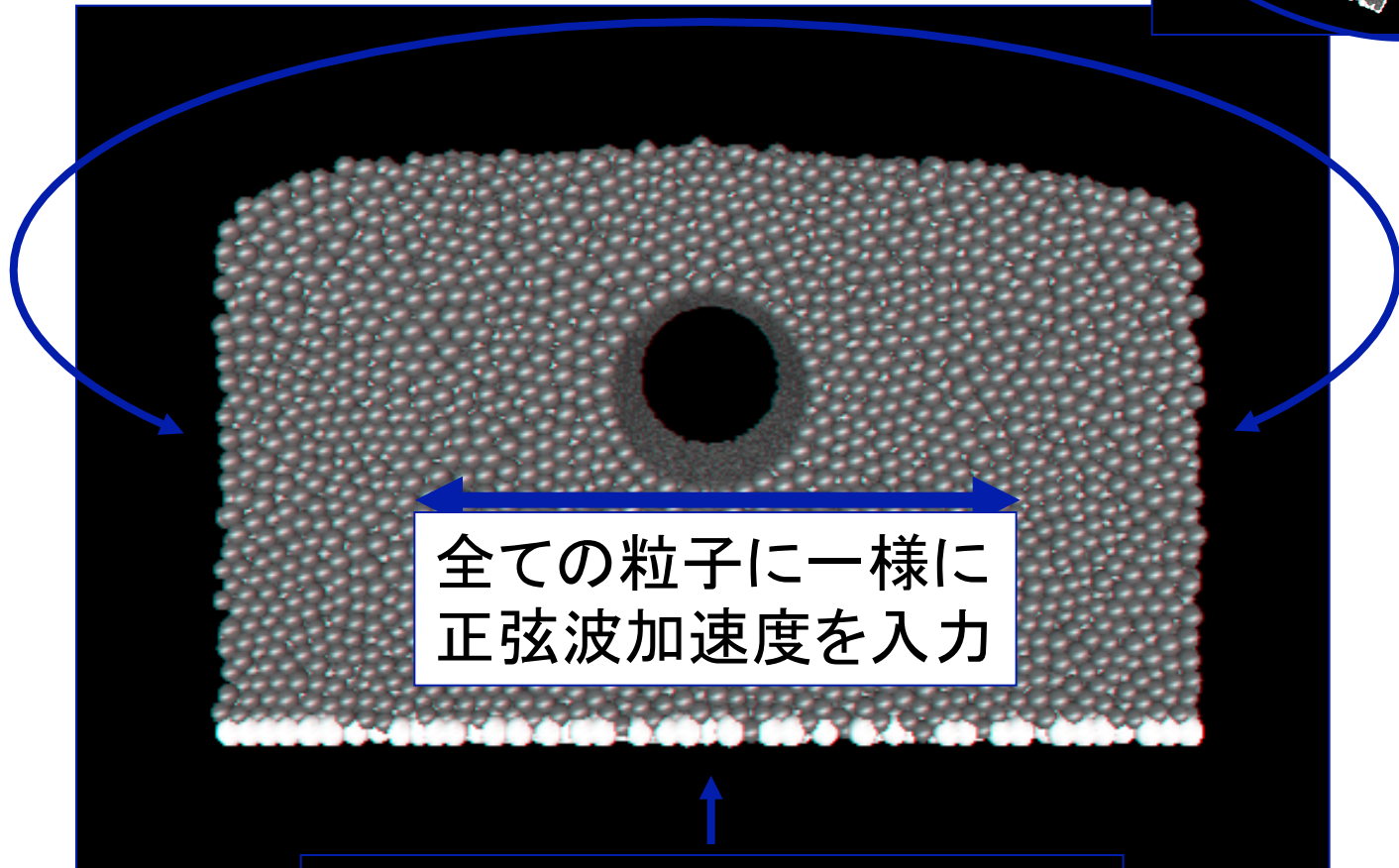
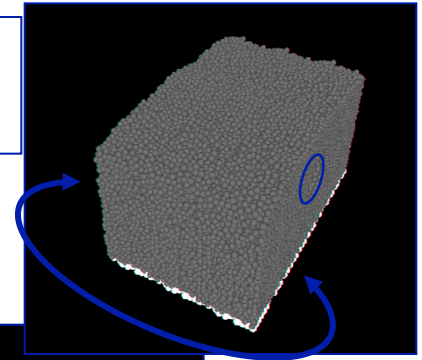


# せん断運動によるBrazil Nuts Effect

4. 境界条件など:

摩擦なし  
壁面境界

壁なし周期境界



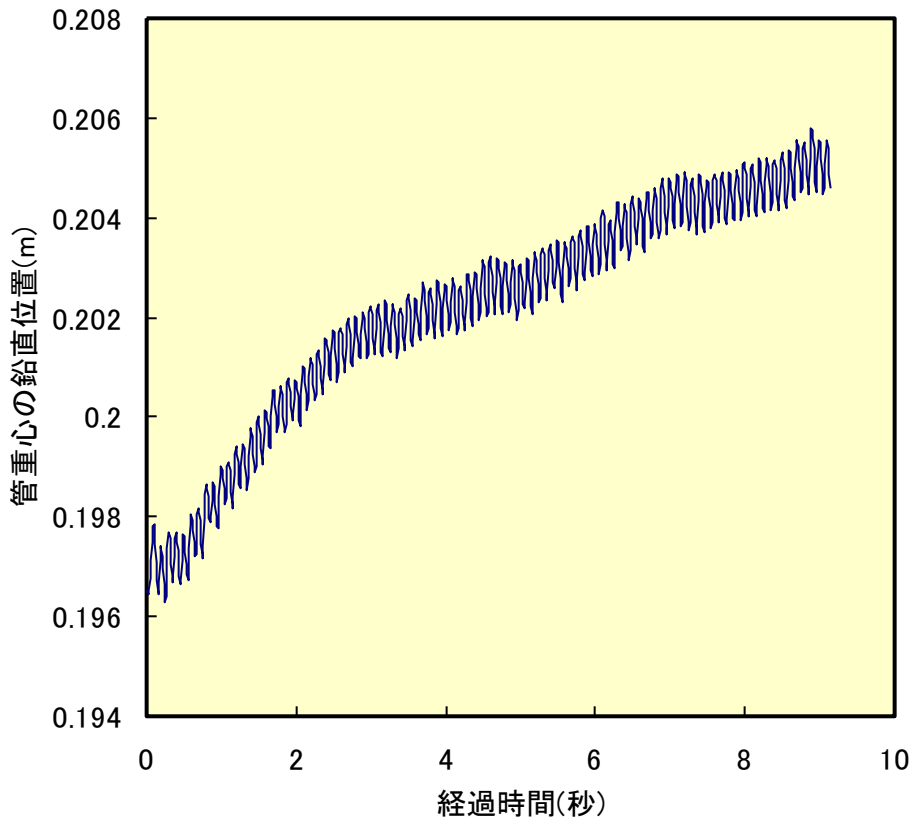
全ての粒子に一様に  
正弦波加速度を入力

底面の粒子は重力パッキング後に固定

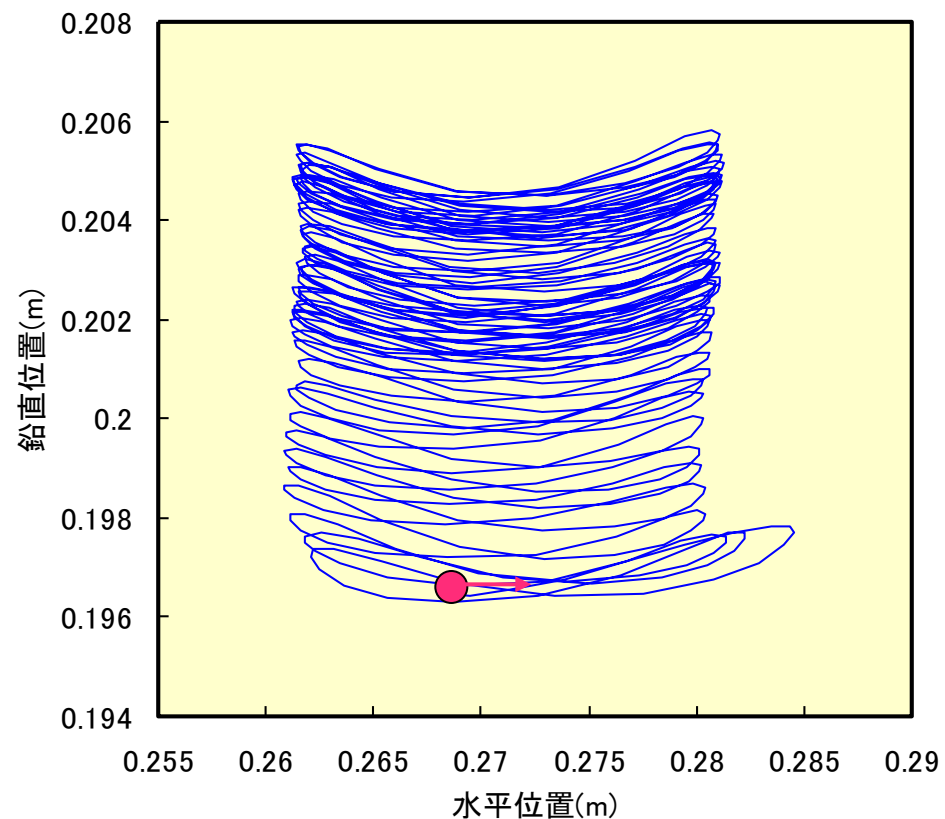
# せん断運動によるBrazil Nuts Effect

## DEMによるシミュレーション結果

管の上昇

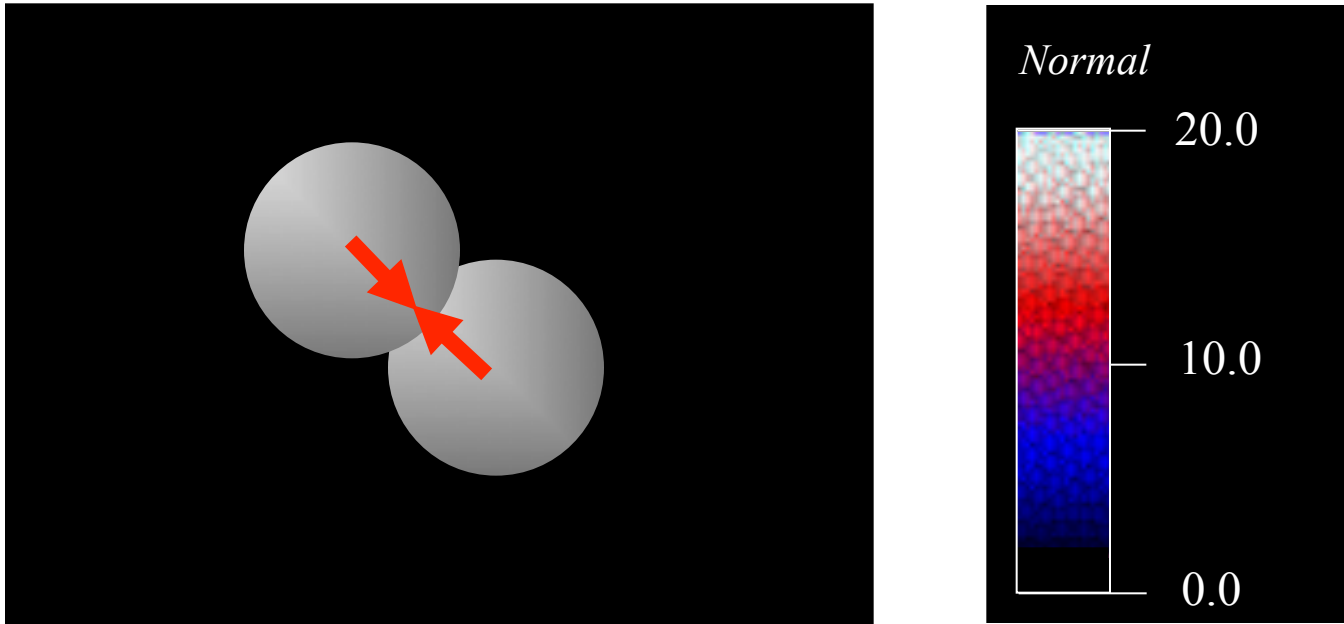


管重心の軌跡



# せん断運動によるBrazil Nuts Effect

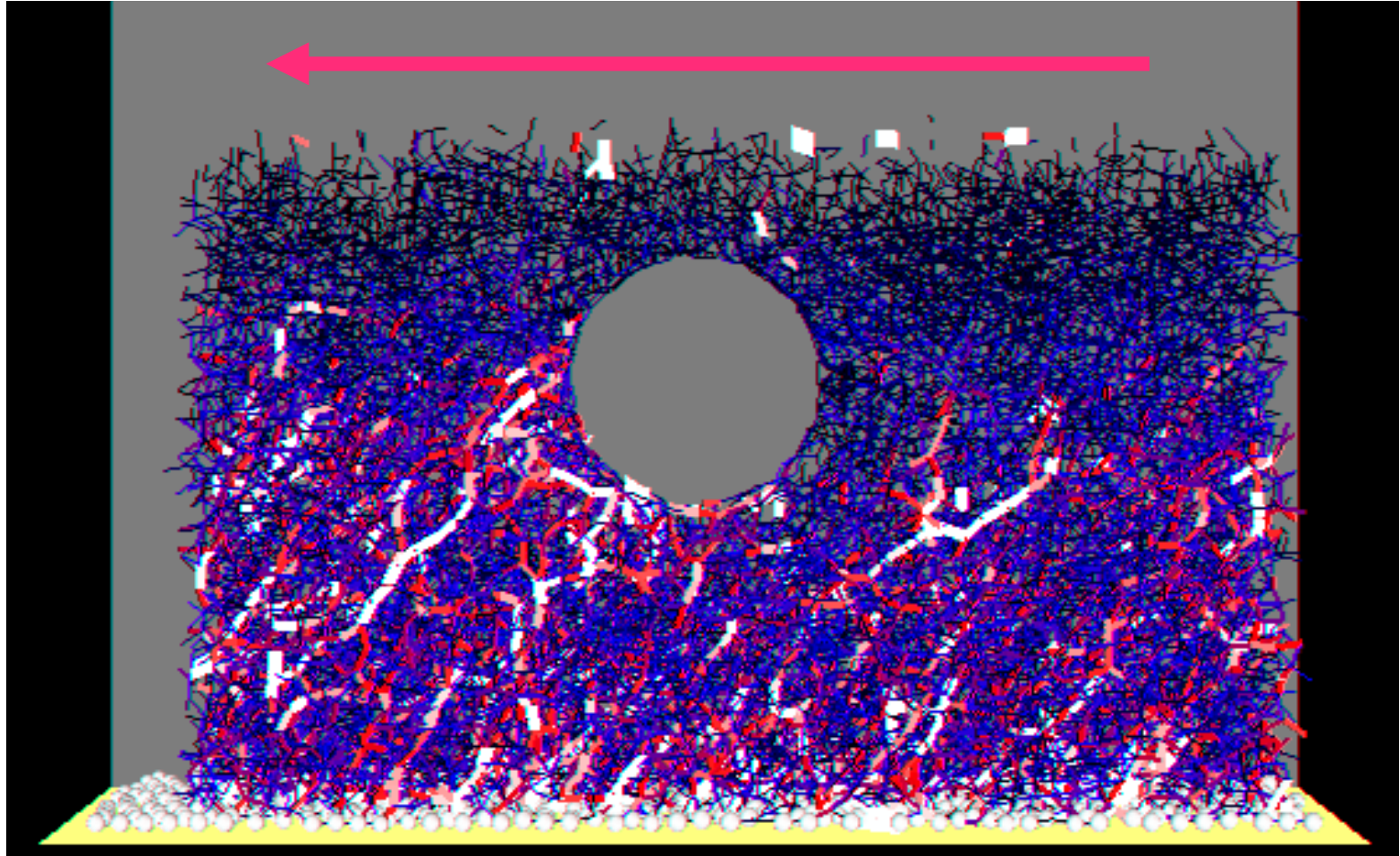
粒子間の法線方向力の分布



粒子間に働く局所圧縮力を線の色と太さで表す

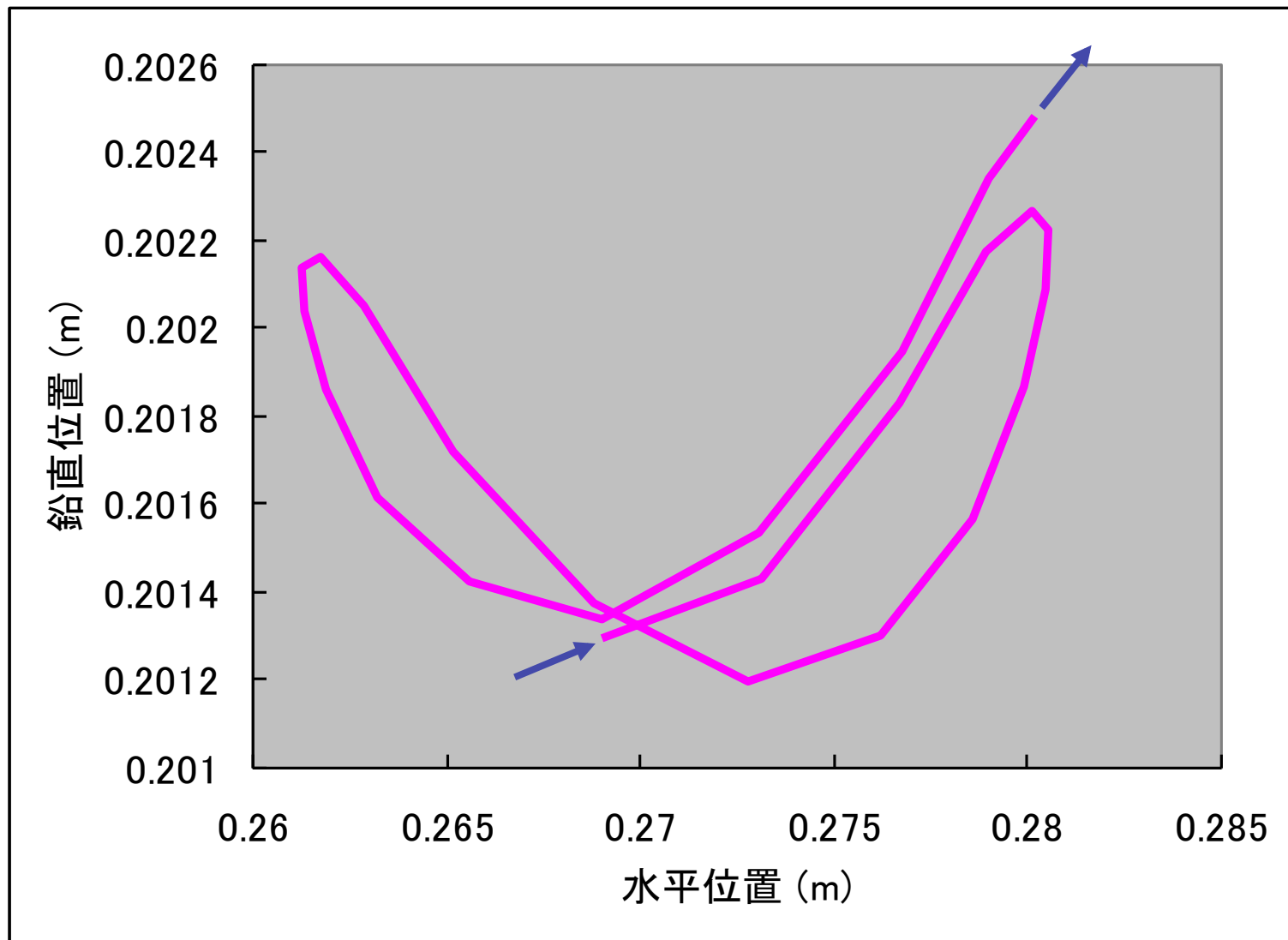


# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



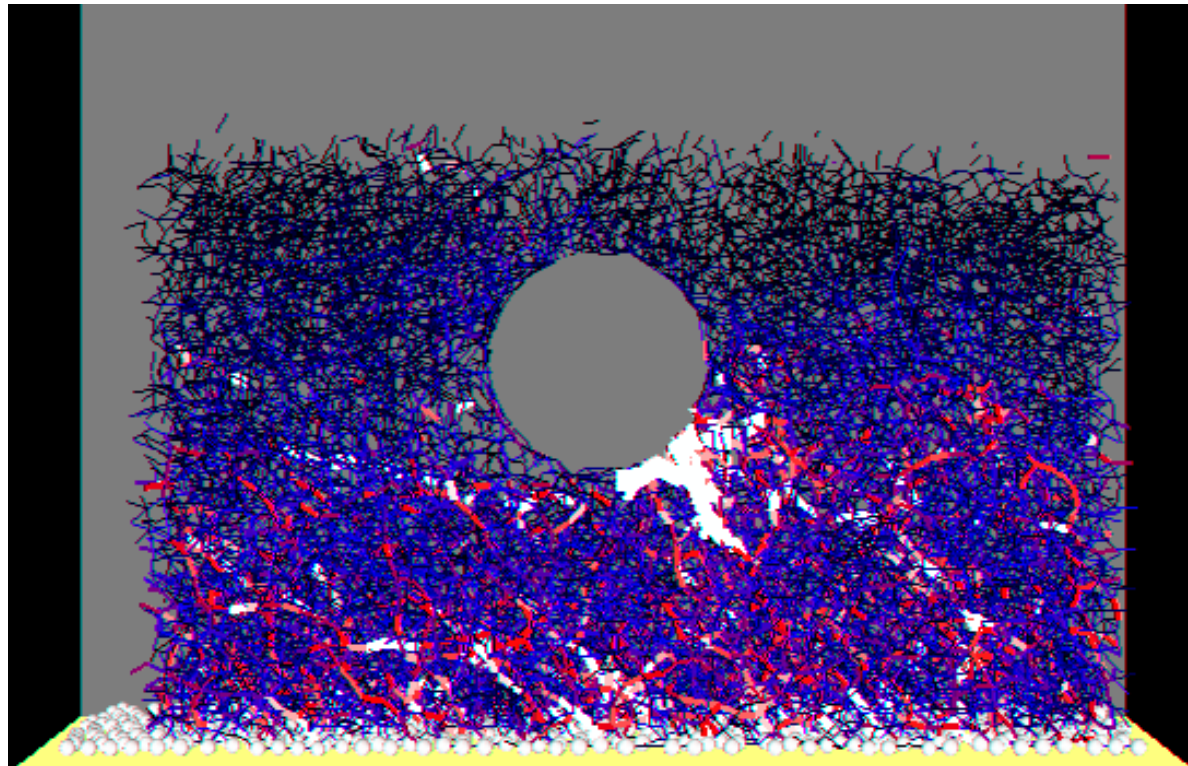
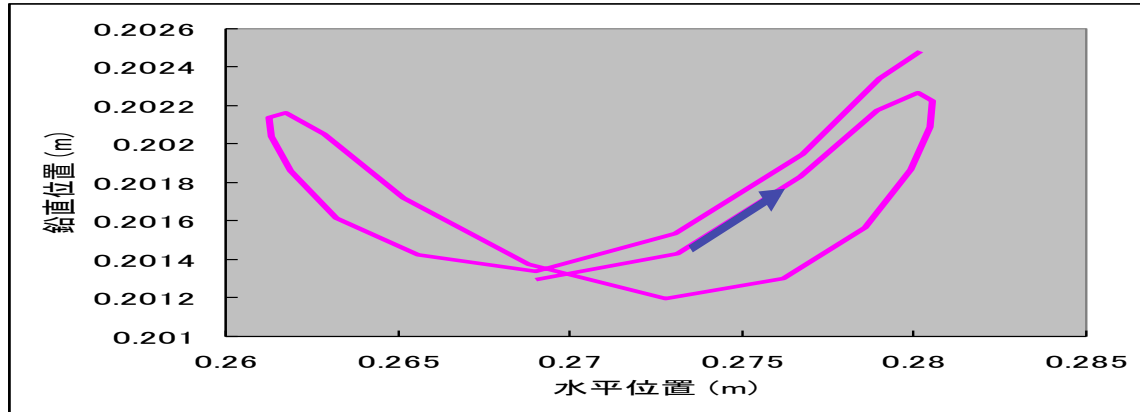
せん断変形による応力鎖の発達とその回転による上昇運動＝ダイレイタンスー

# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



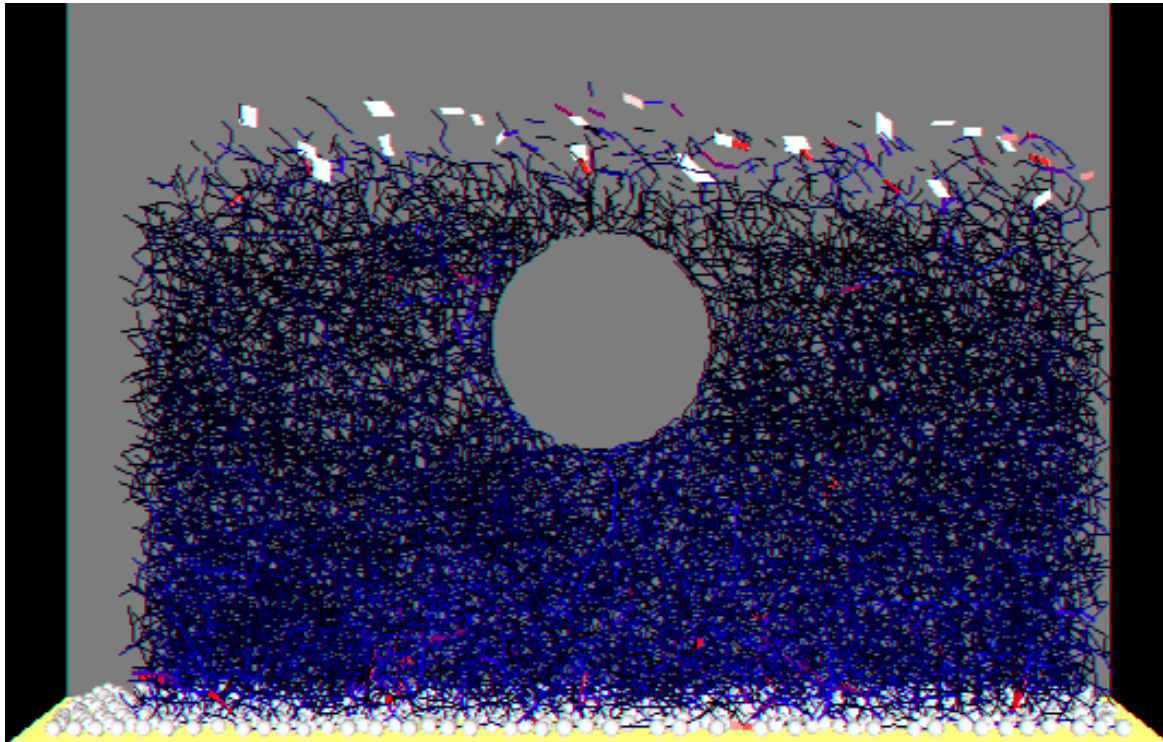
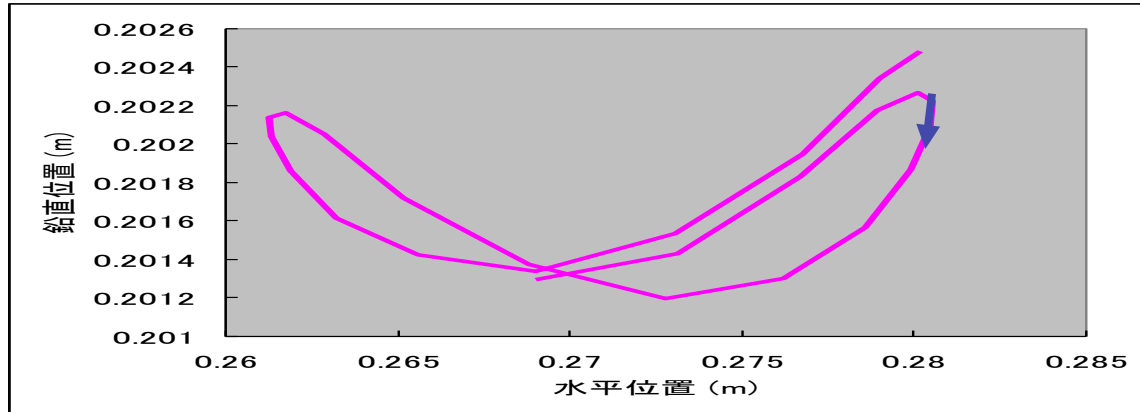
管重心の軌跡の特徴的なパターン

# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



応力鎖のパターン

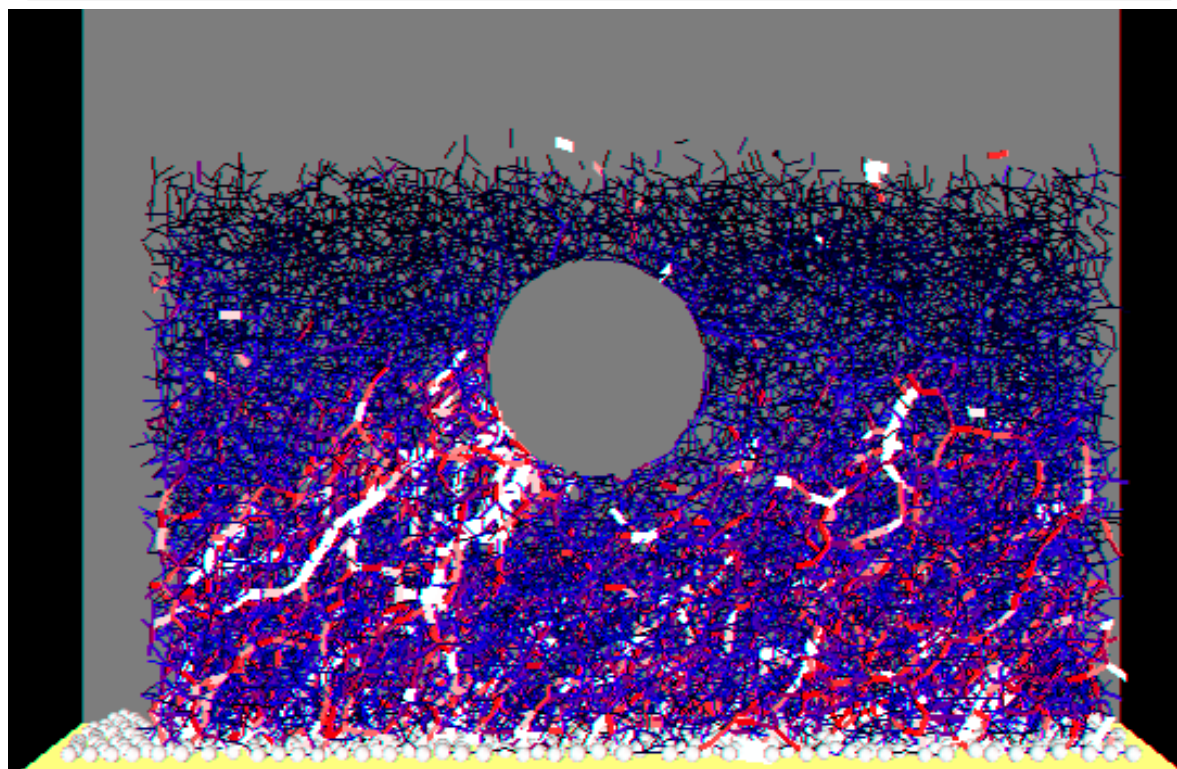
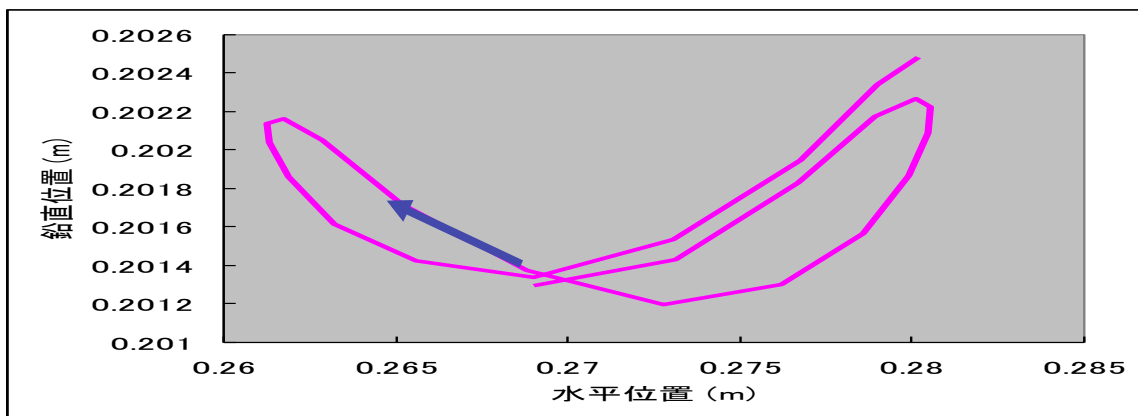
# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



応力鎖のパターン

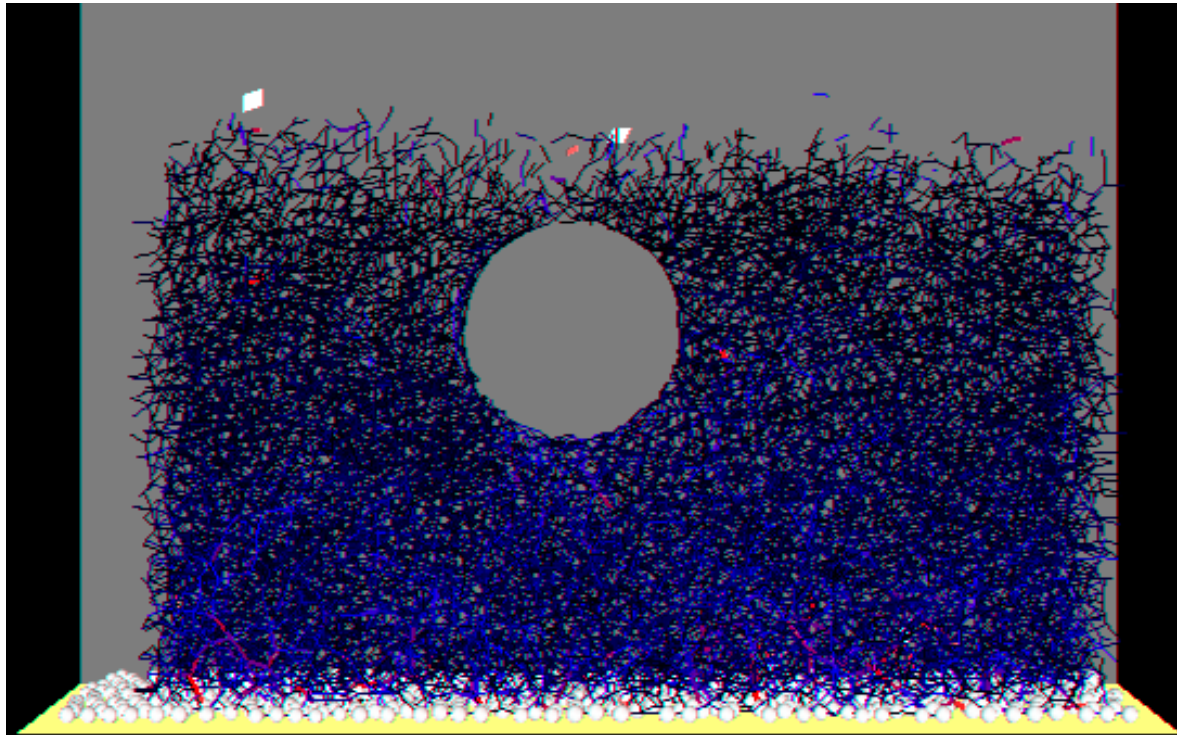
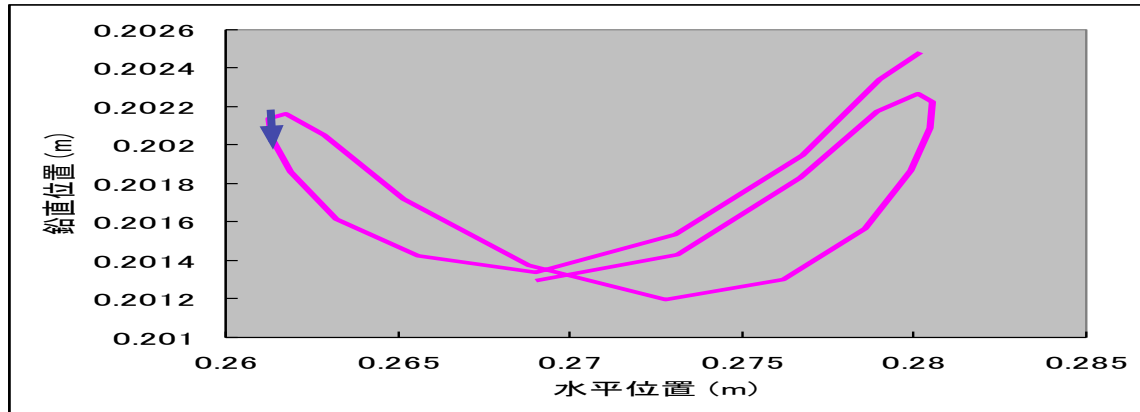


# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



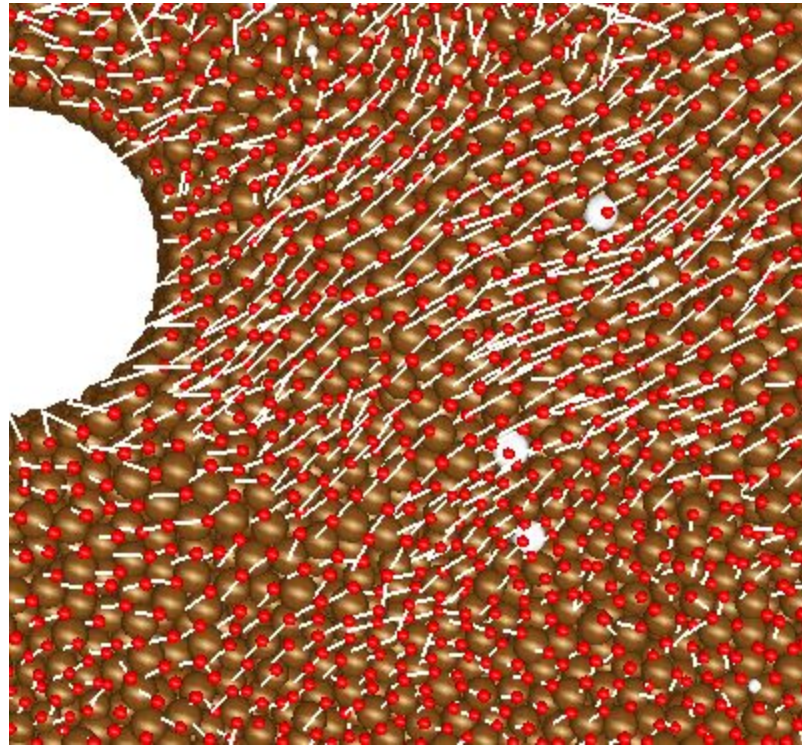
応力鎖のパターン

# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



応力鎖のパターン

# せん断運動によるBrazil Nuts Effect



円管周辺の粒子の動き

# せん断運動によるBrazil Nuts Effect

大きな物体は、基本的に動きにくいので、瞬間的には局所壁面境界の役割を果たす。

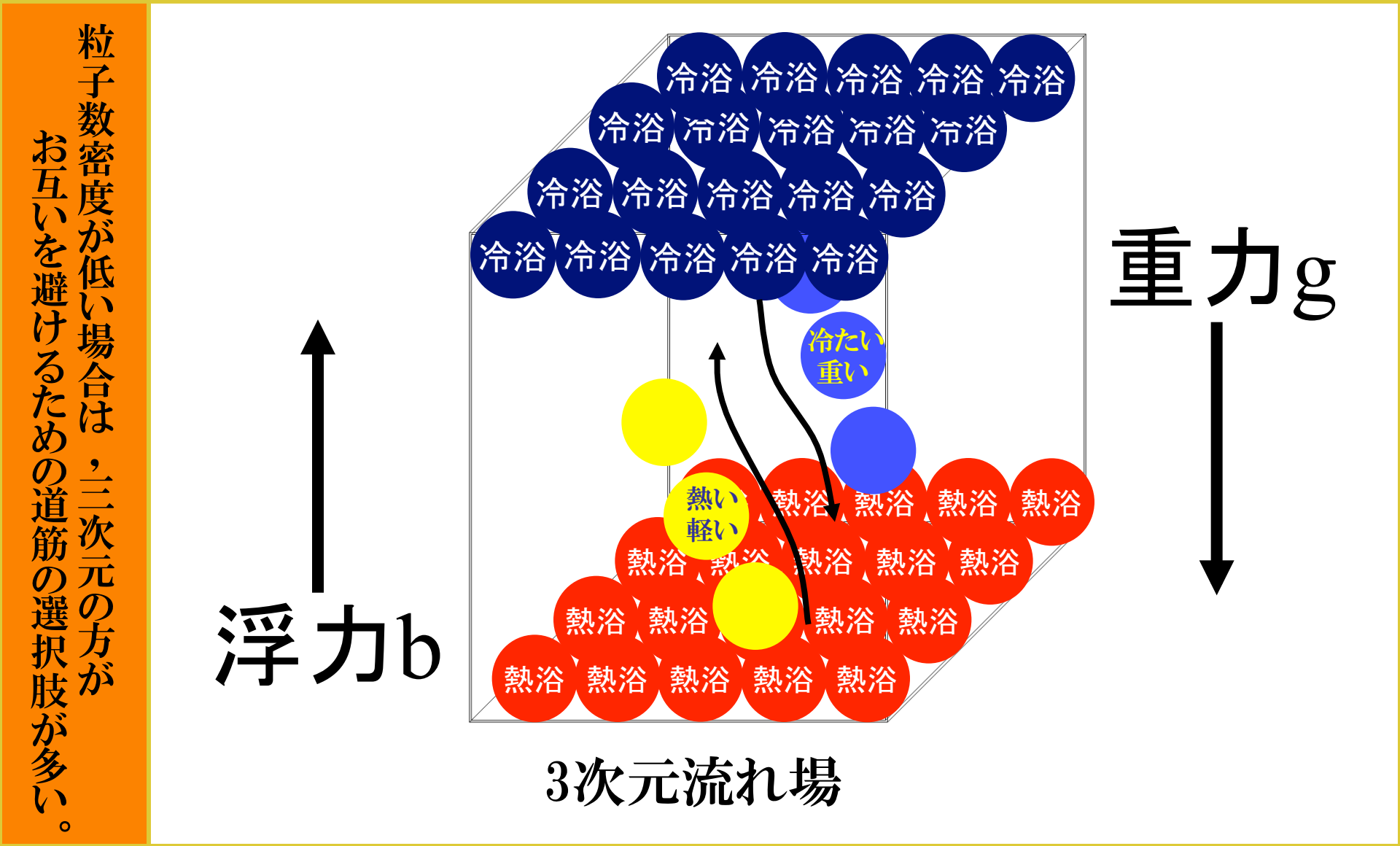
水平運動せん断運動によって、大きな物体集変に応力鎖が発達し、応力鎖が剛体回転することで、上昇運動が生じる。

上昇運動が生じると、鉛直振動のBrazil Nuts Effectと同じメカニズムで、永久変位が残る。

**異方的な応力鎖の分布とその回転 = 内部擾乱がなせる業**



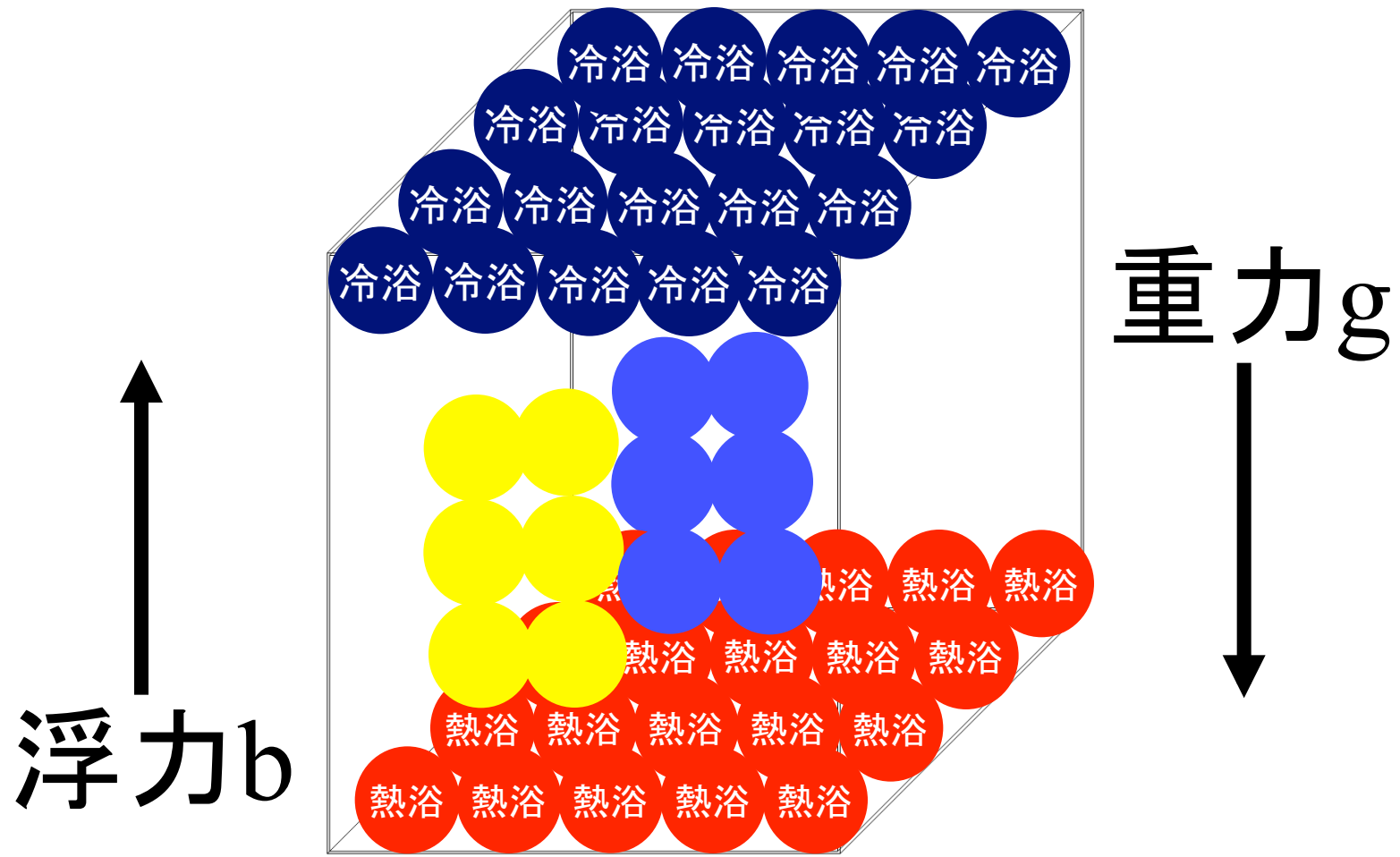
# 2次元と3次元の違い：お互いを避けて運動できる空間的余裕の問題



粒子数密度が低い場合は、三次元の方がお互いを避けるための道筋の選択肢が多い。

# 自ら2次元化する場合：粒子群が速度差の最も少ない動きを選ぶ

粒子数密度が高い場合は速度差のある集団運動の界面を最小にする動き⇨二次元化を選ぶ。



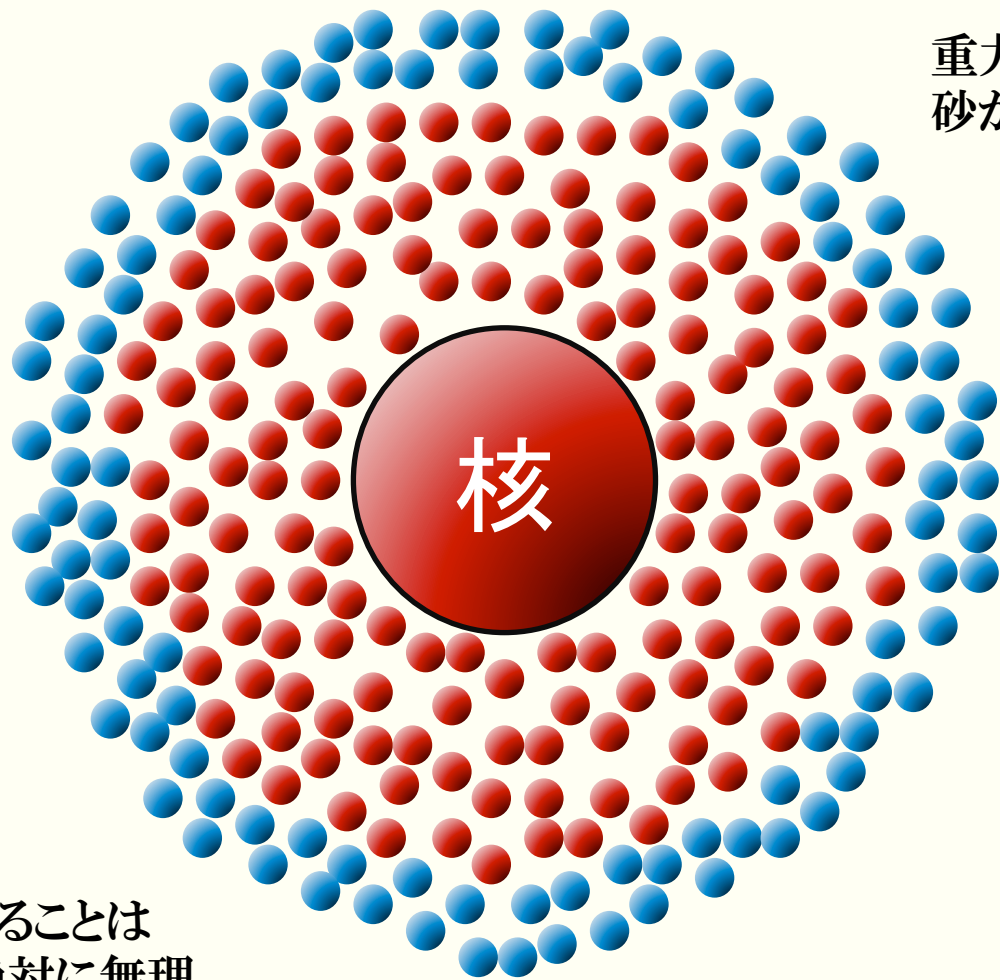
3次元流れ場が自ら2次元化する場合

# 「自然は粉体モデルでも描くことができる。」

粉体モデルを用いてある知識を  
表現したときに、しばしば  
モデル自身の時空間拡大によって、  
当初に意図されたことを超える  
結論が引き出される。

でも、電気代も一銭もかけないで、同じことを  
紙と鉛筆だけで表現できる数学は素晴らしい。

# 粉体振動対流を3次元球殻上で行う

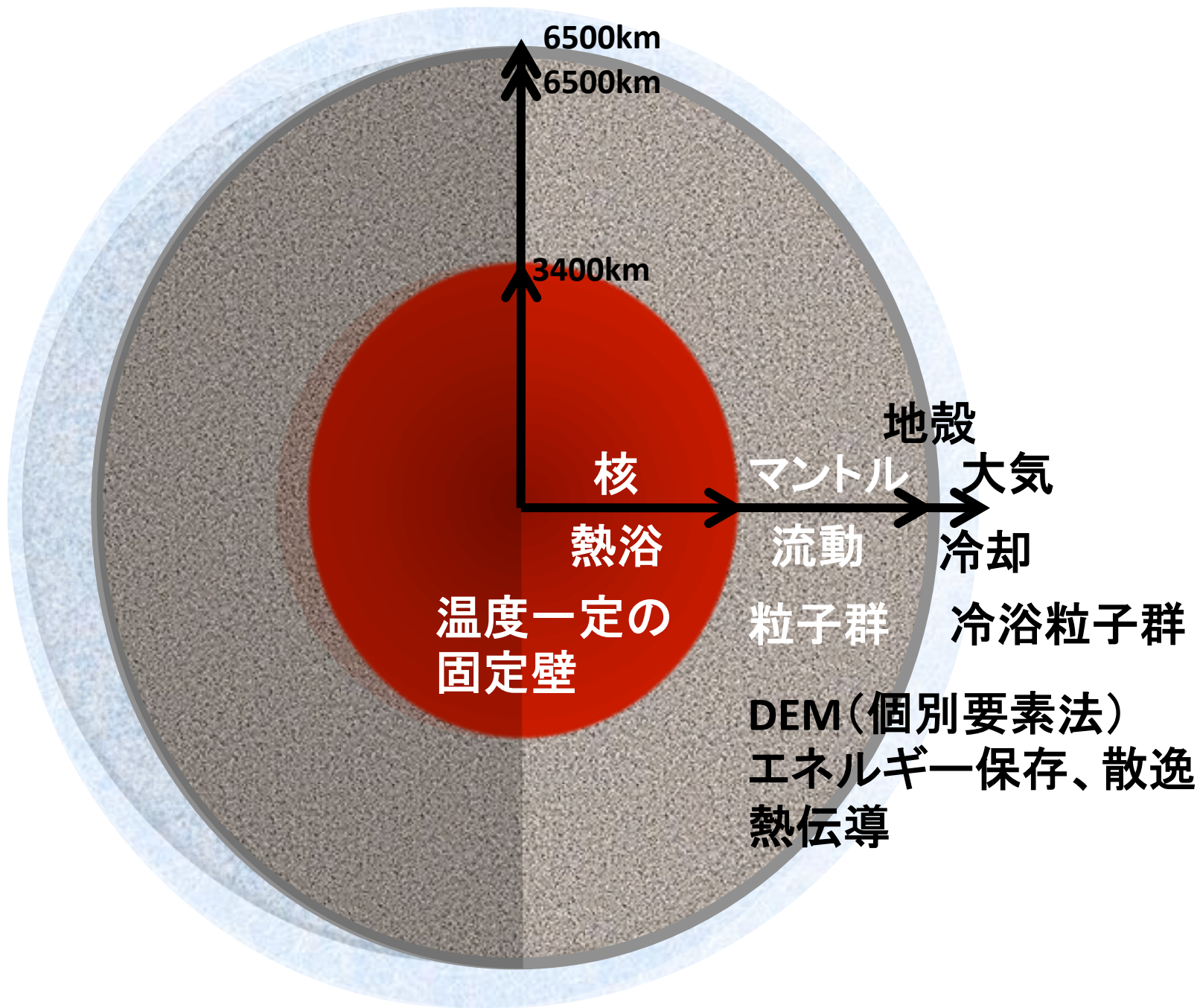


重力環境下では  
砂が全部落ちてしまう

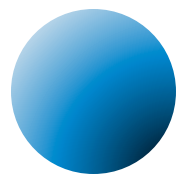
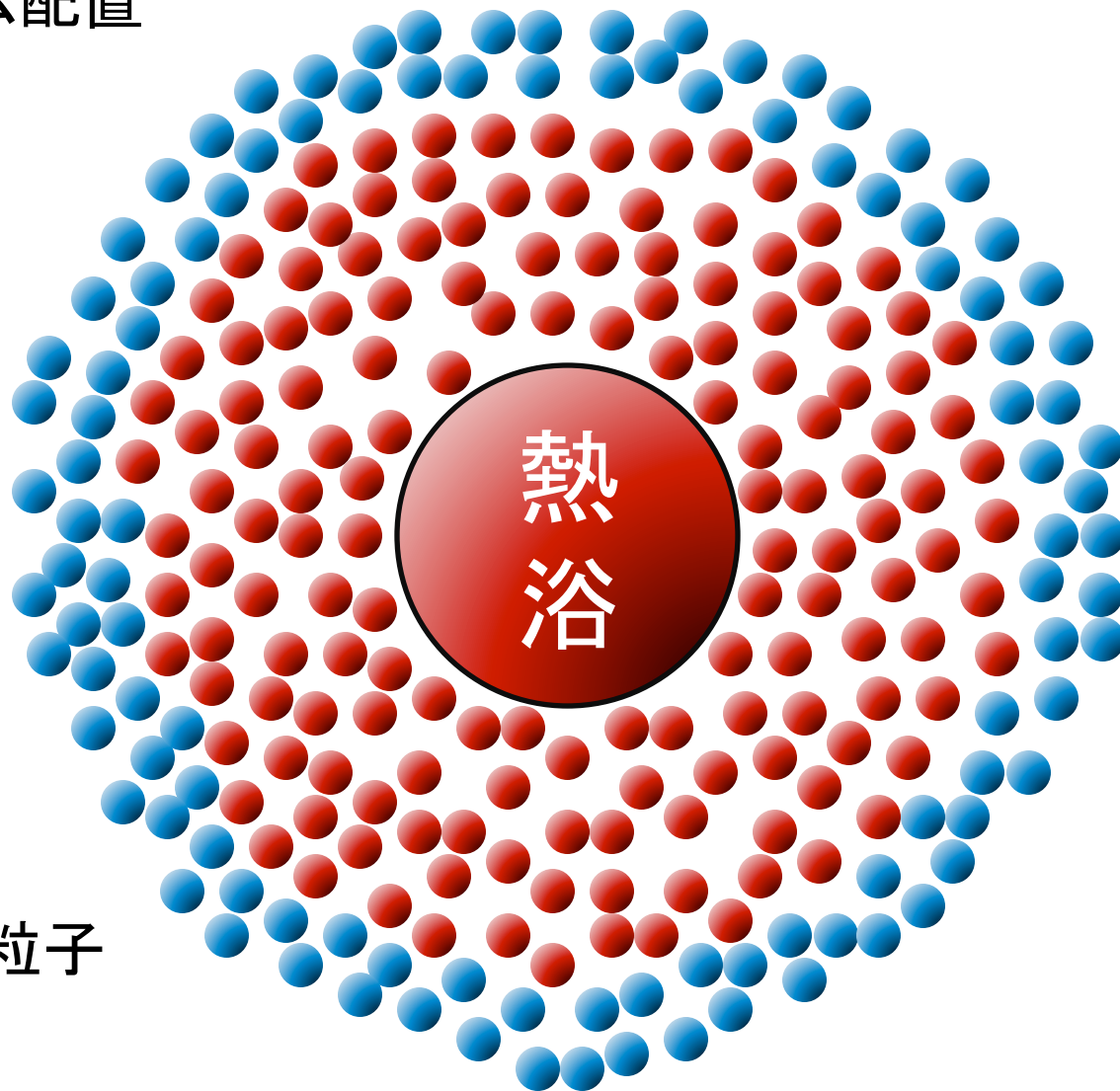
これは絶対に実験できない問題です。

宇宙で実験することは  
このご時勢、絶対に無理

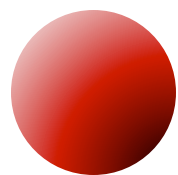




# 1. ランダム配置

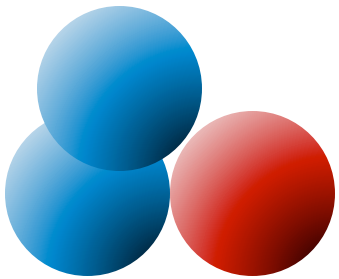
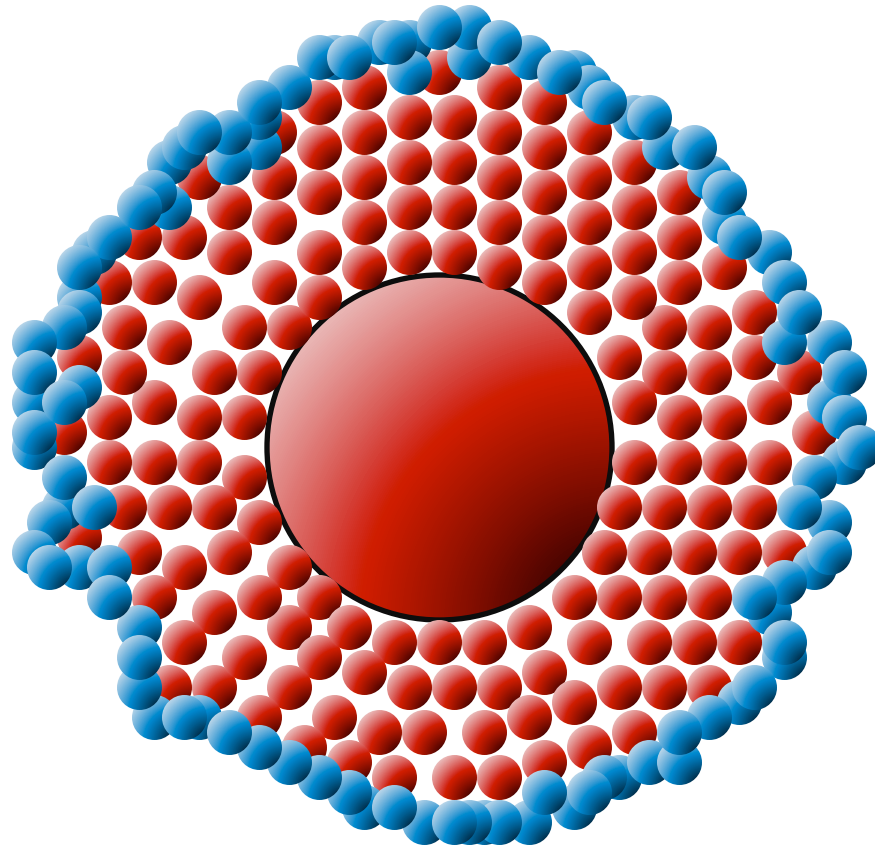


冷浴粒子



流動粒子

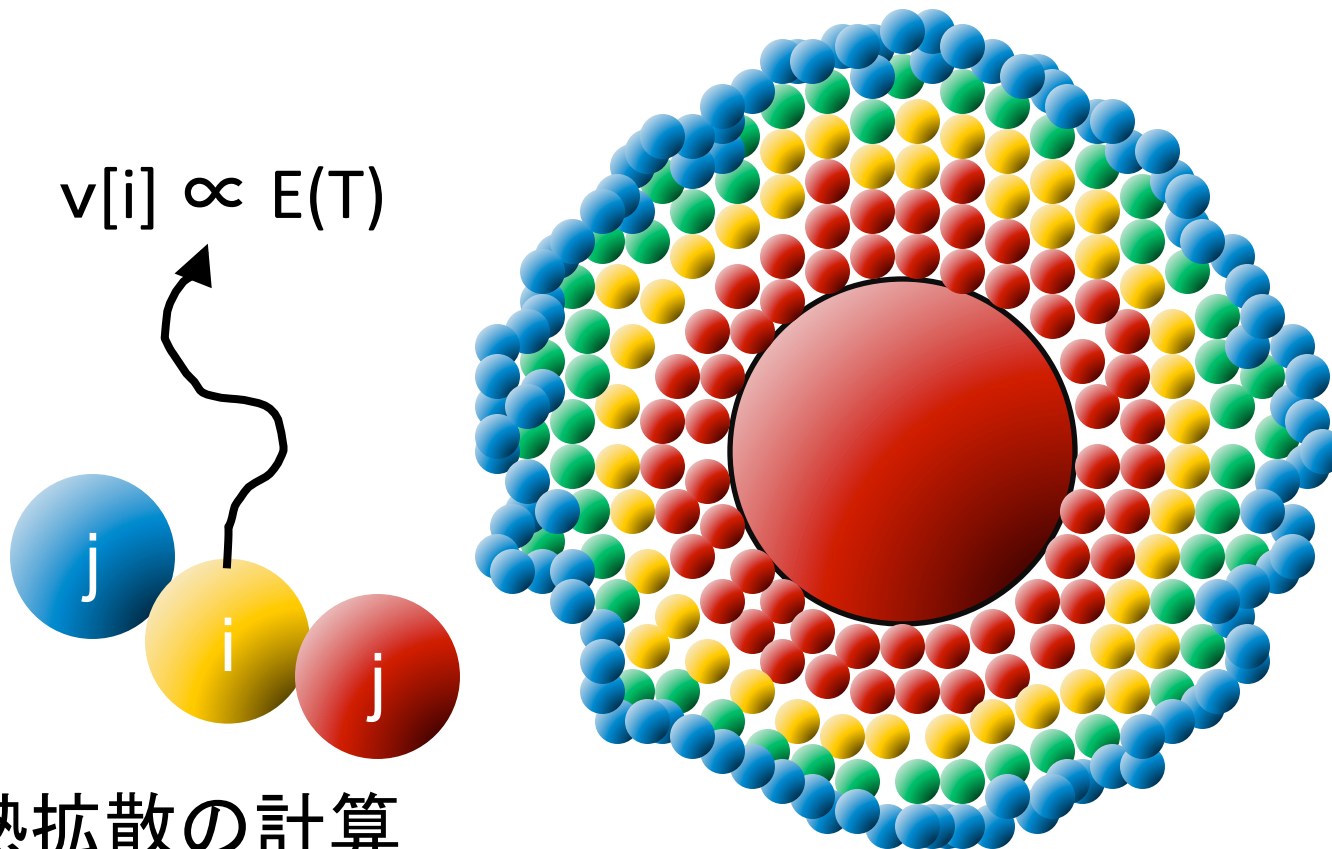
## 2. 重力充填



冷浴粒子間の相互作用は無視

冷浴粒子は流動粒子を冷やすだけで接触力を与えない

### 3. 熱拡散 & エネルギー保存



#### 熱拡散の計算

$$T[i] = T[i] + \kappa(T[j] - T[i])$$

#### エネルギーの計算

$$v[i] = v[i] E[i] / (0.5 m |v[i]|^2)$$



# シミュレーション条件

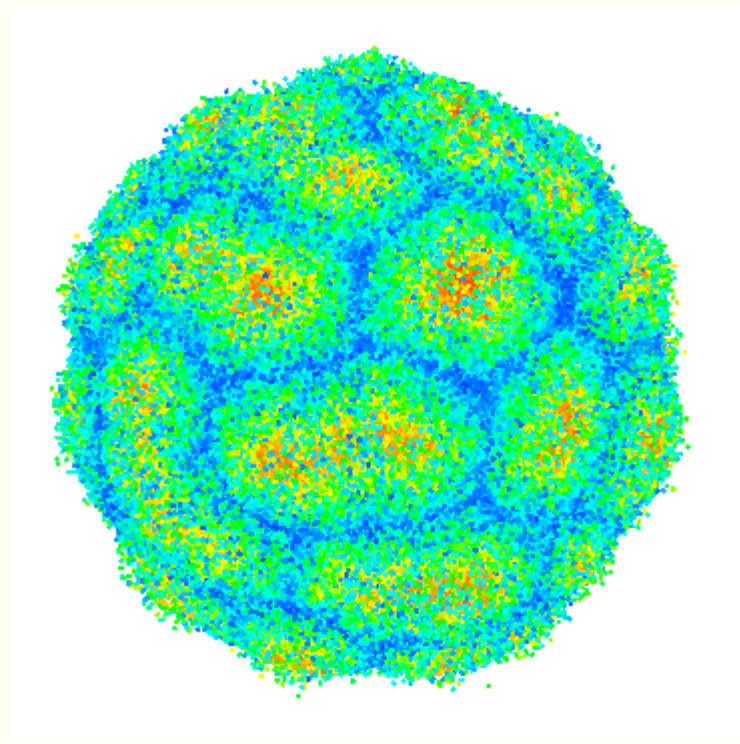
粒子温度	$T[i]: 0\sim 1$	コア: $T=1$ 冷浴粒子: $T=0$	$T_{ij}=0.5(T[i]+T[j])$
重力	$G=gh/H^2(1-T[i])$	$H$ :内核半径	$h$ :粒子動径座標 $g$ :重力加速度
粘着力	$F_c=Mg*\exp(4*(1-T_{ij}))$	$M$ :粒子質量	
摩擦係数	$\mu=\mu_0*(1-T_{ij})$	$\mu_0$ : $T=0$ の時の摩擦係数	
粘性減衰係数	$\eta=\eta_0*(1-T_{ij})$	$\eta_0$ : $T=0$ の時の減衰係数	
熱拡散率	$\kappa=\kappa_1*(0.8*T_{ij}+0.2)$	$\kappa_1$ : $T=1$ の時の熱拡散率	
運動エネルギー	$E[i]=0.5+15*T[i]$		

温度が上昇すると

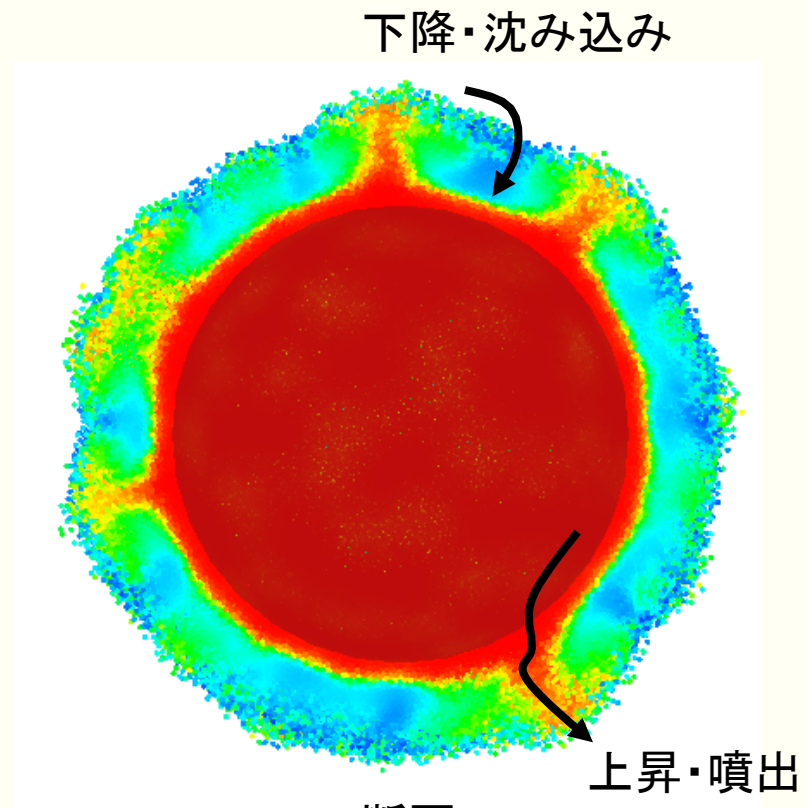
- ・浮力が働く
- ・粘着力が弱まる
- ・摩擦や減衰によるエネルギー損失が減る
- ・熱拡散率が大きくなる
- ・運動エネルギーが上がる.

# 3次元球殻熱輸送連成粉体振動対流

流体に近い条件で対流させると  
レイリー・ベナール対流に似たパターンが出る。



概観



下降・沈み込み

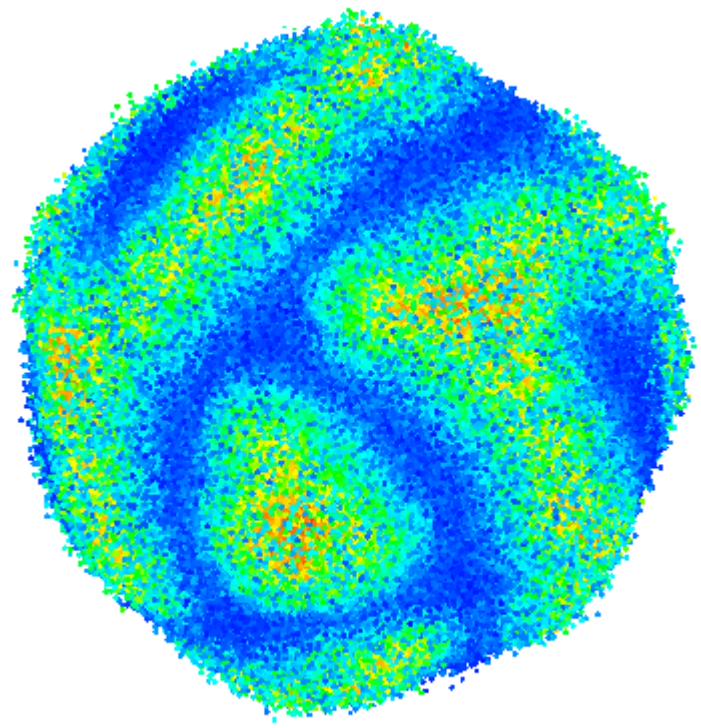
上昇・噴出

断面

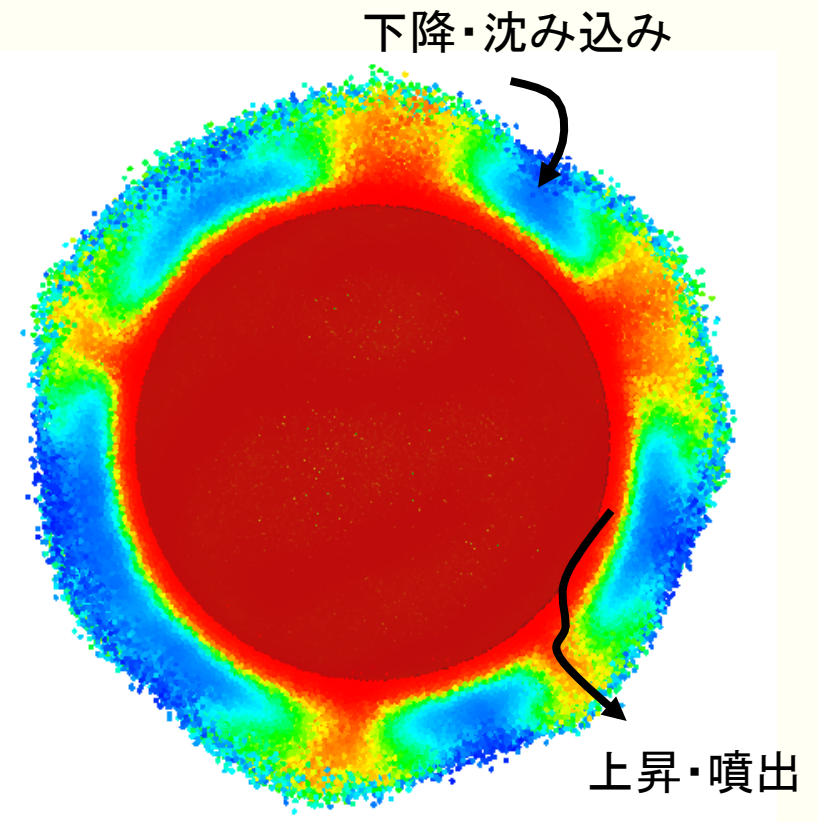
色は温度を表す： 赤＝熱い 青＝冷たい

# 3次元球殻熱輸送連成粉体振動対流

固体に近い条件で対流させると、これまでに世界のどこにも見られなかった対流パターンが出る



概観

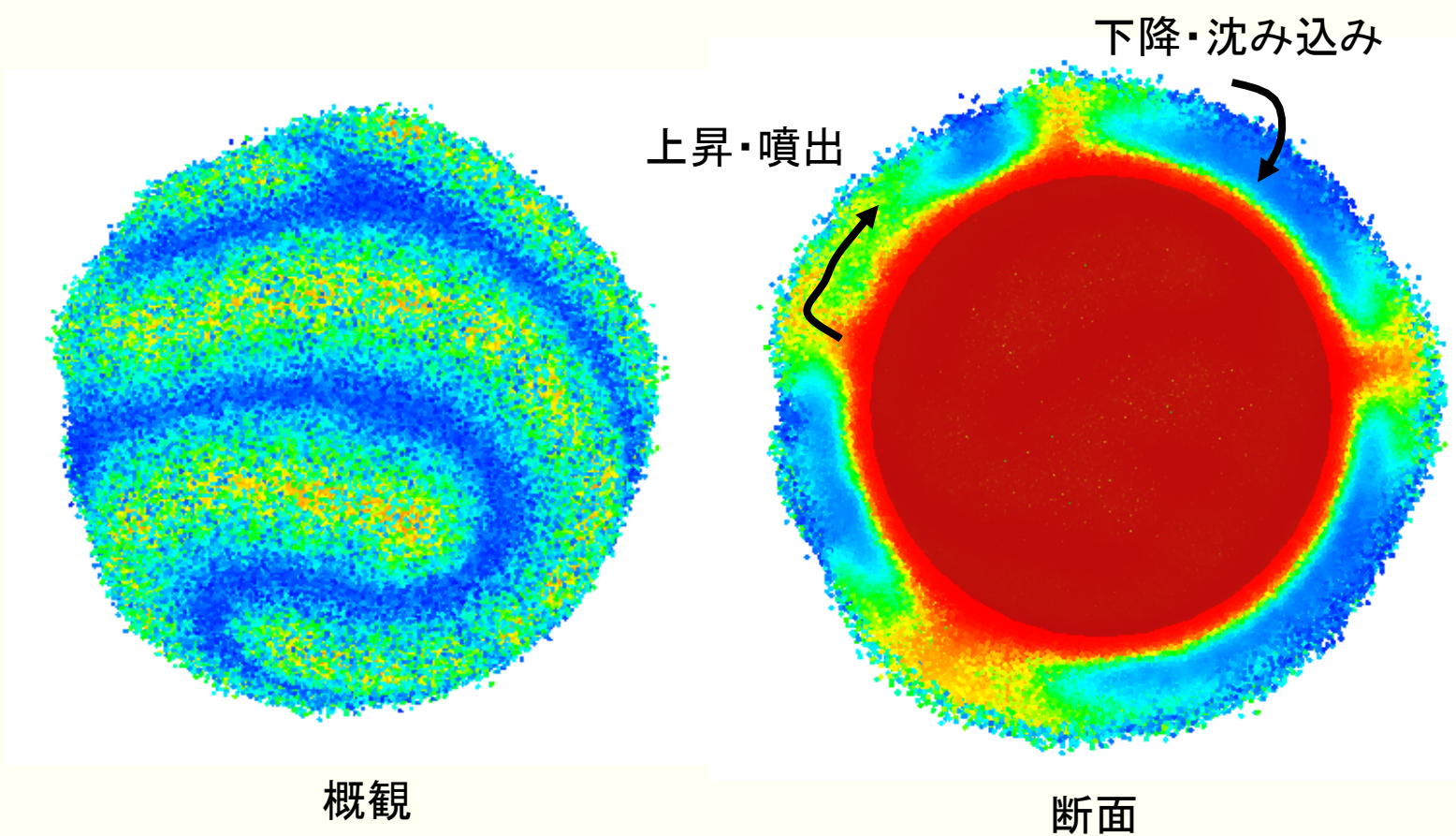


断面

色は温度を表す： 赤＝熱い 青＝冷たい

# 3次元球殻熱輸送連成粉体振動対流

固体に近い条件で対流させると、これまでに世界のどこにも見られなかった対流パターンが出る

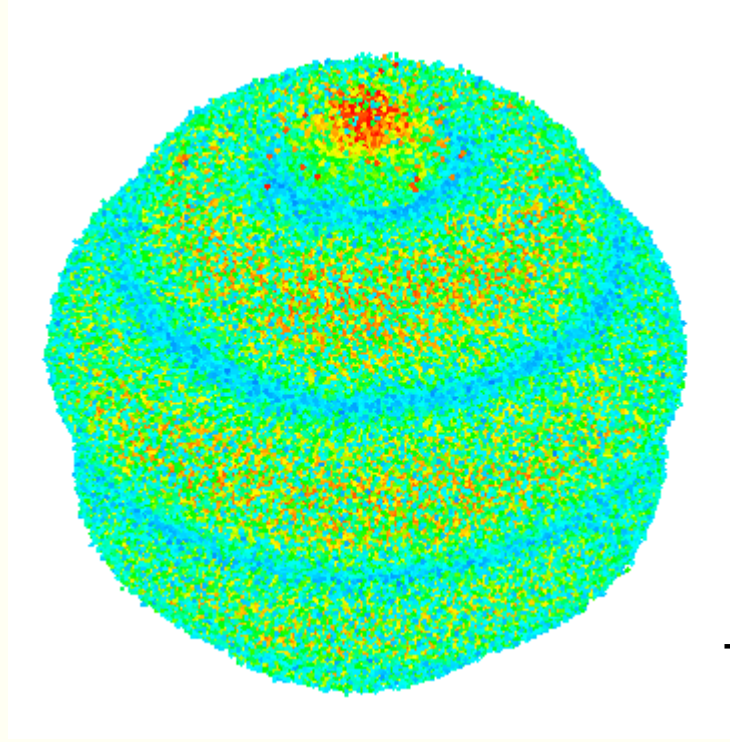


色は温度を表す： 赤＝熱い 青＝冷たい

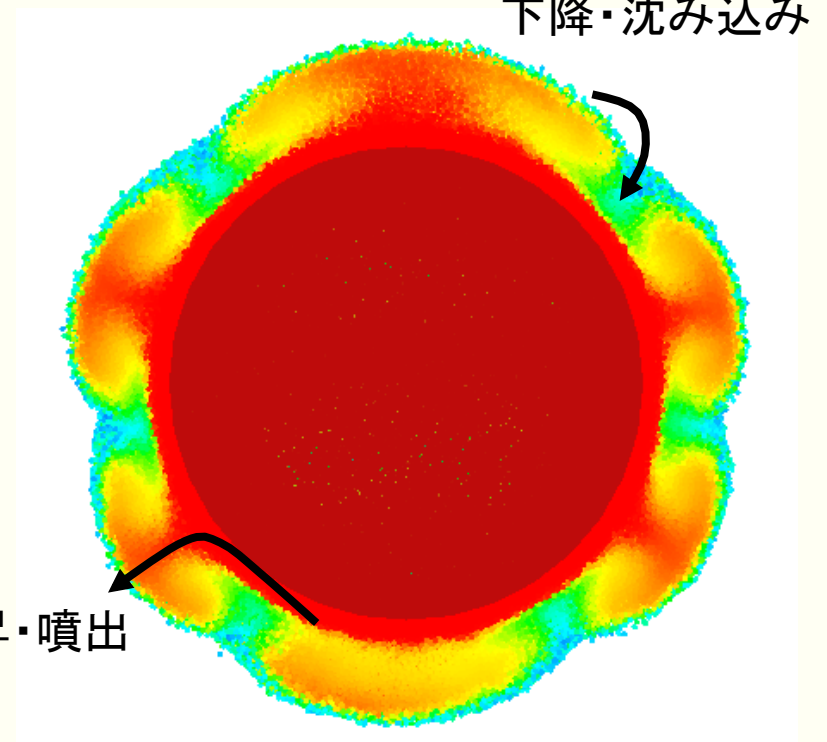


# 3次元球殻熱輸送連成粉体振動対流

球殻上をロール対流が平行に並ぶ。



概観

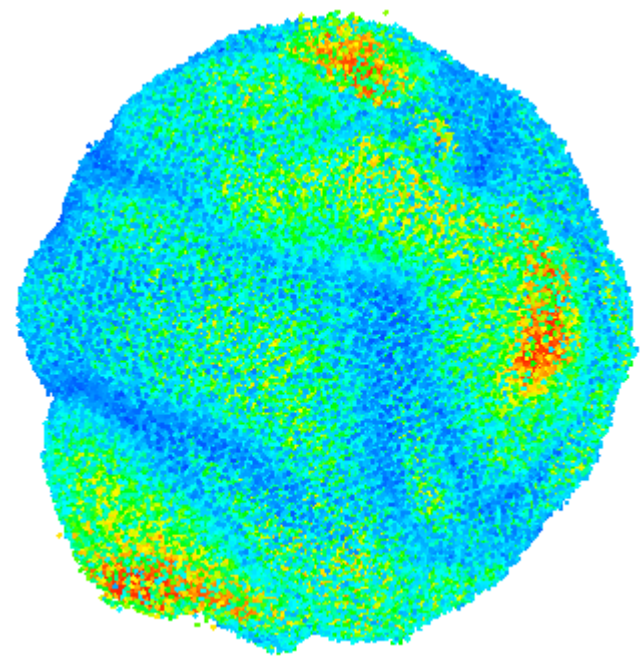


断面

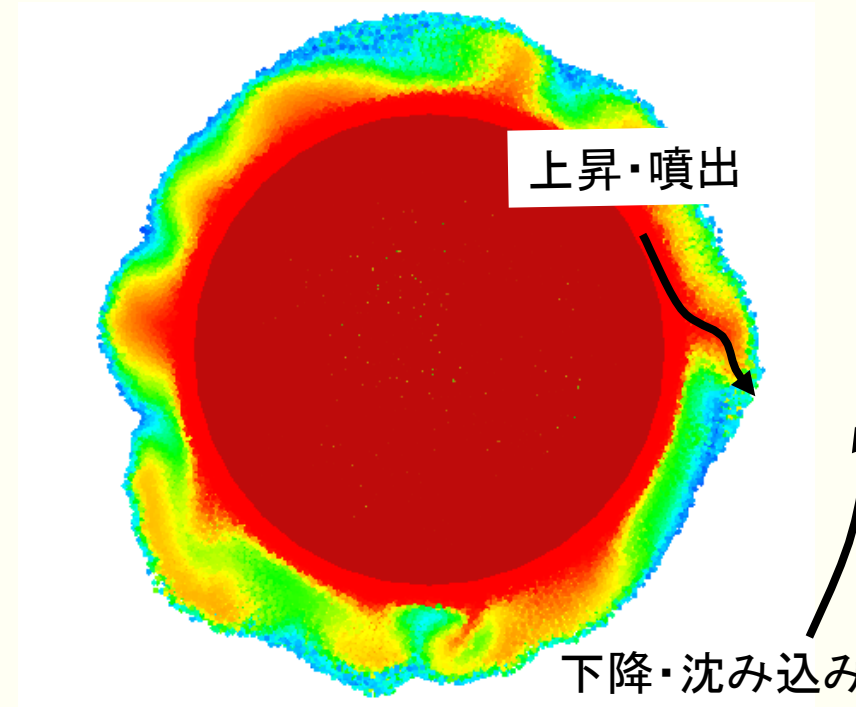
色は温度を表す： 赤＝熱い 青＝冷たい

# 洗濯機までの過渡期に見える地球の沈み込みに似た対流パターン

縞模様になって全体が洗濯機のように回転する。



概観

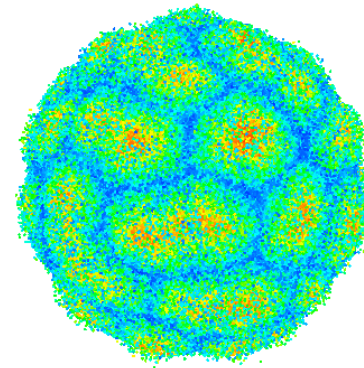


断面

色は温度を表す： 赤＝熱い 青＝冷たい

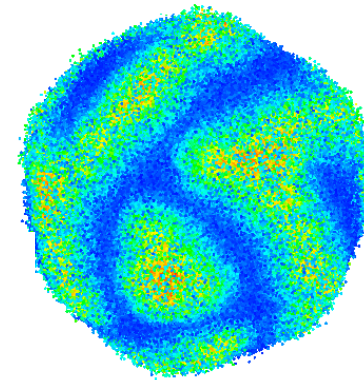
# サッカーボール対流

流体的条件



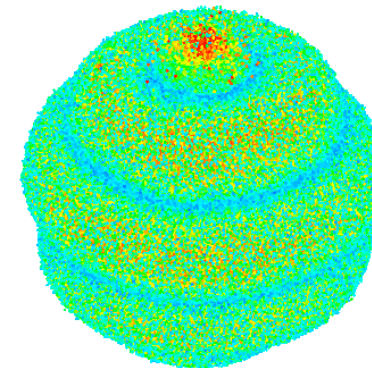
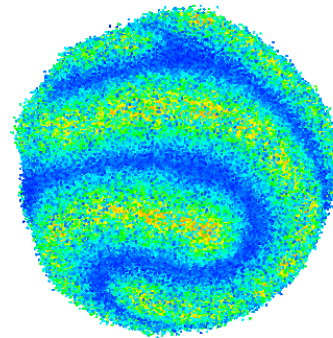
# バレーボール対流

流体-固体中間的条件



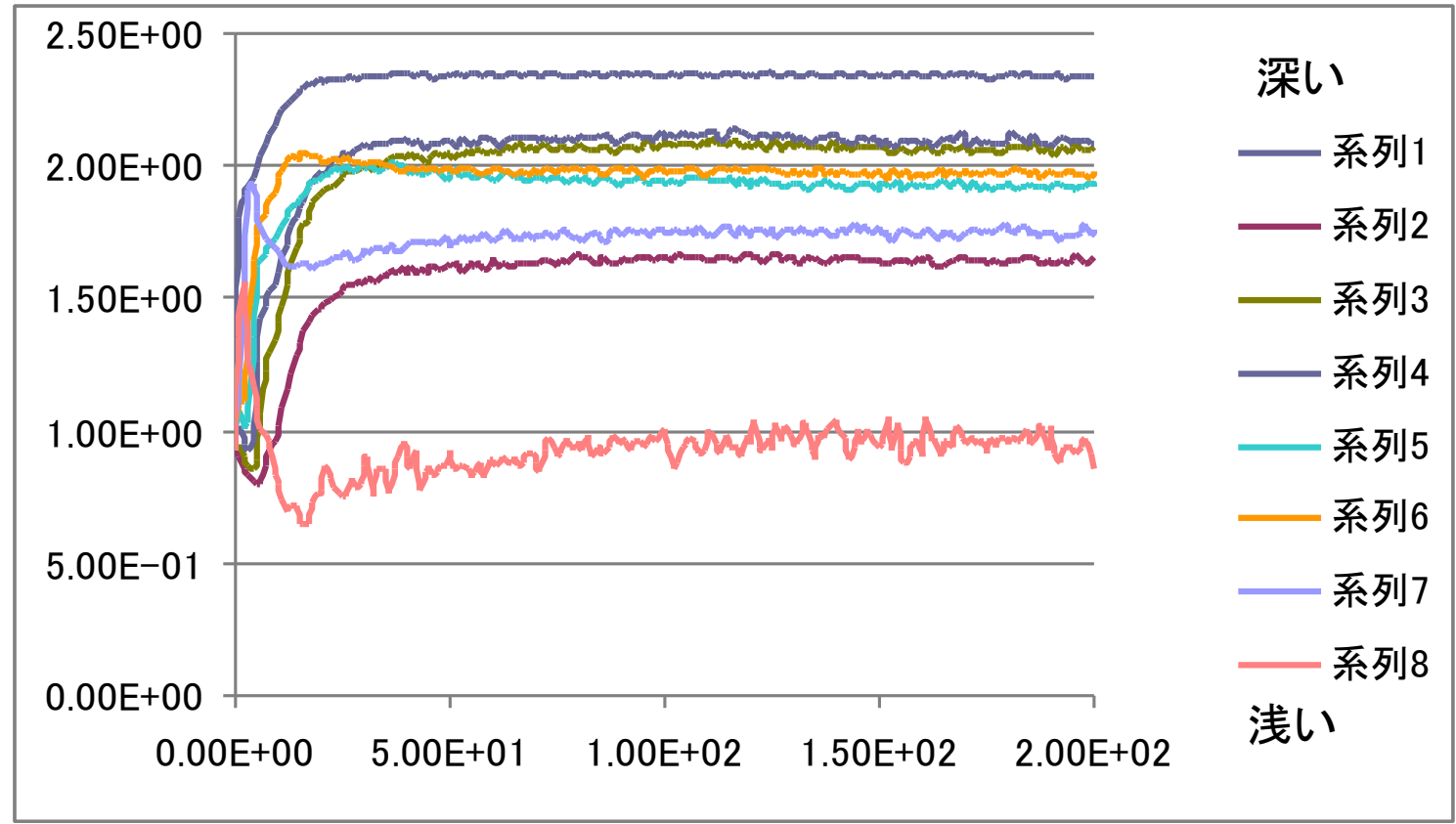
# 洗濯機対流

固体的条件



# 粒子数密度の標準偏差 $\sigma$ — サッカーボール

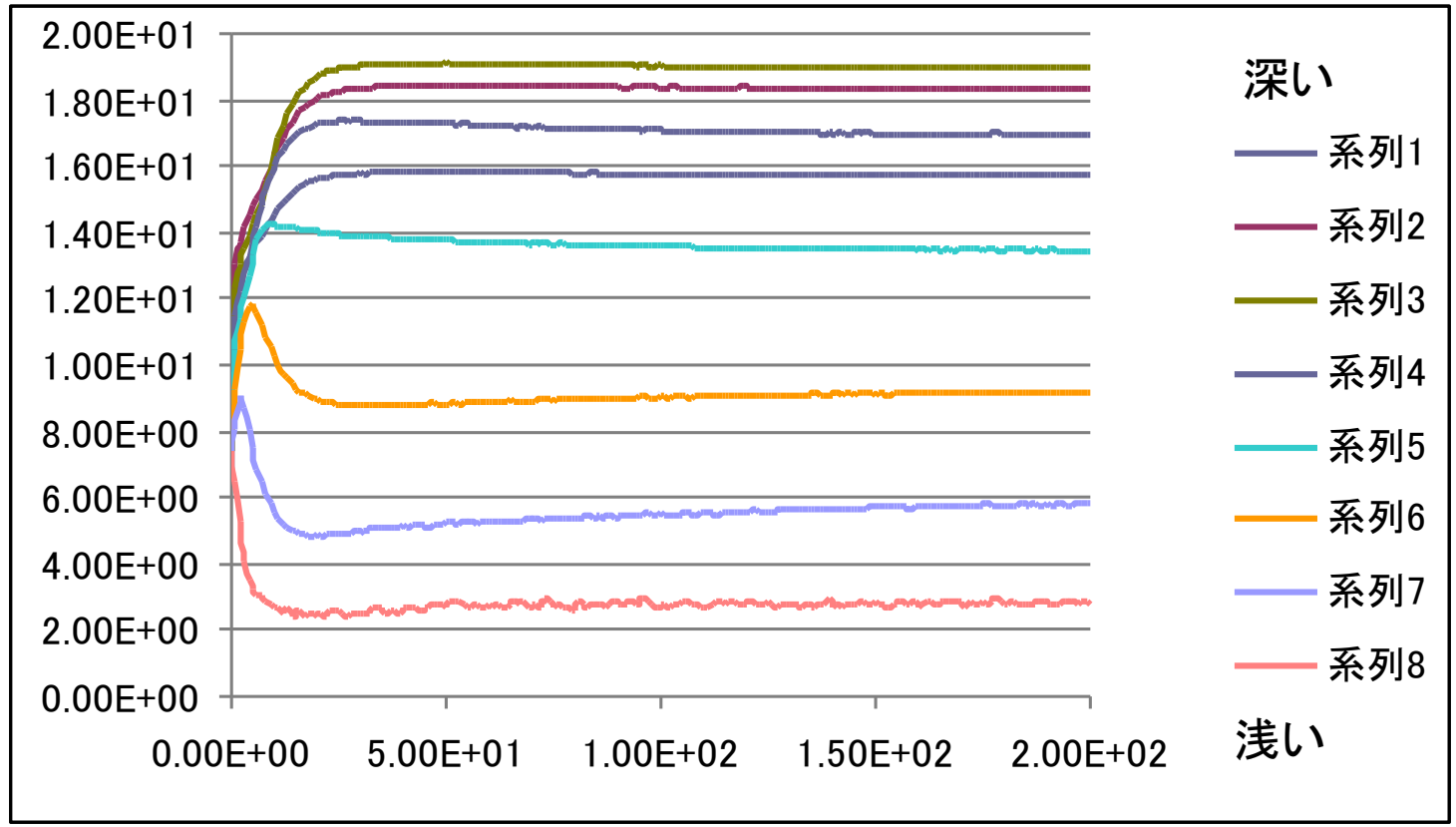
中層でバラツキが大きい





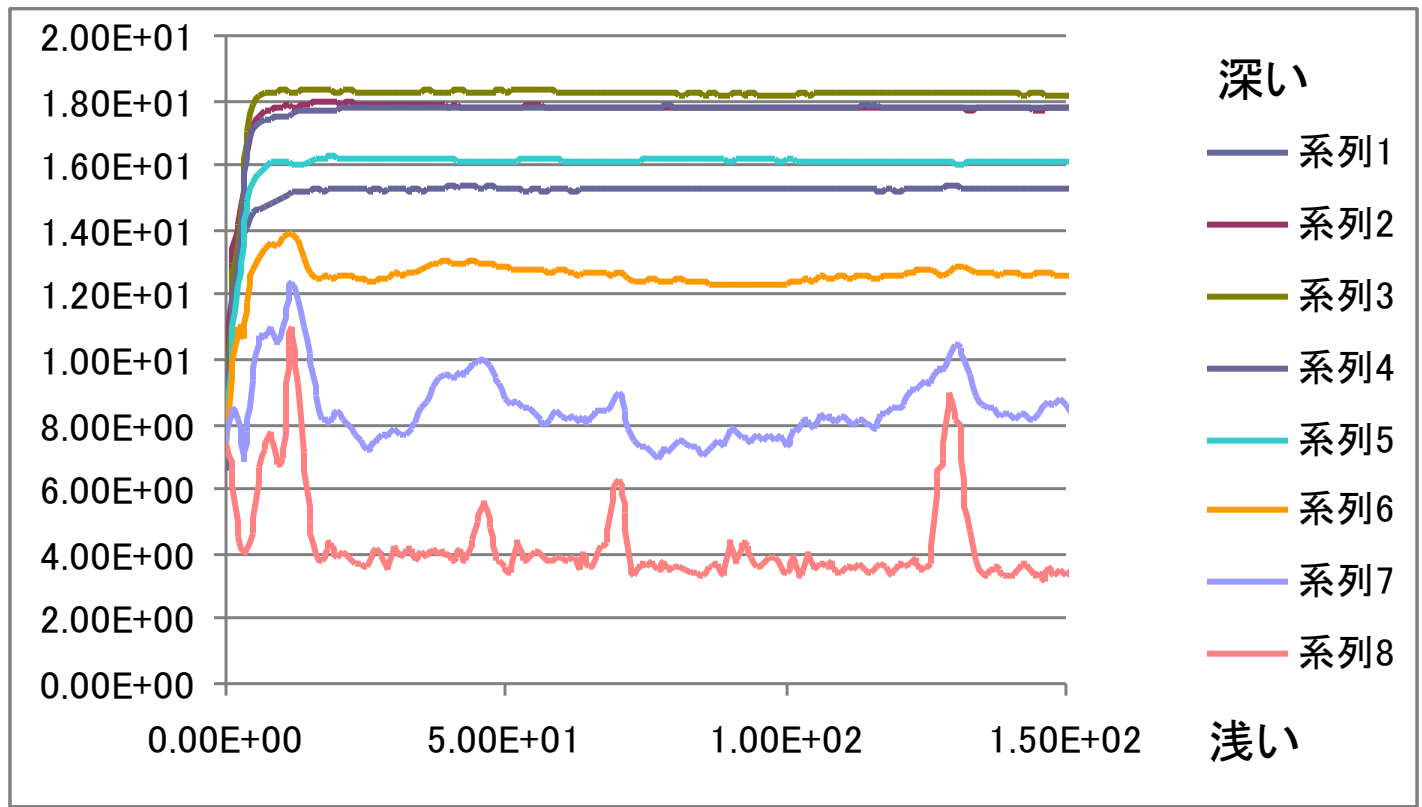
# 粒子数密度の平均値 — バレーボール

必ず



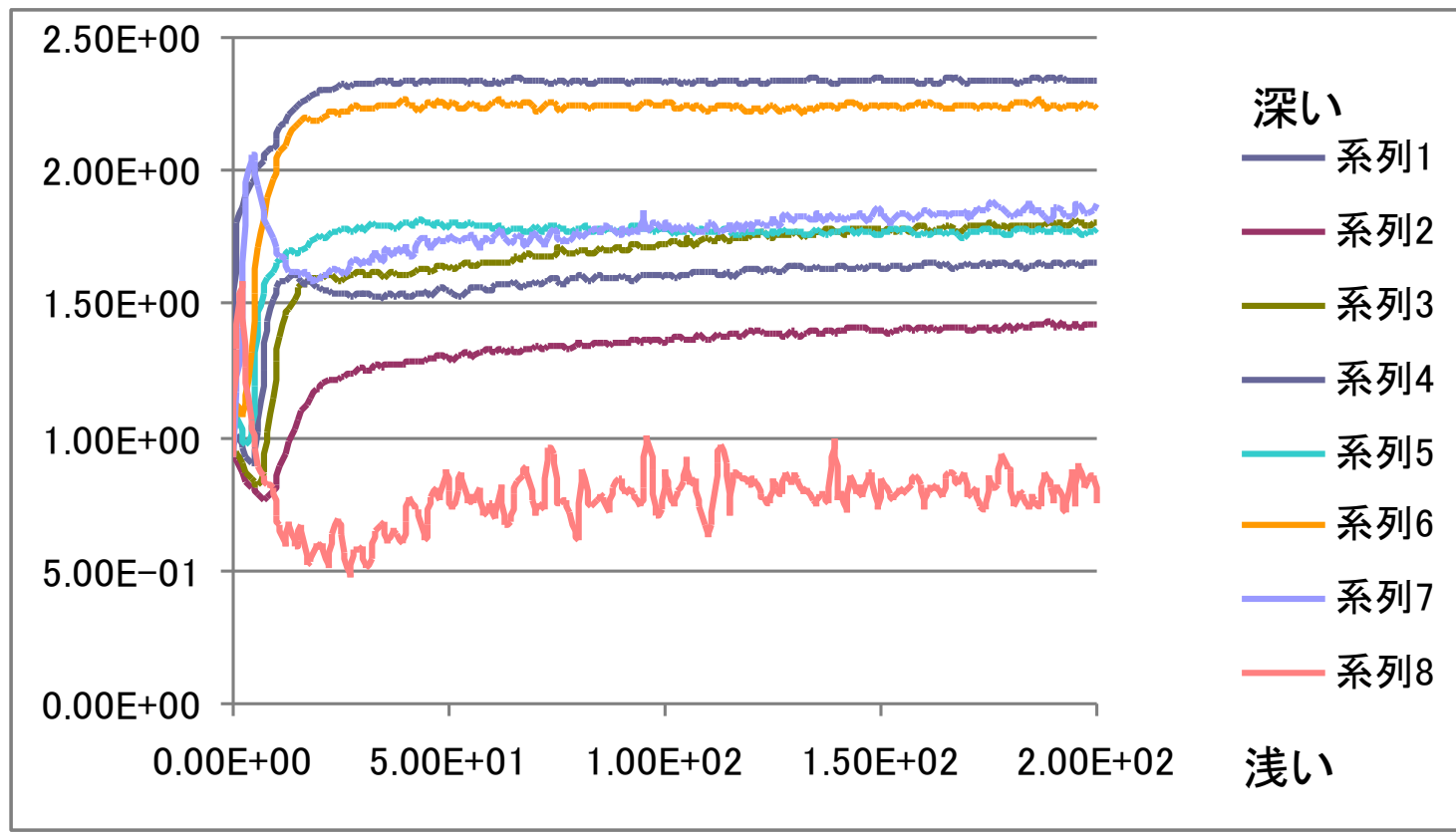
# 粒子数密度の平均値 — 洗濯機

表面の密度が高い



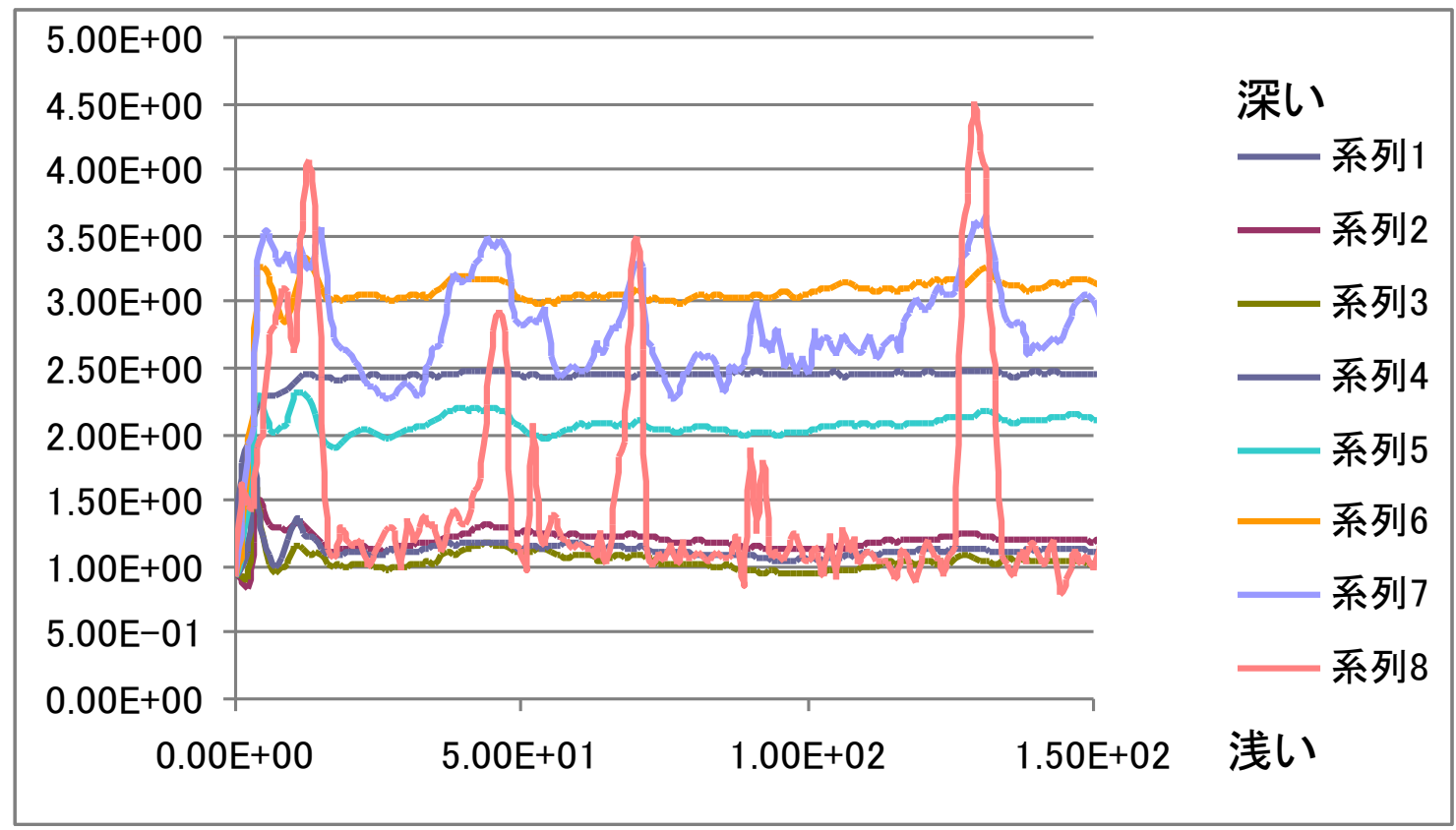
# 粒子数密度の標準偏差 $\sigma$ — バレーボール

サッカーボールと比較してバラツキ小



# 粒子数密度の標準偏差 $\sigma$ — 洗濯機

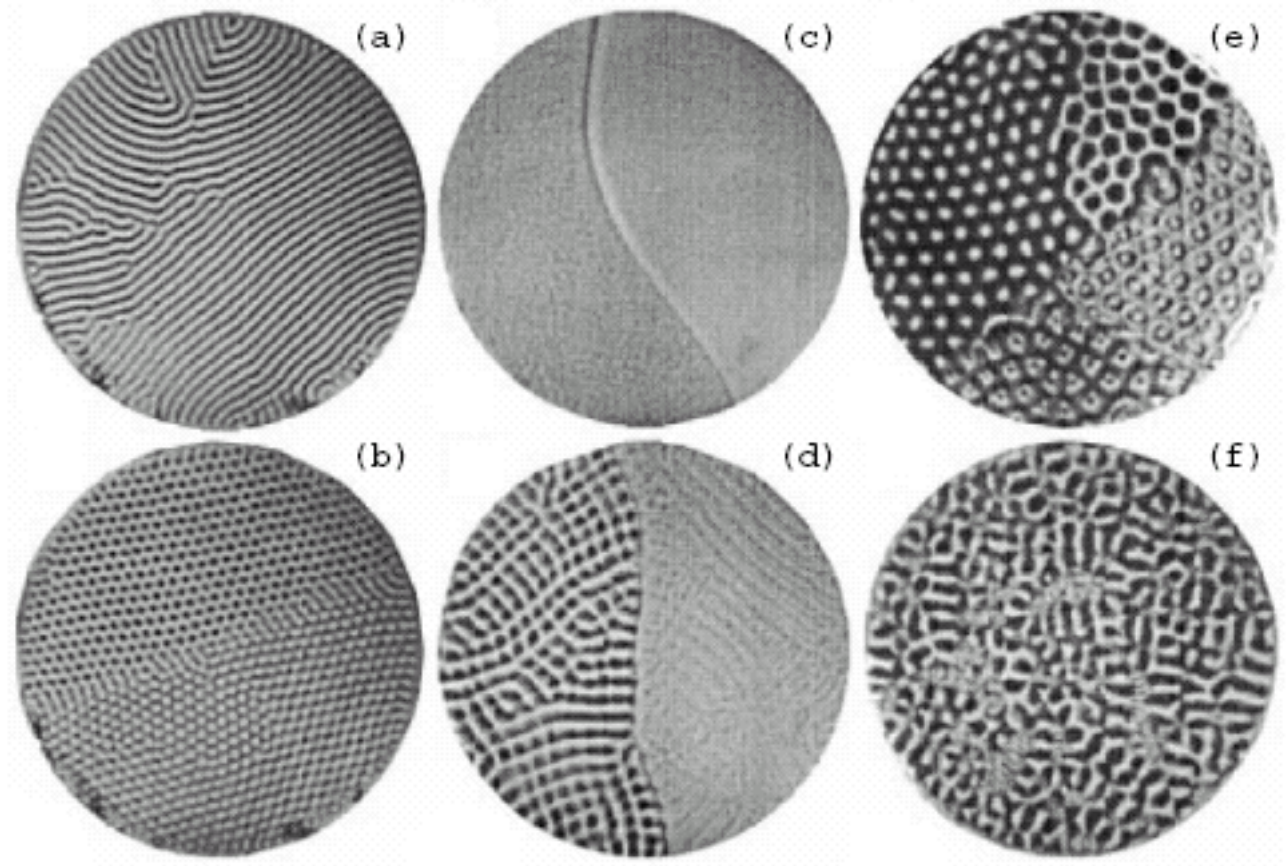
必ず





# 現存するサッカーボール・バレーボール対流

重力下での粉体対流に存在していた。

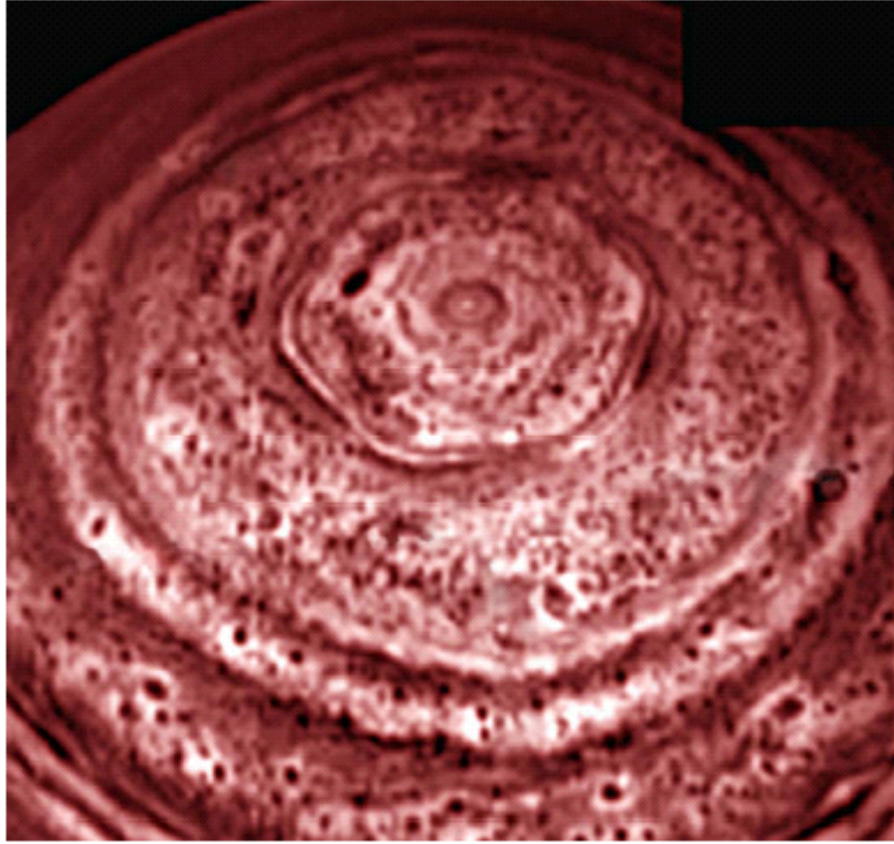


Vertically shaken layer of tiny balls (layer depth 1.2mm, ball diameter 0.15-0.18mm) [From Melo, Umbanhowar, and Swinney]

# 現存する洗濯機対流

29 OCTOBER 2006: *NASA's Casini spacecraft reveals "bizarre 6-sided feature encircling the north pole of Saturn"*

<http://saturn.jpl.nasa.gov/home/index.cfm>



Each side  
13,800 km

Period  
10h 39min 24s

Latitude  
78° North

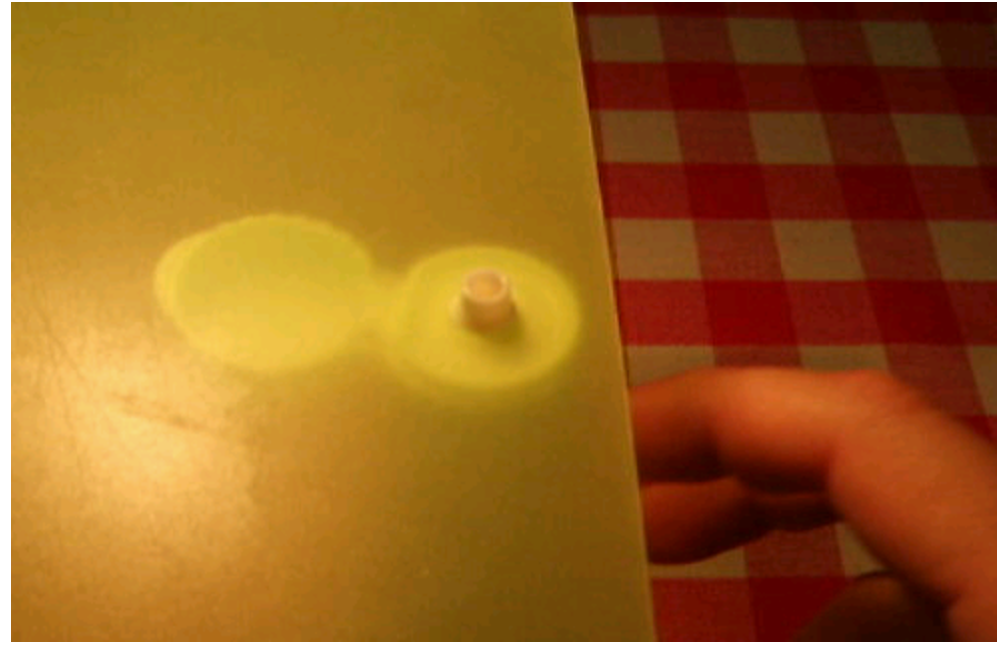
土星を真上から見た様

# 噴出物の幾何学 — 穴状噴出

ちようど良い材料と道具がありました。



キューピーマヨネーズ  
カロリーーフ (税込み\210)

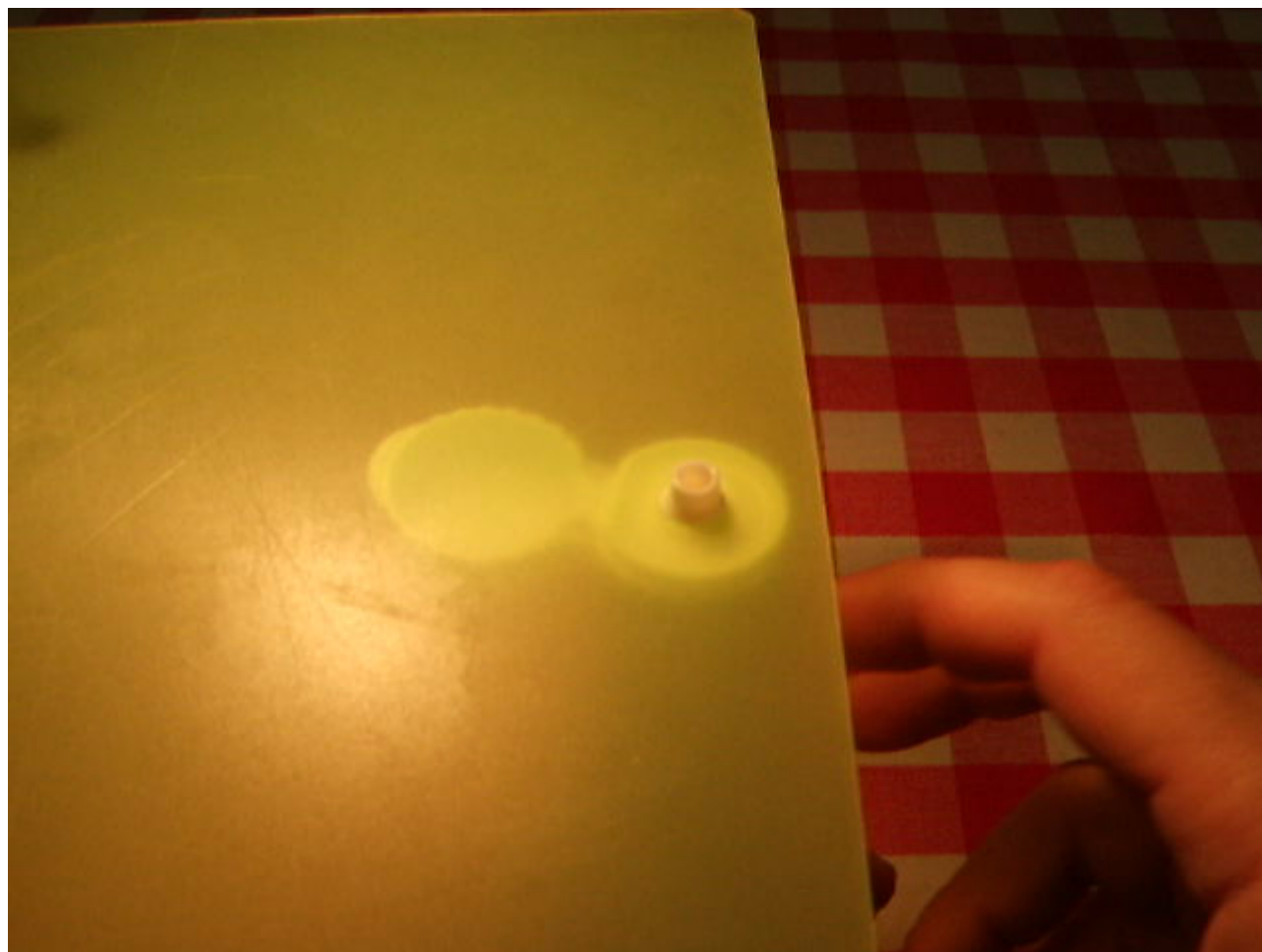


まな板シート (端に穴が開いてるもの)



## 噴出物の幾何学 — 穴状噴出

ちなみに、マヨネーズを上向きに出したのは、生まれては初めてでした。

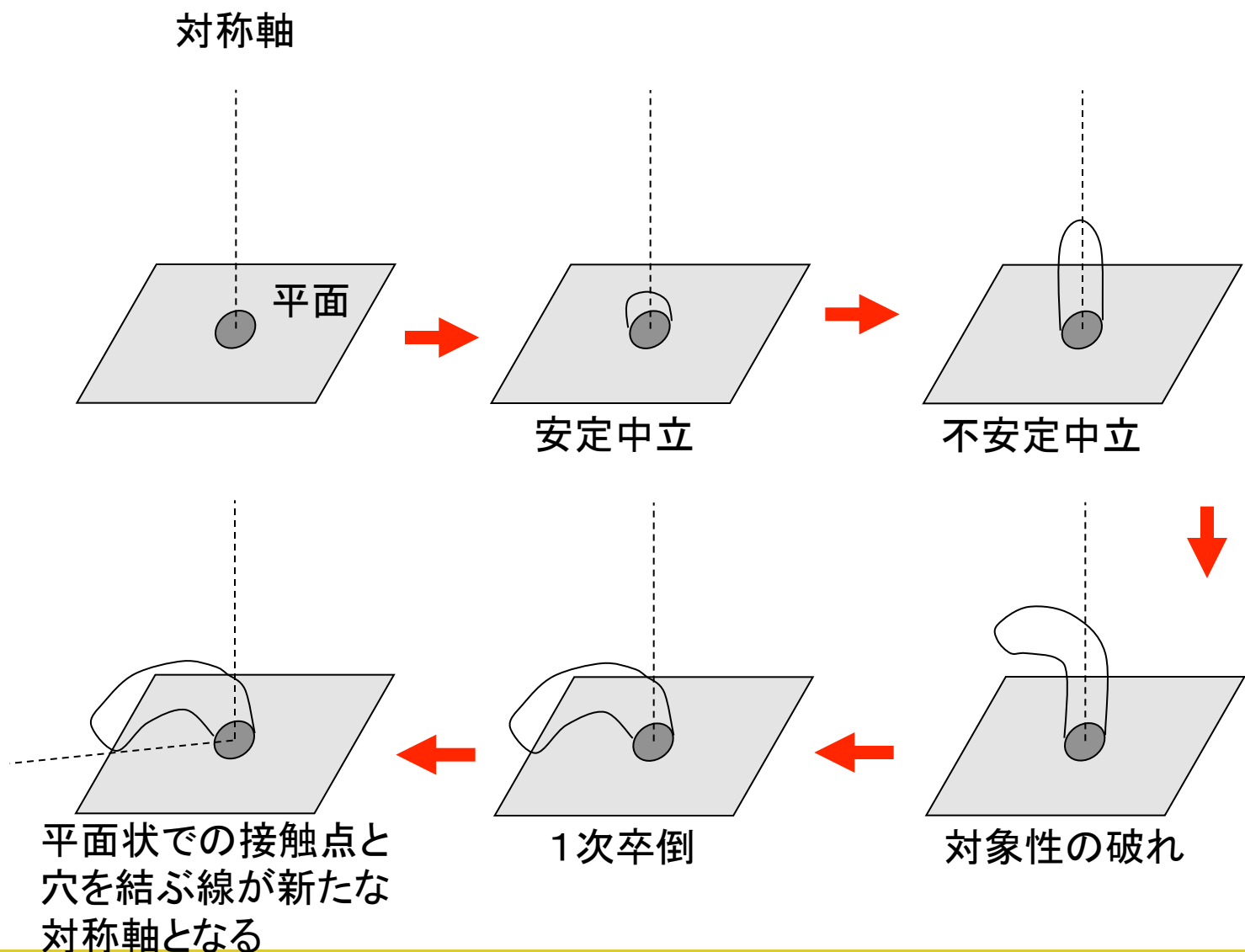


実験



# 噴出物の幾何学 — 穴状噴出

ちなみに、マヨネーズを上向きに出すと。



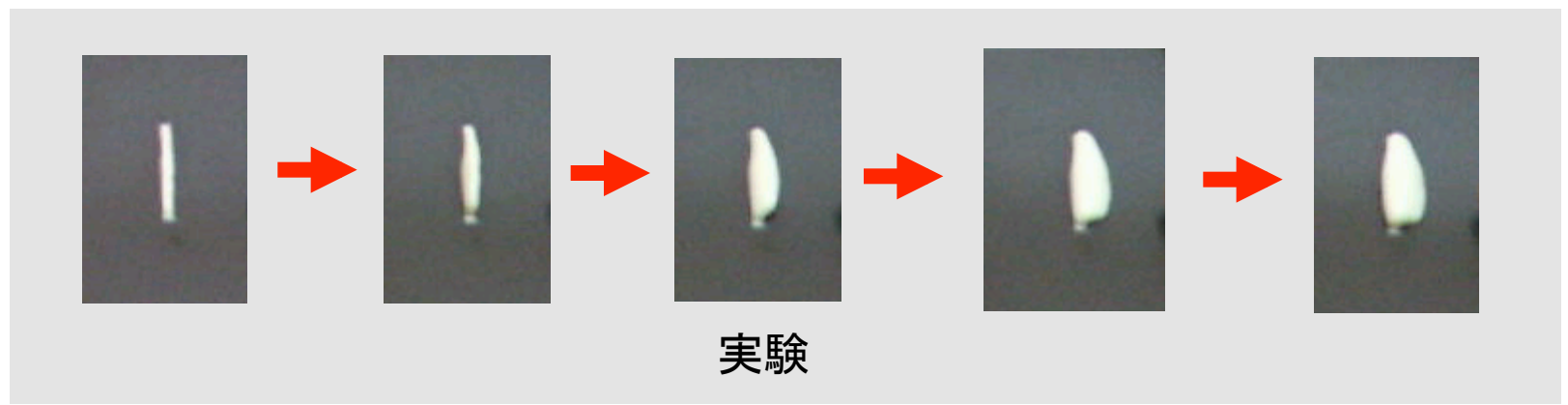
# 噴出物の幾何学 — スリット状噴出

かなり違います。



# 噴出物の幾何学 — スリット状噴出

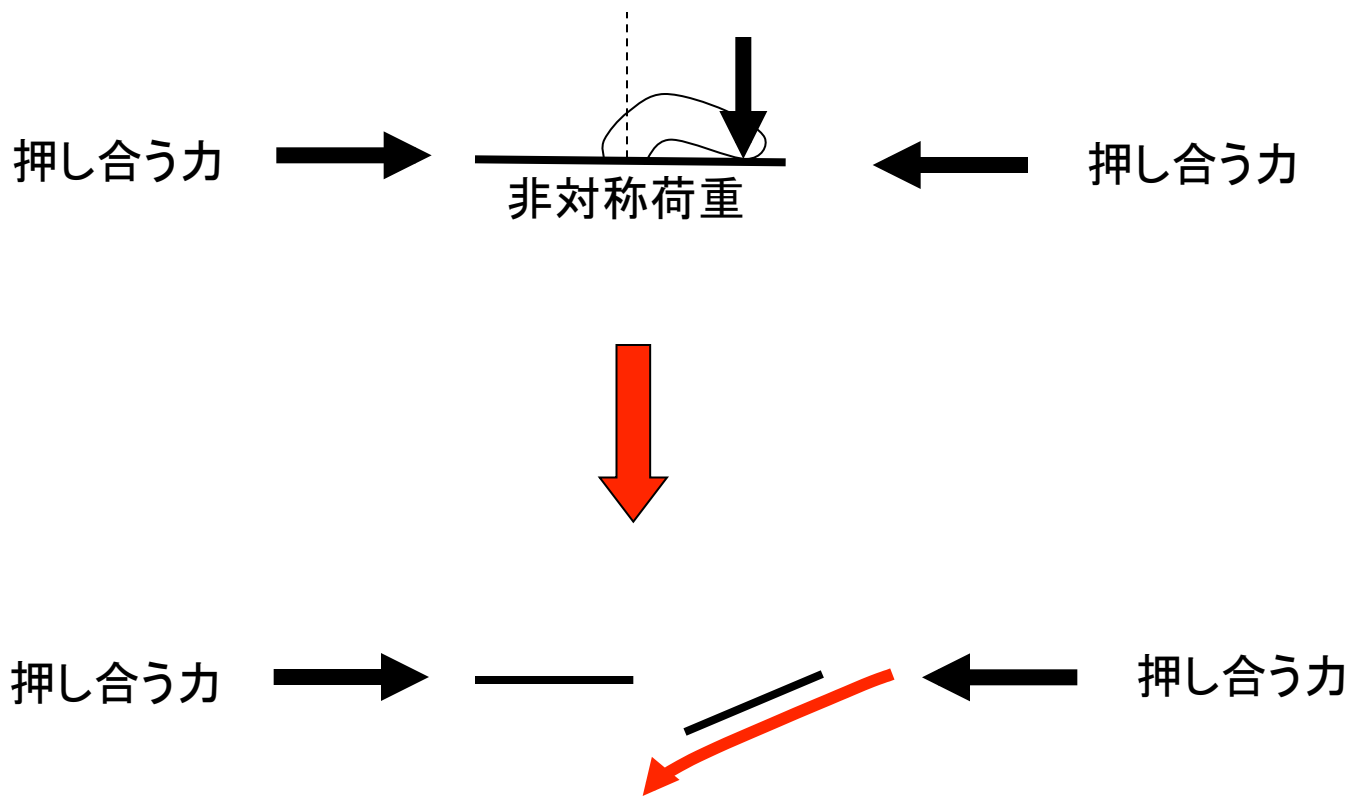
非対称が維持されます。



スリットの長手方向の対称性は維持されるので2次元問題になり、  
自発的にスリットの幅方向に荷重非対称が生じる。

# 沈み込み開始の新しい理論

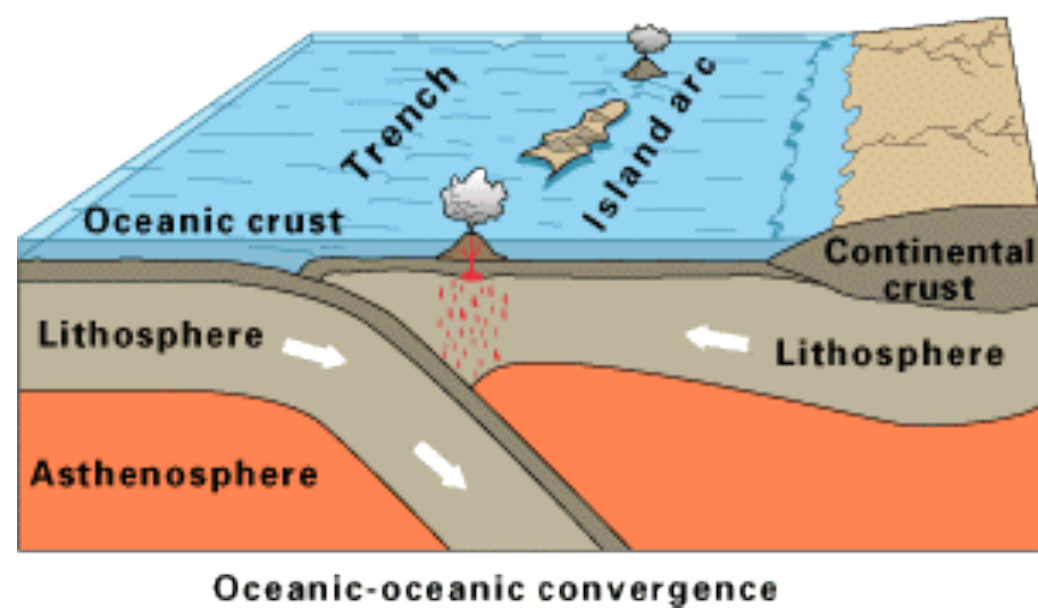
噴出が板状にできたから  
沈み込みが始まった



表面の固い固体層が割れて沈み込みが開始する



# 沈み込み帯と火山フロントの関係：既存の仮説



沈み込みがあるから火山ができた。

全く逆である。



# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み



# 千手観音様数千人と五円玉十億個の実験





# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み



# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み



# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み



# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み





# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み



# 溶岩湖に見られる非対称沈み込み

