

## プレート沈み込み帯への掘削計画JUDGE

### (9) 結論および用語集

浦辺徹郎\* 森田信男\*\* 木口 努\*\*\* 宮崎光旗\*\*\* 倉本真一\*\*\*\* 藤本光一郎\*\*\*\*\*

URABE Tetsuro, MORITA Nobuo, KIGUCHI Tsutomu, MIYAZAKI Teruki, KURAMOTO Shin-ichi and FUJIMOTO Koichiro (1997) JUDGE Project: A Continental Scientific Drilling into Plate Subduction Zone (9) Conclusion and Terminology. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.48 (3/4), p. 253-256

#### 9.1 JUDGE計画の技術的問題点

本特集号における検討により, JUDGE計画を初め日本での超深度科学掘削では, ドイツ大陸超深度掘削(KTB)計画や, ロシアのコラ半島の超深度井(SG-3)より厳しい掘削条件が予測されることが判明した。掘削障害を生じる主な項目は, 高い地層温度, 地殻内応力の異方性による坑井不安定性, および超深度における掘削効率の著しい低下の3点である。KTB計画では, 当時のツールズ等の耐熱限界を考慮して掘削目標深度を15kmから10kmに変更した。しかしそれに至る前の深度9.1kmで末期的な坑井不安定状態が見られ, 掘り留めとなった。このように坑井深度は技術限界および地層条件の両方により左右されるので, 平均地温勾配および水平応力の両方が高い日本で超深度掘削計画を立てる場合, 様々な困難が予想される。以下にそれらの困難点に関しこの特集号で検討した結果を要約する。

#### 温度

まず温度である。これまでの掘削技術動向調査(石油技術協会, 1990)では, 一般的に深度10kmで300°Cを越えると, 「在来技術の改善に加え, 新しいコンセプトによる画期的な技術開発が必須」としている。地質調査所(1996)および本特集号の(7)では, このアプローチをさらに進め, 実際にJUDGE坑井掘削において予想される条件を想定し, 個々の問題点の検討を通じてより具体的かつ精度の高い技術的な調査を行なった。ここではJUDGE坑井の坑底温度を, キュリー一点深度分布の検討から得られた400°Cとして技術開発の可能性を検討したが, その温度では泥水循環による冷却を行なっても坑井温度は約260°Cにしか下がらず, 掘削ツールズおよび泥水ともに, 現在より約

110°C耐温を上げなければならないことが分かった。ツールズの温度限界の改善, 坑内安定技術の改善速度は遅く, 過去10年間に50°C程度しか改善が見られなかったことから, 本計画により高温耐久材料を使用した新しい機器の開発を一層促進する必要がある。つまり計画の実現のためには, 他の高温エレクトロニクスを必要とする分野と協調し, ツールズ等の耐熱性を飛躍的に向上させるか, 新しいコンセプトの掘削方法を開発する必要がある。

ただし, この10km, 400°Cという値は温度推定の上限値であることを注意しておく必要がある。JUDGE坑井が掘削されるであろう日本列島の太平洋岸では地温勾配の実測値は低いものが多く, 100m当り平均2.2°Cである。これを外挿すると10kmでの地層温度は220°Cとなり, 本特集号(7)で仮定した400°Cより180°Cも低いことになる。そこで実際にどのような温度条件が予想されるのか, 計画の早い時期に7km程度のパイロットホールを掘削し技術開発目標を設定する必要がある。坑底温度が10°C予想より低いだけで, 計画の実現性は大きく向上するからである。またこの温度がどれくらい高いかにより, 計画の総予算および年数も大きく左右される。

現在, 日本で最も深い井戸での長期観測の実績は科学技術庁防災科学技術研究所が埼玉県岩槻市などで行っている深層地殻活動観測装置が持っている。岩槻井の深度は3,510mで, 温度は85.9°Cである。この温度においても機器に使用される半導体に非常に制約を受けるため単純な構造のセンサーを使っているが, それでも現状の実績は連続3年で交換を余儀なくされている。JUDGE計画の最終目標は長期観測にあるので, 観測機器の耐高温化は計画の最も初期にとりかかるべき課題である。

#### 水平応力の異方性

プレート沈み込み帯では, 沈み込みに直交する方向と平行する方向とで, 水平応力の偏差が大きい事が予想される。この差応力は坑壁の不安定性をもたらし, 掘削を著しく困難にする。泥水圧を水平最小応力以上に上げると剪断型滑りを引き起こす危険性があるので, 泥水圧は最

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

\*\*早稲田大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Waseda University; 4-1 Okubo 3-chome Shinjyuku-ku, Tokyo, 169 Japan)

\*\*\*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

\*\*\*\*海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

\*\*\*\*\*地殻熱部 (Geothermal Research Department, GSJ)

Keywords: JUDGE Project, continental drilling, feasibility study

小水平応力より低い状態に保つ必要がある。しかし泥水圧を低く保つと、最大水平応力が高ければ坑井ブレイクアウトを生じる。すなわち裸坑部分が短くても、ある部分で逸泥、他の部分で坑井ブレイクアウトを引き起こす可能性がある。

一方、浅い震源を持つ地域における掘削では、断層面の周辺で断層のすべりとともに差応力が解消されている現象も知られており、沈み込み断層面付近でもこのような現象が起きていると予想される。とすれば上記のような困難は緩和されているかも知れない。このように破壊は極めて局所的な物理条件によって引き起こされるものではあるが、実際にコアを採集しその強度・歪み挙動を測定することは全体の計画立案に大きな手掛かりを与える。そこで、深度方向の応力分布を調べるため、7 km程度のパイロット坑井の掘削を行うべきである。なおJUDGE坑井では、掘削に悪影響を及ぼす硫化水素などのガスの噴出の危険性は少ないものと思われる。

### 掘削効率

オールコア掘りを基本とする10km科学井では掘削掘管の上下操作所要時間が膨大となる。そのためKTB計画のパイロットホール(4,001m)ではコアが採取できた区間は全長の81%に達するが、メインホール(9,101m)でコア掘りされた全長は199.6mに過ぎず、コアが採取できた区間は1.8%に過ぎなかった。そこで、パイプ交換の自動化、多段繋ぎパイプの使用、連続コア回収装置の開発が必要になる。日本の超深度掘削にもKTBの開発した自動パイプ操作装置が採用可能であるが、改良点があれば改良する必要がある。また超深度掘削では掘削管の保護のため坑井を垂直に保つ必要があり、高温度に耐える垂直掘削装置の開発はぜひ必要である。連続コア回収装置が開発できない場合を想定して、スポットコア、サイドコアで科学的成果の目減りを防ぐにはどうすればよいか、コアの採取をしない区間はどのような代替データがあればいいかについての検討も同時に進める必要がある。コア以外にも流体の採取、掘削中の坑内観測など、さらに掘削効率を下げる方向に作用するが、科学的には不可欠である作業が存在する。これらの困難を解決していくためには、柔軟な組織と目標決定のプロセスが必要であることは言うまでもないが、この組織においては科学者、技術者、および管理者の間に密な情報交換と信頼関係が存在しなければならない。

### 9.2 JUDGE計画は実現可能か?

これまでの検討により、現状の技術レベルのままではJUDGE計画の実現は必ずしも可能であるとは言えず、多くの技術開発のチャレンジが必要であることが分かった。この技術開発の成否に関する不確定性の最も大きな理由は、温度の予測幅が大きいことにある。そこでまず現在の技術で可能である7 kmクラスのパイロットホールを掘削すべきである。それに基づいた予測値がこの特集号で仮に設定した10km、400°Cという条件を数10°C下回

るものであれば、将来の技術開発を見越すと、実現可能となろう。JUDGE計画はサイエンスのみを頭に描いていては実現できず、逆に掘削坑が完成すれば自動的にサイエンスが達成されるものでもない。両者の密接な連携のもと、日本の国家的ビッグ・サイエンス・プロジェクトとして実施して行く中で、ここに上げた困難さを征服していくことが求められている。

現在の技術レベルから見た場合、特殊な検層の上限温度は約300°Cだが、主な検層サービス会社が行っている高温検層の上限温度は一般に260°Cである。これは開発投資に見合うほど高温検層の市場が大きくないという経済的側面によるところも大きい。しかし一般産業分野においても、半導体素子の高集積度化、高速化に伴う自己発熱への対策は重要な研究課題となっている。将来の大規模LSI(1000万ゲート/cm<sup>2</sup>)の発熱量は160W/cm<sup>2</sup>にも達すると試算されることから、強制冷却の限界を越えてしまい、高温電子材料をベースにした半導体開発の必要性が指摘されている(日本電子工業振興協会編, 1995)。これらの動向に対し、JUDGE計画もまた一定のインセンティブを与えることが可能かどうか、計画の実現性に大きな影響を与える。今後、様々な分野と力を合わせて耐高温電子技術開発のインセンティブを創出することにより、計画実現に向けて努力して行くことが必要であろう。

### 9.3 用語集

用語とその定義：(50音順)

#### (地球科学編)

アウト・オブ・シーケンス スラスト(out-of-sequence thrust)：付加体の陸側で、新しく、より陸側に傾斜したスラスト(低角の逆断層)ができ、付加体がさらにスタッキング(積み重なり)をおこし急速に厚くなることがあるが、そのスラストのこと。

アンダープレーティング(underplating)：デコルマ面の下位にあった堆積物やその下位の火山岩が、デコルマ面の下方へのステップダウンに伴い、剝がされ付加体の底に付加されていく現象。

コア(core)：(技術編)参照。ボーリングをすれば必ずコアが採取される訳ではなく、コア用ビットを用いないときは、空いた穴を占めていた岩石は掘屑となってボーリング泥水とともに排出される。

サイズミックポンプ(地震ポンプ)(seismic pump)：水を含んだ岩石の強度が増す現象をダイラタンシー硬化というが、この様な部分が地震の発生とともに崩壊すると、大量の間隙水を放出することがある。この間隙水が地表に向かって急激に押し出される現象をサイズミックポンプという。

コンラッド面(ないしコンラッド不連続面)：大陸地殻上部を構成する花崗岩質岩と、大陸地殻下部を構

成する玄武岩質岩との境界面。

沈み込み帯 (プレート沈み込み帯) (subduction zone) : 海洋プレートが別のプレートの下に潜り込む現象を沈み込みといい、それが起こる場所を沈み込み帯という。プレートの収束域ともいう。

沈み込み帯での物質循環: 沈み込み帯においては火成岩からなる海洋地殻と、その上に載る堆積物、粒間を占める流体、変質/変成岩、などが、沈み込みに伴って地下に引きずり込まれる。それらの一部は、脱水反応、アンダープレーティング、などにより地表に戻ってくるが、残りはマントルに還流する。マントルに沈み込んだ物質の一部はマグマに取り込まれて、火山として噴火することが知られている。

塑性/脆性変形境界 (brittle/ductile transition) : 深さ10km程度以深の地殻深部は塑性領域に、地殻浅部は脆性領域にあると考えられるが、地震の震源核は脆性領域ないし脆性・塑性境界領域において形成すると考えられている。

デコルマ面 (decollement, detachment fault) : デコルマンともいう。付加体中ではデコルマ面を境に、上位の地層が下位の地層から分離し、後者とは無関係に変位・変形をするという現象が見られる。デコルマ面は必ずしもプレート境界面と一致しない。

島弧・海溝系 (arc-trench system) : プレート沈み込み帯に発達する、お互いに平行な弧状の列島と海溝のこと。日本列島はその代表例。

付加体 (accretionary complex) : 付加体は、陸側から運搬された堆積物と、海洋プレート上の堆積物や一部火成岩類が、海洋プレートの沈み込みに伴って、ブルドーザーでかき寄せられるように、大陸プレート前縁に順次付加されて形成された細長いウエッジ状の累積体のこと。内部に陸側に傾斜するスラスト (低角の逆断層) が発達している。

プレート (plate) : プレートは地球の表面を覆う厚さ数十kmから百数十kmの岩石の剛体で、大陸および海洋のそれがある。後者は海嶺において生成される。

プレート沈み込み帯: 沈み込み帯参照。

プレート間地震 (inter-plate earthquake) : プレート内部で起こるプレート内地震に対し、プレート間地震は2枚のプレートの接面で起こる。沈み込み境界が卓越する日本周辺では沈み込み帯で起こる、いわゆる海溝型地震がこれに当たる。

流体 (fluid) : この特集では主として圧密による脱水反応や変成反応によって生じる水溶液を指す。組成的には酸素、水素、炭素、窒素、イオウなどより成り、一部炭化水素やガスとして分離していることが考えられる。

(技術編)

アニユラス: 坑井内の泥水が坑壁の貯留層中に浸透することにより、石油・ガス等の流体が坑壁側からおしやられることにより生じる、坑壁内のリング状の比抵抗値の低下した部分。

逸泥・溢泥: 循環泥水と地層水の圧力差により、循環泥水が地層中に逃げる (逸泥) のと、逆に地層水が坑井内に流入する (溢泥) 現象。

カッティングス: 坑井掘削時に出る岩石の掘屑。

ケーシング: 坑壁を保護するために挿入する鋼管。

コア: 坑井中心部を掘削せず外周部のみを掘削して残存させた円柱状の岩石試料。岩芯。

サイドトラック: 枝掘り。

ジャーリング: 振動。

セメンチング: さく井においてケーシングと地層の間にセメント液を注入してケーシングを固定する方法。

セメントプラグ: 地層の割れ目を閉塞したり、水圧破碎やサイドトラックの位置を制御するために、セメントによりシーリングをする方法。

ダウンホールモーター: 掘進ビットを回転させ、泥水を循環させるための坑底駆動モーター。

チュービング: 生産流体採取のためにケーシング内に設置されるパイプ。

ツール: 坑井内で各種検層、測定、掘削等に用いる道具。

泥水: 坑壁保持・ビットなどの冷却潤滑・掘屑回収・運搬、地層流体の噴出防止、などの目的で掘削中に坑井内を循環させる粘土等を混合させた流体。

トップドライブ: 掘削櫓の上部のトラベリングブロック直下に取り付けられ、直接掘管を回転させる装置。

ドリルカラー: 孔曲がり防止及びビットの給圧を増すための肉厚パイプ。

ドリルストリング: 掘管などの掘削編成をつなげた物の総称。

ドリルパイプ: 掘管。

ドローワークス: ローター型掘削機器の主要構成装置のひとつ。主としてビットや掘管等の揚降とロータリーマシンの駆動に用いられる。

パッカー: 水圧破碎の場所を制御するために用いる栓。

フィルターケーキ: マッドケーキないし泥壁。浸透性の地層の場合、泥水の一部が濾過浸透することにより坑壁に泥水固形成分が凝着することにより形成されるフィルム。検層データに影響を与えるので、キャリパー検層により厚さを測定する必要がある。

ビット: 坑底で岩石を切削・破碎する用具。

ブレイクアウト: 大きな差応力によって生じる坑壁の崩壊。

ベントサブ: 孔曲げのためにダウンホールモーター直上に接続する角度の付いた短管。

ホイップストック: ダウンホールモーターを使用せずに

坑井をサイドトラックするために、坑井に設置する楔状のツール。

ライナー：ケーシングを保護するための内張りパイプ。

リグ：掘削装置全体の総称。

ロータリーテーブル：ロータリー掘削機で掘管に回転を与える装置。

DP: Drill pipe. 掘管

FMI: Fullbore Formation MicroImager. 坑壁の電気抵抗を測定し、その相対変化を展開図のように画像化する装置。

MWD: Measurement While Drilling. 坑井の方位・傾斜や、温度・比抵抗などの地層の情報を掘削中に測定し、地上に泥水パルス圧力等で伝達する装置。

PDM: Positive Displacement Motor. ダウンホールモーターの一種。ビットシステム自体が流動する泥水により回転力を受ける様になっており、ビットに回転を与えるツール。

SP: Spontaneous Potential. 自然電位。地層水・伝導性泥水・シェールの相互作用により生じる電位。これにより、浸透性地層の存在や地層水の比抵抗値、シェール含有量が推定できる。

VDS: Vertical drilling system. 垂直掘削システム。

## 文 献

- 石油技術協会 (1990) 超深度陸上學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, 76p.
- 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。地質調査所技術資料no. 263, 217p.
- 日本電子工業振興協会編 (1995) ハードエレクトロニクスのニーズ。ハードエレクトロニクス調査研究報告 I, 5-7.

(受付：1997年3月13日；受理：1997年3月18日)