

第2回 フラクタル

2nd Week : Fractal

～元祖生成系AI～

延原 肇

(のぶはら はじめ)

nobuhara@iit.tsukuba.ac.jp

授業のページ (Class web page)
manabaからリンクしています

筑波大学
University of Tsukuba

※自己登録許可期間中 2015-04-15 (Wed)
延原 肇 | 設定 | ログアウト

マイページ コース

01CK107 スマートインフォメディアシステム特論

コース設定 担当教員: 延原 肇
2015 春AB 水3,4

小テスト アンケート レポート プロジェクト 成績

レポート管理

表示モード 教員 学生

レポート出題 インポート

No.	タイトル	期間	公開/非公開	管理
1	個別指導 第2回フラクタル 演習1	受付開始待ち 2015-04-15 12:15～ 2015-04-17 12:00	公開 非公開	0名
2	個別指導 第2回フラクタル 演習2から5まで	受付開始待ち 2015-04-15 12:00～ 2015-04-29 12:00	公開 非公開	0名

レポートの問題を一括エクスポート

課題はmanabaから提出すること

2024年度 スケジュール

- [4/15] 第1回 ガイダンス (Guidance)
- [4/22] 第2回 フラクタル (Fractal)
- [5/07] 第3回 カオス (Chaos)
- [5/13] 第4回 セルオートマトン (Cellular Automata)
- [5/20] 第5回 パーコレーション (Percolation)
- [5/27] 第6回 複雑ネットワーク (Complex Networks)
- [6/03] 第7回 マルチエージェント (Multi-agents)
- [6/10] 最終課題のため自習期間
- [6/17] 最終課題のため自習期間
- [6/24] 最終課題提出

本日の構成 (contents)

20分でわかるフラクタルの基礎

Basic of Fractal (20min)

30分でわかるフラクタルの応用

Application of Fractal (20min)

20分でわかるフラクタルの数理

Mathematics of Fractal (20min)

今週の課題 -reports -

いきなり質問

Question!

フラクタルという言葉について

- 英語表記 **fractal** (in English)
- 対応する正確な日本語はない
なので、そのまま「フラクタル」
- 誰が名づけ親？
フラクタルの提案者

Benoît Mandelbrot の造語

“Fractal” named by Mandelbrot

Benoît Mandelbrot



1924年11月20日

ポーランド生まれの数学者 (**幾何学**)

His favorite is geometry .

2003年 日本国際賞を受賞

(過去に**江崎玲於奈**、

マービン・ミンスキーも受賞)

Japan Prize winner (2003)

■IBMに勤務

Actually, he worked at IBM as data analyst.

株価のデータ分析

同じような周期のデータが微妙に形を変えながら頻出

He found the strange phenomena through financial

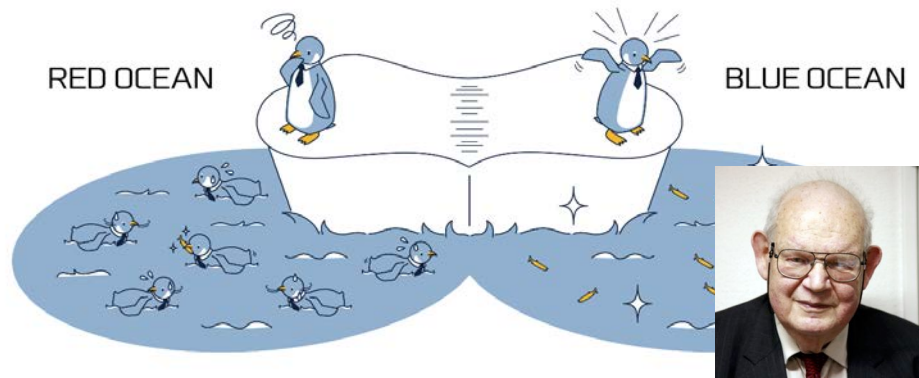
IBM勤務・・・だが、**窓際族／冷飯**を食うポジション



主流ではなく傍流にチャンスあり

空白地帯に仮説の旗を立てる！

どんなに能力の高い人でも競争の激しい領域で生き残るのはしんどい



株式データから自然界へ

自然界にも同種の現象が存在

We can find same phenomena in nature.

1967年

論文誌「Science」にフラクタルのアイデアを投稿
Mandelbrot submitted his idea to "Science".

「ブリテン島の海岸線の長さはどれだけか？」

How long is the coast of Britain ?

Benoît Mandelbrotの論文 (what is his paper?)

HOW LONG IS THE COAST OF BRITAIN?

How long is the coast of Britain?
Statistical self-similarity and fractional dimension
Science: 156, 1967, 636-638

B. B. Mandelbrot

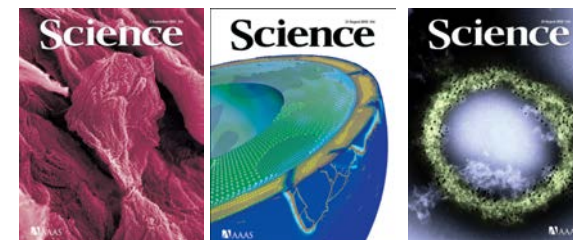
Geographical curves are so involved in their detail that their lengths are often infinite or more accurately, undefinable. However, many are statistically "self-similar," meaning that each portion can be considered a reduced-scale image of the whole. In that case, the degree of complication can be described by a quantity D that has many properties of a "dimension," though it is fractional. In particular, it exceeds the value unity associated with ordinary curves.

1. Introduction

Seacoast shapes are examples of highly involved curves with the property that — in a statistical sense — each portion can be considered a reduced-scale image of the whole. This property will be referred to as "statistical self-similarity." The concept of "length" is usually meaningless for geographical curves. They can be considered superpositions of features of widely scattered characteristic sizes; as even finer features are taken into account, the total measured length increases, and there is usually no clear-cut gap or crossover, between the realm of geography and details with which geography need not be concerned.

Fractional Dimension = 非整数次元

論文雑誌 Science



	ISI Impact Factor	PageRank	Combined
1	52.28 ANNU REV IMMUNOL	16.78 Nature	51.97 Nature
2	37.65 ANNU REV BIOCHEM	16.39 Journal of Biological Chemistry	48.78 Science
3	36.83 PHYSIOL REV	16.38 Science	19.84 New England Journal of Medicine
4	35.04 NAT REV MOL CELL BIO	14.49 PNAS	15.34 Cell
5	34.83 New England Journal of Medicine	8.41 PHYS REV LETT	14.88 PNAS
6	30.98 Nature	5.76 Cell	10.62 Journal of Biological Chemistry
7	30.55 Nature Medicine	5.70 New England Journal of Medicine	8.49 JAMA
8	29.78 Science	4.67 Journal of the American Chemical Society	7.78 The Lancet
9	28.18 NAT IMMUNOL	4.46 J IMMUNOL	7.56 NAT GENET
10	28.17 REV MOD PHYS	4.28 APPL PHYS LETT	6.53 Nature Medicine

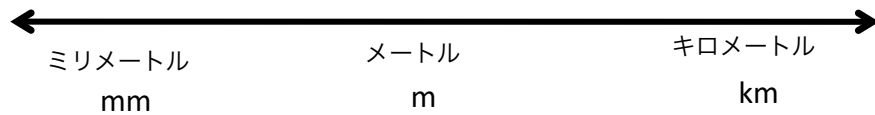
The table shows the top 10 journals by ISI Impact Factor, PageRank, and a modified system that combines the two (based on 2003 data). *Nature* and *Science* are generally regarded as the most prestigious journals, and in the combined system they come out on top.

論文概説 (1) overview of his idea

たいていのモノには固有のスケールがある

Each object has each own scale to be recognized.

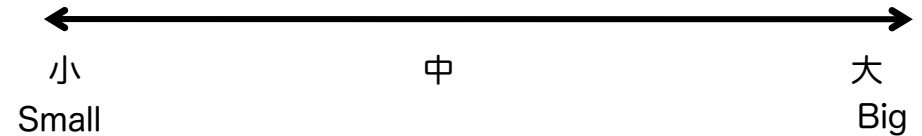
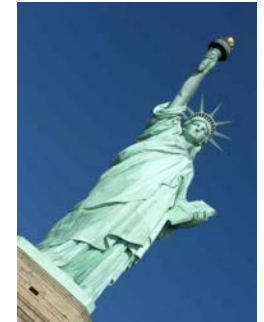
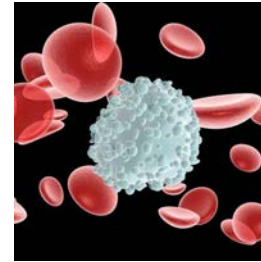
例えば「人間」：「人間」と認識できる程良いスケールが存在



論文概説 (2) overview of his idea

モノには認識できる固有のスケールが存在

Each object has each own scale to be recognized.



論文概説 (3) overview of his idea

「固有」のスケールを持たない場合がある = スケールフリー

Sometimes, we can see "Scale Free" things.

※どんなスケールで観測しても、対象が認識できる

Scale Free = possible to recognize objects, any scale.



例：海岸線 Coastline

この断崖絶壁は何十メートルくらい？



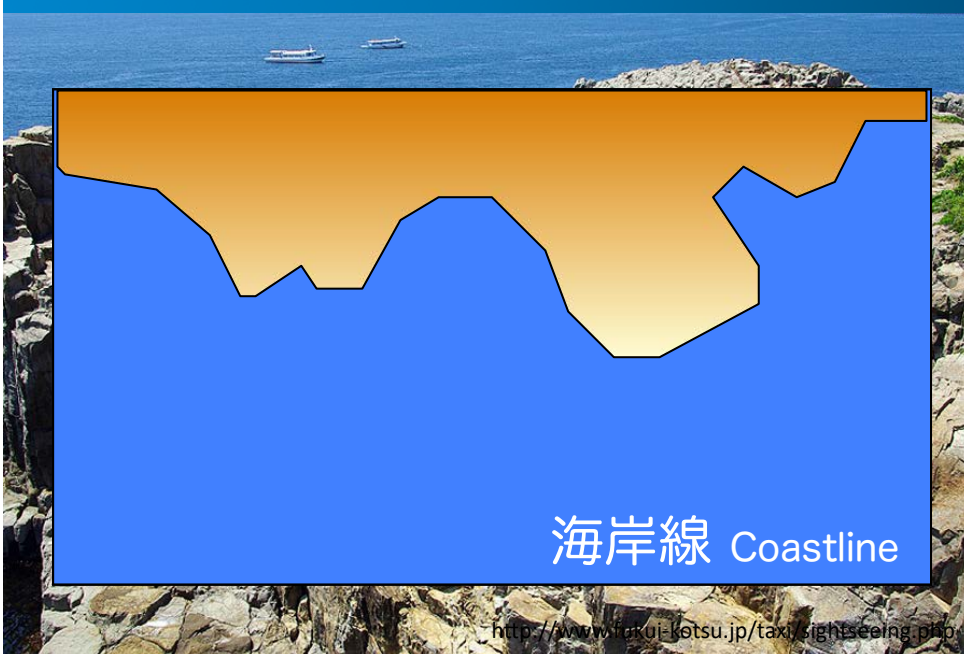


これはなんだろう？
どのくらいのサイズなのだろうか？

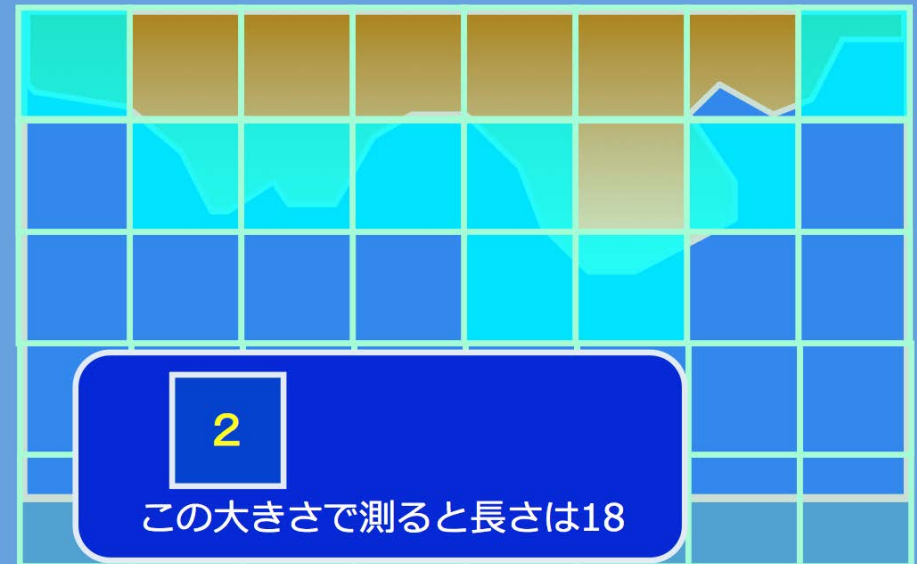


論文概説 (3)

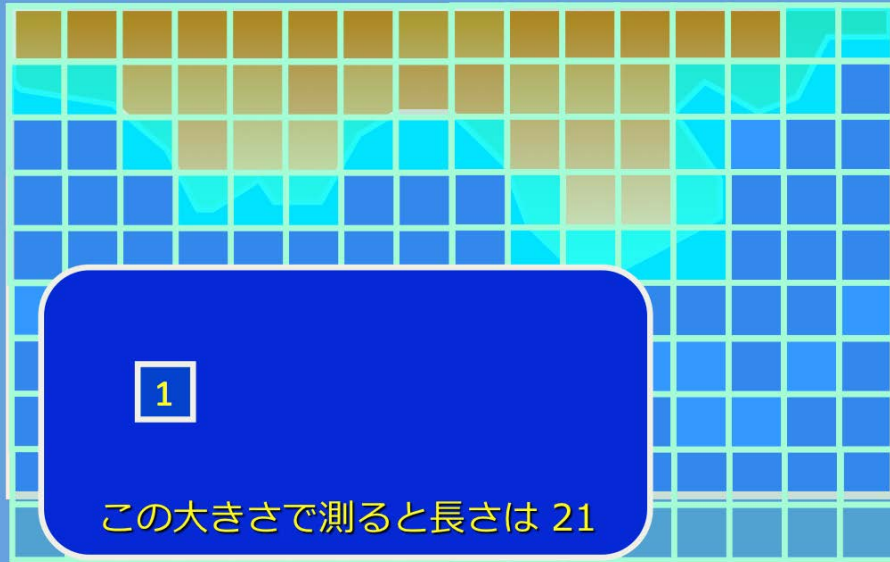
マンデルブロが注目した自然対象



海岸線を測ってみよう Measure the Coastline

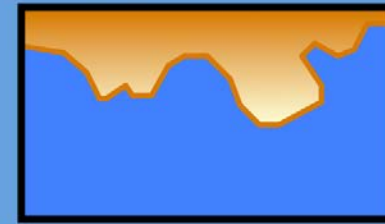


もう少し細かく計測したら？ (more precise?)



長さの変わる海岸線 (1)

Coastline varying lengths



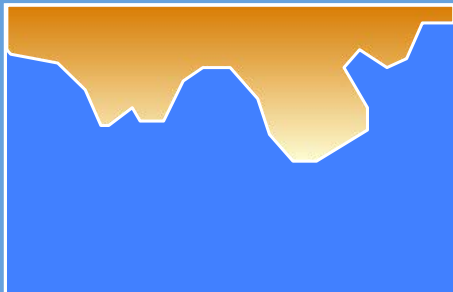
この大きさと測ると長さは18



この大きさと測ると長さは21

長さの変わる海岸線 (2)

Coastline varying lengths

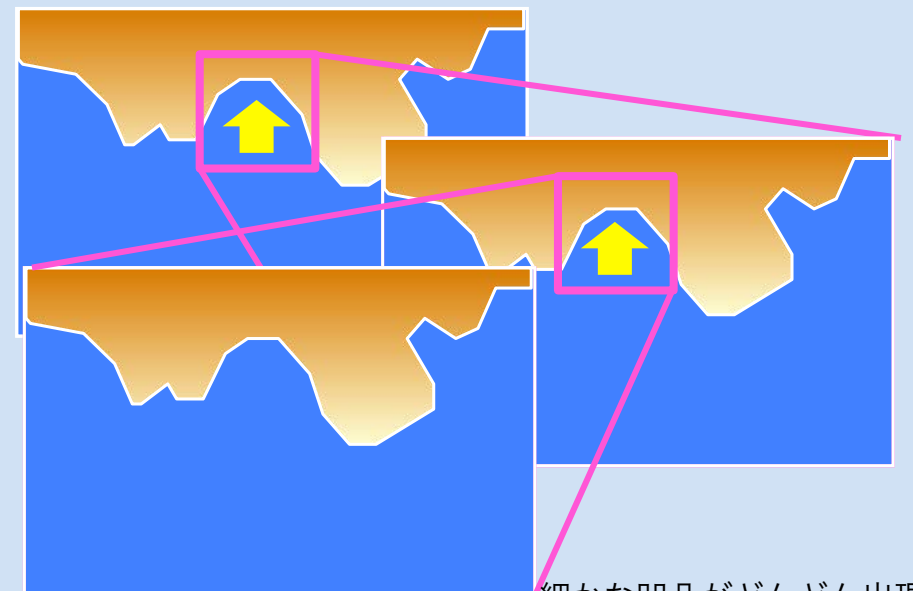


マンデルブロの立てた問い (assumption)

小さいモノサシで測るほど海岸線はどんどん長くなって
ゆくのではないかな？

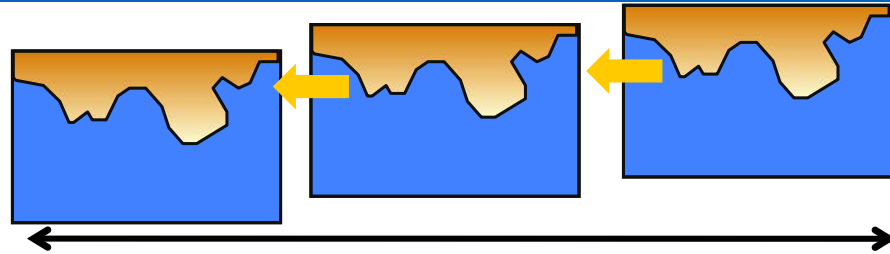
The smaller scale measure is used, the longer coast is obtained?

直観的な説明 (Intuitive illustration)



細かな凹凸がどんどん出現

長さの変わる海岸線



観測スケールを変更しても対象を認識可能なモノ
(固有のスケールをもたない)

小さいモノサシを使えば使うほど
対象の長さが長くなるはず

Smaller ruler, Longer length of subject

マンデルブロは実際やってみた！ (思い立ったらすぐ実行！)

左肩上がりになっていると仮説は正しい

これはイケると確信！

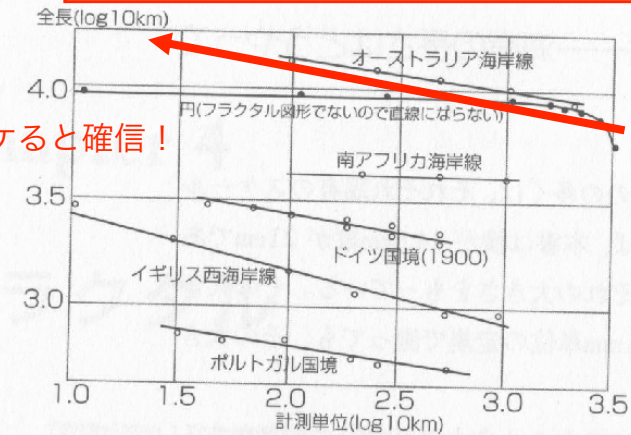


図 4.2 計測するスケールを変えて測った海岸線や国境の長さ

もっとわかりやすい例を紹介

Examples

コッホ曲線
(Koch Curve)

コッホ曲線 (1) Koch Curve

長さ1の直線 (first step)

1/3

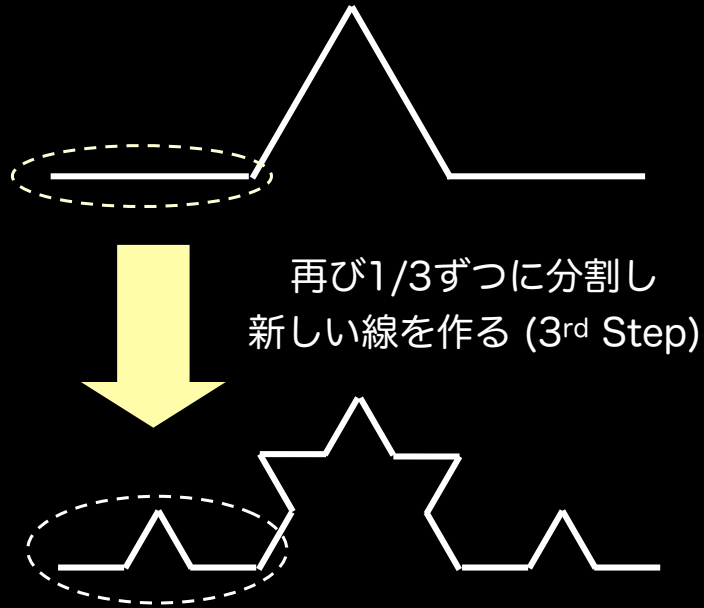
1/3

1/3

長さ1/3をもう一本加え、以下のような図形をつくる (2nd)



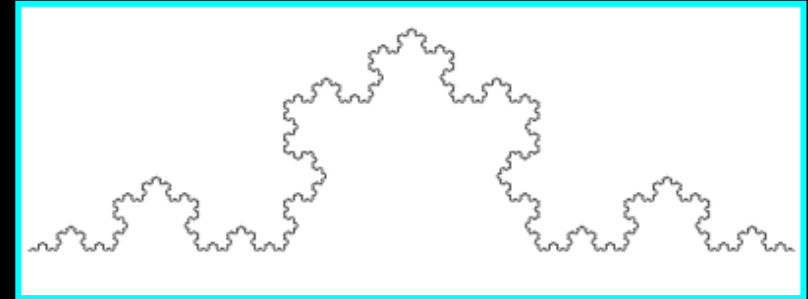
コッホ曲線 (2) Koch Curve



コッホ曲線 (3) Koch Curve

無限回繰り返すときのような図形が得られる
Final shape, after repeated in infinite number

コッホ曲線



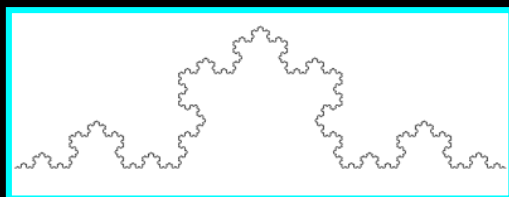
質問： このコッホ曲線の長さは？

Question: How long is it?

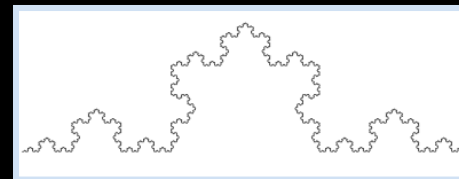
無限回繰り返すということは・・・

$\frac{1}{3}$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{3}$

長さ1/3をもう一本加え、以下のような図形をつくる操作の繰り返し



$$\lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{4}{3} \right)^i = \infty$$



10回繰り返すと 全体の長さは 17.76

20回繰り返すと 全体の長さは 315.34

30回繰り返すと 全体の長さは 5599.67

40回繰り返すと 全体の長さは 99437.33

50回繰り返すと 全体の長さは 1765780.94

60回繰り返すと 全体の長さは 31356255.2

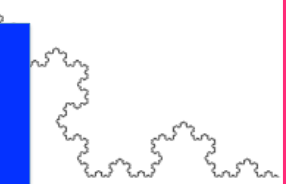
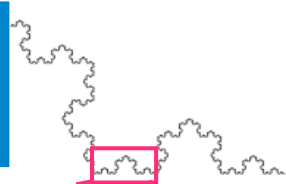
コッホ曲線の特徴

ある部分を取り出してみても
元の図形と全く同じ構造を持つ

It has same structure as the original shape

「自分自身的一部分」と「自身」が同じ
→固有のスケールを持たない

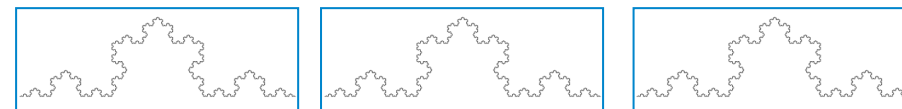
Part of oneself = oneself → We can say 'Scale Free'



フラクタルとは？

このような自己相似な図形の総称を
「フラクタル」

self-similarity figures = fractal



小 (small)

中 (middle)

大 (big)

観測スケール

1975年にマンデルブロが命名

このインスピレーションはどこから？

マンデルブロが眺めていたのは

日経225 (JP:N225)
株価指数(出来高単位100)

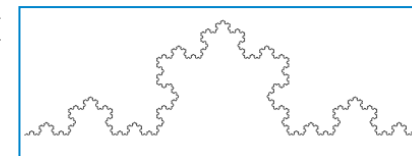


株価の変動の様子
Stock price movement



フラクタルを統計的な観点から観測

フラクタル（自己相似図形）の特徴

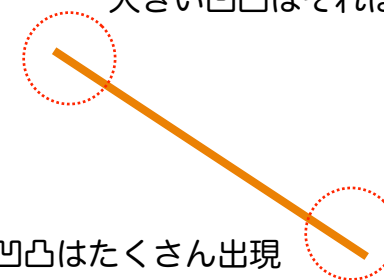


出現頻度 (frequency)

大きい凹凸はそれほど多くない

小さい凹凸はたくさん出現

凹凸の大きさ (size of concavoconvex)



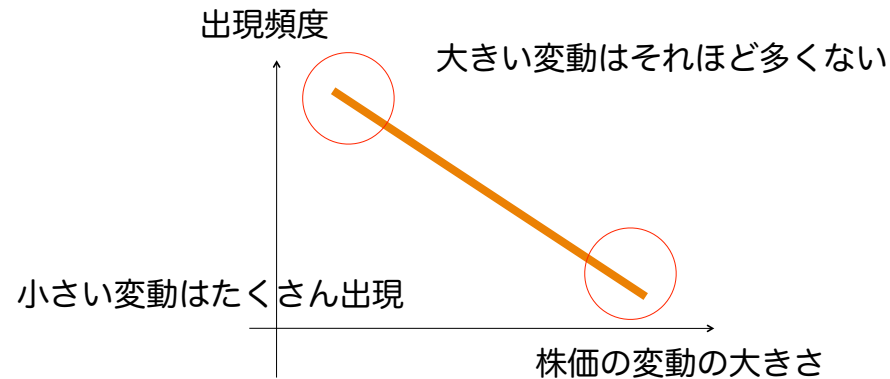
株価を統計的な観点から観測 (stock price)



■直観的には・・・

リーマンショック等は
それほど頻繁に発生しない

Financial crisis is uncommon phenomenon



少しだけ大学院生らしく
(for graduate students!)

反復関数系としてのフラクタル

Fractal as Iteration function system

複雑そうなフラクタルも、以下の**単純**な反復的表記に集約
(Any fractal can be defined as follows:)

$$S = \bigcup_i^N f_i(S) \quad S \subset R^n \quad R^n$$

$$f_i : R^n \rightarrow R^n$$

※私の授業：世の中の複雑怪奇な現象に隠れた単純な数理的構造の紹介

コッホ曲線との対応

$$f_i : R^n \rightarrow R^n$$

長さ1の直線

1/3

1/3

1/3

長さ1/3をもう一本加え、以下のような図形をつくる



$$S = \bigcup_i^N f_i(S)$$

離散数理の観点から (from discrete math.)

反復関数系

$$S = \bigcup_i^N f_i(S) \quad S \subset R^n \quad R^n$$

$$f_i : R^n \rightarrow R^n$$

関数 f_i の集合はモノイドを構成
(= monoid)

モノイドを知らない人におすすめの本！

応用事例とイラストでわかる離散数学

カンタンな数学でAIも理解できる!? (第2版) (共立出版)
延原 肇 (著)

2,500円



イマズグくりっく！



本日の構成 (contents)

20分でわかるフラクタルの基礎

Basic of Fractal (20min)

30分でわかるフラクタルの応用

Application of Fractal (20min)

20分でわかるフラクタルの数理

Mathematics of Fractal (20min)

今週の課題 -reports -

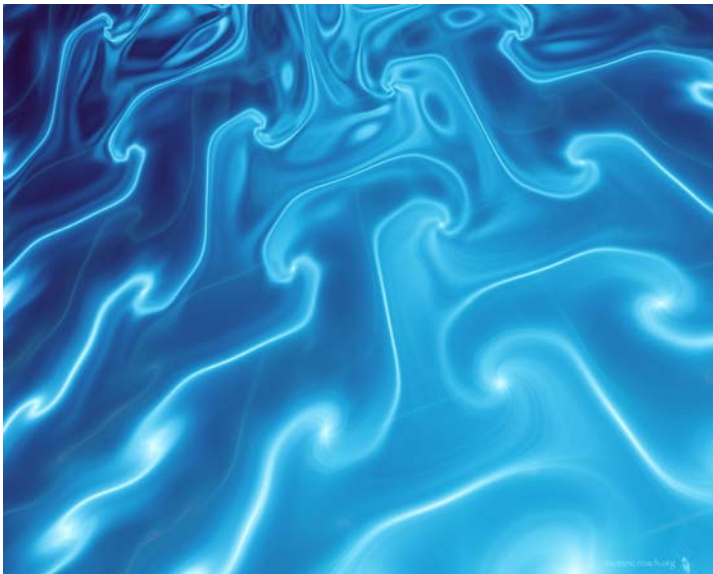
フラクタルの応用 (1)

(fractal applications)

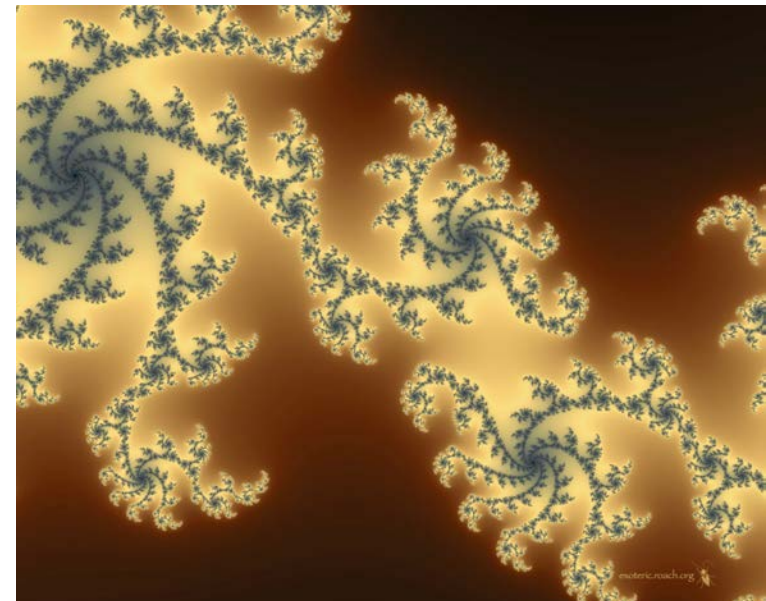
自然界の「フラクタル」 (fractals in nature)



質問：これは何に見える？ What is it?

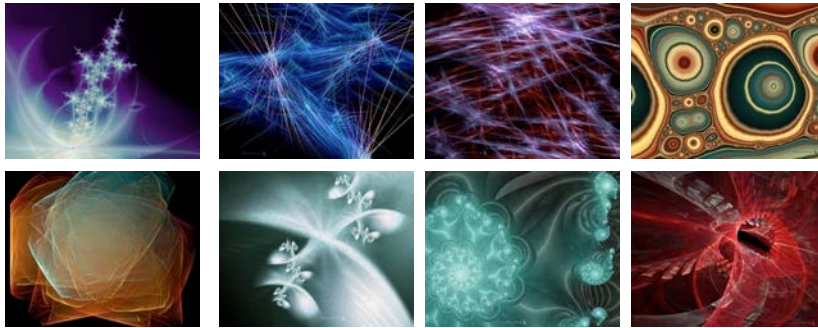


質問：これは何に見える？ What is it?



これらのCGは

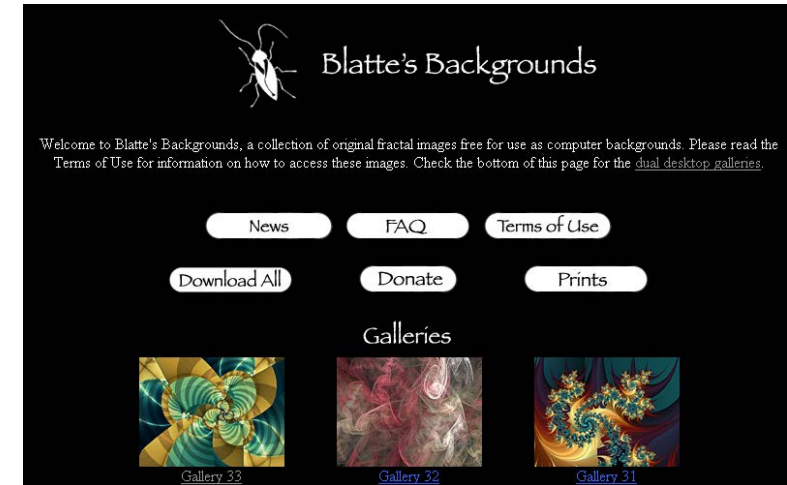
Actually, these CG are



反復関数系で生成

…produced by iterated function system

<http://exoteric.roach.org/bg/index.html>



フラクタルの応用 その1

皆さんに質問：「画像ファイルはどうして大きい？」

Why image file is large?

600画素



400画素

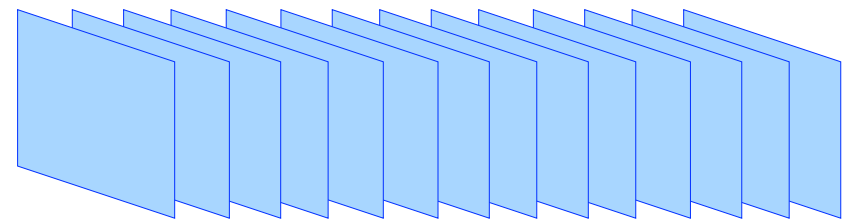
$400 \times 600 = 240,000$ 画素
1画素あたり = 赤, 緑, 青
の各1バイト

こんな小さな画像でも
 $400 \times 600 \times 3 \times 1$ バイト
= 720KB

コンピュータグラフィックスに 응용

Application to computer graphics

動画像の仕組み (movies)



1秒間30枚の静止画像 (30fps)

30 still images / 1 sec

DVD1枚(15GB)に対しハイビジョン画質で録画すると約1時間半

コンピュータグラフィックスに応用

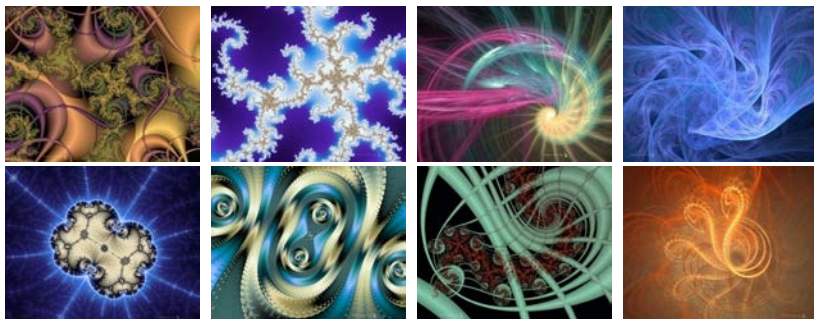
Application to computer graphics

フラクタル図形は？(fractal figures)

生成するための数式を記録するだけでよい

※数式は数十バイトの世界

元祖生成系AI！



フラクタル (数十バイト)

入力



$$S = \bigcup_{i=1}^N f_i(S) \quad S \subset \mathbb{R}^n \quad \mathbb{R}^n$$
$$f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

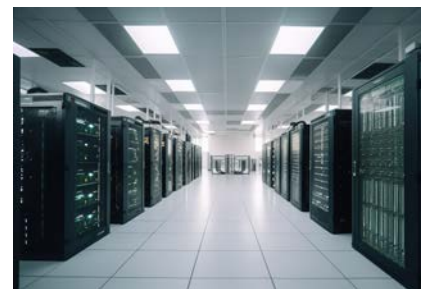


出力

フラクタルの方がワクワクしませんか？

現代の生成系AI (大規模モデル)

入力



出力

4KBでどのくらいの動画が作れる？

4KB = 約2,000文字 (日本語)

新聞紙1ページの文字数は？

How many characters in newspaper?

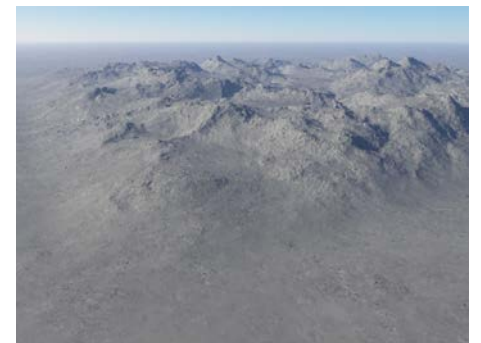
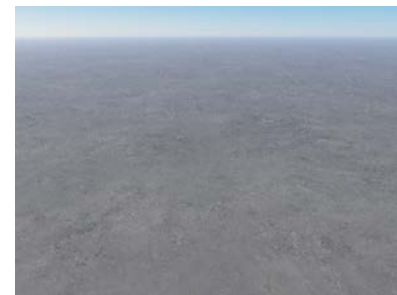
16,000文字

4KB = 新聞紙1/8ページ分



ちょっと見てみましょう

景観作成ソフト：Terragen4

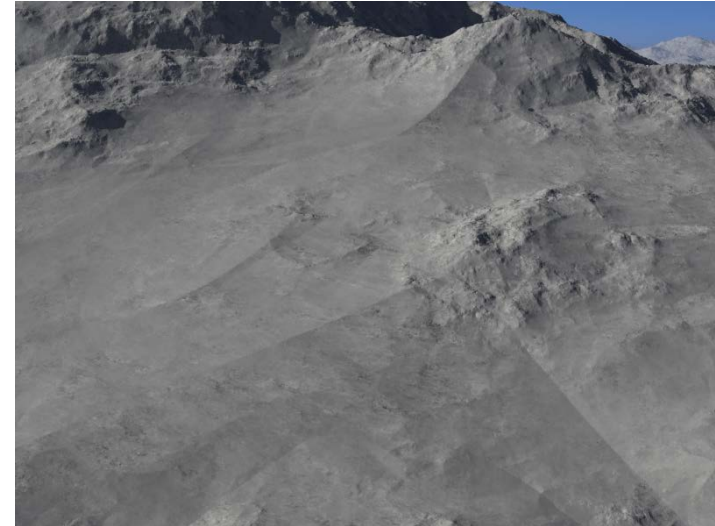


生成例 (1)



640x480 pixels : 72 seconds

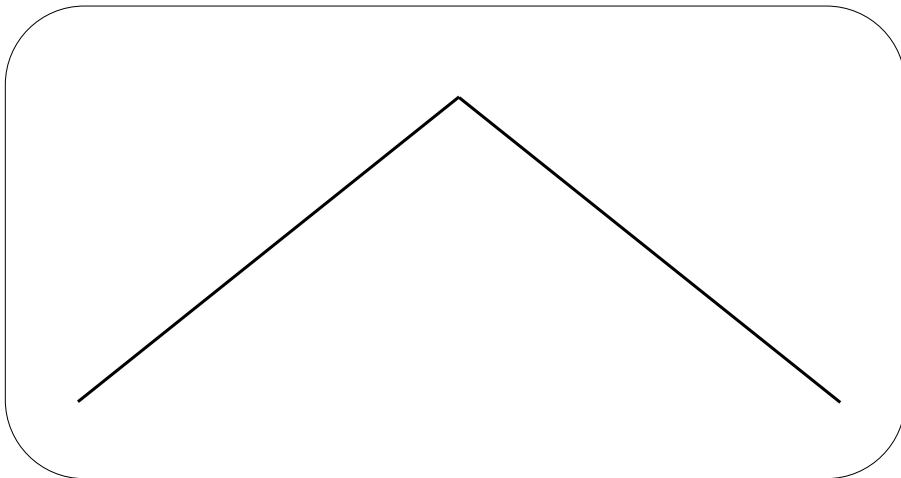
生成例 (2)



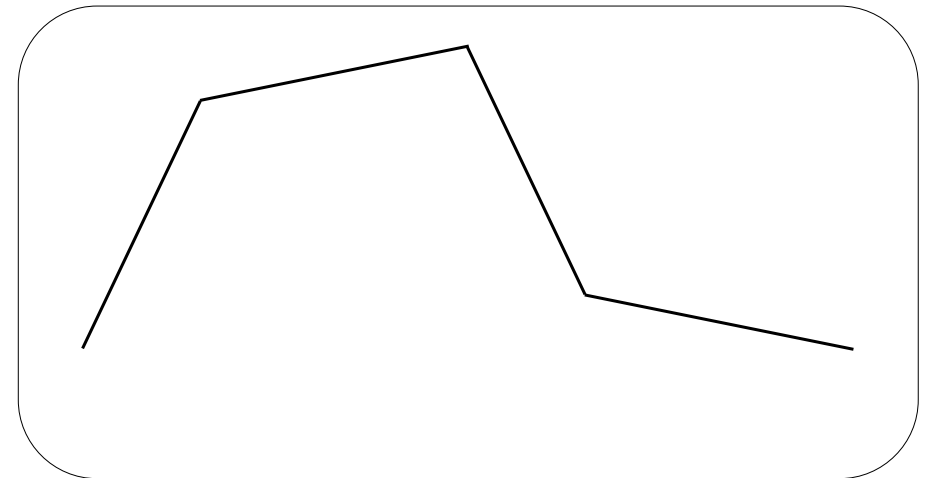
800x600 pixels: 131 seconds

中点変位法 (mid-point method)

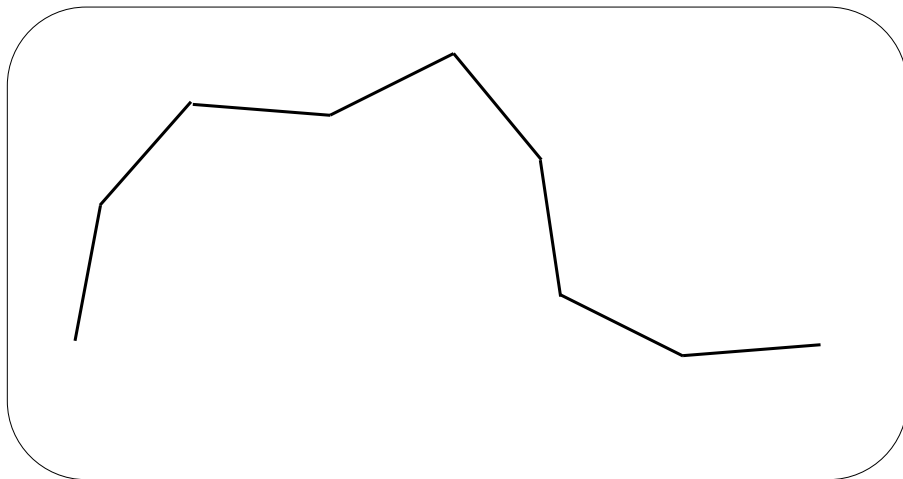
基本的はコッホ曲線と同じ



中点変位法 (mid-point method)

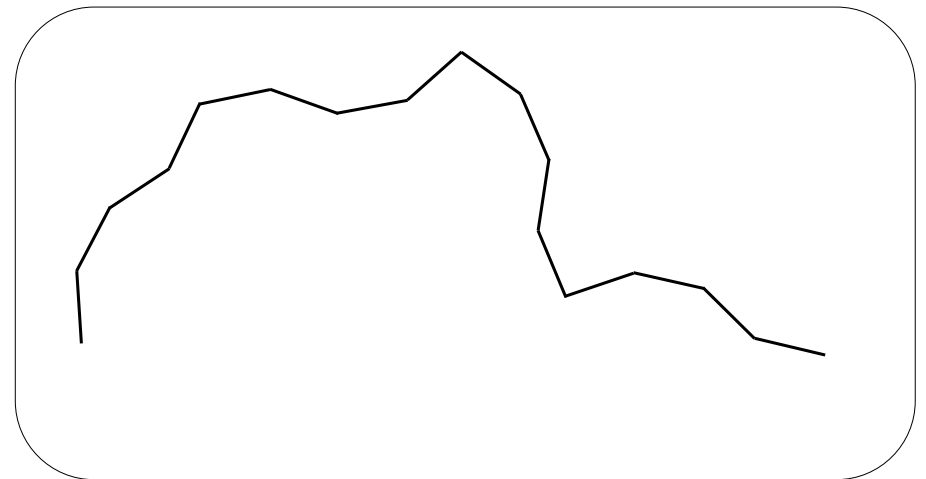


中点変位法 (mid-point method)



中点変位法 (mid-point method)

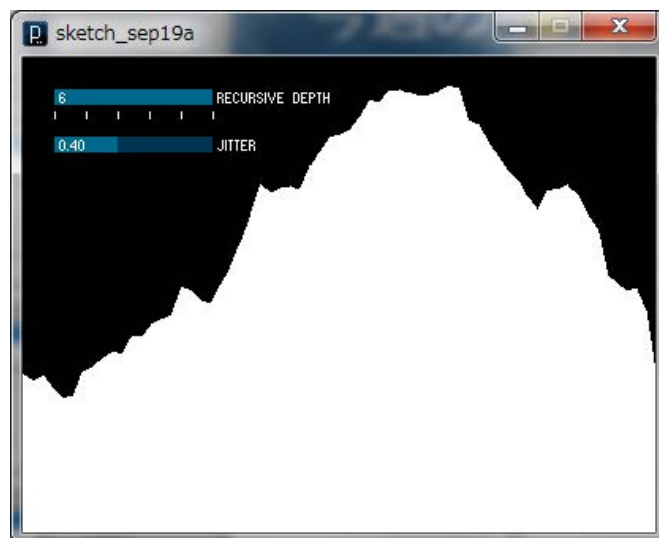
だんだん自然の山らしく・・・ (to be natural...)



立体に拡張も可能 (of course 3D version can be defined.)

今週の演習課題 (ボーナス課題)

中点変位法を利用したプログラムの作成

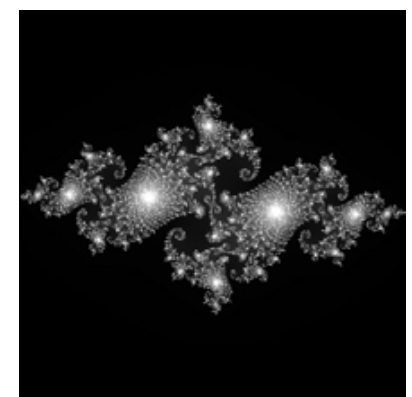
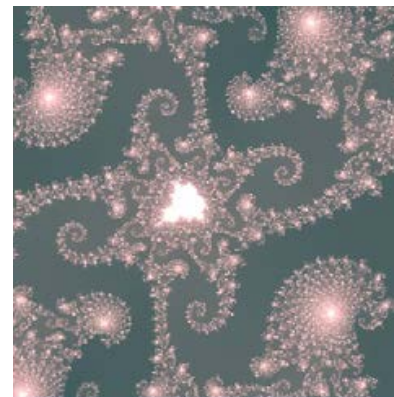


今週の演習課題

マンデルブロ集合の描画

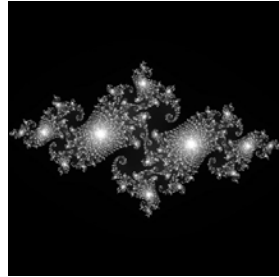
Drawing Mandelbrot set

$$z_{n+1} = z_n^2 + C$$



複素力学系 (complex dynamic system)

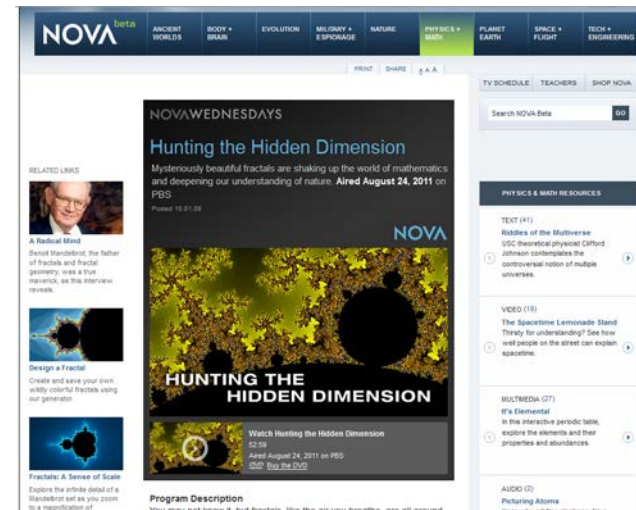
$$z_{n+1} = z_n^2 + C$$



複素力学系

複素数のある多項式による反復写像により、どのようなモノに収束するのかを考える学問

10分ほど映像鑑賞



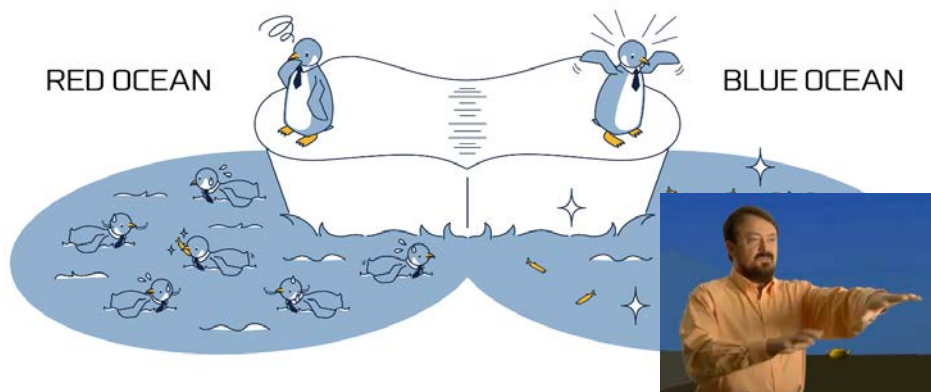
Hunting the Hidden Dimension (PBS)

第1回の授業を思い出してください！

71

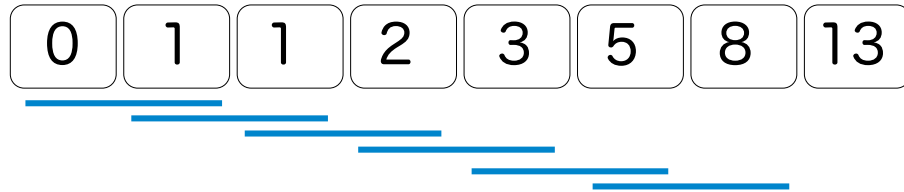
空白地帯に仮説の旗を立てる！

どんなに能力の高い人でも競争の激しい領域で生き残るのはしんどい



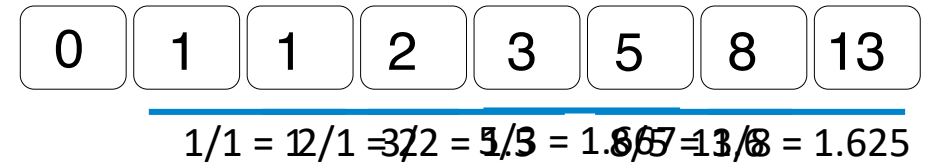
フラクタルの応用 (2)

フィボナッチ数 (1) Fibonacci numbers



自然界の現象と強く対応

フィボナッチ数 (2) Fibonacci numbers



これを続けてゆくとある数値に収束

こんな値に収束 (finally it converge to ...)

目指せ数理デザイナー？

芸術への応用？

黄金比 [Golden Ratio]

$$1 : \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1 : 1.618$$

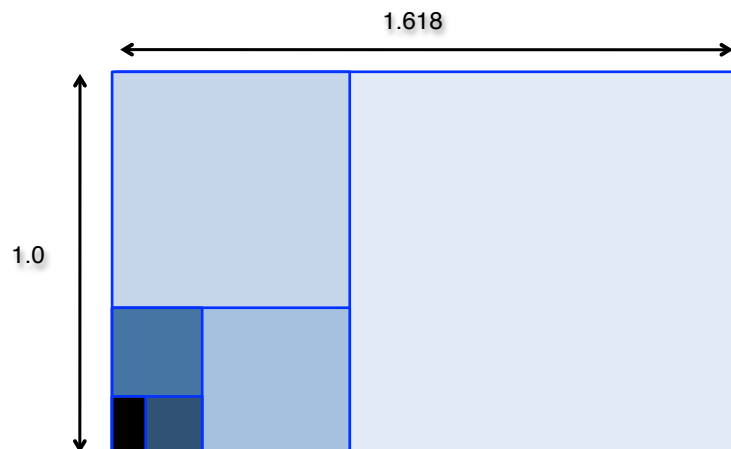
もっとも美しく、落ち着く比率

歴史的建造物、絵画、芸術作品において観測



- 頭～床：へそ～床＝黄金比
- 肩～指先：肘～指先＝黄金比

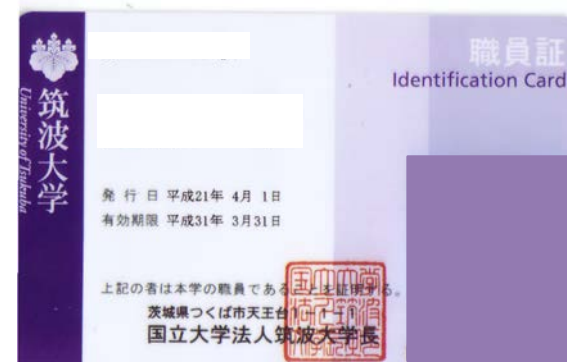
フラクタルと黄金比



黄金比分割はフラクタル

身近な例 (1) example of GR

皆さん、自分の学生証を出してみましょう



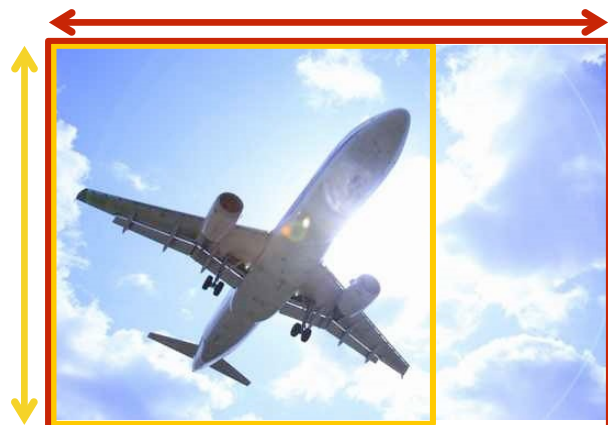
学生証のタテとヨコの比率を計算してみましょう

Let's calculate width and height of student card

※大体、黄金比に近い (1.58~1.6くらい)

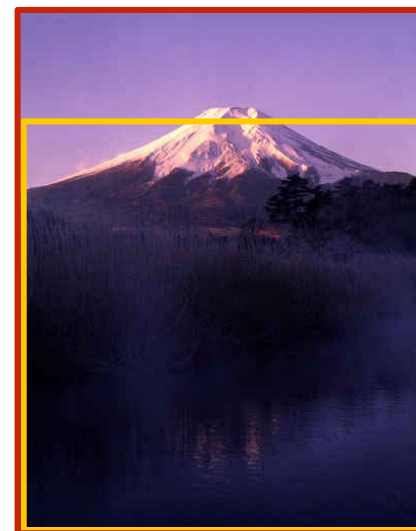
身近な例 (2) example of GR

カメラの構図 (1)



MS Office クリップアートより

身近な例 (2) example of GR



私も実践



Before



After

The Lazy Rule of Thirds



<http://www.jakegarn.com/the-rule-of-thirds/>

本日の構成 (contents)

20分でわかるフラクタルの基礎

Basic of Fractal (20min)

30分でわかるフラクタルの応用

Application of Fractal (20min)

20分でわかるフラクタルの数理

Mathematics of Fractal (20min)

今週の課題 -reports -

フラクタル次元
Fractal Dimension

フラクタル次元について

「次元」とは？

(dimension)

(1) (物) いくつかの基本的物理量に対して、ある物理量がどのような関係をもつかを示す式。例えば、質量 M 、長さ L 、時間 T を基本量とすれば、面積 S は、 $[S] = [L^2]$ と書ける。・・・

(2) (数) 空間のひろがりの度合を表す数。例えば、直線上の点の座標は一つの数で表され、平面上の点の座標は二つの数の組で表され、空間の点の座標は三つの数の組で表されるので、それぞれ一次元・二次元・三次元であるという。一般に n 次元の空間や、無限次元の空間も考えられる。

(3) ものの見方や考え方の立場。また、考え方や意見などを支えている思想や学識などの水準。

「一の異なる意見」 「低い一の話」

三省堂提供「大辞林 第二版」より

位相次元とハウスドルフ次元

線は 1 次元 (Lines = 1D)

面は 2 次元 (Surface = 2D)

これまで習ってきた次元 = 位相次元

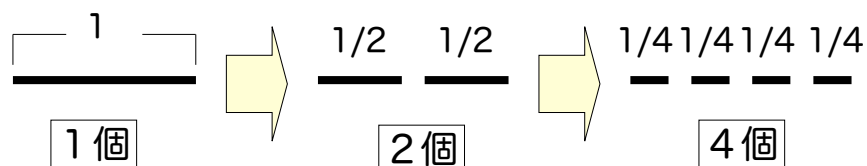
We study the concept of topological dimension, high school etc.



ハウスドルフ次元 (1) Hausdorff dimension

線分 (1次元の場合)

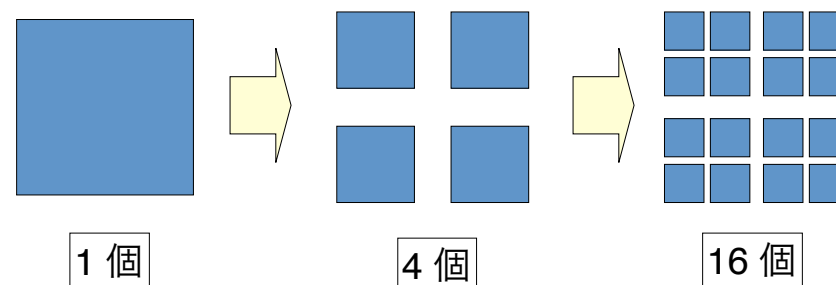
辺を半分にする操作



ハウスドルフ次元 (2) Hausdorff dimension

正方形 (2次元の場合)

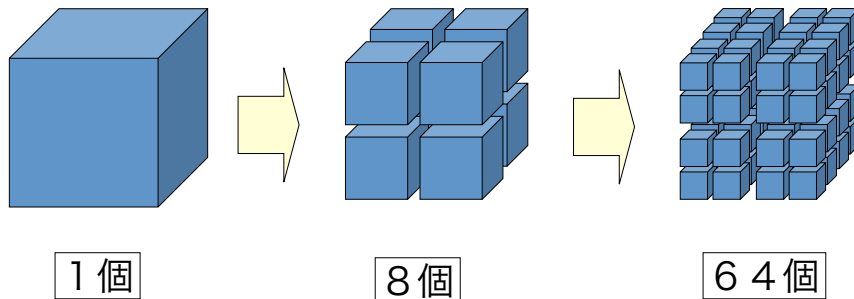
辺を半分にする操作



ハウスドルフ次元 (3) Hausdorff dimension

立方体 (3次元の場合)

辺を半分にする操作



ハウスドルフ次元 (4) Hausdorff dimension

いままでの議論をまとめると To summarize

	初期状態 Initial State	2 等分	さらに 2 等分	さらに 2 等分
線分 (1次元)	1 個	2 個	4 個	8 個
正方形 (2次元)	1 個	4 個	16 個	64 個
立方体 (3次元)	1 個	8 個	64 個	512 個

ハウスドルフ次元 (5) Hausdorff dimension

	初期状態	2 等分
線分 (1次元)	1 個	2 個 (= 2)
正方形 (2次元)	1 個	4 個 (= 2×2)
立方体 (3次元)	1 個	8 個 (= $2 \times 2 \times 2$)

線分 (1次元)

$$1 \rightarrow 2 = (2^1) \rightarrow 4 = (2^1) \times (2^1)$$

正方形 (2次元)

$$1 \rightarrow 4 = (2^2) \rightarrow 16 = (2^2) \times (2^2)$$

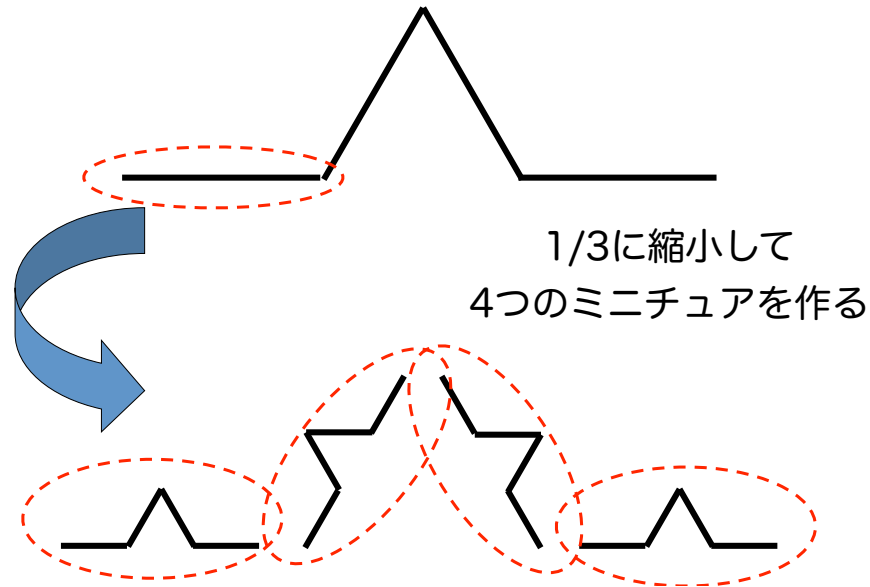
立方体 (3次元)

$$1 \rightarrow 8 = (2^3) \rightarrow 64 = (2^3) \times (2^3)$$

D次元

$$1 \rightarrow (2^D) \rightarrow (2^D) \times (2^D)$$

フラクタル図形の次元は？



フラクタル次元の次元は

このような**非整数次元**を**フラクタル次元**という

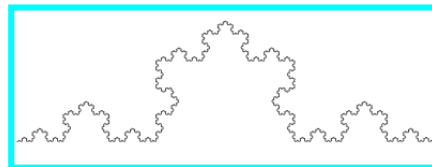
$$(3^D) = 4$$

$$\log(3^D) = \log 4$$

$$D \log 3 = \log 4$$

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.2619 \dots$$

コッホ曲線の次元



フラクタル図形の次元は？

D次元

半分にする操作

$$1 \rightarrow (2^D)$$

コッホ曲線の場合

1/3 にする操作

$$1 \rightarrow (3^D) = 4$$

この式をDについて解けばよい

フラクタルの別の定義

フラクタルのもうひとつの定義

位相次元 \neq ハウスドルフ次元

となるような図形のこと

Fractal definition

topological dimension \neq Hausdorff dimension

自然界に存在するフラクタル次元の例

星：約1.2次元



樹木：1.3~1.8



川：1.4~1.8



雲：約1.35次元

自己組織的臨界状態

Self-organized critical state

砂山のメタファー ※メタファー=暗喩

砂山の上から少しずつ砂を落とす

Dropping the sand a little bit

- 山が緩やかな時：落下した砂は蓄積

the mountain is gradual : accumulation

- 一定の高さになった時：雪崩がおきる
山は崩れて低くなる

the height of the mountain is higher : avalanche



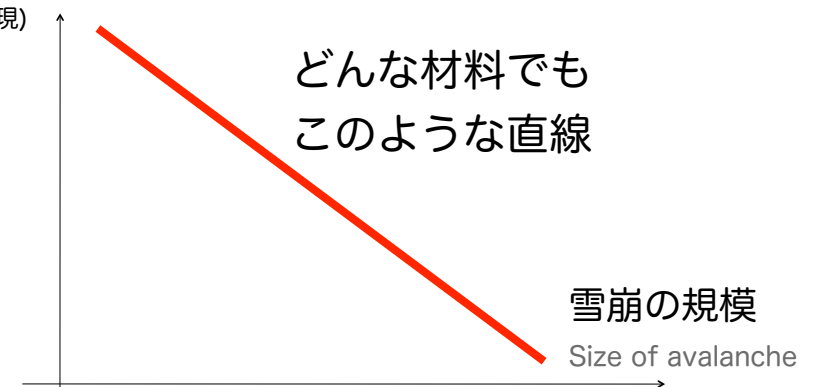
パー・バック（物理学者）

色々な材料で実験を実施材料によって、砂山の特性に違いがでるか？

べき乗の法則

雪崩の頻度 (frequency)

(対数表現)



小さな雪崩は頻繁に起きる
大きな雪崩はそれほど起こらない

自己組織的臨界状態 - Self-organized criticality -

「臨界状態」 (Critical state)

砂山がある一定の高さと傾きを保っている状態

「超臨界状態」 (Supercritical state)

「臨界状態」の砂山にさらに砂が加わった状態

※雪崩が発生する

※臨界状態に戻ろうとする

「亜臨界状態」 (Subcritical state)

「臨界状態」よりも砂山が低い状態

システムが自分自身で臨界状態を保とうとする状態

自己組織的臨界状態

べき乗の法則

・地震の規模と頻度

(The size and frequency of earthquakes)

・都市人口と順位

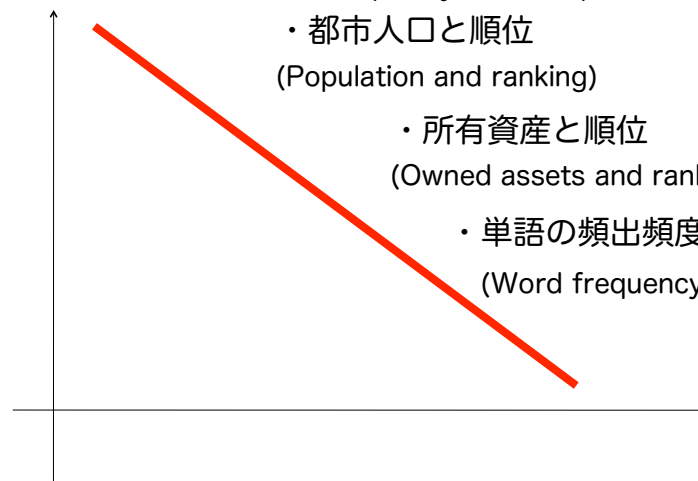
(Population and ranking)

・所有資産と順位

(Owned assets and ranking)

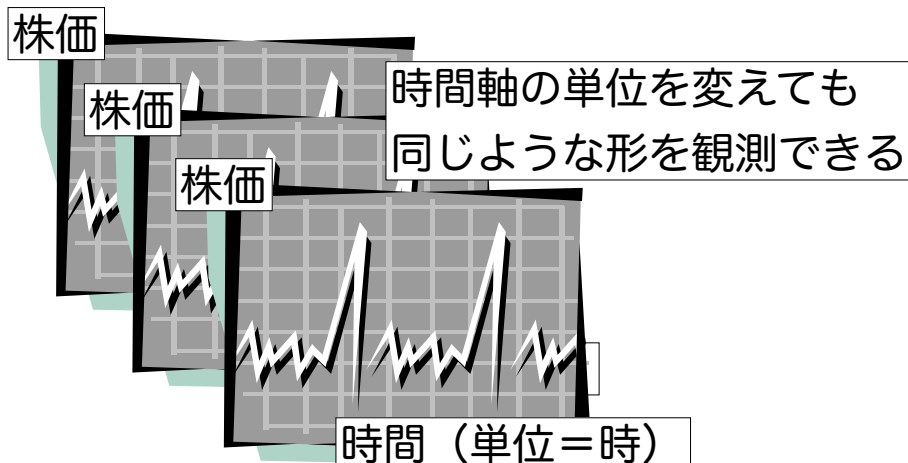
・単語の頻出頻度と順位

(Word frequency and ranking)



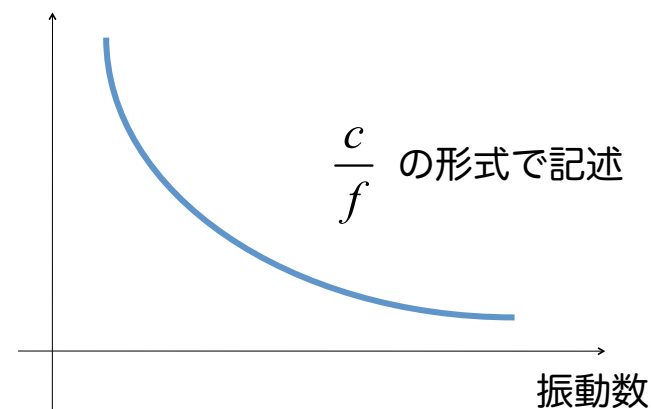
1/f ノイズ (1) 1/f noise

時間軸上のフラクタルのこと



1/f ノイズ (2) 1/f noise

変動の大きさ



1/fゆらぎは人間の声にも現れる (らしい)

MISIA、宇多田ヒカル、美空ひばり、徳永英明、
吉田美和 (DCT)、松任谷由実、井上陽水、森本レオなど

ちょっと見てみましょうか

ろうそくの炎，たき火と1/f ノイズ

見ていて飽きないのは 1/f が心地よいから？



子供の頃の火遊びは・・・1/fへの憧れ？

フラクタルと感性 (fractal and Sensitivity)

人間の感性の深層には
フラクタルの構造が存在するかもしれない

1/f ゆらぎ （心地よく聴こえる） [聴覚]

黄金比 （美しく見える） [視覚]

フラクタルと感性

味覚？



フラクタルと感性

触覚？

ファミリー イナダチェア ユメロボ FIC-R100

細やかに隅々まで届くもみ玉動作。そして、これまでにない脚ほくし機構、首ストレッチ機構搭載で全身を包み込んでほくします。さらに、ロッキングチェアに座っているような心地の体感。11/19の動きをテーマとした動きで心を解きほくします。インダストリアルデザイナーの意匠によりデザインもかわり、身体だけでなく心や空間までも癒すロボット、それがYUMEROBOです。



気持ちいい、心身の癒し。

YUMEROBO
ファミリー イナダチェア ユメロボ FIC-R100

1/19の動きロッキング+ほくしもみメカを融合させた新体感をあなたに。

<業界初の3大新技術>

身体の疲れを取るために座るのではなく、
座ることで健康的な自分になれる。
心の筋肉がとろけ、新しい活力が生まれる。
そんなホリスティックなチェアが「YUMEROBO」。
身体と心のベストバランスを生み出す。
これまでにないチェアの価値をお届けします。



HOLISTIC
心身の癒しを促す

MEDICAL
自律神経のバランスを整える

MASSAGE
身体と心のベストバランスを生み出す

Wholistic 3大新技術

人間の感性と普遍性

そうでないもの

普遍性 (Universality)

黄金比のような構造を見いだせるか？
e.g. Golden Ratio

本日の構成 (contents)

20分でわかるフラクタルの基礎

Basic of Fractal (20min)

30分でわかるフラクタルの応用

Application of Fractal (20min)

20分でわかるフラクタルの数理

Mathematics of Fractal (20min)

今週の課題 -reports -

今週の課題について

- Reports -

今週の課題

演習1 (3点)

1. 黄金比を考慮しないで撮影した画像
2. 黄金比を考慮して撮影した画像
3. 2.について、具体的に工夫したところをテキストで説明



これらを ppt 1枚にまとめて提出。

注意点・・・この課題だけ4/27 17:00締切

今週の課題

演習2 (3点)

フラクタルを利用した応用（サービス、デバイスなんでもOK）を、自分なりに考えて、もしそれが実現できたら世の中がどのような変わるのかを含めて、300文字から500文字程度で記述しなさい。

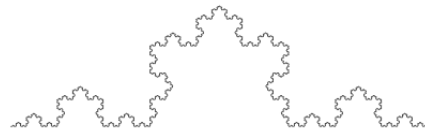
例： フラクタルマイク・・・カラオケで利用すれば、どんな人も上手に聴こえる。電話のやりとりにおいても、相手の声が心地よく聴こえる。

以降の課題は5/6 15:00締切

今週の課題

演習3

- 1) 上記のプログラムを参考にして、自分のパソコンの壁紙サイズのコッホ曲線を描くように改良してください。また描画の色なども変更して、カラフルなものにしてみてください。
- 2) 1)で作成した画像を、自分のパソコンの壁紙に設定し、そのスクリーンショットしたものを提出してください。つまり提出するものは、スクリーンショット1枚です。



今週の課題

演習4

マンデルブロ集合の描画

パラメータを色々変更して
3種類異なる画像を提出



今週の課題

演習5 (ボーナス課題)

ControllP5ライブラリを用いた中点変位法の実装

