



2003年(第19回)

# 日本国際賞 記念講演会

2003(19th)  
JAPAN PRIZE Commemorative Lectures

財団法人 国際科学技術財団  
THE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOUNDATION OF JAPAN

2003年(第19回)

# 日本国際賞 記念講演会

2003(19th)

JAPAN PRIZE Commemorative Lectures

平成15年4月23日(水) 14:00~16:15

日本科学未来館 みらい CAN ホール

14:00~16:15, Wednesday, April 23, 2003

Miraican Hall, National Museum of Emerging Science and Innovation

## ごあいさつ

人類の平和と繁栄は、すべての人にとって共通の願いです。そのために科学技術の果たす役割は極めて大きなものがあります。

当財団は、科学技術の進歩をめざし、日本国際賞による顕彰を行うとともに、科学技術に関する知識及び思想の総合的な普及啓発の事業を行っており、その一環として、毎年日本国際賞週間中に、日本国際賞受賞者による記念講演会を催しております。

日本国際賞は、科学技術において研究で独創的・飛躍的な成果を挙げ、科学技術の進歩に大きく寄与し、人類の平和と繁栄に著しく貢献したと認められる人に贈られる賞で、1985年にその第1回の授賞が行われました。

2003年（第19回）日本国際賞は、

「複雑さの科学技術分野」では、

“複雑系における普遍的概念の創出——カオスとフラクタル”  
の授賞業績により

ブノワ・B・マンデルブロー博士（米国）

エール大学数学部数理科学科教授

ジェームズ・A・ヨーク博士（米国）

メリーランド大学物理科学技術研究所数学、物理学教授

「医学における視覚化技術分野」では、

“磁気共鳴機能画像法の基礎原理の発見”の授賞業績で

小川 誠二博士（日本）

財団法人 濱野生命科学研究所 小川脳機能研究所所長

の3博士が受賞されます。

今回の受賞記念講演会には、この3博士をお招きして講演を行っていただきます。「日本国際賞受賞記念講演会」は、科学技術に関心をもつ一般の方々に受賞者が直接語りかけるパブリックスピーチの場として設定したもので、この講演会を通じて、多くの方、とくに次代の科学技術を担っていくであろう方々が多くの示唆をつかんでいただければ幸いに存じます。

2003年4月

財団法人 国際科学技術財団  
理事長 近藤次郎

## Message

Peace and prosperity are fundamental human aspirations, and the role that can be played by science and technology towards these ends is vast.

For the development of science and technology, The Science and Technology Foundation of Japan presents Japan Prize to promote the comprehensive spread and development of science and technology. Commemorative Lectures by the Prize Laureates are held annually during the Japan Prize Week.

The Japan Prize honors those who are seen to have made original and outstanding achievements in science and technology, and thus to the peace and prosperity of mankind.

The first Japan Prize was presented in 1985.

This year, 2003, the 19th Japan Prize will be presented to the following three laureates :

Category: Science and Technology of Complexity

Contribution: Creation of Universal Concepts in Complex Systems--Chaos and Fractals

Laureates: Dr. Benoit B. Mandelbrot (U.S.A.)

Sterling Professor of Mathematical Sciences, Mathematics Dept.,  
Yale University

Dr. James A. Yorke (U.S.A.)

Distinguished University Professor of Mathematics and Physics,  
Institute for Physical Sciences and Technology,  
University of Maryland

Category: Visualizing Techniques in Medicine

Contribution: Discovery of the principle for functional magnetic resonance imaging

Laureate: Dr. Ogawa, Seiji (Japan)

Director, Ogawa Laboratories for Brain Function Research,  
Hamano Life Science Research Foundation

The three laureates have been invited to deliver Commemorative Lectures to the general public.

We sincerely hope that these lectures provide inspirations and encouragement to those who will be leaders in science and technology in future generations.

Prof. Dr. Kondo, Jiro

Chairman

The Science and Technology Foundation of Japan

プログラム 4月23日(水)、日本科学未来館 みらいCANホール  
PROGRAM April 23 (Wed.) Miraican Hall, National Museum of Emerging Science and Innovation

開会 主催者挨拶 近藤次郎 財団法人国際科学技術財団理事長	14:00	Opening Remarks Prof. Kondo, Jiro Chairman The Science and Technology Foundation of Japan
受賞者紹介 上田昌明 財団法人国際科学技術財団事務局長	14:10	Introduction of the Laureates Mr. Ueda, Masaaki Executive Officer The Science and Technology Foundation of Japan
第一部 ブワノ・B・マンデルブロー博士 「フラクタルと粗さの計測」	14:15	Lecture I Dr. Benoit B. Mandelbrot “Fractals and the measurement of roughness”
ジェームズ・A・ヨーク博士 「カオス動力学的な現象」	14:45	Dr. James A. Yorke “The Phenomena of Chaotic Dynamics”
休憩(10分)	15:15	Break (10min.)
受賞者紹介 上田昌明 財団法人国際科学技術財団事務局長	15:25	Introduction of the Laureate Mr. Ueda, Masaaki Executive Officer The Science and Technology Foundation of Japan
第二部 小川誠二博士 「脳機能を知る一つの方法」	15:30	Lecture II Dr. Ogawa, Seiji “A way to learn brain function”
閉会	16:15	Closing

## 2003年（第19回）日本国際賞受賞者 2003 (19th) Japan Prize Laureate



ブノワ・B・マンデルブロー博士(アメリカ合衆国)

エール大学数学部数理科学科教授  
IBMトーマス・J・ワトソン研究所名誉特別研究員  
1924年11月生まれ

**Dr. Benoit B. Mandelbrot (United States of America)**

Sterling Professor of Mathematical Sciences, Mathematics  
Department, Yale University  
IBM Fellow Emeritus, TJ Watson Research Center,  
International Business Machines Corporation  
Born on 1924

### フラクタルと粗さの計測

私のライフワークは、主として、私が創始し、多方向に発展させ、そして命名したフラクタル幾何学である。この分野は、カオス理論と部分的に重複しており、粗さ（roughness）の理論の端緒と見ることができる。東ヨーロッパで生まれたことが私に燃えるような大志を抱かせるもととなった。時宜を得たフランスへの移住で命拾いをし、数学、科学、芸術などの特異であるが傑出した文化に出会った。後の米国への移住がこの大志と文化を開花させた。

20歳のとき、私の成績は私に平穏で快適な将来への権利をもたらしたが、それは私自身を抽象論に限定するということを前提としていた。幾何学と科学は滑らかで単純な現象に焦点を合わせていた。しかしながら、私は形式主義に反逆し、幸い私がおの才に恵まれていた視覚能力と想像力を利用することを望み、そして、ありのままの自然の粗さと限らない複雑さに魅了された。したがって、私は科学の踏みならされた道を捨て去ることを選び、以前に誰も住んでいなかった領域に引かれていった。独立独行の科学者として、私は非常に孤独で、困難に遭遇した。しかし、それが報いられ、50年前の私の博士論文を初めとして、私を複雑さの分野の開拓者にしてくれた。

フラクタル幾何学のいくつかのツールと概念が、私の目的と全く異なる多様な目的のために既に開発されていた。それらは、数学者が世界に背を向け、我々が見たり感じたりするものに無関係な理論を公表し始めた1875年～1925年に案出された強気な数学的奥義から生じた。私はそれらを方向転換させ、それらの数と融通性を増加させ、それらを具象的にし、多くの点で有用なものとした。私はまた、他の側面において、フラクタル性は人類発祥以来の経験の認識されていない部分であったことを徐々に発見した。今日では、フラクタルの世界は、数学、金融、多くの科学および多方面の工学を通して、多くの分野をつなぐ学環として認められていると思われる。

ユークリッドの標準幾何学がしばしば、灰色で、単調で、冷たく、無味乾燥であるとされるのはなぜだろうか？ 1つの理由は、それが雲、山、海岸線あるいは木の形を記述することができないことにある。雲は球でなく、山は円錐でなく、海岸線は円でなく、樹皮はなめらかでなく、稲妻は直線状には走らない。さらにより一般的には、自然の日常のパターンはあまりにも不規則で細分化されているので、標準幾何学では記述することができない。自然の多くの

ものの複雑さは、単に程度が高いだけでなく、全く異質である。実際的な目的のために、自然のパターンでは、長さの異なるスケールが無制限にある。

同じ見方が、文化の多くの側面、すなわち、ヒトによって表現され、あるいは創られたパターンに当てはまる。それらは、絵画、建築物、および音楽の多様な側面はもちろん、偶然性と決定論的カオスの幾何学から金融チャートの形およびインターネット上のデータの流れにまで及んでいる。

さらに具体的に言うならば、ポアンカレは、問題としては、他人に聞いてみる問題と、自問する問題の2つがあるという。後者の自問する問題とはありふれた事柄であり、次に示す最初のいくつかの例のように、答えが見つからないと子供の問題として放っておかれる傾向にある。

- 破碎された石、金属、ガラス、あるいはさびた鉄のような通常の物体の粗さをどのようにして計測し、比較するのか？
- 英国の海岸はどれくらい長い？
- 地球、より精密には、山、海岸線、川、あるいは2つの川の分水界の間の境界線はどのような形状であろうか？すなわち、「幾何学」という言葉はそれが約束すると思われることを提供することができるであろうか？
- 嵐のときの風速はどのようにして定義するのか？
- 雲、炎、あるいは溶接はどのような形状であろうか？
- 宇宙における銀河の密度はどれほどであろうか？

このリストに対して、最近、次のような他の問題が加えられた。

- カオス力学系における2つの吸引領域の間の境界をどのようにして特徴づけるのか？
- インターネット上のメッセージの流れの変動をどのようにして計測するのか？
- 金融市場での取引価格の変動率をどのように

して計測するのか？

- 平面上の酔歩の境界をどのようにして特徴づけるのか？

これらの問題は、我々の自然観を変化させること、そして、標準幾何学が無定形とみなす形をうまく取り扱うことを要求している。私は、この要求に広くかつ具体的に応えて、自然および文化の新たな幾何学を構想し、創出した。フラクタルは、不規則性および（または）細分の程度がすべてのスケールで同じであることを表現する「スケーリング」と呼ぶある形式の不変性を満たしている。フラクタルは、曲線、表面、あるいは切れぎれの「ダスト」であることもあり、さらにはいくつかのものは以前には名称がなかった非常に奇妙な形状を有している。例えば、地球のレリーフや実際の物理的破面はフラクタル的表面である。価格記録は、マルチフラクタル関数である。私は、山、雲および価格記録をどのようにして模倣するのかを示した。私はまた、荒々しい、魔術的な新しい形をどのようにして創るかも示し、数学に対して、困難で刺激となる多くの問題を与えた。

フラクタル性は科学のどこに位置するのか？多くの科学が、脳が感覚から受けとる基本メッセージを表現し、理解しようとする欲求から直接的に発生した。ほとんどの場合、次の3つの段階をかなり明確に識別することができる。すなわち、豊かな記述語彙を洗練化する段階、すべてがどのようにしてまとまっているかを再保証するメッセージを伴って「叙述」を洗練化する段階、および真の科学の段階である。

たとえば、視覚信号は大きさと形状、ならびに明度と色の語彙に結びつき、聴覚信号は音量と音律の高さの語彙に結びついた。これらの言葉の背後の概念（例えば、遠い昔から音楽家に知られているもの）が定量的になったときに、光学および音響学が生じた。同様に、重さと軽さ、および速さと遅さの感覚が力学に至り、熱さと冷たさの感覚が熱の理論に至った。質量と大きさの疑問の余地のない適切な尺度が、初期の書と歴史の幕開けを特徴づけている。均一な

---

熱さの適切な尺度である温度は、ガリレオにまでさかのぼる。このような背景に対して、先験的に同等に本質的である、滑らかさと粗さの感覚は無視された。

乱雑な感覚を定量的な科学に変換した最初の段階は、多くの科学でほぼ同じであった。音の科学は、完全であると主張したことはなかったが、健全な楽観主義により成功した。難しい問題を回避しつつ、歌と音楽における純粋な音を発見して久しい。弦楽器の理想的な音は、同時にかなり実際の、数学的に対処可能で、そして定量的計測につながる「アイコン」であることが証明された。それは、それが特徴づけたり、説明したりできない事実さえも明らかにする。より一般的に言えば、生の感覚が科学になるための長い過程の中での決定的な瞬間は、単純化と適用可能範囲の広さの間の適切な「妥協点」を見極める事に成功した時である。フラクタル幾何学は、温度が均一な熱さを計測するのと同様に、純粋な粗さを計測することができる初めて合意された数量なのである。



# Fractals and the measurement of roughness

---

My life work largely consists in fractal geometry, which I originated, developed in many directions, and named. This field overlaps the theory of chaos and can be viewed as the beginning of a theory of roughness. Being born in Eastern Europe gave me a burning ambition. A timely move to France saved my life and provided an idiosyncratic but outstanding culture in mathematics, science, and art. A later move to the USA allowed this ambition and culture to flower.

At age twenty, my grades earned me the right to a smooth and comfortable future but on the condition of limiting myself to abstractions. Geometry and science have focused on smooth and simple phenomena. However, I rebelled against formalism, wanted to take advantage of the visual skills and imagination with which I was blessed, and was fascinated by the roughness and bottomless complication of raw nature. I chose therefore to forsake all beaten paths of science and was drawn to territory where no one had dwelt before. As a maverick scientist, I had a very lonely and rough ride. But it has been rewarding and, starting with my doctoral dissertation fifty years ago, it made me a pioneer of the field of complexity.

A few tools and concepts of fractal geometry had been developed earlier for diverse purposes quite different from mine. They arose within unabashed mathematical esoterica that were devised from 1875 to 1925, when mathematicians began to turn their backs to the world and celebrate theories unrelated to what we see and feel. I turned them around, increased their number and versatility, and made them concrete and useful in many ways. I also found gradually that, in other guises, fractality had been an unrecognized part of human experience since the dawn of humanity. Today, the world of fractals may be perceived as a ring from art back

to art, through mathematics, finance, many sciences, and many corners of engineering.

Why is Euclid's standard geometry often described as grey, dull, cold, and dry? One reason lies in its inability to describe the shape of a cloud, a mountain, a coastline, or a tree. 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. More generally, everyday patterns of Nature are far too irregular and fragmented to be accounted for by standard geometry. The level of complexity of much in Nature is not simply higher but altogether different. For practical purposes, natural patterns show an infinite number of distinct scales of length.

Identical remarks apply to many aspects of culture, that is, patterns revealed or created by Man. They range from the geometry of chance and deterministic chaos, to the shape of financial charts and to traffic on the internet - not to mention diverse aspects of painting, architecture, and music.

More specifically, Poincaré remarked that there are questions that one chooses to ask and other questions that ask themselves. The latter can be mundane. The first few demonstrate that a question that has been without response tends to be abandoned to children.

- How to measure and compare the roughness of ordinary objects such as broken stone, metal, glass, or rusted iron?
- How long is the coast of Britain?
- What shape is the Earth, more precisely a mountain, a coastline, a river, or a dividing line between two rivers' watersheds? That is, can the term "geometry" deliver what it seems to promise?
- How to define the speed of the wind during a storm?
- What shape is a cloud, a flame, or a welding?

---

● What is the density of galaxies in the universe?

To this list, other questions were added recently:

● How to characterize the boundary between two basins of attraction in a chaotic dynamical system?

● How to measure the variation of the flow of messages on the Internet?

● How to measure the volatility of the prices quoted on financial markets?

● How to characterize the boundary of a plane random walk?

These questions challenge us to change our view of nature, to tame forms that

standard geometry considers as formless.

Responding broadly and specifically to this challenge, I conceived and developed a new geometry of nature and culture. Fractals satisfy a form of invariance called “scaling” which expresses that the degree of their irregularity and/or fragmentation is identical at all scales. Fractals can be curves, surfaces, or disconnected “dusts,” and some are so oddly shaped that we formerly lacked terms for them. For example, Earth’s relief and real physical fractures are fractal surfaces. Price records are multifractal functions. I showed how to imitate the mountains, the clouds and the price records. I also showed how to create wild and magical new shapes and provided mathematics with many difficult and inspiring questions.

Where does fractality stand among the sciences? Many sciences arose directly from the desire to describe and understand the basic messages, that the brain receives from the senses. In most instances, three stages can be distinguished reasonably clearly: elaboration of a rich descriptive vocabulary, elaboration of a “narrative” with a reassuring message of how everything holds together, and a proper science.

Thus, visual signals led to the vocabulary of

bulk and shape, and of brightness

and color; auditory signals, to the vocabulary of loudness and pitch. Optics and acoustics

arose when the notions behind those words (for example, those known to musicians since time immemorial) were made quantitative.

Similarly, the senses of heavy versus light and fast versus slow led to mechanics, and the sense of hot versus cold led to the theory of heat.

Unquestioned proper measures of mass and size mark early writing and the dawn of history; temperature, which is a proper measure of uniform hotness, dates back to Galileo. Against this background, the sense of smooth versus rough, which a priori equally essential, was neglected.

The first step that transformed a mess of sensations into a quantitative science was about the same for many sciences. While the science of sound never claimed to be complete, it went far with healthy opportunism. Side-stepping the hard questions, it long identified pure sounds in song and music. The idealized sound of string instruments proved to be an “icon” that is at the same time reasonably realistic, mathematically manageable, and leading to a quantitative measurement. It clarifies even those facts it fails to characterize or explain. More generally, in the long road from raw sensation to science, a key moment was marked by the successful identification of a proper “compromise” between simplicity and breadth of applicability. Fractal geometry is the first agreed-upon quantity able to measure pure roughness the way temperature measures uniform hotness.

## 2003年（第19回）日本国際賞受賞者 2003 (19th) Japan Prize Laureate



ジェームズ・A・ヨーク博士（アメリカ合衆国）  
メリーランド大学物理科学技術研究所数学、物理学教授  
1941年生まれ

**Dr. James A. Yorke (United States of America)**

Distinguished University Professor of Mathematics and  
Physics, Institute for Physical Sciences and Technology,  
University of Maryland  
Born in 1941

### カオス動力的な現象

カオスは、我々すべてが知っている人類の永遠の真実である。すなわち、小さい攪乱またはわずかな事象が大きい事象につながる。ドストエフスキーのカラマーゾフ兄弟（1879年）において、年老いた司祭が次のような重要な真実を語っている。

「ある場所でのひと触れが地球の果てにおける動きを引き起こす。」

1972年にローレンツは次のように問いかけた。

「ブラジルにいる一頭の蝶の羽のはばたきがテキサスにおいてトルネードを引き起こすだろうか？」

ベンジャミン・フランクリンは、次第に重要性を増していく事象のカスケードが偶然の事象からどのように発生し得るかを述べた。

「釘を欲したために靴を失った。

靴を欲したために馬を失った。

馬を欲したために騎手を失った。

騎手を欲したために戦いを失った。

戦いを欲したために王国を失った。

結局、蹄鉄の釘を欲したためにすべてを失ったのだ。」

これらの著者はすべて、小さい事象が大きい事象を引き起こす状況について語っている。そ

して、そのような振る舞いが広く見られる時、その状況を“カオス的”と呼ぶ。カオス的状況は、短期的には予測可能であるが、長期的には予測不能である。1975年頃まで、自分たちの研究対象である単純な状況がこのように振る舞う可能性があることを認識していた科学者は、ほとんどいなかった。Henri Poincare（アンリ・ポアンカレ）、Steven Smale（スティーブン・スモール）と彼の共同研究者、Yasha Sinai（ヤシャ・シナイ）と彼のモスクワの同僚、京都の Yoshisuke Ueda（上田暁亮）、MIT の Edward Lorenz（エドワード・ローレンツ）および他の何人かの人々のみがそのような振る舞いに気づいた。しかしながら、大多数の科学者および技術者は、彼らのシステムが長期的にみて高度に予測可能な振る舞いを有していると思っていた。

1970年代の後期に、理解のブレークスルーがあった。多くの人々がいくつかの非常に単純な数学的システムが複雑な挙動を示すことに気づいていたが、これらは自分たちとは無関係の例外的現象であるとみなされていた。種々の分野の科学者がこれらの単純なシステムのカオス的挙動が彼らの研究分野の複雑なコンピュータシミュレーションに反映されているように思われ

ることを認識したときに、ブレイクスルーが起こった。科学者（数学者を含む）は、彼らが研究していたシステムが、電流や摩擦や流速やインフレーション速度やその他彼らの研究に関連した何らかのパラメータ値の選択に応じて、カオス的であることを、突然実感し始めた。

我々のグループは現在、US National Weather Service によって創られたモデルを研究している。それは、全地球の天候のモデルである。このモデルはコンピュータプログラムであり、それを実行するには、地球上の約20,000の地点ならびにこれらの各地点上の約30点（地上約300m、地上約600m、地上約900m等）における温度、風速、気圧および湿度の推定値が必要となる。我々がこれらのすべて、合計で約3,000,000個の推定値を与えれば、モデルは10分後の各推定値を出力する。これらの新しい数値をコンピュータに送り返せば、さらに10分後、すなわち開始20分後の温度、風速、気圧および湿度の予測値を得ることができる。このプログラムを繰り返して適用することによって、将来の任意の望む時点における推定値が得られる。ただしこの予測は完全ではなく、約3,000,000個の良い推定初期値を有していることに強く依存している。もしこれらの推定値がわずかでも不正確であるならば、モデルを反復適用することによって誤差が拡大し、やがて、モデルはその予測能力を失うことになる。

この複雑なモデルの諸特性を理解することは非常に困難であるため、我々はしばしば、 $x_{n+1} = 3.9 x_n (1 - x_n)$  のような極めて単純化したモデルを調べる。このモデルは、3百万個の代わりに1個の数、すなわち  $x$  のみに依存する。0と1の間の値をとる数字  $x$  が現在のシステムの状態を表わし、 $3.9 x (1 - x)$  がある時間周期経過後のシステムの状態を表わすと想定してみよう。もし単純化したモデルが何らかの現実的意味を持つものであるならば、我々は  $x$  を正確に知ることはできないだろう。そこでもし任意の微小数値区間を選び、この区間における各数にこの関数を適用するならば、新しい区間の像が

得られ、そして、この過程を繰り返せば、さらに新しい区間の像が得られる。その過程を繰り返すにつれて、区間の大きさは通常増加し、適用するごとに長さがほぼ2倍になる。区間の長さは増加に増加を重ねる。0と1の間の任意の区間から始めても、最終的には大きな区間、すなわち、長さが少なくとも1/2の区間が得られる。

この性質がすべての微小区間に対して成り立つという事実の証明はなく、ほぼ確実に証明されないであろうが、少なくともそれが我々が観察することである。3.9という数を任意に少し変化させることができれば結果が異なることを、実は我々は知っている。決して大きくならない、いくつかの微小区間が存在するであろう。3.9に対する結果を立証するためには、3.9に任意に近い数、すなわち拡大特性が偽である数と区別する3.9の関連する特性を見つけなければならないだろう。

この挙動は予測可能性に関連している。写像を、たとえば1000回繰り返して適用する最初の点があって、あなたが知っているのはその点がある微小区間に存在することだけだとすれば、その区間のすべての点に写像を適用しなければならない。1000回適用後の微小区間の像はたいへん大きく、あなたが知っているのはその点があるその区間に存在するというだけで、予測する能力はほとんどない。

我々は、この単純な過程、すなわち、 $x$  を  $3.9 x (1 - x)$  で置きかえることを研究している。その理由は、それがカオスの現象の世界への窓であるからである。この過程の結果を確立する困難さは、より複雑な過程の結果を確立することがいかに困難かを暗示している。

天候に関する我々の研究は、カオスを間接的に用いて現在の天候のより良好な推定を得ることを目的としていている。現在の誤差がより小さければ、現在から数日間は予測の誤差がより小さい。我々はまた、生存種における DNA の文字 (ACGT) の配列を決定するより良い方法を発見するためにカオスの概念を用いている。

---

例えば、日本は米のドラフト配列を報告した。米国の2つのグループがヒトゲノムの配列のドラフトを得たと報告した。しかし多くの作業が残っている。我々は、天候について用いているのと同様なカオスの概念を使って、費用をあまりかけずに配列のより正確なドラフトを決定することができると思っています。

ある過程がカオス的であると決定することは通常良い知らせでないが、それは、その過程と共存しなければならないすべての人にとって重要な知識である。

# The Phenomena of Chaotic Dynamics

---

Chaos is an eternal human truth that we all know: small disturbances or minor events lead to large events. In Dostoevsky's *The Brothers Karamazov* (1879) an old priest relates an important truth:

“A touch in one place sets up movement at the other end of the Earth.”

In 1972 Lorenz asked:

“Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?”

Benjamin Franklin described how a cascade of increasingly important events might emerge from a chance event:

“For the want of a nail the shoe was lost  
For the want of a shoe the horse was lost.  
For the want of a horse a rider was lost.  
For the want of a rider the battle was lost.  
For the want of a battle the kingdom was lost  
And all for the want of a horseshoe nail.”

All of these authors speak of situations in which small events resulting big events and when such behavior is common, we call a situation chaotic. Chaotic situations are predictable in the short run but not in the long run. Until about 1975, few scientists realized that the simple situations they study could behave in this way. There were a few who were aware of such behavior, people such as Henri Poincaré, Steven Smale and his collaborators, Yasha Sinai and his colleagues in Moscow, Yoshisuke Ueda of Kyoto, Edward Lorenz of MIT, and several others. The great majority of scientists and engineers, however, felt that their systems had behavior that was highly predictable in the long run.

In the late 1970s there was a breakthrough in understanding. Many were aware that some very simple mathematical systems exhibited

complicated behavior, but these were considered irrelevant anomalies. The breakthrough came about when scientists in different fields recognized that the chaotic behavior of these simple systems seemed to be reflected in the complex computer simulations of their research areas. Scientists (including mathematicians) suddenly began to realize that the systems they studied were chaotic for some choices of current or friction or flow rate or inflation rate or whatever was relevant to their investigation.

Our group is currently investigating a model created by the US National Weather Service. It models the weather for the whole planet. It is a computer program and to run it one must have estimates of the temperature, wind velocity, pressure and humidity at about 20,000 points on the Earth and at about 30 points above each of these (roughly 300 meters above the ground, 600 meters above the ground, 900 meters above the ground, etc.). If we provide an estimate of all these numbers, roughly 3,000,000 numbers all together, then the model will output an estimate of what the same numbers will be 10 minutes later. Send the new numbers back into the computer and one gets a prediction for the temperature, wind velocity, pressure, and humidity another 10 minutes later, or 20 minutes after starting. Repeatedly applying the program gives estimates as far in the future as one wishes. It is not perfect and depends strongly on having good estimates of the 3,000,000 numbers. If these estimates are only slightly incorrect, the errors will be magnified upon iteration of the model and soon the model will lose its predictive power.

Because it is so difficult to understand the properties of this complicated model, we often examine extremely simplified models such as

---

$x_{n+1} = 3.9 x_n(1 - x_n)$ . This model only depends on one number,  $x$ , instead of three million. Imagine that the number  $x$  (between 0 and 1) represents the state of a system now and  $3.9 x (1 - x)$  represents the state of the system after the elapse of one time period. If the simplified model had real meaning, we would not know  $x$  exactly. If we choose any tiny interval of values and apply the function to each number in this interval, we get a new “image” interval, and if we repeat the process we get a new image interval. As we repeat the process the sizes of the intervals usually increase, roughly doubling in length from application to application. Growing and growing and growing. Start with any interval of numbers between 0 and 1. Eventually you will get a big interval, that is, an interval whose length is at least  $1/2$ .

At least that is what we observe, though there is no proof of the fact that it holds true for all tiny intervals and there almost certainly never will be. We do know that we can change the number 3.9 by arbitrarily small amounts and the result will be false. There will be some tiny intervals that do not grow ever larger. To prove the result for 3.9 we would have to find a relevant property of 3.9 that distinguishes it from the numbers arbitrarily close to it, numbers for which the expansion property is false.

This behavior is related to predictability. If there is an initial point that you apply the map repeatedly to, perhaps 1000 times, and you only know that the point lies in some tiny interval, then you must apply the map to all the points of the interval. Since the image of the tiny interval after 1000 applications will be huge and all you know is that the point is in that interval, you have little ability to predict.

We study this simple process, namely replacing  $x$  by  $3.9 x (1 - x)$  because it is a window into the world of chaotic phenomena. The difficulty of establishing results for this process hints at how difficult it is to establish results for more complicated processes.

Our study of the weather is aimed at using chaos indirectly to get a better estimate of what the weather is now. Less error now results in less error in a prediction for a few days from now. We are also using the ideas of chaos to find better ways to determine the sequence of letters (ACGTs) in the DNA in living species. Japan has for example reported a draft sequence for rice. Two groups in the United States reported obtaining a draft of the sequence for humans. Much work remains. We believe that the ideas of chaos that are similar to what we use for the weather will allow us to determine more accurate drafts of sequences at negligible cost.

Determining that a process is chaotic is usually not good news, but it is important knowledge for anyone who must coexist with the process.

# 2003年（第19回）日本国際賞受賞者 2003 (19th) Japan Prize Laureate



## 小川 誠二博士（日本）

財団法人 濱野生命科学研究財団 小川脳機能研究所所長  
1934年生まれ

## Dr. Ogawa, Seiji (Japan)

Director, Ogawa Laboratories for Brain Function Research,  
Hamano Life Science Research Foundation  
Born in 1934

## 脳の機能を知る一つの方法

脳についての機能的磁気共鳴映像法（fMRI）は脳機能を知る一つの方法であります。この方法は脳科学の分野で盛んに応用されるようになりました。脳が与えられた機能課題を遂行する時、脳のどの部分が使われるかを指摘し、そのような脳の部分の機能的役割をはっきりさせようとするものです。ただ、この機能的磁気共鳴映像法は電気的な神経活動を直接検出するのではなく、その神経活動に付随しておきる二次的な生理現象、すなわち代謝や脳還流の変化に依存しています。この種の脳機能測定法にとって大変運の良い状況を二つ、自然が用意してくれています。一つは、脳は多く機能ユニットの細分化されており、脳の機能活動が脳全体に亘って連動しておこなわれるのではないという事です。空間的区別がなければ画像になりません。第二の点は、上の代謝活動や脳還流の示す応答が機能ユニットの神経活動と非常に強く連繋しており、更に、両者の活動の空間的位置も大体同じであることです。最近この強い連繋のメカニズムが実験的に示されてきました。もしこの自然がつくりだした二つの状況の一つでも欠ければ fMRI のような脳機能の画像化は不可能です。

MRI（磁気共鳴映像法）は脳の解剖学的構造

を非侵襲的に測定できる最も良い方法です。これは水の水素核の磁気共鳴を使う画像法で、画像のコントラストは、水の磁気的特性が水の置かれた局所的環境で僅かずつかわる事を使って出されたものです。MRI の最も重要な使用目的は解剖学的構造を測る事ではありますが、その画像は一般に静的なものです。1980年代の終り近くに、私共はこのような MRI の画像のなかに動的な要素がないかと考え、MRI の信号で脳の生理状態、そして出来たら機能に関係して変わるものを探していました。このような現象のうちで出合ったものが、酸素と結合していないヘモグロビンの濃度でかわる画像のコントラストであります。

私共はこの画像コントラストを BOLD（Blood Oxygenation Level Dependent）コントラストと呼びました。これは血液中のヘモグロビンが関係する事です。酸素を放出したあとのヘモグロビン（デオキシヘモグロビン）は常磁性体であり、酸素を結合したヘモグロビン（オキシヘモグロビン）は反磁性体です。この事は Linus Pauling が1930年代に示しています。赤血球中のデオキシヘモグロビン分子が磁場の中に置かれると、小さな弱い磁石がするであろうように、血液の中や周りに小さな磁場に歪をつくりま



す。この歪のある所におかれた水の水素核はこの歪を磁気共鳴現象の中で感じ得るため、その結果そこでの MRI 信号強度が少し下がり、歪のない所と比べて画像上にコントラストを生ずるといったわけです。一方、反磁性体であるオキシヘモグロビンはその磁気的性格が周りの組織と大差ないため、そのような磁場の歪をつくらないとされます。デオキシヘモグロビンの濃度は組織の生理的状況、特に血流量（酸素の供給）と代謝活動（酸素消費量）によってかわります。そこで前にのべたように、脳のある部分で機能課題を果たすべく活動がおきれば、その場所でのこの種の生理現象に変化がおき、局所的な MRI 信号が変化をみせる、すなはち脳機能活動に関する測定を MRI に期待できるようになります。このことを提唱した1990年の初めには、PET (positron emission tomography) を使って、脳血流量の測定による脳機能の画像化が既になされておりました。

ヒトの脳でその機能活動を MRI で捉える事は、友人であるミネソタ大学の Ugurbil 教授とそこでの有能な若い研究者、R. Menon や S-G. Kim 等との共同研究によってなされ、その成功時の感激を共にしました。その結果が報告された1992年の春には2つのほかのグループ、ミルオーキー医科大学、ハーヴァード大の MGH、からの報告も殆ど時を同じくして出ました。この後の研究の進展はめまぐるしいもので、世界中の数多くの研究者が非常な努力をもって仕事に熱中し、現在 fMRI として知られているこの分野の発展に貢献しました。そしてその応用が脳科学に広がり亘って行ったわけです。

この間、BOLD 法に加えて、CBF (脳血流量) や CBV (脳血液体積) の変化を測るようなほかの fMRI 法も開発されてきました。BOLD 法はデオキシヘモグロビンによるので、循環系の毛細管から静脈にいたる下流側での変化を反映するので血流と代謝の変化両方の影響を受けます。血流量の測定は動脈側からの微小血管での現象に注目できます。これらの方法のうちで、現在、認知科学や臨床的研究実験などには、測

定感度や容易さ等の理由で BOLD 法が一番よく使われているようです。

脳機能を測る fMRI の特長の第一はそれが非侵襲的であることですが更に、脳内の構造的位置的確さ、実働時間測定である事、2-3秒で脳全体を測定できる速さ（あるいは断層画像一枚を0.1秒以下ではかる）で経時変化を追える事等の特長があります。これらの特徴は、現在知られている脳機能測定法に比べて fMRI が有利な測定法であるとする所以です。これにたいして fMRI の短所もいくつかあります。応答時間が秒単位で、神経活動が0.01秒の時間単位で進むのに対して、ずうっと遅い事もその一つです。fMRI は局所的におきる信号変化を捉えるといっても、これは生きた脳の脳循環や代謝の生理的変動の上に乗っている信号を取り出すわけで、その背景信号のふらつきと区別する必要がありますがこの分離法はまだ不充分です。

fMRI が非侵襲的である事は測定への壁を非常に低くします。それは健常者が被験者として実験に参加する事を可能にし、脳になんらかの異常のある人と健常者との比較も容易になります。臨床応用の可能性もここからきます。上記のような特長により、この fMRI 法は神経生理や認知科学での脳機能マッピングの研究には最も重要な測定手段となってきました。五感を刺激する入力に対する脳の一次野二次野での応答、運動の実行を司る運動一次野や運動の準備や制御に関する部野での賦活、神経物理現象の脳内での対応等から、高次認知機能活動である言語、音楽、短期および長期記憶活動、更に感情反応などに至る広汎な脳機能活動のマッピングが研究対象になってきています。

fMRI は脳機能を知る方法の一つと云いました。それによって私共は脳機能のほんの一側面にさわるわけです。すなはち fMRI が示す事は、ある課題にたいして脳の何処の部分が活動したかについてです。今後、その機能ユニットの役割がさらに細かくわかってくるでしょう。しかしそこで何が行われたかの内容については全然わかりません。脳自身が脳内での情報処理及び

---

交換に使う言葉がどのようなものであるかについては脳科学の分野でもまだはっきりしていません。脳機能画像法の出きる事は、神経科学者が「脳はどのように働いているのか」の最終的理解への路を築いていくにあたって、その基礎になる知識を提供することです。これも大いに意義のあることと信じます。

## A WAY TO LEARN BRAIN FUNCTION

---

Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) of the brain is a way to learn brain function. It has been extensively used in brain science. It points out which parts of the brain are used when the brain performs a given functional task. It can identify the functional roles of such brain units. However, fMRI does not detect directly the electrical neuronal activity induced by the task, but it depends on the secondary physiological responses, such as changes in metabolic activity and cerebral blood circulation, associated with the neuronal activation. There are two very fortunate situations nature provided for us. One is the fact that the brain is subdivided in distinct many functional units rather than it works as a whole. If there is no spatial distinction, there is no point to make image. The second is that the responses in metabolic activity and blood circulation are very tightly coupled to and roughly co-localized with the neural system activity of these functional units. Recently this feature of the tight coupling has been experimentally shown. If any of the two fortunate situations is absent, so-called functional neuro-imaging does not exist.

MRI is known as the best non-invasive method to measure anatomical structure of the brain. It can depict the detailed structure with contrast based on the subtle variation of magnetic characters of water protons. Such magnetic characteristics depend on the local environment in which these water molecules are placed. Although to measure anatomic structure is the most important objective for MRI usage, the image is rather static. In late 1980's, we were seeking some dynamic aspect in MR images, some signal changes that could depend on the physiology or hopefully on the function of the brain. One of such phenomena we encountered was the image contrast that depended on the concentration of hemoglobin with ferrous iron

without bound oxygen.

We called the image contrast BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) contrast. It is due to the presence of hemoglobin in the blood. Hemoglobin after unloading oxygen to the tissue is paramagnetic (deoxyhemoglobin). On the other hand, hemoglobin combined with oxygen (oxyhemoglobin) is diamagnetic. This magnetic property of hemoglobin that is determined by the state of the ferrous ion at the middle of the heme has been known since Linus Pauling showed it in 1930's. When deoxyhemoglobin molecules in red cells are placed in a magnetic field, they induce some small magnetic field perturbation in and around the blood vessels, as small weak magnets could do. Water protons in such environments sense these field disturbances. As a consequence, MRI signals in these locations show small intensity drop and make image contrast relative to the location with no signal drop. On the other hand, diamagnetic oxyhemoglobin whose magnetic property is not much different from the surrounding tissue does not produce the field disturbances. The amount of deoxyhemoglobin varies with the physiology, namely the blood flow (oxygen supply) and metabolic activity (oxygen consumption). Furthermore, when a part of the brain is activated to perform a functional task, the physiology at the location changes accordingly as mentioned earlier. Therefore, MRI signal can have some sensitivity toward the functional activity in the brain. At the beginning of the last decade, we postulated the potential of MRI for such functional imaging as PET (positron emission tomography) that was already known at that time.

The success in capturing functional responses in the human brain was brought out by the collaboration with Prof. Kamil Ugurbil at University of Minnesota and his young able

---

associates, such as Drs R. Menon, S.G. Kim and others. We all shared the excitement at the time of the success. By the time the result was published in 1992, two other groups, Milwaukee College of Medicine and Massachusetts General Hospital of Harvard University, reported their results within a few weeks apart. Immediately afterwards, a large number of enthusiastic scientists worked hard to develop the field now known as fMRI and the scope of the research field has expanded widely into the brain science.

Meanwhile, alternate methods for fMRI in addition to BOLD have been developed. They include those to measure changes in CBF (cerebral blood flow) and CBV (cerebral blood volume). BOLD imaging which depends on deoxyhemoglobin reflects the change in the downstream side of the circulation from capillaries to veins. CBF measurements focus on the change in arterial side of the blood circulation. Among these methods, BOLD imaging, because of its sensitivity and convenience of measurements, is still most popular for application in cognitive neuroscience and clinically oriented research.

The features of fMRI are that the measurement is completely non-invasive, comes with reliable structural information at relatively high spatial resolution and is real time measurement at a rate of covering whole brain area in a few seconds or one slice image within less than 100 milliseconds. These features make fMRI be a choice among the methods now known for functional study of the brain. On the other hand, fMRI also has shortcomings, mostly due to the fact that it is based on the secondary response to the neural activation. These include a slow response time of seconds rather than tens of milliseconds in which neural processes proceed. Another is the presence of physiological signal variation at similar size to

the fMRI signal. The local signal change of fMRI is sitting on the occasional variation of live brain circulation. It requires further technical advances to distinguish the two better.

Non-invasiveness of fMRI measurement allows normal willing volunteers to participate in the examination as well as those people with some neuro-disorder. The potential for the clinical application can be seen in the future. These merits as above have made the method be a major tool for neurophysiologists or cognitive neuroscientists to study the functional map of the brain. Such mapping can cover the primary and secondary areas for sensory inputs, motor areas for execution and processing areas for preparation and control of motor motion, areas in the brain attributable to psychophysical phenomena. Mapping study further includes areas for higher order cognitive function such as language, short- and long-term memory and even emotion. FMRI does not detect the activity of individual neurons, but measures the system activity of functional units and therefore it fits for the mapping.

FMRI is a way to learn brain function as said earlier. It is 'a' way and also only one aspect of the brain function can be touched with it. That is to show the location where the action for a specific task is. In the coming years it will refine the knowledge of the specificity of the functional site further, but never tells the content of the processing or what is being done at the activated area. What kind of language the brain is using to communicate and to process within the brain itself is yet to be found in brain science in general. Functional neuro-imaging will contribute to lay down some parts of the framework on which neuroscientists will build the way to the final understanding of how brain works.

# MEMO

財団法人 国際科学技術財団

〒105-0001 東京都港区虎ノ門4丁目3番20号 神谷町MTビル4階

THE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOUNDATION OF JAPAN

Kamiyacho MT Building, 4th Floor, 3-20, Toranomon 4-chome, Minato-ku, Tokyo, 105-0001 JAPAN

Tel: 03(3432)5951 Fax: 03(3432)5954

Internet: <http://www.jstf.or.jp>

E-Mail: [info@jstf.or.jp](mailto:info@jstf.or.jp)

禁無断転載