

## 脱皮する陸上學術ボーリング計画と21世紀の地質学

Renewed continental scientific drilling project and geology in the 21st century

### Abstract

新妻信明\*

*Nobuaki Niitsuma\**

1997年9月19日受付.

1997年12月15日受理.

\* 静岡大学理学部地球科学教室.

Institute of Geosciences, Shizuoka University

836 Oya, Shizuoka 422-8529, Japan

Email: senniit@sci.shizuoka.ac.jp

Continental scientific drilling projects have been promoted actively in the world for the latter part of 20th century with the notion that our understanding of the Earth's interior is extremely insufficient. International Continental Scientific Drilling Program was initiated to promote continental scientific drilling projects with a global view and with the aim of international cooperation. The science of geology should be more extensively taken into consideration and the technology for preventing of bore-hole break-out should be developed in the continental drilling projects for the 21st century. Because the accretion and arc magmatism accompanied by subduction of the oceanic plate are particularly important on the formation of the continental crust, continental scientific drilling projects on the Japanese Islands will play an important role in the progress of geological science and improving the wellbeing of the humankind in the 21st century.

*Key words: continental scientific drilling, ICDP, formation of the continental crust, subduction zone, and bore-hole break-out.*

### はじめに

自然科学において一次資料が十分に獲得できるかどうかは、その分野が健全に成長し、魅力的であるかを判定するための良い指標である。地質学における陸上からの一次資料獲得は、1950年代に峠を越し、海洋からの一次資料獲得へ関心が向けられた。海と陸の資料をもとに、地球科学の革命と言われるプレートテクトニクスが生み出され、地質学は近代科学へ脱皮した。21世紀において地質学が充分魅力ある分野として健全な発展を遂げるかどうかは、地質学がどれだけ一次資料を得ることができるかにかかっている。

量的に見れば、地質学における一次資料の大部分は地表から獲得されている。地表は地質学を育む基盤であり、地球科学の発展に伴って提唱される仮説の検証やより詳細な検討のために最も重要な資料源であることは、21世紀においても変わらないであろう。しかし、これだけで地質学が地球科学の飛躍的発展を担い、充分魅力的な分野として留まれるであろうか。

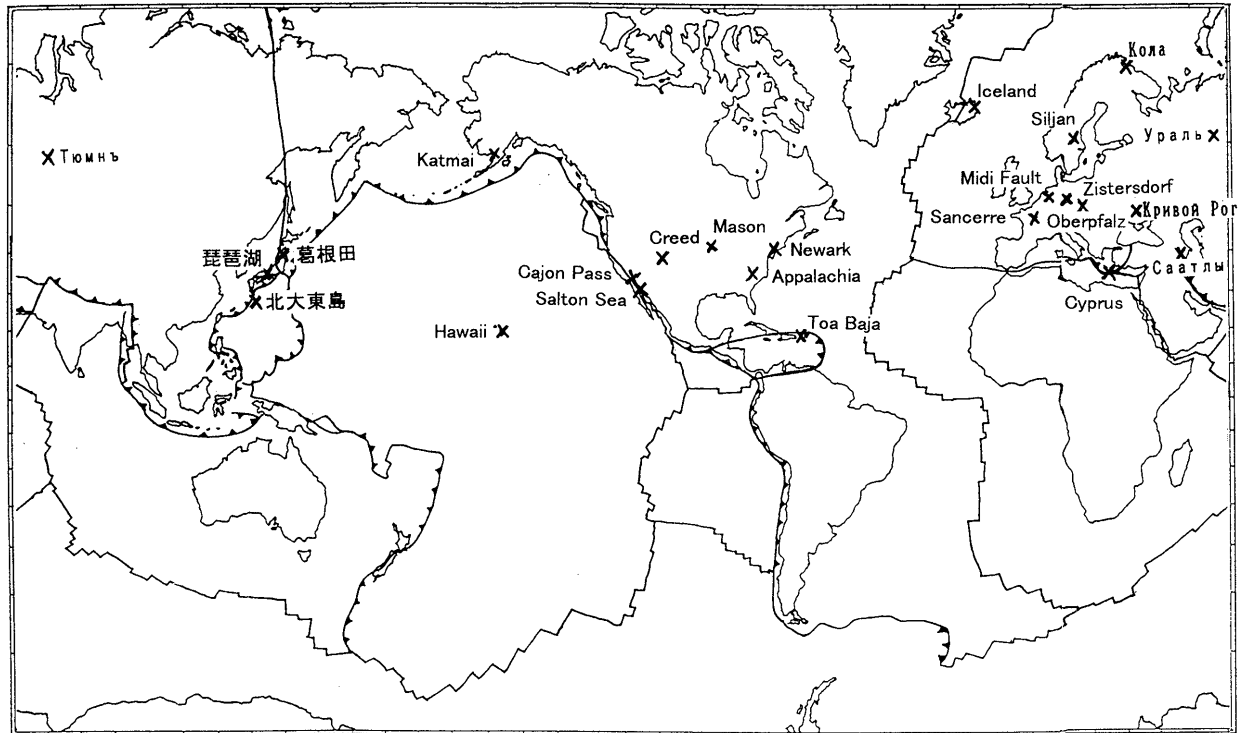
21世紀には人口の爆発的増大と建設技術の発展に呼応して人類活動は拡大され、開発は地表のみならず地下にもおよび、地下への関心はこれまで以上に強くなることは充分予測できる。この新たな領域からの一次資料を考古学のように積極的に得て、地質学の発展に結び付けるとともに、開発の後を追うに留まらず、地下に関するより完全な理解のために一次資料の意図的な獲得に踏み出すことができれば、地質学はより一層魅力的な分野として発展するであろう。そのために

は、まだ見たことのない地下深部からの試料を獲得することが地質学にとって最も直接的である。地下の試料を直接得る手段は種々存在するが、その中でボーリングは最も安価な方法である。天文学では一次資料を得るために巨大望遠鏡建造の国際競争が繰り広げられているが、21世紀の地質学では地球内部を覗く望遠鏡であるボーリングが重要な役割を果たすであろう。

20世紀後半は地球科学の発展と技術開発に支えられ、地下深部から試料を直接採取する陸上學術ボーリングが国威を懸けて実施された(第1図)。これらの経験から、国にこだわらず、全地球的視野に立ち、国際協力によって陸上學術ボーリングを実施しようとする気運が生まれ、国際陸上科学掘削計画ICDPが1996年に発足した。ここでは、この国際協力による陸上學術ボーリング計画が、21世紀の地質学を健全に発展させ、充分魅力あるものにしようかどうかを検討することとする。

### 日本における陸上學術ボーリング活動

學術ボーリングは地表調査の実施に比較して多額の予算を必要とするが、1960年代から1990年代にかけて10年毎に実施された地球科学関係の国際協同研究計画を企画する際に検討がなされた。1960年代には米国が海洋地殻を掘り抜くモホール計画、1970年代にはソ連が大陸上部地殻を掘り抜くコラ半島の超深層ボーリング、1980年代には西独がボヘミア地塊西部において古生代のプレート境界を掘り抜くKTBが企画・実行された。



第1図 世界の陸上學術ボーリング地点. 実線はプレート境界.

日本でもその節目ごとに国家事業として実施すべき事業の一つとして学術ボーリングが話題になり、1980年代のリソフェア探査開発計画立案時には、西独・米と肩を並べて検討が開始された。実施こそ見送られたが、学術ボーリングの継続的な検討のために、日本学術会議に陸上学術ボーリングワーキンググループが設置された。このワーキンググループは、陸上学術ボーリング計画を推進するためにリソフェア探査開発計画、科学研究費による総合研究、大学の調査費などによって、国際的な対応とともに国内ではシンポジウムや候補地点の調査を実施してきた。また、国内外の陸上学術ボーリングに関する情報を広範に提供するために「学術ボーリングニュースレター」が1981年から発刊され、45号まで刊行されている。このニュースレターには、学術ボーリングに関する最新のニュースが掲載されているほか、海外で発刊されたニュースレターや論文も和訳され掲載されており、世界で最も多くの最新情報が盛り込まれ、現在までに総計777頁に及んでいる。このニュースレターにはその時々の学術ボーリング計画の企画・掘削状況・掘削結果が時系列的に記載されており、学術ボーリング計画がどのような思い入れで企画され、どのような困難の中で実施されたかが追跡でき、21世紀の学術ボーリング計画を考えるために有効である。

陸上学術ボーリングについての関心は日本地質学会においても高く、1989年5月の総会の際にシンポジウム「陸上学術ボーリングと日本の地球科学」が開催され、当時の陸上学術ボーリングについての総説が地質学雑誌に掲載された(新妻, 1989)。1995年の国際陸上科学掘削計画ICDPの発足時には日本学術会議を通して政府に参加を要請するとともに、

1997年には関係省庁に早期参加を要請する要望書を送っている。

本論では、世界の陸上学術ボーリングに関する動向を総覧し、21世紀の地質学における位置付けと発展について論ずることとする。

### 地球内部の内診

地球内部についての理解は、医学に例えると、腑分け以前の状態であることは、決して誇張ではない。地震学によって地球中心核の存在が明らかになったのは1906年であり、モホ面が1909年、上部地殻と下部地殻の境界のコンラッド面が1925年である。この地球内部の層状構造の解明は、近代科学の枠組みの中で地球を捉えることを可能にした画期的な成果であるが、西瓜が熟しているかどうかを叩いて予測する段階にすぎず、内科医が聴診器で内臓の疾病を探ろうとしている段階に到達したにすぎない。ただし、西瓜や内臓の場合には、その内部構造を既に知っていてこのような診断を行うのに対して、地球内部についてはその内部構造を探る唯一の手段である点が根本的に異なっている。

地震学的方法を駆使して地球内部を探ろうとする努力は、近年の計算機技術の進歩に支えられ、反射地震探査として開花している。医学では外科手術の前に行われるコンピュータトモグラフィCTと対応させることができる。この手法は石油・天然ガス探査のために発達したが、欧米では1970年代から地殻構造の詳細を知るために積極的に用いられ、下部地殻にはラミネーションと呼ばれる多数の反射面が存在して上部地殻と区別できることやモホ面が断層で切られている

ことなどが明らかにされた。日本では1980年代後半になり、学術目的の探査が実施されるようになり、近年は、地質学者も地下の地質構造を知るために積極的に使用している。

科学技術庁は1989年度から10年計画で反射法地震探査とMT法電磁気探査による地下深部探査を開始した。反射法地震探査にはパイブロサイスとダイナマイト法を併用しその特性の比較実験も含め、北海道日高山地南西縁の沙流川・新潟油田地域・酒田東方の出羽丘陵、北上山地南西縁で実施された。また、1994年からは、科学研究費によって、日高衝突帯深部構造の探査計画が開始され、パイブロサイス4台を用いた反射法地震探査が建設中の国道236号線に沿って実施された(在田ほか, 1995)。1997年にこれらの探査によってこれまで「日本においては地殻深部の反射面は見えない」という神話を破り、北上山地西縁と日高山地東縁において地殻深部からの反射面が捉えられ、下部地殻のラミネーションも捉えられている(伊藤ほか, 1998)。これに先立ち、阿武隈山地西縁(爆破地震動研究グループ, 1988)および北上山地(Iwasaki et al., 1994)において実施された爆破地震探査においても下部地殻にこのような反射面が見出されている。この成果によって、日本列島の地殻を欧米の地殻構造と比較検討することが可能になり、深部からの反射が無いことも島弧地殻の性質であり、深部からの反射が捉えられた外弧は内弧と本質的に異なっていることを示唆している。

一方、中央構造線については、紀伊半島において油圧インパクターによる反射法地震探査が行われ、北傾斜した断層であることが判明した(吉川ほか, 1992)。これは、大分県の佐賀関半島における中央構造線が北傾斜し、三波川変成岩の上に白亜紀の大野川層群が衝上していることと調和的であり(山北ほか, 1995)、その後の別府湾における反射法地震探査によっても確かめられた(由佐ほか, 1992)。

#### 地球内部理解の現状

地球内部を知るために、地表に露出する岩石を地質学・岩石学的に調べたり、地表から地球物理学探査を実施しても、地球内部の状態を予測するのみであり、ともすると予測に予測を重ねて迷宮に入ってしまうことが多い。このような堂々巡りを回避するために、地下が予測通りになっているかどうかを直接確かめる必要がある。20世紀後半には国威を懸けて陸上学術ボーリングが実施されたが、予期せぬ結果やこれまでの定説を混乱させる結果を生み出し、これらの予測が間違っていたことを白日のもとに晒した。

コラ半島の超深層ボーリングでは、上部地殻と下部地殻との境界であるコンラッド面が地下数kmに存在すると予測されたが、深度12,261mに至っても花崗岩質の片麻岩が掘削された。「地殻がどのような岩石で構成されているかは、ボーリングを行って岩石を直接採取しなければ知ることはできない」と言われた。しかし、地震探査についての再検討結果では、コンラッド面は深度25kmにあるとの報告がワシントンで開催された万国地質学会で講演され、苦笑を誘った。

フランスのSancerre-Couyの掘削では3-3.5kmの深度に磁気異常の原因となる岩体が存在するという三次元モデル

に従い、その頂部を掘り抜く学術ボーリング計画が実施されたが、3.5kmの掘削ではその岩体には到達できなかった。坑井内磁気測定によるとその岩体は4-5kmと7kmに推定されるとのことである。

ドイツのKTBでは、古生代のプレート境界が深度3-4kmに存在するとの予測で掘削を行ったが、4,000mの先行掘削Pilot Holeでも捉えられず、本掘削の掘り止め深度9,101mにいたっても掘削される岩石は地表に露出する片麻岩および変塩基性岩と変わらず、7kmに大破砕帯を挟んでいた。この破砕帯は、白亜紀以後に活動した地表の断層から延長していることが判明した(Emmermann and Lauterjung, 1997)。

これらの例は、地球内部の理解がまだ端緒についたばかりであり、地表からの探査が地下の状態を把握するためには極めて不十分であり、今後抜本的な改良が必要であることを示している。一方、国内の資源探査を目的としたボーリングによって、地表からは知ることができない地質学的に重要な事実が明らかにされている。例えば、四国三波川帯の白髪山で金属鉱業事業団が実施した掘削では、1,750m以深で三波川変成岩が熱変成を被っていることが明らかになり、三波川帯の下部に花崗岩の侵入が予測されている(坂野ほか, 1988)。北海道渡島半島の濁川カルデラはクレータレク型の陥没カルデラとされてきたが、26本の掘削によって火道の大きな爆裂型カルデラであることが判明し(Yoshida, 1991)、カルデラ形成についての世界的常識を一変させた。葛根田の掘削は侵入したマグマ溜りに到達し、マグマ進入による変成作用に関して直接的な資料を提供した。

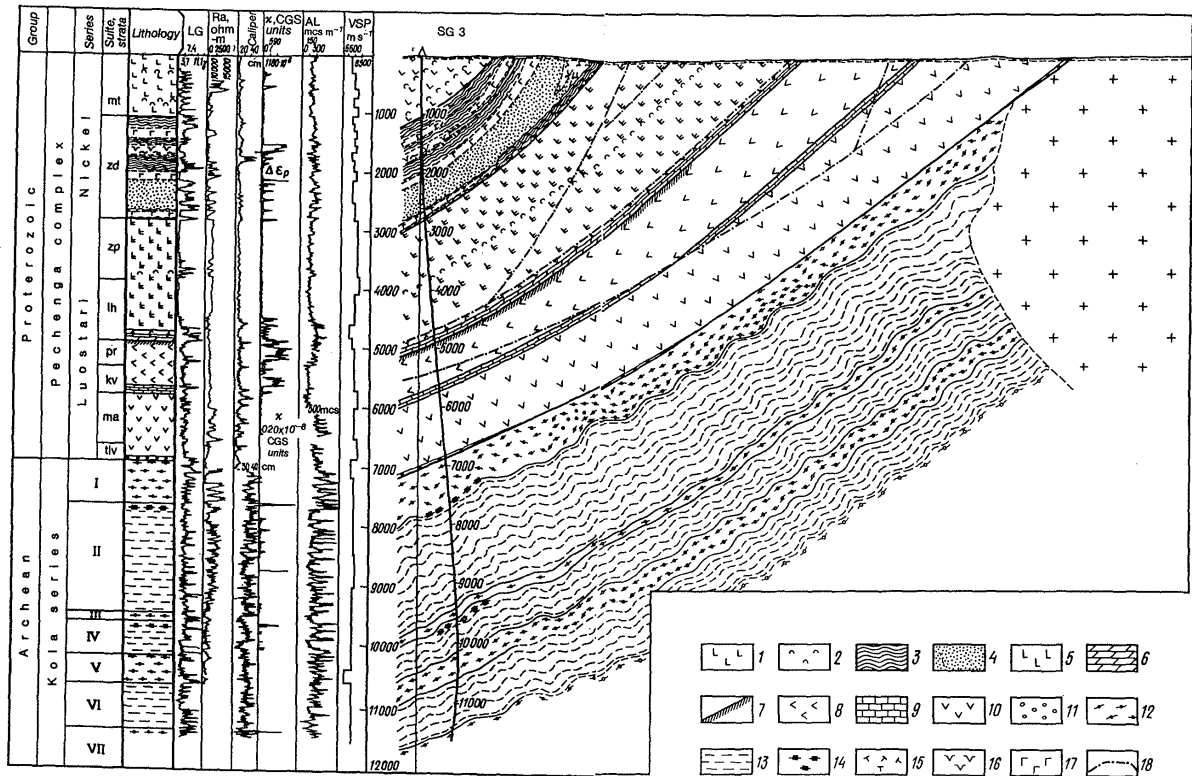
このような状態において、学術ボーリングを推進することは「闇夜に鉄砲を放つ」ようなものと消極的な意見もあるが、地球内部を知るための挑戦がやっと開始された段階であり、今後いかようにも発展させることのできる大きな可能性を秘めた状態と積極的に捉え、具体的な解決方法を試してみるべきであろう。

#### 国威を懸けた深度への挑戦

1960-1980年代は第二次大戦後の厳しい冷戦の時代であり、この世相を反映して陸上学術ボーリングも国威発揚のために実施された。

名実ともに世界最先端の石油掘削技術を有していた米国は、未知の領域であった海洋への発展を目指し、海洋地殻を掘り抜くモホール計画を1960年代に開始した。目的を達成することはできなかったが、そこで開発された海洋掘削技術を用いた深海掘削計画は、プレートテクトニクスの証明をはじめとする幾多の成果を上げて、21世紀まで継続される予定である。また、モホールの夢は日本の掘削船によるOD21に受け継がれることとなった。

一方、ソ連は1970年にコラ半島で超深層陸上学術ボーリングを開始し、1979年には9,584mに達して米国オクラホマの石油井の世界記録を抜いた。1980年には10,000mを越えて世界最深記録更新を続け、1990年には12,261mに到達している。躍進を続けるソ連に対し、米国は1970年代に超深層陸上学術ボーリング計画を企画したが、研究者の合意を得る



第2図 コラ半島における超深層ボーリング結果と地質構造 (Kozlovsky, 1989)。縦軸は深度 (m)。1: 普通輝石輝緑岩, 2: 塩基性凝灰岩, 3: 千枚岩, 4: 砂岩, 5: 陽起石輝緑岩, 6: 苦灰岩・アルコーズ砂岩, 7: 絹雲母片岩, 8: 変輝緑岩, 9: 苦灰岩・石灰質砂岩, 10: 輝緑班岩, 11: 礫岩, 12: 黒雲母・斜長石片麻岩, 13: 花崗岩化片麻岩, 14: 磁鉄鉱・角閃石片岩, 15: 斑岩, 16: カンラン岩, 17: 輝緑班礫岩, 18: 構造的に不連続面。

ことができずに着手できないまま冷戦構造が崩壊し、より安上がりな小・中深度の学術ボーリングを多数実施する方向に転換した。1980年代に深度記録への挑戦を受けて立ったのは西独であり、14,000 mの深度記録を目標にKTB Kontinentales Tiefbohrprogrammを開始した。

これらに挑戦するためには、計画の立案時に、国内における合意形成、ビッグプロジェクトを支える経済力、その予算を取り扱う機関の設立が必要であり、計画開始後はプロジェクト推進体制が重要な役割を担うが、深度への挑戦そのものは掘削技術の抜本的な発展が鍵を握っている。その事例をコラ半島とKTBについてみることにする。

1. コラ半島超深層陸上学術ボーリング Кольская СГЗ

ベローソフによると、ソ連では、「ボーリングに予算を投入するか、それとも地表を良く調査すべきかが議論された結果、超深層学術ボーリングが開始された」(新妻, 1988)とのことであり、超深層ボーリングについての合意形成について多くの議論があったことが推察される。コラ半島のСГЗはソ連内で計画された超深層学術ボーリング地点の中の1つである。

掘削地点は、バルチック楯状地のペチェンガ銅・ニッケル鉱区、ムルマンスク北西110 km、ザポリアルニの町近くに位置し、1970年5月に掘削を開始した(第2図)。この地点は地殻変動が殆どない安定地塊上にあり、地殻熱流量が小さく、

地下増温率は1.6-2.0°C/100 mと極めて小さいため、既存の機器でも超深層における掘削や計測が可能である。

掘削には、従来の掘削管を地表から回転させるロータリー掘削を用いず、掘削管先端に装着したビット部分のみを掘削泥水で回転させる方式を採用し、新たに坑底モーターが開発された。長大な掘削管を地表で支えたり、先端のビットを交換するために降揚する際の負担を軽減するために、軽量で耐熱温度が300°Cのアルミニウム合金Al-Cu-Mg-Fe-Ni掘削管が開発された。また、ビット交換などのために掘削管を降揚しなければならないが、その際の掘削管接続部のネジを閉めたり外したりする作業を10,000 m以上の深度でも18時間以内に行えるように自動化した。掘削現場には、これらの機器を開発・改造する工場が附属しており、掘削時に問題が起これば直ちに改良を加えることができる体制が整えられた。

СГЗはこのような世界最先端の掘削技術に支えられ、掘削深度の世界記録を更新・保持しているが、坑壁崩壊防止のためのケーシングを地表部2,000 mのみに施しただけで裸坑の状態では12,046 m掘削できたことは、この掘削地点が驚くほど安定しており、坑壁崩壊が起こらなかったためである。また、その後、拡張して8,900 mまで世界最長のケーシングを行って、12,261 mまで掘削深度を更新した。ただし、10,000 m以深では20-30°の坑曲がりを起こし掘削効率が悪化して放棄し、枝掘り(side track)を行ったために4本の掘削が行

われたことになり、岩相の連続性や破碎帯の連続性を知るために役立つとのことである。1991年には、国際共同利用の地下実験室として提供することを申し出ている。

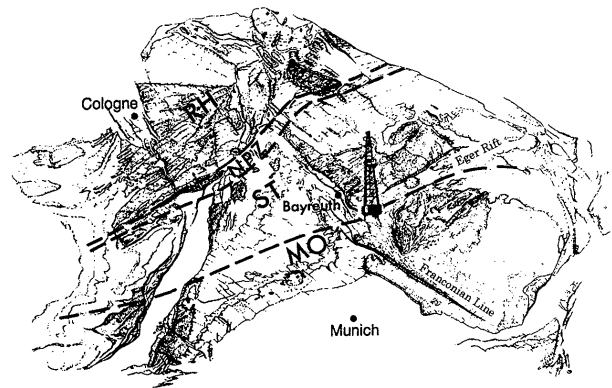
このような目覚ましい成果についての情報は、西欧諸国へは鉄のカーテンに遮られ、新聞などによって断片的に提供されていたにすぎなかったが、ソ連国内でもベロソフが「掘削は開始されたが、その結果は国内でも余り公表されず、本当に掘っているのか分からない状態であった。何故、秘密にしなければならないのであろうか」と言うように不満が広がっていた(新妻, 1988)。このような状態にあったので、地質学的に見ると何故、地表地質から充分推定できる向斜部を掘削したのか、コンラッド面の深度予測が優先され地表地質を無視した形で掘削地点が決定された理由、などについて知る由もない。コラ半島の掘削については、1984年にモスクワで開催された万国地質学会の際に刊行されたロシア語のКозловский (1984) によって全貌が明らかにされた。その一部は1986年に邦訳され(木下, 1986 訳), 1987年には英訳されている(Kozlovsky, 1987.)。

## 2. ドイツ KTB

西独研究協会 Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG は1978年に陸上学術ボーリングについてのワーキンググループを設け、検討を開始した。1981年には、固体地球研究委員会 Kommission für Geowissenschaftlich Gemeinschaftsforschung が1980年代の「国際リソスフェア計画」期間中に8,000 m以上の超深度掘削を目指す陸上深層ボーリング Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland の実施計画(A5版70ページ)を作成した。全地球的問題の解決を目指して5箇所(Hohenzollerngraben, Bramsche, Oberpfalzer Wald, Sudschwarzwald, Venn Massiv)の候補地が例として上げられ、事前調査として深層反射法地震探査・重力・電磁気・地殻熱流量・地殻変動の探査・測定を行うことを提案している。西独政府は、このボーリング計画を了承し、研究技術省を経費の運用に当てることとした。計画開始の経費として約500万DMを掘削前の調整と統括を行っているDFGとアルフレッド・ウェーゲナー基金に託された。

20箇所ある掘削候補地の中から掘削地点を選定するために、西独の地球科学研究者によるワークショップが開催され、石油・天然ガス探査ボーリングが行われている地域は探査ボーリングとの相乗りを考えて本計画の候補から除外され、17箇所に絞られ、調査検討の結果、更に4箇所に絞られた。1983年11月の集会において、4箇所の候補地の中から事前掘削を含む学術的精密調査を実施する候補地として、OberpfalzとSchwarzwaldの2箇所が選定された。

地質学・地球化学・地球物理学について30のワーキンググループが設けられ、両候補地における野外調査を開始し、1984年にSchwarzwaldについてライン地溝を横切る2測線についてパイロサイスによる反射法地震探査が実施された。1985年2月に研究技術省は、コラ半島の深度記録を越える14kmの超深層ボーリング計画を始動させ、掘削前の事前調査のために2,700万DMの予算が計上された。1985年には



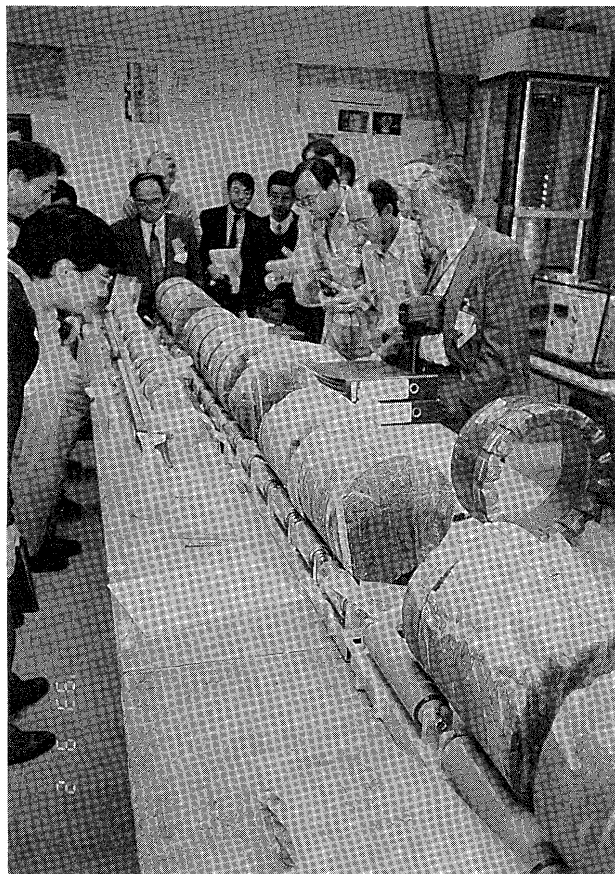
第3図 ドイツ超深層陸上学術ボーリング計画KTB掘削地点 (after Springer Newsletter, no. 1, 1987). ボヘミア地塊の西縁部のMoldanubian帯(MO)とSaxothuringen帯(ST)の境界に位置する。RH: Rhenocynian.

Oberpfalzのパイロサイス探査が実施された。

両地域における学術目的としては、1) 上部地殻を掘削して下部地殻との遷移帯を直接観察し、下部地殻の物理・化学的な性質やそこで働いている過程を観測するための窓を作ること、2) 低角度反射法地震探査によって見出された地殻内の低角衝上断層を確かめることによってヘルシニアンおよび先ヘルシニアン造山運動について新しいモデルを構築する、3) 反射法地震探査で見出される下部地殻のラミネーション構造と電気伝導度や地震波速度の不均質構造を掘削によって確かめる、などが上げられた。事前調査としては、地質・地震波・電気伝導度・磁気・重力などの精査が行われ、両地域について過去100年間に蓄積されてきた研究を上回る成果があげられた。また、KTBを推進するために研究・掘削技術・管理の3つの組織が正式に置かれた。

掘削地点の最終決定には困難が伴ったが、1986年10月に、掘削可能温度とされる250-300°Cに達する予想深度がSchwarzwaldでは7kmであるに対しOberpfalzでは12kmであったことから、Oberpfalzが本掘削候補地に決定された。Oberpfalzは、ババリア北部のパイロイトの南西約50kmのWindischechenbachの近くにあり、Moldanubian帯とSaxothuringen帯の境界に位置している。この境界は、3億2000万年前のヘルシニアン造山運動において、大陸地殻が衝突したsuture lineであり、掘削はMoldanubianを掘り抜いてSaxothuringenまで到達することを目的とした(第3図)。この南に傾斜する境界面は地震波探査によると地殻底下のモホ面にまで到達している。この境界線の東方延長部にはEger開裂帯が在り、その開裂帯ではマントル物質を捕獲する新第三紀の玄武岩活動があり、掘削地域までこのマグマ活動の分岐が達している。また、この地点の西方数kmには、ペルム紀から白亜紀の4,000mにも及ぶ海成堆積物がヘルシニアンの変成岩類と接する横ずれ断層帯であるFranconian構造線がある。坑底温度が300°Cに達するのは最終目標深度の12-14kmと予想された。

1987年9月に、深度4.5-6kmを目標とするオールコアの



第4図 ドイツ超深層陸上學術ボーリング計画KTBにおいて採取された大口徑コア試料。変形した角閃岩やそれを切る鉍脈の三次元構造解析に役立つ。コア試料の右側に置いてあるのが、このコア試料採取に使用されたダイヤモンドビット。見学しているのは1993年8月に開催されたポツダム集会への日本からの参加者。

先行掘削（内径159 mm，上部400 m ケーシング）が開始された。この計画には250人ほどの研究者が参加し、5,000万DMが事前調査に、6,500万DMが大学関係の研究費に計上され、掘削前に2,600万DMが使用された。また、5,000万DMがKTBの研究者15人・技術職員18人・事務職員12人の人件費、2,500万DMが先行掘削、25,000万DMが本掘削に計上された。

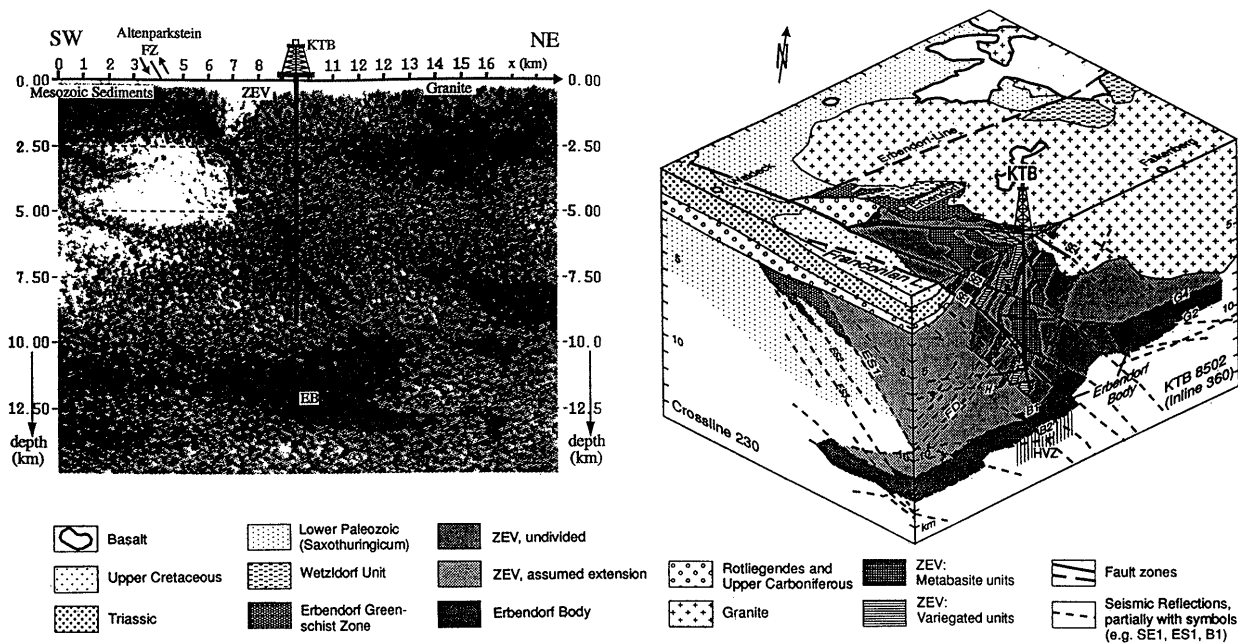
1988年2月には掘削地点に実験室・研究室・会議室・コア保管倉庫を持つ中庭付き平屋70 m×40 mのフィールドラボが完成した。1987年に訪独した三ツ林科学技術庁長官（当時）が技術協力を約束したことを受けて、西独は1988年にボーリング技術開発に関する技術協力を要請したが、日本は応じなかった。

1989年に98%の高回収率で4,000.10 mの先行掘削を終了した。検層とコアの比較によって方位付けが行われ、ほぼ垂直な構造を有する片麻岩と角閃岩の繰り返しからなり、同一層準が繰り返し出てきており、破碎を受けている。深度3,000 mまでは、破碎部は方解石や緑簾石の脈で埋められていたが、3,000 m以深では開裂しており高塩分溶液によって満たされている。この溶液で満たされた所は石墨を伴い地表で観

測される電気伝導度異常を担っていることが判明した。反射法地震探査によって捉えられた水平に近い反射面は岩相境界ではなく、この高塩分水面であったようである。深度3,580 mで既に掘削試料が煎餅状に割れる現象が見られ、予想以上に強い水平応力場にあることが分かった。掘削後の検層と諸試験は1990年3月に終了したが、坑内温度計測によると、深度3,800 mで180°Cに達しており、掘削限界とされる300°Cに達する深度は11,500 mと予想され、本掘削の最終深度が12,000 mに下方修正された。この見積もり違いは、表層1,000–1,500 mまでは地表水循環によって冷却されていたので坑底温度を低く見積もっていたことが原因と考えられる。また、予想に反して地質構造が複雑であり、本掘削のビット径やケーシング計画の変更が余儀なくされた。

1990年9月6日に10,000 mを目指して高さ83 mで自動揚降管システムと強力なドローワークスを持つ専用リグによって本掘削が開始された。掘削現場のフィールドラボには、電気伝導度、P波地震波速度、透水性、熱伝導度、残留磁気、帯磁率などの測定器、Cs 137を用いた密度測定器が備えられ、掘削試料やカッチングス試料を測定できる体制が整えられた。泥水中のガスは3分毎にガスクロマトグラフ・質量分析器による定常的な分析がなされた。泥水は高温に安定なNa・Mgシリケートに有機ポリマーを加えたものが使用された。掘削直後のコア試料の変形やアコースティックエミッションの測定、カッチングスや掘削粉についてはX線回折・蛍光X線分析装置やイオン分析・原子吸光分析装置を用いた分析が行われ、先行掘削坑の試料と比較された。コアの方位を決定する為にコア表面を直接記録できるように改造したコピー機、双眼実体顕微鏡、偏光顕微鏡などが掘削コア取り入れ口に設けられた。コアラボには掘削コア、カッチングスなどが8種類の形で保存された。掘削状況はラボ内のモニターテレビで常に表示される。先行坑と200 m離れた本坑との岩相の対比は良好であった。掘削はトリコーンビットを用い4,000 mまではコア採取は行わないが、それ以深ではコーンビットとダブルチューブコアバーレルによってスポットコアの採取が行われた。Eastman Christensenの垂直掘削装置が装備され、6,786 mの深度でも偏距は10 m以内という垂直掘削が実現された。6,850 mから破碎帯に入り、2回坑壁崩壊を起こしたが、枝掘りなどで7,200 mまで掘削し、掘削径よりも1–1.5 cm小さい坑壁ぎりぎりのケーシングが6,000 mまで挿入された。7,166 mで坑壁が崩壊し、坑壁径が1 m以上になり、深度7,400 mで垂直掘削装置の使用を断念し、ロータリー掘削に切り換えられた。偏距10 m以内であった坑井は、垂直から22°もずれてしまった。1993年9月には、最終目標深度を10,000 mと決定し、崩壊帯を試行錯誤を繰り返しながら掘削が進められた。その一つの方法として、ダイヤモンドビットによる7インチ半の大口徑コアの採取が試みられた。このコア試料は、変成岩の構造を立体的に詳細な観察を行なうことが可能であるが、片理はほぼ垂直で同一岩相を繰り返しており（第4図）、より深部の未知の岩石入手という初期の目的を達成することは絶望的となった。

1994年2月28日には深度8,714 mに達し、偏距は205 m



第5図 KTBの再処理した反射法地震探査と掘削岩石から復元した地質断面 (Harjes et al., 1997; Bosum et al., 1997). 後期白亜紀堆積物を切る Franconian 構造線が掘削地点の地質構造を支配しており、掘削されたコア試料から復元された地質構造 (右図) とも調和的であることが判明した。左図では、黒いほど地震波の反射率が大きい。EB: Erbendorf Body.

と増大した。大きな地殻応力に起因すると予想される坑壁崩壊が7,500 mや8,300 mで起こったが、このような大深度で起こる坑壁の不安定を根本的に除く方策は存在しないので、注意深く掘削するのみであった。1994年9月に8,900 m, 1994年10月10日に9,101.0 mに達して掘り止められた。ケーシングは9,030 mまでなされている。坑底温度は、約265°Cであり、垂直深度は9,030 mである。掘削日数は、総計1,468日に達し、1994年12月31日に700人以上の研究者が参加した主 phaseを終了した。総経費は5億2800万DMであった。

計画当初に実施された反射波地震探査によって、反射面が地下3 kmに見出され、それが古生代のプレート境界と解釈され、掘削目標に設定された。しかし、この反射波地震探査記録を高角の反射面が現れるような再処理を行った結果、掘削試料から組み立てられた地質断面と驚くほど一致する断面が得られた (第5図)。

KTBについての成果は、1997年のアメリカ地球物理学連合AGUの機関誌である *Journal of Geophysical Research* 102 (B8) に特集されているが、その主要な成果としては、(1) 地殻応力断面が連続的に得られた、(2) 現在の脆性-塑性境界に達した、(3) 大陸地殻中部にも流体の存在が確認された、(4) 後造山期の脆性変形が予想以上に大きいことが分かった、(5) 高角反射法地震探査によって上部地殻の変形様式が明らかになった、(6) 地殻の高解像度地震探査像に真の深度と強度を導入する解析法が開発された、(7) 地殻の電磁気異常は破碎帯に形成された二次的な石墨 (±硫化物) に起因することが判明した、などが上げられている (Emmermann and Lauterjung, 1997)。

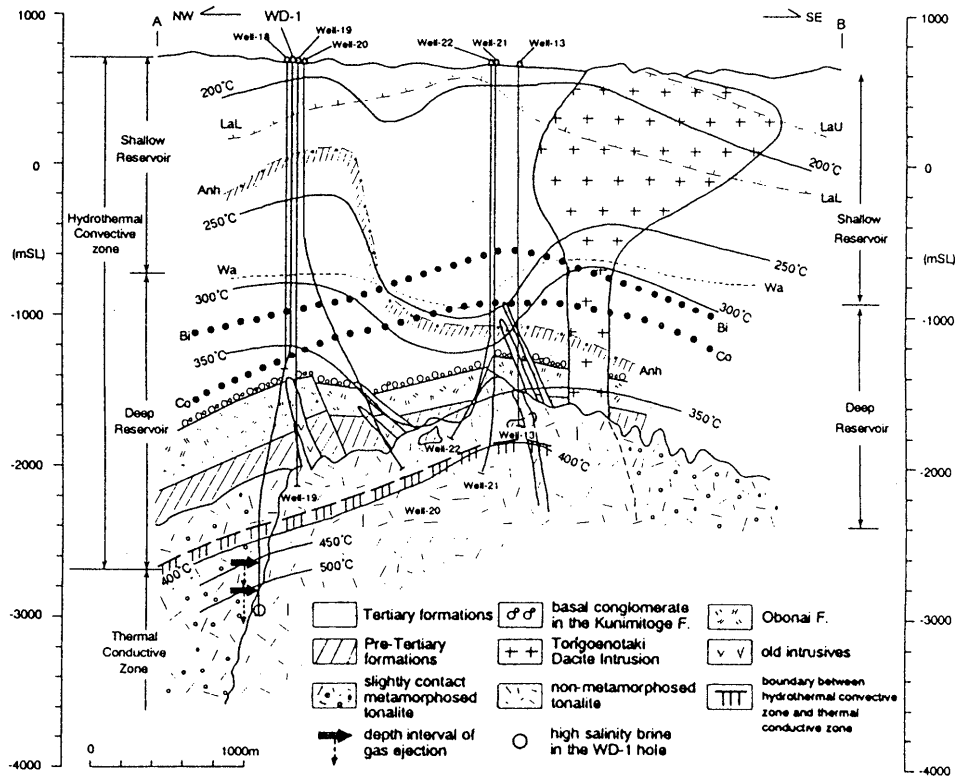
## 高温への挑戦

地表からボーリングを行うと、地下増温率に従って温度が上昇するために、地下深部にまで到達する超深層ボーリングは、深度への挑戦であるとともに高温への挑戦でもある。一方、地下の高温は地熱開発の対象として探査・掘削されており、地熱ボーリングは高温への挑戦そのものである。ここでは、高温掘削に真向から挑戦した米国のソルトンシーと日本の葛根田の例を紹介する。

### 1. ソルトンシー掘削計画 SSSDP Salton Sea Scientific Drilling Program

ソルトンシーは北アメリカ西部のカリフォルニア湾北端に位置しており、海洋底拡大軸である東太平洋海膨が上陸する地点に当たり、コロラド川が注いでいる。コロラド川の河口三角州地域は、地熱地帯であり、地熱開発が行われている。1980年代の米国では、各種資源開発ボーリングに相乗り (add-on) した学術ボーリングが推奨されたが、その第1号として注目されたのがこの計画である。この計画は、開裂しつつあるソルトン地溝の地熱系の根源をつきとめ、坑井内の地熱実験や地球科学的な基礎調査・研究を行うことを目的とした。

最初は、Republic Geothermal 社が3,700 mの蒸気生産井を掘削するのに相乗りして、3,700 mまではスポットコアを採取しながら掘削し、それ以降は学術目的のためにオールコアで5,500 mまで掘削する計画が立てられた。しかし、国家予算を競争なしに特定の企業に投入することに対してエネルギー省DOEが難色を示している間に、この増し掘りの可能性は消えてしまった。そこで独自に、カリフォルニア州イン



第6図 葛根田地熱地帯に進入したマグマ溜りとその周辺の変成帯(土井ほか, 1997). WD-1は世界最高掘削温度記録を樹立したNEDO深部地熱探査井. その他のWellは日本重化学工業の地熱開発井. LaU: laumontite 上限, LaL: laumontite 下限, Anh: anhydrite 上限, Wa: wairakite 下限, Bi: biotite isograd, Co: XRDによるcordierite isograd.

ペリアル地区のNiland市の7.2 km南西に3,000 mの予定で, 1985年10月に掘削が開始された. 1985年12月に1,860 mで実施された噴気試験では, 塩分が24.8%に達し, 気体成分の99.6%が炭酸ガスであった. 1986年2月に2,835 mで長石・輝石・角閃石の顕著な輝緑岩岩脈に当たり, 坑底温度は350°Cに達した. 1986年3月17日に深度3,220 mに達し, 掘り止められた. この坑井では33箇所から30本, 総長230 mのコアが採取された. 温度回復を待って1986年5月1日に行われた温度測定では, 1,830 mで305°C, 3,190 mで355°Cであった. 掘削された岩石は, 未固結泥岩から緑簾石に富む中新世の緑色片岩相のホルンフェルスであり, 1,865 mおよび3,193 mから流体試料が採取された(Elder and Sass, 1988).

掘削が学術的であり, 高温であったために石油掘削と以下の点で異なっていた. 1) 61個のビットが用いられたが, コア採取のために15個が寿命を残して引き上げられた, 2) コア採取の際の岩片残留のためにローラーコーンの摩耗とベアリングの消耗が激しかった, 3) 1,800 m以深で9箇所の大きな逸水層に遭遇し, セメント栓箇所の1週間以内の逸水も発生した, 4) 高温のために坑井傾斜の測定が困難であり, ターボドリルの寿命も数分の1に減じた.

この計画およびその成果については, *Geothermal Resources Council Transaction*, 10 (1986)・12 (1988), *Journal of Geophysical Research*, 93, (1988), *Economic Geology*, 83, (1988) に特集・報告されている.

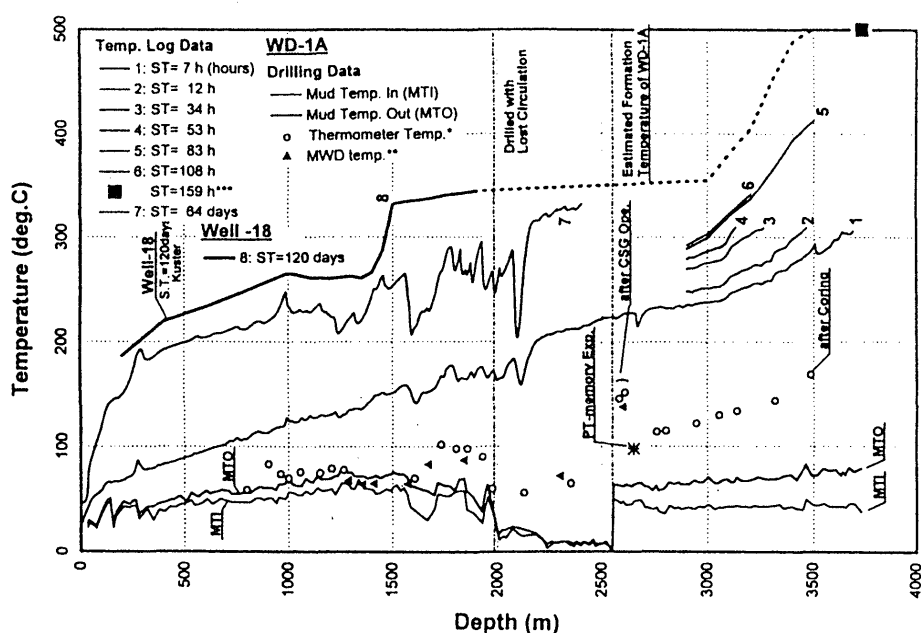
## 2. 葛根田地熱開発井 NEDO-WD1

この坑井は, 東北日本脊梁山地の島弧火山帯の中軸部に位置し, 地熱開発井として初めてトップドライブを使用し, 坑井内を泥水循環によって冷却して角閃岩相ホルンフェルスを掘り抜きマグマ溜りに到達した. 坑底温度は水の特異点を越える500°C以上であり, 世界最高温度掘削記録を樹立した.

葛根田地熱地帯は岩手火山の西方12 km, 玉川カルデラの東南縁に位置し, 1978年に5万kWの発電所が稼動し, 現在3万kWの発電所を建設中で, 1日5,000トンの蒸気・熱水を生産している. 深度3,000 m級のボーリングが5本掘削されている(加藤ほか, 1993; 第6図). これらのボーリングでは, 深度1,950-2,780 mで新期花崗岩類の頂部に到達している. 新期花崗岩類は, 後期中新世の海成層を貫く, 島弧型を示すトーナル岩・花崗閃緑岩・花崗岩・石英閃緑岩からなる. 放射年代は7-34万年前と非常に若く冷却しつつある深成岩体である. 岩体の規模は径10 km程度であるが, 地下温度分布は広域に及んでおり, より大規模な熱源の存在が予想されている. 坑底温度412°Cの坑井もあった. 現在の震源分布は断裂方向と調和的であるが, この断裂方向は花崗岩類の進入方向と調和的でないことから, 花崗岩進入後に応力方向が変化したものと予想される(越谷ほか, 1993). 海成層には貝化石を産するが地殻応力のために変形している.

新エネルギー総合開発機構NEDOは, 地下深部における地熱資源の探査のために, 1994年1月から目標深度4,000 m





第7図 葛根田地熱探査井 NEDO-WD1 の温度記録 (after Saito et al., 1996 b). 掘削後 159 時間放置して実施された温度測定により、深度 3,729 m では 500°C を超えていることが明らかになった。このように高い地層温度でも、掘削中には泥水循環によって 200°C 以下に冷却されている。

の NEDO-WD1 井の掘削を開始した。1994 年 5 月に 1,500 m までほぼ垂直にロータリー掘削し、1995 年には坑底モーターとトップドライブで 3,729 m まで掘削した。温度回復後の坑底温度は既存の坑内温度計測機器で測定できないほど高温であり、合金の融点を用いて 500°C を超していることが確認され、世界記録を樹立した(第7図)。掘削中の循環泥水の温度は掘削時計測装置 MWD (Measurement While Drilling) で計測され、泥水を循環していれば坑井内は 200°C 以下に保持できることが明らかになり、2,653 m まで FMI (Formation Micro Imager) の使用にも成功し、断裂面の方位決定ができた。温度回復後の坑井内温度計測によると、坑底モーターと MWD も地層温度 350°C においての使用に成功したことになる。この掘削では、泥水循環を保持可能なトップドライブの導入が高温掘削に大変有効であることが実証された (Saito et al., 1996b)。掘削されたコア試料によると、深度 2,860 m で花崗岩体に接する堆積岩中には黒雲母 (1,610-2,020 m) や堇青石 (2,020-2,140 m)・直閃石 (2,140-2,860 m) などの変成鉱物が形成されており(第6図)、現在進行しつつある高温変成作用の現場を掘り抜いたことになる。3,729 m における清水置換による坑井内流体の採取を行ったところ 20% を越える高塩分水であった (赤工ほか, 1997; 土井ほか, 1997)。

#### 陸上学術ボーリングに対する各国の取り組み

20 世紀後半の地球科学開花に伴い、各国はそれぞれ陸上学術ボーリングに取り組んだ。この取り組みは、1980 年代に地球科学関係の国際協同研究事業である「国際リソスフェア計画」において頂点に達した。ドイツは世界最深掘削記録を目指して KTB を推進したことは前述したが、各国の動きを紹介する。

#### 1. 米国

1970 年代に実施された国際ジオダイナミクス計画において米国は陸上学術ボーリングの推進を強く打ち出し、1974 年・1978 年とワークショップを開催し、科学アカデミー National Academy of Science の National Research Council から Continental Drilling (Shoemaker, 1975) および Continental Scientific Drilling Program (U.S. Geodynamics Committee, 1979) を出している。この活動を受けて、科学アカデミーは 1979 年 12 月に陸上学術掘削委員会 CSDC (Continental Scientific Drilling Committee) を設置した。CSDC は米国における陸上学術ボーリング計画を検討するとともに、DEW Newsletter (Drilling Early Warning News Letter) を発刊し、学術ボーリングについての情報を伝えるとともに企業などが行うボーリング計画を研究者にできるだけ早く伝え、そのボーリングについて相乗り研究の推進を目指した。

1983 年 9 月には、科学アカデミーの地球科学委員会から大統領科学補佐官や関係省庁に於て「陸上学術ボーリング計画を開始すべきである」との勧告書が提出され、CSDC は米国が行うべき陸上学術ボーリングの目的として、大陸地殻の構造発達・マグマ-熱水系・熱水鉱化作用・活断層・基盤岩の層状構造・先カンブリア紀基盤の放射年代、を課題として上げ、最優先する候補として南アパラチアの掘削を取り上げている。

1985 年に学術ボーリング計画を推進するために 18 大学が参加する非営利団体 DOSECC (Deep Observation and Sampling of the Continental Crust) が NSF によって設立され、CSDC の活動を引継ぎ、ニュースレターとして DOSECC 情報を発行し、カホンパスにおけるサンアンドレ

アス断層の掘削を開始した。

1986年、上院議員 Larry Pressler によって提出された上院法案 S. 1026「陸上学術ボーリング探査法」が採択され、1987年には下院議員 Claudine Schneider によって提案された同趣旨の H.R. 2737 法案が採択された。これらを受けてレーガン大統領は、1988年9月に法令 100-441号「陸上学術ボーリング探査開発法」を制定し、陸上学術ボーリングは正式に米国の国家施策として認定された。このような政治活動が盛んになされている時に、研究者側からは陸上学術ボーリング計画の推進方法について次のような批判が出されていた。陸上学術ボーリングが無ければ、地下に関する情報として得られるものは、石油探査や地熱探査に関係するものに限られてしまい健全な地球科学の発展は望めない。しかし、現在検討されている計画は、その学術目的の実現性の希薄な提案が多すぎるので、熱意と理念を持つ研究者がもっと提案すべきである。提案の審査を簡素化せよ。共通の概念となって定着している火山や断層を掘削して直接見てみよう (Eichelberger, 1987)。

DOSECC は、カホンパスの掘削を終了し、改組して超深層掘削計画を開始する予定であったが、予算が削減され、1991年から4年間の第1期には300万ドルの予算で、浅・中深度の掘削を10-15本行う計画へと基本方針を転換した。

法令 100-441号は、議会への陸上学術ボーリングについての報告を年1回要請しているため、1990年には報告書「現代地球科学における陸上学術ボーリングの役割：1990年代における学術的根拠および計画」(Zoback et al., 1990) が出版・提出された。CSD (US Continental Scientific Drilling Program) ニュースが1990年から刊行され、1992年まで送付されてきたが、最近の状況は、アメリカ地球物理学連合 AGU のニュース誌 *EOS* や掘削成果を報告する論文、そして学会や委員会の際に知るのみとなった。

ここに米国内で検討・企画・実施された陸上学術ボーリング計画について紹介する。

#### 南アパラチア掘削計画：South Appalachian Deep Core Hole (ADCOH)

南カロライナ州・ジョージア州境界部に約10kmの超深層ボーリングを行い、結晶質・変成岩の thrust sheet を貫き、基盤岩に到達して thin-skinned tectonic thrusting model を検証する計画が1985年2月に提案され、1985年5月の AGU においてセッション「南アパラチアにおける超深層ボーリングで何が解明されるか」が持たれた。1986年4月に掘削技術の具体的検討を行うために超深層試錐会議がジョージア州の Sky Valley で開催された。この会議では超深層ボーリングを実施するためには、浅い部分については既存の掘削機でオールコアの先行掘削を行い、深部は専用的大型掘削機を用いるが、先行掘削でコアリングした部分はコアリングせず掘り進むという2段階掘削法が提案された。当時のレーガン大統領の強力な支持があり、CSDCへ正式の申請書を出されたが (Hay, 1987)、2年間の予備調査と現地でのワークショップが開催されたにすぎない。

掘削候補地点は、1989年にワシントンで開催された万国地

質学会の巡検コースとして予定されたが、取り消された。また、この掘削計画はアパラチアの地質学研究者には評判が悪かった。ただし、Sky Valley で開催された超深層試錐会議で提案された2段階掘削戦略は、西独の KTB において実践されることとなる。

#### カホンパス Cajon Pass 掘削計画

サンアンドレアス断層は右横ずれの大断層であり、15Ma以降のプレート境界となっているが、断層運動にともなう摩擦熱の効果が地殻熱流量の測定により認められないことから、地表付近で測定される剪断応力は深度とともに10MPa/kmで増大するが3km程度で20MPaに達してそれ以上増大しないのではないかという予測が立てられた。本計画は、その予測を確かめるために立案された。南カリフォルニアの San Bernardino の近くで、サンアンドレアス断層から3.4km離れた Cajon Pass において、既存の1,800mの坑井を4,900mまで掘り下げる計画が提案された。しかし、既存坑井の掘り下げには大きなリスクを伴うことから、新たに掘削することとなった。この地域のサンアンドレアス断層は1812年に4.5mのずれを生じて以来地震がなく、地震周期の末期にあり、応力が充分貯えられていると予想されている。800万\$の予算で1986年12月8日に開坑した。目標深度は4,900mである。1987年2月11日に1,829m、9月には2,115mに達し、34層準で10%のスポットコアリングがなされ、総計103mのコアが採取された。これらのコアはデンバーの地質調査所 Core Research Center に保存されている。応力方向は南北で坑底温度は95℃と、地表から予測された値を与えている。VSP (Vertical Seismic Profile) 探査も行われた。1988年4月に3,510mまで掘削され、3,467mまでケーシングされ掘り止めとされた。3深度で水圧破碎による応力測定が行われた。応力は地表からの予測よりもはるかに小さい。坑底温度は142℃で、地殻熱流量は、45mW/sと低い。N57°E±19°で20MPaの差応力が測定されたが、走向N30-60°Wのサンアンドレアス断層面にほぼ直交しており、断層面上にずれを生じさせないか、生じさせるとしても左横ずれである。Cajon Pass のすぐそばにある Claeghorn 断層は、サンアンドレアス断層に並行し、左ずれであり、測定された応力方向と一致している。これはサンアンドレアス断層は極めて弱く、摩擦力が小さいことを示している。しかし、サンアンドレアス断層から離れた Cajon Pass では、深度とともに応力が増大することから充分強い(摩擦力の大きい)地殻から構成されていることが分かった。ただし、坑井を深度2,000mで切る正断層付近ではこの関係が大きく乱されている (Zoback and Lachenbruch, 1992)。

#### サンアンドレアス断層掘削計画

カホンパス掘削の結果は、サンアンドレアス断層の摩擦力が極めて小さいことを予測させており、この予測を確かめるためにサンアンドレアス断層のより深部を掘削する計画が1992年に提案された。この弱い摩擦力は断層帯の状態を現していると考えられるので、断層帯を1km・3km・9kmの3つの深度で貫き、試料を採取するとともに、種々の計測を実施しようとするものである。1993年に7箇所の掘削候補地が

4箇所には絞られたが、Parkfieldは既に良く調べられており、M6の地震が起きそうであり、研究を行うための土地使用料が高騰していることから候補地から除かれた。しかし、1995年には、Parkfield地震(1966年)の震央近くのMiddle Mountainが候補地として最終的に選定され、深さ2.5 kmの掘削が5年計画として提案されている(Zoback and Hickman, 1996)。

#### バイエス・カルデラ Valles Caldera

ロスアラモス研究所では2本の坑井を水圧破碎によって連結し、5万kWの地熱発電を行おうとする高温岩体計画が実施された。掘削地点のFenton Hillは、ロスアラモスの西50 kmのJemez山の西側で、リオグランデ開裂帯の西端の火山帯にあり、110万年前に形成されたVallesカルデラの南側である。掘削されたのは先カンブリア紀の花崗岩であり、1979年4月から1980年5月に掘削された深度4,660 m・坑底温度320°CのEE-2と1980年5月から1981年4月に掘削された4,247 m・280°CのEE-3を用いて、1983年12月に大規模水圧破碎実験が行われた。EE-2から21,300 m<sup>3</sup>の水が注入され、地下貯留層を形成できたが、EE-3への導通には到らなかった。そこで導通のために1984年12月からEE-3の枝掘りが行われた(唐沢, 1986)。

また、ロスアラモス研究所は、1984年夏から秋にかけてVallesカルデラの南西部に856 mの垂直掘削VC-1を行い、95%のコアが回収された。この掘削ではカルデラの地表近くの熱水化学、環状割れ目下の層序、カルデラ内で最も若い5-10万年前のBanco Bonito黒曜石溶岩の連続試料を得ることができた。カルデラ内の中央火口丘の西端にある蒸気卓越地域のSulfur SpringsにおけるVC-2の掘削は、1986年9月5日に開始され11月1日に528 mの深度で終了した。坑底温度は212°Cであった。坑井上部に比較的高温で形成されるイライト・石英・モリブデン・螢石の自形結晶の組み合わせがあることから、熱水卓越貯留層が30 mの深度にある岩石にまで200°Cの熱水を供給していたことが分かり、熱水卓越帯が時間とともに下降し、現在の地下240 mに達したことが予測された(Goff et al., 1987)。

#### ロングバレーカルデラ Long Valley Caldera

ロングバレーカルデラ内の熱水循環を解明する目的で、1986年5月5日から6月17日にかけて、カルデラ西部のShady Restにおいて715 mの掘削が行われた。400 mまでは深度とともに温度が上昇するが、それ以深では200°Cと一定しており、熱水循環が側方あるいは層状に起こっていることが示唆された(Sass et al., 1991)。

地下6-8 kmの上部地殻に貫入した大規模珪長質マグマ溜りが地熱エネルギー抽出の対象となるかどうかを評価するために深度7 km 予想坑底温度500°Cの掘削が計画された。掘削は1989年9月に839 m、1991年9月には2,170 mに達し、200 mのコアリングがなされた。622 mで後カルデラ流紋岩を貫き、1,178 mで70万年前の大爆発の際に噴出した火砕流であるBishop凝灰岩に達した。この凝灰岩下部は基盤岩からもたらされた大量の角礫を含んでいる。熱水系は上部200 mの熱源が支配的であり、Bishop凝灰岩の最上部から下部

への熱は熱伝導で伝えられていることが判明した。

#### インヨー火山列 Inyo Volcanic Chain

カリフォルニア州のロングバレーカルデラ北西縁から北のモノ・クレーターにかけて南北8 kmに伸びるInyo火山列である。火山列の地下に予想される岩脈の確認、ロングバレーカルデラ内部の火山岩類と基盤の結晶質岩という異なった環境で、マグマが熱的・化学的・力学的にどのように挙動するかを知ることを目的として掘削計画が立案された。1983年に152 mの垂直掘削が実施され、この火山列の中で最も新しい600年前の黒曜石噴出物であるInyo Dome黒曜石から93%の回収率でコア試料を得、非溶結のBishop凝灰岩を貫き、先カルデラ期の安山岩に到達した。1984年にはObsidian Domeにおいてマグマの通路となった岩脈を斜め掘りによって貫いた。更にObsidian DomeとGlass Creek溶岩の間の岩脈を54°の斜め掘りによって貫いた(Eichelberger et al., 1988)。

#### カトマイ計画 Katomai Project

アリューシャン弧の海洋性地殻から大陸性地殻への境界部に位置しているカトマイ火山は、1912年の噴火で火山灰の噴出に次いで広域的な火砕流を伴う火山灰を放出し、最後にNovaruptaカルデラ中央部に幅2 kmの流紋岩円頂丘を作った。1985年5月にこの噴火活動について学術ボーリングを行うためのワーキンググループが結成された。

このカルデラには未だに溶融状態のマグマが存在し、広範な鉍化作用が起こっているものと推測される。1988年11月にNSF・USGS・DOEによって正式に承認され、地表調査・環境保全調査が開始された。ボーリングは180 mから1500 mの4本を計画している。第1段階として調査が行われ珪長質火砕流やプリニー式噴火のモデルの確立、噴気中の金属元素の移動、火山システムの冷却速度などについて成果があげられた(Eichelberger et al., 1991)。1994-1995年の掘削を目指し準備されたが、実現されていない。

#### Mason 隕石衝突構造

アイオワ州西部の6,500-6,600万年前に形成された直径36.5 kmのMason隕石衝突構造に、450 m程度の連続コアリング掘削を多数実施する計画である。現在は、氷河堆積物で覆われているので、ボーリングによって衝突構造を明らかにしようとするものである。1991-1992年度には総長1,283 mの掘削が行われ、少なくとも地下6 kmから由来する堆積岩と結晶質岩石の角礫が放出されたことが明らかになった。角礫の大きさはmm単位からm単位におよぶ広い範囲で、衝突の証拠を残している。最終的に合計12本の掘削が行われた。結晶質岩石はシュードタキライト脈に貫かれたり多重ショック変成を被っている。カリ長石が溶融してできたsanidineのアルゴン・アルゴン法による放射年齢は7200万年前であり、古地磁気は正磁極方向で、K-T境界よりも古いことが判明した(Roddy et al., 1994)。

#### Creed 掘削計画

コロラド州南西部San Juan山脈にあるクリードの町から南西に6 kmにおいて、2,600万年前の珪長質カルデラ群の中に発達する深部の熱水循環系とその頂部に胚胎する銀・鉛の

エピサーマル鉱床との関係を解明することを目的としている (Bethke and Lipman, 1987). 1984年に提案され、1986年に空中磁気探査と熱流量測定が行われ、30-50°C/kmの地熱勾配が得られた。1989年には約1,000mのボーリングが2本掘削された。1991年10月に418mのCCM-1が掘削され、CCM-2は708mで1992年に掘り止めとなった。

#### ニューアーク堆積盆 Newark Basin

ニューヨーク北西のニューアーク堆積盆において、1990年冬から1991年春にかけて6地点で10本のオールコア掘削が行われ、総長5,981mのコアが得られた。5-15°で傾斜する地層断面に沿って連続的に堆積物を採取できるように掘削地点が設定され、掘削後直ちに自動地質評価モジュールによってコア分析が行われた。後期三畳紀の河川・湖沼堆積物からなり、2,300万年間の連続記録が得られた。古地磁気層序が確立され、ミランコビッチ周期が見出されている (Kent et al., 1995; 第8図)。

#### ハワイ掘削計画 Hawaii Drilling Project

ホットスポットの火山岩を掘削し、岩石学・古地磁気学の記録を得るとともに、火山岩の下の海洋地殻を掘り抜き上部マントルに到達することを目指している。噴出物の化学組成・同位体組成からマントルの状況を知ること、マントルと海洋リソスフェアの相互作用、テクトニクスとマグマ活動の関係を解明することを主目的とし、副次的には、海洋火山の内部構造、火山の荷重とリソスフェアの沈降、古地磁気変動の精密解析、地磁気異常の起源の精密解明を目的としている。1990年1月にハワイ島のキラウエア火山東部の開裂帯に深度2kmの4本の掘削が着手され、1992年の春・夏にマウナケア火山の北西翼で600mオールコアの先行掘削を開始し、マウナケア火山本体の主体をなすソレアイト質溶岩を掘削する。本掘削の目標深度は4,300mである。

#### 2. スウェーデン

スウェーデン議会は1990年までに原子力発電所を全廃することを決議したことを受けて代替エネルギー資源の探査を開始した。そこで候補に上がったのが、天然ガス産出のあるシルヤン隕石孔である。スウェーデン政府はシルヤン隕石孔掘削計画を推進した。

#### シルヤン隕石孔 Siljan Crater

スウェーデン中央部のシルヤン環状構造は、3億6千万年前に隕石が約16億年前の花崗岩に衝突して形成されたクレーターである。この隕石孔では天然ガスやタールの湧出があり、暖房等に用いられていたことから、隕石衝突によって地下深くまで割れ目が生じ、地表近くは圧砕され、一部は熔融し、マントル由来の非生物源の炭化水素が上昇・貯留されていることが予想されていた (Gold, 1979)。この天然ガスやタールの起源を解明することは石油・天然ガス探査に新たな道を開くものとして探査が開始された。

1983年に7箇所500-700mの予備掘削を行ったほか、各種探査を行い、反射法地震探査では、1,250, 2,580, 4,700, 7,500mの4枚の反射面が確認され、4枚目の反射面を貫く掘削計画が企画された。

1986年7月に、隕石孔北部の負の重力異常が最も大きな地

点で目標深度7.5kmのGravberg No.1掘削が開始された。掘削は米国オクラホマの掘削会社が、検層はシュランベルジェ社が当たった。1986年9月に破砕を受けた花崗岩をロータリーで3km掘削し、1,000mにつき20mのコアを採取した。1987年3月に深度6.1kmにおいて逸水・抑留され、4.7kmから枝掘りして5.7kmに到達している。比較的多量のメタンと少量のエタン・プロパンが検知されている。その炭素同位体比は有機物由来のものよりも中央海嶺起源のものに近いと言われている。ただし、泥水の種類を変えるとガスの溶存量が変わることから、混入の可能性も示唆された。コア採取は極めて困難であり、ダイヤモンドビットよりもローラーコーンビットの方が良いが、10mのコアリングに対して最大4mで平均1m以下の回収率であり、円筒形のものには希にしか取れなかった。坑壁崩壊は各所で起こり、接触型の検層は困難であった。1987年9月5日には6,600mに到達。坑井は垂直から45°も傾いていた。3回目の枝掘りも6,750mで崩壊のために、掘削は中止された。温度勾配は16.1°C/kmあり、ガス試料は粗粒玄武岩に伴う中央海嶺のガスに類似したものと花崗岩に伴うメタン・ヘリウム・水素を含むガスの2つの成分からなり、期待された天然ガスには到達しなかった。また、9%に及ぶ磁鉄鉱を析出している箇所があった (Julin, 1990)。1991年1月にVattenfall Research and Developmentは炭化水素の存在は確認されなかったという最終報告を提出している (Julin et al., 1991)。

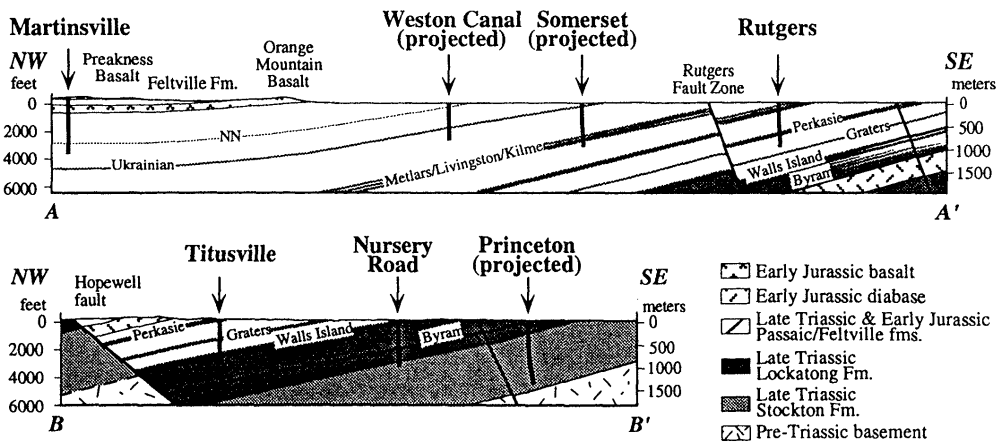
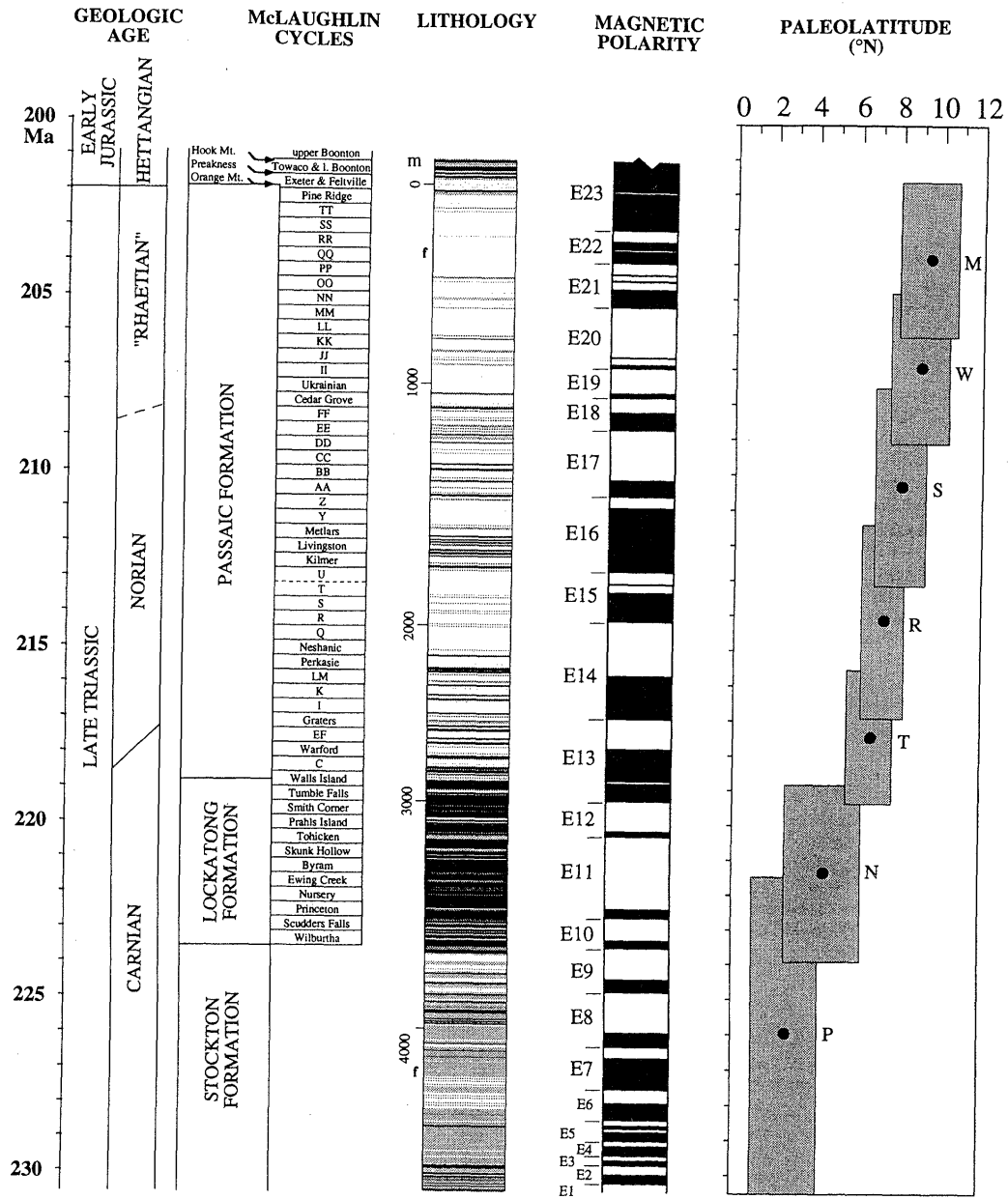
1991年7月にDala Djupgas Produktionsによる目標深度7,000mの掘削がクレータ中央部で開始されたが、中断されたままである。

#### 3. フランス

フランスでは、1982年5月にパリで陸上学術ボーリングに関するシンポジウムを開催し、350人の参加を得て13のトピックについて討論した。そこで、国際深海掘削計画IPODを規範に1,500-4,000mの学術ボーリングを2年に1本程度掘削する10年継続の「フランス深層地質計画」GPFが決定された。そして候補地としては、地震波断面計画と関係してパリ盆地北部のSovioieとDauphineそして北ピレネー、堆積盆地としてCevennesに沿う南東中生代堆積盆・北アキタン盆地・南パリ盆地、基盤に關係して中央ブルターニュ・セントラルマッシフの南西部Limousin・北西部Bombonais、異地性地質体としてアルプス・ピレネー、火山と關係してセントラルマッシフ、などが上げられた。1983年末まで事前調査が行われ、1984年から2-3箇所のサイトサーベイ、1986年から掘削が開始された。

#### Sancerre-Couy

パリ盆地北部の磁気異常解明のために1986年10月1日から3,500mの掘削がなされ、1987年11月22日に掘り止められた。1,800mまでオールコアで掘削され、三畳紀-ジュラ紀の堆積物について古地磁気層序が確立された。3-3.5kmの深度に磁気異常の原因となる岩体が存在するという三次元モデルに従い、その頂部を掘り抜く計画であったが、3.5kmの掘削では磁気異常を担う岩体を捉えることはできず、坑井内磁気測定によるとその岩体は4-5kmと7kmに存在すること



第8図 Newark Basin 掘削計画 (Kent et al., 1995). 北西に緩く傾斜する後期三畳紀の堆積物を掘削地点をずらしながらオールコア掘削を行い、完全な層序断面を得た。採取されたコア試料の研究によって、ミランコビッチ周期、古地磁気層序、極移動などが明らかになった。

が分かった。基盤岩類の源岩は塩基性火成岩と堆積岩からなり、ヘルシニアン造山期の suture に当たり、後退変成作用を受けているが、高圧グラニュライト相の変成を被っていることが判明した。

#### Échassieres

金属鉱床・マグマ地球化学の目的での鉱化作用を受けた花崗岩に 900 m の定方位オールコアリング掘削が 1987 年に行われた。

#### Cézallier

熱水研究のために、150 m の観測井が坑底ハンマーによって 500 m ノンコア掘削され、1,400 m 連続コアの本掘削が行われ、岩石・流体循環・流体組成・熱流量・応力測定が実施された。

#### Balazuc 1

1990 年 7-9 月に石炭紀からジュラ紀の堆積岩を 1,730 m 掘削し、1,200 m から 1,730 m まで連続定方位コアリングが行われた。

#### 4. ロシア

ロシアはソ連時代から大深度陸上ボーリングを各地で展開してきたが(塚原, 1994), 前述のコラ半島 C Γ-3 は、その中の一つである。

#### サートリ Саатлы CΓ-1

トランスコーカサス地方のクリンスカヤ低地に位置し、中生代・古生代の堆積岩・火山岩複合体中の石油・天然ガス鉱床の埋蔵量予測のために掘削された。1977 年 6 月開坑、1982 年 8 月に 8,180 m に達し終了し、坑底温度は約 150°C であった。深度 6,450 m からは玄武岩であり、8,000 m のコア試料はジュラ紀の火山岩と言われている。

#### チュメニ Тюнь

ウルゴイ天然ガス田の北部に位置し、中生代・古生代の石油・天然ガスの埋蔵量を予測するために掘削され、1994 年に 7.4 km、1996 年に 7,502 m を掘削中である。

#### ウラル Урал

ウラルの優地向斜堆積物を貫き古生代の断面を得るとともに、鉱床胚胎層準を貫き、結晶質基盤まで掘削する計画である。1994 年に 4.8 km、1996 年に 5,350 m をコラ半島で用いられた掘削機と同規格の掘削機で掘削中である。

#### クリボイログ Кривой Рог

縞状鉄鉱床を掘削管を使用しない投入型の坑底モーターを用いて掘削した。坑底モーターは泥水を逆流させて地上に回収し、50 m 毎のスポットコアを採取した。深度 1,400 m 付近で 32° にも及ぶ坑曲がりを起こし、枝掘りを行い、1994 年までに 5,300 m 掘削した。

#### 5. ベルギー

地下 5,500 m に予測される Midi 断層の掘削を目的としてベルギー南部の Havelane において学術ボーリングが実施され、1983 年 5 月には 4,500 m に達し、4,902 m で Midi 衝上断層を貫き、激しく褶曲して直立したヴァリスカン堆積盆の前期デボン紀の頁岩・砂岩・礫岩に達して 1984 年 12 月に 5,648 m で掘り止めされた (Bouckaert, 1985)。

#### 6. カナダ

1984 年に新型のバイプロサイズによる地殻の反射波断面探査計画であるリソプローブ Lithoprobe 計画、1985 年 2 月に陸上学術ボーリング計画について検討が開始された。1986 年 2 月にオタワで開催された学術掘削についての研究集会には 180 人の研究者が参加し、リソプローブ計画の実現と早急な陸上学術ボーリング計画を立案することが決定された。1987 年に陸上学術ボーリング計画のための事務所がオタワに開設され、既存の掘削技術による比較的安価な 3 km 以浅の掘削による 5 年計画の検討を開始した。

リソプローブ計画も開始され、1987 年末までに 29 の陸上学術ボーリング候補地が受け付けられた。1988 年 2 月にはトロント大学で、第一の候補地として上げられた下部地殻物質を直接入手する Kapuskasing Structure Zone (KSZ) についてのワークショップを皮切りに、グラニュライト相変成岩と隕石衝突そしてニッケル鉱床の関係解明を目指すサドベリー盆地、ヴァンクーバー島の新期の断層から Grenvill 帯の衝上断層までの各種断層の本質を掘削によって解明しようとする大断層帯について、等のワークショップが行われ、グリーンストーンと花崗岩帯、Algonquin Arch, K-T 境界なども検討された。

1989 年 8 月にトロント大学で米英日の参加者も交えて陸上ボーリング計画検討会を開催され、カナダ陸上ボーリング計画 CCDP 第一次 5 ヶ年計画が策定された。この計画における掘削深度は 3 km 以浅であり、年平均 350 万 \$ の計画で、K-T 境界、花崗岩・グリーンストーン、アルバータ州北西部 Steen 川衝突構造、ヴァンクーバー島の断層、南オンタリオの Algonquin Arch, Grenvillian の掘削を予定している。

#### 7. イギリス

1950 年から 1975 年にかけて地域地質の問題解決のため 1-1.5 km のボーリングが行われ、1975 年からはエネルギー省予算による数本のボーリングがなされ、更に 1980 年代には地熱開発のためのボーリングがなされている。最も深い坑井は英国東部の地熱開発のために 1984 年に掘削された深度 2,100 m の坑井であり、三畳紀の Sherwood 砂岩と二畳紀の砂岩を貫き、上部石炭系に達している。その後、1985 年には高温岩体の地熱開発のために坑井長 2,800 m、深度 2,652 m の坑井が掘削されている。1989 年には 3-6 km の学術ボーリング候補地、1) スコットランドの第三紀花崗岩の下に予測される超塩基性岩体、2) 反射法地震探査によって明らかになったモホ面を切る suture zone に沿って地下 3.8 km に予測されるカレドニアン基盤、3) 南ウェールズにおける反射法地震探査によって確認された構造の確認、等 23 箇所が提唱されている。

#### 8. 中国

1987 年 4 月 5 日から新疆・ウイグル自治区タリム盆地で米国製 9 km リグで 6,000 m の深層ボーリングを地質構造と石油・天然ガスの埋蔵量の評価のために開始し、5 月 21 日には 3,300 m に達した。1989 年 6 月北京に中国科学掘削技術国立研究所が設立され、掘削の理論的基礎研究とその応用技術の開発を行っている。1992 年 4 月 15-17 日に北京の中国科学

院で第1回中国科学調査掘削 (CCSD) 討論会が開催され、30数箇所の候補地が検討された。1993年3月には「日本の陸上学術ボーリング候補地集 I II III」が中国語訳されて出版されている。

### 9. オーストリア

ウィーン盆地は、ボヘミア地塊とアルプス山脈に挟まれたパラテチスと呼ばれる新第三紀の変動帯にあり、国内の20%の石油・天然ガスを供給している。ウィーン盆地北部のチステルスドルフ Zistersdorf では、石油探鉱のためにコラ半島・オクラホマ油田に次ぐ当時世界第三位の8,553 mの深層ボーリングがなされた。この坑井は、パラテチスの新第三紀堆積物としてアルプスからのナップを貫き、ボヘミア地塊のジュラ紀石灰岩に達した。この地下構造の解明によって、石油の起源がボヘミア地塊であることが判明し、石油探鉱の指針を大きく変換するために重要な役割を果たした (Ringhofer, 1986)。

### 10. チェコスロバキア

西部カルパチアの基盤に達する深度6,000 m以上の坑井が5本掘削されており、基盤の構成と構造が明らかになり、アルプス・カルパチアナップの性質および西部カルパチアの基盤を構成する古生層と先カンブリア紀の分布が解明された (Suk and Drica, 1991)。1985-1987年には総長420 kmの反射法地震探査が行われ、ボヘミア地塊の Moldanubian の深部構造を探るために南部ボヘミアの Jeseniky 山脈における学術ボーリングが検討されている。これらは、西部カルパチアナップと北部ヨーロッパ楕状地のヘルシニアン東端部の関係と性質を解明することを目的としている。

### 11. オーストラリア

地質・地球物理局 BMR は、3つの堆積盆において1,000 m級のオールコア掘削を1985年から実施する計画を立案した。掘削地点と目的は、1) Amadeus: 古生代/後期原生代の堆積盆で天然ガス生成モデルにおける母岩の確認、2) McArthur: 原生代堆積盆の北西部に存在すると予想されている珪化作用を受けていない源岩採取と逆帯磁の確認そして原生代中期の石油貯留層の確認、3) Clarence-Moreton: 中生代堆積盆において海水準変動にともなう堆積作用の変動を解明、等である。

### 12. プエルトリコ

プエルトリコ電力公社 PREPA は1989年8月24日から11月9日に Toa Baja 島の North Coast 第三紀堆積盆において石油埋蔵の可能性の評価を目的に2,704 mの掘削を行った。プエルトリコは南北両側から海洋プレートの沈み込みを受けているが火山活動は堆積盆の基盤である白亜紀から始新世の4千万年前以降存在せず、15°C/kmと低い地下増温率を有している。中新世以降の浅海成石灰岩・砂岩を貫き600 mで不整合下の後期始新世-中期漸新世の泥灰質石灰岩・火山砕屑岩・火山岩に達した (Larue, 1991)。

### 日本のボーリング活動

ダーウィンの珊瑚礁沈降説を解明するために、1934年には世界に先駆けて北大東島で431 mの学術ボーリングがな

れている (杉山, 1934)。また、第四紀の環境変動を解明する目的で、琵琶湖において学術ボーリングが1965年から開始され、1971年に200 m、1983年に1400 mの湖底堆積物が得られ、総合的な解析が行われている (Horie, 1987 など)。

日本の石油掘削は、1955年に3,000 m、1961年に4,000 m、1967年に5,000 m、1990年に6,000 mと掘削深度を伸ばしてきたが、1955年以降のボーリング深度記録の達成には石油公団の基礎試錐が重要な役割を果たしてきた。1990年に5,000 mを超える坑井は25本に達し、北海道と秋田がそれぞれ1本、新潟が23本である。坑底温度が200°Cに達する深度は、コラ半島で11,000 m、オクラホマで8,300 mであるのに対して、日本では5,600 mであり、日本における困難さが際立っている (石油技術協会, 1990)。

国による地熱開発調査のための掘削は、1970年から本格的に開始され、日本各地でオールコアのボーリングが多数実施された。地熱開発のための掘削も盛んに行われ、掘削深度も1960年に1,000 m、1970年に1,500 m、1980年に2,500 mと増大し、1984年に3,206 mで373°C (斎藤, 1993)、1995年には前述のごとく3,729 mで500°C以上の世界最高温度掘削記録を樹立している。

金属鉱床探査のためのボーリングは金属鉱業事業団によって1960年代から実施されている。首都圏においては天然ガス調査、地盤沈下調査、地震観測のためのボーリングが多数実施されている。

1980年代に陸上学術ボーリングについて検討が開始された際に、これらのボーリング資料について「既存ボーリング資料集」としてまとめられ出版された (新妻ほか, 1982)。この資料集には石油関係112本、金属鉱床関係212本、地熱関係67本、珊瑚礁関係11本が収録されている。それ以後の石油関係のボーリングについては、「日本の石油・天然ガス資源」(天然ガス鉱業会・陸上石油開発協会, 1992)にまとめられている。首都圏についての最近のボーリングについては、東京都土木技術研究所 (1996)・関東平野中央部地質研究会 (1994) などがある。

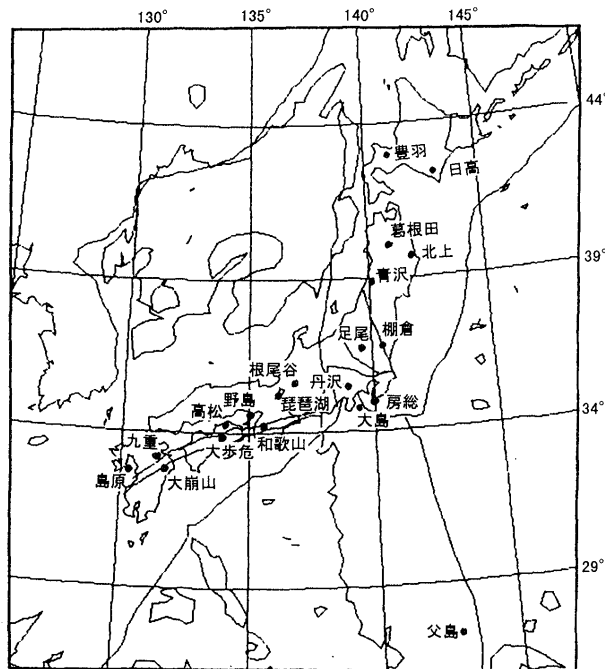
#### 1. 学術ボーリング活動

これらの検討をもとに日本各地に陸上学術ボーリング候補地が提唱されるとともに、防災科学技術研究所では地震の本質を担う地殻応力測定を目的に学術ボーリング計画が推進されている (第9図)。

#### 足尾：地震予知を目指した地殻応力測定と震源過程

栃木県足尾町では微小地震が群発しているが、震源が2 kmと極めて浅い地震も起こっている。1988年度から4年計画で2,000 mのボーリングが実施された。掘削されたのは、足尾帯のジュラ紀付加体を貫く均質な花崗岩である。掘削は、深度167 mまでエアハンマーで行われ、それ以深はロータリーで掘削された。諸測定のために坑井は垂直から3°以内におさえられた。1993年に深度2,002 mで掘り止めし、1,500 mまでケーシングがなされた。坑底温度は90°Cであった。

深度205, 288, 445 mで地殻応力を測定され、最大水平圧縮方位はN45°±15°Wで、周囲で起こっている地震の発震機構と調和的である。応力の大きさは破碎帯の存在によって



第9図 日本の陸上學術ボーリング地点および候補地点。実線は、1000 fath. (1852 m) および 2000 fath. (3704 m) 等深線、プレート境界、および構造線。

支配されており、破碎帯の下では応力が急増した後、ほぼ一定の大きさに落ち着く。断層付近では坑壁破碎が起こらないが、離れると坑壁破碎が起こる。地殻応力測定によると、断層付近では最大水平応力が 40 MPa であるのに対して、離れると 80 MPa になっていることが明らかになった。断層でない所では 100 MPa とカホンパスにおける 30 MPa の 3 倍に達している。地殻応力は深度とともに増大し、1000 m 以深では水圧破碎では破碎できない程大きくなっている。以上の結果は、均質な岩石で構成されている地殻でも、断層などの破碎によって応力が低下していることを示している (Tsukahara et al., 1996; 第 10 図)。

#### 根尾谷：1891 年の濃尾地震震源断層掘削

1891 年に発生した内陸地震最大の濃尾地震 ( $M=8.0$ ) に伴う全長 80 km の数本の断層系が出現したが、根尾谷断層はその内の 1 本であり、美濃帯のジュラ紀付加体を 31 km にわたり切断し、中央部において 7-8 m の左横ずれ変位をもっている。掘削地点は、上下変位 6 m を起こした水鳥断層から 120 m 離れた場所にあり、根尾谷断層を地下で貫く計画である。

掘削は 1994 年 1 月 19 日から開始され、掘削されたコアは典型的な付加体であり、海溝堆積物である頁岩・千枚岩の泥質岩を主体とし、深海底の珪質頁岩やチャート・玄武岩を取込んでいる。これらの岩相の境界部には断層が無数に発達している。γ線検層では、線量の殆どない深海底岩石と、高い線量の海溝埋積堆積物と明確に区別可能である。深度 211 m で行われた地殻応力の測定では、水平最大応力は 14.4 MPa、水平最小応力は 8.5 MPa で、5.4 MPa の垂直封圧よりも大きい逆断層型であった (池田ほか, 1995)。1996 年 2 月に 900 m

の深度で断層を貫き、1,300 m に達した。断層周辺では応力が減じている。

#### 活断層ドリリング計画：活動期の異なる活断層掘削

東西方向の水平圧縮応力によって本州中部に形成された共役横ずれ活断層である根尾谷断層・阿寺断層・跡津川断層を貫く 2 km のボーリングを実施する計画である。これらの活断層は再来周期 1,000-4,000 年と考えられているが、上記の根尾谷断層は 1891 年に  $M=8.0$  の濃尾地震を起こして 100 年であるのに対し、跡津川断層は 150 年前に  $M=6.9$  の地震を起こし、現在も小さな地震を起こしているが、阿寺断層は地震を起こしていない。これらの相違は、活断層の異なる活動段階を現しているものと考えられ、これらの断層を調査することによって活断層の活動全体についての理解が得られるものと期待されている。掘削によって、1) 地殻応力の測定、2) 断層・き裂の観察、3) 断層・き裂内の間隙水圧・透水率の測定、4) 岩石の岩石学的・化学的・物理的性質・破壊強度の測定、5) 流体の圧力・成分・温度の測定、が計画されている (池田ほか, 1995)。

1995 年 1 月に起こった  $M 7.2$  の兵庫県南部地震を引き起こしたのは、本州中部の共役活断層系の活動である。活動した断層のほんの一部が淡路島北淡町の野島断層の動きとして現れたが、大部分は地下に隠されたままである。地震直後の断層の状態を知るために多くの掘削が計画され、科学技術庁では野島平林・岩屋・甲山の 3 地点で 1,000-1,800 m の掘削を行った。1992 年以來実施してきた応力の繰り返し測定によると、地震による応力の急激な減少と方向の変化が観測されている。

#### 2. 學術ボーリング候補地の検討

1980 年代に実施された陸上學術ボーリングについての検討結果は、陸上學術ボーリングワーキンググループによって「陸上學術ボーリング候補地集 I, II, III」としてまとめられた。1990 年代には、これらの候補地において現地検討会が行われるとともに国際陸上科学掘削計画 ICDP 立案と並行して、より具体的な學術ボーリング計画が立案された (第 9 図)。以下に 1980 年代から検討されてきた候補地を紹介する。

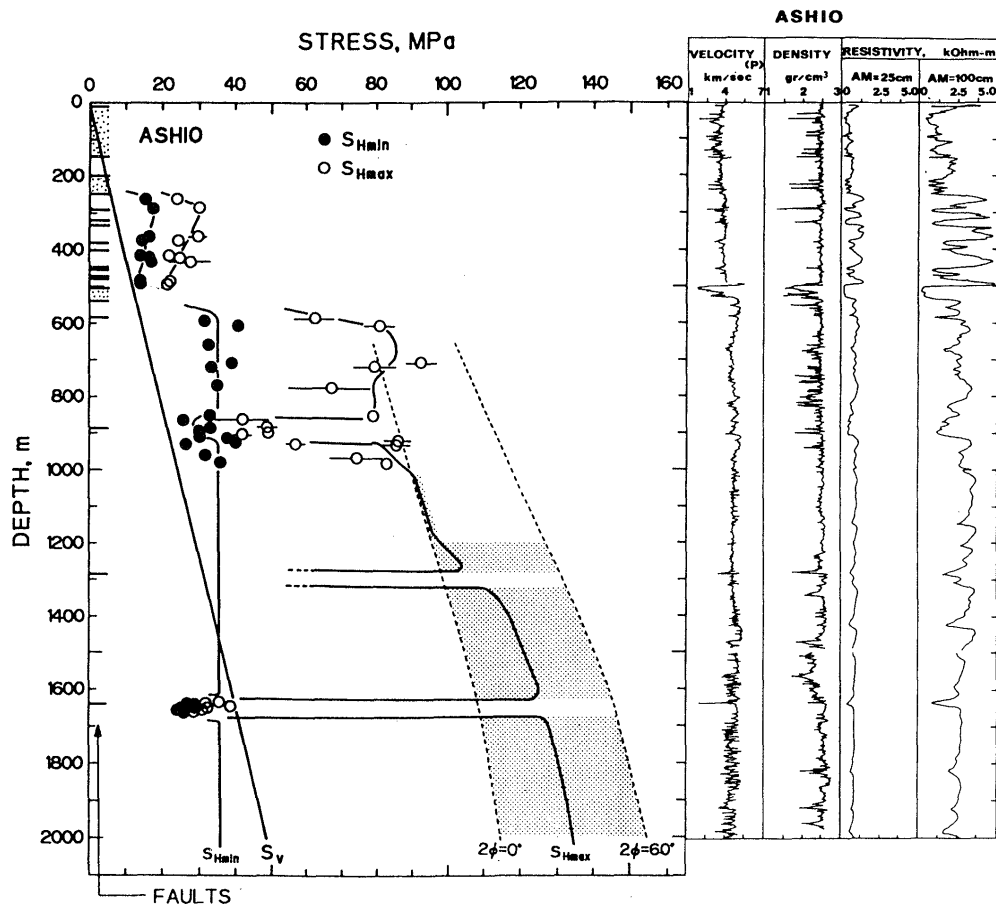
##### 小笠原

小笠原諸島 (Bonin Islands) は boninite の模式地であり、島弧形成初期の火成活動を解明するための適地である。小笠原父島には始新世の boninite 火成活動の前にも火成活動が存在し、島弧形成初期の火成活動の変遷と島弧地殻の成長について関心が持たれ、1980 年代にキプロスを掘削した後述の国際地殻掘削グループ ICRDG において掘削候補地として取り上げられた。周辺海域における爆破地震探査によると、モホ面の深度は 12 km と推定されており、モホール計画を実施できる候補地でもある (海野ほか, 1988; Umino, 1996)。1995 年 9 月に現地検討会が開催された。

##### 四国三波川帯

典型的な高圧変成帯であり、沈み込みによって形成された付加体深部における変成作用を受けて形成されたと考えられている。構造的に下位より大歩危ナップ、別子ナップ、久万





第10図 足尾掘削によって判明した地殻応力の不均質性 (Tsukahara et al., 1996). 地震波速度, 密度, 比抵抗の低下する断層帯では水平圧縮応力が局部的に低下することが明らかになった. 1,000 m以深では, 断層周辺以外は, 応力が大きすぎて水圧破碎による応力測定ができないので, 坑壁の変形状態から応力を推定している (網目).

ナップの少なくとも3つのナップから構成されており, それらのピーク変成年代は70-77 Ma, 90-100 Ma, 145-185 Maと下位ほど若く, 変成度は上位ほど高い. 四国三波川帯の大規模背斜部の大歩危地域で大歩危ナップの下位に存在する地質体が, 1) 黒瀬川帯か, 2) 四万十帯か, 3) 既に存在していた島弧地殻か, 4) 花崗岩か, をボーリングによって解明することによって, 高压変成帯内部の詳細な構造, 変成場から浅部への上昇機構, 付加体による島弧地殻の形成過程, などの解明が期待される (坂野ほか, 1988; Takasu, 1996). 1995年7月に現地検討会が行われた.

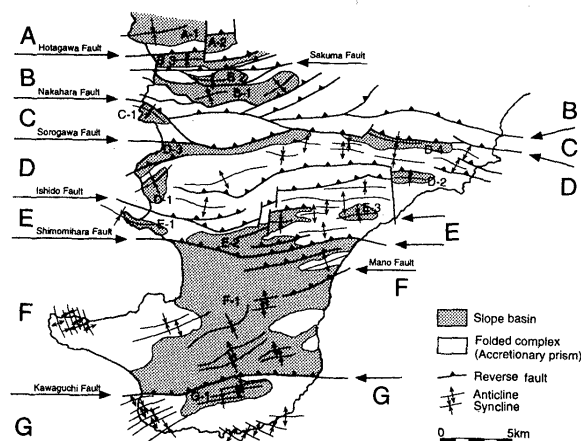
#### 和歌山

深さ2-5 kmの地震が頻発している地域であり, 学術ボーリングによって震源を貫き, 震源域の地殻の力学的特性・地殻応力・地殻流体などを明らかにするとともに計測実験を実施することができる. この地域は三波川変成帯に位置しており, この地域の変成岩は四国三波川帯と同様に, 上位ほど変成度が高い構造を有している. 震源域は三波川帯およびその下位に当たることから, 地殻構成岩体と震源の関係を追及できるとともに三波川帯の詳細な内部構造, 三波川帯の下位の地質体, 変成場から浅部への上昇メカニズム, 付加体による島弧地殻の形成過程, などの解明が期待される (溝上・中村,

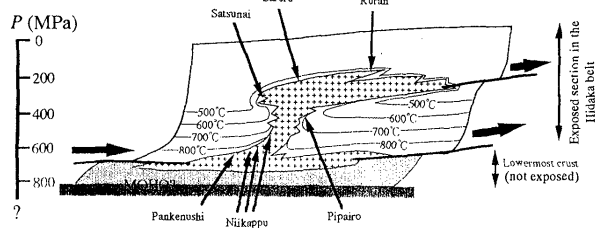
1988; Maekawa et al., 1996). 1994年11月に現地検討会が開催された.

#### 房総

房総半島南部の地質は, 東西走向の断層群と褶曲群によって南北方向に短縮した中期中新世以降の付加体と斜面海盆堆積物の複合体である (第11図). 地下10 kmにフィリピン海プレートが沈み込み, 関東地震の震源域を形成しているため, 陸域から沈み込むフィリピン海プレートを直接掘削するために最適な地域である. 同様な候補としては静岡地域がある. 房総沖には, 地球上で唯一の3つのプレートが収斂する海溝・海溝・海溝型三重会合点が存在し, 火山弧が衝突している特異な地域であり, 沈み込み帯を掘り抜くことによって, 1) 付加体深部や沈み込み帯で進行している堆積物の変成作用・変形様式・地殻内流体などの地球科学的諸現象の解明, 2) 沈み込み帯付近における微小地震・応力・歪・流体移動などを長期坑内観測, 3) 地震の前兆現象を捉え首都圏の防災に資する, などを目的としている. この掘削計画は, JUDGE計画 (Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experiments) の主要候補となっている (斎藤, 1995; Saito et al., 1996 a). 沈み込むプレートに到達するためには超深層ボーリングを行わねばならず, 掘削技術の開発が必要



第11図 南房総に分布する中新世・鮮新世付加体と斜面堆積物 (Saito et al., 1996 a). 房総半島南部には激しく褶曲し、逆断層によって切断される新第三紀付加体と、付加体上面の沈降部を埋積する斜面堆積盆堆積物が露出している。新第三紀付加体は、後期中新世から相模トラフに沿って開始されたフィリピン海プレートの沈み込みによって形成された。この付加体を貫いて、沈み込むフィリピン海プレートまで掘削する計画が提案されている。



第12図 日高山地に露出する地殻深部物質から復元された島弧地殻構造 (Komatsu et al., 1996). 日高山地には、島弧マグマ活動によって貫かれ変成した付加体堆積物が露出しているが、露出していないモホ面直上の下部地殻を掘削する計画が提案されている。縦軸は変成時の圧力、温度は変成温度である。

である。掘削地点選定のために、地表調査とともに反射法地震探査を行う必要がある。1993年12月に現地検討会が開催され、1996年3月には、筑波で開催された「掘削による大陸地殻観測」国際ワークショップの巡検が行われている。

#### 丹沢

南部フォッサマグナでは、約500万年前に丹沢が衝突し、約100万年前に伊豆半島が衝突している。丹沢は2度の衝突のために東西走向で北に傾斜する褶曲軸面を持つ背斜構造を形成し、その南翼では逆転している。背斜構造軸部には伊豆弧下部に分布する深成岩類が露出し、それらに進入された火山岩類は、角閃岩相に変成して5-10倍に引き伸ばされる塑性変形を蒙っている。屈折法地震探査によると丹沢北方の大菩薩峠を中心とする関東山地は下部地殻が24kmと通常の2倍の厚さを有しており、丹沢の褶曲構造に参加しなかった下部地殻が分離して北方の関東山地の下に沈み込んでいるものと予想される。背斜軸部において上部地殻である酸性・中性

の深成岩を貫き、分離した下部地殻に到達する目的で学術ボーリングが提案されている (Niitsuma, 1996)。1995年11月に現地検討会が開催された。

#### 日高山地

日高山地を構成している変成岩は、島弧地殻深部が地表に露出したものである (第12図)。地表で見られる島弧地殻下部のグラニュライト帯に進入するザクロ石・斜方輝石トータル岩や花崗岩は、下部地殻の溶解によって形成されたものであり、島弧火成活動の下部地殻における熱的・動的過程の重要性が指摘されている。日高変成帯では、大規模なデコルマンによる下部地殻の分離・切断が起こり、デュプレックスを形成している。このデュプレックス構造形成に伴ってマントルカンラン岩が露出しており、地表に露出していない下部地殻からマントルまでの岩石を採取して、島弧下部地殻で起こっている火成・変成の諸過程を明かにすることが学術ボーリングの目的である (小松, 1988; Komatsu et al., 1996)。

1960年代の上部マントル探査開発計画において学術ボーリングが検討された際に、掘削技術検討のためにマントルカンラン岩が掘削されている (丹治, 1974)。近年は反射法地震探査が実施され、下部地殻からの多数の反射面を持つラミネーションも捉えられている (伊藤ほか, 1998)。1994年8月に現地検討会が開催された。

#### 領家帯

領家変成帯は、典型的な低圧高温変成帯であり、後期中生代の島弧火成活動帯の地殻深部が露出している。領家帯の中で最高変成度を示すザクロ石・董青石・カリ長石片麻岩は古期花崗岩・花崗閃緑岩の進入帯にある。その下底部は、マイロナイト化の激しい剪断帯となっており、デコルマン下底に位置していると考えられる。新期花崗岩や中新世の瀬戸内火山岩の捕獲岩にはザクロ石・黒雲母片麻岩の部分溶解によって形成されたザクロ石・斜方輝石グラニュライトがあり、領家帯下部には下部地殻深部のグラニュライトが存在することが明らかである。領家帯における学術ボーリングでは、中生代島弧火成活動帯軸部の下部地殻における火成作用・変成作用の諸過程を解明することを目的としている (小松, 1996)。1995年7月に現地検討会が開催された。

#### 飛驒

飛驒神岡鉾山周辺には古期のミグマタイト質花崗岩、ジュラ紀および三畳紀の船津花崗岩、白亜紀から古第三紀の濃飛流紋岩に伴う花崗岩そして更新世の花崗岩体が在り、飛驒片麻岩などの古期岩体はそれらの上に薄く載っている。山岳地域であるので河川による下刻によって、キノコ型の花崗岩体断面が露出しており、その下部を解明する目的で学術ボーリングが提唱されている (加納, 1989)。

#### 伊豆大島火山

日本の活火山の中で最も調査の進んでいる火山であり、火山体を直接ボーリングするとともに坑井に計測器を設置して3次元的観測網を作り、カルデラ形成過程を含む火山体の内部構造と噴火史・噴火マグマ組成との関係についての調査と、火山噴火とマグマの集積・注入過程、地下水との相互作用などの観測を行うことを目的としている (荒牧, 1988; 渡

辺, 1995). 1995年2月に現地検討会が行われた。

#### 九重火山

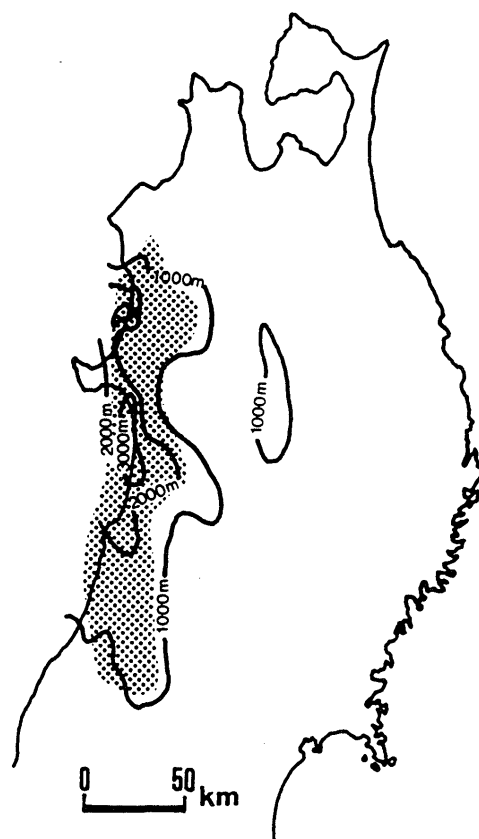
九重火山は別府・島原地溝帯内に位置し、20個以上のドーム状火山体から構成されている。主要火山活動は、30万年前から開始され、1万5千年前からは300-1,000年の間隔でマグマ活動が起こっている。火山活動史と地殻熱流量の測定により、地下4kmに冷却中のマグマの存在が予測され、マグマから供給されるマグマ性流体と地表からの天水の混合によって噴気・温泉となり地表に流出している。學術ボーリングは、火山体・基盤の白亜紀変成岩を貫き、冷却中のマグマ溜りに到達し、マグマ周辺の構造とマグマ性熱水系の解明を目的としている(江原・茂木, 1989; Ehara et al., 1996)。

#### 青沢層

山形県北西部の青沢層に代表される前期-中期中新世玄武岩類は1,000m以上の層厚を有し、噴出時期は14-16Maと日本海拡大時に一致している。また、1,000-3,000mの深海堆積物に覆われ、一部粗粒玄武岩として泥岩中に貫入し、日本海形成の際に生じた開裂海盆底を構成していた可能性が高い(第13図)。青沢層は、鮮新世以降の隆起軸である出羽丘陵の背斜部および衝上断層に沿って露出している。深部の塊状溶岩・層状岩脈群・班禰岩という開裂海盆底の連続断面を得ることが學術ボーリングに期待されている。また、この地域は、日本海盆や大和海盆に比較して開裂規模が小さく、開裂域の東縁に位置することから、開裂に伴う島弧火成活動と背弧海盆拡大との相互作用を解明するための試料を得ることも期待される。石油・天然ガスのマントル起源説が唱えられ(Gold, 1979など)、シルマン隕石孔で検証のための學術ボーリングが実施されたが、青沢層分布域は石油・天然ガスの産出地でもあり、石油・天然ガスが青沢層上位の海盆埋積堆積岩から由来したのか、下位のマントルから由来したのかを検討するための適地でもある(佐藤・天野, 1988)。近年、地殻深部探査によって反射法地震探査およびMT法電磁気探査が実施されている。

#### 大崩山

約14Maの日本海拡大時に西南日本弧が拡大直後の四国海盆にせり上がったため地殻が溶融して形成された花崗岩体の典型的露出地で、島弧地殻溶融過程と火山活動を明らかにするための適地である。大崩山火山・複成岩体は3つのカルデラとそれに伴う大量の珪長質火砕流堆積物、安山岩質成層火山、侵入花崗岩とそれに関連する花崗斑岩の環状岩脈を伴っている。大量の流紋岩・石英安山岩質の火砕流と18×13kmの祖母山カルデラの陥没によって火山活動が開始され、それに続き無斑晶質流紋岩溶岩の大規模噴出と12×6kmの傾山カルデラが形成された。これら2つのカルデラを覆って安山岩溶岩と火砕流が噴出し、成層火山が形成され、最後に環状割れ目が形成され、膨大な量の流紋岩質火砕流の噴出後、花崗斑岩で満たされ、その内側が陥没して33×23kmの大崩山カルデラが形成された。學術ボーリングでは中期中新世に形成された若い上部地殻の全断面を得て、1)カルデラ下のマグマ溜りの3次元構造、2)大規模珪長質マグマ溜りの化学組成の成層構造、3)大規模珪長質マグマの進入機構、など



第13図 青沢層およびその相当層の分布とそれを覆う海成堆積物の厚さ(佐藤・天野, 1988)。青沢層と呼ばれる前期・中期中新世玄武岩類の分布域(網目)とそれを厚く覆う海成堆積物の等層厚線。青沢層の分布域と等層厚線が一致していることから、前期・中期中新世に拡大した日本海の東縁部に当たると考えられている。背弧海盆の拡大過程と島弧火成活動との関係を明らかにするため掘削計画が提案されている。

の解明を目的としている(高橋, 1988)。

#### 北上山地

北上山地の三陸沿岸は、地殻熱流量が低く、コンラッド面が深度10km程度まで上昇しており、地殻下部の地球科学的情報を得るために好都合である。北部北上帯はジュラ紀の付加体から構成されており、白亜紀初期に起こった異地性地塊である南部北上の衝突とそれに続く厚さ数1,000mにもおよぶ大規模な石英安山岩・安山岩・玄武岩の火山岩類噴出によって特徴付けられる。この火山活動には黒鉄型鉱床が伴っており、新第三紀の日本海拡大と同様な開裂海盆が形成されたものと考えられている。超深層學術ボーリングによって、この厚い火山岩類を貫き、コンラッド面の岩石学的性質と広域に観測される磁気異常を担う岩体を確かめるための掘削計画が提唱されている(箕浦, 1988)。

#### 古琵琶湖

琵琶湖堆積物の學術ボーリングは世界に先駆けて行われたが(Horie, 1987など)、琵琶湖堆積物よりも古い古琵琶湖層群を琵琶湖南方に分布する掘削することにより、過去数百万年の環境変動を読み出す計画が提案されている。

### 棚倉

日本列島が日本海拡大によってアジア大陸から分離して島弧となったが、この拡大期に棚倉断層などの大規模な横ずれ断層が形成され、その横ずれ断層運動に伴って堆積盆が形成された。この堆積物をボーリングし、1) 横ずれ断層沿いの堆積盆形成過程、2) 横ずれ断層の深部構造、3) 日本海拡大期のテクトニクスと環境変動、などを解明する。同様な候補として秩父盆地も上げられる。

### 南鳥島

南鳥島は太平洋プレート上の離水環礁であり、白亜紀中期の海山基盤の上に1,000-1,500 mの炭酸塩岩が覆っていると予想される。離水海山の起源、プレート運動の復元、海洋リソスフェアの沈降史、地球環境の復元、などを目的に学術ボーリングが提唱されている(小西, 1988)。

### 豊羽鉱山

島弧マグマ活動に起因する鉱化作用を明らかにするために、マグマ進入・鉱液形成と移動・鉱床鉱物の晶出過程を解明する。鉱床の起源となる深成岩体に到達可能な地点を選定して掘削を行う。同様な目的で薩南地域も候補となる。

### 高松クレータ

精密重力探査によって四国高松市南部に発見された直径4 kmのクレータ構造は、埋積する火山性堆積物から隕石衝突によるショック変成鉱物も発見され、天体の衝突クレータである可能性が高い(Miura and Okamoto, 1996)。ランドエアガンによる反射法地震探査によって、埋積堆積物の厚さは1,400 mに達することが明らかになっている。磁気測定によってクレータに対応する磁気異常が見出され、ほぼ南北方向に磁化した埋積物が示唆される。西南日本は14 Maの日本海拡大によって45°時計廻り回転していること、また11 Maの瀬戸内火山岩類に覆われていることから高松クレータは14 Ma以後、11 Ma以前に形成されたと予想される。これらの予測を検証するために学術ボーリングが提唱されている(Furumoto et al., 1996)。1995年7月に現地検討会が開催された。

## 陸上学術ボーリングにおける国際協力

### 1. 陸上学術ボーリングについての委員会と集会

国際リソスフェア計画の陸上掘削委員会 Coordinating Committee on Continental Drilling

1980年代に開始した国際リソスフェア計画 ILP (International Lithosphere Project) は、日本国内では、リソスフェア探査開発計画 DELP (Dynamics and Evolution of the Lithosphere Project) として実行されたが、ILPでは陸上学術ボーリング計画の国際協力のために、1981年8月に委員長を西独の H. Vidal、副委員長をソ連の N. Lavrov とする付置委員会 CC6 陸上掘削委員会が設置された。1982年6月にサーキュラーが発刊され、1985年からは ICSD (International Continental Scientific Drilling) ニュースレターが発刊された。

この委員会では、各国の陸上学術ボーリング活動に関する情報を収集し、サーキュラーで情報を提供するとともに国際

リソスフェア委員会 ICL に報告を行っている。委員会は、学術ボーリング関係の国際集会や地球科学関係の国際学会の際に開催され、情報の交換の他に国際集会の企画や国際協力の方法が検討された。これらの活動は、各国における陸上学術ボーリング計画の推進に貢献するとともに、陸上学術ボーリングを国際的視野で推進する国際陸上科学掘削計画 ICDP の立案に中心的役割を果たした。ICLの改組にともない付置委員会の番号は6から4に変更されている。

掘削による大陸地殻観測ワークショップ Observation of the Continental Crust through Drilling

1980年代に超深層陸上学術ボーリングを実現しようとする米国が、1984年に陸上掘削を国際的に進展させることを目的に開始した国際ワークショップであり、世界の陸上学術ボーリング計画の節目毎に各国持ち回りでこれまで8回開催されている。

第1回は、1984年5月に、超深層陸上学術ボーリング計画が盛んに検討されていた米国のニューヨーク近郊 Tarrytown で開催された (Raleigh, 1985)。

第2回は、KTBを開始した西独の Seeheim で1985年に開催され、1987年にシルヤン隕石孔掘削計画による本掘削を行っていたスウェーデンのシルヤン環状構造内の Mora と Orsa で第3回が開催された。1987年にはソ連のコーラ半島の超深層掘削地点で第4回、1989年にKTBの本掘削開始式典と合わせて西独の Regensburg で第5回、1992年にフランス深層地質計画を終了したフランスの Paris で第6回、浅・中深度の陸上学術ボーリング計画を推進していた米国の Santa Fe で1994年に第7回が開催され、その席で国際陸上科学掘削計画 ICDP の提案がなされた。ICDPが正式に発足した1996年には筑波で第8回が開催された。

ソ連深層ボーリングセミナー「超深層ボーリングと深部地球物理探査」

世界最先端の掘削技術を持ち、世界最深掘削記録を保持するソ連が、ペレストロイカの波に乗って、1988年8月にヤロスラウリで世界各国の学術ボーリングおよび掘削技術についての専門家を招待し開催されたセミナーである。外国からの参加者には通訳が付き、講演は同時通訳された。種々の歓迎の催しの他に、クリボイログにおいて世界最先端の掘削技術である掘削管無し投入型坑底モーター掘削や坑底展開ビットが公開された。

### 万国地質学会

万国地質学会は4年毎に開催される地質学関係最大の国際学会であるが、1980年代には、国際的に陸上学術ボーリングへの関心が高まり、陸上学術ボーリングについてのシンポジウムが定期的で開催されている。

1984年8月にソ連のモスクワで開催された第27回万国地質学会では、Y. A. Kozlovsky と J. Aubouin がシンポジウム「陸上掘削」を行い、500人の参加を得て、6カ国から15の講演がなされた。このシンポジウムの開催に合わせて490頁に及ぶ Кольская Сверхглубокая (Козловский, 1984) が刊行された。実施が危ぶまれていたコーラ半島超深層掘削地点の見学会が各国から30人の参加のもとに行われた。

1989年7月に米国のワシントンで開催された第28回には、G. Arthur Barberがシンポジウム「陸上掘削」を開催し、DOSECCが日・米・ソ連・西独・仏・チェコ・英・スウェーデン・加の各国にポスター展示の場を与えた。KTBの先行掘削結果、シルヤン隕石孔掘削、カホンパス、ソルトンシー、インヨードーム、パリ盆地、コラ半島など進行中の掘削についての講演がなされた。南アパラチア超深層掘削候補地点の巡検が企画されていたが、中止された。

1992年9月に京都で開催された第29回には、R. Emmermann・A.I. Krivtsov・新妻信明・M.D. Zobackがポスターセッションを含むシンポジウム「深層学術ボーリング計画」を開催した。KTBの先行掘削・本掘削と地震探査・検層結果、ロシアの掘削計画と既存坑井の国際実験・観測施設として使用する提案、日本の学術ボーリング計画、米国のNewark Basin・San Andreas Fault・火山などの掘削、等の講演と、ロシア・日本・チェコスロバキアのポスター発表が行われた。

1996年8月に中国の北京で開催された第30回では劉廣志がシンポジウム「中国における学術ボーリング」を開催した。

## 2. 国際協力による掘削計画

各国が国家事業として陸上学術ボーリング計画を企画・推進していたが、全地球の視野に立ち、地球科学の根本的問題を解決するために研究費を持ち寄り、地下の岩石を直接採取する陸上学術ボーリング計画が実施された。

### アイスランド国際地殻掘削計画

海洋掘削では実現できない目標を安価に陸上掘削で実現することを目指し、1978年に米・加・独・仏・アイスランド・デンマークの研究者が、各種研究費200万\$を持ち寄って結成したICRDG (International Crustal Research Drilling Group)が1,920mの掘削を実施した。掘削地点は、アイスランドの北東海岸部に多数の岩脈に貫かれる層状溶岩の最下部が露出しているReydarfjordurである。掘削には66日を要し、坑底温度は81°Cであった。中央海嶺における海洋拡大過程の解明が目的として掘削されたが、溶岩を供給する拡大軸が何本にも枝分かれして1本でないこと、溶岩を地表に流出しないマグマ供給軸部でも変質作用や岩脈の貫入が起きていることから、1本の掘削によって目的を達することはできなかった。結果は*Journal of Geophysical Research* (1982), 87, 9659-6667に特集されている。

### キプロス国際地殻掘削計画

トルードスオフィオライト (Tordos Ophiolite) の掘削による地殻下部構造の解明を目的に、アイスランド掘削計画を行ったICRDグループが、1982-1985年に深度225-2,263mの5本のオールコア掘削を実施した。92-99%の高いコア回収率の5本の掘削により、枕状溶岩、層状岩脈、班礫岩、層状超塩基性岩体とオフィオライト構成岩石およびその境界を採取することができた。また、これらの岩石に熱水変質を与えた網状鉄染帯 Agrokippa 鉄床についてのコアも採取された。3成分リングコア磁力計および帯磁率計による坑内測定によると、岩脈帯から班礫岩に入ると全磁力・帯磁率ともに急激に減少することが明らかになった。これらの掘削によ

て得られた成果は、1) 変質は海水や熱水によって不均質・部分的に起こっているにすぎない、2) トルードスオフィオライトは島弧ソレアイト系・deplete ソレアイト系・ボニナイト系の3種のマグマからもたらされたものである、3) 塊状硫化鉄床は噴出岩体中に存在しており熱水循環と鉄床鉄物生成は岩脈卓越部上部に限定される、4) トルードスオフィオライトは単一のマグマ溜りから連続的に形成されたものではない、5) 層状岩脈の構造単位から断層で区切られた3本の拡大軸が存在していたと予想される、6) 地震波速度構造は現在の海洋地殻と類似しており岩脈と班礫岩境界が第2層と第3層の境界にあたる、等である。これらの成果は1987年10月にニコシアで開催されたシンポジウム「オフィオライトと海洋リソスフェア」において報告・討論された (Malpas et al., 1990)。

### サントリーニ火山

エーゲ小プレートに沈み込むアフリカプレートによって鮮新世から現在にわたる火成活動がエーゲ海のサントリーニ Santorini 島にみられる。B.C. 1390年の爆発によって形成されたカルデラ中央部の Palea Kamini 島において、1988年に201.5mの掘削が、ギリシャの地質・鉄山開発大学 IGME とスウェーデンのストックホルム大学の協力によって実施された。目的は、海水が石英安山岩質マグマに接触して金属に富む溶液の形成する過程を明らかにするために、坑井内でpH,  $fO_2$ ,  $fS_2$ ,  $fCO_2$ 等を測定して溶液化学・岩石学・地球化学的变化との対応を付けることである (Arvanitides et al., 1988)。

### ホワイト島

ニュージーランド北島北東部のプレントィ湾の50km沖合いのタウポ火山帯に位置する安山岩質・石英安山岩質のホワイト火山は、1971年、1976-1982年、1983-1984年、1986-1988年に噴火しており、火口の南東部は海に面して大きく割れている。1973年から1976年にかけて塩基性安山岩質マグマが地下500mまで貫入し、火道周辺には熱水系が発達してエピソード鉄床の形成過程を理解するための良好な地点として注目され、200mと600mの学術ボーリング計画が提案されている。1991年からニュージーランドと日本の地質調査所が計画を開始しようと検討している (Giggenbach et al., 1989)。

### バイカル湖

プレート境界に発達し、長期間沈降しているバイカル湖の堆積物を掘削する計画で、日米露協力によって掘削が開始されている。

1989年7月に米国NSF・USGSとソ連科学アカデミーの間で交わされた米ソ相互協力覚書に基づき、南カロライナ大学においてバイカル湖堆積物の連続掘削について検討がなされた。1990年5月にはソ連によってバイカル国際生態学研究センターが設立され、1991年3月に日本BICERが結成された。1993年に米国NSFの予算で2本の100mボーリングがなされ、日本の予算で1,000mの掘削が計画されている。1995年11月ニューオーリンズで1,000m掘削候補地点11点の中から北湖盆南部が選定された。1996年8月には、1,000

m掘削用の船がドック入りし、1996年11月には全ての調整・試運転を終えている。

**国際陸上科学掘削計画 ICDP: International Continental Scientific Drilling Program**

### 1. ポツダム集会

東西ドイツの統合を行ったドイツは、KTBの本掘削も後半に入り、国内体制を変換し、地球科学研究の中心としてポツダムの地球科学研究センター GFZ を開設した。この GFZ は KTB などの地球科学のビッグプロジェクトを推進するとともに、深海掘削計画 ODP などの国際研究計画も担当することとなった。この GFZ は、開所と合わせて、国際的協力によって全地球的視野に立って陸上学術ボーリングを実施する体制と学術的目標を検討する国際集会を企画した。

経済開発協力機構 OECD は、科学研究のためのビッグプロジェクトが1国の手に余るようになったために国際協力の方策を探る作業を進めており、天体望遠鏡の次の具体例として学術ボーリングが取り上げられ、1992年11月にフランス Brest の INFREMER で開催されたメガサイエンスフォーラムで検討された (OECD, 1993)。そこで提唱された陸上学術ボーリングの国際的取り組みを実現することがポツダム集会の目的であった。

集会は独米の主催により、1993年8月30日-9月1日にわたりポツダム大学で開催され、25カ国から220名が参加した。日本からは非主催国としては最大の22名が参加した。気候変動、堆積盆、地球物理探査の検定、リソスフェアの力学と変形、火山、地殻/マントル境界、収束プレート境界と衝突帯、地殻内流体、鉱床の起源、隕石衝突構造と大絶滅、掘削技術、海洋/大陸境界に分かれて討論が行われるとともに、国際協力についての具体的方策が討論された (Zoback and Emmermann, 1994)。

### 2. 立案作業

ポツダム集会後、1993年9月2日に KTB 掘削地点で陸上学術ボーリング計画のマネージャーミーティングが開催され、日本から浜田和郎・浦辺徹郎・石原瞬三の3氏が参加し、国際陸上科学掘削計画 ICDP の設立に着手することが共同声明に盛り込まれた。これに呼応して日本では、「島弧超深度掘削推進協議会」が結成された。1994年4月に Santa Fe で開催された第7回大陸地殻掘削探査国際シンポジウムにおいて ICDP 試案が提案された。1994年6月に日本学術会議は、地質学研究連絡委員会に ICDP ワーキンググループを設置・検討し、学術会議会長に地質学研究連絡委員会委員長名で要望書「国際陸上科学掘削計画 (International Continental Scientific Drilling Program, ICDP) について」を提出し、日本の積極的参加を要請した。1995年2月23日に独の GFZ と米の NSF 間で ICDP に関する合意書が交わされ、ICDP が正式に発足するための準備が進められた。学術会議の第4部に設置された ICDP 小委員会とワーキンググループ合同委員会では、ICDP に日本政府の参加を要請するための学術会議の対外報告を作成する方針が決定され、1995年10

月に日本学術会議から地質学研究連絡委員会名で対外報告「国際陸上科学掘削計画 (ICDP) への我が国の参加について」が出された。1996年2月に ICDP の掘削候補申請手続きが告示され、1996年2月には東京のドイツ大使館で中国が ICDP に正式に加盟した。日本は1997年の時点で加盟していない。

### 3. 開始された活動

ICDP は、加盟した国や団体の分担金によって基本的に運営されるが、運営主体であるドイツの GFZ にかかる人件費や経常経費については全額ドイツが負うことになっている。分担金は、G7 級の国が 80 万 \$、その他の先進国が 40 万 \$、途上国が 10-20 万 \$ であり、国際深海掘削計画 ODP に比較して小額であり、むしろ ICRD グループに類似している。

ICDP では陸上学術ボーリング計画立案を補佐するとともに、事前調査・掘削地点の選定・掘削技術・掘削組織の設立や運営について助言・援助を行う。既存技術による 2,000 m 程度の掘削費用は ICDP から賄われることがあるが、事前調査や技術開発を伴う掘削については独自の財源を準備しなければならない。

ICDP の組織としては、加盟国や団体の代表者によって構成される理事会 (Assembly of Governors)、計画を実施する計画委員会 (Planning Committee)、掘削技術の開発や助言を行う技術支援グループ (Operational Support Group)、計画の学術的検討を行う科学諮問委員会 (Scientific Advisory Group) などから構成される (第14図)。

1996年7月17-19日にはポツダムで ICDP 第1回科学諮問委員会が開催され、提案された候補地の審査が行われた。日本からは佐藤 正委員が参加している。1997年4月2-4日にポツダムで第2回委員会が開催され、世界の湖沼掘削・大別山 (Tabieshan) 超高压変成帯掘削・雲仙火山掘削の仮提案について掘削計画立案のためのワークショップを開催することが承認された。

1997年5月には、1990年から始まった噴火過程を掘削によって確かめようとする雲仙火山掘削計画を検討するワークショップが島原市で開催された。

### 坑壁崩壊防止掘削技術と変動帯掘削

「画期的な掘削技術なしに画期的な掘削計画を成功に導くことはできない」と言われるように技術的裏付けの無い掘削計画は目的を達成しないばかりか、その後の発展に貢献することも少ない。コラ半島の掘削で使用された坑底モーターは多くの掘削現場で使用されており、坑底モーターと掘削監視装置 MWD を組み合わせた KTB の垂直掘削装置 VDS は北海油田で石油掘削に使用されている。葛根田で地熱開発に初めて使用されたトップドライブを使用した高温掘削技術は多くの地熱開発で使用されている。深度と高温に対する挑戦は、地下深部に対する新たな挑戦の足がかりとなるとともに、新たな挑戦は新たな技術を生み出すこととなる。

これらの挑戦に厳然と立ちはだかり、コラ半島の 15 km、KTB の 12 km の目標深度を断念させたのが坑壁崩壊である。KTB の VDS は、MWD によって得られる掘進方向の垂直からのずれを坑壁に4枚の板を出して自動的に調整する装

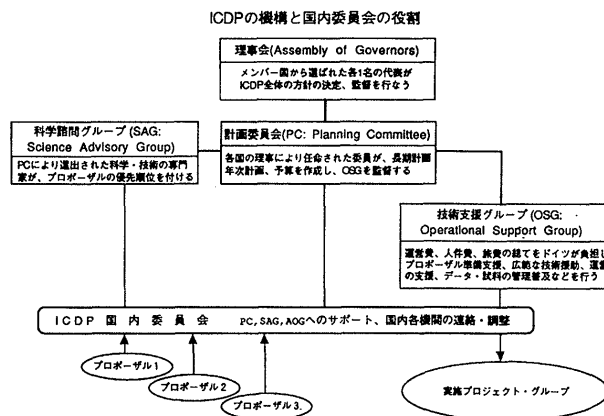
置であるが、坑壁が崩壊すれば調整板が坑壁に届かず使用できなくなる。コラ半島とKTBの到達深度の違いは、地殻に働く応力の差に起因する破滅的坑壁崩壊発生深度の差とも言える。変動帯に位置する日本列島の地殻には、両地域よりも遙かに強い地殻応力が働いており、これらの最新掘削技術を用いても数kmの深度で掘削を断念することとなろう。そこで21世紀の学術ボーリング計画に必要な不可欠なのは、地下深部で起こる坑壁崩壊を未然に防ぐ掘削法の開発である。

トンネル工事などの土木工事では、崩壊を起こす前にコンクリート等で覆うシールド工法が日常的に使用されており、類似の工法をボーリング技術に取り入れるのが現実的と考えられる。ボーリングでは坑壁崩壊防止のためには坑壁保護管ケーシングを設置するが、掘削後できる限り裸坑の状態に放置せずケーシングを施すことができれば、坑壁崩壊の直接原因である坑壁不安定を発生前に防止できる。KTBの経験でも、掘削後のビットの交換や検層の為に泥水循環を止めて裸坑状態で放置している間に坑壁崩壊が起きている。

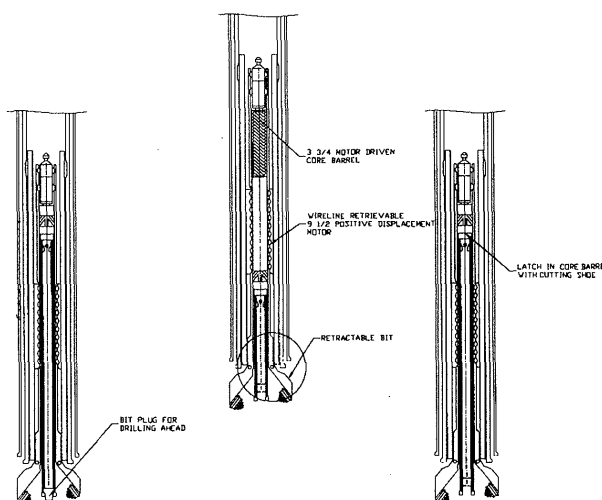
掘削直後に坑壁保護管を直ちに挿入する掘削方法の開発において解決しなければならない問題としてあげられるのは、1) 保護管を通して保護管の外径よりも大きな坑径の掘削を行えるビットが必要である、2) 裸坑で実施されてきた検層ができなくなる、などである。1) については、ロシア・日本をはじめ各国で坑底展開ビット (retractable bit) が開発され、日本でも古くは瀬戸大橋建設工事にも使用されていることから、地下深部でも確実に作動し寿命の長い坑底展開ビットを開発することによって対処可能である。2) については、現在でも掘削監視装置MWDによって掘削時の状態を地表で監視することが可能であり、計測種目を増やすことによって、掘削後に掘削管を引き上げてから実施していた検層を、掘削時に実施できる掘削時検層LWD (Logging While Drilling) の開発によって対処できよう。LWDの開発によって、掘削直後から成長する坑壁不安定を坑壁変形として計測できれば、地殻応力の状態とともに掘削岩石の力学的反応も掘削しながら知ることができ、地下における詳細な応力分布についての情報提供のみならず掘削機器の選定や掘削速度そして泥水の選択など掘削方法の対応にも威力を発揮するであろう。また、掘削時の振動を利用した反射法地震探査法の開発によって、これから掘削しようとする坑底以深からの反射面が捉えられており (Asanuma et al., 1996)、掘削前に坑壁崩壊の予測や対策を立てることも可能になっている。

地下では、地下増温率に従って温度が上昇するために高温対策が必要となり、KTBの掘削地点選定でも地下増温率の小さいOberpfalzが選定されている。しかし、泥水を循環させれば4,000mの深度でも200℃以下に保てるのが葛根田の500℃掘削によって実証され、泥水循環の保持の重要性が確認された。泥水循環を保持するには、地上から坑底に泥水を循環させる管を坑井内に設置する必要がある。そこで考案されたのが多重管掘削である (Rowley et al., 1996)。

陸上学術ボーリングでは、間接的に探査される地下の状態を直接知ることが基本目的であるので、原則としてオールコア掘削が必要である。地下深部からコア試料を地上に回収す

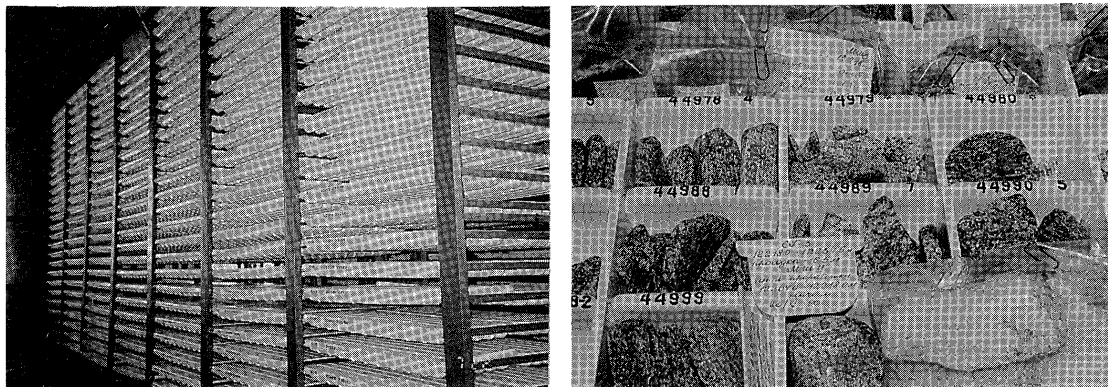


第14図 国際陸上科学掘削計画ICDPの組織と国内委員会の関係。



第15図 Haward・新妻による坑底展開ビットを使用する坑壁崩壊防止4重管掘削システム。最も内側の管がコア試料採取用であり、3 3/4インチの坑底駆動コアバレルが組み込まれている。最初に小口径のコアを採取した後、内側から2番目の管の9 1/2インチの坑底駆動モーターによって坑底展開ビットを回転させて、最も外側の坑壁保護管より大きな口径に拡張した後、坑壁保護管を降下させる。外側から2番目の管は泥水循環用。

るためには深海掘削計画で定期的にいわれている2重コアバレルを使用したワイヤーラインを用いる方法が最も信頼性が高い。坑壁崩壊を防止しながらコア試料を採取するという要求を同時に満たすには、コア試料採取のための掘削管を坑壁保護管・泥水循環保持管・坑底展開ビット掘削管の3重管の内側に挿入し、坑径よりも小口径のコア試料採取のための先行掘削を行なった後に、坑底展開ビットによって坑壁保護管の外径よりの大きな口径へ拡張するシステムがHaward・新妻によって考案された (新妻, 1996; 第15図)。このシステムでは、坑底展開ビットもコア試料掘削ビットも海洋掘削によって開発された坑底駆動モーター (Storms, 1990) で回転させることを想定しているが、近年開発の進んでいるパークッション掘削の適用も考えられる。



第 16 図 コラ半島の超深層掘削現場に保存されている掘削コア試料 (斎藤, 1996). コラ半島の超深層掘削コア試料ケースの保管棚 (左) と試料ケース内の深度 12218.0-12234.6 m の片麻岩試料 (右).

### 掘削試料の保存と資料の公開

学術ボーリングによって掘削直後に地上に引き上げられるコア試料は多大な情報を有しており、掘削深度や掘削状況などの情報とも併せて検討することにより地質学を含む地球科学の革新的な発展の礎となる。コア試料や掘削に関する資料が保存・公開されていれば、後に誰でも研究・再検討が可能である。

ロシアでは掘削現場にコア試料を保存するためのコアラボが設置されており、コラ半島を始めとする掘削現場では、保存されているコア試料についての国際共同研究を待っている (斎藤, 1996; 第 16 図)。ドイツの KTB においても掘削現場に建造された研究棟にコアラボがあり、コア・カッチングス試料が 8 種類の形で保存されている。米国では CSDP において掘削された試料はすべてコロラド州デンバーの地質調査所の Core Research Center に掘削資料とともに永久保存されており、コア試料について行われた観察・測定結果がデータベースに入れられている。カナダでは石油開発ボーリングのコアおよびカッチングス試料は提出が義務づけられており、カルガリーの Core Research Center に収納されて、一般に公開され、地下地質学の中心となっている (保柳, 1997, 1998)。

これらの経験から、学術ボーリングにおいては、少なくとも目標深度全体から採取されるコア試料・カッチングス試料を収納できる建物と、そのコア試料を研究するための研究・測定室を掘削現場に確保する必要がある。コア試料については、その時点でできる限りの記載・測定・研究を掘削直後に行う体制が必要である。また、これらの測定・研究に基づいてコア試料に重要度の判定がなされ、データベース化されれば、将来、多くのコア試料の中から研究対象となるコア試料を選択する際に参考となろう。これらの作業が終了した後に、共同研究体制の整った施設に永久保存し、広く公開することが基本となろう。

### 結 論

1) 20 世紀後半は、各国が地球内部を理解するために陸上

学術ボーリングを盛んに行い、地球内部についての理解が極めて不十分であることが判明した。各国はそれぞれ異なったテクトニクス場を占めており、地球を理解するためにはそれぞれ重要な意味を持っているので、世界的視野に立った陸上学術ボーリングを実施するために国際陸上科学掘削計画 ICDP が発足した。21 世紀には国際協力の基に、より良く地球を理解するための陸上学術ボーリング計画が推進されるであろう。日本の地質学界も積極的に取り組むことが期待される。

2) 20 世紀に行われた超深層学術ボーリング計画では、掘削計画立案時に地質学的検討よりも地震探査結果を重視したため、予測は外れ、地表地質から推定できる地質構造が確認された。この経験を生かし、21 世紀の陸上学術ボーリング計画を立案する場合には地表地質を十分考慮する必要がある。

3) 大陸地殻についての理解はこれらの陸上学術ボーリングによって余り進んだとは言いがたい。その理由として考えられるのは、大陸地殻形成に関して、海洋地殻の沈み込みに伴う付加や火成活動についての理解が不十分な現在、後の変成・変形を蒙った大陸地殻を掘削したからであろう。この理解を得るためには、海洋地殻が沈み込んでいる地域で学術ボーリングを実施する必要がある。日本列島は、世界で最も良く調査・検討されている沈み込み帯であるので最適である。

4) 20 世紀に国威を懸けて行われた陸上学術ボーリング計画では、掘削技術の飛躍的発展があり、その波及効果によって人類全体への貢献も大きかった。各国が分担金を拠出する ICDP において、超深層陸上学術ボーリングや飛躍的な掘削技術の開発を実施することは困難である。従って、21 世紀においても 20 世紀同様、各国がこのような計画を国家施策として実施する必要がある。

5) 現在の最進の掘削技術を使用しても、コラ半島の最深記録を更新するためには、テクトニクスが全く進行していない地点を捜し出す以外に方法はない。コラ半島や KTB では、テクトニクスに由来する地殻応力によって坑壁が崩壊し、掘削目標深度に到達できなかった経験から、坑壁崩壊防止掘削技術の開発が極めて重要である。テクトニクスの激しい日本



のような変動帯では、坑壁崩壊が浅所で起こるために、防止技術の開発に適合しているとともに、社会的要請も大きい。

6) 米国では、他の目的で掘削されるボーリングに相乗りして、学術ボーリング計画を推進しようと試みたが、既存の坑井を増し掘りする場合にはリスクが大きいため実現できなかった。この経験から、学術ボーリングであっても独立した掘削計画を念頭に置く必要があることが明らかになった。日本では石油・地熱・金属鉱床の開発のための探査ボーリングについては、学術的調査・計測などが実施されており、多くの成果を上げている。21世紀にも研究者は、これらの掘削計画に関心を持ち、積極的に参加して成果を上げることが期待される。また、日本の地熱開発に伴って高温掘削技術において飛躍的発展が成し遂げられており、産学官の垣根を取り払い、学術・技術開発に積極的に取り組むべきである。

7) 21世紀においても陸上学術ボーリング計画を実施するためには幾多の困難が予想されるが、これらの難点を克服し、地下の理解を得るために積極的に陸上学術ボーリングを推進すれば、地質学は魅力ある学問として発展し、21世紀の人類のために重要な役割を演ずることになるであろう。

## 文 献

- 赤工浩平・内田利弘・佐々木宗建・亀之園弘幸・土井宣夫・宮崎真一, 1997, NEDO「深部地熱資源調査」の概要. 地感合同大会予稿集, 252.
- 荒牧重雄, 1988, 伊豆大島火山, 荒牧重雄・新妻信明編「陸上学術ボーリング候補地集Ⅱ」, 11-18.
- 在田一則・日高衝突深部構造探査グループ, 1995, 日高バイプロサイス 94. 地感合同大会予稿集, 56.
- Arvanitides, N., Galanopoulos, V., Kalogeropoulos, S., Skamnelos, G., Papavassiliou, C., Paritsis, S. and Boström, K., 1988, Drilling at Santorini Volcano, Greece: A Joint Greek-Swedish Project to explore and ore-forming hydrothermal system. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **69**, 578.
- Asanuma, H., Park, J.N., Niitsuma, H. and Baria, R., 1996, Characterization of subsurface structure at Soultz-sous-forets (France) by triaxial drill-bit VSP. *Proc. Soc. Geophys. Exploration, Annual Meeting*, 202-205.
- 爆破地震動研究グループ, 1988, 棚倉破砕帯を横断する測線下の浅部地殻構造. 地震学会講演予稿集, 1, 91.
- 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, 63-81.
- 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**, 177-188.
- Bosum, W., Casten, U., Fieberg, F.C., Heyde, I. and Soffel, H.C., 1997, Three-dimensional interpretation of the KTB gravity and magnetic anomalies. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 18307-18321.
- Bouckaert, J., 1985, Deep Drilling Program in Belgium. In Raleigh, C.B. ed., *Observation of the Continental Crust through Drilling I*, Springer Verlag, New York, 28-38.
- 土井宣夫・池内 研・笠井加一郎・加藤 修・小松 亮・金藤太由樹・宮崎真一・赤工浩平・佐々木宗建・亀之園弘幸・内田利弘, 1997, 葛根田地域の熱源深成岩-活地熱系. 地感合同大会予稿集, 253.
- 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, 1-22.
- Ehara, S., Fujimitsu, Y., Mogi, T., Watanabe, K., Taguchi, S. and Sudo, Y., 1996, Proposal for scientific drilling on Kuju Volcano, central Kyushu, Japan. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 127-130.
- Eichelberger, J.C., 1987, CSDP at the crossroads. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **68**, 1130.
- Eichelberger, J.C., Vogel, T.A., Younker, L.W., Miller, C.D., Heiken, G.H. and Wholetz, K.H., 1988, Structure and stratigraphy beneath a young phreatic vent: South Inyo Crater, Long Valley Caldera, California. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 13208-13220.
- Eichelberger, J.C., Hildreth, W. and Papike, J.J.A., 1991, The Katmai Scientific Drilling Project, surface phase: Investigation of an exceptional igneous system. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1513-1516.
- Elder, W. A. and Sass, J. H., 1988, The Salton Sea Scientific Drilling Project. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 1293-12969.
- Emmermann, R. and Lauterjung, J., 1997, The German Continental Deep Drilling Program KTB: overview and major results. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 18179-18201.
- Furumoto, M., Kono, Y. and Miura, Y., 1996, Proposal for scientific drilling on the Takamatsu Crater. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 172-177.
- Giggenbach, W.F., Hedenquist, J.W., Houghton, B.F., Otway, P.M. and Allis, R.G., 1989, Research drilling into the volcanic hydrothermal system on White Island, New Zealand. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **70**, 98-109.
- Goff, F., Nielson, D.L., Gardner, J.N., Hulen, J.B., Lysne, P., Shevenell, L. and Rowley, J.C., 1987, Scientific drilling at Sulfur Springs, Valles Caldera, New Mexico: Core Hole VC2. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **68**, 649-662.
- Gold, T., 1979, Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing. *Jour. Petrol. Geol.*, **1**, 3-19.
- Harjes, H.-P., Bram, K., Dürbaum, H.-J., Gebrande, H., Hirschmann, G., Janik, M., Klöckner, M., Lüschen, E., Rabbel, W., Simon, M., Thomas, R., Tormann, J. and Wenzel, F., 1997, Origin and nature of crustal reflections: Results from integrated seismic measurements at the KTB superdeep drilling site. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 18267-18288.
- Hay, W.W., 1987 ed., *The scientific value of coring the proposed Southern Appalachian Research Drill Hole*. National Academy Press, Washington, DC, 45 p.
- Horie, S., 1987 ed., *History of Lake Biwa—its transition as discovered in an extremely long core of 1400 m obtained in Lake Biwa*. Inst. Paleolim. Paleoenviron. Kyoto Univ., 242 p.
- 保柳康一, 1997, アルバータ州 EUB コア研究センター紹介. 学術ボーリングニュースレター, no. 45, 20-23.
- 保柳康一, 1998, 地層からの空間-時間の復元をめざして堆積地質学の発展と未来. 地質学論集, no. 49, 49-56 (本論集).
- 池田隆司・塚原弘昭・小村健太郎, 1995, 震源域と活断層へのドリリング. 地質ニュース, no. 488, 37-42.
- 伊藤谷生・在田一則・井川 崇, 1998, 日高山脈に島弧の衝突をみる. 科学, **68**, 72-78.
- Iwasaki, T., Yoshii, T., Moriya, T., Kobayashi, A., Nishiwaki, N., Tsutsui, T., Iidata, T., Ikami, A. and Msuda, T., 1994, Precise P and S wave velocity structures in the Kitakami massif, Northern Honshu, Japan, from a seismic refraction experiment. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 22187-22204.
- Juhlin, C., 1990, Interpretation of reflections in the Siljan Ring area based on results from the Gravberg-1 borehole. *Tectonophysics*, **173**, 345-360.
- Juhlin, C., Aldahan, A. A., Castaño, J., Collini, B., Gorody and Sandstedt, H., 1991, *Scientific summary report of the Deep Gas Drilling Project in the Siljan Ring Impact Structure*. Vattenfall Research and Development, Stockholm, 257 p.
- 加納 隆, 1989, 飛騨帯の深部断面と神岡鉱床下部の花崗岩類の分布と構造. 学術ボーリングニュースレター, no. 23, 6-7.
- 関東平野中央部地質研究会, 1994, 関東平野中央部の地下地質—ボーリングコアによる解析—. 地団研専報, no. 42, 180p.

- 唐沢広和, 1986, ロスアラモス HDR プロジェクトの EE-3A 坑井の掘削. 探鉱と保安, **32**, 449-461.
- 加藤 修・土井宣夫・村松容一, 1993, 岩手県葛根田地熱地域における新期花崗岩類と地熱貯留層. 地熱学会誌, **15**, 41-57.
- Kent, D.V., Olsen, P.E. and Witte, W.K., 1995, Late Triassic-earliest Jurassic geomagnetic polarity sequence and paleolatitudes from drill cores in the Newark rift basin, eastern North America. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 14965-14988.
- 木下 肇, 1986 訳, 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 Publication*, no. 8, 90 p.
- 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.
- 小松正幸, 1996, 島弧火成岩帯の深部地殻 I : 領家変成岩. 地惑合同大会予稿集, 107.
- Komatsu, M., Toyoshima, T., Shimura, T., Osanai, Y. and Owada, M., 1996, Deep crustal structure of the Tertiary magmatic arc exposed in the Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, Japan. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 131-136.
- 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.
- 越谷 信・大上和良・菊地 康・平山拓哉・早坂祐里・宇沢政晃・本間健一郎・土井宣夫, 1993, 滝の土地熱地帯に発達する断裂系. 地熱学会誌, **15**, 109-139.
- Козловский, Е. А., 1984 ed., Кольская Сверхглубокая. Недр, Москва, 490p.
- Kozlovsky, Ye. A., 1987 ed., *The superdeep well of the Kola Peninsula (English translation)*. Springer-Verlag, Berlin, 558 p.
- Larue, D.K., 1991, The Toa Baja Drilling Project, Puerto Rico : scientific drilling into a non-volcanic Island arc massif. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 489-492.
- Maekawa, H., Wang, C.H., Nakamura, M., Takasu, A., Mizoue, M. and Wakita, H., 1996, Drilling into the earthquake focal area at the northwestern part of the Kii Peninsula, Japan. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 143-148.
- Malpas, J., Moores, E.M., Panayiotou, A. and Xenophontos, C., 1990 eds., *Ophiolites oceanic crustal analogues*. Geol. Survey Dept., Cyprus, 733 p.
- 箕浦幸治, 1988, 北部北上山地—ジュラ紀付加体の下部地殻の掘削—. 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.
- Miura, Y., and Okamoto, M., 1996, Material evidences of impact craters. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 166-171.
- 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.
- 新妻信明, 1988, ソ連深層ボーリングセミナー参加日誌. 学術ボーリングニュースレター, no. 21, 3-10.
- 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—. 地質雑報, **95**, 603-614.
- Niituma, N., 1996, Continental scientific drilling through delaminated lower crust in Tanzawa, central Japan. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 115-120.
- 新妻信明, 1997, 米国における学術ボーリングおよび掘削技術について. 学術ボーリングニュースレター, no. 45, 6-10.
- 新妻信明・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. 科学研究費「学術ボーリング計画の研究」, 静岡, 670 p.
- OECD, 1993, *Megascience : the OECD Forum Deep Drilling*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 97 p.
- Raleigh, C.B., 1985 ed., *Observation of the Continental Crust through Drilling I*, Springer Verlag, New York, 364 p.
- Ringhofer, von W., 1986, Geologische Auswertung von Bohrparametern beim übertiefen Aufschluss im Wiener Becken. *Geologie*, **102**, 116-122.
- Roddy, A.M., Shoemaker, E.M. and Anderson, R.R., 1994, The Mason Impact Structure Research Program : a summary of results. *Geol. Soc. Amer. 1994 Annual Meeting Abs.*, 337.
- Rowley, J., Saito, S., Long, R. and Ito, T., 1996, Ultra-deep core-drilling strategy and system concepts. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 316-321.
- 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—日本海拡大時の海洋底玄武岩の掘削—. 荒牧重雄・新妻信明編「陸上学術ボーリング候補地集 I」, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 33-50.
- 斎藤実篤, 1995, 南房総地域における沈み込み現象—JUDGE 計画の地質学的側面—. 地質ニュース, no. 488, 24-27.
- Saito, S., Urabe, T. and Ito, H., 1996, JUDGE Project—observation of the subducting Philippine Sea Plate through scientific drilling. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 149-150.
- 斎藤清次, 1993, 我が国における地熱掘削の動向. 日本地熱学会編「21世紀のエネルギー地熱」, 日本地熱学会, 104-110.
- 斎藤清次, 1996, コラ半島の超深層掘削試料の利用について. 学術ボーリングニュースレター, no. 44, 16-17.
- Saito, S., Sakuma, S. and Uchida, T., 1996, The experience of drilling into 500°C formation in NEDO WD-1A well, Kakkonda, Japan. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 52-57.
- Sass, J.H., Jacobson, R. and Sorey, M.L., 1991, Implications of thermal observations in the Long Valley Exploratory Well. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **72**, 504.
- 石油技術協会, 1990, 超深層陸上学術ボーリングへのアプローチ. 石油技術協会技術資料, no. 14, 76 p.
- Shoemaker, E.M., 1975 ed., *Continental Drilling*. Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 56 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.
- Storms, M.A., 1990, Ocean Drilling Program (ODP) deep sea coring techniques. *Marine Geophys. Res.*, **12**, 109-130.
- Suk, M. and Durica, D., 1991, *Deep drilling in Bohemia and Moravia and its geological implications*. Gabriel Publishing House, Praha, 171 p.
- 高橋正樹, 1988, 九州東部大崩山花崗岩体—固結したカルデラ下マagma溜りとバソリス底部の掘削—. 荒牧重雄・新妻信明編「陸上学術ボーリング候補地集 I」, 陸上学術ボーリングワーキンググループ, 51-79.
- 高須 晃・坂野昇平, 1996, 典型的高圧型変成帯としての三波川帯と陸上学術ボーリング. 地惑合同大会予稿集, 103.
- 丹治耕吉, 1974, 北海道幌満における 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.
- 天然ガス鉱業会・陸棚石油開発協会, 1992, 日本の石油・天然ガス資源. 520 p.
- 東京都土木技術研究所, 1996, 東京都 (区部) 大深度地下地盤図—東京都地質図集 6—, 66 p, 9 plates, 491 columns.
- 塚原弘昭, 1994, ロシア学術ボーリングの現状. 学術ボーリングニュースレター, no. 39, 22-24.
- Tsukahara, H., Ikeda, R. and Omura, K., 1996, Drilling into a shallow earthquake swarm area—stress distribution, fracture zones and logging data—. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 189-193.
- Umino, S., 1996, Proposal for scientific drilling on the Bonin Islands. *Proc. 8th Intern. Symp. "the Observation of the Continental Crust through Drilling"*, 121-126.
- 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.

- U.S. Geodynamics Committee, 1979, *Continental Scientific Drilling Program*. National Academy of Sciences, Washington, D.C., 192 p.
- 山北 聡・伊藤谷生・田中秀実・渡辺弘樹, 1995, 古期中央構造線としての佐志生断層の前期漸新世における top-to-the-west 斜め衝上運動. *地質雑*, **101**, 978-988.
- Yoshida, Y., 1991, Geochemistry of the Nigorikawa geothermal system, southwest Hokkaido, Japan. *Geochem. Jour.*, **25**, 203-222.
- 吉川宗治・岩崎好規・井川 猛・横田 裕, 1992, 反射法地震探査による和歌山県西部の中央構造線の地質構造. *地質学論集*, no. 40, 177-186.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・中川一郎・小林芳正・久保寺章・須藤靖明・井川 猛・浅田正陽, 1992, 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造. *地震*, **45**, 199-212.
- Zoback, M. D., Elders, W. A., van Schmus, W. R., and Youker, L., 1990, *The role of continental scientific drillings in modern earth sciences, scientific rationale and plan for the 1990's*. Stanford Univ., Stanford, 151 p.
- Zoback, M. D. and Lachenbruch, A. H., 1992, Introduction to special section on the Cajon Pass Scientific Drilling Project. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 4991-4994.
- Zoback, M. D. and Emmermann, R., 1994 eds., *Scientific rationale for establishment of an International Program of Continental Scientific Drilling*. Geo Forschungs Zentrum, Potsdam, 194 p.
- Zoback, M. D. and Hickman, S. H., 1996, San Andreas Fault Zone Drilling Project : Scientific rationale and proposal for a pilot project at Parkfield, Ca. *Proposal for NSF, UGS, DOE and ICDP*, 86 p.

## (要 旨)

新妻信明, 1998, 脱皮する陸上学術ボーリング計画と 21 世紀の地質学. *地質学論集*, 第 49 号, 199-225. (Niitsuma, N., 1998, Renewed continental scientific drilling project and geology in the 21st century. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 49, 199-225.)

20 世紀後半は、地球内部を理解するために世界各国において陸上学術ボーリングが盛んに行われたが、地球内部についての理解が極めて不十分であることが判明し、国際協力の基に陸上学術ボーリングを実施するために国際陸上科学掘削計画 ICDP が発足した。21 世紀の掘削計画においては、地表地質を十分考慮することと、坑壁崩壊防止のための技術開発が必要である。海洋地殻の沈み込みに伴う付加作用と火成活動は、大陸地殻形成の本質を担っているため、日本列島において積極的に陸上学術ボーリングを推進すれば、地質学は魅力ある学問として発展し、21 世紀の人類のために重要な役割を演ずることになるであろう。