

超深層ボーリングはなぜ必要か

佐藤 壮 郎¹⁾

はじめに

1969年7月, アメリカの月探査船アポロ11号が月面に着陸した。世界中の人がテレビに映しだされた月面での調査の様子に興奮した。なぜ人類は月を目指したか。アメリカ政府にはいろいろな思惑があったかも知れないが, 最大の動機は人がまだ誰も行ってないところへ行きたい, そしてそこに何かがあるかを知りたいという知的好奇心であったろう。少なくとも世界中はそう理解し, それが故にこの偉業をなしたげたアメリカを尊敬した。

アポロ11号とその後の探査船がもち帰った大量の月の岩石試料は, その後の研究により地球の初期史を書き換えるほどの地球科学上の成果をもたらした。さらに引き続きマリナーやヴェイキングなどによる一連の内惑星の探査により, 火星や金星の表面の様子が明らかになった。その結果, 地球の進化に関する我々の理解も飛躍的に深まり, 比較惑星学という新しい学問分野を生んだ。

超深層ボーリングがなぜ必要かという質問に対しても, 関係者のもっとも正直な答えは, 誰もそこまで到達していないから, そこに何かがあるか分からないから, というものであろう。特に我が国の場合は, 世界中でもっとも活発な島弧に位置しており, 日常的に火山が噴火し, 地震が起り, 温泉が湧きだし, 地熱による発電が行われている。これらのすべての現象は地下深部に原因があり, その究極的なエネルギー源は, 1年に数センチの割合で日本列島の下に潜り込んでいるといわれている海洋プレートとの動きにあるとされている。

一体地下深部で何が起っているのか。海洋プレートは本当に沈み込んでいるのか, その動きは連続的なのか, 大陸プレートとの境界はどうなっているのか, エネルギーや物質の収支はどうか。もし超深

層ボーリングがこれらの疑問に答えられるなら, その成果は地球科学のみならず科学一般への第一級の貢献であり, ボーリングの必要性の説明として十分なのではなかろうか。

しかし国の予算を使う大プロジェクトの場合には, その成果の社会的効用についてより明確な説明が必要であろう。そこで誇大広告であるという批判を覚悟の上で, 超深層ボーリングの宣伝をしてみたいと思う。

地震予知への貢献

今年1月17日早朝, 淡路島北端を震央としたマグニチュード7.2の地震が発生した。兵庫県南部地震と名付けられたこの地震は, 野島断層から六甲断層系に続く一連の活断層が動いたために生じた典型的な直下型地震であった。その直接的・間接的被害は想像を絶するものであり, 首都圏を始め人口密集地域における直下型地震襲来の恐怖がにわかに現実的なものとなった。今回私たちが痛いほど思い知ったのは, 直下型の地震はマグニチュードが比較的小さくとも, 局地的に大きな被害をもたらす, ということである。東京での代表的な直下型地震といわれる安政江戸地震(1855年)は, マグニチュードは, 6.9であったが直径20-30 kmの範囲が震度6に達し, 14,000戸以上の倒壊家屋と1万人近くの死者を出したという。局地的とはいえ, 現在の東京都心部が直径20-30 kmにわたって被害を受ければ, 人的被害はもとよりその政治的・経済的打撃は兵庫県南部地震をしのぐ甚大なものになるだろう。

マグニチュードが小さい直下型地震の予知は, 現在の科学技術レベルではほとんど不可能だとされている。一般には誤解も多いようだが, 1978年に制定された「大規模地震対策特別措置法」の対象とな

1) 地質調査所 所長

キーワード: 超深層ボーリング, 直下型地震, 炭素循環

っているのはマグニチュード8クラスの巨大地震であり、具体的には巨大地震の襲来がもっとも切迫しているとされている東海地方に対して、予知システムの構築・防災対策の強化などの措置が取られているに過ぎない。直下型の地震に対しては何の対策もない。

東京圏を襲ったマグニチュード6以上の直下型地震は、1615年から現在まで21個が数えられている。そのうち3個はマグニチュード7.0であった。もっとも最近のものは1922年の浦賀水道地震であり、その後70年間は被害の出るような地震は起こっていない。力武常次氏によると、今後10年間に東京圏をマグニチュード6以上の直下型地震が起こる確率は40%に達する。これは前述した東海地震より高い確率である。

なお、1923年の関東地震(M=7.9)は、相模トラフ沿いに起こった海溝型の地震であり直下型ではない。かつて関東地震の69年周期説が流布されその再来が恐れられたが、力武氏によれば、今後10年間に相模トラフ沿いに地震が起こる確率は19%であり、確率40%に達するのは来世紀半ばである。

さて、超深層ボーリングは、果たして直下型地震の予知に役立つのか。

東京圏の直下型地震は、相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートと日本海溝から沈み込む太平洋プレートの衝突に起因する応力集中地域の周辺活動として起こるとされている。従って、明瞭な活断層の動きにより生じた兵庫県南部地震とはやや異なり、より直接的にプレートの沈み込みに関連している地震といえよう。

震源の深さは30 km ないしそれより浅いらしい。日本でまず実施すべき超深層ボーリングとして地質調査所が提案している「JUDGE 計画」は、フィリピン海プレート北端部をとりまく地域(静岡市周辺、三浦半島、房総半島など)で、このフィリピン海プレートの上面を貫こうというものである。もちろん深さは10 km 程度なので地震の巣そのものには達しないが、巣の縁くらいはつかまえることができよう。

直下型の地震の予知が難しいのは、マグニチュードが7ないしそれ以下なので前兆が現われる範囲が狭く、また本震までの先行時間も短いからである。さらに首都圏では、軟弱な第四紀層によって厚

く覆われているうえに、交通などの社会・経済活動によるノイズが多いことも、前兆を捕えることを困難にしている。防災科学技術研究所では、埼玉県岩槻などで基盤まで達する3000 m級のボーリングを掘り、微小地震などの観測を行っているが、予知システムとしては到底満足のいくものではない。

もし超深層ボーリングが計画どおり実施されれば、地震が起こるとされているプレート上面そのもので種々の観測が可能になる。その結果、多くの有効な前兆現象が捕えられるであろう。地震のエネルギーが溜まる震源域の広がりによく分かっていないようであるが、マグニチュード7クラスの地震の場合、地殻の異常隆起などの前兆現象が震源から最大70 km 程度まで(マグニチュード8クラスの場合は200 km 程度まで)現われるとされているから、震源域のひろがりもその程度であるらしい。伊豆半島か房総半島でボーリングを行えば、過去の首都圏直下型地震の震源のほとんど全部が70 km 以内にはいる。と言うことは、震源域の中で直接歪変化などのモニタリングが行えるということになる。

1988年に国土庁が公表した「南関東地域地震被害想定調査の結果」によると、関東地震クラスの地震が南関東を襲った場合、15万人に達する死者が出、40万棟近くの建物が大破し、最悪の場合260万棟の建物が焼失するという。これらの被害を金額に換算すると、93.6兆円に達するという計算結果もある。直下型地震の場合は被害を受ける面積はこの想定より狭くなるだろうが、それにしても我が国の社会・経済のみならず国際社会に対しても、その直接的・間接的被害は甚大なものとなることは今回の阪神・淡路島大震災の例をみても明らかである。我が国は、先進国の中で唯一地震の危険域の中に首都を持つ国である。たとえ超深層ボーリングに数100億円かかったにしても、首都圏の地震予知に貢献するとすれば安いものではなからうか。

地球環境問題への貢献

地球環境の悪化に対して何らかの対策を取る必要があるという認識は、今や世界共通のものとなった。特に大気中の二酸化炭素の増大による地球温暖化は最大の問題である。

産業革命以来、大気中の二酸化炭素が徐々に増大

しているというデータを見せられると、化石燃料の使用が二酸化炭素増大の唯一無二の原因であると誰もが信じたくなる。しかし大気中への二酸化炭素の放出源は他にも沢山ある。それらを無視して温暖化問題を論ずるのは短絡的であり、少なくとも科学的な態度ではない。

東京大学の松井孝典氏によると、ほとんど二酸化炭素からなる60気圧の原始大気から、現在の0.03%の二酸化炭素を含む1気圧の大気に変化するには、次のようなプロセスが必要であった。

まず、マグマ・オーシャンに覆われていた地球が次第に冷え始めると、水蒸気として大気に含まれていた大量の水分が雨となって地表に降り注ぎ、海が誕生した。この海に溶け込むことにより、二酸化炭素大気は数気圧まで減少した。海水中の二酸化炭素はカルシウムイオンと結び付いて炭酸カルシウムとして海底に堆積し、当時非常に活発であったマントル対流に乗って地球内部に沈み込むが、やがて火山ガスとして再び大気中に放出される。ここで初めて気圏・水圏・地圏の間の二酸化炭素の循環が成立するが、大気中の二酸化炭素量はほとんど減少しない。

やがて海に覆われていた地球に陸地が現われ、徐々に大陸規模に成長していく。その結果それまでの地球内部へ沈み込むだけであった海底堆積物の一部は大陸の縁に付加されるようになる。もちろん炭酸カルシウム(石灰岩)は付加される堆積物の重要なメンバーであり、付加が続くにつれて大陸は二酸化炭素の巨大な貯蔵庫となった。このプロセスの影響は大きく、大気中の二酸化炭素の量(分圧)は1気圧弱まで下がった。そして最後に生物が登場する。サンゴ礁や石灰質有孔虫は二酸化炭素を炭酸カルシウムとして固定し、藍藻類やその後陸上に進出した植物群は二酸化炭素を炭素と酸素に分解し、炭素を主成分とするその遺骸は地中に埋もれていった。かくして21%の酸素と0.03%の二酸化炭素を含む現在の大気が形成されたのである。

このように現在の大気組成は、大気・海洋・堆積物・大陸・マントル・生物などの間の微妙なバランスの上に成立しているものであり、それらの間を堆積作用・風化作用・プレート運動・火山活動・生物活動そして最近の人間の生産活動などを介して、様々な化学反応や物理現象が結び付けているのである。

さらにいくつかの数字を挙げてみよう。地殻を含めた地球表層部にある炭素の全量は 9×10^{16} トンであり、そのほとんどすべてが岩石中にある。大気中には 7×10^{11} トン、海洋中には 3.6×10^{13} トンが含まれ、それぞれ全量の0.001%弱と0.04%に過ぎない。岩石中の炭素のうち13%が有機炭素であり、そのうちのわずか0.1%が石炭や石油の化石燃料である。岩石中の炭素の70%強は石灰岩中にあり、全石灰岩が分解すると、大気は60気圧の二酸化炭素大気に戻ってしまう。

このようにしてみると、地圏を抜きにして地球の炭素循環を論ずることがいかに不十分なものかがよく分かる。上述した大気・海洋・大陸・生物の間のバランスが成立した後でも、過去の地球において大気中の二酸化炭素濃度はかなり変動した。とくに白亜紀には現在よりはるかに高かったらしい。その原因は当時活発化した火成作用により、大量の二酸化炭素が大気中に放出されたためと推定されている。

火成作用や変成作用は、プレートの沈み込み帯上の下部地殻で起こる。下部地殻でどのような反応が起き、物質がどのように挙動しているかについては、まだ何も分っていないと言ってよい。またプレートの沈み込みとともに、炭酸カルシウムに富む堆積物がどの程度マントルの中に引きずり込まれ、どのように周囲の岩石と反応しているかも分かっていない。超深層ボーリングは、これらのことを明らかにするためにもっとも有効な方法である。

二酸化炭素問題を、化石燃料の使用削減などというような対症療法的で皮相な対応で終わらせずに(それですらほとんど不可能であろうが)、地球における物質循環システムの全体像を明らかにするという壮大な科学的挑戦のきっかけにしたいものである。地球環境問題は、結局は全てそこに行き着くから。

フィールド COE の提唱

フィールド COE というのは耳慣れない言葉かも知れない。COE は Center of Excellence の略で、世界の優秀な研究者を集めて基礎研究を行う、国内外に開かれた先端的研究所というイメージであろうか。国立研究所をこのような研究所に育て、我が国の基礎研究を世界最高レベルに引き上げる必要がある。

るとして、最近通産省や科学技術庁がその育成に力をそそいでいる。

このような動きに対して地質調査所では、フィールドCOEということ提唱している。COEにフィールドを付けたのは、野外のフィールドこそが地球科学者にとって最良の研究施設であるという意味である。活発な島弧である日本列島は、それだけでもフィールドCOEにふさわしい場である。そこに超深層ボーリングが実施されれば正に鬼に金棒、世界の地球科学者が集まる最先端のフィールドCOEが実現するだろう。これから次々と産み出される研究成果が地球科学の飛躍的進歩に貢献し、地震予知

や地球環境問題の解決に結びついていく。これが私達の夢である。

なお、本稿は「超深研ニュースレター」(平成4年7月)に掲載された拙文の一部修正を加えたものである。転載を許可された超深度コアードリリング技術研究会に謝意を表す。

SATO Takeo (1995): Why are Super-Deep Drillings needed?

〈受付：1994年11月18日/1995年3月31日改〉

「超深度科学掘削に関する東京'93ワークショップ」から

JUDGE 計画に対するコア掘削と戦略

John C. ROWLEY (Pajarito Enterprises)

これまでの多くの超深度掘削計画は、古い結晶質基盤岩が対象となっている。しかし、JUDGE 計画では、非常に複雑で、若く、しかも不安定な地層が対象となる可能性が高いので、従来の(例えばドイツのKTB)計画とは異なった戦略が必要と思われる。その場合でも、KTBで採用されている3段階の掘削という基本戦略は、依然有効と思われる。この3段階の掘削とは、第1段階で幾つかのパイロット孔(深度1~7 km)をワイアラインコア掘りにより掘削し、第2段階でパイロット孔の到達深度までできるだけ垂直な坑井を掘削し、最後の第3段階で特別に設計・開発した超深度コア掘削システムを用いて目標深度までの掘削を行うという戦略である。第1段階で複数のパイロット孔を掘削することは、計画の実現可能性を最大限高めることになる。VSPや、他の物理探査手法を用いることにより、パイロット孔以深の岩盤条件についての情報を得られるばかりでなく、プレート境界の位置、構造、厚さや性状を予測することができる。また、これらパイロット孔は超深度ボーリング坑の上部について豊富な情報を提供するので、第2段階でその部分のコア掘削を行わなくてもよくなる。

第2段階の掘削については、第1段階の結果によって坑井の設計が容易になり、掘削時のリスクも回避でき

ようになる。また、第1段階のパイロット孔を併用してクロスホール検層やVSPを行うことで、より詳細に地質条件を把握することができるので、深部掘削のリスクを低減できるであろう。

第3段階では、目標である接触ゾーン付近が不安定な地層からなる可能性が高く、掘削困難な地層でのコア掘削が予想される。このため、掘削には特別なコア採取システムを考える必要がある。このシステムの開発には2重壁コア採取システムの応用が考えられる(口絵p. 1)。このシステムでは、2重壁のアニュラス部を泥水の循環に使えるので、流体の条件、圧力、温度の制御が容易になる。また、坑井壁面と2重壁の外管とのアニュラス部を別な流れで制御したり、あるいは流体を停止したままにできる。このため、坑井の安定性の制御が可能で、しかも地層の汚染を最小限に抑えることができる。また、泥水の順循環と逆循環の両方を行うことができ、しかもそれを坑井壁面と外管、外管と内管の両方のアニュラスで行うことができる。更に、このシステムでは種々のコア採取方法を用いることができる。深部で使用するためには、例えば、外側に中空状のダウンホールモータを配置し、内部でワイアラインコアリング装置を使用する組み合わせが有効であろう。ダウンホールモータ駆動のリーミングタイプのビットの採用によって、坑井の直進性と垂直性を制御することができる。また、これと独立して、内側に小坑径のワイアラインコア採取システムを用いることもでき、外側の重い2重壁掘り管を引き抜かず、下部の小坑径裸坑部でのサンプリングや計測を行うことができる。(抄訳：松永 烈)