

地質学雑誌 第95巻 第8号 603-614 ページ, 1989年8月
Jour. Geol. Soc. Japan, Vol. 95, No. 8, p. 603-614, August 1989

地質科学の将来と陸上学術ボーリング —学術ボーリングは地質科学のビッグプロジェクトたりうるか—

新妻信明*

Continental scientific drilling as a big project in geological science

Nobuaki NIITSUMA*

Abstract Plate tectonics are related to the dynamic process along the low velocity layer in the upper mantle. Plate tectonics have succeeded in describing kinematically the movements of surficial part of the Earth, however, the dynamic process has not been understood yet. This stage of the earth science can be correlated with that of J. KEPLER in the development of the Newtonian dynamics.

The plate motion should be affected by the dynamic process under the continental area, especially the mobile belt along the continental margin. The island arc system along the plate subduction zone is the most active area in such dynamic process, accompanied with magmatism. This kind process is strongly controlled by the temperature, because the rocks lose the mechanical strength with increase of the temperature. The dynamic boundary should be located in the lower part of the crust, because the temperature increases with the depth by the heat flow and the strength of the rocks can be recovered below the Moho discontinuity by the changes in the mineral composition.

The process should be relate to the formation of metamorphic rocks and the tectonic displacement from the deeper part of the crust to the surface which is directly related to the geologic process. The most direct approach to understand the crustal dynamic processes is scientific drilling.

The Japanese Island Arcs have been well investigated geologically and geophysically, and the 12 sites are proposed for the continental scientific drilling including ultra-deep drilling, which have different tectonic backgrounds and present situations in the island arc system.

Because the Japanese Island Arcs have higher heat flow, it is much easier to reach the portions of the crustal dynamic process. The development of technology for drilling under high temperature condition is very important to realize the approach.

近年の地質科学の進展には目覚しいものがあり、我々の住む地球の理解もおおいに進展してきた。特に地球全体のテクトニクスを記述するプレートテクトニクスの登場により、地質科学の謎が解き明かされてきている。しかし、未だに解明されていない謎も多数存在しており、それらを統一的に説明できる学問体系の確立が待たれて

1989年3月27日受付 1989年6月23日受理

* 静岡大学理学部地球科学教室 Institute of Geosciences, Shizuoka University, Oya 836, Shizuoka, 422 Japan.

いる。特に、陸域の地質と地殻変動を支配しているテクトニクスの機構とその原動力に関しては未だに暗中模索の状態と言っても過言でなかろう。

この状態を打破するには、従来の研究方法を単に進展させ、資料を集積することにより対処できるのであろうか。近年の自然科学の根本的な発展はいわゆるビッグプロジェクトによって誘起されてきている。物理学の加速器、天文学の望遠鏡、宇宙科学のロケットなどをその例としてあげることができるが、これらのプロジェクトは

他の学問分野や一般の人々からも学問の本質的発展のために必要なものと是認されており、世界各国はそれらを推進するために多額の予算を投入している。地質科学において、このようなビッグプロジェクトは他の分野に比較し余り推進されていないが、近年、学術ボーリングがこのようなプロジェクトの対象として急速に注目を集めている。はたして学術ボーリングに他分野のビッグプロジェクトに匹敵する学術的意味があるのであろうか。現在、地質科学にたずさわる人々は学術ボーリングについてこのような観点で検討する時期に来ている。このような状況を反映して、1988年8月にはソ連において超深層学術ボーリングと深部地球物理探査の国際セミナーが開催され、1989年の茨城大学における地質学会総会においては学術ボーリングについてのシンポジウムが企画されている。

本稿では世界および日本における陸上学術ボーリング活動について紹介するとともに陸上学術ボーリングの地質科学における科学史上の位置づけとビッグプロジェクトに値するものであるかどうかを論ずる。

プレートテクトニクスの次に来たるもの

プレートテクトニクスは全地球規模のテクトニクスを記述することに成功し、最近では予想されていたプレート運動も VLBI や人工衛星測距により実施され、直接比較することも可能になってきている。プレートテクトニクスの出現は、プレートの沈み込み帯にある日本列島の地質を理解する上に重要な役割をはたした。特に、付加の概念は無くてはならないものになっている(例えば、中村・平、1986)。

このプレートテクトニクスの成立を物理学のニュートン力学の成立過程(例えば、朝永、1981)と比較してみると興味深い対応を見出すことができる(新妻、1986)。すなわち、コペルニクスの地動説はウェーベナーの大陸移動説に、地向斜説は天動説に対応させることができる。そして、惑星運行の精密観測をしたティコ・ブラーエはモーリス・ユーイングに対応するが、両者とも基本的な態度は地動説および大陸移動説という当時の新しい考えには反対であったことも興味深い。ティコ・ブラーエの観測資料を受け継いだケプラーは地動説をもとに惑星運行の 3 大法則を確立し、惑星の運行を正確に記述することに成功した。ユーイングの率いる米国のコロンビア大学ラモントドハティー地質学研究所の海洋地質学者を中心とするグループはプレートテクトニクスを創りあげることに成功した。

ニュートン力学成立の過程は、地動説を認めることか

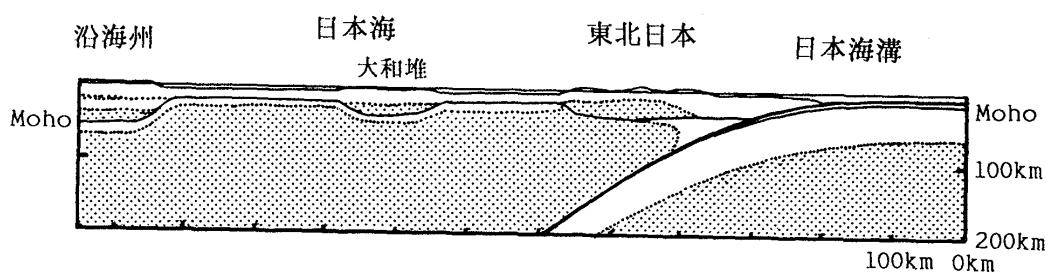
ら開始され、ケプラーの惑星運行の法則を本質的に支配する力を考へるとともに、ガリレオによって導入された実験に基づく事実を集大成することによって成し遂げられた。従って、ニュートン力学の成立は惑星の運行に力学的な基礎を与えるに留まらず、日常的に我々の周りで起こっている現象をも統一的に理解することを可能にした。

現在の地球科学は惑星の運行にたとえられるプレート運動の記述に成功したが、我々の周りに露出している地質体の分布やそのテクトニック過程についてある程度定性的な説明を与えるにすぎず、地質学者を満足させるには至っていないのが現状であろう。従って、プレートテクトニクスの次に来たるべきものは、我々の周りで起こっている地質現象の統一的理解をも可能にするガリレオ・ニュートンの段階のものであろう。

日本列島の形成とプレートテクトニクス

全地球的な力学境界は地下数十 km から 100 km に存在する上部マントル中の低速度層であり、この境界における移動を記述したものがプレートテクトニクスである。すなわち、この境界より上の地球表層部はあたかも剛板のような振る舞いをし、その動きは数 1000 km にもおよび少なくとも数億年以上継続していると考えられている。

上部地殻の形成についてはこのプレートテクトニクスの出現によって理解が飛躍的に進展した。特に日本のようなプレートの沈み込み帯においては、それまで存在が想定されていた“基盤”は存在せずに、側方に地殻が付加成長したものと考えられている。現在大陸になっているところでも過去に同様な過程が進行し、大陸として成長したと漠然と理解されている。このようにして成長した大陸は分裂し、新たな海洋によって隔てられる。これらの地殻成長・分裂の過程にはその地域に特有なテクトニックな出来事が直接関係しており、それが地殻の不均一性をもたらしているものと考えられている。我々はこのように上部地殻形成過程についてはその大筋を理解しているが、日本列島の場合には上部地殻に地殻成長の歴史が鮮明に書き込まれており、その後余り乱されておらず、マントルおよび下部地殻から由来する火成活動と地殻の成長の歴史を対応付けた研究がなされている。特に、日本海拡大とそれに伴う外帯の火成活動や南部フォッサマグナや日高山地における衝突現象等をその例としてあげることができる。このことから、どのようなテクトニックな場においてどのような地殻が形成されてきたかを直接確かめるために日本列島は格好な位置を占



第1図. 日本列島周辺の力学的構造. 砂目の部分は高温のために流動変形が卓越しているところ. 白抜きの部分は脆性的変形が卓越しているところ.

めており、これらの過程を解明する国際的役割を担っている。

地殻下部のダイナミクス

プレートテクトニクスの登場以来、地球全体のダイナミクスの構築が叫ばれて久しいが、プレートテクトニクスがいつまでもキネマティクスの状態で進展しないのは、海嶺における拡大機構についての知識が増大しているのに比較し、もう一方の大陸地殻のダイナミクスが不明のまま放置されているからである。日本列島の場合には地表の地質と沈み込むスラブについての知識は増大・精密化しているが、プレート運動のダイナミクスにおいて最も重要な沈み込むスラブと接する上部マントル・地殻下部に関する知識がきわめて乏しい状態であり、ダイナミクスを論ずるに至っていない。現在のこのような状態を打破するには地質科学研究者がまず、この現状を認識し、上部マントルを含む地殻のダイナミクスの構築へ向かう必要がある。

岩石は温度の上昇とともに強度を減少することから地殻の強度は深度とともに減少すると予想される。地殻下部では温度の上昇に伴い岩石がクリープを起こし、さらに変成過程が進行し、力学的強度は急速に失われる。しかし、モホ面を通過しマントルに入ると、岩質が大きく変わり強度を回復することから、大陸地殻ではモホ面が大きな力学的境界に成り得る。このような温度上昇にともなう地殻およびマントルの力学的境界を考慮に入れた嶋本(1989)の推定によると、海洋地域では地殻が薄いために地殻内では温度が上昇せず、力学境界はマントル上部の低速度層一面である。大陸地域では地殻が厚く下部地殻では温度上昇のためにモホ面に力学境界が存在するとともにマントル上部の低速度層も力学境界として機能する。沈み込み帯では、島弧マグマ活動のために地下増温率が高く、下部地殻も力学境界となり、マントルも浅い深度で低速度層を形成する。その低速度層に海洋地殻と上部マントルからなる海洋プレートが沈み込むの

で、3ないし4つの力学境界が存在することが予想される(第1図)。

日本列島の下部地殻

日本列島は島弧という典型的な変動帯に位置しており、現在、激しい地殻変動が進行している。その地殻変動は日本列島の地殻内で起こっている流動変形に起因している可能性が大きく、地殻に上部マントルを含めた地球表層のダイナミクスであるクラスタルダイナミクスを考えるために最適な位置を占めていると言えよう。また、日本列島は地表の地質が詳細に検討されており、構造発達過程をダイナミクスと合わせて検討できる段階に達していることもクラスタルダイナミクスを地質科学の一つの学問体系として構築するために好都合である。

クラスタルダイナミクスにおいては地殻を構成する岩石の種類や地温上昇に伴う岩石強度の変化を正確に知ることが最も重要となる。地殻下部におけるダイナミクス過程の記録は変成岩から読み取ることができよう。変成岩をはじめ地表に露出する地質体は一般に複雑なモザイク状に分布していることは地質学的には常識であるが、これは地殻下部のダイナミクスの反映であろう。これまでの変成岩の研究は、その岩石が生成された温度・圧力(深度)を知るために構成鉱物の化学的研究に主力がおかれている。しかし、変成岩には再結晶時の力学的状態が片理として保存されていることは良く知られており、下部地殻のダイナミクスを構築するためには、これまで研究してきた変成岩生成時の温度・圧力に加え岩石力学的強度および応力状態を明らかにする必要がある。更に、現在の日本列島の下部地殻を構成している岩石の推定、応力状態の推定を行うまでに発展させる必要がある。このようにして予想される力学的状態は現在観測されている自然地震の発震メカニズムや地震波速度等と対応付けられよう。日本列島の上部地殻内では頻繁に地震が起こるのに対し、下部地殻では地震が起らない(伊藤, 1989)。これは下部地殻岩石の強度が減じ、ク

リープや変成過程が進行していることが原因と考えられる。以上の予想を実際の岩石の定量的測定や実験の資料を蓄積することによりできるだけリアリスティックなモデルを構築する必要がある。

クラスタルダイナミクスと超深層学術ボーリング

クラスタルダイナミクスは上述のような視点に立脚し、活断層、褶曲、地殻変動、隆起・沈降、堆積速度の変遷、地殻熱流量、地震、重力、岩石物性、変成作用、火成作用等の関連分野の研究者が総合的に調査・研究・実験・測定・観測を行うことによって、近い将来、日本列島の下部地殻において現在起こっているダイナミクス過程を定量的に予想できるようになるであろう。この学問体系こそ我々の周辺で起こっているいわゆる地質現象を本質的に理解する道へと導くものであり、プレートテクトニクスの次を担うものである。しかし、このダイナミクス過程はあくまでも予想であり、その状態を直接確かめること無しには新しい学問体系を確立し、発展させることは困難である。これを直接確かめる手段として考えられるのが超深層学術ボーリングである。プレートテクトニクスもその基本となる海洋底拡大過程が深海掘削計画 DSDP によって 1968 年から 1969 年にかけて証明されることによって 1 つの学問体系として発展したことから、超深層ボーリングによる実証的重要性が理解できよう。

日本列島は地殻熱流量が大きいため、地下増温率が高く 10 km 程度の深度でも 200°C に達する地域がほとんどである。西独の KTB 掘削地点選考の第一条件は地下増温率が低いことであったが、この点から見れば日本の候補地はいずれも西独のそれよりも悪条件ということになる。しかし、現在の岩石力学の知識に基づくと、下部地殻におけるテクトニック過程はどのような岩石が構成しているかという問題よりも温度圧力条件の方が重要であり、地下増温率の高い日本列島では浅い深度でこれらの過程が進行していることになる。従って、このような過程を直接ボーリングによって確かめるには地殻熱流量の小さな安定大陸地域よりも日本列島の方がはるかに有利である。

下部地殻の反射法地震探査

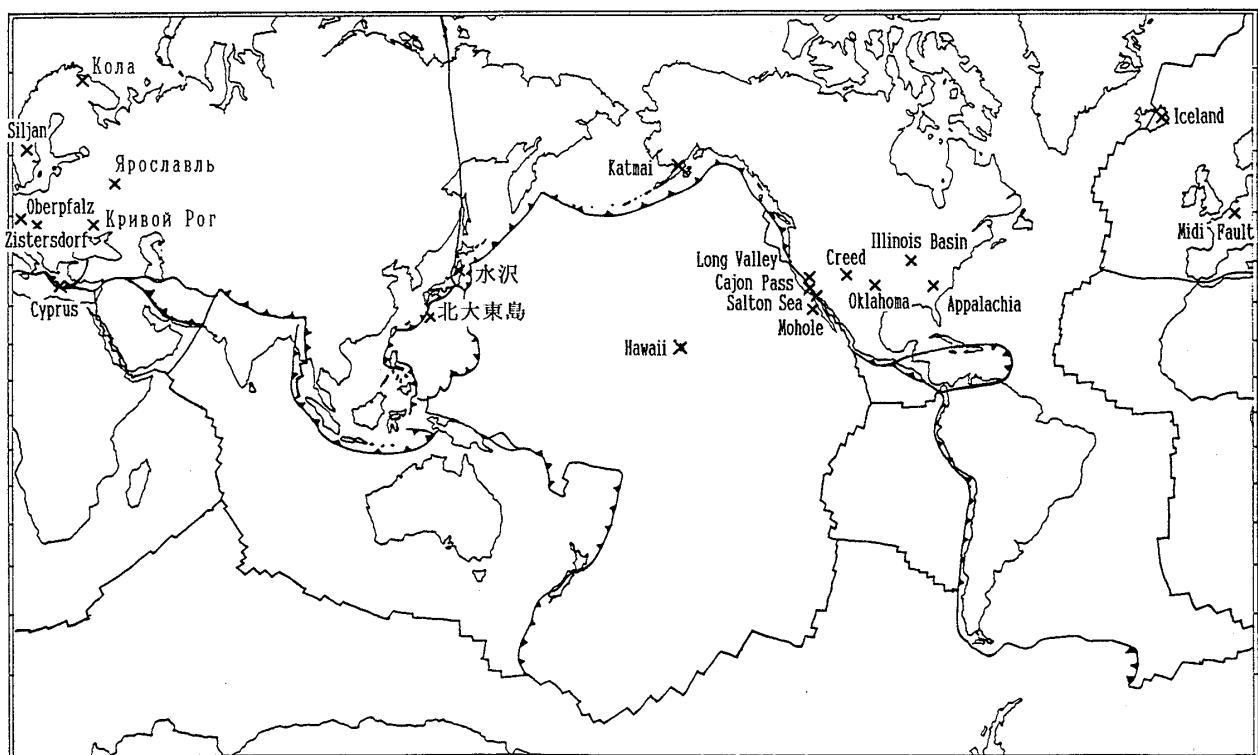
プレートテクトニクスの確立者の一人とも言われる米国の J. OLIVER を中心として実施されている反射法地震探査計画、COCORP(Consortium for Continental Reflection Profiling)は、米国全域にまたがる探査測線網を開拓している (OLIVER *et al.*, 1983)。COCORP 計画による

地殻・上部マントルの反射法地震探査はモホ面をはじめ下部地殻に多くの反射面をとらえている。このような地殻深部の地球物理探査は医学における内臓の診断や手術前に行われている CT スキャンのように、ソ連や西独の学術ボーリングのための事前調査として従来の地表調査とともに定期的に実施されている。西独においてもやはり下部地殻に多くの反射面が見出されているが、上部地殻ではこのように多くの反射面は見出されていない。しかし、S 波での反射波探査によると上部地殻にも反射面が見出されることが多い、上部地殻に含まれる液体のために見掛け上、透明になっているものと推定されている。カナダでは深層学術ボーリング計画を念頭にリソプローブ計画として組織的な下部地殻の反射法地震探査を開始している (Cook, 1985)。

日本においても上部マントルに達する反射法地震探査が北海道で試みられたが、モホ面はおろか下部地殻からの反射波すらほとんど認めることができなかった (吉井, 1988)。このことは逆に言うと、日本の下部地殻は西独の上部地殻のように液体で満たされているために透明に見えているとも考えられる。上部地殻の場合にはその液体は間隙水と予想されるが、下部地殻の場合には変成作用と関係する液状物質あるいは半溶融状態かも知れない。米国や西独で観測される下部地殻の反射面は従来の反射波探査法でとらえることができるのであるから、発震器と受震器の最大間隔から考えると、その反射面の傾斜がきわめて緩く 5 度以下と考えられる。このように水平に近い反射面が多数存在することは、下部地殻に起こった水平すべり面が現在は固化して観測されるものと予想される。米国や西独の地殻は数十億から数億年前にその活動を停止し現在に至っている安定大陸地殻であり、その反射面がすべて現在のテクトニック過程を担っているとは考えにくい。その点日本はそのような過程が正に進行しているものと考えられており、これらの過程を直接調べるには、最適な地域と言える。

世界の陸上学術ボーリング

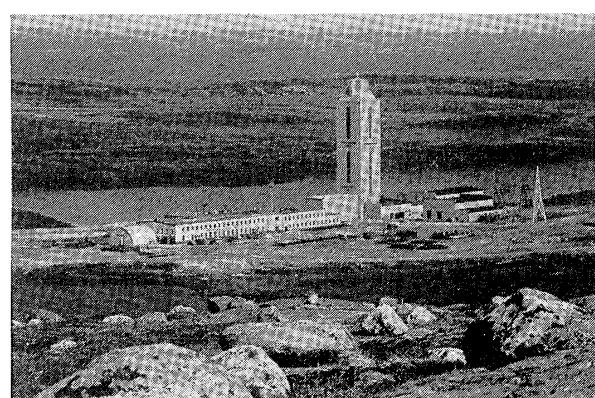
超深層学術ボーリングが地球科学研究に脚光を浴びて登場したのは 1960 年代の上部マントル探査開発計画 (UMP) の時である。日本を含め世界各国で学術ボーリングの実施計画が検討されるとともに準備作業も進められた。特に、米ソは当時の宇宙探査計画と同様に国威を掛けて取り組んだ。すなわち、米国は海洋地殻を掘り抜くモホール計画を、ソ連はコラ半島を含む数地点において大陸地殻の学術ボーリングを開始した。当時はプレートテクトニクス登場前夜に当たり、大陸と海洋とは地殻



第2図 世界の学術ボーリング地点とプレート境界。

構造を始め本質的な相違があることは認識されていたが、その起源については暗中模索の状態であり、米ソ両大国がそれぞれ取り組んだのである。日本における学術ボーリング計画が目指したのは、日本最古のシルル紀堆積物の基盤と考えられていた地震波速度秒速6 km層を明らかにすることであり、岩手県の水沢が最終候補地として選定された(第2図)。ソ連はコラ半島のボーリングを継続し、現在に至っている。米国はモホール計画を中断したが、そのテストボーリングで開発した海洋掘削技術を使用して、深海掘削計画DSDPを開始させプレートテクトニクスの基本となる海洋底拡大説を証明した(MAXWELL *et al.*, 1970)。この海洋地殻の掘削計画は現在の海洋掘削計画ODPに受け継がれている。日本ではプレートテクトニクスの出現により日本の地質の基本的見直しを迫られ、学術ボーリング計画は開始に至らなかった。

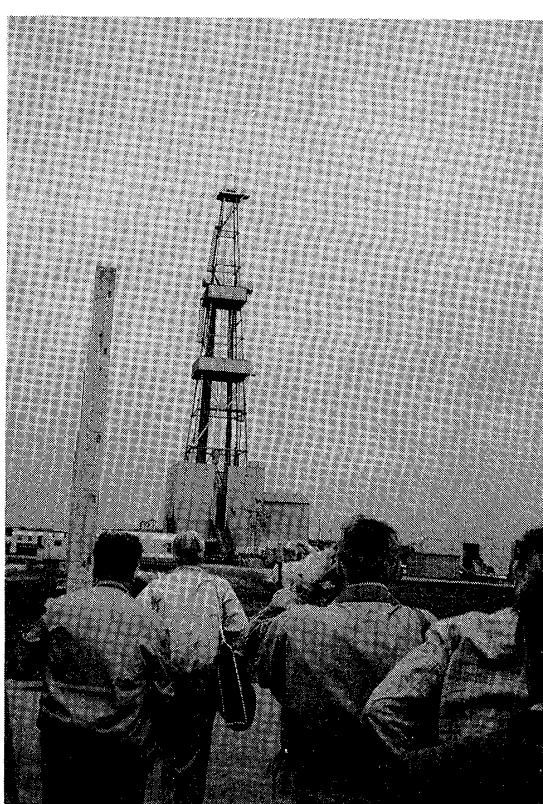
1988年8月23日から29日にかけてモスクワ郊外の古都ヤロスラウリにおいて国際セミナー「超深層ボーリングと深部地球物理探査」が開催された(SASS & BARBER, 1989)。世界各国から300人以上の専門家が集まり、4日間の発表・講演・討論・会議と1日の超深層ボーリング現場の見学会が行われ、地球深部を探るための世界最先端の動向を知ることができた。



第3図 コラ半島の世界最深陸上學術ボーリング地点 CR 3。

現在の世界の陸上學術ボーリングの状況を見ると、ソ連は世界最深記録12066 mを保持しているコラ半島のCR 3(第3図)を含め、CR 1からCR 11までの地点で超深層学術ボーリング計画を強力に推し進めている。このセミナーの見学会が行われたのは黒海北方の鉄鉱産地であるクリボイログのCR 8の現場である(第4図)。掘削技術の質、掘削計画の規模いずれを見ても他の国を大きく引き離している。

西独では1970年代の後半から検討を始めたKTB



第4図. クリボイロクの陸上学術ボーリング地点
Cf 8.

(Kontinentales Tiefbohr Programm; 大陸深層ボーリング計画)が 14 km の超深層学術ボーリングを目指してボヘミア地塊西縁のバイロイト南のオーバーファルツ (Oberpfalz)において、昨年 1987 年 9 月から浅部調査ボーリングを開始しており (BEHR *et al.*, 1989 in press), その成果をこのセミナーで早くも公表し、本命の超深層ボーリングの準備を着実に進め、世界の注目を浴びている。

米国は多岐に渡る学術ボーリング活動を展開している。現在拡大しているカリフォルニア湾奥部で実施されたサルトンシー学術ボーリング計画(SSSDP)は 1986 年に 350°C 以上という悪条件を 3.2 km まで掘削している (SASS & ELDER, 1986)。活構造運動のダイナミクスを探ろうとするロサンゼルス東方のカホンパスにおけるサンアンドreas断層の掘削は 1986 年に開始された (PHILLIPS, 1988)。マグマ活動を直接知るためのカリフォルニアのロングバレーカルデラ (WOLLENBERG *et al.*, 1987) やアラスカのカトマイ火山ボーリング計画 (EICELBERGER & HILDRETH, 1986), 浅熱水性鉱脈系の根源を明らかにするためのコロラドのクリード鉱山ボーリング計画 (BETHKE & LIPMAN, 1987), 超深層ボーリング

を目指すア巴拉チア深層坑井 (ADCOH: HATCHER *et al.*, 1985), イリノイバーズン超深層坑井 (IBUD: COATES *et al.*, 1983) や海洋地殻を掘り抜きモホールを目指すハイの計画等が検討されている。しかし、国家経済を反映してか、その活動はやや低迷気味である。現在中断しているサンアンドreas断層沿いのカホンパスの掘削の再開や、ア巴拉チアでの超深層ボーリングの開始が強く望まれる。

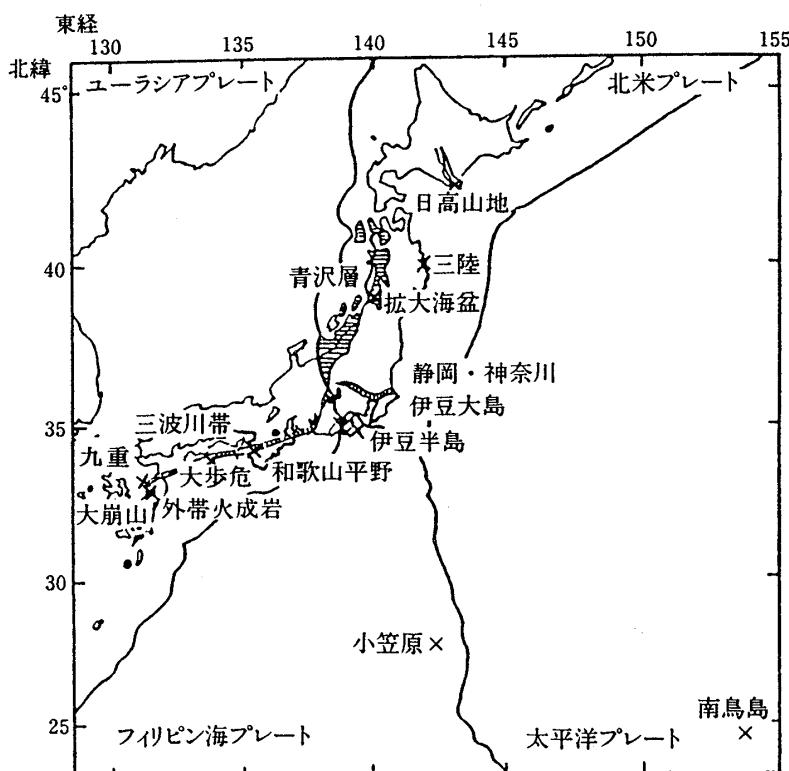
スウェーデンでは原子力発電所の閉鎖決議のもとに、同国がその電力需要の 50% を依存している原子力の代替エネルギー資源を求めて、3 億 6 千万年前に隕石の衝突によって形成されたシルヤンクレーターのボーリングを進めている。この地域は油兆が在り、その母岩と考えられる岩石が存在しないため、マントル由来の炭化水素がその起源ではなからうかとの仮説が提出されている (GOLD, 1988)。この仮説の実証は、新しい資源を求める政府の計画とも合致し、1986 年 6 月にボーリングが開始された。目標深度の 7.5 km には当初予算では達することはできず中断しているが、各層からの寄付に頼って再開を期している (脇田, 1988)。

カナダのダルハウジー大学を中心とする地殻探査掘削グループ (ICRDG) は、1978 年にアイスランド (FRIDLEIFSSON *et al.*, 1982), 1982 年から 1986 年にかけてキプロスの掘削を終えて (THY, 1987), 西太平洋の掘削計画を検討中である。

オーストリアはウィーンの北東約 50 km のジステルスドルフ (Zistersdorf) において、パラテーチスの新第三系を掘り抜き、古第三系そして上部ジュラ系に到達する 8553 m の学術ボーリング Ü Tla-2A を実施している (RINGHOFER, 1986)。この深度はソ連のコラ半島の超深層ボーリング、米国のオクラホマの石油井に次ぐものである。

ベルギーではミディー衝上断層の学術ボーリング計画を実施しており (BOUCKERT, 1985), フランスは従来の掘削技術により地質構造を確かめるための学術ボーリング計画を進めている。

このように活発な学術ボーリング活動を反映して、国際リソスフェア探査開発計画では陸上学術ボーリングについての委員会を設置し、情報の交換や国際シンポジウムの企画を行っている。上記のセミナーもこの委員会が主催者となって加わっている。これまでにこの委員会が主催した国際シンポジウムはニューヨーク、西独シーハイム、スウェーデンシルヤンで開催されている。また、1984 年のモスクワ万国地質学会では学術ボーリングについてのシンポジウムが企画され、コラ半島の超深層



第5図 日本の陸上学術ボーリング候補地.

ボーリングの結果が初めて公表された。1989年のワシントン万国地質学会でもシンポジウムが計画されている。シュプリンガー社はニューヨークのシンポジウムの内容の出版(RALEIGH(ed.), 1985), コラ半島超深層ボーリングの結果についての英訳(KOZLOVSKY(ed.), 1987)の出版に引き続き、上記のシンポジウムの内容をシリーズの単行本“Continental Crust through Drilling”として出版を行っており、さらに学術ボーリングに関する国際雑誌“Scientific Drilling”的刊行も始めた。

日本の陸上学術ボーリング活動

日本における学術ボーリング活動は1934年の北大東島珊瑚礁ボーリング(杉山, 1934)により開始された。そして、上部マントル探査開発計画UMPでは本格的に計画が検討され、1970年に、四国の三波川帯および伊豆大島とともに事前調査が実施された岩手県水沢が最終候補地として決定された。さらに、日高の幌満における橄欖岩のテストボーリングも実施されたが(丹治, 1974), プレートテクトニクスの登場により実施は見合わせられて現在に至っている。その間に地質調査所、金属鉱業事業団、石油公団、新エネルギー機構などによる資源探査・開発を目的とするボーリングが日本各地で行なわれた。

日本の陸上学術ボーリング計画は現在、ソ連に遅れる

こと10数年、西独のKTBから約10年遅れて進行している。すなわち、1970年代後半から新たに開始された陸上学術ボーリング計画の検討は、1986年に組織された公式のワーキンググループによって引き継がれており、現在12の候補地が検討されている(第5図)。また、予算的裏付けを得る努力や、事前調査および掘削技術開発のフィジビリティスタディも開始されようとしている。

この計画検討において行われている活動を紹介すると、

ニュースレター：1981年から隨時発行されており、1988年12月に21号が発行されている。その時々の学術ボーリングに関する国内・国外の情報を日本語で紹介し、全国主要研究機関・関連企業および希望者個人へ陸上学術ボーリング事務局(静岡大学理学部地球科学教室)より発送している。

既存ボーリング資料集(新妻ほか, 1982)：1970年代後半に行われた国際リソスフェア探査開発計画DELPの立案作業中に学術ボーリング計画も取り上げられ検討されたが、その際に既存のボーリング資料の整理・検討の必要性が叫ばれ、作成されたものである。この資料集には、学術、金属鉱業、地熱、石油、農林関係のボーリング428本の資料が同一規格の5千分の1の地質柱状図と位置図とともに収録されている。

コラ半島の超深度掘削井一大陸地殻の深部構造の超深度掘削井による研究開発について—(ソビエト連邦地質省;木下・肇訳, 1986) : 1984 年の万国地質学会の訳である。原本(Министерство Геологии СССР, 1984)は 490 頁におよぶ大著であるが、本訳では地質・地球物理・掘削技術の 3 章の内、地質の一部と地球物理の章が訳出されている。これは 1987 年に Springer 社から英訳が出版されるまでは、コラ半島のボーリングについて知ることのできる唯一の訳本であった。

陸上学術ボーリング候補地集 I, II, III(荒牧・新妻編, 1988 a, b; 1989) : 現在検討されている候補地について掘削目的・地球科学における意義、研究史、地質図、屈折法地震探査による地下構造、地殻熱流量、重力異常、反射法地震探査候補測線、予想断面、掘削候補地点、掘削予想岩石をこれまでの資料をもとにまとめたものである。I では伊豆半島、青沢層、大崩山、日高山地、II では南鳥島、伊豆大島、和歌山平野、小笠原諸島、大歩危、北部北上、III では九重、静岡・神奈川地域の計 12か所を収録している。

カラーパンフレット : 学術ボーリングの重要性・日本および世界の学術ボーリング活動・日本の学術ボーリング候補地について関係者の理解を得ることを目的に陸上学術ボーリングワーキンググループから出版したものである。

シンポジウム・学術出版物 : これまでに国内で開催された陸上学術ボーリングに関するシンポジウムは、1981 年 12 月の「学術ボーリングと固体地球科学の将来」(新妻編, 1981) および 1987 年 12 月の「陸上学術ボーリング」(新妻編, 1988) で、いずれも文部省科学研究費総合研究 B によるものである。1989 年の地質学会においては「陸上学術ボーリングと日本の地球科学」が企画されている。日本の学術ボーリングについて紹介した学術出版物としては新妻(1981, 1984, 1987, 1988 a, b), NIITSUMA(1985), 田中(1987)などがある。

日本における学術ボーリング候補地

学術ボーリングの先進国であるソ連や西独などはすでに何億年前や何十億年前に地殻形成やテクトニック過程が終了した大陸地殻の上に位置している。一方、日本列島は正に地殻形成や変動が進行している地域であり、アジア大陸の成長・分離過程および現在のテクトニック過程を知るための貴重な位置を占めており、それらの過程を支配しているクラスタルダイナミクスを直接検証するためには最も適した場と言えよう。世界の地球科学者は

等しく地殻形成・テクトニック過程そのものを直接ボーリングによって確かめたいと切望しているが、多くの国では適当な位置に立地していないこと、地表からの調査が十分なされていないことなどの理由により変動帯の学術ボーリングには未だ手が付けられていない。

日本列島は海洋プレートの沈み込み帯の陸側の島弧であり、日本列島のテクトニクスはプレートの沈み込みに基本的に支配されていることから、沈み込むプレートを直接ボーリングによって確かめることを一つの目標としてあげることができる。しかし、太平洋プレートの沈み込む東北日本・北海道の海岸線ではその深度が 60 km を越し、フィリピン海プレートの沈み込む西南日本の潮岬をはじめとする紀伊半島・四国・九州の岬でも深度 20-25 km であり、相模湾の房総・三浦半島の先端でも 20 km と現在のボーリング技術の枠を大幅に越えている。ただし、南部フォッサマグナにおいては伊豆の衝突により沈み込む境界が本州中部に八の字型に湾入しており、駿河湾・相模湾奥部ではスラブの深度は浅く、静岡で 10 km 程度、御前崎で 20 km とボーリングによって直接到達可能な範囲にある。このことから静岡・神奈川地域が沈み込みスラブを直接掘削する目的で検討されている(笠原, 1989)。

海洋プレートの沈み込みにともなう島弧活動の中でプレート間の相対運動が地殻の力学状態を支配しているのは前弧域である。前弧域の海溝陸側では海溝堆積物の側方付加が進行している。これは、陸域から海溝に供給された堆積物が海溝の島弧側に付加することにより、上部地殻が側方に生長していることによる。これらは沈み込む海洋プレートと楔状マントルおよび地殻との力学的相互作用によって形成されていることは明らかであり、その力学過程の解明が待たれる。このような力学過程の解明を目的として、地下深部(20-30 km)から上昇し地表に露出していると考えられる三波川変成帯が候補地としてあげられている(坂野ほか, 1988)。前弧域および非火山弧にともなう高い正の重力異常および磁気異常も前弧域のダイナミクス過程の現われと考えられており、それらの異常の実体を直接ボーリングするものとして三陸海岸(箕浦, 1988)や小笠原(海野ほか, 1988)が検討されている。

島弧特に前弧域ではプレートの相互作用により多くの地震が起こっているが、その中で注目されている地域として和歌山平野がある(溝上・中村, 1988)。ここでは地下数 km の深度でも群発地震が起こっており、その機構として考えられるのは地下から液体を含むものが上昇しているとされ、ヘリウムの同位体比異常もともなって

いる。この震源を目指す学術ボーリングも提案されている。

大陸は海洋プレートの沈み込みにともなう付加作用によって側方に成長するが、それが大陸地殻になるためには花崗岩の進入が起こって初めて完成するものと考えられる。このような付加体への花崗岩进入は日本海拡大の際に四国海盆へ迫り上がった西南日本の外帯に起こっている。この进入過程を知るための候補地として大崩山があげられている(高橋, 1988)。ここでは花崗岩の进入にともなう地殻溶融の物理・化学、物質・熱収支、ストーピング過程の実証そしてクラスタルダイナミクス等が目的とされている。

島弧活動の中で最も顕著なのは火山弧の火成活動であり、陸上学術ボーリングの候補地としても取り上げられている。まず、活動している火山そのものをボーリングしようと検討されているのが伊豆大島(荒牧, 1988)および九重(江原・茂木, 1989)である。これはマグマ発電等とも関連し注目されているが、ボーリングの高温技術対策の開発あるいは実証のためにも関心が持たれている。火山弧そのものの掘削を目指すものとしては伊豆半島が候補地にあげられており(小山, 1988)、日高変成帶も過去の火山弧の地下深部を知るための候補地として検討されている(小松, 1988)。また、小笠原は海洋地殻上に形成された島弧としてオフィオライトの形成とともに関連して検討されている(海野ほか, 1988)。これらの島弧火成活動に關係する学術ボーリングは、島弧火成活動にともなう地殻形成、特に深成岩・キュムレートの島弧地殻への裏打ち作用と变成作用、マグマ混合、花崗岩マグマの生成、それらの大陸地殻との比較、地球の熱および物質循環における役割、クラスタルダイナミクス等の問題の解明を目的としている。

約 1500 万年前の西黒沢期から女川期にかけて 100 万年以内という短期間に高速で拡大したと言われている日本海の形成は、日本列島がアジア大陸東縁の陸弧から現在のような島弧に変化した大事件であり、プレートの沈み込み帯を理解するために日本の地球科学界が解明しなければならない重要な問題の一つである。このような高速の縁海拡大の時のダイナミクス、特にアジア大陸東縁の地殻あるいはプレートの力学的強度は上部地殻・下部地殻・上部マントルのいずれが担っていたのか、そしてその原動力は何か(能動的拡大か受動的拡大か)、その時のマントルの状態や組成の変化、高速拡大時に起こった地球化学バランスの変化、拡大後の地下増温率の変遷と縁海深度の増大そしてマントル由来の炭化水素等を解明するために学術ボーリングは必要不可欠である。日本

海域における学術ボーリングは ODP 海洋掘削計画において 1989 年に計画されており、成果が期待されているが、掘削船の掘削能力からして、日本海の海洋地殻内部までのボーリングはできず、陸上学術ボーリングにおいて行われることが期待されている。その候補としては秋田・山形県境付近の青沢層があげられている(佐藤・天野, 1988)。

以上あげたいずれの候補地もその地域特有のテクトニックな出来事を解明すると同時に、現在の力学的状況を直接解明することを目的とする。地殻内のクラスタルダイナミクスは地下増温率に従って高温になると、その過程が指数関数的に進行することが予想される。これらの過程を学術ボーリングによってどれだけ直接捉えることが可能かは、ボーリング技術の高温対策と高温の地下の状態を直接測定できる計測法の開発にかかっている。ソ連や西独の超深層ボーリングにおいても、目標深度である 14-15 km に達すると高温に対する同様な対策が必要となるので、その方面的技術開発に邁進している。日本が地熱開発にともなって蓄積した高温技術は世界的に高く評価されており、日本が学術ボーリングを開始し、合わせてボーリング技術の国際協同開発に着手することを関係各国は強く希望している。

これらの超深層ボーリング候補地の他に、日本が世界に先駆けて行った珊瑚礁ボーリングについての検討もなされており、南鳥島が候補として上げられている(小西, 1988)。

ま と め

本総説では陸上学術ボーリング活動について紹介するとともに陸上学術ボーリングの地質科学における科学史的位置づけを行い、学術陸上ボーリングがプレートテクトニクスの次代を担うクラスタルダイナミクスを確立するための根幹となるビッグプロジェクトであることを論じた。以下にその内容を要約すると:

- 1) 現在の地球科学の発達段階とニュートン力学の発展段階を対比してみると、プレートテクトニクスの登場はケプラーの惑星運動法則の確立に対応し、地球を本質的に理解するためには、さらにガリレオおよびニュートンの段階を経る必要がある。ガリレオ・ニュートンの段階に対応させられるものは、変動帶の地殻の力学を記述する学問体系であるクラスタルダイナミクスであろう。
- 2) 日本列島は変動帶に位置しており、地表の地質が詳細に検討され、構造発達過程をダイナミクスと合わせて検討できる段階に達しており、島弧地殻を支配して

いるクラスタルダイナミクスを確立するために最適な地域である。超深層陸上學術ボーリングはこのクラスタルダイナミクスを直接確かめる手段として不可欠な手段である。

3) クラスタルダイナミクスが扱う地殻のテクトニック過程は温度条件に支配されており、地下増温率の高い日本列島では浅い深度でこれらの過程が進行しているので、直接ボーリングによって確かめることが可能である。

4) ソ連は世界最深記録 12066 m を保持しているコラ半島を含め、数地点で超深層學術ボーリング計画を強力に推し進めており、西独は KTB(大陸深層ボーリング計画)を開始し、米国は多岐に渡る學術ボーリング活動を展開している。スウェーデンは原子力の代替エネルギー資源を求めてシルヤンクレーターのボーリングを進めしており、カナダのダルハウジー大学を中心とする地殻探査掘削グループ(ICRDG)はアイスランド、キプロスの掘削を終えて、西太平洋の掘削計画を検討中である。オーストリアは 8553 m の學術ボーリング実施し、フランス・ベルギーでも地質構造を解明するための學術ボーリングを実施している。

5) 各国におけるこのような學術ボーリングへの関心の高まりを反映し、万国地質学会ではシンポジウムが計画・実施されているのを始め、国際シンポジウムが毎年のように開催されており、學術ボーリングに関する国際専門誌の刊行も始められている。

6) 日本においては、陸上學術ボーリングを実施するための活動として、陸上學術ボーリングニュースレター、既存ボーリング資料集、陸上學術ボーリング候補地集 I・II・III、カラーパンフレットの発行とともにシンポジウムが開催されている。

7) 日本において現在検討されている候補地は、沈み込むスラブを直接掘削する静岡・神奈川地域、前弧域地下深部から上昇し地表に露出している三波川変成帯、前弧域の重力異常および磁気異常実体を目指す三陸海岸や小笠原、前弧域の地震多発地域における震源掘削を目的とする和歌山平野、付加体への花崗岩進入過程を知るための大崩山、活動している火山の伊豆大島および九重、火山弧の掘削を目指す伊豆半島、過去の火山弧の地下深部を知るための日高変成帯、海洋地殻上に形成された島弧である小笠原、日本列島がアジア大陸東縁の陸弧から現在のような島弧に変化した日本海拡大を解明する秋田・山形県境付近の青沢層があげられている。

8) いずれの候補地もその地域特有のテクトニックな出来事を解明すると同時に、現在進行しているクラス

タルダイナミクス過程を直接測定することを目的としている。ダイナミクス過程の直接測定のためにはボーリング技術の高温対策と高温の地下の状態を直接測定できる計測法の開発が不可欠である。

文 献

- 荒牧重雄, 1988 : 伊豆大島火山. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上學術ボーリング候補地集 II. 陸上學術ボーリングワーキンググループ, 11-18.
- ・新妻信明(編), 1988 a : 陸上學術ボーリング候補地集 I. 79 p., 陸上學術ボーリングワーキンググループ.
- ・———(編), 1988 b : 陸上學術ボーリング候補地集 II. 98 p., 陸上學術ボーリングワーキンググループ.
- ・———(編), 1989 : 陸上學術ボーリング候補地集 III. 60 p., 陸上學術ボーリングワーキンググループ.
- 坂野昇平・新正裕尚・伊藤潔・高須晃, 1988 : 四国の三波川帯. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上學術ボーリング候補地集 II, 陸上學術ボーリングワーキンググループ, 63-81.
- BEHR, H.-J., KEHRER, P. and RISCHMULLER, H., 1989 in press: The German Continental Deep Drilling Program, objectives and state of work. In "Observation of the continental crust through Drilling III", Springer Verlag, Berlin (in press); 1988 : 西独の大陸深層ボーリング計画—目的および現状, 陸上學術ボーリングニュースレター, 20, 5-15.
- BETHKE, P. M. and LIPMAN, P. W., 1987: Deep environment of volcanogenic epithermal mineralization-proposed research drilling at Creede, Colorado. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 68, 177-189; 浅熱水性鉱化作用の深部状態—コロラド州クリード鉱床での探査計画. 學術ボーリングニュースレター, 16, 6-9.
- BOUCKERT, J., 1985 : Deep drilling programs In Belgium. In RALEIGH, C. B. (ed.) "Observation of the continental crust through Drilling I", 29-38, Springer-Verlag, Berlin.
- COATES, M.S., HAIMSON, B.C., HINZE, W. J. and VANSCHMUS, W. R., 1983 : Introduction to the Illinois Deep Hole Project. *Jour. Geophys. Res.*, 88, 7267-7275.
- COOK, F. A., 1985 : Geometry of the Kapuskasing structure from a LITHOPROBE pilot reflection survey. *Geology*, 13, 368-371.
- EICHELBERGER, J. C. and HILDRETH, W., 1986 : Research drilling at Katmai, Alaska. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 67, 778-780; ア拉斯カ、カトマイ火山の掘削, 學術ボーリングニュースレター, 13, 9.
- 江原幸雄・茂木透, 1989 : 九重硫黄山—火山性高温地熱系下の深部構造. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上學術ボーリング候補地集 III, 陸上學術ボーリングワーキンググループ, 1-26.
- FRIDLEIFSSON, I. B., GIBSON, I. L., HALL, J. M., JOHNSON, H. P., CHRISTENSEN, N. I., SCHMINCKE, H.-U. and SCHÖNHARTING, G., 1982 : The Iceland Research Drilling Project. *Jour. Geophys. Res.*, 87, 6359-6361.
- GOLD, T. (脇田宏訳), 1988 : 地球深層ガス—新しいエネルギーの創生. 286 p., 日経サイエンス社, 東京.
- HATCHER, R. D., Jr., COSTAIN, J. K., GLOVER, L. III, PHINNEY, R.

- A., ZOBACK, M. D., WILLIAMS, R. T., TALWANI, P., DIEBOLD, J. B. and ANDERSON, R. N., 1985 : Rationale for selecting a site for an ultra-deep dedicated scientific drill hole in the Southern Appalachians. In RAILEIGH, C.B. (ed.) "Observation of the continental crust through Drilling I", 343-354, Springer-Verlag, Berlin.
- 伊藤 潔, 1989 : 地殻内の地震発生層の深さ分布と内陸大地震. 月刊地球, 11, 97-104.
- 笠原敬司, 1989 : 沈み込み機構の直接解明—静岡・神奈川・千葉の15 km 級ボーリング. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅲ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 27-50.
- 小松正幸, 1988 : 日高山地, 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅰ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 65-79.
- 小西健二, 1988 : 南鳥島(マーカス島). 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅱ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 1-10.
- 小山真人, 1988 : 伊豆半島の過去と現在. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅰ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 1-32.
- KOZLOVSKY, Y.A. (ed.), 1987 : *The superdeep well of the Kola Peninsula*. 558 p., Springer-Verlag, Berlin.
- MAXWELL, A. E., von HERZEN, R. P., HSÜ, K. J., ANDERSON, J. E., SAITO, T., PERCIVAL, S. F., MILOW, E.D. and BOYCE, R.E., 1970 : Deep Sea Drilling in the South Atlantic. *Science*, 168, 1047-1059.
- Ministerstvo Geologii CCCP, 1984 : Коласка сверхглубокая, 490 p., Недра, Москва.
- 箕浦幸治, 1988 : 北部北上山地ジュラ紀付加体と下部地殻の掘削. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅱ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 83-98.
- 溝上 恵・中村正夫, 1988 : 和歌山平野の群発地震活動と震源掘削の意義. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅱ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 19-33.
- 中村一明・平 朝彦(編), 1986 : 日本列島の形成—変動帶としての歴史と現在. 414 p., 岩波書店, 東京.
- 新妻信明, 1981 : 「深層ボーリング」シンポジウム, 月刊地球, 3, 5-14.
- (編), 1981 : 特集号「深層ボーリング(1)・(2)」. 月刊地球, 3, 5-112.
- , 1984 : 陸上学術ボーリングと地殻構造. 科学, 54, 754-760.
- NIITSUMA, N., 1985 : Scientific Continental Drilling Project in Japan and Scientific Goals. In RAILEIGH, C.B. (ed.) "Observation of the continental crust through Drilling I", 39-55, Springer-Verlag, Berlin.
- 新妻信明, 1986 : 新第三紀構造運動とプレートテクトニクス. 中川久夫・小高民夫・高柳洋吉(編), 北村記念地質学論文集, 北村記念事業会, 289-296.
- , 1987 : 学術大深度ボーリングと地球科学. 土と基礎, 35, 45-49.
- , 1988 a : 超深層学術ボーリングをめぐる最近の動向. 科学, 58, 682-683.
- , 1988 b : 世界の学術ボーリングと日本の陸上学術ボーリング. 月刊地球, 10, 162-167.
- (編), 1988 : 特集「陸上学術ボーリング(1)・(2)」. 月刊地球, 10, 162-296.
- ・小西健二・和田秀樹・北里 洋・天野一男・箕浦幸治, 1982 : 既存ボーリング資料集. 670 p., 科学研究費「学術ボーリング計画の研究」, 静岡.
- OLIVER, J., COOK, F. and BROWN, L., 1983 : COCORP and the continental crust. *Jour. Geophys. Res.*, 88, 3329-3347.
- PHILLIPS, R. J. (ed.), 1988 : Scientific drilling near the San Andreas Fault. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 931-1076.
- RAILEIGH, C. B. (ed.), 1985 : *Observation of the continental crust through Drilling I*. 364 p., Springer-Verlag, Berlin.
- RINGHOFER, W., 1986 : Geologische Auswertung von Bohrparametern beim übertiefen G Aufschluß im Wiener Becken. *Geologie*, 102, 116-122.
- SASS, J. and BARBER, G.A., 1989 : Continental drilling-superdeep drilling and deep geophysical research. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 70, 135-136.
- and ELDERS, W. A., 1986 : Salton Sea Scientific Drilling Project-scientific program. *Geotherm. Resource Council Bull.*, 15, (9), 21-26.
- 佐藤比呂志・天野一男, 1988 : 山形県北西部中部中新統青沢層の掘削とその意義. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅰ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 33-50.
- 嶋本利彦, 1989 : 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス—剛体プレートから変形するプレートへ. 科学, 59, 170-181.
- ソビエト連邦地質省(木下 肇訳), 1986 : コラ半島の超深度掘削井—大陸地殻の深部構造の超深度掘削井による研究開発について—. DELP 出版物, 8, 90 p.
- 杉山敏郎, 1934 : 北大東島試錐に就いて. 東北大地質古生物邦文報告, 11, 1-44.
- 高橋正樹, 1988 : 九州東部大崩山花崗岩体. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅰ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 51-64.
- 田中彰一, 1987 : 学術ボーリングについて. 石油技術協会誌, 52, 466-477.
- 丹治耕吉, 1974 : 北海道幌満地区における UMP 深層試錐のテストボーリングについて. 地調月報, 25, 609-629.
- THY, P., 1987 : Magmas and magma chamber evolution, Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology*, 15, 316-319.
- 朝永振一郎, 1981 : 物理学とは何だろうか, 上. 246 p., 岩波書店, 東京.
- 海野 進・白木敬一・黒田 直, 1988 : 小笠原諸島—世界初のモホールに向けて. 荒牧重雄・新妻信明(編), 陸上学術ボーリング候補地集Ⅱ, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 35-61.
- 脇田 宏, 1988 : スウェーデンにおける深部ボーリング. 月刊地球, 10, 171-176.
- WOLLENBERG, H.A., SOREY, M.L., FARRAR, C.D., WHITE, A.F., FLEXNER, S. and BARTEL, L.C., 1987 : A core hole in the Southwestern Moat of the Long Valley Caldera : early results. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 68, 529-534 ; ロングバレーカルデラ南西部における掘削速報. 学術ボーリングニュースレター, 16, 3-5.
- 吉井敏剋, 1988 : 地震探査—特に下部地殻について. 月刊地球, 10, 183-187.

(要旨)

新妻信明, 1989 : 地質科学の将来と陸上学術ボーリング—学術ボーリングは地質科学のビッグプロジェクトたりうるか—。地質雑誌, 95, 603-614. (NIITSUMA, N., 1989 : Continental scientific drilling as a big project in geological science. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 95, 603-614.)

プレートテクトニクスは地球表層部の運動像を記述することに成功したが、その運動の力学過程を理解するまでには至っていない。現在のこのような段階はニュートン力学の成立におけるケプラーの段階に対比することができ、更なる発展が期待される。

プレート沈み込み帯の島弧系では火成作用をともない、地殻内の力学過程が最も活発な地域である。この過程は変成岩の形成や地殻深部から地表におよぶテクトニックな変動に関係しており、地質学的過程と直結しているはずである。陸上学術ボーリングはこの地殻の力学、クラスタルダイナミクス、を直接研究する手段であり、地質科学の基本的発展のために絶対必要である。プレートテクトニクスの次代を担うべく、日本の島弧系の異なった位置を占め、それぞれ異なったテクトニクスの背景を有する 12ヶ所において超深層ボーリングを含む陸上学術ボーリング計画が検討されている。