

プレート沈み込み帯への掘削計画JUDGE

(4) JUDGE計画のプログラム

宮崎 光旗* 横倉 隆伸* 浦辺 徹郎**

MIYAZAKI Teruki, YOKOKURA Takanobu and URABE Tetsuro (1997): JUDGE Project: A Continental Scientific Drilling into Subduction Zone, (4) Program Plan of the JUDGE Project. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48 (3/4), p. 160-172, 4figs.

Abstract: Execution plan of the JUDGE project is discussed and presented. Several steps are necessary before we start drilling of the main hole of the JUDGE project; that is, (1) site survey, (2) technology development, (3) drilling and down-hole monitoring of pilot holes, and (4) establishment of an archive for data and sample distribution. It is concluded that the organizational structure and decision-making process should be kept as flexible as possible until the completion of the pilot holes. This is because repeated evaluation and assessment of the results obtained through steps (1) to (3) should be reflected for the final site selection and technology development. Therefore, the program plan stated in this Chapter should be regarded as a possible design at the present level of knowledge.

4.1 はじめに

従来の地下資源探査などを目的とするボーリングをミッション指向掘削 (Mission-orientated Drilling) とすると, ドイツの大陸超深度掘削 (KTB) 計画やJUDGE計画は科学掘削 (Scientific Drilling) であるといえる。計画の目的には社会的なものも含まれるが, 目的を達成するための手段がこれまでの掘削とは大きく異なっているからである。その意味で科学掘削にはこれまでのミッション指向掘削とは根本的に異なった, 新しい地球科学技術体系の確立が必要となっている。

例をあげよう。超深度掘削を困難にする最大の要因である坑壁の崩壊を防止するという技術的観点からは, 掘削をなるべく短期間に行ない, 直ちにケーシングをすることが望ましい。そこでミッション指向掘削では掘削期間中に必要最小限の坑内計測が行なわれるのが普通である。しかし, 科学掘削では坑井から学際的かつ多量のデータと情報を得ることが主目的であり, コア・流体の採取, 坑内測定・観測などの科学目的の作業が主体となる。幾つかの測定項目ではケーシングを行わないで裸坑のまま坑井を長期間維持することすら必要となる。この本質的な矛盾を解決するため, 科学掘削では新しい発想と技術開発が不可欠なのである。

JUDGE計画では, 本掘削とそれに引き続く観測・実験に至るまでに, 幾つかのステップが必要となる。それは大きく, (1)事前調査, (2)技術開発, (3)パイロットホールの掘削とそれを用いた観測・実験, (4)得られる資試料のデータベース化と普及, に分けられよう。これらと同時に, 国内

外から広く英知を結集してプロジェクト遂行体制を整備し, 事業実施体制, 研究実施体制, ならびに評価推進体制を確立する必要がある。事前調査の結果, 当初予想もしなかった新たな疑問・知見・意味付けなどが得られる可能性がある。そのような場合に備え, 事前調査と先行パイロットホールが終了するまではJUDGEの掘削目的や計画の固定化は行わない方がよい。調査の結果を踏まえて掘削目的や技術開発の見直し・再設定・追加が可能となる, 柔軟な体制・組織を整えるべきであろう。事前調査と先行パイロットホールにより本掘削の最終デザインが描かれると, 現地のロジスティクスを検討したうえで, 用地の確定などを行うことになる。これらの段階は組織として責任体制を明らかにしたうえで行うことが望ましい。このようにJUDGE計画では, 確固とした全体計画が一朝一夕に出来上がり, その実施が決定されるということには有りえない。まずはプロジェクトの体制を整え, 計画を適切な規模とテーマに分割し, 合理的手順に従って各テーマを適切なタイミングで開始し, 計画途中での評価とそれに基づく柔軟な計画の修正を経つつ, 一步一步前進していくことが望ましい。本章ではJUDGE計画における観測・実験と掘削の問題点を概観し, それへ至る第一歩となる事前調査とパイロットホールを検討する。しかし本章で述べることは, 現時点でのJUDGE計画に対する可能なデッサンの一つであり, 決して確定したものではないことを強調しておく。

4.2 JUDGE計画における観測・実験と坑井掘削

地球科学にブレイクスルーをもたらす観測・実験

*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

**首席研究官 (Chief Senior Researcher, GSJ)

Keyword: JUDGE Project, site survey, geophysical exploration, pilot hole, KTB Project

(4) JUDGE計画のプログラム (宮崎 ほか)

JUDGE計画は、石油、ガス、地熱等の資源採取のための掘削と異なり、コア・流体の採取、坑井を利用した各種計測・実験、坑井の観測施設としての利用が本質的に重要である。特にデコルマ面深度での各種観測・モニタリングはJUDGE計画の最も重要な柱である。地球内部での活動をモニタリングすることによって、将来の活動予測も可能となる。地球内部の動きは変化が非常に緩やかで、非常に微量にしか変化しないので、これまで観測困難なものが多かった。しかし地球内部の動きを時間経過とともに、どの様に変化していくのかを観測することはこれからの地球科学にとって重要な課題である。例えば本特集号(3)で述べたような地震予知という問題に対して、海洋プレートの沈み込みと上盤側の地殻内応力の時間変化、あるいはデコルマ面における水の挙動は非常に重要なデータを与えると考えられるが、現在の所全く観測されていない。そういった深度方向の観測およびリアルタイムのモニタリングがJUDGE計画で達成されることが望ましい。

地殻内の流体の時間変化は、これまでに3次元マルチチャンネル音波探査を繰り返し行うことによって観測された例がある。それはルイジアナ沖のEugene島における炭化水素の回収による貯留層内の流体の移動を、3次元音波探査を1985年、1988年、1992年の3回行うことによって明らかにしたものである。貯留層が高振幅異常として音波探査記録に現れ、それを時間を追ってトレースしていくと、これまでに坑井から汲み上げた炭化水素の量に比例して貯留層が縮小していく様子が明らかにされた。この例は人工的な地殻内からの流体の汲み上げによる変化であって、恐らく自然界、例えばデコルマ面における流体の移動よりその変動量ははるかに大きいであろう。しかし地殻変動に伴う流体の移動は観測精度を上げれば可能となるかもしれない。観測精度を上げるには観測する対象その物に近づくことが重要であり、直接観測できればこの上ないデータを得ることができる。この意味でもJUDGE坑井を使ったモニタリングは達成すべき課題である。また沈み込み帯が3次元的に不均質であることは、例えばバルバドス島沖での3次元音波探査の例(Shibley *et al.*, 1994)からも明らかである。したがって平面的な観測の展開も重要である。また(3)で述べたような広域応力場源を特定するためにも3箇所以上の観測点での観測が必要である。超深部観測井を平面的に何箇所にも配置してモニタリングする事は現実的ではないと思われるが、それに近い形態を計画することが重要と思われる。つまりパイロット坑を本坑とあわせて平面的な観測が行えるように配置し、最終的には4次元的な観測を行うことが今後の地球科学にブレイクスルーをもたらすと考えられる。

最終的な目的はデコルマ面深度での各種観測、モニタリングであるが、技術的な制約からデコルマ面での直接観測が不可能なことも十分予想される。このために地上あるいは比較的浅い複数の坑井による「リモート」な観測により、デコルマ面の広がり・物性等を推定することも

JUDGE計画推進に当たって重要な鍵となろう。なぜなら、たとえ直接デコルマ面に到達しない坑井においても、よりターゲットに近い坑井利用の観測を行うことにより、地上での観測に比べて格段に精度が向上し、情報量が増えるからである。

以上を簡単にまとめると次のようになろう。

- ・超深度観測井によるデコルマ面深度での観測・実験
- ・超深度観測井によるデコルマ面深度までの観測・実験
- ・超深度観測井と近傍パイロット井による相互作用の観測・実験
- ・坑井ネットワークによる観測・実験

我々は、事前調査と先行パイロットホールから得られる上記のような様々な知見を有機的に組み立ててJUDGE計画を推進していく必要がある。

掘削上の問題点と技術開発

(3)で述べた科学的目的とそれを達成するための観測・実験のために、JUDGE計画では陸上からデコルマ面に至る10kmの超深部掘削を行おうとしている。ここではJUDGE本坑となる超深部観測井についていくつかの点を検討する。

まず掘削上の問題点、あるいは開発項目として、

1. 掘削装置、坑井内で使用する掘削用ツールの改良と開発の必要性
 - ・吊り下げ荷重の大きな陸上掘削機(リグ)の開発
 - ・垂直掘削システム(VSD)の開発
 - ・ダウンホールモーター(PDM)の開発
 - ・掘削監視装置(MWD)や掘削時検層装置(LWD)の開発
 - ・抑留等の障害対策ツールの開発
2. 地層温度上昇への対応
 - ・ゴム製品やエレクトロニクスの耐熱性の向上
 - ・上記機器の耐熱性の向上
 - ・ボーリング泥水の開発
3. 坑壁不安定性への対応
 - ・ケーシングプログラム
 - ・泥水管理

といった点があげられる(齊藤, 1994; Yoshida, 1996; 地質調査所, 1996; 本報告(7))。地下深部では、差応力によりブレイクアウトが発生する(例えばMoos and Zoback, 1990)。ブレイクアウトとは坑壁周辺の応力集中により坑壁で破壊が発生し、坑壁が不安定になる現象であり、深部では本質的に発生することが避けられない。このため坑井掘削ではケーシングプログラム、泥水の管理に十分留意すべきである。温度についてはYoshida (1996)がコラ、KTB、新潟の深度-温度を比較し、日本での地下温度の高さを改めて指摘した。具体的な掘削場所での正確な温度推定は極めて困難であり、このこと

がJUDGE計画の立案に当たっての大きな不確定要素となっている。現状での掘削に必要な、ビット・泥水・セメンティング等の耐温性の実績・開発状況を考慮すると、泥水循環により坑井は冷却されることを考慮しても、今後耐温性について開発すべき課題は多いであろう。これら困難に加えてさらにJUDGE計画では岩石・水・ガス試料の採取、坑井を利用した各種計測・観測を行う必要があり、一層計画を困難にする。

観測・計測上の問題点と技術開発

次いで掘削中、あるいは掘削後の観測・計測について考える。これらを大別すると、

- ・岩石や流体の採取
- ・計測
 1. 掘削に際して必要な計測 (MWD等)
 2. 検層 (LWDを含む)
 3. 坑井内測定・実験
 - 間隙水圧, 地殻応力, VSP (Vertical Seismic Profiling), 注水試験等
 4. 坑井を利用した長期観測
 - 地震, 歪み・応力, 間隙水圧, 温度・圧力

となろう。掘削に際して必要な計測として掘削監視装置 (MWD: Measurement While Drilling) 技術がある。MWDとは、掘削中に坑井の方位・傾斜、地層評価、掘削パラメータに関する坑底データを計測し、リアルタイムで地上へデータを伝送する技術である。MWD技術は、掘削作業時間の短縮による掘削コストの低減及び掘削作業の安全性の向上の点で超深層掘削には不可欠の技術である。掘削時検層装置 (LWD: Logging While Drilling) はドリルパイプに検層機器を組み込み、掘削中に検層を行うものである。計測項目が少ないことや分解能が低いなどの短所があるが、坑壁不安定の危険を低減する、より低温での計測が可能などの長所があり、深部井掘削時には可能な限り採用すべきである。

JUDGEにおける坑井内測定については、高温、高圧、ケーブル長と張力、泥水の影響、坑壁の不安定、測定に長時間必要等があるが、ここで特に問題となるのは耐温性と、多種目の計測・観測を掘削経過のなかでどう位置づけて実行するかである。

坑井を利用した長期観測としては、地震、歪み・応力、間隙水圧、温度・圧力等多種観測をデコルマ面を含む多深度レベルで行いたい。測定時期としては掘削中適宜、掘削後連続的あるいは繰り返し観測を行う必要がある。このための問題点としては、信号伝送、計測種目による競合等が考えられ、耐温性の問題とともに、具体的な掘削計画に即して問題点を抽出してゆく必要がある。KTBでは掘削終了後深部地殻観測施設としての利用が計画されている。またコラでも同様な計画があり、JUDGE計画においても、深部地殻観測施設としての坑井利用を念頭に置いた掘削計画と技術開発を積極的に押し進めていかなければならない。

4.3 掘削地と事前調査

掘削地について

前章までの記述で、沈み込み帯を貫く掘削とそれを利用する地球科学の各種観測・実験が地球規模での重要性を持っていることが明かになった。日本列島は太平洋プレートとフィリピン海プレートという2つの海洋プレートによって沈み込みを受けているので、その意味では日本中どこでも掘削候補地点となる。さらに、環太平洋地域のほとんどの場所がプレート掘削の要件を満たすであろう。それでは、南関東地域を掘削地とする必然性はどこにあるのであろうか？

浅い沈み込み帯

問題は沈み込み帯の深度にある。第4-2図にあるようにJUDGE計画のターゲットになっている房総半島・三浦半島・静岡市周辺の地点では、陸上に掘削地点を置く場合、沈み込むプレートの上面の深度が10km程度に存在する。一方、南海トラフ沿いの海岸ではこの深度が15-20kmとなる。東北日本の太平洋沿岸では平均60km程度である。このことより、現在の深部掘削技術レベルで可能であるのは、房総半島・三浦半島・静岡市周辺の地点のみということになる。15kmとなると技術的困難性は急速に増大し、20km以上となると現状の技術では不可能と思われる。

世界的に見るとチリ南端部のTaitao半島でも地表から10kmの深度に沈み込み帯が存在する可能性がある。ここには南米、ナスカ、南極の3枚のプレート間の3重点があり、そのために沈み込み帯が例外的に浅くなっているらしい。しかし、付近に地震計の観測網はなく、プレートの深度を推定したデータの精度は高くない。また現地はインフラが未整備であることが、掘削するに当たって問題となろう。一方、関東地方南部にはプレート間地震の“予知”のために設置された密な地震観測網があり、世界で最も詳細に沈み込み帯の形状と深度が決定されている。また地表地質調査が進んでいるのもこの地域の利点である。この意味から、日本には事実上世界唯一といえるプレート掘削が可能な地点が存在すると結論できるであろう。ここでの浅い沈み込みは太平洋、フィリピン海および陸側の北米の3枚のプレート間の、三本の海溝により区切られる三重点が存在することに関連している (斎藤, 1995)。

掘削地点の絞り込み

JUDGE計画では上記の3カ所のうちから、1カ所を選んで掘削をすることを計画している。そのために事前調査が必要となる。事前調査は文献調査と現地調査に分けられる。後者の目的は地下の情報をあらかじめ知っておくことにより、科学的成果が最も上がる地点が選定できるという所にある。また、掘削により得られるたった1点のデータを面的に展開することができるというメリットもある。今回JUDGEプロジェクト推進チーム内で討論を

行った限りでは、房総半島が最も適当ではないかという仮の結論が得られている。その理由を表4-2-1にあげた。よってこの特集号では3つの候補地点の内、煩雑を避けるために1ヶ所のみを例に挙げる必要があるときには房総半島を挙げている。ただし最終的には事前実地調査の結果を下に決める必要があることは、強調してしすぎることはない。

4.4. 海外における事前調査

南関東における掘削のための事前調査を考える上で、既に掘削の行われた旧ソ連とドイツの例を振り返ってみることは重要である。そこで以下に、事前調査がどのように行われたのか、それによりどのような予測がなされたのか、掘削結果との整合性はどうかであったのかを概観する。ただし本節では、現在最も高分解能の結果を与えることのできる地震探査を中心としてみていく。

コラ半島

旧ソ連がコラ半島を掘削地点として選定した大きな理由のひとつは、その下部地殻が他に比べて浅所まで上昇しており、いわゆる「玄武岩層：シマ」と呼ばれる下部地殻を容易に掘り抜くことができると考えられたからである。この掘削では「玄武岩層」の正体を見極めることが目的のひとつとされた。「玄武岩層」が浅いという根拠は、DSS (deep seismic sounding) と呼ばれる大規模な、しかし古典的な屈折法に依存している。1960-1963年当時得られていたDSSの結果によれば、コラ半島の地下は浅部が40-60° という急傾斜をしていることを除き、ほぼ水平成層のいくつかの層からなり、弾性波速度は深度5-10kmで6.0-6.7km/s、深度20-30kmで7.2-7.5km/sであった。他に比べるとこれらの速度はやや高く、岩石がより塩基性であると考えられていた。そして深度約7kmの速度6.5-6.6km/s層の上面が上部地殻と下部地殻を分けるコンラッド面と解釈されていた (Pavlenkova, 1992)。掘削サイトが決定されてからさらに詳しい地震探査が行われた。広角反射法と呼ばれる探査がそれである。これも現在の反射法探査とは質的に異なるものである。しかしDSSの結果と調和的に、いくつかの明瞭な反射面が同定できた。すなわち、浅部には地表地質と一致する急傾斜の反射面が認められる (例えば深度4.5kmのもの) 一方、7-10kmの深度にはほぼ水平な反射面群が認められた。

この広角反射法がコラ半島サイトにおける唯一の事前調査と言えるかも知れない。すなわちソ連ではごく少ない情報に基づいて、掘削を開始してしまったといえる。掘削結果は周知のとおり、予想と大きく食い違った。0-4500mは原生代の火成岩、4500-6840mは空隙率・透水性の大きい原生代の安山岩質玄武岩、6840m以下が始生代の岩石である (Kozlovsky, 1984)。重要なことはこれら岩石は化学的にはほとんど変化のないものであったということである。すなわち深度12kmまで掘り進んでも一向にいわゆる「玄武岩層」には達しなかったのである。このことから、これら古典的な地震探査の結果そのものを疑

うという立場もあり得るかもしれない。しかし最近行われた現代的な反射法によっても、上記と同様な反射面が得られている (Smythe *et al.*, 1994)。問題は、探査そのもの (例えば古典的であっても) にあるのではなく、得られた速度なり反射面なりをどう解釈するかという点にある。つまり当時の知識で、速度の違いなり反射面の存在なりを、ものの違いすなわち岩石組成の違いを示す指標とのみ考えていたことが問題なのである。この点については後で述べる。掘削の結果と地震探査の結果を総合して現在では、コラ半島周辺のコンラッド面は深度25km付近であると予想されている。

オーバーファルツ

旧ソ連とは異なり、ドイツは考え得るすべての事前調査を徹底して行った。多くの研究プログラムとも密接に連携している。その中で最も重要なものは、反射法地震探査による大陸地殻探査計画であるDEKORPである。掘削候補地点はサクソチューリングゲン帯 (ST) とモルダニューブ帯 (MD) の境界付近に想定されていた。DEKORPにより、掘削候補地点を通りこの大構造にほぼ直交する方向に、約200kmものパイプロサイズによる反射法測線が設定された。またKTBも独自に1測線当り40-60kmの測線を、掘削地点周辺で格子状に6測線設定した。すべてをあわせると測線長は500km以上にもおよぶ (DEKORP Research Group, 1988)。これらの他にDEKORP測線上でダイナマイトを使用した広角反射法と展開拡大式探査 (Expanding Spread Profiling: ESP) 実験も行い、精度の良い速度構造情報を得ている。

この他掘削地点周辺の20km×20kmの範囲において、3次元の反射法探査が実施された (Stiller, 1991)。共通反射点になるべく均一になるように周到に計画された探査であった。また3次元のESP実験も行われ、周辺岩体に傾斜や異方性が存在する場合にも対処できるような探査法・処理法が開発された (Wiederhold, 1991)。このほかパイロットホールを使用した様々な地震探査実験が行われた。また重力探査、MT法探査なども精力的に行われた (Behr and Emmermann, 1987)。

これらの地震探査を中心とした諸探査の結果、細かい解釈の相違はあるものの、基本的にはMDがSTにのしあがるスラスト構造を呈すること、このスラストがモホにまでおよぶ大規模なものであること、掘削地点直下の浅部は比較的単調であるが4秒付近 (約10km) 以下に多くの反射面群が存在すること、など重要な結果が得られた (DEKORP Research Group, 1988; Reston and Meissner, 1989; Vollbrecht *et al.*, 1989; Meissner and Tanner, 1990)。これらの結果から、この4秒付近の反射がどのようなものであるかを調べることも目的のひとつとなった。ただし掘削深度が予定より浅くなったため、結果的にこの反射面を調べることは出来なかった。また比較的単調と思われていた浅部が実はかなり複雑で、急傾斜をなしている上に複雑に褶曲し、なおかつ断層で何度も切られているということが分った。その結果パイロ

ットホールにおいては同一の地層を何度も掘り抜くという結果となった (Emmermann *et al.*, 1991)。一方本掘削においては、6800-7000mで大破砕帯に達した。これは大規模3次元探査の結果とよく調和し、急傾斜で地表の Franconian lineまで達していることが確かめられた (Emmermann, 1993)。

海外の例からの教訓

1970年代なかばから開始されたCOCORPなどの、地殻深部を対象とした現代的な反射法探査により、地殻中部から下部にはほぼ水平な反射面が見つけられている。その反射面の原因として様々なことが提唱されている。例えば古い堆積構造の名残、マントルからの水平貫入岩、地殻の伸張による組織構造 (例えばBrown *et al.*, 1986) などである。また最近では鉱物の加水/脱水反応にともなう水の存在形態・存在度の違いや脆性/延性の境界なども原因として挙げられている (Jones, 1987; Hyndman and Shearer, 1989; Lewis *et al.*, 1992)。つまり物の違い (petrological or chemical) だけでなく、断層やshear構造などの造構造運動の結果 (tectonic)、温度・圧力・孔隙率・加水/脱水・脆性/延性といった物の存在状態の違い (physical) など原因となり得るのである。

コラ半島では回収率40%とはいえ、大量のコアが得られている。これらコアの詳細な岩石学的な研究や岩石物性測定によって、上記の反射面や速度のコントラストは、脱水反応による水の存在や温度・圧力などの物理的状態の違いとして理解できるようになってきた (Kremenetsky, 1990; Pavlenkova, 1992)。例えばコラ半島の深度4.5kmの反射面は脱水反応による水の存在で説明できることが確かめられた。またオーバーファルツの深度3.4 kmの反射面も水が関与しているという (Emmermann *et al.*, 1991)。

逆に言えば、事前調査で詳細な構造が得られていれば、掘削地点でのコアから得た物理的・化学的・造構造的情報を面的にひろげることが出来るということである。またこれら反射面の構造・形態等の知識をもとにすれば、掘削によって達し得ないさらに深部についての予測もその確度を大きく向上させることが出来る。したがって反射面の性質の同定という立場からは坑内諸測定ばかりでなく、得られたコアについて実地に密度、弾性波速度、孔隙率、透水率、異方性などの物性の測定や、水の存在形態を知る上での岩石の変成相の精査などが是非必要である。この意味で事前調査はなくてはならないものであるし、可能なかぎりのコアの回収をはかることが重要である。少なくとも反射面の存在する区間はすべてコアリングするべきであろう。

反射法は現在もっとも分解能良く構造を探索できる手法である。もともと堆積盆での石油探査を目的として技術開発されてきた経緯があることから、どちらかといえば水平に近い構造に対し敏感である。コラ半島やオーバーファルツでの掘削が示しているような、急傾斜の構造を検出するのは、大規模3次元探査のような特別な場合

を除けば、まだまだ困難をとまなう。そのための技術開発はどうしても必要になるだろう。JUDGE計画が想定している付加体掘削では、かなりの急傾斜・複雑さが予想されるからである。KTBでは2次元の反射法データを再解析することによって、Franconian lineの急傾斜のイメージングできたという (新妻, 1996)。その詳細はまだよく分らないが、急傾斜のイメージング技術が確立されれば、その事前調査における意義は計り知れないものがある。

4.5 南関東における既存調査の現状

JUDGE計画で掘削を目指す南関東では、地球物理的調査・研究は数多く行われている。しかし掘削地点の選定という観点からは、先に述べたコラ半島の掘削以前の状態とほとんど変わらないと言えるだろう。以下では比較的調査の多い房総周辺を例として考えてみる。三浦半島、静岡周辺では房総に比べてさらに調査は少ない。

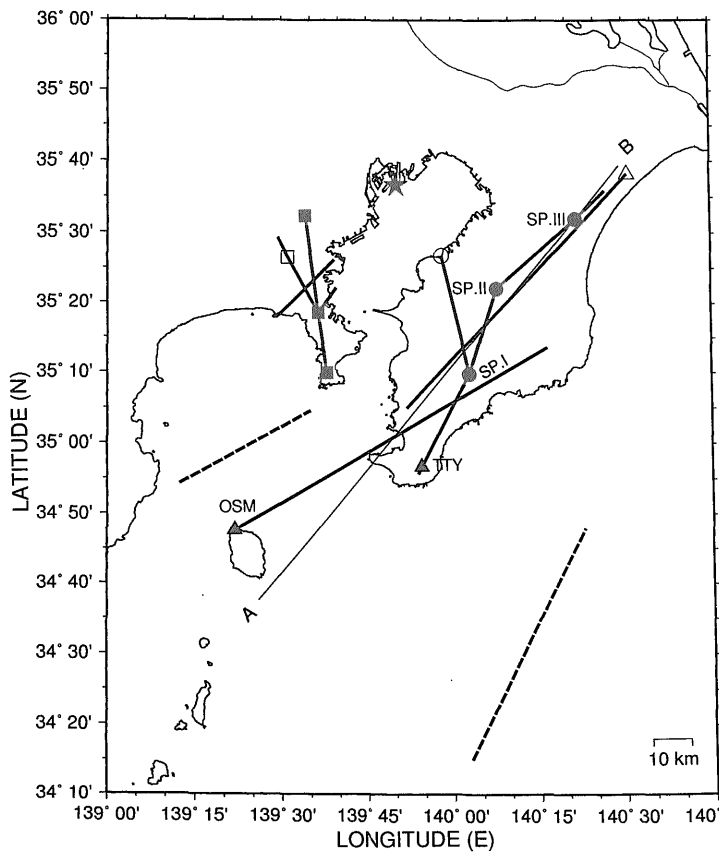
地震探査による地殻構造

第4-1図に房総周辺の地震探査測線を示す。爆破観測による屈折法探査が浅野ほか (1979)、伊藤ほか (1987) によって行われている。このほか伊藤ほか (1987) の測線に直交する方向に、房総半島中部で座間ほか (1985) が測線を設定している。浅野ほか (1979) は大島・館山の爆破のデータを順測線、古くに行われた銚子発破 (爆破地震動観測グループ, 1958) のデータを逆測線とした解析を行い、観測点は少ないものの大局的な速度構造を得ている。特に5.6-6.0km/s, 6.9km/sという深い速度層を求めることが出来た。その後伊藤ほか (1987) は浅野ほか (1979) とほぼ同一の測線上に、観測点を密に配置した約90kmの測線を設定し、さらに詳細な速度構造を求めている。ただし6.9km/s層は測線長の割には深いため、明かではない。座間ほか (1985) は伊藤ほか (1987) の観測時にその爆破の一部を利用して逆測線を設定した。その結果、伊藤ほか (1987) と同様の速度層を得ている。浅野ほか (1979) と伊藤ほか (1987) の結果を第4-2図に併せて示してある。これらは滑らかにつながりそうである。また併せて次に述べる微小地震によって決定されたプレート上面も図中に示した。5.6-6.0km/sの折れ曲がりや6.0km/sと5.6-5.7km/sの境界がちょうどこれらプレート上面に相当することは興味深い。

反射法探査は海上のみで行われており、もっとも近いものは加藤ほか (1983, 1987) の相模湾測線、房総南東沖測線である。相模湾測線では厚いところで4,000m以上の堆積物が存在し、その下位に明瞭な伊豆側の基盤が見えている。房総南東沖測線では音響基盤は断続的に認められるだけである。ただしこれらの基盤が海洋性地殻のどこに相当するかは明かではなく、海洋性地殻の構造自体は不明である。

三浦半島に関しては、鈴木ほか (1993) の屈折法調査がある。大局的には伊藤ほか (1987) の構造と似ており、葉山・嶺岡ベルトで3.4-3.6km/s層の盛り上がりが見られる。他には瀬尾・小林 (1980) の江ノ島・夢の島測線、山

(4) JUDGE計画のプログラム (宮崎 ほか)



第4-1図 房総半島南部周辺の地震探査。各シンボルは爆破点を示す。黒丸：伊藤・他 (1987) によるSP. I, II, III。黒三角：浅野・他 (1979) による大島 (OSM)・館山 (TTY) 爆破。白三角：爆破地震動研究グループ (1958) による銚子爆破。白丸：座間・他 (1985) による袖ヶ浦爆破。星：瀬尾・小林 (1980) による夢の島爆破。黒四角：鈴木・他 (1993) によるSP. A, B, C爆破。白四角：山中・他 (1988) による岡津爆破。太線：各屈折法探査の近似的な観測測線。太破線：加藤・他 (1983, 1987) による反射法測線。直線ABは第4-2図の断面のABに対応。

fig. 4-1 Seismic surveys around the southern Boso peninsula. Large symbols represent explosion points. Solid circles: SP. I, SP. II and SP. III after Ito *et al.* (1987); solid triangles: Ohshima (OSM) and Tateyama (TTY) explosions after Asano *et al.* (1979); open triangle: Choshi explosion after Research Group for Explosion Seimology (1958); open circle: Sodegaura explosion after Zama *et al.* (1985); star: Yumenoshima explosion after Seo and Kobayashi (1980); solid square: SP. A, SP. B and SP. C after Suzuki *et al.* (1993); open square: Okazu explosion after Yamanaka *et al.* (1988). Bold lines are approximate receiver lines for refraction surveys. Dashed lines are reflection surveys by Kato *et al.* (1983, 1987). The line AB corresponds to the section in fig. 4-2.

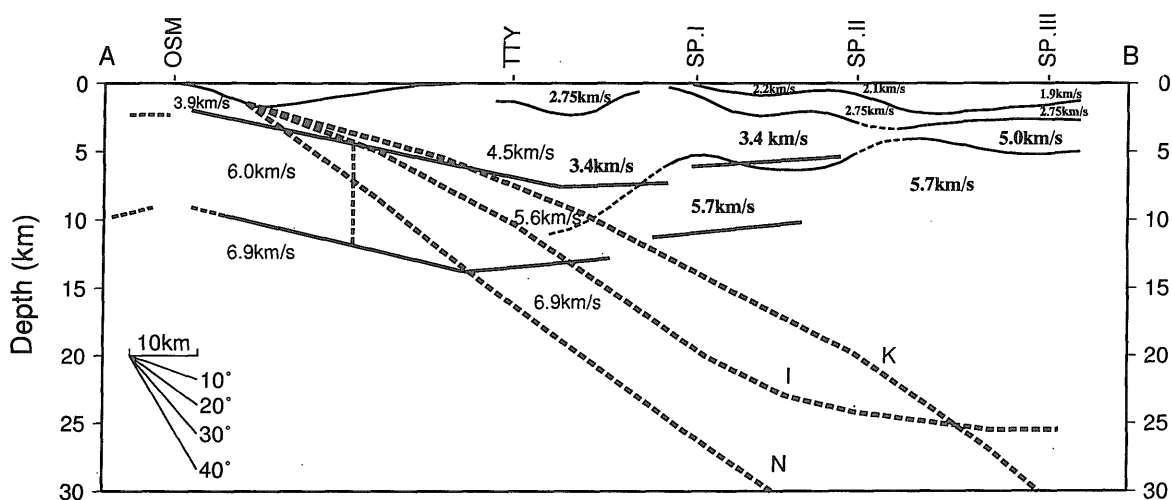
中ほか (1988) の逗子-岡津測線があるが、いずれも三浦半島の付け根をкаろうじてかすめているだけである。

フィリピン海プレート上面の深度分布

JUDGE計画では、深度10kmというのが掘削に関する技術目標となっている。本項ではこの掘削深度10kmで、目的とするフィリピン海プレートに本当に達することが出来るのかを考えてみたい。防災上の観点からすれば、実際に起こった関東地震の断層面を貫くような掘削をJUDGEは目指すべきであろう。しかし関東地震の断層面を正確に求めることは難しい。関東地震の断層面のモデ

ルはKanamori (1971), Ando (1971, 1974), Tada and Sakata (1980), Scholz and Kato (1978), Matsu'ura *et al.* (1980) などによって提出されているが、dip angleはモデルにより23-45°とまちまちである。これだけでは深度の特定は出来ない。

微小地震の観測網が整備されるにしたがって、より詳細なフィリピン海プレート上面の深度分布が, Shimazaki *et al.* (1982) を始めとして石田 (1986), 笠原 (1985), 野口 (1985) により提唱されてきた。これらの結果では、関東地震の断層モデルの傾きより低角なものが多い。最近詳細な速度構造が決定され (Ishida and Hasemi,



第4-2図 第4-1図ABに沿った速度構造断面。細線とタイムズロマンで書かれた文はそれぞれ伊藤・他 (1987) の速度境界と速度値を示す。中線とヘルヴェチカで書かれた文字はそれぞれ浅野・他 (1979) の速度境界と速度値を示す。ただし浅野・他 (1979) の浅部の層は省略。太破線は地震学的なフィリピン海プレートの上面で、Kは笠原 (1985)、Iは石田 (1992)、Nは野口 (1985) による。

fig. 4-2 Composite velocity structure along the line AB in fig. 4-1. Thin lines and characters written by Times-Roman are velocity boundaries and velocity values from Ito *et al.* (1987), respectively. Medium lines and characters written by Helvetica are velocity boundaries and velocity values from Asano *et al.* (1979), respectively, in which surface layers are omitted. Bold dashed lines are seismologically-determined upper planes of the Philippine Sea plate: I after Ishida (1992); K after Kasahara (1985); N after Noguchi (1985).

1988), 様々なタイプの地震が起こりプレート間の相対運動についての知識が増したため、Ishida (1992) はさらに詳細なプレート上面の深度分布を求めることができた。特筆すべきことはIshida (1992) の深度分布が、Matsura *et al.* (1980) の断面と良い一致を示しているということである (Ishida, 1995)。特に三浦半島付近ではきわめて良く一致しており、これらデータの信頼性は高いといえる。第4-2図にいくつかのモデルによる房総半島付近のプレート上面の分布をも示した。しかし微小地震の震源決定精度、特に深度の決定精度からいって、10kmの深度の地点を選定して掘削を行っても、本当に10kmでフィリピン海プレートに達するかどうかは定かではない。8 kmでプレートに達する可能性もあるし、12km掘っても達しない可能性もある。

その他のデータ

重力に関しては、駒澤 (1985) や主に海域をまとめた植田ほか (1987) らのコンパイルがある。しかしその測定密度はまだ十分ではない。磁気に関しては、空中磁気探査が中塚ほか (1980)、中塚・斎藤 (1983)、新エネルギー総合開発機構 (NEDO) (1983) によって行われている。この測定密度はやはり粗く、例えば嶺岡帯の強い磁気異常が十分に反映されているとはいえない。これらに基づいてNEDOはキュリー点深度分布図を作成している。陸上調査は千葉大学グループにより実施されており (例えばFujiwara *et al.*, 1989, 1990; Kinoshita *et al.*, 1995), よ

り微細な磁気異常の分布が求められている。

掘削に大きな影響を与える温度情報は極めて少ない。わずかに熱流量値が北方の茂原で測定されているに過ぎない。それによれば地温勾配はせいぜい0.2°C/km程度である。この他鈴木 (1985, 1992) は多くの井戸の地温勾配をコンパイルし、それに平均的な熱伝導率を仮定して熱流量分布図を作成している。房総半島南端で地温勾配は同じく0.2°C/km程度、熱流量として30mW/m²程度である。これらの結果はキュリー点深度から求められるものとは大きく異なる。これについては、本特集(6)で詳しく論じられている。

4.6 南関東において必要な調査

掘削に先だって明かにしなければならない重要な問題は、プレートの深度分布、付加体の構造、デコルマ面の位置・形状、アンダープレートの有無の確認などである。掘削地点の決定には10kmでプレートに達するという条件が必要であり、深度分布の正確な推定が最も重要な問題である。付加体は一般に構造が複雑で、何度も同一の層準が繰り返している可能性があり、これらの詳細な構造形態の情報がなくてはボーリング結果の解釈は困難である。特に房総付近では斜め沈み込みのため、3次元的な付加体分布の把握が必要である。また斎藤 (1995) によれば、伊豆・小笠原弧の地殻構造から類推すると、地殻各層間の物性変化が大きいため、何枚ものデコルマ面が存在する可能性があるという。これらのデコルマ面の相互位

(4) JUDGE計画のプログラム (宮崎 ほか)

置、新旧の区分、アンダープレATINGした部分の確認、などは付加の過程を解明する上で重要である。またデコルマ面あるいはその周辺には多くの水が存在する可能性があり、掘削の際に異常高圧水の突出の元凶となる可能性もある。これらの予測の上でもデコルマ面の3次元的な把握が必要である。上記の目的を達成するために以下の3段階の地震探査とその他の補足探査を提案する。またいずれの探査もモホ面までの探査深度を持つように考慮すべきである。したがって探査深度は海域において5 km以上、海陸境界部においては15km以上、内陸域においては30km程度であることが望ましい。

大規模構造概査

まず第一に概査として海域・陸域が連続した大測線を設定する。ここでは反射法とともに、詳細な速度構造を決定するための大規模屈折法・広角反射法・ESPをあわせ行う。この探査の目的は

- 1) プレート上面の正確なイメージング。
- 2) リファレンスとしての、沈み込みによって乱されていない部分のフィリピン海プレートの地殻構造の把握。
- 3) リファレンス部から付加体部への漸移帯における、順を追ったデコルマの発生位置・消長様式の解明と付加体の構造の把握。
- 4) 付加体部から陸域地殻への漸移帯の構造の把握。
- 5) リファレンスとしての、沈み込みによって乱されていない陸域地殻の構造の把握。

などである。実際の測線としては、大島近海から房総半島中・北部にいたる、100-150kmの大測線となる。

最近大陸地域において、コンラッド面あるいはその付近は400-500°Cに相当する一種の等温面である、という可能性が指摘されている (Jones, 1987; Hyndman and Shearer, 1989; Lewis *et al.*, 1992)。日本においてもそれらしいものが見つけられている (横倉ほか, 1994)。また海域においてはしばしばBottom simulating reflectionが発見され、これにより熱流量の推定が可能となる (Yamano *et al.*, 1982)。したがって運がよければ、海と陸の両方において温度情報を得ることが可能となり、掘削予定地点周辺のある程度の温度予測が可能になるかもしれない。探査結果の解釈においてはこれらのことにも十分留意すべきであろう。

中規模準3次元概査と3次元精査

大規模概査でフィリピン海プレートの深度が約10km程度であると推定された地域に集中して、測線長40-50 kmの測線を格子状に設定する。測線数としては5測線程度必要である。この探査の目的は、

- 1) 斜め沈み込みのために生じた3次元的な構造を、準3次元的な格子状測線配置により解明する。
 - 2) 大体の掘削予定地点の絞り込みを行う。
- などである。イメージとしては、第4-3図のような測線配

置が考えられる。

上述の掘削予定地点周辺で、精査のための3次元反射法探査を実施する。想定される規模は10km×10kmから20km×20kmの領域にまたがるものである。実際のサイズは上記探査結果によって異なる。例えば付加体が急傾斜を示すほど広い領域が必要となる。この探査の目的は、以下の節に述べられるパイロットホールと併せて、

- 1) 実際の掘削地点の重要なデータを提供する。
- 2) 掘削の際に遭遇するであろう破碎帯・異常高圧水帯などの予測データを提供する。
- 3) 本掘削の目的の変更・追加のためのデータを提供することなどである。

補足調査と探査技術開発

地震探査のほか、補足データとして重力探査、MT法探査などを行う。異なった物性を提供する探査を行うことにより、構造の解釈がより正確となるからである。例えばバンクーバー島での探査例のように、反射法 (Green *et al.*, 1986)、屈折法 (Spence *et al.*, 1985)、重力 (Riddihough, 1979)、MT法 (Kurtz *et al.*, 1986) を組み合わせることにより、アンダープレATINGした部分の同定、沈み込むプレートの上面・モホの位置解釈等が容易となる。

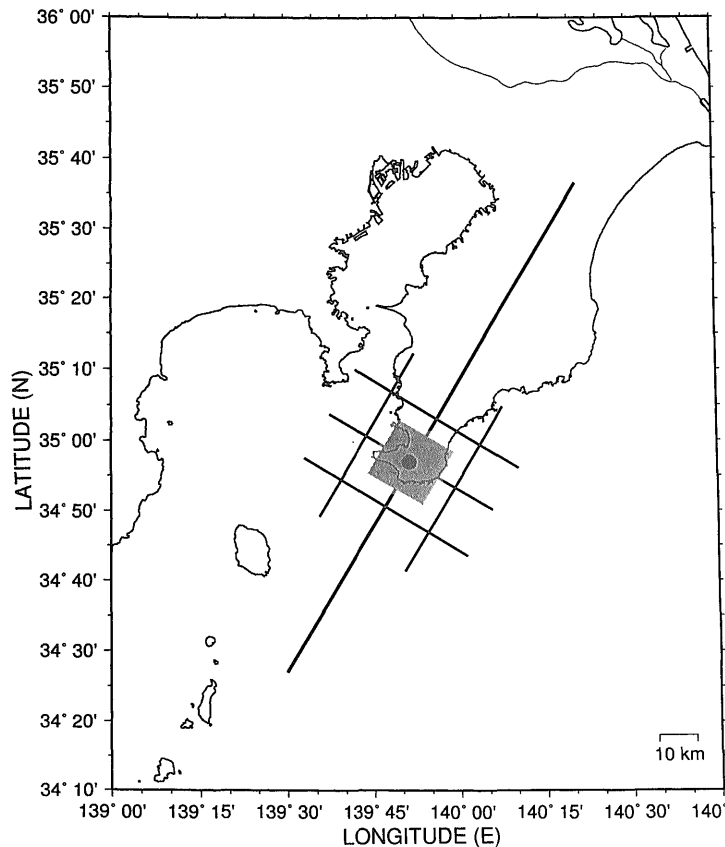
先にも述べたように付加体の構造は急傾斜である可能性がある。したがって急傾斜に対応した探査技術を開発する必要がある。急傾斜に対応したデータ処理法は、重合前マイグレーション、重合前深度マイグレーションなど現在でもいくつか可能である。しかし陸域データの場合人家・その他障害物・道路の屈曲・標高の凹凸など様々な困難な状況を考えると、データの広域的欠落への対処や3次元的な取り扱いが必要となる。また重合前マイグレーションのための速度解析をどのように行うか、など処理上の開発すべき点は多い。また処理以前のデータ取得段階でも、急傾斜からの反射イベントをもらさずすべて記録することが重要である。そのためには大オフセット・小受振点間隔でのデータ取得が必要となる。またこれらとは全く異なったパラダイムの探査法・あるいは急傾斜面の処理法が必要となるかもしれない。

4.7 パイロットホール

KTB計画のパイロットホール

ドイツのKTB計画では本掘削坑 (初期の目標深度15,000m) の前に、目標3,000-5,000mという幅を持たせたパイロットホールの掘削を行なった。パイロットホールの掘削は中古のリグを用い、なるべく安価な方法で行われ、4,000mで破碎帯に遭遇して掘り止めとなった。2段ロケット方式とも呼べるこの方法の目的は以下のようにまとめることができる。

- ・本掘削時に予測される条件 (温度、応力、岩相、破碎帯の頻度など) の予測
- ・本掘削に用いられる掘削リグのスペックの決定



第4-3図 提案する地震探査による事前調査の模式図。太線、細線、影付の領域、黒丸は、それぞれ大規模2次元探査測線、中規模格子状2次元探査測線、3次元精査領域、掘削地点を示す。

fig. 4-3 schematic figure of proposed pre-site seismic surveys. The bold line, thin line, shaded area and solid circle represent a large-scale 2D seismic line, medium-scale semi-3D seismic lines, a detailed 3D seismic survey area, and a boring site, respectively.

- ここでの硬岩に適したダイヤモンドビットの開発
- ドリラーの訓練とノウハウの獲得
- 現場研究施設におけるデータ採取・保存・分配方策の検討
- 地表から3,000-5,000mまでのコアの採取

さらにパイロットホールを行うことにより、次のようなメリットがあった。リアルタイムのガス分析により、断層破碎帯の存在が事前予測できることが分かり、掘削技術者がトラブルを未然に防止することができた (Emmermann, 1993)。またメインホール (本掘削坑) では4,000mまでコアを採取せず、垂直掘削装置を用いてできるだけ垂直に掘削が行うことができたので、後のオペレーションの負担を大幅に軽減することができた (第7章)。このパイロットホールは掘削終了後も保存されており、メインホールとの間で透水試験を行ったり、機器のテストおよび様々な探査に用いられている。なお、このパイロットホールの前に、深さ300m程度の地温勾配測定用の浅井戸が10数本掘られたが、浅すぎて深部の温度推定にはあまり役に立たなかった。

JUDGE計画におけるパイロットホールの役割

JUDGE計画においては、KTB以上にパイロットホール掘削の意味するところは大きい。本章の最初で述べたようにパイロットホールは単に超深部観測井掘削の浅部立て替え坑だけではなく、超深部井とともに、独自の役割がある。さらに、実際の温度の推定に大きな幅のあるJUDGE計画の場合、機器の耐熱限界の目標を設定するうえでその必要性は高い。よってJUDGE計画におけるパイロットホールの役割は以下のようにまとめられる。

(本掘削開始前までの役割)

- 本坑掘削時の掘削条件(温度、応力、岩相、破碎帯の頻度など)の予測
- 機器の技術開発課題の設定と開発計画の立案
- 本掘削に用いられる掘削リグのスペックの決定
- ドリラーの訓練とノウハウの獲得
- 科学掘削としてのデータ採取方策の検討
- 浅部におけるコアおよび流体の採取と観測・実験 (機器開発を含む)

(本掘削開始後の役割)

- 本掘削掘進中のモニタリング・監視

(4) JUDGE計画のプログラム (宮崎 ほか)

- ・複数の坑井を用いた坑井間トモグラフィ
- ・複数の坑井を用いた坑井間水理試験
- ・流体の採取
- ・数多くの観測機器の設置
- ・深地殻観測ネットワーク

これらは大きく本掘削開始前と後に分けられるが、さらに技術開発目標の設定、坑井を用いた観測と試料の採取に細分される。これらの役割を本掘削坑1本に押し付けることは不可能であり、仮にそうしても時間がかかり費用の節約にはつながらない。さらに、本掘削坑の浅部に多くの目的を持たせることは、ひいては掘削可能深度を著しく減少させることにつながる。

岩石コアの採取について

10kmにも達しようとする超深度坑を、すべて岩石コアを採取しつつ(連続コアで)掘削することは時間(および経費)がかかり、坑壁の不安定性が時間と共に増すなど、様々な技術的困難を伴う。しかし、第3章に述べられているように、科学的には連続コアが望ましく、それに固執するかスポットコアで我慢するかが、計画の策定に大きな影響を与える。連続コアを必要とするのは、古地磁気、微化石、酸素同位体などによる環境指標の抽出、重鉍物分析による堆積物の起源の研究などに必要であるばかりでなく、地球物理探査のデータのキャリブレーションにとっても必要である。

米国の掘削技術者で、地熱、石油、および科学掘削に造詣の深いジョン・ローリー博士は、掘削技術開発を行うことにより、JUDGE坑井をオールコアで掘削することは実現可能としている(Rowley, 1993)。彼らはコアリングビットとリーミングビット(坑径拡張のためのもの)の組み合わせで、オールコアをしつつ垂直に掘削する方法を提案している。このようなアイデアとともに、各種パイロットホールなどの組み合わせで、可能な限りコアを採取していきたい。同時に、連続コア採取が不可能な場合に備えて、スポットコア採取の行動計画やサイドコア採取技術の検討なども行っていく必要がある。

掘削・観測の地層温度条件

本特集(7)は地質調査所(1996)の技術フィージビリティ調査結果を多く引用して書かれている。その調査ではJUDGE本坑の10km深度での地層温度を400°Cと仮定し、高い温度によって引き起こされる技術的課題を検討した。この400°Cという値はキュリー点温度の調査を基にした数字ではあるが、他の様々な科学的根拠により推定される値はこれを大きく下回り、実際の地温は200°C-400°Cの間と推定される(本特集(6)参照)。400°Cという値は技術フィージビリティを行なうに当たって仮に用いられた温度であって、実際には上限値と考えて良いだろう。

上限値を用いて技術フィージビリティを行ったのは、日本において超深層掘削を行う際に、高い地温勾配への対策は避けて通れないという事情があるからである。

上限の目標を設定することにより、計画の目標を達成するのに必要な技術開発項目や新たな発想の必要性の検討に遺漏がないように努めた。しかし、実際に計画を遂行していくうえで、この10km、400°Cという値を既定事実として成否を判断するのではなく、事前調査、パイロットホールの掘削、および本掘削坑の浅部掘削時のデータをもとに、途中段階で絶えず自己修正を可能とするフレキシブルな目標設定システムの構築が成功のカギを握っているといえる。

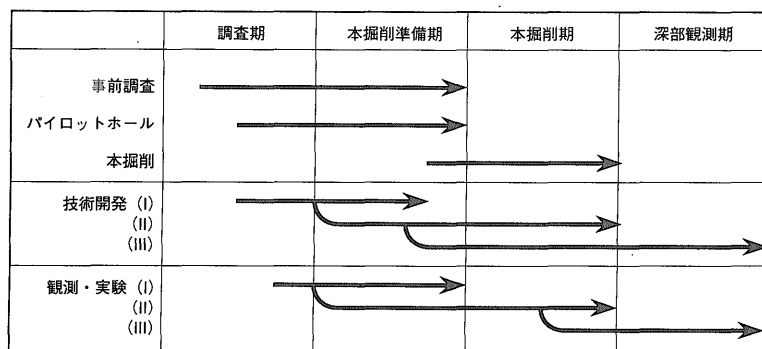
4.8 探検的性格を有するJUDGE計画

JUDGE計画の想定する科学的目的・目標と、現在与えられている技術等手段との間の埋めなくてはならない溝は決して浅くはない。これはJUDGE計画が探検的性格を有していることに起因している。探検では、十全な準備を行ったとしても実際現地に到達する、あるいはその過程で思わぬ事象に遭遇する。また、現地に行ってみないと分からないことが多々ある。逆説的に言えば、そのためにこそ現地への探検が必要となるのである。同様にJUDGE計画でも掘削しなければ判明し得ないことがある。本当に10kmでデコルマ面に遭遇するか、深部での地温は何度になっているか、そのためにどれほどの仕様の機器を用意すべきかなどはその主なものである。これらはプログラムの展開の中でしか解決できない。

プログラムは、責任と権限の明確な体制のもとで立案されることが必要である。そこでは全体計画の立案と実行管理・評価、計画の見直しなどが適切なタイミングでなされるであろう。またその基調は、最小の計画実行リスクと最大の科学的成果達成となろう。これらをふまえて、前節までの検討を加味して現時点での可能なデッサンの一つとしてJUDGE計画プログラムを想定したのが第4-4図である。プログラムは大きく4つの期(フェーズ)に分かれる。ここでは、それらを調査期、本掘削準備期、本掘削期、そして深部観測期と呼ぶことにする。

調査期はJUDGE計画の全体の準備期間であり、事前調査や先行パイロットホール調査、そして技術開発の第一段階期である。本掘削準備期は、調査期の結果を受けて本掘削基地を準備するとともに本掘削のための最終的技術開発、基地内でのパイロットホール掘削などを実施する。また、先行パイロットホールでの本格的観測・実験を通して超深部観測井での観測・実験課題をリファインしていく。本掘削計画が固められるとそれにあわせて超深部井での観測・実験のための技術開発が開始されるであろう。本掘削期では超深部観測井の掘削と計測、観測・実験のための技術開発、パイロットホールによる観測・実験が平行して行われる。深部観測期は掘削された観測井をパイロットホールとともに深部地殻観測施設として運用する。

以上示したプログラムはあくまで一つの試案であり、このようなプログラムデザインを創っていくことがJUDGE計画の第一歩である。



第4-4図 JUDGE計画のプログラムデッサン。
fig. 4-4 Rough sketch for a program of the JUDGE project.

4.9 おわりに

本章ではJUDGE計画の科学的目的(本特集(3)参照)をもとに、本特集(6)や(7)を参照しつつ、JUDGE計画のプログラムをデッサンした。実際にJUDGE計画を開始するにあたっては、

- ・ 科学者と技術者の対話、調和、協力
- ・ 組織の確立と権限の明確化
- ・ プログラム立案の戦略
 - 全体計画と各段階の目標設定、行動の明瞭化、優先度設定、評価・判断の確立
 - 常に用意する立て替え計画、同時に走るバックアップ計画(特に技術開発において)

が最も重要なこととなろう(Rowley, 1996, 私信; Sperber, 1996, 私信)。本章の「はじめに」でも述べたように、本章は現時点でのJUDGE計画に対する可能なデッサンの一つであり、決して確定したものではないことを協調してしすぎるものではない。まずはプロジェクトの体制を整え、計画を適切な規模とテーマ・段階に分割し、合理的手順に従って各テーマ・段階を適切なタイミングで開始し、計画途中での評価とそれに基づく柔軟な計画の修正を経つつ、一步一步前進していくことが望ましい。

さらにJUDGE計画は、日本の科学掘削であると同時にグローバルな視点で国際的連携のもとに進められるべき科学プログラムである(本特集(5))。国内の英知の結集と国際的協力のもとに計画が開始されることを期待してやまない。

文 献

Ando, M. (1971) A fault-origin model of the great Kanto earthquake of 1923 as deduced from geodetic data. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, **49**, 19-32.
 Ando, M. (1974) Seismo-tectonics of the 1923 Kanto earthquake. J. Phys. Earth, **22**, 263-277.
 浅野周三・一ノ瀬洋一郎・長谷川功・飯塚 進・鈴木宏芳 (1979) 爆破地震動観測資料による南関東の地殻構造. 地震, **32**, 41-55.

爆破地震動研究グループ (1958) 銚子爆破地震動観測結果報告, 爆破地震動研究グループ会報, no. 16, 10-22.
 Behr, H. J. and Emmermann, R. (1987) Scientific objectives and site-selection studies of the continental deep drilling program of the Federal Republic of Germany. In Behr, H.-J., Stehli, F. G. and Vidal, H. eds., Observation of the Continental Crust through Drilling II. Springer-Verlag, Berlin, 85-119.
 Brown, L. D., Barazangi, M., Kaufman, S. and Oliver, J. (1986) The first decade of COCORP: 1974-1984. In Barazangi, M. and Brown, L. D. eds., Reflection Seimology: A Global Perspective. Geodyn. Ser., vol. 14, Amer. Geophys. Union, Washington, D. C., 107-120.
 地質調査所 (1996) 深部掘削技術調査, 深部観測技術調査およびボーリング資試料データベース概念設計報告書, 217 pp, 地質調査所研究資料, No. 263.
 DEKORP Research Group (1988) Results of the DEKORP4/KTB Oberpfalz deep seismic reflection investigations. J. Geophys., **62**, 69-101.
 Emmermann, R. (1993) Overview of the German KTB Project-Technological developments and scientific results. Program and Abstracts, International Workshop on Ultra-deep Scientific Drilling Tokyo 1993, 2.
 Emmermann, R., Duba, A. and Lauterjung, J. (1991) Super-deep, continental drilling in Germany. EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, **72**, 193, 196-197.
 Green, A. G., Clowes, R. M., Yorath, C. J., Spencer, C., Kanasewich, E.R., Brandon, M. T. and Sutherland-Brown, A. (1986) Seismic reflection imaging of the subducting Juan de Fuca. Nature, 319, 210-213.
 Fujiwara, T., Ogura, S., Kinoshita, H. and Morijiri,

- R. (1989) Study of crustal structure in the south Boso peninsula inferred from magnetic anomalies. *Rock Magnetism and Paleogeophysics*, **16**, 4-7.
- Fujiwara, T., Ogura, S., Morijiri, R. and Kinoshita, H. (1990) The crustal structure of the southern part of Boso peninsula based on magnetic anomaly study. *Rock Magnetism and Paleogeophysics*, **17**, 100-104.
- Hyndman, R. D. and Shearer, P. M. (1989) Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results. *Geophys. J. Int.*, **98**, 343-365.
- 石田瑞穂 (1986) 関東・東海地域の震源分布から推定したフィリピン海及び太平洋プレートの等深線. 国立防災科学技術センター研究報告, **36**, 1-19.
- Ishida, M. (1992) Geometry and relative motion of the Philippine Sea Plate and Pacific Plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 489-513.
- Ishida, M. (1995) The seismically quiescent boundary between the Philippine Sea plate and the Eurasian plate in central Japan. *Tectonophysics*, **243**, 241-253.
- Ishida, M. and Hasemi, A. (1988) Three-dimensional fine velocity structure and hypocentral distribution of earthquakes beneath the Kanto-Tokai district, Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 489-513.
- 伊藤公介・長谷川功・佐藤 隆・相原輝雄・楠瀬勤一郎・高橋 学・渡辺史郎・横倉隆伸・小玉喜三郎 (1987) 屈折法による地下構造探査—房総半島地域. 科学技術振興調整。「首都圏における直下型地震の予知及び総合防災システムに関する研究」研究成果報告書, 科学技術庁研究開発局, 173-183.
- Jones, A. G. (1987) MT and reflection: an essential combination, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **89**, 7-18.
- Kanamori, H. (1971) faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **49**, 13-18.
- 笠原敬司 (1985) プレートが3重会合する関東・東海地域の地震活動様式. 国立防災科学技術センター研究報告, **35**, 33-137.
- 加藤 茂・佐藤任弘・桜井 操 (1983) 南海・駿河・相模トラフのマルチチャンネル反射. 法音波探査. 水路部研究報告, **18**, 1-23.
- 加藤 茂・富安義昭・土岐嘉孝 (1987) 相模トラフのマルチチャンネル反射法音波探査. 水路部研究報告, **22**, 95-111.
- Kinoshita, H., Nakasa, Y., Morijiri, R. and Fujiwara, T. (1995) Formation of backarc basin and genesis of ophiolite. *J. Geography*, **104**, 392-407.
- 駒澤正夫 (1985) 20万分の1 関東地域重力図 (ブーゲー異常図). 特殊地質. no. 24, 地質調査所.
- Kozlovsky, Y. A. ed. (1984) *The Superdeep Well of the Kola Peninsula*. Springer-Verlag, Berlin, 588p.
- Kremenetsky, A. A. (1990) The geological nature of seismic boundaries in the continental crust. In Fuchs, K., Kozlovsky, Y. A., Krivtsov, A. I. and Zoback, M. D. eds., *Super-Deep Continental Drilling and Deep Geophysical Sounding*. Springer-Verlag, Berlin, 393-407.
- Kurtz, R. D., DeLaurie, J. M. and Gupta, J. C. (1986) A magnetotelluric sounding across Vancouver Island detects the subducting Juan de Fuca plate. *Nature*, **321**, 596-599.
- Lewis, T. J., W. H. Bentokowsky, and R. D. Hyndman (1992) Crustal temperatures near the Lithoprobe southern Canadian Cordillera transect, *Can. J. Earth Sci.*, **29**, 1197-1214.
- Matsu'ura, M., Iwasaki, T., Suzuki, Y. and Sato, R. (1980) Statical and dynamical study on faulting mechanism of the 1923 great Kanto earthquake. *J. Phys. Earth*, **26**, 119-143.
- Meissner, R. and Tanner, B. (1990) Structure and tectonics in the Oberpfalz area and its surroundings. In Fuchs, K., Kozlovsky, Y. A., Krivtsov, A. I. and Zoback, M. D. eds., *Super-Deep Continental Drilling and Deep Geophysical Sounding*. Springer-Verlag, Berlin, 120-133.
- 中塚 正・斎藤友三郎 (1983) 20万分の1 浦賀水道空中磁気図. 国際協力事業団.
- 中塚 正・堀川義夫・大久保泰邦・丹治耕吉・中井順二 (1980) 20万分の1 空中磁気図XXVII, 房総沖—伊豆沖海域. 地質調査所.
- Moos, D. and Zoback, M. D. (1990) Utilization of the observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: Application to continental, Deep Sea Drilling project, and Ocean Drilling Program boreholes, *Jour. Geophys. Res.*, **95**, 9305-9325.
- 新妻信明 (1996) ドイツ超深層陸上學術ボーリングKTBと国際陸上科学掘削計画ICDP. 學術ボーリングニュースレター, no. **43**, 1-10.
- 野口伸一 (1985) フィリピン海プレートの形状と茨城地震活動の特徴. 月刊地球, **7**, 97-104.
- Pavlenkova, N. I. (1992) The Kola superdeep drill-hole and the nature of seismic boundaries. *Terra Nove*, **4**, 117-123.
- Reston, T. and Meissner, R. (1989) The three-

- dimensional structure of the Oberpfalz---an alternative interpretation of the DEKORP-KTB data. *Tectono-physics*, **157**, 1-11.
- Riddihough, R. P. (1979) Gravity and structure of an active margin-British Columbia and Washington. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 350-363.
- Rowley, J. (1993) Core-drilling strategy and design concepts for ultra-deep scientific projects, Proc. ASME Drilling Technology Symp., Houston, ASME Paper No. 93-PET-10.
- 斉藤清治(1994) ドイツKTBの掘削技術と日本の超深度掘削への期待. *地質ニュース*, no. **488**, 41-47.
- 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.
- Scholz, C. and Kato, T. (1978) The behavior of a convergent plate boundary: Crustal deformation in the south Kanto district, Japan. *J. Geophys. res.*, **83**, 783-797.
- 瀬尾和大・小林啓美(1980) 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査—夢の島-江の島測線の地下構造—. *地震*, **33**, 23-36.
- Shimazaki, K., Nakamura, K. and Yoshii, T. (1982) Complicated pattern of the seismicity beneath metropolitan area of Japan: Proposed explanation by the interactions among the superficial Eurasian plate and the subducted philippine Sea and Pacific slabs. *Mathematical Geophysics*, Chateau de Bonas, France, 20-25 June 1982, *Terra Cognita*, **2**, 403.
- 新エネルギー総合開発機構(NEDO)(1983) 東南北部・関東及び東海地域20万分の1 IGRF残差磁気図. 全国地熱資源総合調査キュリー一点法調査.
- Smythe, D. K., Smithson, S. B., Gillen, C., Humphreys, C., Kristffersen, Y., Karaev, N. A., Garipov, V. Z., Pavlenkova, N. I. and Kola-92 Working Group (1994) Project images crust, collects seismic data in world's largest borehole. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **75**, 473-476.
- Spence, G. D., Clowes, R. M. and Ellis, R. M. (1985) Seismic structure across the active subduction zone of western Canada. *J. Geophys. Res.*, **90**, 6574-6772.
- Shibley, T.H., Moore, G.F., Bangs, N., Moore, J. C., and Stoffa, P.L. (1994) Seismicity inferred dilatancy distribution, northern Barbados Ridge decollement: Implication for fluid migration and fault strength, *Geology*, **22**, 411-414.
- Stiller, M. (1991) 3-D vertical incidence seismic reflection survey at the KTB location, Oberpfalz. In Meissner, R., Brown, L., Duerbaum, H.-J., Franke, W., Fuchs, K. and Seifert, F. eds., *Continental Lithosphere: Deep seismic Reflection. Geodyn. Ser.*, vol. 22, Amer. Geophys. Union, Washington, D. C., 101-113.
- 鈴木宏芳(1985) 関東平野の地中温度. 国立防災科学技術センター研究報告, **35**, 139-154.
- 鈴木宏芳(1992) 関東平野の地下温度分布と地質構造. 日本地質学会第99年学術大会講演要旨, 566.
- 鈴木宏芳・広部良輔・渡辺健(1993) 人工地震による神奈川県東部地域の地下構造調査. 防災科学技術研究所研究報告, **51**, 23-40.
- Tada, T. and Sakata, S. (1980) On fault model of the 1923 great Kanto earth-quake and its geotectonic implication. *Bull. Geograph. Surv. Inst.*, **22**, 103-121.
- 植田義夫・中川久穂・平岩恒広・朝尾紀幸・久保田隆二(1987) 東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造. 水路部研究報告, **22**, 179-206.
- Vollbrecht, A., Weber, K. and Schmoll, J. (1989) Structural model for the Saxothuringian-Moldanubian suture in the Variscan basement of the Oberpfalz (Northeastern Bavaria, F. R. G.) interpreted from geophysical data. *Tectono-physics*, **157**, 123-133.
- Wiederhold, H. (1991) Investigation of structures and anisotropy by a 3-D expanding-spread Experiment. In Meissner, R., Brown, L., Duerbaum, H.-J., Franke, W., Fuchs, K. and Seifert, F. eds., *Continental Lithosphere: Deep seismic Reflection. Geodyn. Ser.*, vol.22, Amer. Geophys. Union, Washington, D. C., 115-120.
- 山中浩明・瀬尾和大・佐間野隆憲・翠川三郎・嶋悦三・柳沢馬住(1988) 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(3)—1983, 1984年に実施された人工地震のデータの総合的解析—. *地震*, **41**, 527-539.
- Yamano, M., Uyeda, S., Aoki, Y. and Shipley, T. H. (1982) Estimates of heat flow derived from gas hydrates. *Geology*, **10**, 339-343.
- 横倉隆伸・宮崎光旗・長谷川功(1994) 東北脊梁下に見られた深部反射面—等温面の可能性. 日本地震学会1994年度秋季大会講演予稿集, 305.
- Yoshida, C. (1996) Deep oil and gas well drilling in Japan, *Proceedings 8th International Symposium on the Observation of the Continental Crust Through Drilling*, 46-51.
- 座間信作・柳沢馬住・嶋悦三(1985) 千葉県中部の地下構造(2). 昭和60年度地震学会秋季大会講演予稿集. no. **2**, 150.

(受付: 1997年2月17日; 受理: 1997年2月18日)