

地球流体構造論

Global Fluid Dynamics and Natural Structure Formation

第1部: 地球流体システム論

Part 1: Global Fluid Dynamic System

第2部: 秩序構造形成論

Part 2: Natural Structure Formation

(注: 2022年度までの「地球流体防災論」から名称変更)

水曜日, 8:45~, J201

Wednesday

広島大学先進理工系科学研究科・総合科学部

Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

小澤 久

Hisashi Ozawa

Ver. 2023

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

概要1 Outline 1

Part 1. 地球流体システム論 Global Fluid Dynamic System

- はじめに

Introduction

- 非平衡開放系としての地球流体システム

The global fluid dynamic system: a non-equilibrium open system

- 地球の放射収支

Global radiation balance

- 大気温度の高度分布

Vertical temperature distribution

- 大循環運動による熱輸送

Heat transport by the general circulation

- 熱輸送に伴うエネルギー生成率と散逸率

Generation and dissipation of available energy due to heat transport

概要2 Outline 2

Part 2. 秩序構造形成論 Natural Structure Formation

- 自然界の縞模様
Periodic patterns in nature
- 流体系の散逸構造とその特徴
Dissipative structures of fluid systems
- 粉体流の秩序構造
Pattern formation in granular flows
- 割れ目の周期構造
Periodic patterns of cracks
- フラクタルと散逸構造
Fractal and dissipative structures
- まとめと課題 (小レポート)
Summary and exercises
- 講義資料の画像ファイル (PDF) : Moodle
Lecture materials (PDF): Moodle

Part 2. 秩序構造形成論

Natural Structure Formation

2-1. 自然界の縞模様

Periodic patterns in nature

寺田寅彦の科学随筆 (1933)

Scientific essay by T. Terada

- 流体系の散逸構造とその特徴
Dissipative structures of fluid systems
(ベナールの熱対流, 電気対流の構造変化)
Bénard convection, electronic convection
- 粉体流の秩序構造
Pattern formation in granular flows
(流下する粉体流の渦構造, 砂の表面の風紋)
Vortex formation in granular flows, sand ripples
- 割れ目の周期構造
Periodic patterns of cracks
(乾燥割れ目, 氷河クレバス, ガラスの割れ目)
Dried cracks, glacier crevasses, cracks in glass

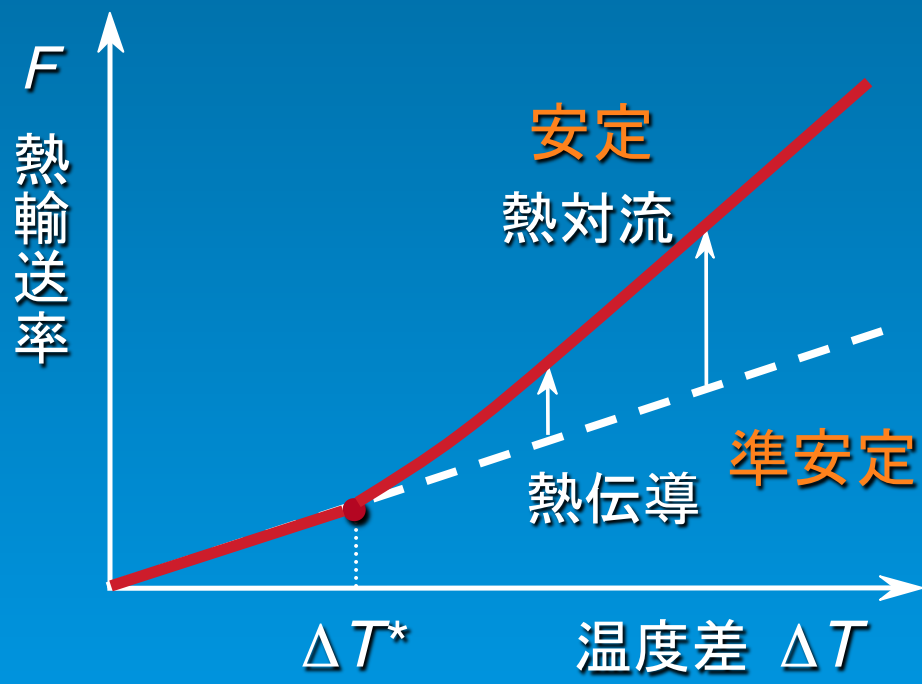
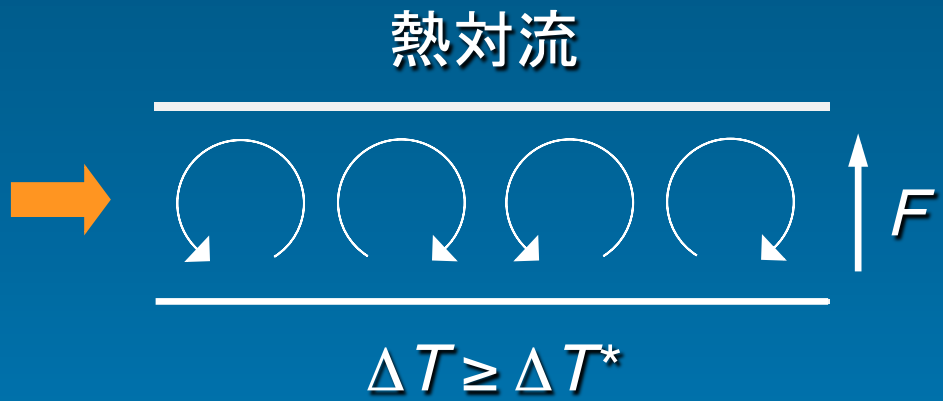
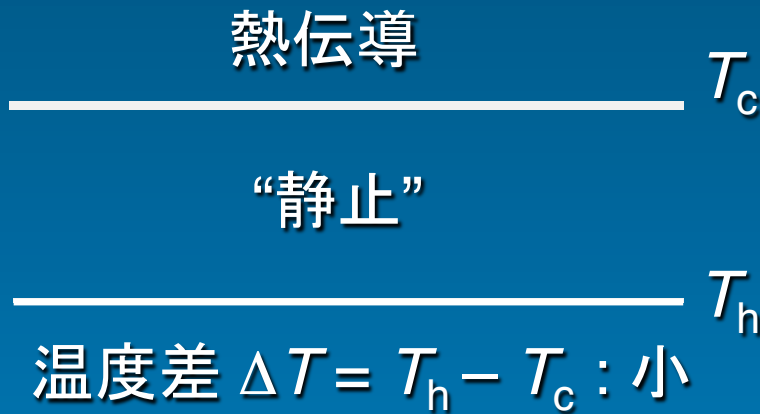
...

⇒ エネルギー論的な解釈が可能か？
Is energetic interpretation possible?



寺田寅彦
Torahiko Terada
(1875–1935)

ベナールの熱対流 Bénard convection



Silveston (1958)

熱輸送率の大きい状態がより安定

エネルギー散逸率 $\propto \frac{dS}{dt}$: エントロピー増加率

$$D \propto \frac{dS}{dt} = \frac{F}{T_c} - \frac{F}{T_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h T_c} F \propto F$$

一定

⇒ エネルギー散逸率 (≈ 力学的仕事率) の大きい状態がより安定?

Sawada (1981) *Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.*

ベナールの熱対流の発達



Velarde and Normand (1980)

対流構造: 未発達



発達

熱輸送率: 小



大

不安定

安定

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

電気対流の構造変化

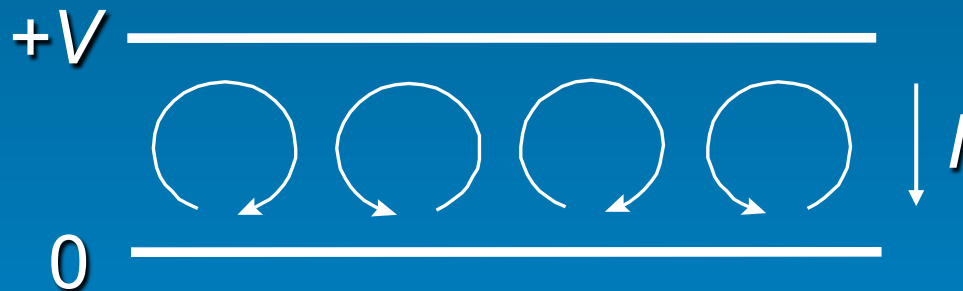
Pattern formation in electric convection

電気対流の数値シミュレーション

Numerical simulation of electric convection

鈴木, 沢田 (1983)

Suzuki, Sawada



電位差 (V): 大
electric potential large

対流が発生
convection occurs

電流 (I) が増加
electric current increases

支配方程式:

Governing equations:

- 流体の運動方程式

Fluid dynamic equation

- 非圧縮の連続の式

Continuity equation for fluid

- 電荷の保存の式

Conservation equation for charges

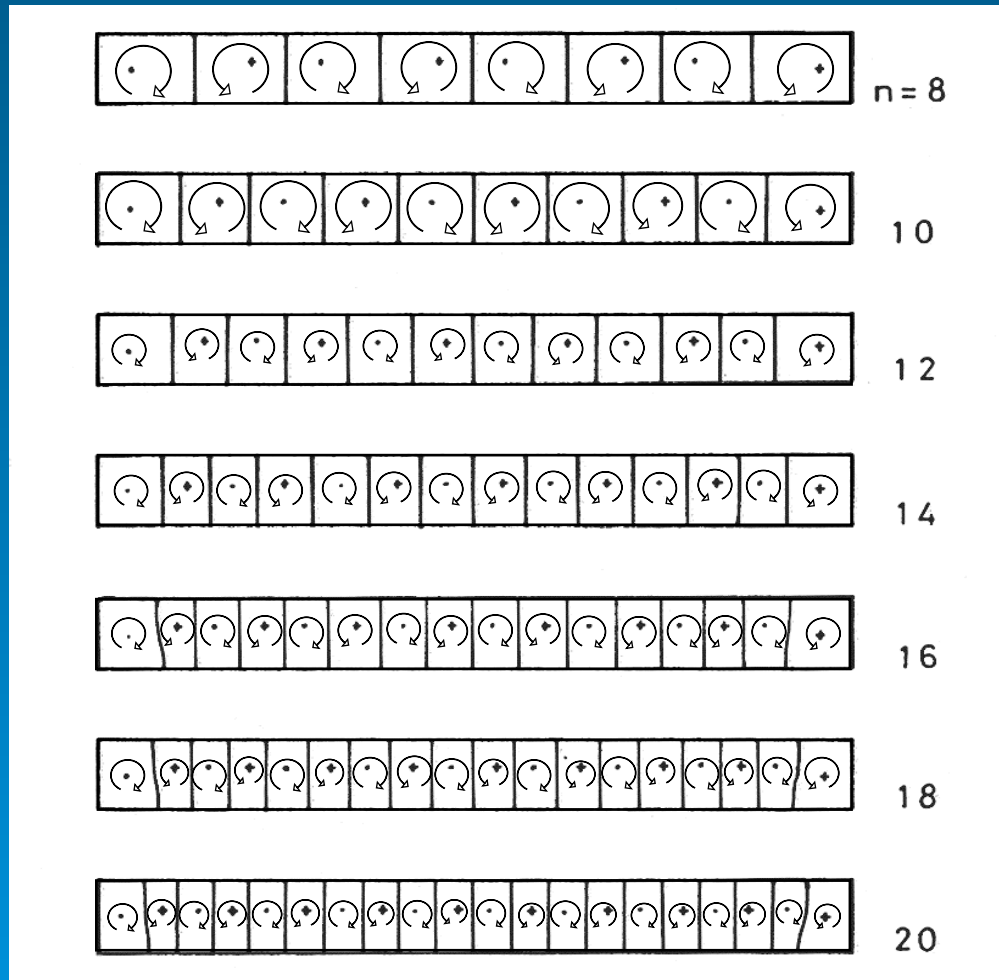
- 同じ電位差で, 初期条件を変えて数値シミュレーション

Numerical simulations under the same electric potential (BC) but with different initial conditions

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

複数の準安定な定常状態

Multiple steady states



同じ境界条件 (電位差)
Same boundary condition (V)

n : 渦の数
number of cells

どの状態が最も安定か？
Which state is the most stable?

境界に擾乱 (電荷のノイズ) を加える数値シミュレーション

Numerical simulations with perturbations at the boundary

擾乱による対流構造の変化

Transitions of convection patterns by perturbations

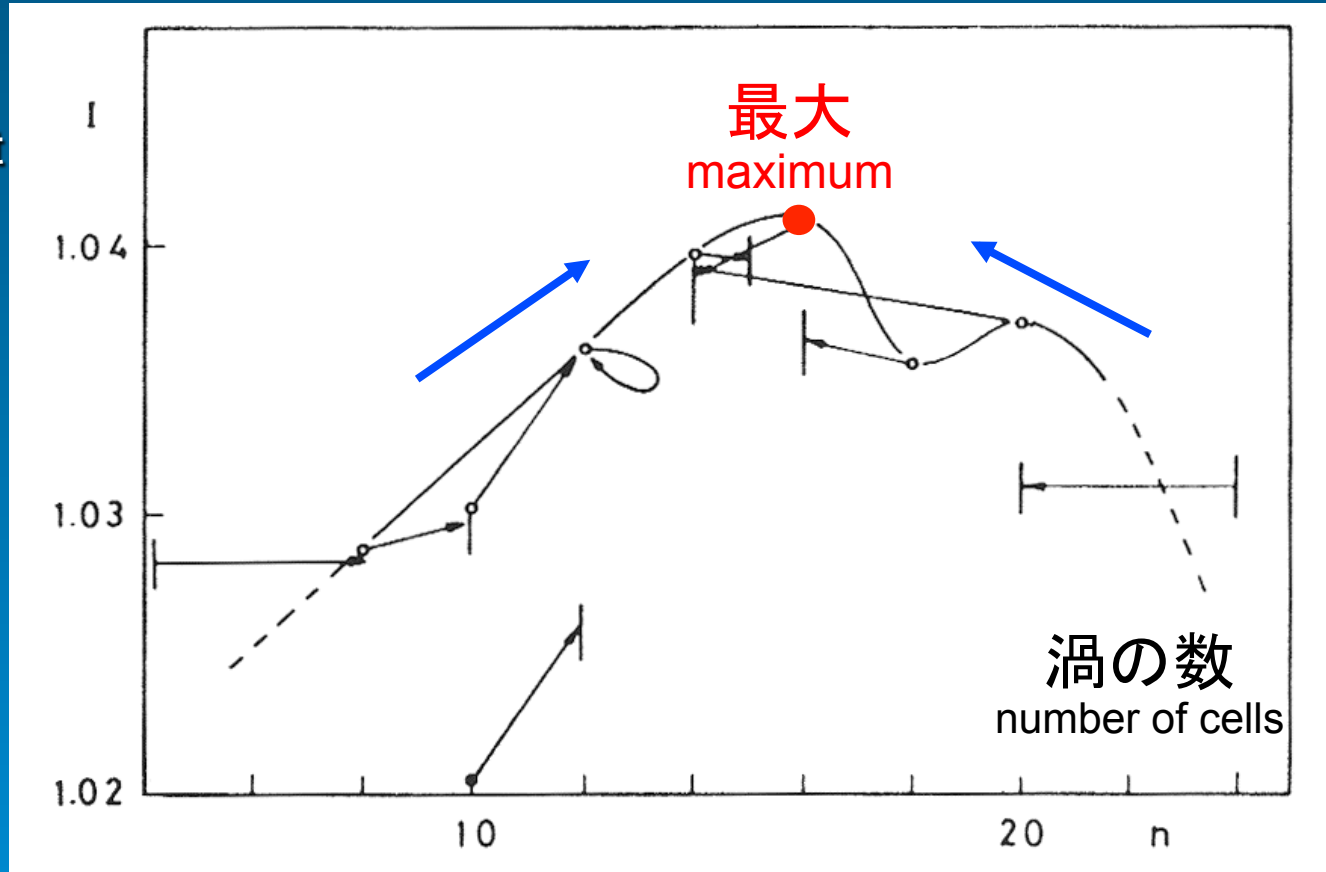
電流
electric current

$$\left[\propto \frac{dS}{dt} \right]$$

エネルギー
散逸率:
energy dissipation:

$$D = \mathbf{V} \times \mathbf{I} \propto I$$

一定
constant



Suzuki and Sawada (1983)



不安定
unstable



安定
stable



不安定
unstable

(エネルギー散逸率最大)
maximum energy dissipation

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

• 流下する粉体流に現れる渦構造

Vortex structure formation in granular flows



「もくもくした」構造

"smoky" structure

Brad White (2000)

[<http://www.avalanche.org/pictures/avalanche3.jpg>]

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

三宅島の噴煙と火砕流 2000年8月29日



千葉達郎さん撮影: <http://www.geo.chs.nihon-u.ac.jp/tchiba/miyake/0829/index.htm>

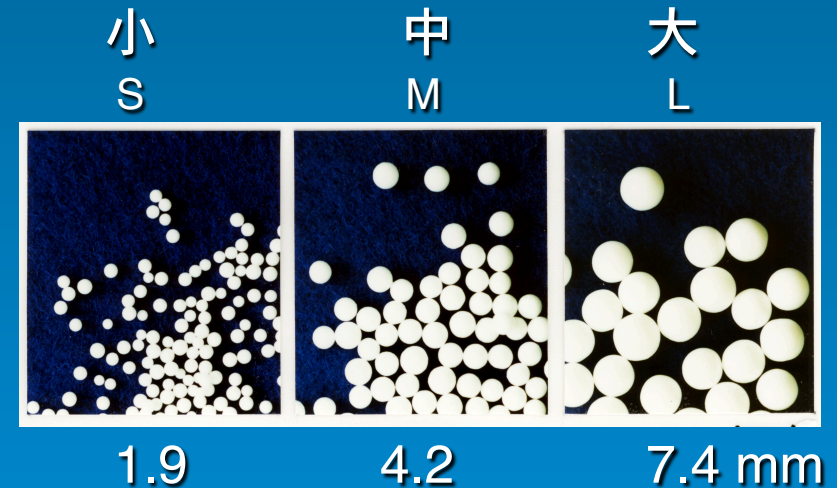
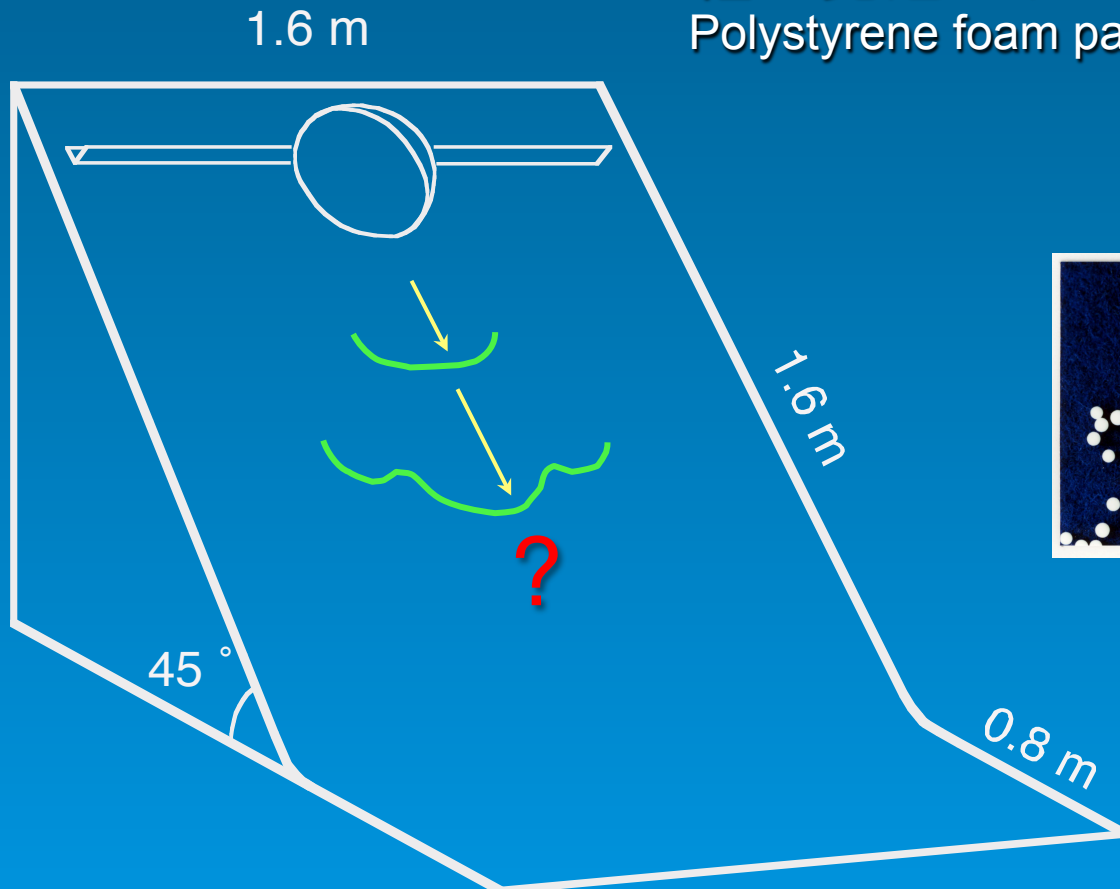
軽い粒子の流下実験

Flow experiments on lightweight granular particles

納口, 小澤 (2009)

Nohguchi, Ozawa

軽い発泡スチロールの粒子 (密度: 0.02 g/cm^3)
Polystyrene foam particles density



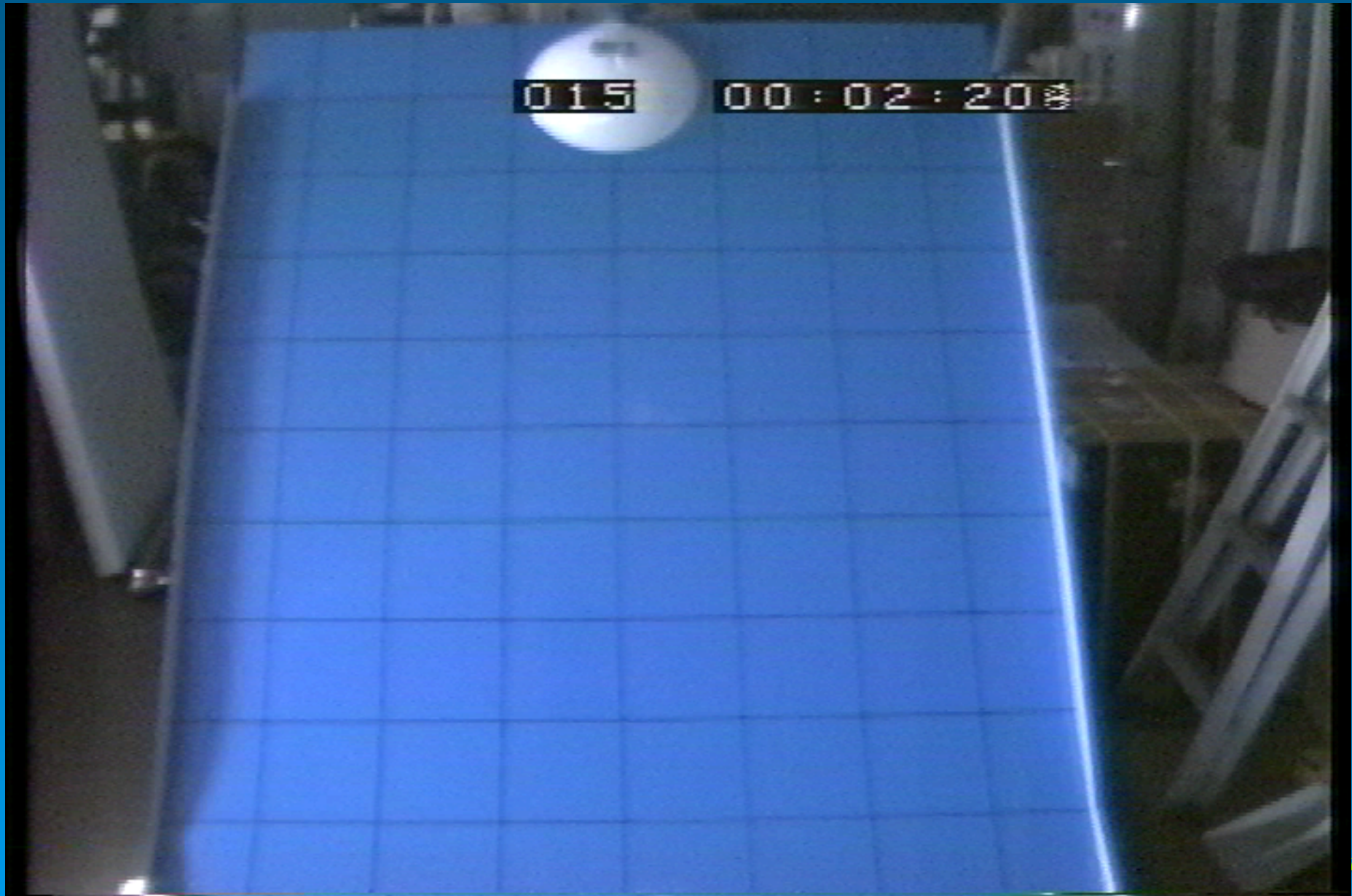
[[Physica D, 34, 20–26, 2009](#)]

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/hozawa/PhysicaD-2009.pdf>

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

流下実験

Flow experiments



粒子集団がつくる構造

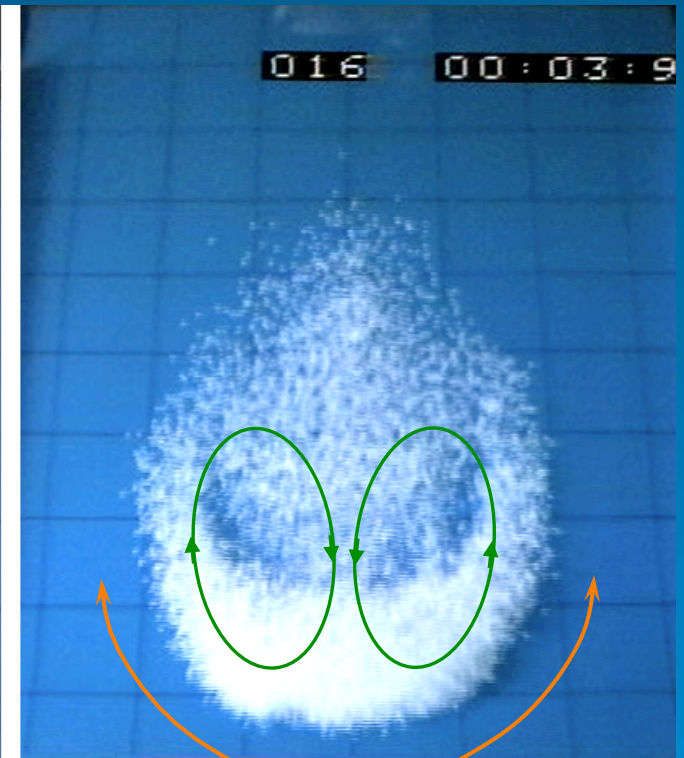
Structure formation in granular flows



小
S



中
M



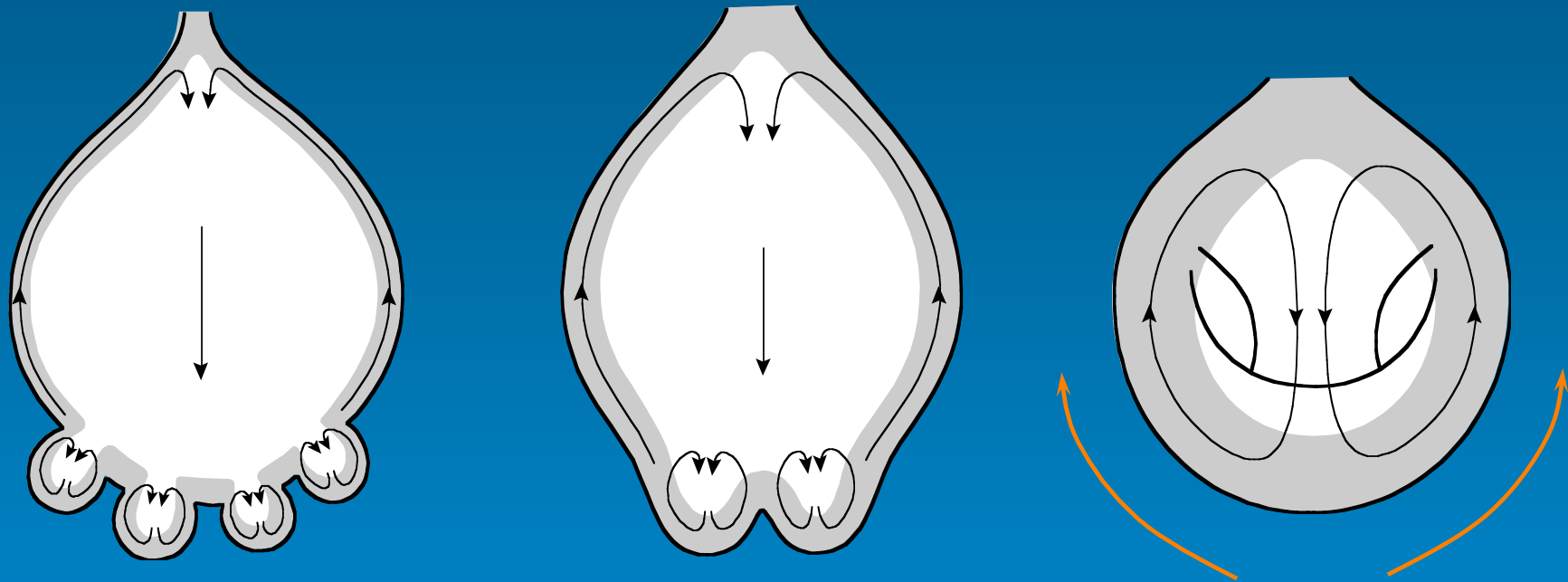
大
L

“双子渦”
twin vortices

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

エネルギー論的解釈

Energetical interpretation



空気抵抗を減らす様な渦運動が発生し、位置エネルギーを効率よく渦運動に変換し熱に散逸させている。

Vortex motion that reduces air drag force emerges, thereby converting potential energy into vortex kinetic energy and dissipating it into heat energy.

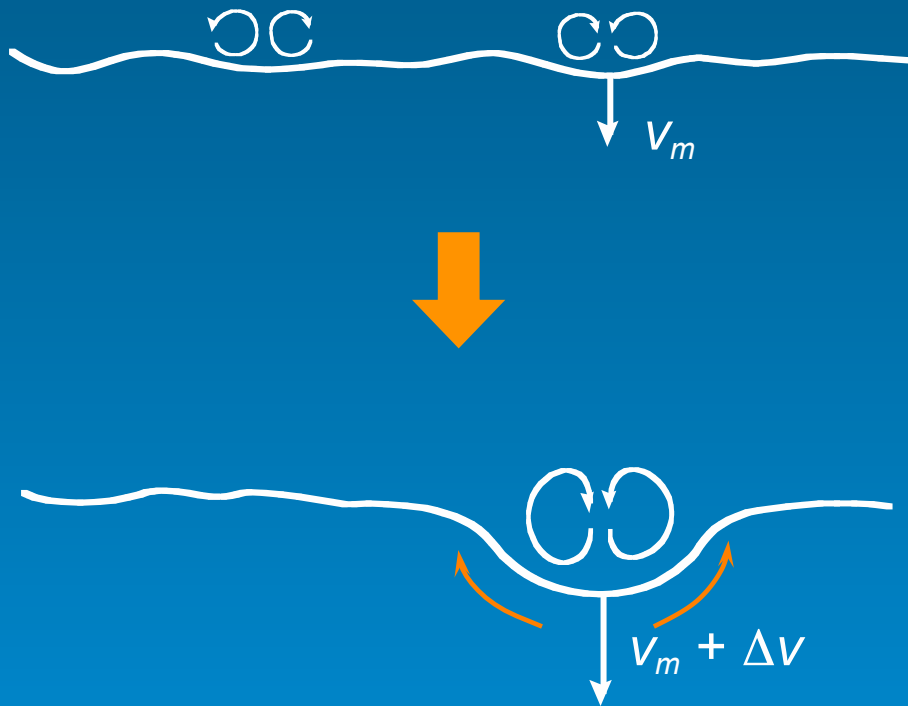
位置エネルギーを自ら「取り込む」様に発達する渦構造

Vortex structure that “extracts” potential energy.

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

双子渦の発達の様子

Formation process of twin vortices



空気抵抗を減らす様な双子渦が発生
Formation of twin vortices that reduces air drag

流下速度が増加
Increase of flow velocity

(位置 → 運動エネルギー)
Potential to kinetic energy

渦運動が加速
Increase of vortex motion

正のフィードバック
positive feedback

エネルギー散逸率: $D \approx$ 位置エネルギーの減少率
Energy dissipation rate

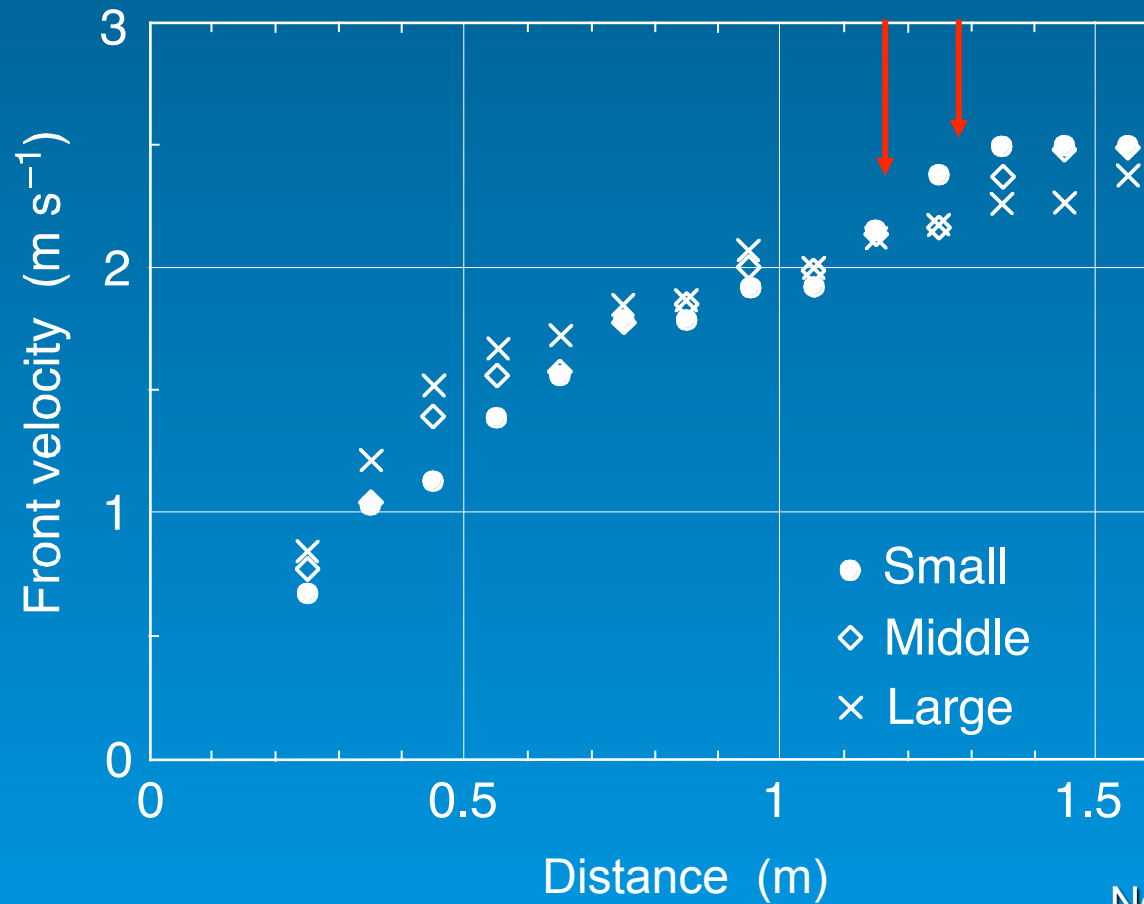
$$\approx \underbrace{Mg \sin \theta}_{} v \propto v$$

一定 constant

流下速度の変化

Evolution of front velocity

双子渦の形成
twin vortex formation

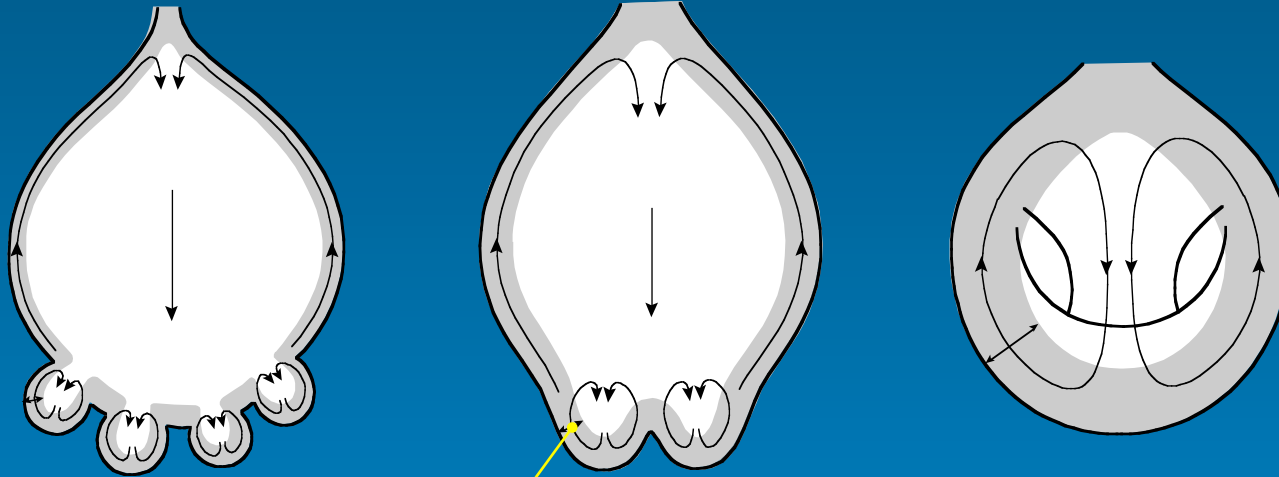


渦構造がエネルギー散逸を加速している
vortex formation enhances energy dissipation

Nohguchi and Ozawa (2009)

渦のサイズ

Vortex size



55万個の
ピンポン球
550,000 table
tennis balls

*McElwaine and Nishimura (2001)

速度境界層の厚さ: δ
velocity boundary layer thickness

空気抵抗力 $\times \delta \approx 1$ 粒子の運動エネルギー
air drag force kinetic energy of a single particle

$$\delta \approx (\rho_p / \rho_{air}) \times \text{粒径}$$

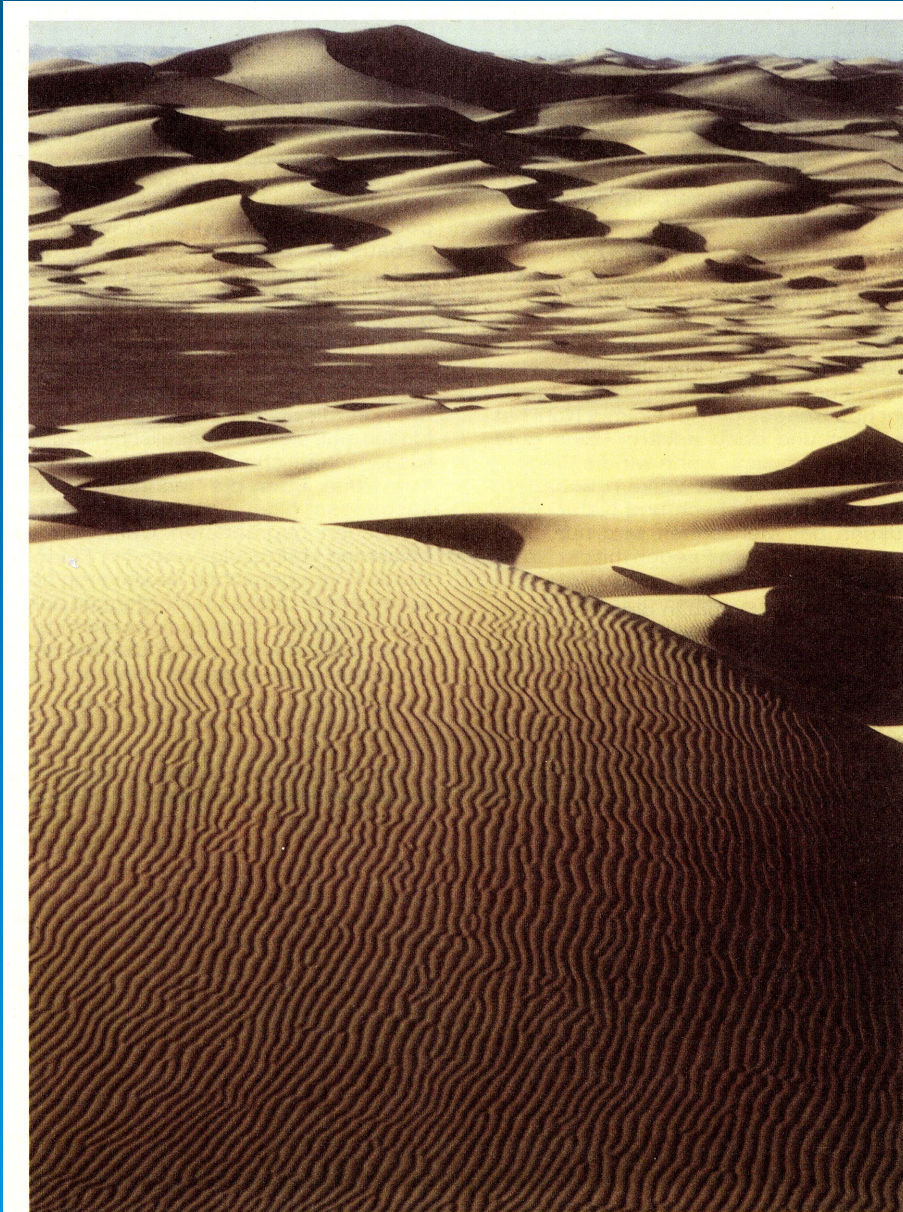
particle diameter

	S	M	L	TTB*
推定値: 2δ (mm)	56	120	220	5100
実験値: r (mm)	49 ± 8	83 ± 10	304 ± 23	5800

Nohguchi and Ozawa (2009)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

• 砂の表面に風によってできる風紋 Sand ripple formation by wind



Weltweit wachsen die Wüsten, und wird fruchtbare Erde unfruchtbar.

地表の風速 (v) がある敷居値を超えると風紋が発達。

$$v \geq v^* \quad (v^* \approx 5 \text{ m/s})$$

風紋 (凸凹) ができると、表面の摩擦抵抗力が増加する。
(風の運動エネルギーを消耗させる構造)

W. Wiedlich (1993)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

エネルギー論的解釈 Energetical interpretation



風紋 (凸凹) の発生

⇒ 地表の摩擦抵抗力が増加

風から地表への仕事率: $W = \text{摩擦抵抗力} \times v$

⇒ 仕事率 (W) が増加

エネルギーを取り込み, 散逸させるように発達する構造

・結晶の樹枝状成長

過冷却状態の水の中での氷の成長。(水温: $-0.1 \sim -0.5 \text{ }^\circ\text{C}$)

過冷却度 ΔT : 小 \Rightarrow 円板状

過冷却度 ΔT : 大 \Rightarrow 凸凹発生

自由エネルギー大: 不安定

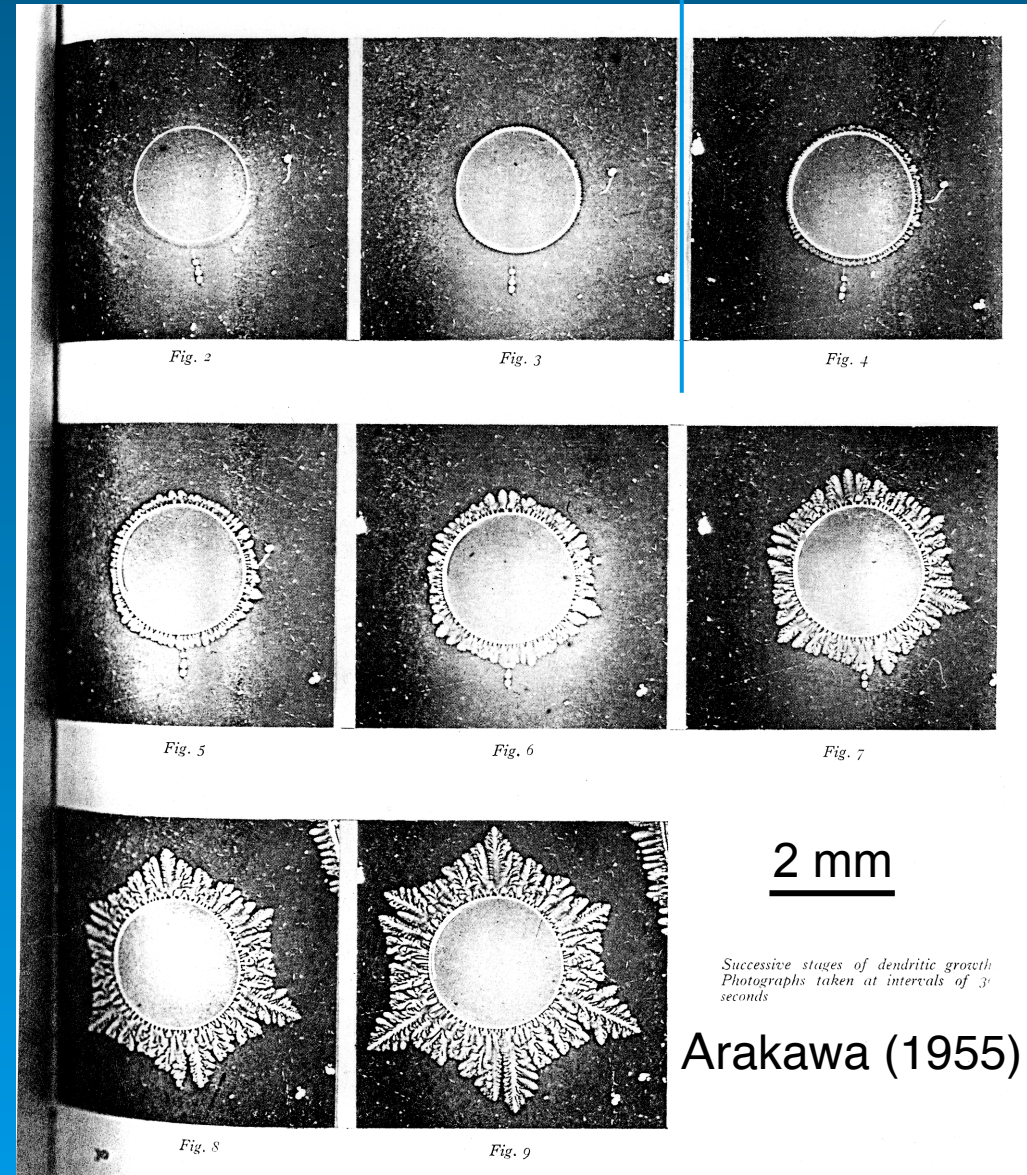


樹枝構造が発生

[凍結による自由エネルギー減少
 \geq 表面エネルギー増加]

Mullins–Sekerka (1963) の条件

円板状の氷 \longleftrightarrow 凸凹発生



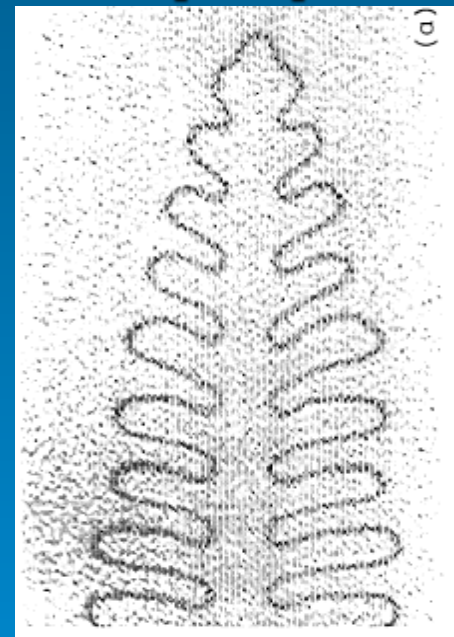
結晶の成長方向の変化

塩化アンモニウム(NH_4Cl)
の過飽和水溶液から結晶を
成長。

過飽和度 (σ) の大きさによ
って、成長方向と形が変化。

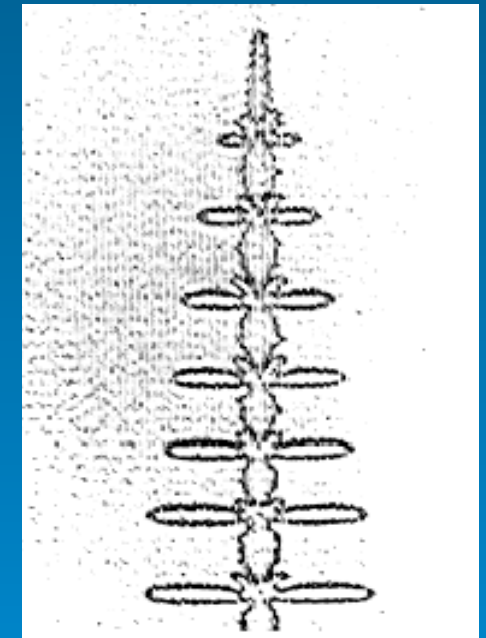
“晶癖変化”

[110]



$\sigma < 0.21$

[111]

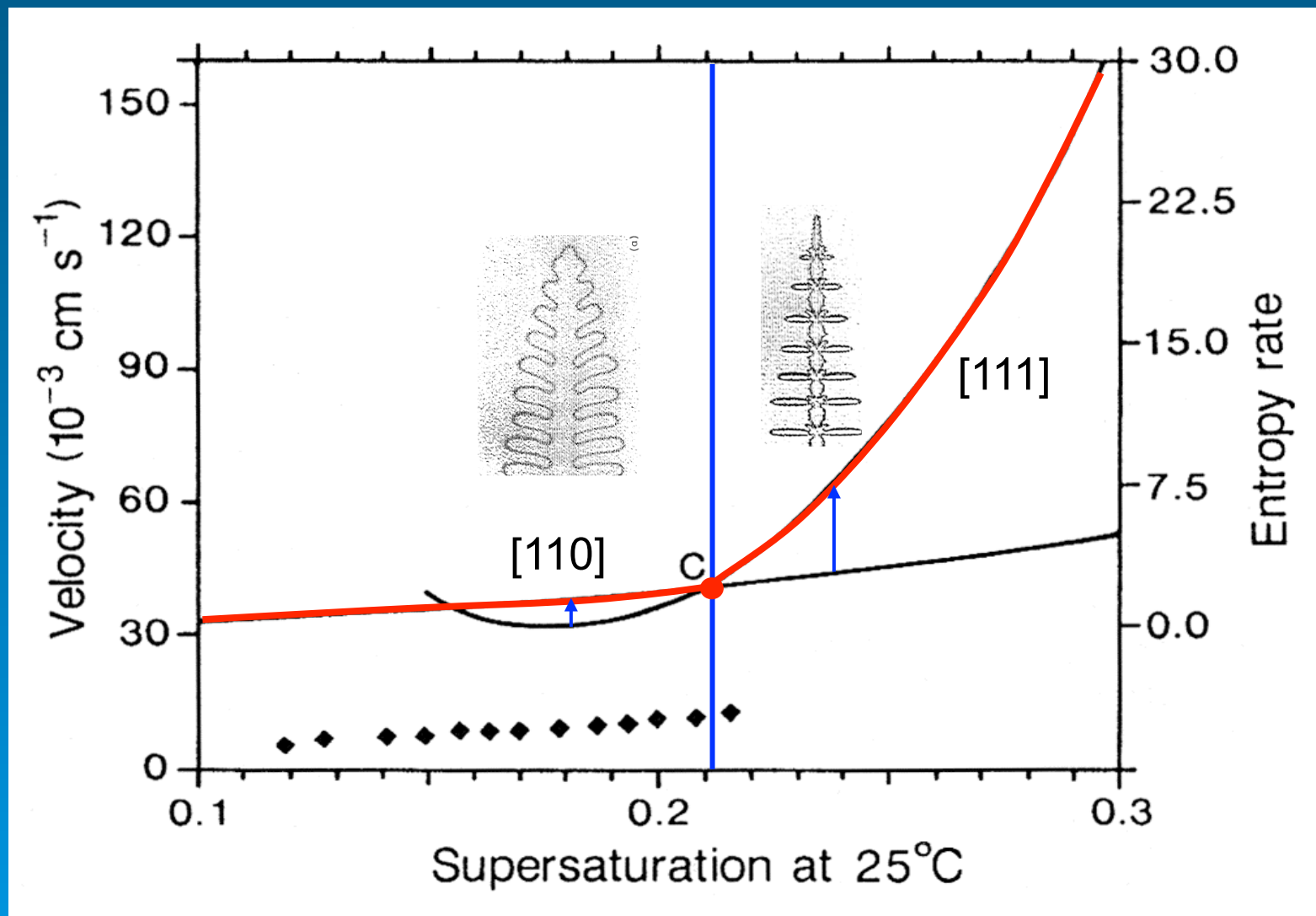


$\sigma > 0.21$

Honjo et al. (1985)

結晶の成長方向の選択

Hill (1990) *Nature* 438, 426.

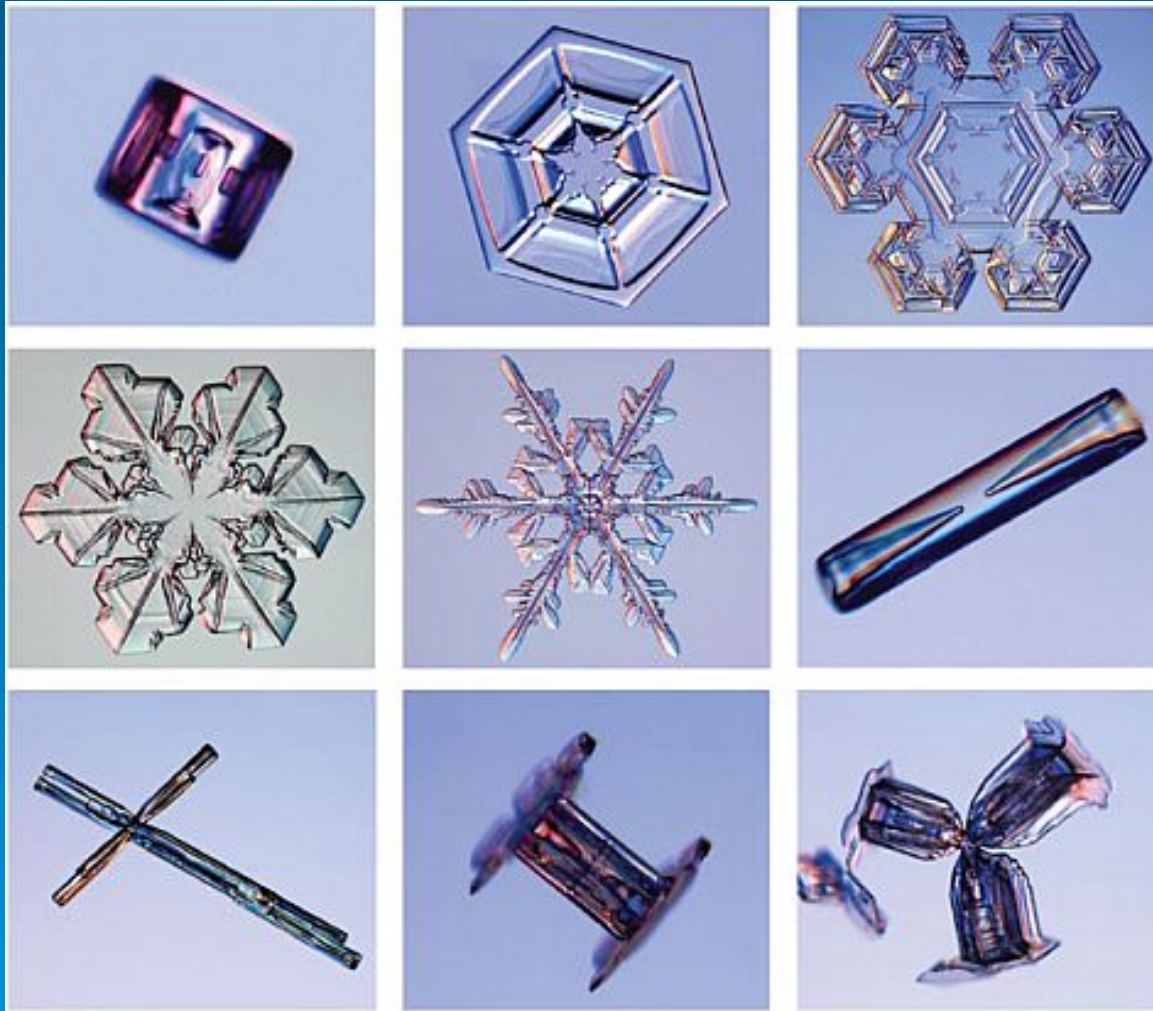


自由エネルギーの減少率

過飽和度 σ

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

雪の結晶 (過飽和状態の水蒸気から成長)



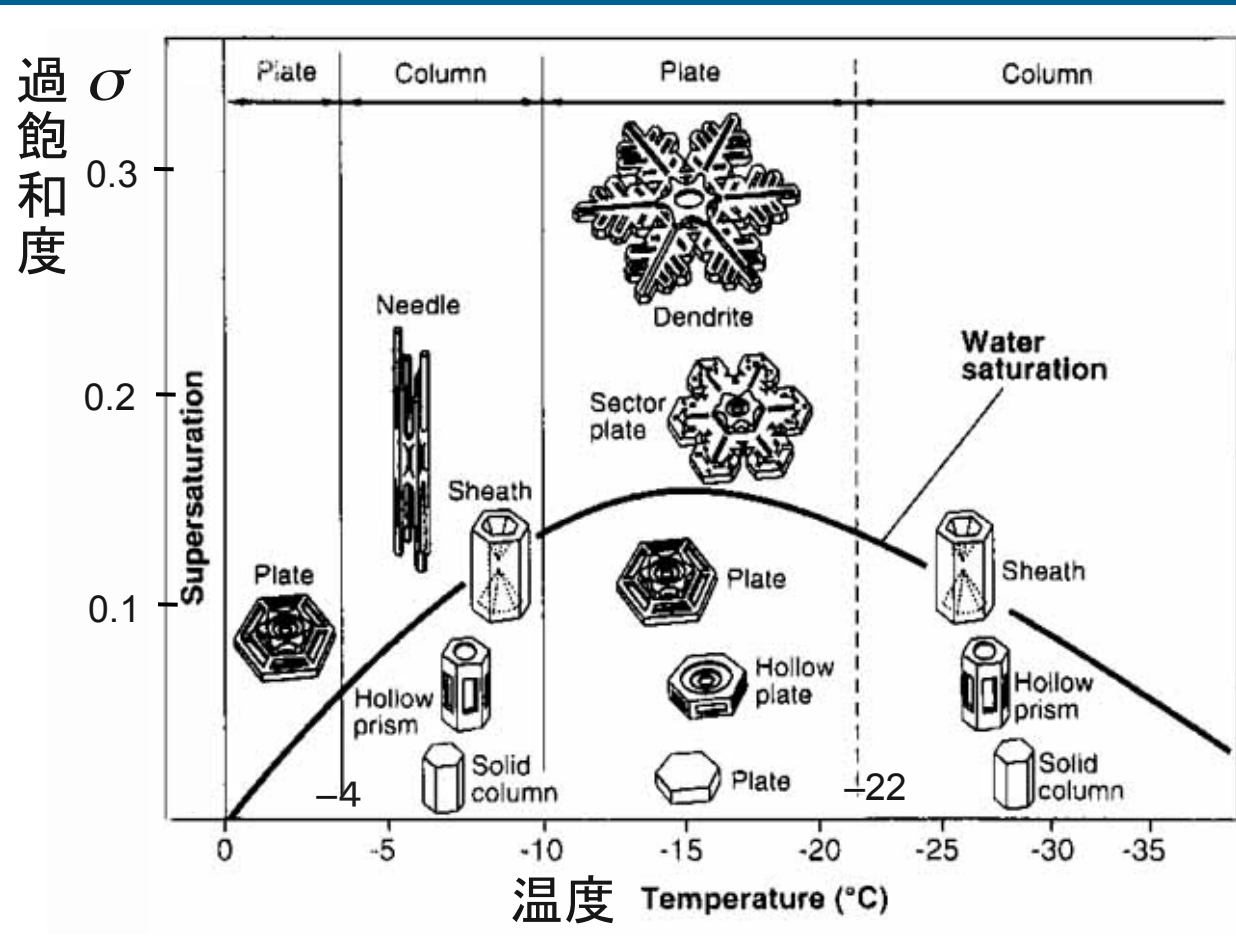
環境の温度や過飽和度に応じて様々な形に変化

(角柱, 角板, 樹枝状, 針, 鼓, ...)

K. G. Libbrecht [<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>]

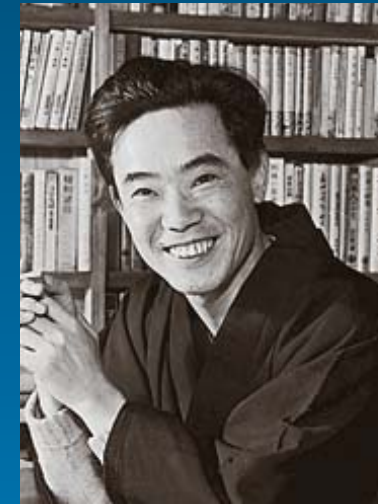
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

雪結晶の形と成長条件：中谷ダイヤグラム



Nakaya et al. (1938), Nakaya (1954)

理論的な説明: Kuroda and Lacmann (1982)



中谷宇吉郎 (1900–62)



V. Tanusheva (CalTech. USA)

樹枝状成長の条件

$$\sigma_s \geq \sigma^*(L) \quad L: \text{結晶サイズ}$$

Yokoyama and Kuroda (1990)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

乾燥割れ目 Dried clacks



Wunderlich (1995)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

氷河のクレバス Glacier crevasses



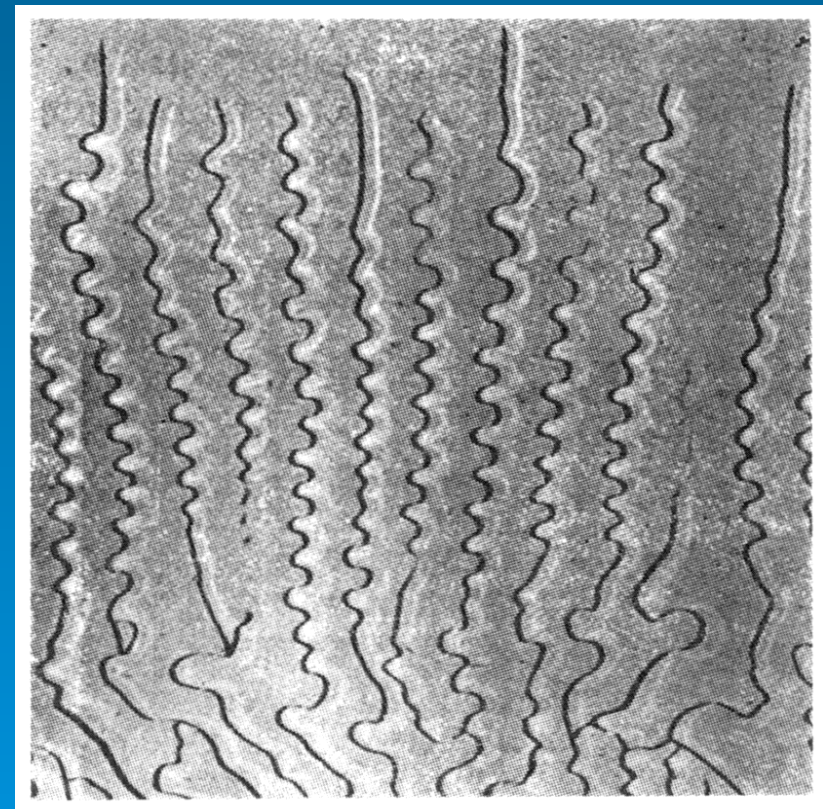
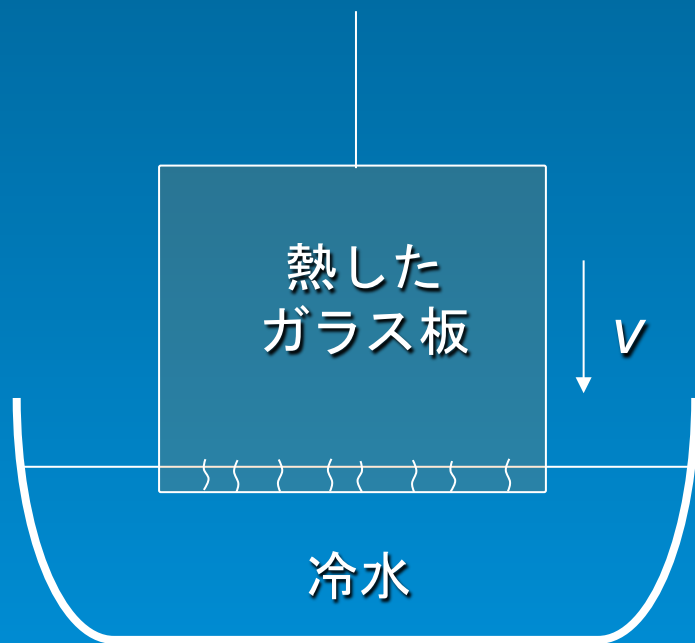
Morteratchgletscher (スイス)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

・ ガラスの割れ目の周期構造

Hirata (1931)

熱したガラス板を水に沈めて急冷すると、周期的に蛇行する割れ目が (ほぼ等間隔) に発生。



- ・ 沈める速度 (冷却率) を変えると、割れ目の間隔や蛇行の波長が変化。

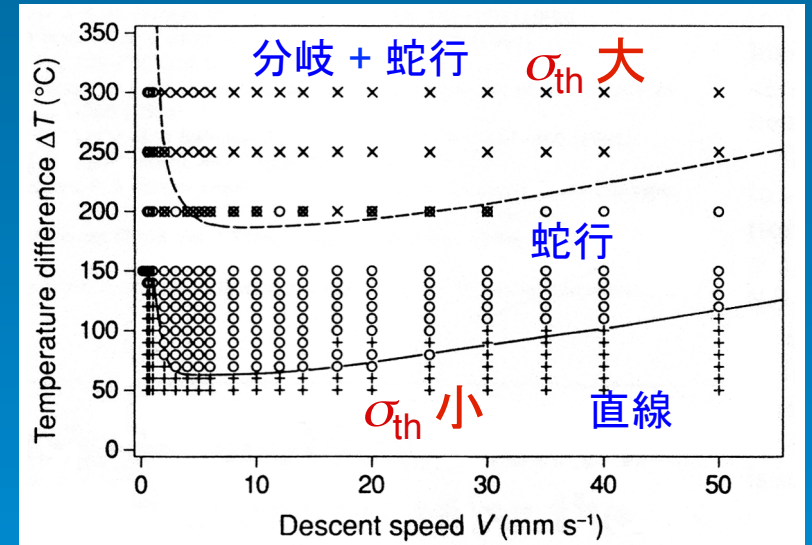
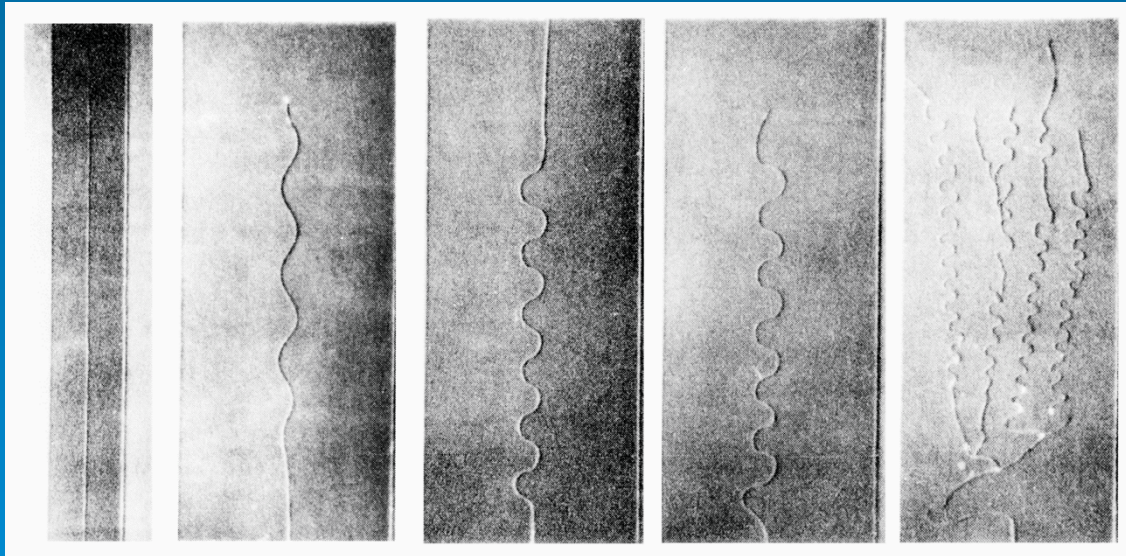
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

詳しい実験

Yuse and Sano (1993) *Nature* 362, 329.

割れ目の先端にかかる熱歪み応力: $\sigma_{th} \propto dT/dz|_{tip} \propto \Delta T, v$

σ_{th} : 小 → 大



直線 → 蛇行 → 分岐 + 蛇行

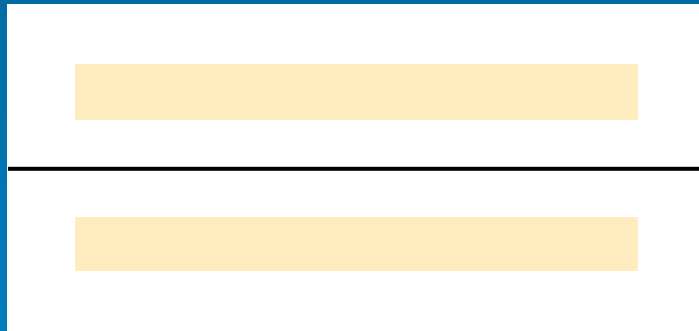
⇒ 歪み解放の有効距離 (δ) が規定?

割れ目の発達 (蛇行や分岐の条件)

エネルギー論的解釈

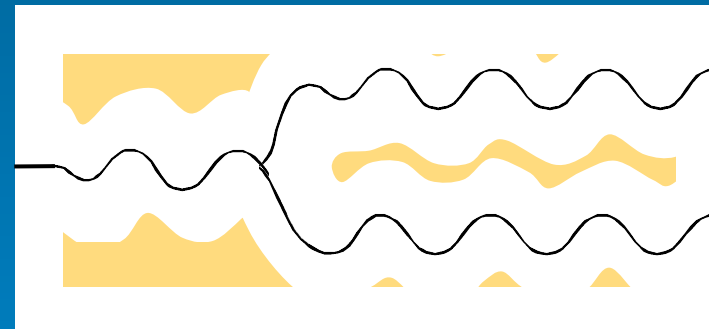
σ_{th} : 熱歪み応力

$$\sigma_{th} < \sigma_{th}^*$$



有効距離: δ

$$\sigma_{th} \geq \sigma_{th}^*$$



2δ ?

割れ目による熱歪みエネルギーの解放量: ΔE_{σ}

割れ目による表面エネルギーの増加量: $\Delta E_{表面}$

- 割れ目の発達条件: $\Delta E_{\sigma} \geq \Delta E_{表面}$?

自動車の窓ガラスの破壊 (等間隔の割れ目の例)

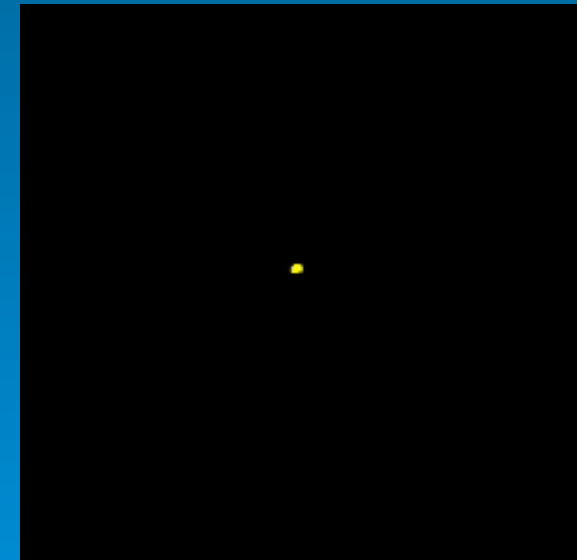
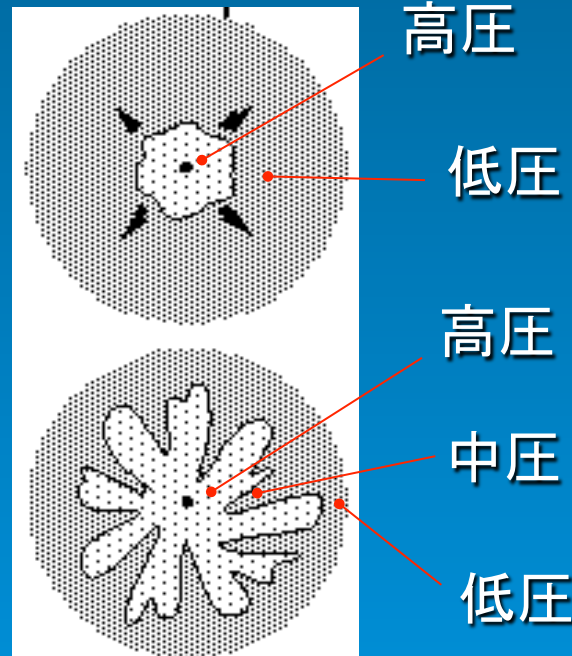
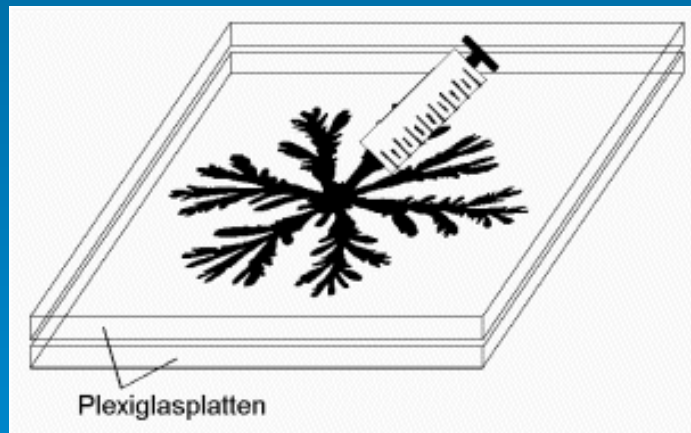


2006年11月

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

• 粘性指 (viscous fingering)

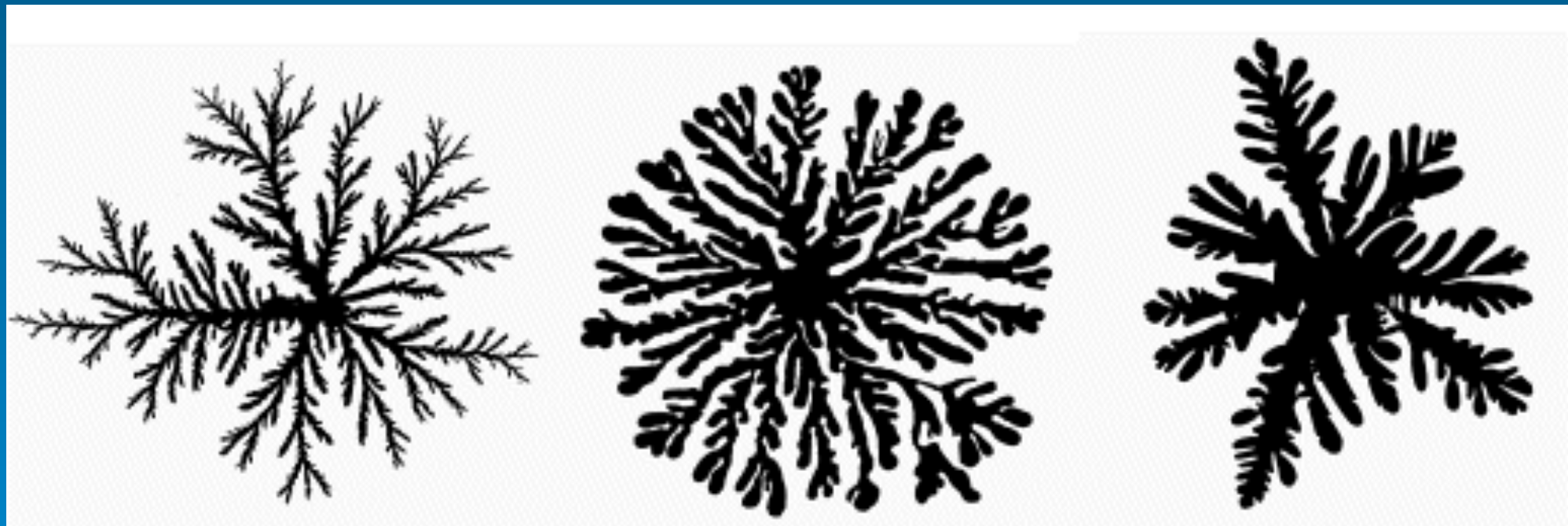
高粘性の流体 (水 or 油) に低粘性の流体 (空気等) を注入した時に、2つの流体の境界面にできる凸凹の形。



Fast and Shelley
(2006)

- 圧力の低い外側に向かって指が伸び出る。

粘性指のかたち



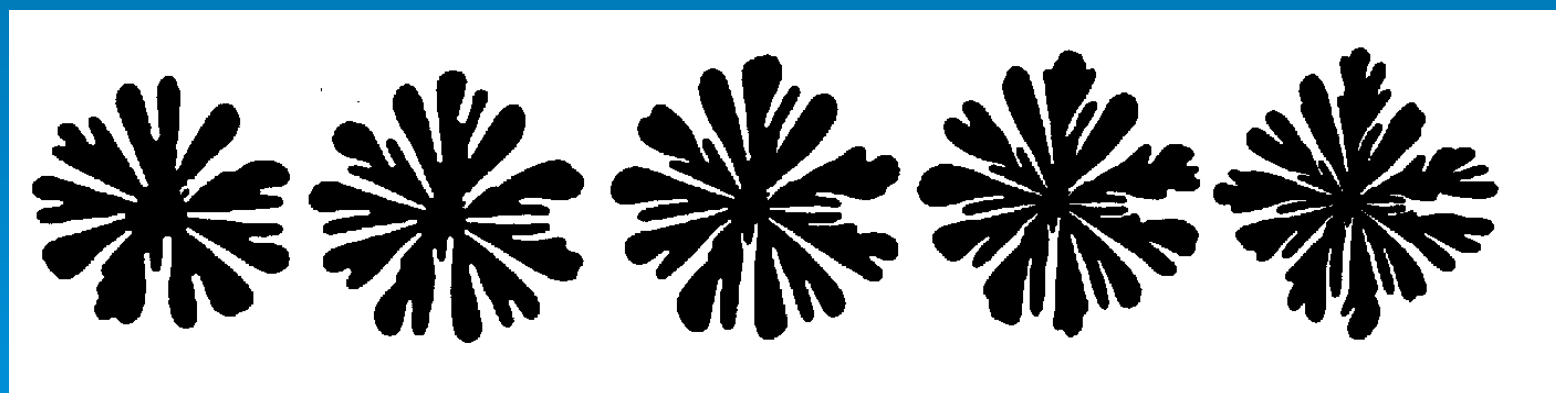
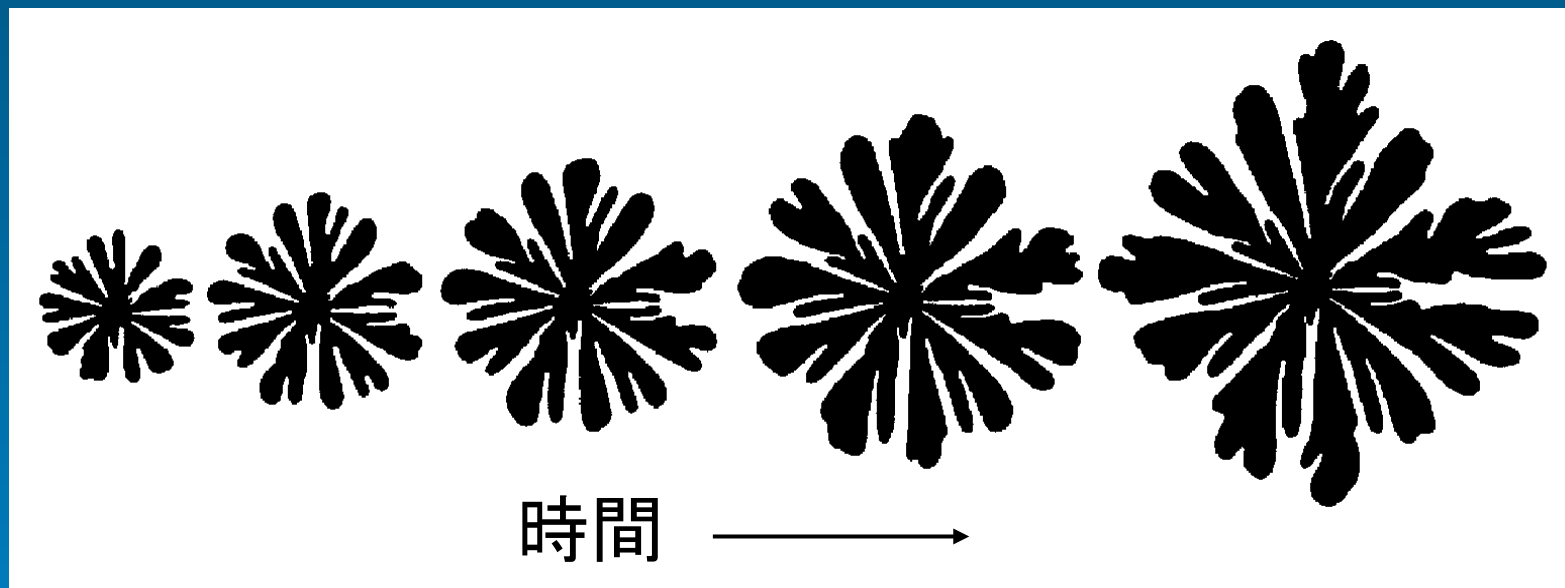
粘性 小

中

大

Nordmeier (1998)

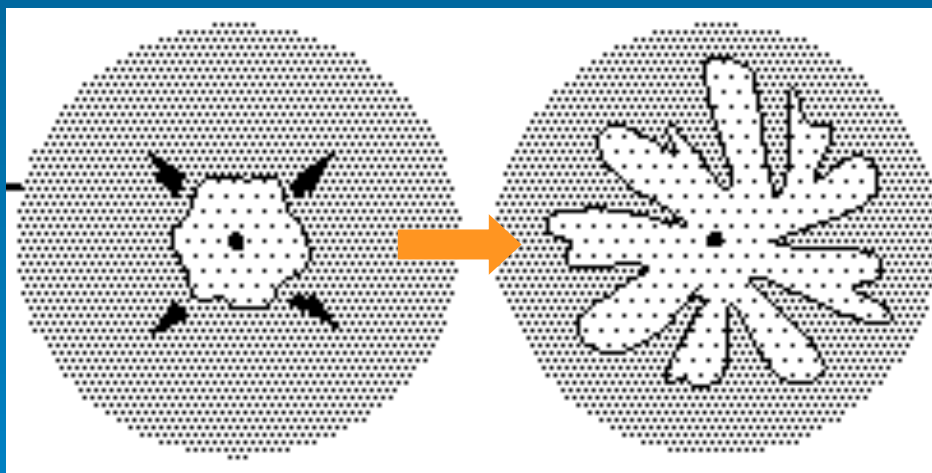
粘性指の成長と形の相似性



自己相似性 (拡大縮小対称性): フラクタル

粘性指のエネルギー論的解釈

流体の押し込みによる仕事率： $W = P \frac{dV}{dt}$



指が伸び出ることによってエネルギーの供給率が増加する。

しかし、表面エネルギーは増加。

指が出る事による仕事率の増加 \geq 表面エネルギーの増加率

線形安定性解析: Martyushev and Birzina (2008)

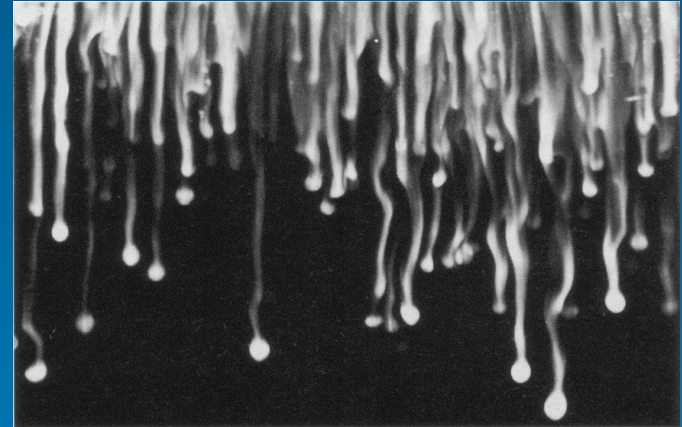
⇒ 指が伸び出る臨界条件は説明できる。

その他の例 Other examples

- 塩の指 (salt fingering)

重い食塩水をできるだけ早く流下させる様なパターンを形成。

Huppert and Turner (1981)



- Lichtenbergの放電図 (絶縁破壊)

絶縁体の表面で、できるだけ早く放電する様なパターンを形成。

Ball (1999)

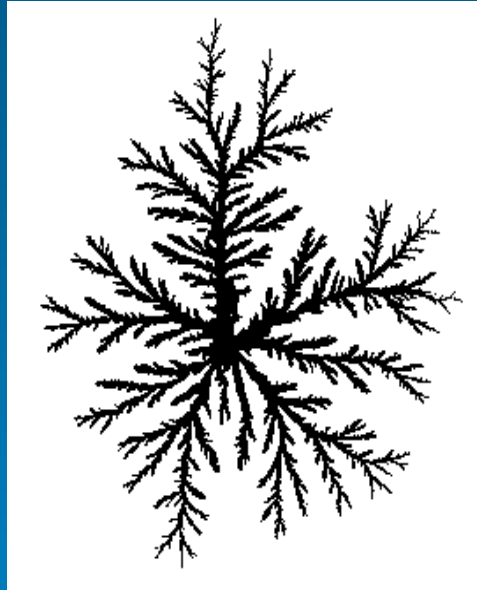


Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

まとめ (Part 2-1) Summary

- 自然界における秩序形成現象の多くは、力学的なエネルギー (or 自由エネルギー) を効率よく取り込み、熱に散逸させるように発達するという考えで、定性的には理解する事ができる。
- しかし、個々の構造の形や長さ (“間隔”) を決めている要因は、まだ良くわかっていない。
⇒ 「形」自身の問題 (フラクタル性?)

2-2. フラクタルと散逸構造 Fractal and dissipative structures



Clouds are not spheres,
mountains are not cones,
coastlines are not circles,
and bark is not smooth,
nor does lightning travel in
a straight line.

Mandelbrot (1982)



Benoît Mandelbrot
(1924–2010)

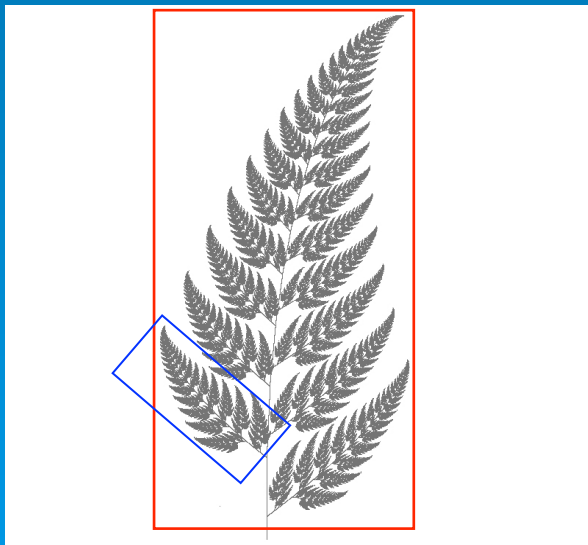
自然の形は, Euclid 幾何学的ではない。

この自然の形を表現する良い方法はないか？

⇒ Mandelbrot の「**フラクタル幾何学**」

自然の中の対称性 (秩序)

- 回転対称性 (点対称性) — 雪の六角対称性
- 鏡映対称性 (左右対称性) — 人, 魚, 飛行機, ...
- 並進対称性 (周期性) — 結晶配列, ベナールの熱対流
- 拡大 (縮小) 対称性 (自己相似性): フラクタル (fractal)

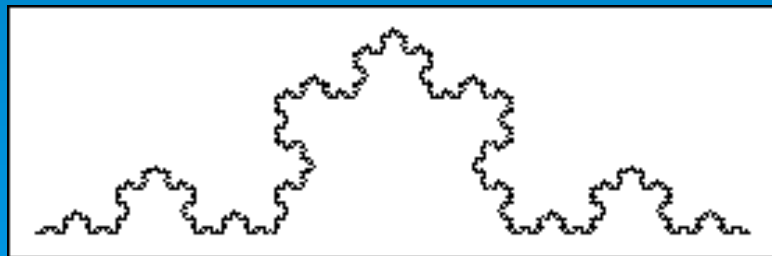
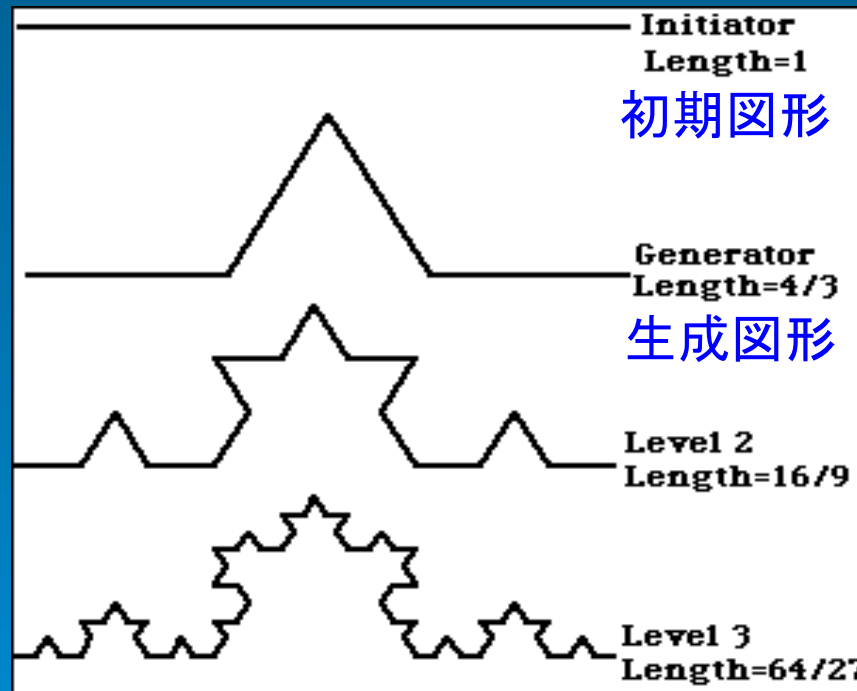


小さい部分を拡大すると, 全体と一致する。

全体を縮小すると, 全体を構成する全ての小さい部分と一致する。

フラクタルの例 1

• Kochの (奇妙な) 曲線



基本操作 (3等分して中央に山をつくる)

1回 長さ: $L_1 = 4/3$

2回 $L_2 = (4/3)^2$

3回 $L_3 = (4/3)^3$

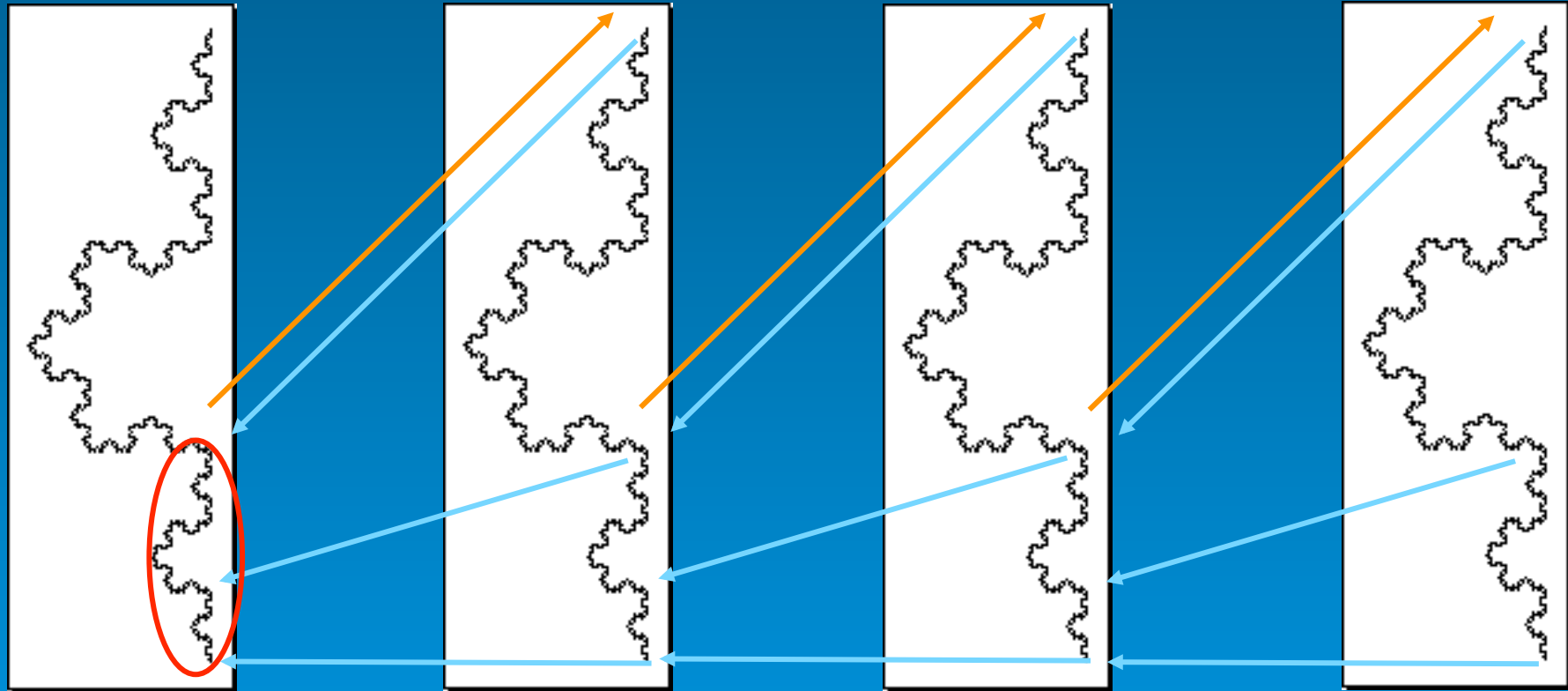
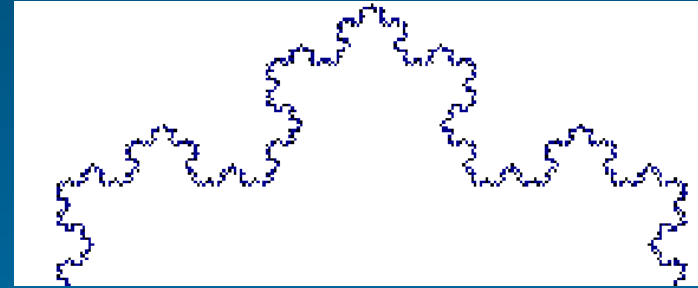
...

n 回 $L_n = (4/3)^n$

無限回: $n \rightarrow \infty$ $L_n \rightarrow \infty$

自己相似の意味

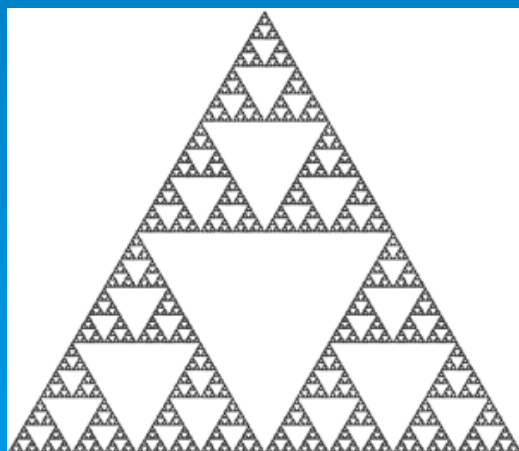
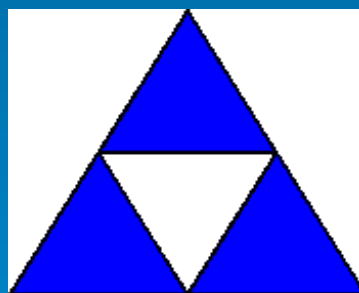
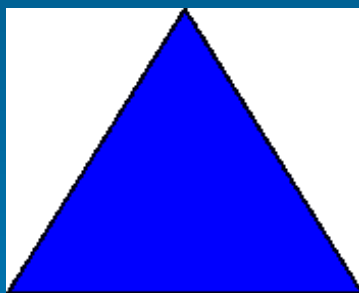
部分に全体が埋め込まれている。



拡大 (縮小) 対称性

フラクタルの例 2

- Sierpinskiのガスケット



基本操作 (各辺の中点を結び, 真ん中の3角を取り除く)

1回

...

n 回

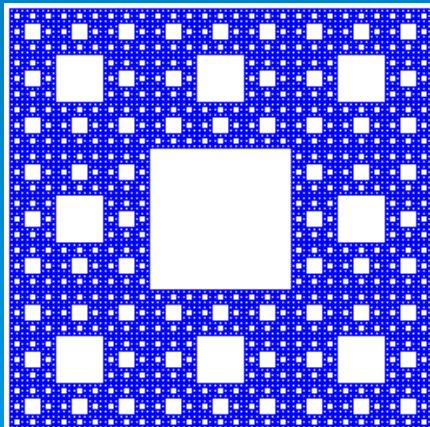
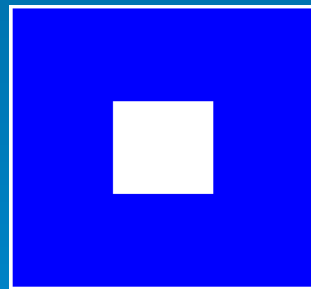
無限回: $n \rightarrow \infty$

面積: $A_n = (3/4)^n$

$A_n \rightarrow 0$

フラクタルの例 3

- Sierpinskiのカーペット



基本操作 (4角形を9等分し, 真ん中の4角を取り除く)

1回

...

n 回

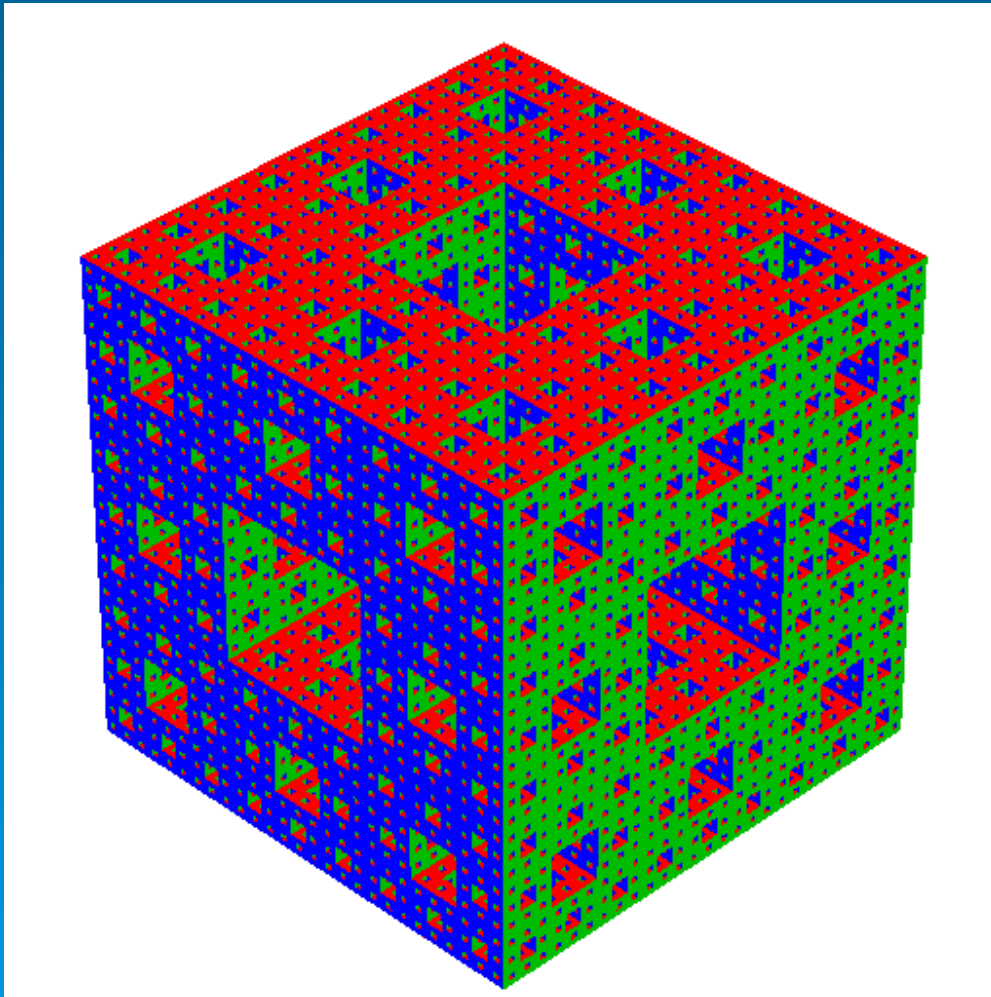
$$\text{面積: } A_n = (8/9)^n$$

無限回: $n \rightarrow \infty$

$$A_n \rightarrow 0$$

フラクタルの例 4

- Sierpinski (Menger) のスポンジ



基本操作は？

立方体を 27 等分して、各面のまん中の立方体を取り除く。

体積は？ $V_n = (21/27)^n$

$n \rightarrow \infty$ $V_n \rightarrow 0$

表面積は？ $A_n = ?$

• フラクタル次元: 形の複雑さ (“重複度”)

次元とは? 基準の長さを X 倍した時の形の変化度

点: 0 次元 点 $\propto X^0 = 1$ (一定)

線: 1 次元 長さ $\propto X^1 = X$

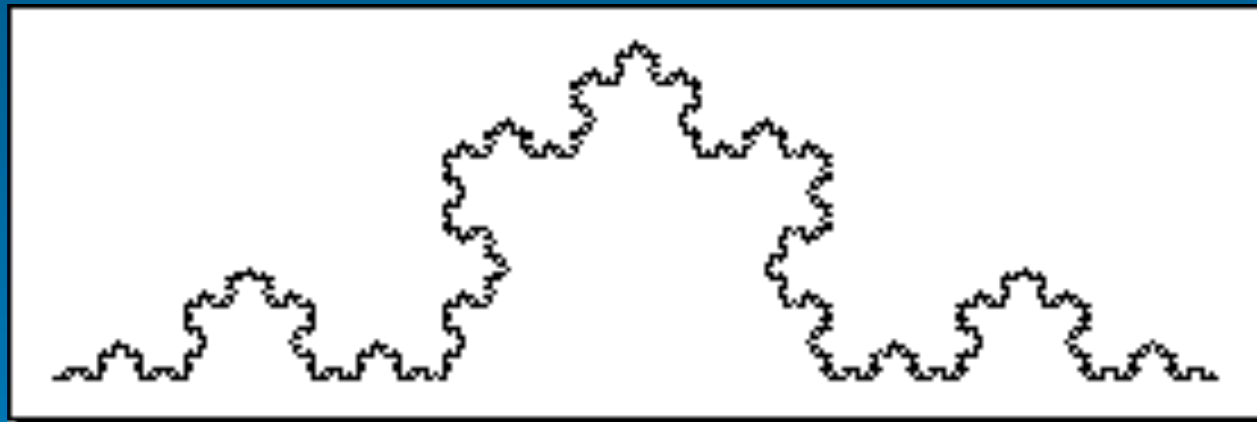
面: 2 次元 面積 $\propto X^2$

立体: 3 次元 体積 $\propto X^3$

一般の形: d 次元 形の変化率 $= X^d$

⇒ 基準の長さを X 倍した時に, それに対応する形の変化率が X^d になる時, その形のフラクタル次元は d 。

Kochの曲線のフラクタル次元



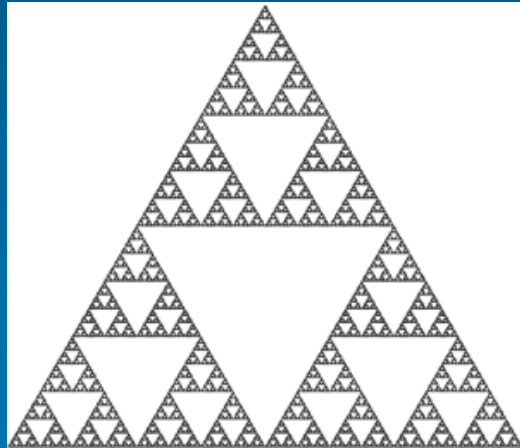
基準の長さを3倍にした時, Kochの曲線の長さは4倍になる。

$$\underbrace{4}_{\text{形の変化率}} = \underbrace{3^d}_{\text{基準の長さの倍率}} \quad d = (\log 4)/(\log 3) \approx 1.262 \dots$$

形の変化率 基準の長さの倍率

⇒ 直線の次元より大きく, 面の次元より小さい。

Sierpinskiのガスケットのフラクタル次元



基準の長さを2倍にした時にSierpinskiのガスケットの「面積」は3倍になる。

$$3 = 2^d$$

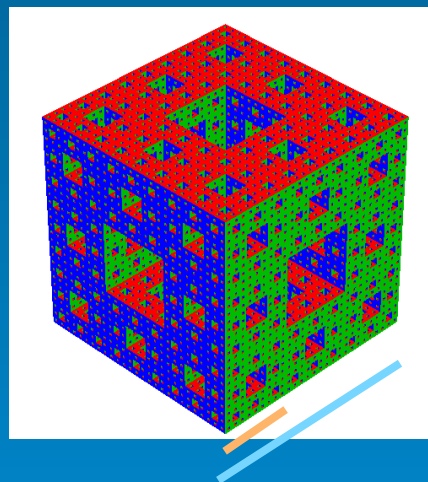
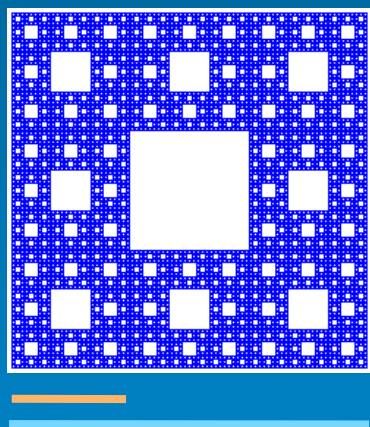
$$d = (\log 3)/(\log 2) \approx 1.585 \dots$$

形の変化率 基準の長さの倍率

⇒ Kochの曲線の次元より大きい、面の次元より小さい。

小課題

- Sierpinskiのカーペットとスポンジのフラクタル次元を求めてください。



- 自然の中にフラクタル的な形を探し出し、その特徴（どの部分がフラクタル的か）を説明してください。



忍石 (河原さん, 2022年)

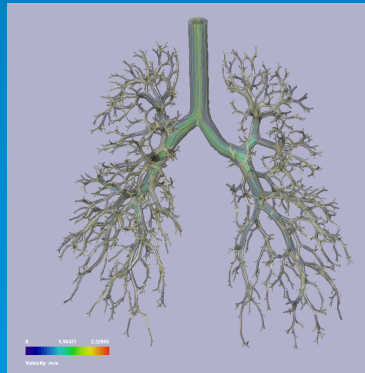
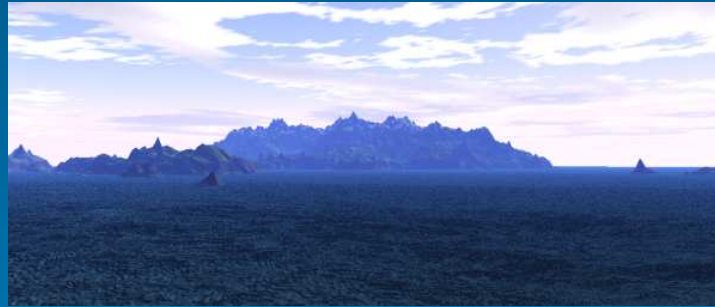


シダの葉 (濱田さん, 2022年)

自然界の散逸構造とフラクタル次元

- 海岸線の形
- 川の流路
- 雲の輪郭
- 粘性指

...



海岸線のフラクタル



Mandelbrot (1967) *Science* 156, 636.

「イギリスの海岸線の長さは何の位か？」

Richardson (1961)

⇒ 長さは定義できない。
細かく見る程長くなる。
フラクタル的 (fractal-like)

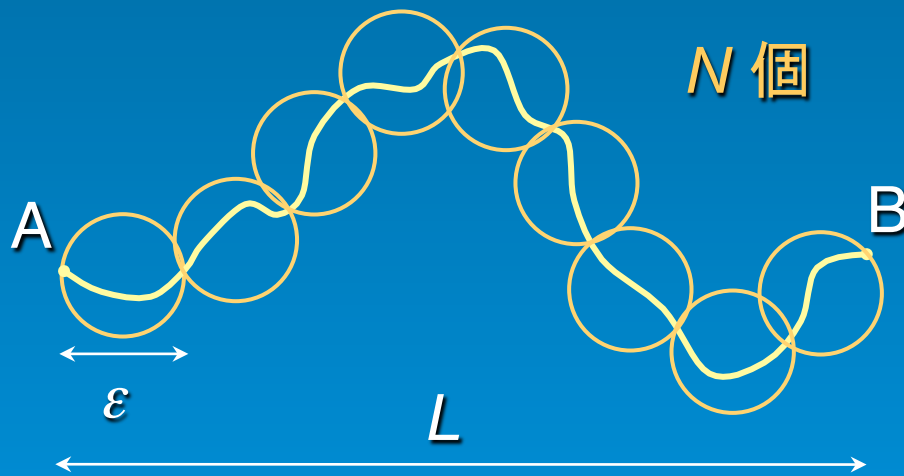
- 海岸線のフラクタル次元を求める方法を考える。

海岸線のフラクタル次元の求め方 (カバー法)

基準の長さのスケールを X 倍した時に, 対応する形の変化率が X^d になる時, その形の次元は d 。

$$\text{形の変化率} = X^d$$

例) 海岸線



直線距離 L の海岸線を直径 ε の小円で覆うと, N 個の円が必要な場合。

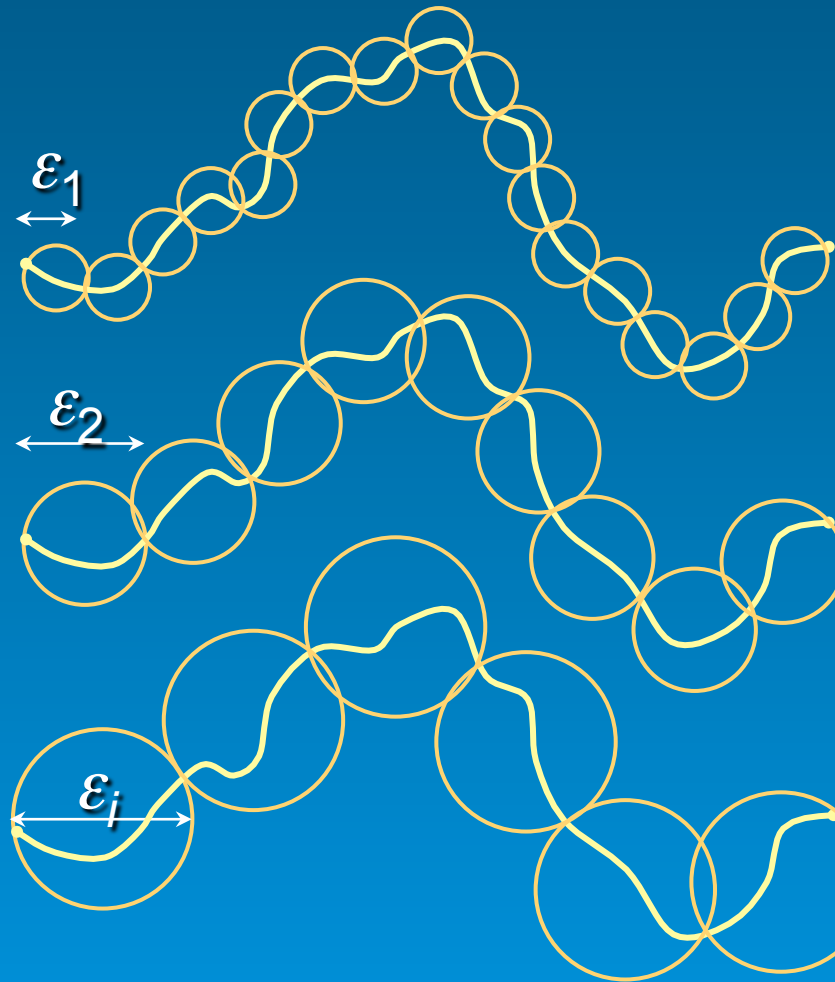
基準の長さ: $\varepsilon \rightarrow L$ ($X = L/\varepsilon$)

海岸線の変化率: N

$$N = (L/\varepsilon)^d$$

$d = (\log N)/(\log L/\varepsilon)$: ε のスケールでのフラクタル次元

小円の直径を変化させる: $\varepsilon = \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j$



N_1 個 $N_1 = (L/\varepsilon_1)^{d_1}$

N_2 個 $N_2 = (L/\varepsilon_2)^{d_2}$

N_i 個 $N_i = (L/\varepsilon_i)^{d_i}$

もし、指数 d_i が、 ε_i の広い範囲 ($\varepsilon_k \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_l$) で一定なら、その形 (海岸線) は、その範囲でフラクタル的である。

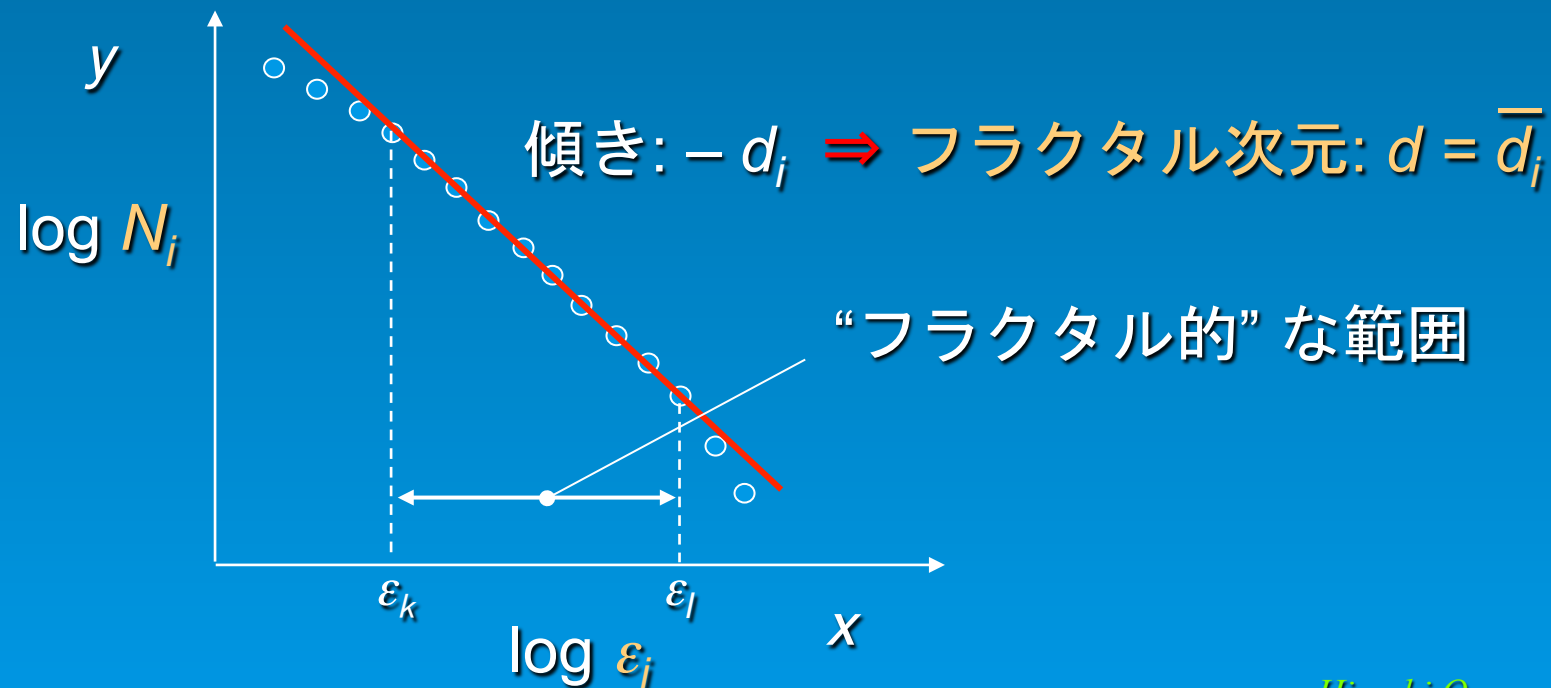
指数 d_i とその平均値を求める方法:

$N_i = (L/\varepsilon_i)^{d_i}$ の両辺の対数をとる

$$\underbrace{\log N_i}_{\text{縦軸: } y} = -d_i \underbrace{\log \varepsilon_i}_{\text{横軸: } x} + \underbrace{d_i \log L}_{\text{傾き } y\text{切片}}$$

$$(y = ax + b)$$

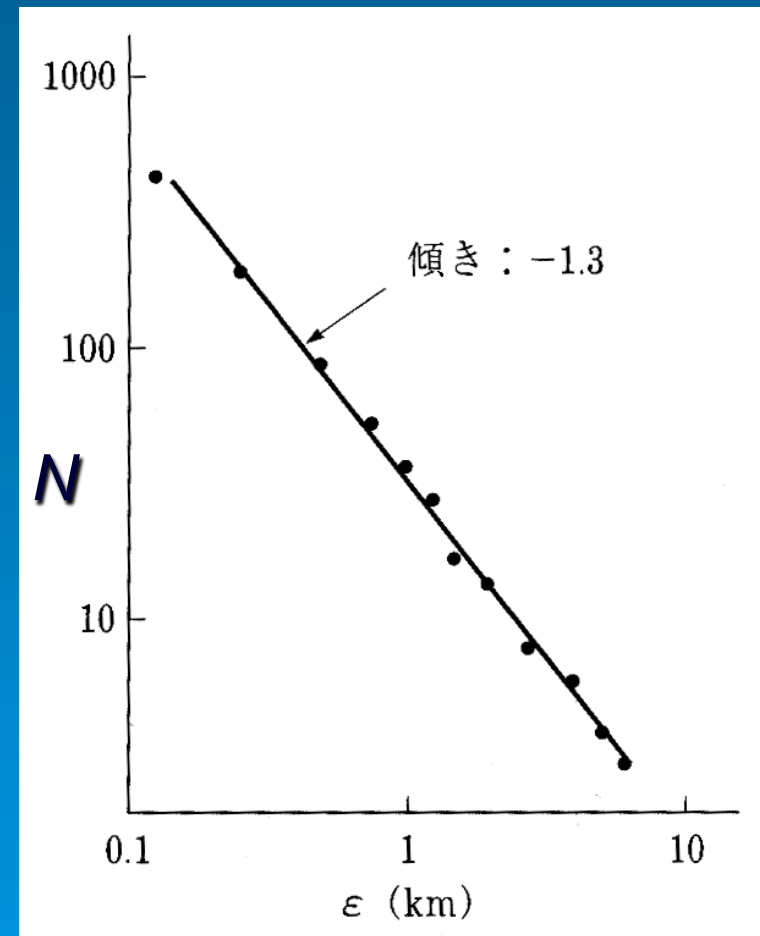
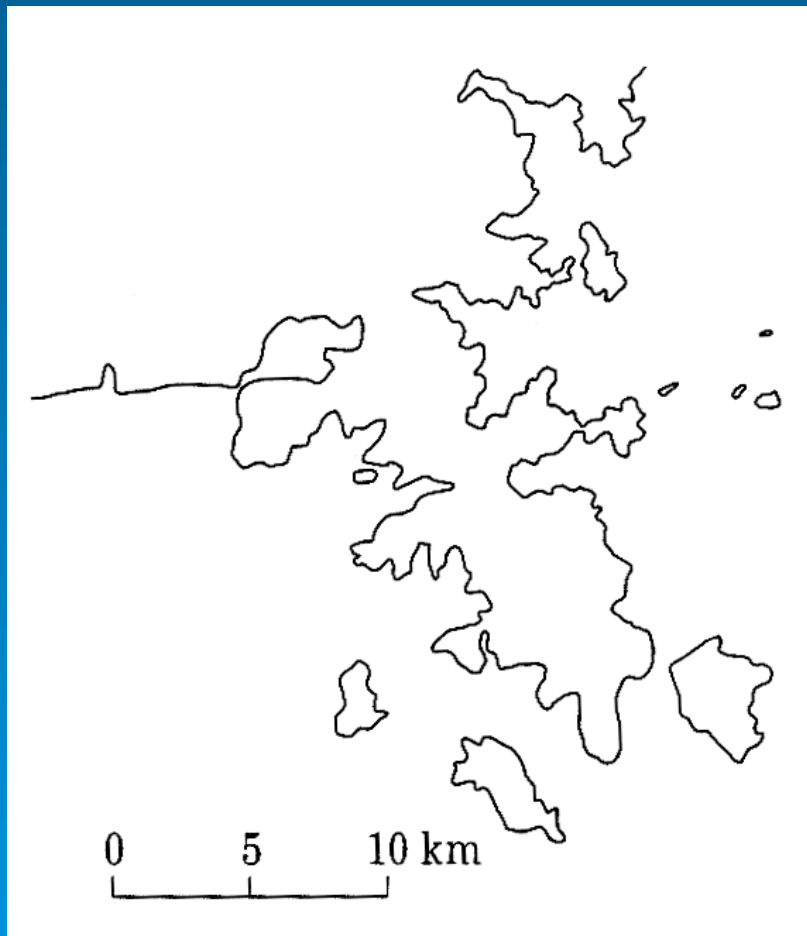
傾き y 切片



海岸線のフラクタル次元 1

宮城県牡鹿半島

$d \approx 1.3$

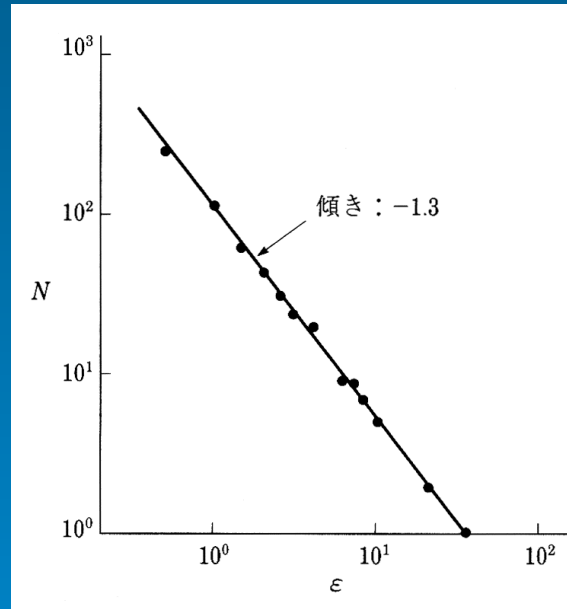
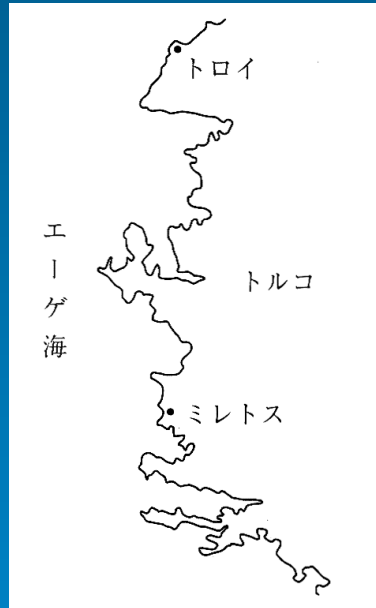


松下 (2002)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

海岸線のフラクタル次元 2

エーゲ海沿岸



$$d \approx 1.3$$

松下 (2002)

リアス式海岸

≈ 1.3

フィヨルド海岸

≈ 1.5

一般の砂浜

≈ 1.0~1.2

d の大きい海岸線は、河川や氷河の浸食作用の反映？

川の流路は？

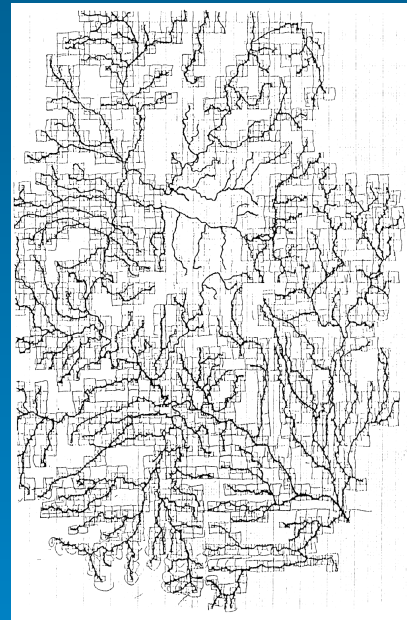
川の流路のフラクタル次元

四万十川



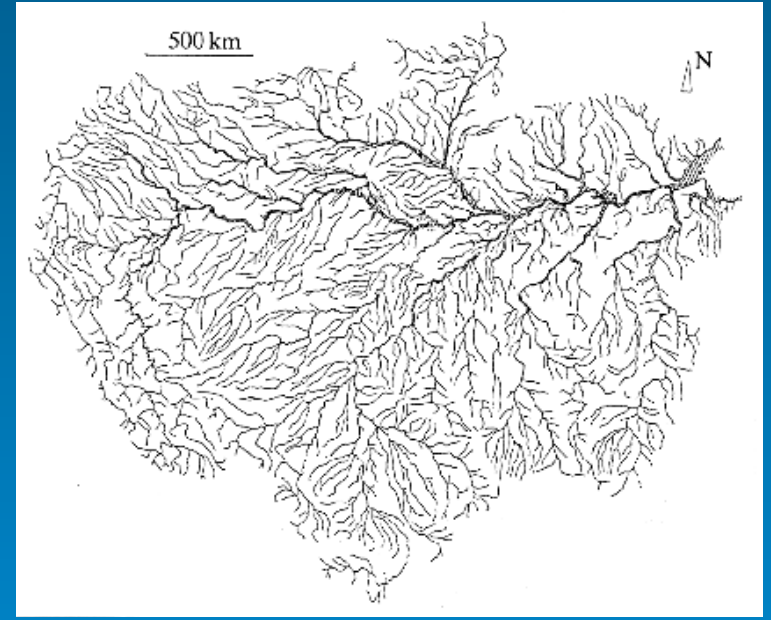
$$d \approx 1.26 \sim 1.38$$

最上川



$$d \approx 1.22$$

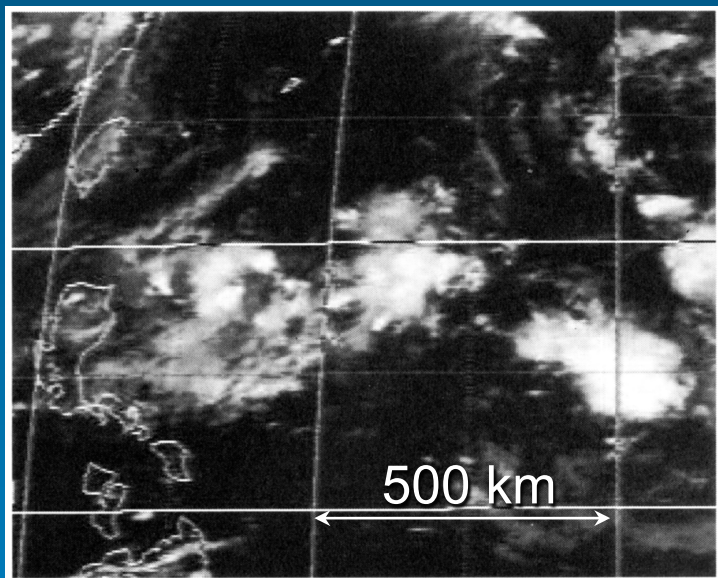
アマゾン川



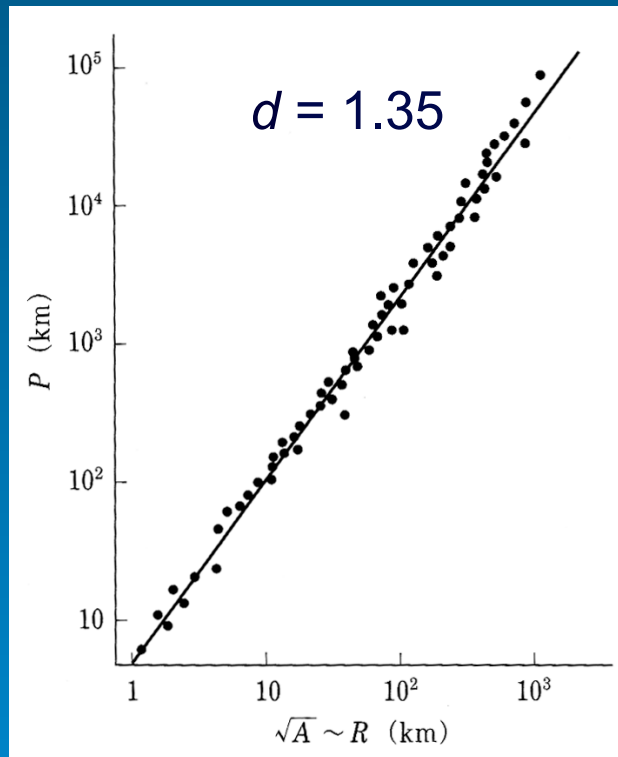
$$d \approx 1.85$$

⇒ 川の流路 (水の位置エネルギーを消費するシステム) もフラクタル性を示す。(降水量 \nearrow \Rightarrow $d \nearrow$?)

積雲の輪郭のフラクタル次元 Lovejoy (1982) Science 216, 185.



輪郭の長さ

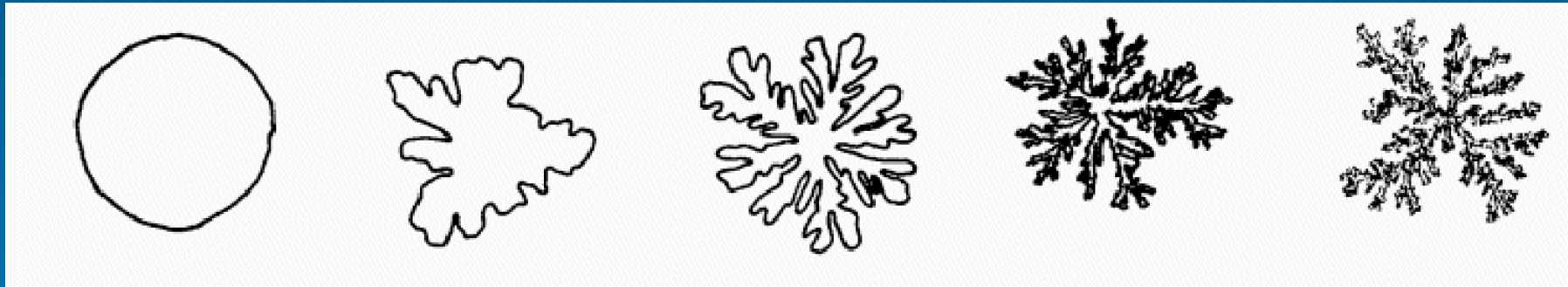


輪郭長: L
 $L/L_0 \approx (R/R_0)^d$
 $L \approx (L_0/R_0^d) R^d$
 $\propto R^d$
 R : 雲のサイズ
 R_0 : 最小サイズ
 ($\approx \delta_v$: 粘性境界層?)

雲のサイズ

⇒ 積雲のフラクタル性も、積雲対流の
 (散逸) 構造を反映?

粘性指の輪郭のフラクタル次元



$d \approx 1.0$

1.1

1.2

1.65

1.7

Nordmeier (1998)

⇒ 粘性指 (圧力差による仕事を取り込み散逸する構造) もフラクタル性をしめす。

- フラクタル性: 散逸構造の一般的性質?

まとめ (Part 2-2) Summary

- エネルギーを取り込み散逸する構造 (散逸構造) の多くにフラクタル性がみられる。
しかし、フラクタル次元の物理的な意味はまだ良くわかっていない。
- エネルギーを取り込み散逸する率が最大になる条件から、個々のフラクタル次元を導く事ができれば、フラクタルの本質が理解できる可能性がある。

私の考え (仮説) : フラクタル次元の意味

エネルギーの供給の過程とエネルギーの散逸の過程を結ぶ構造？

〔 浮力, 重力
外側の非平衡 〕

〔 表面摩擦力, 粘性力
表面張力, 表面拡散 〕

1方向的な力*

2次元的な表面力 (方向性なし)

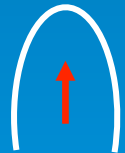
$d \approx 1$

最大で $d \leq 2$ (2次元面内)

釣り合い

$d \leq 3$ (3次元空間内)

例) 積雲対流



浮力小

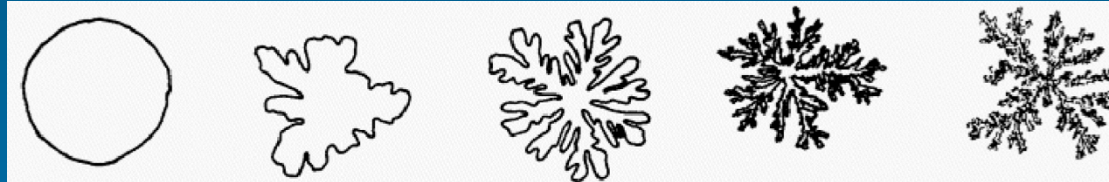


浮力大

表面積 (d) を増やして, 粘性抵抗力を増加？

*) 方向性のないブラウン運動の粒子の軌跡: $d \approx 2$.

フラクタル次元の決まり方 (私の予想)



d 小

d 大

輪郭長: L 表面積: A

$$L \approx L_0 (x/\delta_0)^d \propto (x/\delta_0)^d$$

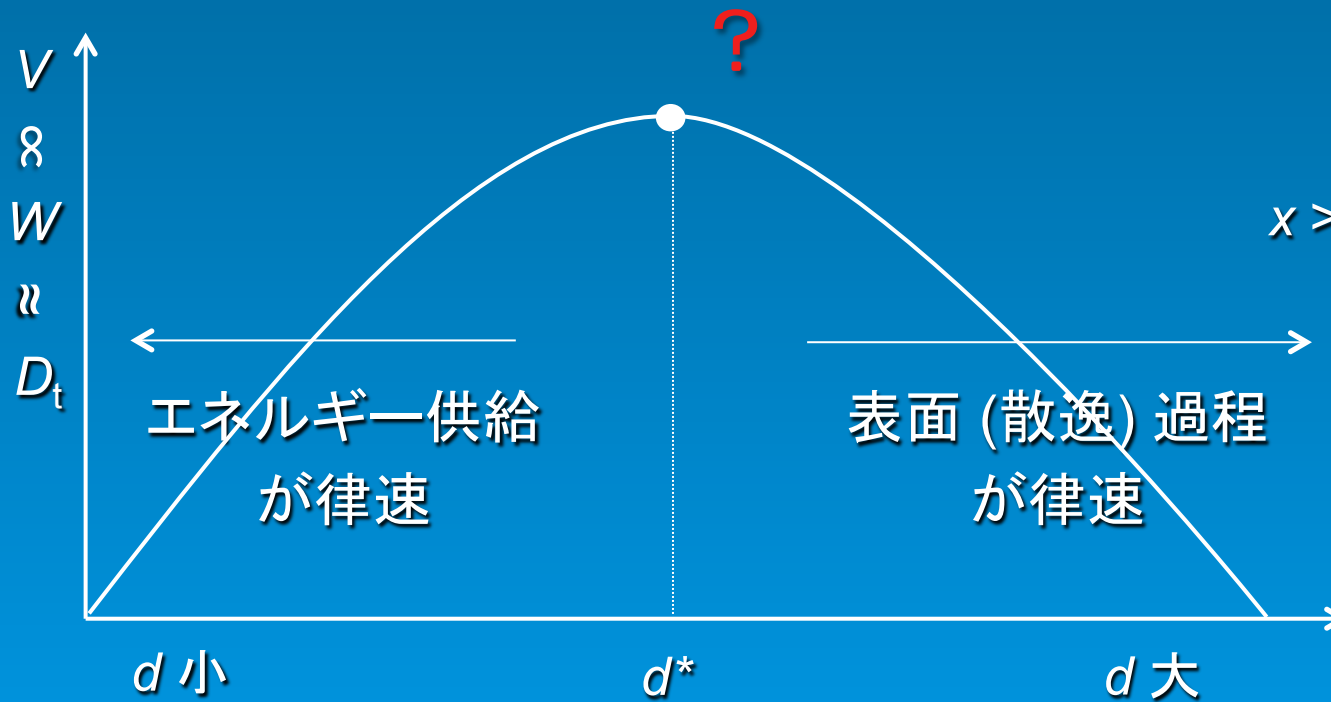
$$A \approx A_0 (x/\delta_0)^d \propto (x/\delta_0)^d$$

x : 形のサイズ

δ_0 : 最小スケール

$$(L_0 \approx \delta_0, A_0 \approx \delta_0^2)$$

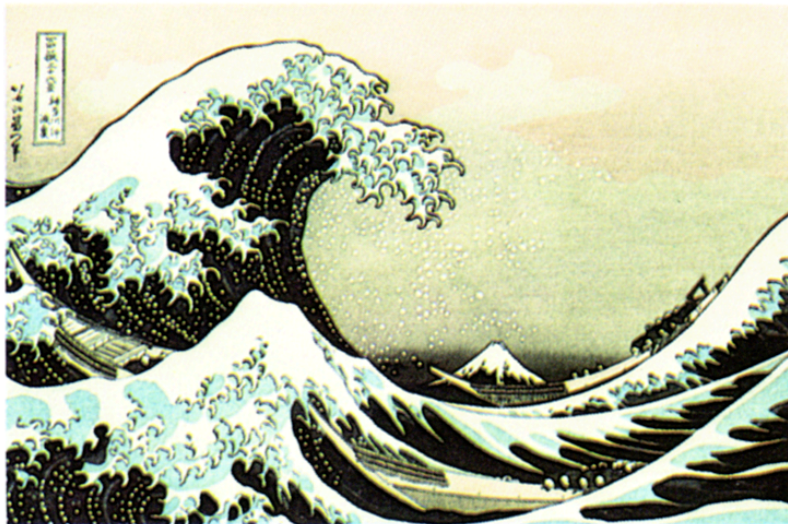
$x \gg \delta_0$ なら, $d \nearrow \Rightarrow L, A \nearrow \nearrow$



マンデルブローが賞賛した日本人画家

LEGEND FROM PAGE C3, CONT'D

PLATE C16. THE *GREAT WAVE* BY HOKUSAI. Katsushika Hokusai (1760-1849) was a painter and engraver of extraordinary power and versatility, a giant by any standard. He was fascinated by eddies and whorls of every kind, as exemplified by one engraving that reached such fame that a stamp-size reproduction will suffice.



葛飾北斎

(1760–1849)

Mandelbrot (1982)

The Fractal Geometry of Nature,
Plate C16.

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

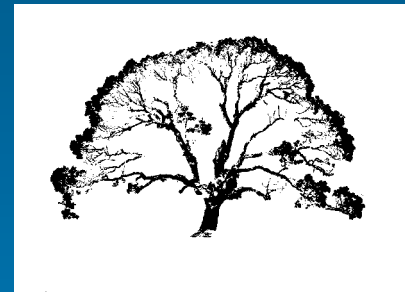
フラクタルを利用した「日除け」

酒井敏他 (2012) 京都大学のグループ

“木陰の効果”

フラクタル「日除け」

$D \approx 2$ (スカスカな立体)



≈

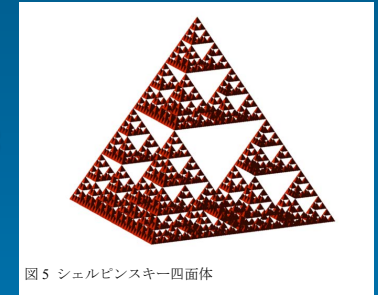


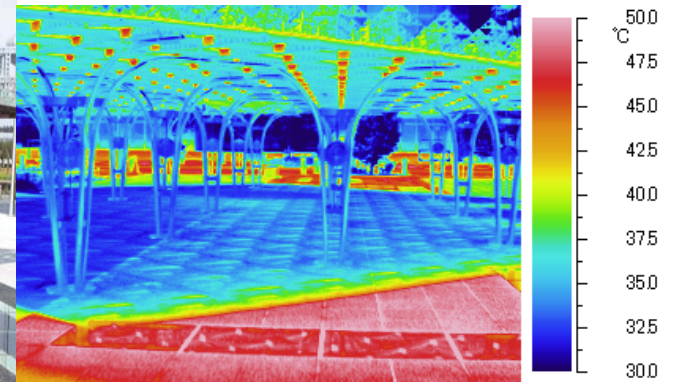
図5 シェルピンスキー四面体



図6 日本科学未来館エントランス前に設置されたフラクタル日除け



図8 フラクタル日除けの下の熱環境.



樹木の形 ($D \approx 2$) は日射を効率よく吸収しつつ、枝葉からの乱流熱輸送を最大化させている? ⇒ 効率の良い“日除け”

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

引用文献 (Part 2) References

Arakawa, K., *J. Glaciol.*, **2**, 463, 1955.

Ball, P., *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1999.

Fast, P., and Shelley, M., *J. Comp. Phys.* **212**, 1, 2006.

Hill, A., *Nature* **438**, 426, 1990.

Hirata, M. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res.* **16**, 172, 1931.

Honjo, H., Ohta, S., and Y. Sawada, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 841, 1985.

Huppert, H. E., and J. S. Turner, *J. Fluid Mech.* **106**, 299, 1981.

Kuroda, T., and Lacmann, R., *J. Crystal Growth* **56**, 189, 1982.

Lovejoy, S., *Science* **216**, 185, 1982.

Mandelbrot, B., *Science* **156**, 636, 1967.

Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, 1982.

Martyushev, L. M., and Birzina, A. I., *J. Phys. Cond. Matt.* **20**, 465102, 2008.

松下貢, フラクタルの物理 I: 基礎編, 裳華房, 2002.

McElwaine, J., and Nishimura, K., *Ann. Glaciol.* **32**, 241, 2001.

Mullins, W. W., and Sekerka, R. F., *J. Appl. Phys.* **34**, 323, 1963.

続き Continued

Nakaya, U., Sato, I., and Sekido, Y., *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. II* **2**, 1, 1938.

Nakaya, U., *Snow Crystals – Natural and Artificial*, Harvard Univ. Press, Cambridge, 1954.

Nohguchi, Y., and Ozawa, H., *Physica D* **238**, 20, 2009.

Nordmeier, V., *Fractals in Physics*, Univ. Essen, 1998. [<http://www.capturedlightning.com/temp/Nordmeier1.pdf>]

Richardson, L. F., *General Systems Yearbook* **6**, 139, 1961.

Sawada, Y., *Prog. Theor. Phys.*, **66**, 68, 1981.

Silveston, P. L., *Forsch. Ing. Wes.* **24**, 29, 1958; *ibid.* **24**, 59, 1958.

Sakai, S., *et al.*, *Energy and Buildings* **55**, 28, 2012.

Suzuki, M., and Sawada, Y., *Phys. Rev. A* **27**, 478, 1983.

寺田寅彦, 科学 (岩波書店) **3** (2), 77, 1933.

Velarde, M. G., and Normand, C., *Scientific American* **243** (1), 92, 1980.

Wiedlich, W., *Unsere Erde im Wandel*, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1993.

Wunderlich, J., in *Global Change: Our World in Transition*, Univ. Marburg, 1995.

Yokoyama, E., and Kuroda, T., *Phys. Rev. A* **41**, 1990.

Yuse, A., and Sano, M., *Nature* **362**, 329, 1993.