

JUDGE 計画における地球工学的挑戦

JUDGE Project as a Challenge of Geo-technology

浦 辺 徹 郎 (うらへ てつろう)

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻

須 藤 祐 子 (すとう ゆうこ)

東北大学大学院環境科学研究科
環境科学専攻

1. JUDGE 計画の科学的目的

JUDGE 計画 (Japanese Ultra-deep Drilling and Geoscientific Experiments) は、首都圏の地下に潜在するフィリピン海プレートの沈み込み帯に達する陸上科学掘削の提案である (Urabe et al.¹⁾, 浦辺ほか^{2)~4)}。房総半島南部には、この沈み込み帯の深度が10 km以浅の所があり (Ishida⁵⁾), 陸上の掘削地点から既存の掘削技術をもって到達することができる世界的に見ても非常にまれな場所となっている。そこはまた、かつて東京首都圏および南関東を壊滅させた元禄地震 (1703年, マグニチュード8.2) や大正関東地震 (1923年, マグニチュード7.9) (図-1) といった、プレート境界で発生する巨大地震の地震発生帯でもあり, JUDGE 坑はそこを貫くことを目的としている (図-2)。

ではなぜ、地震発生帯からコアを取得する必要があるのだろうか? 地震は応力の蓄積により断層面の固着域が破壊されることによって発生するが、断層面の物質、物性および状態は発生や伝播のメカニズムを左右するに

留まらず、発生する地震波の振幅や周期をも決定することが分かっている。さらに主破壊の前には、岩石のミクロな破壊や地殻流体の圧力の変化などの前駆現象が発生すると考えられるが、これらの微弱な変化は地表では検知できないことが多く、なるべく対象に接近して多項目の観測を行う必要がある。JUDGE 計画は掘削後の坑井をそのような長期観測にもちいることを提案している。必ず再来する地震の前駆現象を judge するためである。

ただし地震学の分野では南関東地域におけるプレート間巨大地震の発生は切迫していないとされている。瀬野⁷⁾がその再発間隔を193~257年と計算し、その仮説が受け入れられているからである。その正否はともかくとして、大正関東地震と同規模の地震が近い将来発生した場合6万人の犠牲者と300兆円の損害がもたらされると試算されている。2920万人の市民が住むこの地域の安全を確保するため、地震の前駆現象の把握の可能性を追求することへの理解を求めたい。

2. 本掘削に向けての地盤工学的な課題

房総半島南部の地質は鮮新世から更新世の砂岩および泥岩よりなる層厚数 km の堆積物により特徴づけられる。微化石データよりそれらの堆積物が300万年~100万年前には水深約2000 m の海溝斜面に堆積したことが分か

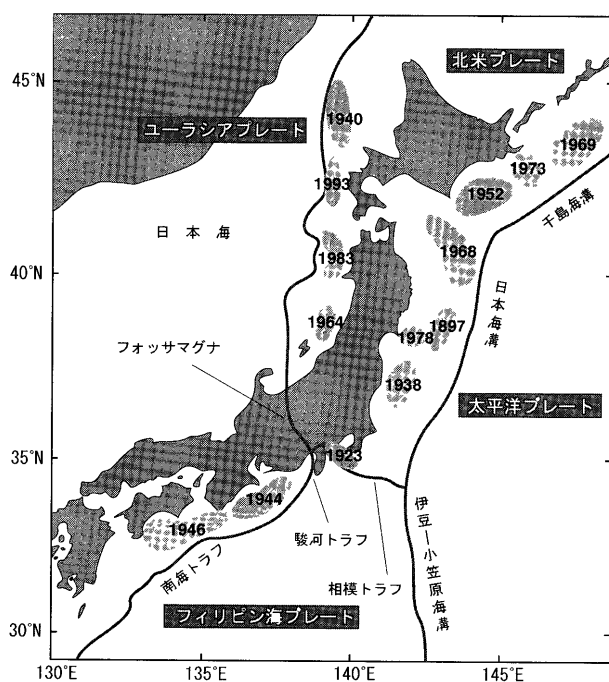


図-1 日本列島周辺のプレート境界と、過去100年間に発生したプレート間巨大地震の震源域および年号 (瀬野⁶⁾を改変)。1923年大正関東地震の震源域は相模トラフから南関東の陸上に及んでいる。

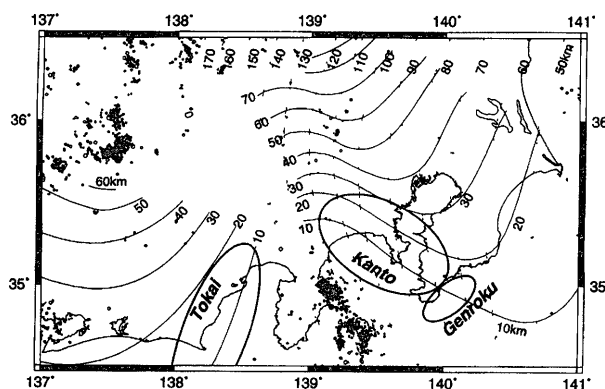


図-2 相模トラフおよび駿河トラフ沿いのプレート間巨大地震の震源域 (浦辺⁴⁾より引用)。実線と破線はそれぞれフィリピン海プレートと太平洋プレートの上面の深度 (Ishida⁵⁾)。黒点は1980~1995の $M > 2$ の10 km 以浅の地震 (防災科学技術研究所による)。JUDGE 計画の予定点は房総半島南端付近。

論 説

っている。これらの地層は房総半島の急速な隆起により“世界で最も年代が新しい”陸上の付加体となっている。付加体というのは沈み込み帯の海溝にたまった堆積物が掃き寄せられて、順次大陸プレート前縁に付け加わって形成された地層のことである（たとえば斎藤⁸⁾）。

JUDGE 計画は科学掘削であり、可能な限りコアを採取することが重要である。コアの採取は単なる掘削に比べ長時間を要し、掘削を困難にする要因となる。さらに上に述べた孔内観測の一部は裸坑のまま行う必要があるなど、科学的要請が実施計画を複雑なものにする可能性が高い。このような個々の問題点は科学者と技術者の綿密かつ長期的な話し合いの中で解決していかなければならないが、以下ではより一般的な課題について考察してみよう。

JUDGE 坑井は日本列島のような活動的な地質構造地帯における世界初の10 km 級坑井となるため、さまざまな技術的挑戦が存在する。一般的に言ってこのような超深度坑井の掘削を困難にするいくつかの要因としては、a) 高温、b) 坑壁の不安定、c) 大深度、d) 坑跡コントロール、e) 高圧（ガスキック）が挙げられる。坑跡コントロールについては、この10年で傾斜掘り技術が急速に発展したため、ツールの耐熱以外は問題がないと考えられる。よって、温度、坑壁安定性および地層圧に関するデータについて、現在までに分かっていることを以下にまとめた。ただし、いずれのパラメーターも現時点での厳密な推定は困難なため、パイロット坑井を掘削して解明することが必要となる。

2.1 温度

房総半島の深度10 km における地層温度はこれまで200～400℃としか推定できなかった（浦辺ほか³⁾）が、新たな熱流量／温度勾配データのコンパイルに基づき、300℃以下と再計算された（Tanaka et al⁹⁾）。この値は、本州太平洋岸の石油探査坑井で観測された低い（＜23℃/km）温度勾配と矛盾しない。JUDGE 坑井の技術的検討において、これまで温度は最大の問題であったが、新たに推定された温度が妥当であれば、既存の技術の改良により深度10 km の掘削は不可能ではないといえる（Sato¹⁰⁾）。

2.2 地層圧

房総半島南部には大深度坑井がなく、坑壁不安定性および地層圧に関するデータは得られていない。地質構造は地域により複雑なので、掘削前にフレークアウトの発生可能性を議論することは極めて困難である。塚原¹¹⁾はモデル計算を通して7 km 以深は無条件にフレークアウトが発生することを示唆している（間隙圧はその深度の静水圧と等しく、岩石強度はその間隙圧が大きくなると小さくなると仮定している）。一方、Tsukahara et al¹²⁾は断層付近では急激な応力偏差の減少が観測され、そのためフレークアウトが発生しないとしている。プレート境界付近で最大変位を示すデコルマ面（ここで上下の地層がお互いに無関係に変形・変位する）ではすべりの影響があるため、周辺より応力偏差が小さく掘削条

件は良いかも知れない。

2.3 深度

房総半島およびその沖ではこれまで幾つかの屈折法地震探査が実施されてきたが、海陸境界にまたがる大規模反射法地震探査は行われていなかった。しかし平成14年度に佐藤助教授（東大地震研）らのグループにより房総半島を縦断する調査が行われ、プレート境界面の深さおよび付加体の地質構造が明らかにされつつある。

3 JUDGE 計画国際ワークショップ

2002年11月14日～11月17日、千葉大学においてJUDGE 計画国際ワークショップが開催され、国内から104名、国外から16名の参加を受けて、活発な議論が交わされた。このワークショップはICDP（国際陸上科学掘削計画）の援助と共催、および科研費基盤研究C（企画調査、代表 浦辺徹郎）による支援を受けて開催されたもので、目的はおおまかに三つあった。その第1は、沈み込み帯掘削における最重要の科学的問題はどのようなものであるかを明らかにすることである。また房総と他の陸上および海底における沈み込み帯掘削計画との交流を図ることにより、房総半島が科学目的を果たす上で世界的に最適の場所であるかどうか初心に帰って見直すことも目指していた。第2に、今回のワークショップでは2001年より国内で行ってきた科学者と技術者によるフィードバックの結果を世界の第一線のエキスパートに聞いてもらうとともに、彼らから最新の掘削技術の進展を紹介してもらうことを目指していた。第3は、世界で最も新しい付加体の岩石を実際に見てもらおうとともに、1703年と1923年の地震によって隆起した地層の露頭を観察するため、1日の野外巡検を実施することである。われわれはこの計画に諸外国からの参加者を求め、それらの人々と国際的な科学者、技術者のチームを結成してICDP と日本政府に対するJUDGE 計画の正式プロポーザルを作成することを目指している。

3.1 第1日目

ワークショップの第1日目には、地球科学の専門家からプレート境界域における巨大地震発生の機構や沈み込み帯のプロセスについてレビュー講演が行われた。中でも衝撃を与えたのは、世界の地震学の泰斗である金森教授（カリフォルニア工科大学）の講演であった。それによると、これまで巨大地震の震源直近での観測データが極めて限られていたため、現在の超高層ヒルの耐震基準は中規模の地震による短周期の地震動データをもとに作られている。しかし台湾の1999年集々地震では地震断層面の潤滑効果によりすべり速度が速くなる一方、高周波の成分が発生せず結果として大きな水平振動が観測され、巨大地震による振動に近いものが観測された。そのデータをもとに三次元シミュレーション計算をしてみると、現在の超高層ヒルの破壊は免れ得ないとの結果が得られた。よって今後巨大地震の研究にとって最も必要なことは、掘削をして断層面の物性と厚さを直接観察することにあると強調された。

1 日目の後半は海陸にわたるプレート境界掘削の計画が数例紹介された。その結果、沈み込み帯掘削は1本ですべてが解決するわけではなく、プレート境界面の温度、深度、固着率、流体の存在などによる差がその後のプロセスに大きく影響するため、複数の掘削を行うことが不可欠であることが認識された。

3.2 第2日目

第2日目は JUDGE 掘削のベースとなるさまざまな現象やデータがレビューされた。特に瀬野教授（東大地震研）により、東海地震の再来が心配されている南海トラフと、JUDGE 計画が対象としている相模トラフの沈み込みの様式の相違について見解が述べられた。それによると、南海トラフでは地震に伴うすべりてプレートの運動量がほぼ説明されるのに対し、相模トラフでは約30%しか説明できない。これは沈み込むプレートの表層が前者では海洋地殻であるのに対し、相模トラフでは伊豆の島弧地殻であることによっていると推定される。しかし相模トラフ側では研究が不足しており、新たな視点で相模トラフの地震発生機構を再度見直す必要があることが指摘された。

3.3 第3日目

第3日目には、房総半島南端の地質巡検が行われた。半遠洋性堆積物よりなる更新世の付加帯が既に大きく褶曲している有様や、元禄型および大正型の関東地震で隆起した地形などを見学した。露頭の観察では付加体中に微細構造が見出され、それが多くの地質情報を持っていることから、計画ではオールコアで掘削すべきとの意見が大勢を占めた。掘削技術者からは、この岩相であれば掘進速度が極めて早いであろうとの感想が述べられた。

3.4 第4日目

それまでの発表を受け、第4日目には暫定的な JUDGE 計画の仕様（図-3）に沿って技術面から JUDGE 坑井の討論が行われた。まず、国内で超深度掘削にかかわってきた斎藤教授（東北大）と国内の主要な掘削会社によって JUDGE 坑井の実現の可能性と問題点が述べられたほか、掘削ツールを開発している海外の会社によって、大深度まで安定して掘削するための新しい技術が紹介された。大深度掘削において問題となるのは、①コアリング方法、②ケーシングプログラム、③高温対策の3点と考えられるので、以下それらについてどのような話し合いが行われたか述べる。

科学目的にかなうコアを採取するためには、コアリング方法の選択が最重要課題となる。最も有効と考えられるのは KTB（西ドイツ大陸超深度掘削計画）や ODP（深海底掘削計画）で用いられたワイヤライン工法であるが、現在のところ10 000 mの長さのワイヤーは無く工夫が必要である。さらに重要なのはコアストリングスの設計である。大深度において耐久性と信頼性のあるツールを考える必要がある。Coring-While-Drilling (CWD) を用いるのも一つのオプションといえる。

ケーシングプログラムも非常に重要である。通常のケーシングを使用すると10 kmで5段階くらいのケー

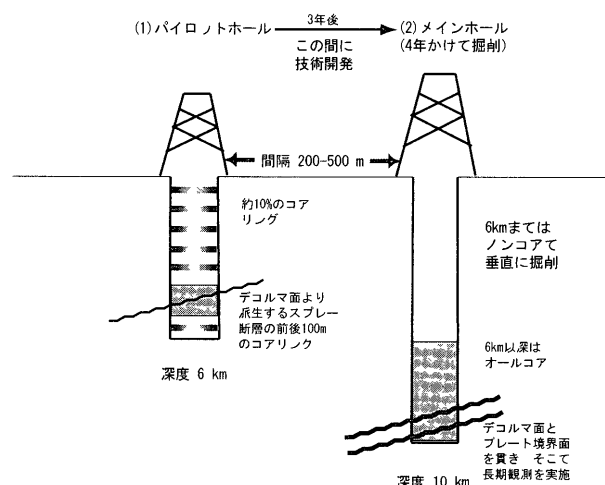


図-3 JUDGE 計画の仕様概略。まず6 kmのパイロットホールを掘削し、地殻応力などの未知の情報を得た後、技術開発を行ってメインホールに取り掛かる。スプレー断層（ないしは Out-of-Sequence 断層）はそれに沿って流体の移動があるのではないかと推定されているもの。

シングプログラムが考えられるが、予期しないトラブル（崩落や逸泥など）により予定外にケーシングを挿入しなくてはならなくなると、結果として掘削深度が制限される恐れがある。しかし、ワークショップで紹介されたように、ケーシングドリリングやエキスパンダブルケーシングなどの新技術を使用すると、この危険性が大きく軽減され得る。

ケーシングドリリングを使用すると、掘進→揚管→ケーシング挿入→セメンチングという従来の工程に対して、掘進→セメンチングのように工程が短縮される。つまり、ケーシングドリリングはケーシングの挿入がドリリングと同時にされるため、崩落しやすい地層を掘削する際に特に有効である。現在までに54本の坑井において使用された実績があり、従来型と比較しても引けをとらない平均掘進率を示しているが、3 000 m以深における掘削実績が無く、大深度掘削にどれほど適用できるかは議論する必要がある。

エキスパンダブルケーシングを使用すると、ケーシング挿入のたびに小さくなっていた坑井の径が小さくならずに同じ径を保持できる。これにより径が小さくなる段階を遅らせることができ、坑井径による掘削深度の制限がなくなる。現在までに97本使用されていて、特にオープンホールライナーの実績が高い。現在までのセット最高深度は約8 500 mで、最高坑底温度は約200℃であり、JUDGE メインホールにも十分適用可能と考えられる。

JUDGE 計画の場合、大深度であることだけでなく10 kmにおける地層温度が300℃に達するという点が、問題を一層困難にする。高温のため、掘削ツールや検層ツール中の高分子材料やエレクトロニクス、さらには泥水も、その使用を制限されることになる。泥水循環や TDS-Cooling 法などによる坑内冷却も可能であるが、

論 説

コアリングという性質上、掘削中に十分な泥水を送れずに温度上昇が著しくなることも想定できるため、高温用ツールの開発が望ましい。特に、坑跡を垂直に保つための Vertical Drilling System (VDS) や掘削中に坑内の状況を測定する MWD などを高温に耐えられるように発展させるか、あるいはその代替技術の開発が必要である。

6 km のパイロットホールについては現在の技術で問題なく掘削可能であると考えられる。したかつて、まず 6 km のパイロットホールを掘削して地下の詳しい情報を得、それを基に 10 km メインホールを掘削するのが確実だというのが掘削技術者たちの一致した見解であった。

4 まとめと JUDGE 計画の将来展望

ワークショップの総合討論では、房総半島南部が超深層掘削を行うターゲットとして科学的にも技術的にも優れた場所であることが全員一致で結論された。また、それを実現するための技術についても、今や決して夢物語ではないので今後世界各国の精鋭メンハーによって詳細な検討を行っていくべきとの助言がなされた。ICDP の科学諮問委員会委員長である Zoback 教授（スタンフォード大学）は、まず南房総で掘削をして、その経験を他の掘削計画に活かしていくべきでないと感想を述べられた。計画を前に進めるキーは、そのような作業を行うコアグループの結成である。

しかし現実には JUDGE 計画は 1996 年にフィージビリティ調査の予算が 1 回付いたきりで、ワークショップ開催以上の予算獲得は実現していない。現在のような緊縮財政のもとでは、パイロットホールの予算はおろか、そのようなコアグループの結成もままならない状況が続いている。それを打開していくためには JUDGE 計画を広く社会に知ってもらい、支持者の輪を広げていく必要がある。その意味で、最近注目すべき動きがあった。本年 4 月の日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC) (<http://www.aesto.or.jp/j-desc/index.html>) の結成である。これは地球掘削科学計画推進を目的とする研究組織 機関の連合体で、現在は IODP (統合国際深海掘削計画) 部会のみだが、今秋に陸上掘削部会の設立が計画されている。JUDGE 計画の検討はこれまで超深度コアドリリング技術研究会 (吉田國夫会長) において行われてきたが、今後は陸上掘削部会の専門部会等においても議論が進められることになるだろう。

ドイツの KTB (9 101 m) とロシアの SG-3 (12 261 m) の掘削終了から約 10 年が経過し、当時は無かった新技術も開発され、コストも大幅に下がっている。それらより得られた教訓と新技術を組合せて、メインホールの掘削計画を練るとともに、開発が必要な技術課題を明らかにすることが技術面での今後のステップとなるだろう。

5. 謝 辞

JUDGE 計画のアイテアは多くの方々との討論の中から生まれたもので、他田隆司 伊藤久男 伊藤谷生 岡

部高志 小川勇二郎 小村健太朗 加藤碩一 金子信行 木口 努 木村克己 木村 学 倉本真一 斎藤実篤 佐倉保夫 佐竹健治 高田 亮 竹野直人 田中明子・塚原弘昭 中島 隆 中島善人 長沼 毅 藤本光一郎 宮内崇裕 宮崎光旗 横倉隆伸 吉田國夫その他の地球科学者と、浅井忠一郎 池田正市 加藤邦明 木村彰宏 小島 齊 斎藤清次 佐野正一 品田正一 副島寅次郎 島田邦明 大門勝悦 田崎誠司 戸野 聡 友本 潤 三ヶ田 均 南 和雄 森田信男その他の技術者 (いずれも五十音順、敬称略) による共同提案である。それらの方の中でも、計画の技術面を取りまとめておられたのは本年 3 月 20 日に 53 歳の若さで急逝された故斎藤清次東北大学工学部教授である。JUDGE 計画は彼の死の衝撃から立ち直れずにいるが、復活を目指してこの小文を彼の霊前に捧げたい。

参 考 文 献

- 1) Urabe, T, Tanaka, S, Kiya, Y and Soejima, T Japanese ultra-deep drilling and geoscientific experiments (JUDGE) project an overview in Vikram Rao, M and Rowley, J eds "Drilling Technology—1992—", The American Society of Mechanical Engineers, PD, Vol 40, pp 89~94, 1992
- 2) 浦辺徹郎 森田信男 木口 努 宮崎光旗 倉本真一 プレート沈み込み帯への掘削計画 JUDGE (1)要約 地質調査所月報, Vol 38, No 3/4, pp 122~125, 1997a
- 3) 浦辺徹郎 森田信男 木口 努 宮崎光旗 倉本真一 プレート沈み込み帯への掘削計画 JUDGE (2) JUDGE 計画はなぜ必要か? 地質調査所月報, Vol 38, No 3/4, pp 126~131, 1997b
- 4) 浦辺徹郎 木村克己 中島 隆 倉本真一 高田 亮 佐竹健治 藤本光一郎 竹野直人 中島善人 金子信行 プレート沈み込み帯への掘削計画 JUDGE (3) JUDGE 計画の科学的目的 地質調査所月報, Vol 38, No 3/4, pp 132~159, 1997c
- 5) Ishida, M Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J Geophys Res*, Vol 97, pp 489~513, 1992
- 6) 瀬野徹三 日本周辺のプレート境界とプレート間地震の震源域, 科学, Vol 63, 711~719, 1993
- 7) 瀬野徹三 地殻上下変動より推定された相模トラフ巨大地震の再来周期, 地震, 第 2 輯, Vol 30, pp 253~264, 1977
- 8) 斎藤実篤 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, pp 24~27, 1995
- 9) Tanaka, A, K Omura, and R Ikeda Thermal regime of Boso Peninsula and surrounding area, Japan, Proc JUDGE Workshop, Chiba Nov 2003, 2003 (Abstract)
- 10) Saito, S How difficult/easy to make JUDGE-hole?, Proc JUDGE Workshop, Chiba Nov 2003, 2003 (Abstract)
- 11) 塚原弘昭 深層ボーリングによる地殻応力測定—測定限界深度について—, 月刊地球, Vol 12, pp 624~628, 1990
- 12) Tsukahara, H, R Ikeda and K Omura In-situ stress measurement in an earthquake focal area *Tectonophysics*, Vol 262, pp 281~290, 1996

(原稿受理 2003 9 24)