



1990年 日本国際賞 記念講演会

財団法人 国際科学技術財団

1990
JAPAN PRIZE
COMMEMORATIVE LECTURES

THE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOUNDATION OF JAPAN

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、その一つとして、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、科学技術の研究で独創的・飛躍的な成果を挙げ、科学技術の進歩に大きく寄与し、人類の繁栄と平和に著しく貢献したと認められる者に贈られる賞で、1985年にその第1回の授賞が行われました。

本年は、総合化技術分野では、

M・ミンスキー博士（アメリカ合衆国）

マサチューセッツ工科大学教授

地球科学分野では、

W・J・モーガン博士（アメリカ合衆国）

プリンストン大学教授

D・P・マッケンジー博士（イギリス）

ケンブリッジ大学教授

X・ルピション博士（フランス）

エコール・ノルマル・シュールペリエール教授

の三博士が共同受賞されました。

今回の記念講演会には、この四博士をお招きして講演をして頂きます。「日本国際賞記念講演会」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頂ければ幸いに存じます。

1990年4月

財団法人 国際科学技術財団

理事長 横田喜三郎

Message

Peace and prosperity are the fundamental aspirations of all mankind and the role that can be played by science and technology towards these ends is vast and boundless.

For the development of science and technology, the Science and Technology Foundation of Japan operates the activities to present the Japan Prize and as well to promote the comprehensive spread and development of thought and information involving science and technology. As the part of such efforts of promotion, a Commemorative Lecture by the Prize Laureates is held annually during the Japan Prize Week.

The Japan Prize is the award to honor those from all over the world who are recognized to have made original and outstanding achievements in science and technology and who have made substantial contributions to the advancement of science and technology and thus to peace and prosperity of mankind. The first Japan Prize was presented in 1985.

This year, 1990, the Japan Prize was presented to four Laureates in two Prize Categories as follows:

Category: Technology of Integration – Design, Production and Control Technologies
Laureate: Dr. Marvin Minsky, Professor of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Professor of Architecture and Planning, MIT Media Laboratory.

Category: Earth Science
Joint Laureates: Dr. William Jason Morgan, Knox Taylor Professor of Geography, Princeton University
Dr. Dan Peter McKenzie, Professor of Earth Sciences, Cambridge University
Dr. Xavier Le Pichon, Directeur du Département de Géologie, Ecole Normale Supérieure

The four doctors have been invited to speak at the Commemorative Lectures, which are intended to offer a venue for the Laureates to speak directly to the general public who are interested in science and technology. We sincerely hope that these Lectures can provide inspirations and encouragement to those who will be the potential leaders in science and technology of the future generations.

Kisaburo Yokota
Chairman
The Science and Technology
Foundation of Japan

講演会プログラム

東京-4月18日 [水]

霞ヶ関「イイノホール」

- 13:30 開会
主催者挨拶
川村皓章 国際科学技術財団
常務理事
- 13:35 講演者紹介
浅田 敏 東海大学開発技術研究所
教授
- 13:45 講演
W・J・モーガン博士
「プレートテクトニクスから地球
ダイナミクスへ」
- 14:10 講演
D・P・マッケンジー博士
「プレート境界下での溶融」
- 14:35 講演
X・ルピション博士
「海溝プロジェクトとプレートテ
クトニクス」
- 15:00 休憩 (15分)
- 15:15 受賞者紹介
佐田登志夫 理化学研究所理事
- 15:20 講演
M・ミンスキー博士
「知能の過去と未来」
- 16:00 閉会

大阪-4月19日 [木]

大阪ツインタワー前「MIDシアター」

- 18:00 開会
主催者挨拶
川村皓章 国際科学技術財団
常務理事
- 18:05 講演者紹介
白井良明 大阪大学工学部教授
- 18:10 講演
M・ミンスキー博士
「知能の過去と未来」
- 18:50 休憩 (15分)
- 19:05 講演者紹介
松尾禎士 電気通信大学
電気通信学部教授
- 19:15 講演
W・J・モーガン博士
「プレートテクトニクスから地球
ダイナミクスへ」
- 19:40 講演
D・P・マッケンジー博士
「プレート境界下での溶融」
- 20:05 講演 (25分)
X・ルピション博士
「海溝プロジェクトとプレートテ
クトニクス」
- 20:30 閉会

PROGRAMME

TOKYO April 18 (Wed.)

Iino Hall

- 13:30 Opening Remarks
Mr. Tsuguaki Kawamura
Executive Director
The Science and Technology
Foundation of Japan
- 13:35 Introduction of the Laureates
Dr. Toshi Asada
Professor
Tokai University
- 13:45 Lecture: "From Plate Tectonics to
Geodynamics"
Dr. William Jason Morgan
- 14:10 Lecture: "Melting Beneath Plate
Boundaries"
Dr. Dan Peter McKenzie
- 14:35 Lecture: "Kaiko Project and Plate
Tectonics"
Dr. Xavier Le Pichon
- 15:00 Break (15 min.)
- 15:15 Introduction of the Laureate
Mr. Toshio Sata
Executive Director
The Institute of Physical and
Chemical Research
- 15:20 Lecture: "The Past and Future of
Intelligence"
Dr. Marvin Minsky
- 15:30 Closing

OSAKA April 19 (Thu.)

MID Theater

- 18:30 Opening Remarks
Mr. Tsuguaki Kawamura
Executive Director
The Science and Technology
Foundation of Japan
- 18:05 Introduction of the Laureate
Dr. Yoshiaki Shirai
Professor
Osaka University
- 18:10 Lecture: "The Past and Future of
Intelligence"
Dr. Marvin Minsky
- 18:50 Break (15 min.)
- 19:05 Introduction of the Laureate
Dr. Sadao Matsuo
Professor
The University of Electro-
Communications
- 19:15 Lecture: "From Plate Tectonics to
Geodynamics"
Dr. William Jason Morgan
- 19:40 Lecture: "Melting Beneath Plate
Boundaries"
Dr. Dan Peter McKenzie
- 20:05 Lecture: "Kaiko Project and Plate
Tectonics"
Dr. Xavier Le Pichon
- 20:30 Closing

1990(第6回)日本国際賞受賞者

総合化技術分野

受賞対象業績：

「人工知能という学問の研究の確立とその基本理論の提案」

1990 Japan Prize Laureates

Technology of Integration — Design, Production and Control Technologies

Establishment of an academic field named artificial intelligence and the proposal of fundamental theories in that field



マービン・ミンスキー博士 (アメリカ合衆国)

マサチューセッツ工科大学教授 1927年生まれ。1961年に「人工知能へのステップ」という論文を発表した博士は、人工知能という学問分野を世界に広め、「人工知能の父」と呼ばれている。1979年代に入ると、人工知能が扱う対象も複雑になり、コンピュータも人間のような膨大な知識をもち、必要に応じて適切な知識を取り出して、使わねばならなくなった。知識の重要性をいち早く知った博士は、知識をコンピュータ内に表現し、利用するための枠組みとして、「フレームの理論」を提案した。1980年代に入ると、人工知能の実用化がさらに加速され、機械自身に学習させることが注目されるようになった。博士は、理論的思考だけでなく、感情や自我などを含む心(mind)の研究が必要であるとして、「心の社会」という著書の中で、心は簡単な情報処理をする小さなコンピュータが多数集まってできており、それが互いに連絡をとりながら動いているという心のモデルを提案した。これにより人工知能の分野が広がり、今後の発展が期待されている。

Dr. Marvin Minsky (U.S.A.)

Professor of Electrical Engineering, MIT. Born in 1927.

Dr. Marvin Minsky published his paper "Steps Toward Artificial Intelligence" in 1961 that gave Artificial Intelligence (AI) world wide exposure and has earned the title of "father of AI". Artificial Intelligence became increasingly complex by the 1970s, involving vast amounts of knowledge and the need to use specially appropriate pieces of knowledge at particular times. Professor Minsky proposed a theory of frames for the effective representation and utilization of knowledge in computers. In the 1980s, AI has produced many more practical application systems and many researchers have turned forward the question of how to make machines learn more by themselves. In addition to the development of the theory and practical application systems, he emphasized necessity of study on human mind including emotion and self consciousness. In his book "Society of Mind," he has proposed a model of the human mind which consists of many small agents (computers) working together by communicating with each other. His proposal is expected to further expand the AI technology to other fields of science and to help promote AI applications.

知能の過去と未来

Marvin Minsky

人工知能(AI)の研究者は人によって異なる目標をもっています。知的と呼ばれるようなことをもっとたくさん機械にやらせようとしている研究者もいれば、人間がどうしても知的な行動ができるのかを解明しようとしている研究者もいます。さらに、機械が自分で自分をプログラムし、経験から学んで成長するように仕向けることによって、コンピュータ・プログラミングという仕事を撲滅してしまうと考えている研究者もいます。すでに多くのコンピュータ・プログラムが、知能を必要とする(と人々が思う)ような仕事を行なっています。今日、私たちはすでに機械に、チェスを指させたり、電子装置を設計させたり、幾何学の定理を証明させたり、病気の診断をさせたり、地質調査の結果から鉱物資源を発見させたり、工場の作業ロボットを制御させたりすることができるのです。しかし、どんなプログラムでも、ある制限された専門領域の外ではなにもできません。つまり、人間がもつような弾力性や能力的多面性をもっていないのです。私たちは現在、ものを「見る」ことのできるコンピュータはもっていますが、それらは限られた環境の中でしかものを見ることができないのです。どんな子供にでもできるような汎用の画像理解——たとえば、ふつうの家庭にある雑多なもの、つまり、家具、台所用具、衣服、人、飾りつけなどを認識すること——ができるシステムを、まだもっていないのです。家を掃除したり、夕食を作ってくれたり、幼児の世話をしてくれたり、最も単純な子供向けの物語を理解したりするロボットがまだ存在しない理由は、まさにこれなのです。熟練したエキスパートと対等の能力を実現するよりも、こんな簡単なことを機械にやらせることのほうが難しいのは

いったいどうしてなのでしょう。それは、機械に常識をどう与えるかについて、私たちがまだよくわからないからです。

人工知能のルーツは1940年代のサイバネティックス運動にあります。サイバネティックスは、サーボ機構の理論から出てきた「アナログ」のアイデアと、ウォレン・マカロック、およびその同僚のウォルター・ピッツ、ジェローム・レトビン、オリバー・セルフリッジといった脳の研究者の理論から出てきた新しい「デジタル」のアイデアを組み合わせようとしたものでした。しかし、この理論が実験されたのは、1950年代になってコンピュータが使えるようになってからでした。それからすぐ、何人かの研究者はコンピュータ自身に問題を解かせる研究を始めました。初期のAI研究者のとしたアプローチは2つありました。1つは、プログラムが進化の過程を経て自分自身を改良していく「自己組織化システム」を目指すアプローチです。ところが、理論がまだあまりに弱体であったことと、コンピュータがまだあまりにも遅かったことから、ほとんどの実験は失敗に終わってしまいました。そのため、この方向の研究は長い間行なわれませんでした。

もう1つのアプローチは「ヒューリスティック探索」と呼ばれるものです。そこでは、プログラムは1つの問題を解くのにたくさんの異なる手順を試し、そのうちのどれが成功したかを見るだけでした。たくさん問題がこのアプローチで解かれました。しかし、当然のことですが、探索は、探索すべきもののサイズが指数的に大きくなってくると、非現実的になってしまいます。これを克服するために、1960年代のAI研究者は、すべての可能性をシラミつぶしに調べるのではなく、見込

みのありそうなところだけをうまく選んで調べるとい手法を開発しました。たとえば、アレン・ニューエルとハーバート・A・サイモンは、目指す目標と現在の状態とのいろいろな差を計測するという「目標指向型」の探索手法を開発しました。こうすると、プログラムは問題をまるごと考える代わりに、複数個の差を別々の問題として扱うことができるのです。この時代のもう1つのアイデアが「計画立案」です。これは実際の問題にあたる前に、それを少し単純化した問題を計画立案プログラムがまず解いて、それからその解をもとの問題に適用する、というものです。これらの手法は解を得るための計算時間を何桁もスピードアップし、プログラムを作った人間よりもその問題に対処する腕前を上げました。しかし、こういうことをするためには、プログラミング自身にたくさんの新しいアイデアが必要でした。だから、AI研究者のコミュニティは、ソフトウェア工学に関して結果的に多くの貢献をすることになったのです。たとえば、マルチプロセッシング、時分割（タイム・シェアリング）、斬新なデバッグ手法、記号処理言語、画像入出力装置、ワード・プロセッシング、そしてコンピュータによる計算そのものに関する新しい基礎理論、自然言語処理、画像認識、ロボット工学などがあります。

しかし、1970年代になって、一般的な原理を使って達成できるものには限界があることがわかってきました。どんなに賢い人でも、未知の分野の問題に対してはエキスパートにはかなわないのです。そこで、AI研究は、いろいろな種類の問題を解くために、人または機械がどんな知識をもたなければならないか、というテーマに関心をもつ時代に移りました。そして、AI研究者はコンピュータ内部に「知

識を表現する」たくさんの新しい手法を開発しました。たとえば、「IF-THEN型」のルールはいろいろなエキスパートの技術をシミュレートするのに役立ちました。「意味ネットワーク」は、概念とそれらの関係が織りなす複雑なネットワークに関する推論に有用でした。数学的なタイプの問題には、演繹的な推論を自動的に行なってくれる「論理型プログラミング言語」を使って知識を表現するのが有用でした。私が1970年代始めに発明した「フレーム」という知識表現法は、知識を典型的な状況の枠組みで表現し、具体的な応用における個々の知識が典型的な状況から違っているところだけを憶えていればよい、というものです。1980年代になって、こういった基礎研究の積み重ねはエキスパート・システムという応用に花開き、商業的にも成功するようになりました。エキスパート・システムはいくつかの難しい問題をちゃんと解くことができました。しかし、どのプログラムも、人が持っているような能力の多面性と臨機応変さをもっていません。どれも非常に限られた狭い領域や分野でしかうまく機能しないのです。

問題の1つは、どのシステムも経験から学ぶことができなかつたことです。だから1980年代、AI研究者は機械に学習させる方法の研究にとりかかりました。1つのアプローチは「コネクショニスト・ネットワーク」と呼ばれる知識表現を開発することでした。これは脳の中の低レベルの概念をいかにシミュレートするか、という研究です。このアプローチは多数のパターンを認識する学習には大きな成功をおさめましたが、言語的な推論に必要な高レベル推論や計画立案プロセスをサポートすることはできませんでした。こういう目的のために、ほかの研究者は意味ネットワー

ク、「事例にもとづく」推論などの技法を使った高レベル学習システムの研究を行ないました。

もう1つの問題は、こうした手法にはすべて一長一短があって、機械に「常識」をもたせられる見込みがなさそうなことです。だから、私の著書『心の社会』で説明したように、これがいまの私の研究テーマになっているのです。私の基本的な結論は、「人間の心は、単一の知識表現法あるいは単一の推論法に基づいて動いているわけではない」ということです。人間の脳の偉大さは、その機能が何百種類もの異なる動作機構から生まれてきたところにあります。おのおのの心的動作機構（メンタル・エージェンシー、心の中の動作主体）は、ある特定の問題を解くのに特化されているのですが、もっと重要なのは、おのおのの動作主体がほかの動作主体からどうやったら助けを得られるかをちゃんと学ぶことができることなのです！ これによって、ちょうど幼児から大人に成長する間に子供がやってい

るように、心は多数の（低レベルおよび高レベルの）戦略と表現を（個々の限界を越えた形で）十分に活用できるのです。これが私たちの能力的多面性の秘密だと私は信じています。こういうアイデアがどれくらいうまくいくかについては、十分な実験がまだなされていませんが、もし、それがうまくいくのだったら、知的機械は21世紀には工学的な射程に入ってくるでしょう。

しかし、その影響は非常に大きいので、私たちはこのことについてしっかり考えておかなければなりません。採鉱から、農業、家の掃除、工場生産、さらには基礎科学研究までのすべてを人工的作業者がやってくれるようになったら、私たちの生活はどう変化するのでしょうか？ 私たちがいままで成し遂げてきたことが、衰退あるいは崩壊していくのでしょうか？ それとも——私はそう期待し、かつそう予測しているのですが——私たちがいまだかつて予想しなかったような偉大な新しい文化が生まれるのでしょうか？

The Past and Future of Intelligence

Marvin Minsky

Workers in the field of Artificial Intelligence have several different goals. Some of them want to make machines do more of the things that people call intelligent. Others hope to understand what enables people to do such things. Yet other researchers want to eliminate the job of programming computers, by making machines that program themselves, and grow by learning from experience. Many computer programs already exist that do things most people would regard as requiring intelligence. Today, we already have machines that play chess, design electronic devices, prove theorems in geometry, and diagnose diseases, use geological surveys to find mineral deposits, and control robots working in factories. But none of those programs works at all well outside some limited specialty. They all lack the liveliness and versatility that people have. We now have computers that can "see" in factory environments — but none that do what children can — such as recognize the things in a typical home: furniture, kitchenware, clothing, people, decorations etc. This is why there are no robots that can clean a house, serve dinner, take care of an infant, or understand the simplest stories we tell our children. Why has it been harder to make machines do such childish things than to make them compete with trained experts? It is because we do not yet know how to provide our computers with common sense.

The field of Artificial Intelligence had roots in the Cybernetics movement of the 1940s, which was trying to combine "analog" ideas from the theory of servomechanisms with the new "digital" ideas that were emerging from the theories of brain scientists like Warren McCulloch and his associates Walter Pitts, Jerome Lettvin, and Oliver Selfridge. But it was only when computers first became available in the 1950s that those theories could actually be implemented. Soon some people started to try to make computers solve problems for themselves — and these first AI researchers set out in two directions. One approach was to try to develop "self-organizing systems" — programs that would improve themselves, through evolutionary processes. Most of these experiments failed because the theories were still too weak (and the computers were still too slow) — and that line of research went out of style for many years.

The other approach, called "heuristic search", was to write programs that try many different ways to solve a problem — and then simply see

which one worked. Many problems were solved this way, but of course, this becomes impractical when the search-size grows exponentially. To get around this, the AI workers of the 1960s had to discover ways to predict which attempts might work best, instead of trying every possibility. One way to do this, developed by Allen Newell and Herbert A. Simon, used a "goal-directed" search technique that measured various "differences" between the present situation and the desired final state. Then, the program could often deal separately with each of those differences, instead of having to deal with the whole problem all at once. Another idea of that era was called "planning". Before going to work on an actual problem, a planning program first solves a simplified version of it — and then tries to adapt that solution to the original problem. These methods often worked so well that the programs were more proficient than their programmers. But to do all this required new ideas about programming itself, and the AI community contributed many advances in software technology, including basic ideas about multiprocessing and time-sharing, new debugging techniques, symbol-manipulation languages, graphical input and output devices, and word processing — as well as new fundamental theories about computation itself, and about natural language processing, visual pattern recognition, and robotic technology.

But the 1970s also revealed limits to what we could accomplish by using general principles. Even a very smart person cannot compete with experts in an unfamiliar specialty. So the next era in AI research was concerned with what kinds of knowledge a person — or a machine — must possess to be able to do solve various kinds of problems. Soon, AI researchers invented many new ways to "represent knowledge" inside computers. For example, libraries of "If-Then" rules were useful for simulating many kinds of expert skills. "Semantic Networks" were useful for reasoning about complicated networks of concepts and relationships. For mathematical types of problems, it was useful to represent knowledge using new "logic programming languages" that could automatically make logical deductions. Certain structures called "frames", which I invented in the early 1970s, represent knowledge in terms of typical situations so that we need only remember how each particular application differs from some more typical situation. In the 1980s, all this basic research

culminated in the appearance of many commercially successful applications — usually called “Expert Systems” — each of which can solve certain types of problems. But none of these programs seemed to promise to lead to the kinds of versatility and resourcefulness that people have. Each program worked effectively only within some small domain or specialty.

One problem was that none of those systems were able to learn from experience — so the AI researchers of the 1980s now set out to look for ways to make machines learn. One approach was to develop knowledge representations of a type called “connectionist networks,” which are intended to simulate how low-level concepts are encoded in brains. These have seen substantial success in learning to recognize many kinds of patterns, but seem unable to support the kinds of higher level reasoning and planning processes that must be involved in verbal reasoning. For such purposes, other researchers have been developing higher-level learning systems based on semantic networks, “case-based” reasoning, and on other techniques.

The other problem was that, while each of those schemes has its own advantages and limitations, none of them seemed to offer much promise of leading to machines that have “common sense”. So this became the subject of my own research, as explained in my book, “The

Society of Mind”. My basic conclusion is that the human mind does not work on the basis of any single way to represent knowledge, or single way to do reasoning. Instead, the greatness of the human brain comes from having evolved hundreds of different kinds of machinery. Each of these mental “agencies” is specialized for solving certain kinds of problems — but more important, each agency is able to learn how to get help from other agencies! In this way, as each child develops from infant to adult, its mind can exploit the advantages, and escape the limitations, of many different types of low and high-level strategies and representations — and this I believe to be the secret of our versatility. There have not yet been enough experiments to find out how well such ideas will work — but if they work well, it seems possible that smart machines with common sense could arrive within the next century.

The effect of this could be so large that all of us should think about it. How will our lives become transformed, when we have artificial workers to do everything from mining, farming, house-cleaning, and factory production to basic scientific research? Will this lead to the decline and disintegration of what humankind has accomplished so far? Or will it lead, as I hope and expect, to a new kind of civilization, grander than anything we have ever imagined?

1990年(第6回)日本国際賞受賞者

地球科学分野 共同受賞

受賞対象業績:

「プレートテクトニクスの創始とその発展に対する貢献」

1990 Japan Prize Laureates

Earth Science (Joint Award)

Initiation of the theory of plate tectonics and contributions to its development



ウィリアム・ジェイソン・モーガン博士 (アメリカ合衆国)

プリンストン大学教授 1935年生まれ。

博士は、地球表面を約20個のプレートに分割し、それらのプレートの運動の解析を試みて、プレートの相対的運動からプレートが剛体的に地球表面に沿って回転運動していることを明らかにし、プレートの絶対的運動を決定した。この研究により、海嶺、沈み込み帯、トランスフォーム断層等がプレートの運動によって統一的に説明されることが示され、プレートの考えの重要性が広く認識され、この考えに基づく研究が、その後爆発的に発展するきっかけとなった。

Dr. William Jason Morgan (U.S.A.)

Professor at Princeton University.

Born in 1935.

Dr. Morgan began his revolutionary work by dividing Earth's outer shell into some 20 plates, analyzing their movements as rigid, rotating segments of the shell, and measuring absolute velocities of plate motion. Mid-oceanic ridges, subduction zones and transform faults all came to be interpreted as results of the movements of these plates. The great significance of Dr. Morgan's theory became widely recognized and his work subsequently triggered numerous studies in a variety of fields.

プレートテクトニクスから地球ダイナクスへ

William Jason Morgan

プレートテクトニクスという新しい科学は、大陸移動説を定量化しました。今では、海底地磁気の縞状異常の幅から中央海嶺での海底拡大速度を求め、それに基づいて、海溝でのプレートの収束速度やトランスフォーム（水平ずれ）断層でのずれ運動を予言することができます。プレートテクトニクスで最も重要な仮定は、「プレートが完全に剛体であって、内部変形をしない」ということです。だからこの理論では、“すべての”テクトニックな（構造的な）活動はプレート境界で起こると仮定されています。幅1万kmにも達する北米プレートや太平洋プレートを見ても、その変形は年に1cm程度しかありませんが、プレート境界をはさむ幅約100kmの領域では、年に5~10cmも変形するのです。つまり、ほとんどの活動はプレート境界で起こることになります。ただし、“すべての”と申しましたが、実際は80~90%のことです。プレート内にも、地震とかリフト（割れ目）的な地形（たとえば米国のベーズン・アンド・レインジ地域、東アフリカ・リフト、背弧拡大軸など）は存在します。しかし、プレート境界での地震の数や大きさ、リフティングや造山活動に比べれば、2次的（10%程度）なものにすぎないわけです。

プレートテクトニクスによると、いくつかの現象について明確な予言をすることができます。だからプレートテクトニクスは“検証可能”です。異なる海嶺をまたいだループから計算されるプレート運動は一致するでしょうか？ 予言されたプレート間相対運動は、プレート境界での地震の初動分布をうまく説明できるでしょうか？ ホットスポット起源とされる島々の配列方向は、理論から予言される方向と一致するでしょうか？ プレート

テクトニクスによるモデルは、80~90%のレベルでは、これらのテストに合格したのです。また、「硬くて一体となって運動する厚さ100~200kmの表層殻」という概念からは、テクトニクスのさまざまな側面を説明する定量的なモデルが生まれました。たとえば、海洋底の熱流量についてのモデル、さらには、それに基づく海底年齢と水深の関係、また、沈み込む海洋プレート・スラブの厚さや熱構造のモデルなどです。中央海嶺でのリフティング過程についてのモデルの境界条件も、このようなプレート概念から生まれました。多くの定量的な“法則”も発見されました。たとえば、沈み込み帯の傾角とプレートの収束速度の関係、海溝での沈み込みを起こす負の浮力をもった海洋プレートの“年齢”(>40m. Y.), 沈み込むスラブで起こる地震のパターンなどです。プレート理論は、過去の大陸や海洋の配置を復元するのにも利用され、過去の海洋の大きさや形は、当時の海流やそれが気候に与えた影響などを計算するのに使われました。そして、リフト（海嶺）や海溝といった大地形についての理解が進むとともに、ホットスポットのようなより微妙な地形も研究されるようになりました。

私たちは今や“剛体プレート”を乗り越えて、次のステップへと進むスタートラインに立っています。最新の技術によれば、プレート間の距離を約1cmの精度で測ることができます。だから、10年も経てば年に1mmという変形も検知できるようになるでしょう。VLBI（電波望遠鏡と電波星を使った超長基線干渉計）、SLR（衛星からのレーザーパルス反射を使ったもの）、GPS（航海衛星からの信号をスーツケースぐらいの大きさの受信機で受け取る方法）などの“宇宙測地法”は、い

ずれもこの1 cm級の精度をもっています。これらの技術から、今後の数年間に私たちは何を学びとるのでしょか？ プレートはどのくらい変形するのでしょうか？ それにはパターンがあるのでしょうか？ そのパターンはプレート内地震と関係があるのでしょうか？ たとえば、15年前にサイクスとスパー博士は、米国北東部の地殻内の応力がきわめて一様なパターンをもつことを示しました。微小地震、孔内測定、そのほかのin situ法（現場での測定法）による結果は、すべて最大圧縮軸が北東-南西向きであることを示しています。彼らは、これはプレート全体に働く広域的な応力のせいだと主張しました。では、北東-南西方向の短縮が測れるのでしょうか？ 北米東部は概して地震活動の少ない地域ですが、それでも地震がいくらか集中している領域が2つあります。ポストン-オタワ・ゾーンとカロライナー-オザークス・ゾーンです。これら2つのゾーンは、中生代に北米プレートがホットスポットの上を通ったところですが、ホットスポットがこれらのゾーンのプレート強度を弱くしたのでしょうか？ 実測によって、これらのゾーンを境に変形が集中していて、そのために地震が起きるのだということを示すことができるのでしょうか？ 現在のプレート運動は、後氷期の地殻上昇の影響を受けているのでしょうか？ 私たちのモデルによれば、それによって現在mm/年程度の水平運動が期待されていますが、実測のほうはどうでしょうか？ スカンディナヴィアやハドソン湾では最近氷がとけていますが、はたして、それによってプレートが水平方向に短縮し、その影響でノルウェーとグリーンランドの間の

大西洋中央海嶺では、長期的な平均よりも速く海底が拡大しているのでしょうか？ 太平洋プレートは、アリューシャンやニューギニアでの沈み込みによって引っ張られ、南北に引き延ばされているのでしょうか？ プレートの引き延ばしの観測からプレートの底に働く応力を推定し、キネマチックな（静力学的な）運動記述にダイナミクス（動力学）を加味することができるのでしょうか？ さらに、現在のプレートテクトニクスの議論に取り込まれていない多くの小プレートも明らかになるでしょう。中国大陸を形成する多く独立なブロックの運動が測ってみると、そこにはなにかパターンがあり、統一的なモデルを作れるかもしれません。インドネシアにはなぜ屈曲した島弧が多いのでしょうか？ インドネシアの変形の様子を調べるとその理由がわかるのでしょうか？

VLBIなどの技術によって、私たちは、プレート境界での詳しい変形の様子を調べることもできます。なかでも山脈の隆起速度は特に興味深いテーマです。山脈の隆起は侵食速度に密接に関係しているのでしょうか？ 私たちは、多くの大山脈でのプレートの収束速度は知っているつもりですが、台湾やチベットのような衝突ゾーンでは、それはどういうふうに隆起と短縮に分配されるのでしょうか？ 活動的なリフトでの変形を調べれば、リフティング過程について何がわかるのでしょうか？ かつて海底（地磁気）異常探査技術の進歩がプレートテクトニクス時代をもたらしたように、これらの新技術によって、地球研究の新しい夜明けが始まりつつあるのです。

From Plate Tectonics to Geodynamics

William Jason Morgan

Plate tectonics quantified the ideas of continental drift. It gave predictions of the rates of closure at trenches and motion along transcurrent faults based on the opening rates at mid-ocean ridges as measured with sea-floor spreading anomalies. The key assumption of plate tectonics is that the plates are **perfectly** rigid with no internal deformation. The theory thus assumes that all tectonic activity occurs at plate boundaries. The deformation across the entire 10,000 km of the North American or the Pacific plates is perhaps 1 cm/yr; the deformation across a roughly 100 km zone at a plate boundary is 5–10 cm/yr. Therefore most activity is at the boundaries, “all” with an 80% or 90% accuracy. There are intra-plate earthquakes and internal rift-like features (the Basin and Range in the U.S., the East African Rift, back-arc centers, ...), but these are secondary ($\approx 10\%$?) compared to the number and size of the earthquakes at plate boundaries or to the magnitude of the rifting or mountain building at plate boundaries.

Because plate tectonics could be used to make specific predictions, it was “testable”. Do different circuits across different mid-ocean ridge loops give the same result, do predicted plate motion differences between two plates agree closely with earthquake first motion studies at plate boundaries, do hotspot island chains align in directions as predicted by the theory – at the 80% – 90% level the model passed all these tests. Also, the concept of a tough, uniformly moving 100 – 200 km outer shell led to many quantitative models which described different aspects of tectonics. Examples are the model of heatflow in ocean basins and the resulting age-depth relation and models of downgoing slabs with predictions of thickness and thermal structure. Boundary conditions for models of the mid-ocean rifting processes were taken from this concept. Many quantitative “rules” were discovered; the dip of a subduction zone versus the velocities of the converging plates, the “age” of subducting sea-floor (>40 m.y.) that has the negative buoyancy to sink at a trench, the earthquake pattern at subducting slabs. Plate theory was used to make reconstructions of past times, and the sizes and shapes of ocean basins have been used in calculations of ancient ocean currents and their effects on past climates. And as the main features of rifts and trenches were understood, more subtle features such as hotspots could be found.

We are now poised to move beyond “rigid plates”. New techniques can measure cross-plate distances to roughly 1 cm accuracy, and in a decade distortions of ≈ 1 mm/yr will be known. The “space geodesy” techniques of VLBI (Very Long Baseline Interferometry, using radiotelescopes and radio stars), SLR (Satellite Laser Ranging, using laser pulses bounced from satellites) and GPS (Global Positioning System, using suitcase-sized radio receivers to record the signals broadcast by navigation satellites) all have this ≈ 1 cm accuracy. What can we expect to learn in the next few years? How much do the plates deform? Is there a pattern? Does this correlate with the intraplate earthquakes? For example, 15 years ago Sykes and Sbar showed that stress in northeastern United States has a remarkably uniform pattern – the maximum horizontal compressive stresses as evidenced by micro-earthquakes, borehole instruments, and other *in situ* measurements all gave the same NE-SW orientation. They proposed this is due to plate wide stresses; can shortening in the NE-SW direction be measured? There are two zones in the generally aseismic eastern North America where earthquakes are more concentrated than elsewhere, in the Boston-Ottawa and Carolina-Ozarks zones. These two zones are where the North American plate moved over hotspots in the Mesozoic. Did the hotspots weaken the plates in these bands? Can measurements show there is enhanced deformation across these zones leading to the enhanced earthquake activity? Is present plate deformation affected by horizontal motions due to glacial rebound? Our models say present-day mm/yr horizontal motions are to be expected, but what do measurements say? Is the mid-Atlantic ridge between Norway and Greenland now opening faster than the long term average because of plate contractions due to the recent melting of ice in Fennoscandia and Hudson Bay? Is the Pacific plate stretching north-south in response to the pull toward the Aleutian and New Guinea subduction zones? From the stretching of plates, can we infer the stresses acting on the bases of the plates and thus add dynamics to our kinematic description of motion? Also we should be able to learn about the many little pieces now left out of the present plate tectonic descriptions. When the motions of the apparently many independent blocks in China are measured, is there a pattern and can a unifying model be constructed? Why are there so many

curved trenches in Indonesia — will learning how Indonesia deforms make sense out of this?

With these techniques, we should also learn many of the details of how deformation occurs at plate boundaries. Of particular interest is the uplift rates of mountains; does this closely correlate with erosion rates? We think we know the total rate of closure across different mountain belts, but how is the uplift and com-

pression distributed across collision zones such as Taiwan or Tibet? From studies of the deformation at active rifts, what can be learned about the rifting process. With these new tools, a new era should be dawning for the study of the earth, just as the development of the sea-floor anomaly technique gave the measurements that led to the plate tectonic era.

1990年(第6回)日本国際賞受賞者

地球科学分野 共同受賞

受賞対象業績:

「プレートテクトニクスの創始とその発展に対する貢献」

1990 Japan Prize Laureates

Earth Science (Joint Award)

Initiation of the theory of plate tectonics and contributions to its development



ダン・ピーター・マッケンジー博士
(イギリス)

Dr. Dan Peter McKenzie
(U.K.)

ケンブリッジ大学教授 1942年生まれ。

博士は環太平洋地域の地震の発震機構の解析を行い、北米大陸が東アジアに対して太平洋の海底が1枚の板として回転運動していることを明瞭に示した。また、モーガン博士とともに3つのプレートが会合する三重点の幾何学的解析を行って、その後のプレート運動の原動力の解明の研究への道を開いた。さらに博士は、石油や天然ガス資源の成因に重要な大規模な堆積盆地の形成が、プレートの運動により地殻が薄くなり沈降するためであるという画期的なモデルを提唱した。

Professor at Cambridge University. Born in 1942.

Dr. McKenzie has analyzed earthquake systems in the circum-Pacific region and has demonstrated independently that the floor of the Pacific Ocean moves as a single plate, rotating against North America and East Asia. In collaboration with Dr. Morgan, Dr. McKenzie has also carried out a geometrical analysis of triple junctions where three plates meet. This work has contributed greatly to understanding the relative motion of plates and the energetics of plate movements. He has also proposed the highly original model that large sedimentary basins, important in the formation of oil and natural gas deposits, are formed by thinning of the crust due to plate motion.

プレート境界下での溶融

Dan Peter McKenzie

皆さんのようにプレート境界のそばに住む人々は、地震や火山が同じ地域で起こることを知っています。ここ日本では、地震の足下の太平洋プレートの運動によって起こり、詳しいことはよくわからないにせよ、溶融（マグマ生成）もおなじプレート運動によって起こるものと信じられています。目には見えませんが、溶融はプレートが分かれていく境界つまり中央海嶺でも起こっています。事実、すべての海洋底は、海嶺軸で生成された溶融物（メルト）が固まってできた厚さ約7kmの地殻で覆われています。海底の年齢を決めるのに使う地磁気異常は、この火山性の地殻が生成時の地磁気の方向に磁化されたことによって生じたものです。日本のようにプレートが破壊される島弧の下では、年間約1km³のメルトが生産されるのに対して、海嶺では年間約20km³が生産されています。海嶺が海底にあるため、それによる被害がほとんどないのは幸運というべきでしょう。海嶺が海上に顔を出している数少ない場所、たとえばアイスランドのようなところでは、大量の高温低粘性の溶岩が住民にとって大変な問題となっています。

プレートテクトニクス以前には、地質学者たちは、海嶺でこのように大量のメルトが生産されるのは、海嶺がマンテル深くの対流渦の上昇部の上にあるためだと考えていました。海底からの熱流量が海嶺付近で高いこと、また海嶺が地形的な高まりであることも対流の結果であるとされていました。今でも、地質学の教科書には、海嶺の下にマンテル対流の上昇部を描いた図が載っていることもあります。私は大学院生の頃、そのような図を見て、海嶺は移動するのにマンテル対流の上昇部がどうしていつもその下にいられるのか不思議

に思いました。たとえばアフリカはいくつかの海嶺によって取り囲まれています、それらの海嶺は互いに遠ざからなければなりません。しかし、その場合、大西洋中央海嶺下の対流渦は、5000kmも離れたインド洋海嶺下の対流渦から、海嶺同士が離れるのとちょうど同じスピードで離れることができるのでしょうか？ 1965年、ケンブリッジ大学の院生だった私はこの問題を、ウイルソン (Tuzo Wilson) にもちかけた記憶があります (当時の彼は、後でプレートテクトニクス全体にとって中心的重要性を持つことになったトランスフォーム断層のアイデアと取り組んでいました)。私たちには、この問題をどう解決したらいいかわかりませんでした。現在では、海嶺はマンテル対流渦の上昇部を表すものではなく、単にプレートが離れていくところだと思っています。プレート下のマンテル物質は、プレートとプレートのすき間を受動的に登ってくるのです。こう考えれば、アフリカを取り巻き、互いに離れていく多くの海嶺を簡単に理解することができます。

ウイルソンはこの考えについては論じましたが、それが意味するところは詳しくは研究しませんでした。そのような研究は、私、ルピション、スクラター (John Sclater)、パーソンズ (Barry Parsons) たちがしました。海嶺の地形や熱流量がプレート年代によってどう変わるかについて、計算と実際を注意深く比較したのです。その結果、理論からの予言と観測が見事に一致することがわかりました。この一致は、海嶺がまさに受動的なマンテル上昇によって作られることを意味します。海洋底の大地形に関するこの説明は、プレートテクトニクスのもたらした大成功の1つだと思います。それは私がダーウィンの「ビー

『グール号航海記』を呼んだ少年時代以来の謎の1つを解決したのです。この本は地球に興味をもつ人の必読書です。それは、かつて地質学を学んだ最高の科学者の目で見たすばらしい自然観だからです。しかしその中で私が最も不思議に思ったのは、彼の珊瑚礁についての説明でした。ダーウィンは、珊瑚礁は火山島が沈むにつれて珊瑚が上向きに成長して生まれた、としました。この考えは、すべての観察事実を見事に説明しましたが、私にわからなかったのは、いったいなぜすべての海洋火山が沈むのか、ということでした。そのため水はどこからくるのでしょうか？ 仮に未知の水源があったとしても、どうして陸地を浸水することなしに、海だけを深くすることができたのでしょうか？ ダーウィンは、ある地域の海底は沈降し、別な地域の海底は上昇しているのだろう、と言いました。しかし、彼の地図をみると、太平洋やインド洋の広大な地域が沈降を示しており、上昇しているのは海洋の端の部分にすぎないのです。プレートテクトニクスは、今やこの謎の答えを明確に教えてくれます。すべての海底は海嶺で生まれ、年とともに冷却され沈降します。この沈降は、海底が日本のような島弧の下へ沈み込み、マントルに戻っていくまで続きます。つまり、すべての火山島は、まわりの海底とともに沈降するのです。このプロセスでは、海洋の平均水深が増大する必要はありません。沈降は海底のもつ一般的な性質であり、ダーウィンの珊瑚礁はその1つの現われなのです。

こうしたアイデアはすべて地質学者に広く受け入れられ、最近の学部レベルの講義にも必ず入っています。プレートテクトニクスでは、もうあまり新しいことはなさそうに見えたので、私の研究上の興味は、プレートテク

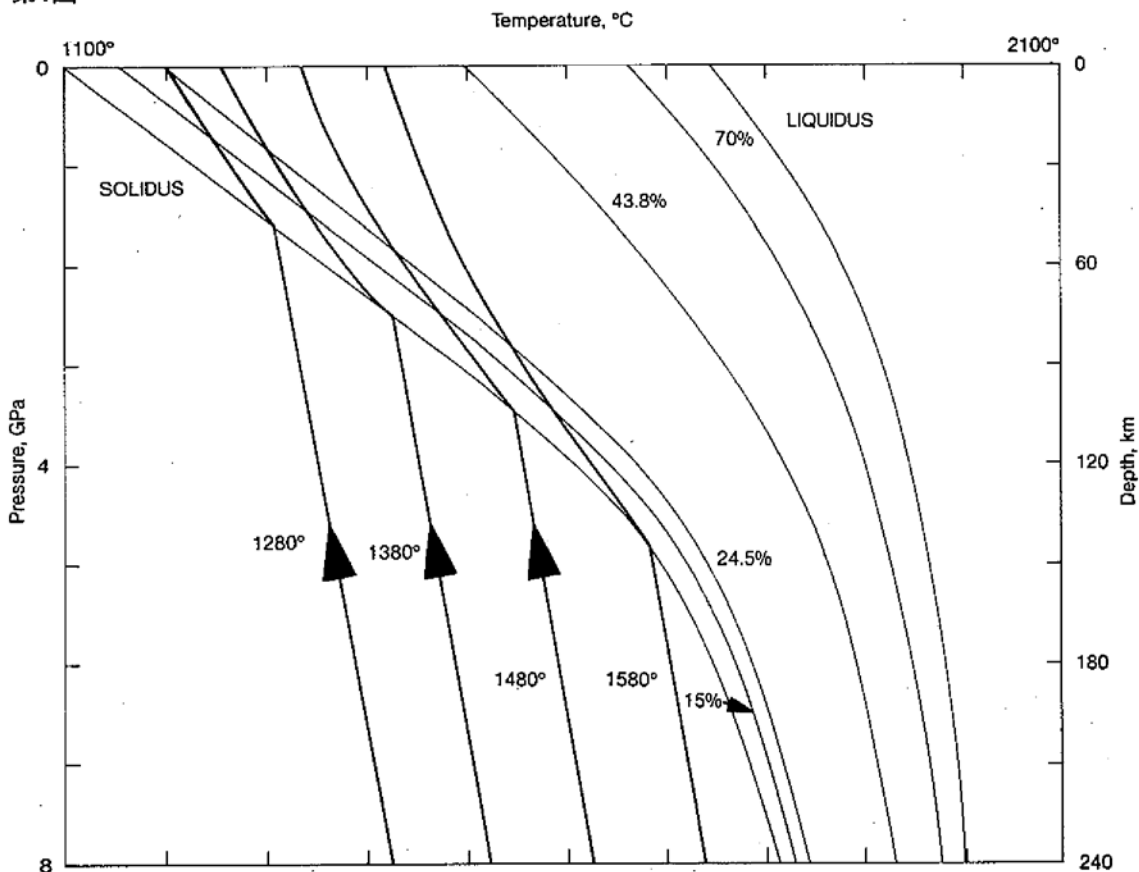
トニクスからマントル対流へと変わっていききました。しかし、私は海嶺下での溶融過程がよくわかっていないこと、したがって海底地殻を作るメルトがどうして生まれるかについての明快な物理学ないことがいつも気になっていました。私はマントル対流渦の進化の手がかりとして、火山島で噴出したメルトの成分を利用したいと思いました。しかし、いかにしてそれらのメルトが生まれ、まわりの結晶質残渣から分離したかがわからないのが難点でした。しかし7年ほど前、それを理解するには、海嶺での溶融現象、つまりメルト生成を理解するのが先決だと思ふようになったのです。火山島下の溶融現象は、海嶺下でのそれよりも複雑だろうと考えたからです。島弧下での溶融もなかなか難題でした。元来は物理学者なので、私はまずメルトと残りの結晶の運動を規制する方程式群を求めるところから出発すべきだと考えました。求めた方程式群はかなり複雑でしたが、非常に有用なものでした。方程式を解いて分かったのですが、メルトが残渣から分離するのは驚くほど容易なのです。5%の溶融成分があれば、厚さ50 kmもの溶融域が数百万年で作られてしまいます。ある種の火山性メルトは、溶融成分がわずか0.1%でも分離できます。これらの結果は、私だけでなく多くの人々を驚かせたようでしたが、実はそれには及ばなかったのです。ガスト (Gast) とケイ (Robert Kay) の2人の地球科学者が、すでに、メルトの成分から、溶融成分がわずか0.5%でもメルトが分離できることを主張していたからです。

私は次に、これらの方程式が海嶺でのメルト生成の説明に利用できないかと考えました。しかしそれにはいくつか心配な面もありました。著名な多くの火成岩岩石学者たちがこの

問題と取り組んでおり、しかも互いに意見が一致せず、しばしば公の場ですら激論をたたかわせてきたのを知っていたからです。私が初めて溶融に取り組んだときには、私はほとんど火成岩岩石学を知らませんでした。そこで、ケンブリッジ大学の本職の岩石学者ビッケル (Mike Bickle) を説得して共同研究を始めたのですが、それはとてもよい結果になりました。彼は、私があらぬ方向に向かうのを何回もとどめてくれたからです。私たちはま

ず、海底の沈降や熱流量分布を見事に説明した受動的な海嶺モデルでは、どのような成分のメルトがどのくらい生成されるべきかを当たってみました。海嶺下で溶融が起こるのは、溶融温度が圧力によって変わるからです。プレート下の固体マントルが十分に高温であれば、それが分かれていく2つのプレートのすき間に上昇してくると溶融を始めます。(第1図)。驚いたことに、このような計算は誰もしたことがないようでした。しかし始めてみる

第1図



固体のマントル物質が矢印で示した線に沿って上昇してくると、ソリダスにぶつかり、溶融する。ソリダスとリキダスとの間の線には、溶融度 (%) を示してある。生成されるメルトの総量は初期温度による。

と、それがなぜだかがわかりました。予想したよりも難問だったのです。しかし私たちは困難を切り抜けるうまい方法を考え出しました。もう一つ驚いたのは、解釈については議論沸騰なのに、ほとんどすべての溶融実験の結果がきわめてよく一致していることでした。私たちの簡単な計算によると、ちょうどよい成分のメルト（第1表）が、ちょうどよい量だけできることがすぐにわかりました。しかし、私たちのこのような考え方に対する否定論をすべて理解し、それらが不当であることを示さなければなりません。私はほんのわずかな岩石学の知識をもって出発したのですが、この過程でなかなかの大家になってしまいました！ おかげで、今のところ私のまったく知らない議論を仕掛けられたことはありませんし、これからもまあ大丈夫でしょう。

最近3カ月、オニオンズ (Keith O'Nions) と私は、「インバース理論」というやや複雑な数学的方法によって、微量元素、特に希土類元素の溶融現象を調べています。私たちは、希土類元素を用いると、海嶺下での溶融度を深さの関数として求めることができ、それによって生産されるメルトの量と成分を計算できることを示しました。第1表はその結果ですが、観測値とも、またマイクと私が前に行なった計算ともよく一致しています。希土類元素のよいところは、その挙動が予測できる

点で、物理学者が地質過程を研究するのに適しているのです。つまり、主要元素の挙動がよくわからない状況下での、溶融現象を調べるのに役立つのです。私たちは、希土類元素を用いて、地球史の前半に生成されたコマチアイトと呼ぶ稀にしか見られないマグネシウムに富んだメルトが、マンタルのほぼ全溶融の産物であること、また、アルカリや炭酸塩に富むメルトは、ザクロ石に富むマンタルがわずか0.1%溶融して分離したものであることを示しました。私たちの足元で生まれているメルトは、全ての大陸性の頁岩（けつがん）と同じく、各閃石（かくせんせき）の存在する状況の下で溶融していることを示しています。キースと私はいま、月、火星、小惑星からのメルトを調べようとしています。プレートテクトニクスの簡単なモデルを使って、地球科学での大きな新分野が開けていくように思えます。

ヘス (Harry Hess) が亡くなる前に、プレートテクトニクスの成功について話し合ったことを思い出します。彼は、「地球科学の主要な問題は解決してしまったので、これからは退屈で細かいことばかりやることになるだろう」と言って寂しそうでした。彼の死後しばらくは私もそう感じていました。新理論（プレートテクトニクス）によって何がわかり、何がわからないかを確かめなければなりません。新理論はきわめてよくできていた

第1表

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
平均的海底地殻	51.1	0.60	16.6	7.2	9.2	12.8	2.3	0.12
溶融モデルからの計算値	50.93	1.03	15.33	7.90	10.61	11.36	2.16	0.27
希土類からの計算値	50.48	1.23	15.40	8.27	10.76	11.29	2.30	0.27

ので、そのころの研究からはあまり新しいアイデアは生まれませんでした。しかし、新理論は、「簡単なアイデアによって、地球の振る舞いを驚くほどうまく記述することができるのだ」という信念を与えてくれました。いま私たちの前には新しいアイデアを必要とする問題があります。しかし、そのプロセスを的確にモデル化し、そこで何が起きているかを正確に理解することができるはずで、このことはより大きな自信を持って言えるのです。確かに、プレートテクトニクスの発見に続いたような大きな変化は期待できないでしょう。いま地球科学に入ってくる若い有能な地質学者や物理学者は、今世紀前半に大陸移動説をめぐって極端な争いを演じた人々ほどはドグ

マティックではないし、科学者としてもより優秀だということもその理由の1つです。しかしヘスとは違って私は、なにかエキサイティングな分野で研究をしたいと志す人にとって、現在の地球科学は私が研究を始めた1963年当時よりも、ずっと魅力的だと思っています。私たちはいま石油会社と緊密な関係を持っていますが、それは私たちの研究が内向的で狭いアカデミズムにかたよるのを食い止めてくれています。このようなわけで、私はいま、かつてない最高の大学院生のグループを持っており、成長する彼ら（私のほうは老化！）とともに今後20年間研究を進めていくことを非常に楽しみにしているのです。

Melting Beneath Plate Boundaries

Dan Peter McKenzie

People like you who live near plate boundaries know that earthquakes and volcanoes occur in the same regions. Here in Japan the earthquakes are produced by the movement of the Pacific plate beneath our feet, and everyone believes that the same process causes melting, though exactly how is not yet clear. Though it is less obvious, melting also occurs where plates are separating, on mid-ocean ridges, and all the oceans are in fact underlain by a layer about 7 km thick of solidified melt that was generated on ridge axes. The magnetic anomalies that have allowed the sea-floor to be dated are caused by this volcanic layer, which became magnetised in the direction of the main magnetic field of the Earth at the time that it was formed. The ridges round the world are presently producing about 20 km³ of melt every year, compared with about 1 km³ that is produced where plates are being destroyed beneath island arcs like Japan. It is fortunate that the ridges are under water, so that the molten rock does little damage. In the few places where it is not, like Iceland, the production of large volumes of very hot low viscosity lava causes severe problems to the inhabitants.

Before plate tectonics was understood, geologists thought that the reason why so much melt is being produced by ridges is because they are the surface expression of the rising limbs of convection cells in the deeper part of the mantle. The high heat flow through the sea floor near ridges and their elevation above the surrounding ocean floor was also thought to be the result of convection. It is still common to find illustrations in geological text books showing hot rising limbs of convection cells beneath ridges. I remember that such pictures puzzled me greatly when I was a graduate student, because I could not understand how the convection cells could remain beneath the ridges as the ridges move. Africa, for instance, is surrounded by spreading ridges which must therefore be moving away from each other. But how could the convection cell beneath the Mid Atlantic Ridge move away from that beneath the Indian Ridge 5,000 km away at exactly the right speed so that they both stayed beneath their respective ridges? I remember talking to Tuzo Wilson about this problem when I was a graduate student at Cambridge in 1965 when he was working on the idea of transform faults, which was later central to the whole idea of plate tectonics. At that time neither of us could really understand how to get round this problem. We now believe that the

solution is that the ridges are not in fact the surface expression of the rising limbs of convection cells in the mantle, but are simply places where two plates are separating. The mantle below the plates upwells passively into the space between. There is then no difficulty in understanding how Africa can be surrounded by ridges, all of which are moving away from each other.

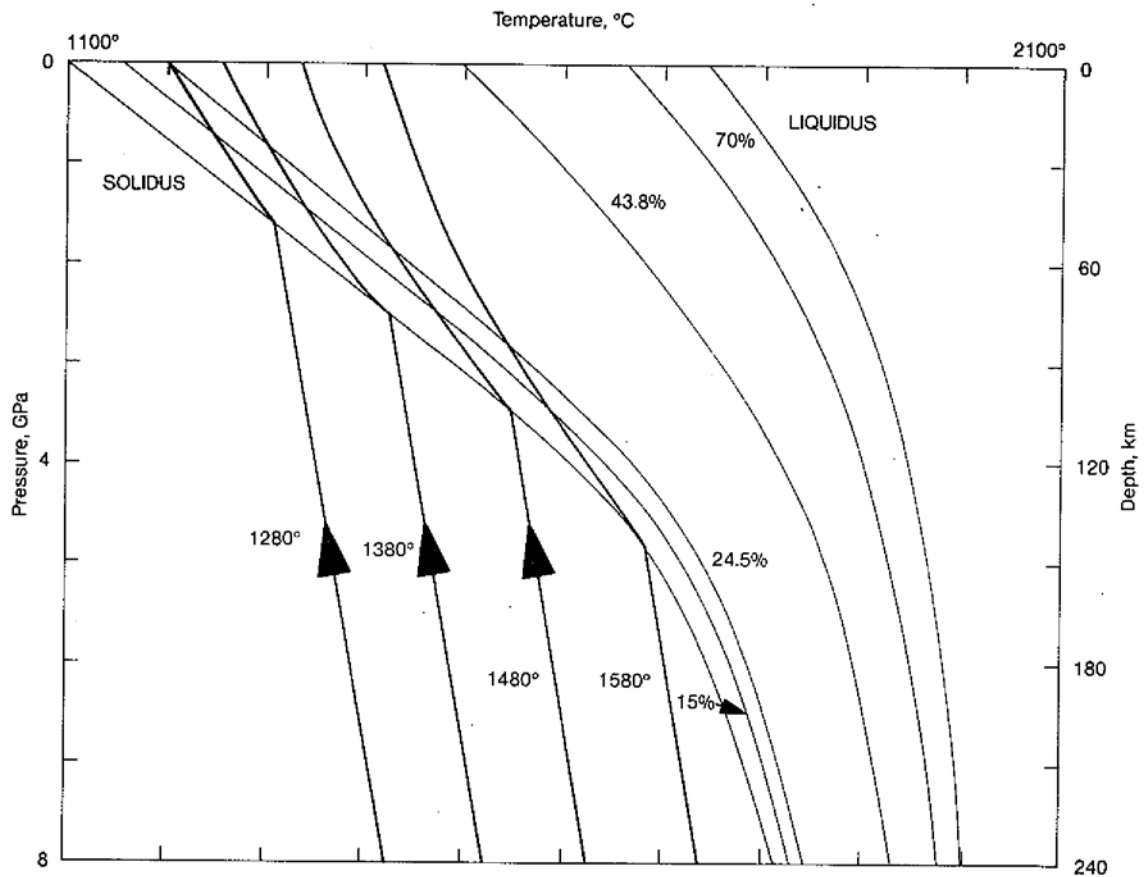
Though Tuzo talked about this idea, and compared the plates to ice flows, he did not work out the details of this suggestion. This was done by myself and by Xavier Le Pichon, and by John Sclater and Barry Parsons, who carefully compared the calculations with the shape of the ridges and with the variation of heat flow with plate age. They found that the predictions of the theory agreed very well indeed with the observations. This agreement implies that the ridges are indeed formed by passive upwelling. I think this explanation of the shape of the ocean basins is one of the great successes of plate tectonics. It also explained something that had puzzled me every since reading Darwin's *Voyage of the Beagle* as a schoolboy. I think anyone who is interested in the Earth should read this book; it is a wonderful view of the natural world through the eyes of one of the best scientists that has ever studied geology. But what puzzled me so much was his explanation of coral atolls. He argued that they were produced by the upward growth of coral as volcanic islands sank. His explanation accounted for all the observations beautifully, but what I could not understand was how **all** oceanic volcanoes could be sinking. Where did the water come from that allowed this to happen, and, even if there was some hidden source of water that we did not know about, how could the depth of the oceans increase without flooding the continents? Darwin suggests that some regions of the sea-floor are sinking and others rising, but his map shows that huge areas of the Pacific and Indian oceans are sinking, and that only the edges are going up. Plate tectonics has now made the solution to this puzzle obvious. All sea-floor is produced on ridge axes, and, as the plates age they cool and sink. Therefore all volcanic islands will sink with time with the surrounding sea-floor, until the plates are returned to the mantle beneath island arcs like Japan. This process does not require the average depth of the ocean to increase. The subsidence is a universal feature of the sea-floor, and Darwin's coral atolls are the expression of a process that occurs everywhere on the sea-floor.

All these ideas have been accepted by geologists, and now form part of all modern undergraduate lecture courses; it is not now possible to do much new in plate tectonics. So my own research interests changed, from plate tectonics to worrying about mantle convection. But I was always unhappy that we had never really understood the melting processes that occur beneath ridges properly, and had no simple physical theory of how the melt that makes up the oceanic crust is produced. Because of my interest in mantle convection, I wanted to use the compositions of the melt erupted from oceanic islands to understand the evolution of the convection cells in the mantle. But I was worried that I did not understand how melt was made and how it separated from its residue of crystals. So about seven years ago I thought I had better try to understand melting and melt production on oceanic ridges. I thought that the melting processes beneath volcanic islands would be more complicated than those beneath spreading ridges, and suspected that the melting beneath island arcs would also not be very easy to understand. Being a physicist by training, I thought I had to begin by obtaining the equations that control the movement of the melt and the residual crystals. These are rather complicated but very useful. When I solved them I found to my surprise that it was rather easy to separate the melt from its residue. Molten regions as thick as 50 km separate from their melt in a few million years if the melt fraction is 5%. Some rare types of volcanic melts can even separate when the melt fraction is only 0.1%. These results surprised many people besides me, but they should not have done. Two geochemists, Paul Gast and Robert Kay, had used the composition of the melts to argue that melts could separate even when the melt fraction present in the source was as small as 0.5%. I then wondered if I could use the equations to explain how melt is produced beneath spreading ridges. But I was somewhat nervous about starting to work on this problem. Many of the best known igneous petrologists had worked on it, and I knew that they disagreed with each other, sometimes very violently and in public. When I first became interested in melting I knew little igneous petrology, so I persuaded Mike Bickle, a proper petrologist at Cambridge, to work with me. I am very glad I did: many times he has stopped me from going astray. We thought we should start by finding out the volume and

composition of the melt that should be produced by the passive ridge model that so successfully explained the subsidence of the sea-floor and the heat flow distribution. Melting occurs because the melting temperature increases with pressure, so, if the solid mantle beneath the plates is sufficiently hot, it will start to melt as it upwells to fill the gap between the two separating plates (Figure 1). To our surprise we could find no-one who had done this calculation. When we started work we discovered why: it was somewhat more difficult to do than we had expected. But we invented some ingenious ways out of our difficulties. We were also surprised to find that the experimental results from almost everyone who had carried out melting experiments were in extremely good agreement, even though the same people vigorously disagreed about the interpretation. We quickly found that our simple calculations produced the right amount of melt of the right composition (Table 1), but we then had to understand all the arguments people had given as to why ours, the simplest possible melting scheme, was wrong, and then why their arguments in turn were wrong. Though I started with little knowledge of igneous petrology, I ended with a great deal! I am pleased that no-one has pointed out to me an argument that I did not know about. Perhaps this will not be about to change!

In the last three months Keith O'Nions and I have been using trace elements, especially the rare earth elements, to study melting processes using some rather complicated mathematical methods called inverse theory. We found that we could use the rare earth elements to find the melt fraction as a function of depth beneath ridges, and then calculate the volume and composition of the melt produced. Table 1 shows the results, which agree very well with the observed composition and with the earlier calculations that Mike and I carried out. The great advantage of the rare earths is that their behaviour is very predictable: they could have been designed by physicists to study geological processes. They can be used to study melting in situations where the behaviour of the major elements is poorly understood. We have used them to show that rare magnesium-rich melts called komatiites, that were produced in the first half of the Earth's history, resulted from almost total melting of the mantle, and that alkali- and carbonate-rich melts are formed by the separation of melt fractions as small as 0.1% from a garnet-rich mantle. The

Figure 1



As solid mantle material upwells along paths marked by arrows it meets the solidus and melts. The lines between the solidus and the liquidus are marked with the melt fraction in %. The total amount of melt produced depends on the initial temperature.

Table 1

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Oceanic crust, average	51.1	0.60	16.6	7.2	9.2	12.8	2.3	0.12
Calculated from melting model	50.93	1.03	15.33	7.90	10.61	11.36	2.16	0.27
Calculated from rare earths	50.48	1.23	15.40	8.27	10.76	11.29	2.30	0.27

melts being produced beneath our feet show a clear signature of melting in the presence of amphibole, as do all continental shales. Keith and I are now starting to look at melts from the Moon, Mars and asteroids, it now seems that another whole area of the Earth Sciences can be understood using simple models from plate tectonics.

Towards the end of his life I remember talking to Harry Hess about the success of plate tectonics. He was sad because he thought that the major problem in the Earth Sciences had been solved, and that the subject would become dull and specialist. For some years after he died I think he was right: we had to find out what could and what could not be understood using the new theory. Because it was so strikingly successful, much of the work in this period led to few new ideas. But it did give us confidence that we could describe the behaviour of the Earth using simple ideas with unexpected accuracy. Now that we know the problems that require new ideas, we

have much greater confidence in our ability to model the processes accurately and to understand very precisely what is going on. I do not expect another change as profound as that which occurred after the discovery of plate tectonics, partly because I think the able young geologists and physicists now coming into the Earth Sciences are less dogmatic and are better scientists than those who took such extreme positions for and against continental drift in the first half of this century. Unlike Harry, I think the Earth Sciences are now more attractive to someone interested in doing research in an exciting area than they were in 1963 when I started work. The close relationship with the oil companies that we now have also stops the field from becoming introverted and narrowly academic. I think for these reasons I now have the best group of graduate students that I have ever worked with, and look forward to working with them as they get better (and I get worse!) over the next twenty years.

1990年(第6回)日本国際賞受賞者

地球科学分野 共同受賞

受賞対象業績:

「プレートテクトニクスの創始とその発展に対する貢献」

1990 Japan Prize Laureates

Earth Science (Joint Award)

Initiation of the theory of plate tectonics and contributions to its development



ザビエル・ルピション博士 (フランス)

エコール・ノルマル・シュペリエール教授
1937年生まれ。

博士は、地磁気の縞模様の幅から推定されるプレート拡大速度のブンプとトランスフォーム断層の方向を用いて、独立にプレートの相対運動を全地球にわたり解析して、海嶺での拡大に伴うプレート運動の角運動を求め、それに基づき6つの主要プレートの相対運動を定量的に求めた。これにより、これまで観測されてきた地学現象が見事に説明された。同博士はまたプレートテクトニクスの著書を著わし、世界の研究者に大きな影響を与えるとともに、深海潜水艇による海嶺や海溝などの調査でも大きな貢献をした。

Dr. Xavier Le Pichon (France)

Directeur, Département de Géologie, Ecole Normale Supérieure. Born in 1937.

Dr. Le Pichon, inspired by the work of Dr. Morgan, has independently determined plate movements over the entire surface of Earth, using ocean floor spreading velocities estimated from paleomagnetic patterns and the directions of transform faults. He has also published a book on plate tectonics which has had a great influence on earth scientists throughout the world, and has played a major role in sea-floor investigation at plate boundaries. Through these work, he has contributed greatly to the understanding of the geological nature of plate boundaries under the ocean.

海溝プロジェクトとプレートテクトニクス

Xavier Le Pichon

地球上では、長さ6万mに及ぶ中央海嶺系で毎年3.5kmの新しい海底が生産されています。そこで、同じだけの海底が毎年消滅しなければなりません。さもないと、地球は1000万年もたつと2倍にも膨れ上がってしまうことになるからです！ 海底の消滅は、おもに太平洋の周縁に分布する合計35,000kmにおよぶ深海溝で起こります。1967年、私は日本海溝で日本列島の下に海底が沈み込むスピードが年間8~9cm、100万年で約100kmであると計算しました。つまりパンゲア超大陸の時代（2億年前）以来、2万kmもの海底が沈み込んだこととなります！ 最近の宇宙測地技術によって、日本とハワイがまさに毎年8cmずつ近づいていることが明らかになりましたが、このことは、私たちが1967年当時想像した以上に、プレートが剛体であることを証明しています。

海底の沈み込みは、島弧の地震、津波、火山活動の原因になることがわかっています。また、日本列島が2億年におよぶ活発な沈み込みの結果であることもわかっています。しかし沈み込み現象の研究は簡単ではありません。一言でいえば、沈み込みとは、海洋の地殻とリソスフェアが、地球内部つまりマントルの中に消え去ることです。しかし、死体のなくなってしまう犯罪をどうやって調べたらよいのでしょうか？ 沈み込みが実在し、しかも地球上で起こる最も激しいプロセスであることが、なかなか地球科学者にわかりにくかったのはこのためです。そのうえ、沈み込みは水深4~11kmの幅の狭い海溝で起こるので、海面上からの観測では、沈み込みが海底に残した痕跡を精度よく判別できません。海底近くに無人機や潜水艇を降ろし、できれば掘削も行なって調べる必要があるわけです。

「深海潜水艇を使って高精度の海溝研究をしよう」というのが1975年に奈須紀幸教授と私たちが考えた海溝計画のミソでした。日仏のチームによる日本周辺の海溝の研究が実際に行なわれるまでには、9年間もの日時を要しました。1984年と1985年、私たちは小林和男教授らと、数カ所の目標地域をまず船上から調査し、次にフランスの^{イフレメール}Ifremer所属潜水艇ノチール号により最深6000mに達する潜水調査を27回行ないました。

日本海溝の北部は、大規模な土砂崩れを起こす急な斜面をもった巨大な侵食地形でした。巨大な海山がスムーズに沈み込む様子について、また、それが吸い込まれた時に海溝の陸側斜面に残した痕跡などが調査されました。一方、南海海溝は厚い泥で覆われており、沈み込みによってその泥が積み上げられ、「付加プリズム」と呼ぶ海底の大山脈を作っています。私たちは、この付加プリズムを伊豆半島付近で調査しました。そこでは圧縮性の変形が海溝外側のリソスフェアで起こっており、海洋地殻は“うろこ状”にはがれていました。こうしたものは、将来、日本の島に付加されることになるでしょう。

海溝計画の潜水調査で発見された注目すべき事実は、海溝壁のいたるところで起こっている液体の流出でした。それは海溝の底部近くで最も多く、陸に向かって減少しています。流出液体からの栄養によってシロウリ貝が群生しているので、液体流出地点を検出するのに役立ちました。海溝壁に付加される泥が液体で飽和されており、それが閉じ込められて圧力が高まると流出してくるのです。私たちは、この高圧力は地震のサイクルとも関係しており、液体の流出量をモニターすれば地震サイクルを理解する上で重大な手がかりにな

ることに気がつきました。いずれにしても、高液体圧は沈み込むプレートと上盤との間の摩擦を減らすので、重要な因子です。

1989年夏に行なわれた次の潜水調査航海は、全面的にこの液体の問題に集中されましたが、その理由がこれなのです。私たちは、巨大地震の発生が予測されている南海トラフ東部の一部、すなわち静岡県南方地域を精査しました。目的は多くの液体流出地点の地図を作成し、液体流出速度を測定し、液体についての収支を確定し、流出の時間変化をモニターすることでした。またごく予備的な結果しか得られてはいませんが、それでも液体流出現象が予想よりはるかに重要なものであり、液体の流出量が、沈み込む泥によって供給される水の量よりはるかに大きいことがわかっています。したがって、そこにはもっと多量の水を付加プリズムに押し込む何らかの仕組みがあるはずです。

まるまる1月間にわたる流出量のモニターも

行なわれ、有意な時間変化が見出されました。しかし「沈み込み」と呼ぶこの信じがたい程複雑なシステムが解明されるのは、まだまだ先のことです。大陸縁辺部に弾性エネルギーが次第に蓄えられ、ある時突然解放されるといふ地震サイクルと、液体流出との間には何か関係があるはずですが、それを明らかにするには、もっともっと調査とモニタリングを続ける必要があります。私は、海溝計画はこの方向へ向けてのささやかな第一歩であったと思います。沈み込みと関係した深部プロセスと、地震サイクルにかかわる深海底現象を徹底的にモニターし、理解し、モデル化することは、科学、特に日本の科学にとってきわめて重要です。この意味で、国際掘削計画(ODP)は近く重要なデータをもたらすことでしょう。しかし、さらに多くの研究をしなければならず、日本はこの分野で今後も重要な役割を果たすにちがひありません。

Kaiko Project And Plate Tectonics

Xavier Le Pichon

3.5 km² of new ocean surface are produced every year along the 60,000 km of mid-Ocean Rifts. Accordingly, an equivalent amount of surface must disappear every year. Otherwise, the Earth would double its surface in about 100 million years! The disappearance occurs along the 35,000 kilometers of oceanic deep trenches that are principally situated along the rim of the Pacific Ocean. In 1967, I computed that the speed at which the ocean floor plunges below the Japanese islands along the Japan Trench is 8 to 9 centimeters per year, nearly one hundred kilometers per million years, 20,000 kilometers since Pangea time, 200 million years ago! It is rewarding that space geodesy techniques have now revealed that Japan is indeed getting every year 8 centimeters closer from Hawaii. This is a proof of the rigidity of the plates which goes much beyond we ever dreamed in 1967.

We know that subduction of the ocean floor is the cause of earthquakes, tsunamis and volcanic activity on the island arcs. We know that the Japanese islands are the products of 200 million years of active subduction. But subduction is very difficult to investigate. In short, subduction is the disappearance of the oceanic crust and lithosphere inside the Earth within its mantle. How does one investigate a crime in which the body of the victim has disappeared? This difficulty explains why it took so long for Earth scientists to realize that subduction does exist and that it is the most energetic process at the surface of the Earth. Furthermore, subduction occurs below water, at depths of 4 to 11 kilometers, within a relatively narrow trench. Thus, techniques of investigation from the sea surface do not offer enough resolution to properly decipher the marks left by the subduction process on the sea-floor. One needs to lower instruments near the sea-floor using a combination of unmanned vehicles and deep sea submersibles coupled, if possible, to drilling programs.

High resolution exploration of the trenches using deep sea submersibles was the rationale for Project Kaiko that we conceived in 1975 with Professor Nori Nasu. We had to wait for nine long years before the actual exploration of the Japanese trenches by a French-Japanese scientific team took place. In 1984 and 1985, with Professor Kazuo Kobayashi, we first mapped from the surface several critical targets and then we dove with the French Ifremer submersible *Nautile* 27 times to the sea-floor to depths of up to 6,000 meters.

The northern Japan trench turned out to be a gigantic erosional feature with steep slopes modeled by major slumping and avalanches. We investigated in detail the remarkably smooth subduction of large seamounts and followed the trails they leave on the wall of the trench as they are being swallowed.

The Nankai trench, on the other hand, is filled with a thick cover of mud and subduction piles up this mud to form a very large submarine mountain belt that we call accretionary prism. We investigated this accretionary prism near the Izu peninsula, at a plate where compressional deformation affects the oceanic lithosphere seaward of the subduction, producing scales of oceanic crust which will later be incorporated within the Japanese margin.

The most remarkable discovery of the Kaiko dives was the ubiquitous presence of fluid venting on the walls of the trench, the venting being maximum near the bottom of the trench and decreasing upward. Large colonies of clams take their food from these seepages and enabled us to rapidly identify the locations of the vents. The venting is due to the fact that the muds that are accreted to the wall of the trench are saturated with fluid which becomes trapped, resulting in high fluid pressure. We realized at this time that the high fluid pressure may well be modulated by the earthquake cycle and that consequently, monitoring the fluid outflow could be a significant step forward in our understanding of the earthquake cycle. In any case, the high fluid pressure reduces the frictions between the subducted plate and the overlying margin and is consequently an essential element of the system.

This is why another submersible cruise, during the Summer of 1989, was entirely devoted to the fluid problem. We explored a small portion of the Eastern Nankai trough, south of Shizuoka prefecture, in the area of the expected future large earthquake. The aim was to map the different vents, measure the fluid outflow, establish a fluid budget and monitor the variation of the venting with time. We only have quite preliminary results but we already know that venting is much more important than was thought and that the fluid outflow is much larger than the amount of water entering the margin with the subducted muds. Thus, there must be a system to pump additional water within the margin.

We also monitored the outflow during a full month and discovered significant variations.

However, we are still far from understanding the incredibly complex system that we call subduction. We need much more exploration and monitoring of the fluid outflow to understand its possible relationship with the earthquake cycle, as elastic energy is progressively loaded within the continental margin to be suddenly released during the earthquake. I believe that Kaiko was a first modest step in this direction. It is vital for

science, especially in Japan, that the deep sea processes related to subduction and the earthquake cycle undersea manifestations be thoroughly monitored, understood and modeled. In this respect, the International Drilling Program will soon bring additional very important data. But much more need to be done. I am sure that Japan will continue to play an important role in this research.