

コア・プロジェクト：水圧破碎による 地球深部へのサンプル・リターン計画

中島 善人¹⁾

1. はじめに

コア・プロジェクト(Core Project)とは、地下2900kmにある地球中心核(コア)までの直接探査を行う計画である(中島, 1992)。本論文は、水圧破碎を利用したコア・プロジェクトを思考実験で行い、サンプル・リターン(地球深部の岩石サンプルの地表への回収)の可能性を考察したものである。

地球惑星科学の醍醐味の一つに、直接探査による、予想もしなかった未知の現象との遭遇がある。たとえば、深部太陽系惑星の直接探査を行ったボイジャーは、イオの火山活動や海王星の大黒斑という感動的な画像を地球に送信してくれた。このように直接探査は、地球惑星科学を本質的に進展させるために必要不可欠な観測データをもたらしてくれる。

さて、目を天空(惑星探査)から足元(地球内部探査)に転じよう。地球内部の直接探査は、地球の進化を理解したいという知的好奇心を満たすだけでなく、地震予知や環境問題などの社会問題の解決にも貢献するという重要な成果をもたらす(佐藤, 1995)。したがって、JUDGE計画(浦辺ほか, 1995)などの超深層ボーリングによって地球深部を探査することは、我々地球科学者の社会に対する義務といえる。しかし、地球内部の直接探査は、太陽系のほぼ全域を制覇した惑星探査にくらべて、達成した探査距離が桁違いに小さい。たとえば、陸上学術ボーリングが、ロシア、ドイツ、オーストラリアなどで実施された(斎藤・浦辺, 1996)。しかし、その達成深度は高々12kmである(地球半径の約0.2%)。地下の高温によるビットの劣化などの技術的困難のため、地球深部(たとえば下部マントル)までのボーリングは非常に困難である。それならば、ボーリング以外の直接探査

原理を新たに開発する必要があるのではないだろうか?

このような背景により、地表からコアまでの直接探査(コア・プロジェクト)を実施するにあたって発生する原理的諸問題の洗いだしと、その問題の解決の試みがなされた(中島, 1992)。本論文は、その続編(改良版)である。前回の論文(中島, 1992)では、半径5km ($5.2 \times 10^{11} \text{m}^3$)の固体鉄でできた地底探査船が自重でマントル中を沈降して行き、100年後にコア・マントル境界(地下2900km)に到達することを示した。これに対して本論文では、鉄をメルトの状態として使用すれば、ほぼ同じ量 ($4.9 \times 10^{11} \text{m}^3$)の鉄を使って、わずか20日でコア・マントル境界に到達できることを示す。

まず2.で、水圧破碎によるコア・プロジェクトの可能性を論じ、次に3.で今後の展望をのべる。3.で述べるように、水圧破碎による直接探査は、原理的にも未解決な問題が多くあり、現段階では実現性の点で、従来の超深層ボーリング法にくらべるべくもない。したがって、本論文を、「現在行われている陸上学術ボーリングにすぐに役に立つ論文」としてではなく、「数百年後に実施されるであろう地球深部直接探査に役に立つ論文」として読んで頂ければ幸いである。

2. 水圧破碎によるコア・プロジェクト

コア・プロジェクトの内容をまず明示しておこう(第1図)。コア・プロジェクトは、(i)水圧破碎と(ii)サンプル・リターンの2段階からなる。(i)水圧破碎：鉄を主成分とするメルト(マントルより高密度)を、地表から地球内部にむけて強制的に注入する。注入された

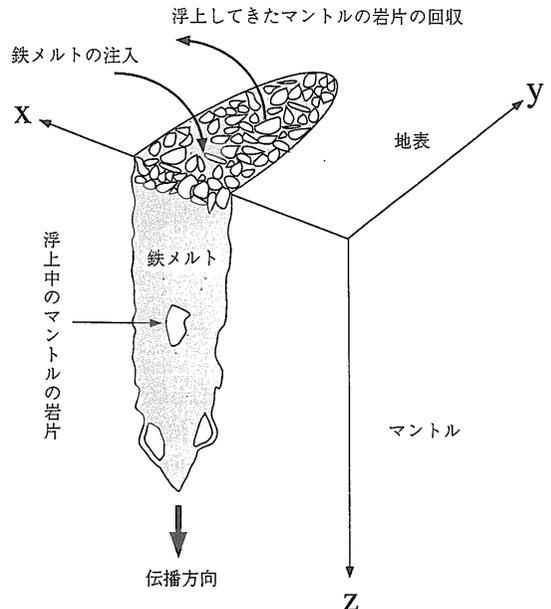
1) 元東京大学地質学教室, 現地質調査所 地殻物理部

キーワード：クラック, コア, JUDGE計画, 水圧破碎, 超深度掘削, ボーリング, マントル

メルトは、水圧破碎によってマントルを脆性的に破壊しながら、負の浮力に駆動されてコアまで突き進む。(ii) サンプル・リターン：水圧破碎によって破壊されたマントルの一部が、岩片 (Fragment) になり、鉄のメルト中を正の浮力に駆動されて浮上していき最終的には地表に達する。その岩片を回収して、コア・プロジェクトは終了する。中島 (1992) のような地底探査船は、本論文では使用しない。鉄は、宇宙・地殻における元素存在度が高くかつマントルよりかなり高密度なので、水圧破碎の作業流体として最適である。また、このプロジェクトには、地表に浮上してきた岩片が地下何kmの深度の岩石であったのか分からないという欠点がある。しかし、岩片自らの浮力で地表に来させるとするのは、サンプル・リターンの最もシンプルな形なので、本論文ではこの方法を採用する。

水圧破碎 (Hydrofracturing または Hydraulic Fracturing) とは、流体 (水とは限らない) に充填されたクラックが固体 (たとえば岩石) 中を伝播する現象である。水圧破碎は、石油工学 (Valko and Economides, 1995)、地熱工学、火山学 (Rubin, 1995)、地球惑星物理学、パターン形成の物理学、という多方面で登場する (中島, 1995)。たとえば、マグマや水が地殻を割る事実は、地球科学者によく知られている (小出, 1982)。また、地球の初期進化におけるコア・フォーメーション (Stevenson, 1981) では、実際に鉄のメルトが、プロトコアを破壊しながら、地球中心部に向かって落下していった可能性がある。したがって、コア・プロジェクトは、小規模なコア・フォーメーションを人工的に再現することを意味する。

純粋な鉄メルトの凝固点は、たとえば1気圧のもとでは1540°Cもある。したがって、純鉄のメルトで水圧破碎を行うと、マントルの温度のもとでは凝固してしまい、クラック伝播が停止する。鉄の代わりに水銀を使用すれば凝固の問題から開放されるが、水銀は元素の地殻存在度が低いので十分な量を確保するのが困難である。結局、元素存在度の大きい鉄を使用せざるを得ない。そこで、液体状態にある外核の化学組成を参考にして、イオウ・酸素などの軽元素を鉄メルトに混入させて、メルトの凝固点をマントル温度より下げることにする。たとえば、Fe 73%、FeS 27%の混合物は1気圧のもとで共融点992°Cの共融混合物を形成し、Fe 82%、FeS 18%の混合物



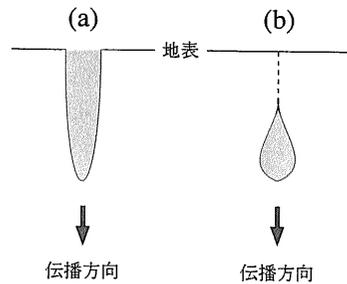
第1図 コア・プロジェクトの概念図。地球上のある地点 (火山の溶岩湖が有力候補) を選び、そこに鉄を主成分とするメルト (影の部分) を注入する。注入されたメルトは、負の浮力に駆動されて、コアに向かって岩石を破壊しつつ降下する。引きはがされたマントルの岩片が、自らの正の浮力に駆動されて地上まで浮上する。クラックは、鉄メルトの過剰圧力による弾性変形によって開いているのであって、岩片の引きはがしによる欠損によって開いているわけではない。

は140万気圧 (コア・マントル境界での圧力) で共融点約1700°Cの共融混合物を形成する (Melchior, 1986)。したがって、適切な量の硫黄を鉄メルトに混入すれば、マントルの全域で凝固しないメルトを作ることは可能であろう。ただし、地球表面にある熱境界層 (リソスフェア) の温度環境では、共融点992°Cの鉄-硫黄メルトでさえも凝固してしまう。しかし幸いなことに、地球上には熱境界層の厚さがゼロの場所 (火山の火口) が多数存在する。したがって、第1図のメルトの投入場所は、ホットスポット (たとえばアフリカのニイラゴンゴ火山; 浜口・森田, 1995) のような大きな火山の溶岩湖がふさわしい。

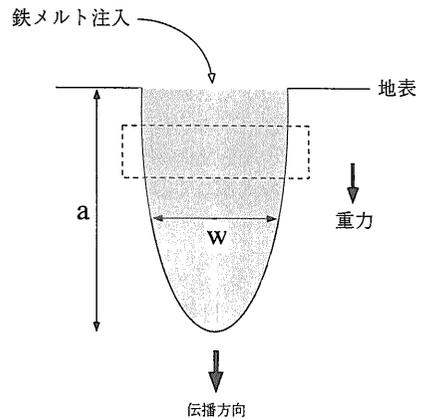
本論文の主眼は、(i) の水圧破碎のプロセスを、2次元クラックモデル (Nakashima, 1993a; Nakashima, 1995) に基づいて考察することである。そのモデルによって、与えられた鉄メルトの注入速度に対する、コア・マントル境界への到達時間や、クラックの厚さ

を推定することができる。そもそも水圧破碎には、2つのモードがある(第2図)。1つは、クラックがコアにむかって伝播している間、鉄メルトの注入を継続するモードである。もう1つは、途中で注入を中止するモードである。本論文では、第2図(a)のモードで、モデリングを行う。その理由は、次の2つである。(I) 第2図(b)のモードは、伝播のダイナミクスがよくわかっていない(極端にクラック体積が大きい場合(Spence and Turcotte, 1990)と極端に小さい場合(Nakashima, 1993b)は解かれているが、一般の場合についてはまだ解かれていない)。(II) 第2図(b)の場合、鉄メルトと地表とが切り離されてしまい、その結果、岩片が第1図のように地上まで浮上できない(したがってサンプル・リターンができない)。

本論文で使用した2次元クラックモデル(Nakashima, 1993a; Nakashima, 1995)の解説をする(第3図)。鉛直下方を向いた小さなクラックを地表につくり、そこに鉄を主成分とする、岩石より高密度のメルトを、与えられた注入速度でポンプを使って強制的に注入する。注入されたメルトは、水圧破碎によってマントルを脆性的に破壊しながら、コア・マントル境界まで突き進む。この時の、クラックの長さ a と平均厚さ w の時間変化を記述したモデルである。岩石は、線形破壊力学に従う弾性体であり、クラックの隙間を流れる鉄メルトはニュートン流体の潤滑理論に従うものと近似した。マントルの温度・圧力環境での岩石の破壊靱性はよくわかっていないが、地殻環境での値と同じ($1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)と仮定した。その結果、クラックの隙間を流れる鉄メルトの粘性抵抗が、クラック伝播の主要な抵抗力となる(つまり破壊靱性に起因する岩石の引っ張り破壊の抵抗力は無視できる)。一方、クラック伝播の駆動力には、鉄メルトを注入するポンプの過剰圧力と、クラック中の鉄メルトのもつ浮力の2つがある。前者が主要な駆動力となっている状態を、「圧力駆動」といい、後者が主要な駆動力となっている状態を「浮力駆動」という。後者は、浮力が体積力なので水圧破碎の最初の頃(クラック体積が小さい間)は無視できる。しかし、時間が経ってクラック体積が大きくなると、クラック伝播は、圧力駆動から浮力駆動に遷移する(それに伴って、 a と w の時間挙動も変化する)。レイノルズ数 R ($R=0.75\times$ 鉄メルトの注入速度 \times 鉄メルトの密度 \div 鉄メルトの粘性係数)が6000を越えると、クラック内部の



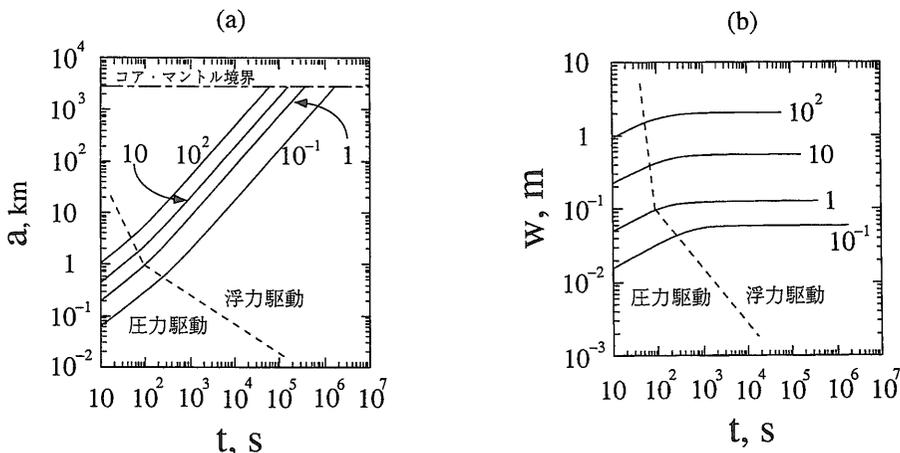
第2図 2つの水圧破碎モード。影の部分は、流体(鉄のメルト)。第1図の y 軸に垂直な平面でクラックを切断した図。(a):地表からクラックへの鉄メルトの注入を継続するモード。十分な幅のクラック開口量が確保されているので、マントルから引きはがされた岩片は、地表まで浮上できる。(b):一定量の流体を注入した後、それ以降の流体注入を停止するモード。クラックは地表付近で閉じてしまう(点線部分)ので、岩片は地表まで浮上できない。



第3図 2次元クラックモデル。第1図の y 軸に垂直な平面でクラックを切断した図。ただし、2次元モデルなので、この図のクラックは、紙面に垂直方向に無限に延びている。地表から鉄メルト(影の部分)を注入すると、クラックの長さ a と平均幅 w は時間とともに増大する。点線部分の拡大図が第5図に示してある。

流れは乱流になるが、そのときは乱流用の潤滑理論の式を採用する。

a と w の時間挙動のグラフを第4図に示す。まず、コアまでの所要時間を議論しよう。第4図(a)によると、注入速度が $10^{-1}\text{m}^2/\text{s}$ の場合は地下2900kmのコア・マントル境界にクラック先端が到達するのに 1.7×10^6 秒(約20日)かかり、 $10^2\text{m}^2/\text{s}$ の場合は $6.0\times$



第4図 クラック伝播の計算例。tは、メルトの注入を開始してからの経過時間。(a)：クラック長さ (b)：クラック平均厚さ。t = 0 sのとき、a = w = 0 mである。a = 2900 km(コア・マントル境界の位置；(a)で一点鎖線で示した)になった時点で計算を打ち切った。また、圧力駆動 ($a \propto t^{2/3}$, $w \propto t^{1/3}$)と浮力駆動 ($a \propto t^1$, $w \propto t^0$)の境界を点線で示した。メルトの粘性係数・密度はそれぞれ5 Pa s, 7000 kg/m³、重力加速度は9.8 m/s²、岩石の密度・ポアソン比・剛性率はそれぞれ4000 kg/m³, 0.29, 100 GPaとした。純粋な鉄メルトの粘性係数は、1気圧1540℃では0.004 Pa sであるが、イオウなどを混入させて5 Pa sに上昇させた。4つの異なるメルト注入速度で計算した。その注入速度は、図中に示してある(単位はm²/s)。注入速度が10⁻¹, 1 m²/sの場合は層流なので(それぞれR ≈ 10², 10³)、Nakashima (1993a)の(15), (16)式を使って計算した。10, 10² m²/sの場合は乱流なので(それぞれR ≈ 10⁴, 10⁵)、Nakashima (1995)の(5)式を使って計算した。ただし、Nakashima (1995)で考慮されていたクラック壁からの流体の漏れは無視した。また、地球表面は応力に関する自由表面なので、Nakashima (1995)の(2)式をNakashima (1993a)の(11)式で、Nakashima (1995)の(3)式をNakashima (1993a)の(3)式でそれぞれ代用して計算した。

10⁴秒(約17時間)かかる。このように、水圧破碎によるコア・プロジェクトは、日常生活のタイムスケールで完了する。ほとんどの地球科学者が半ば諦めていたコアへのアクセスがかくも短時間で可能になるのである。次に、クラックの厚さを考察しよう。図からわかるように、ほとんどの時間領域では浮力駆動状態にある。浮力駆動状態において、注入速度が10⁻¹ m²/sの場合はw = 5.9 cm, 10² m²/sの場合はw = 2.0 mである。レーリー・テラー型流体不安定で起こるダイアピルに比べて、アスペクト比w/aがかなり小さいことがわかる。これは、水圧破碎でできたクラックの特徴である。

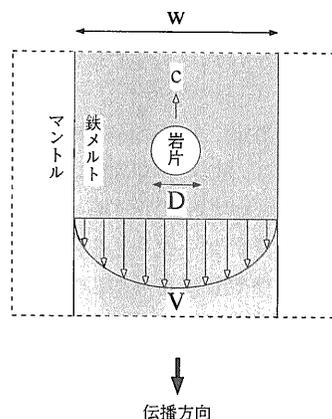
さて、コア・プロジェクトに必要な鉄の量を概算しよう。2次元モデルでは、第1図のy方向のクラックサイズを無限大と近似しているのでクラック体積が計算できない。そこで、ここでは第1図のy方向のクラックサイズがaに等しいと近似する(したがってクラック体積はa²wになる)。すると、地下2900 kmのコア・マントル境界にクラック先端が到達した時のクラ

ック体積は、注入速度が10⁻¹ m²/sの場合は4.9 × 10¹¹ m³であり、10² m²/sの場合は1.7 × 10¹³ m³になる。一方、地球上の鉄資源を調べてみよう。地球上のすべての縞状鉄鉱床(Banded Iron Formation)を精練すれば3.3 × 10¹³ m³の金属鉄が得られる。また、カコウ岩を低品位の鉄鉱石とみなして大陸地殻をすべて精練すれば1.1 × 10¹⁷ m³の金属鉄が得られる(中島, 1992, 第3図)。したがって、地殻にある鉄資源だけで、注入速度が10² m²/s以下のコア・プロジェクトを実施することは原理的に可能である。このことは、鉄という元素の宇宙存在度の高さに起因している。

前回の論文(中島, 1992, 第5図)では、半径数kmの固体鉄(たとえば半径5 kmならば5.2 × 10¹¹ m³)でできた地底探査船が自重でマントル中を沈降して行き、100年後にコア・マントル境界に到達することを示した。これに対して水圧破碎ならば、ほぼ同じ量(注入速度が10⁻¹ m²/sの場合は4.9 × 10¹¹ m³)の鉄を使って、わずか20日でコア・マントル境界に到達

できる。鉄をメルトの状態として水圧破碎に利用したところが、本論文の重要な着想点である。ちなみに、鉄の価格を10万円/tonとすると、 $4.9 \times 10^{11} \text{m}^3$ の鉄の価格は、 3.4×10^{17} 円である(鉄メルトの密度を 7000kg/m^3 として計算した)。 3.4×10^{17} 円は、日本の国家予算(平成8年度は75兆円の予定)の4500年分である。また、全世界の製鉄所($7 \times 10^8 \text{ton/year}$ の粗鋼生産能力がある)を稼働させると、 $4.9 \times 10^{11} \text{m}^3$ の鉄を製造するのに4900年かかる。かりに、コア(地下2900km)までの探査を断念して、かわりに地下290kmまでの探査を行うとしよう。その探査を注入速度 $10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ で行うならば、必要な鉄の量と製造に必要な時間は、上で試算した量の100分の1で済む。

最後に、本節2.の冒頭で挙げた(ii)のサンプル・リターンのプロセスを簡単に論じよう。マンツルの岩片が地上に到達するためには、岩片の浮上速度 c がクラック内部の鉄メルトの流速(平均速度 V)を上回らなければならない(第5図)。この論理は、高密度のマンツルゼノリスが、高速で上昇する低密度のアルカリ玄武岩マグマによって地表に運ばれるかどうかを論じたもの(Carmichael et al., 1977)と類似している。さて、 c の概算値として、層流を仮定して、Stokesの抵抗法則(直径 D の単一の剛体球が広大なニュートン流体中を一定速度で移動している時の粘性抵抗の法則)から計算したものを採用する(D のサイズとして上限値 w を採用した)。一方、 V の概算値として、Nakashima(1993a)のクラック伝播速度(浮力駆動状態において流体注入速度を一定とした)を採用した。その結果、層流ならば粘性係数や注入速度などのパラメータによらず、つねに $c \approx 0.67 V$ になることがわかった。一方、乱流状態($R > 6000$)について同様の概算を行うと、 $c \approx 0.43 R^{-1/8} V < 0.14 V$ となる。いずれの場合も、 c と V は、ほぼ同じオーダーではあるが厳密には $c < V$ である。したがって、2次元クラックの中を単一の剛体球岩片が浮上するモデルで概算する限りでは、岩片は浮き上がらない。つまり、サンプル自らの浮力によるサンプル・リターンはできない。しかし、現実の3次元のクラック内部の流体速度は、2次元モデルの流体速度とは厳密には一致しないので(Mendelsohn, 1984)、実際の V の値は、上で概算した V の値より小さくなる可能性がある。しかも、多数の岩片が粘性流体中を運動すると、干渉沈降(三輪, 1981)のような複雑な協同現



第5図 クラック中を上昇する岩片(直径 D の球が速度 c で上昇している)。第3図の点線部分の拡大図。層流の場合、鉄メルト(影の部分)の流速分布は、平面ポアズイユ流で近似できるので、図で示したように放物線になる(平均速度を V とする)。 c と V は、空間に固定した座標系からみた速度である。岩片サイズ D が大きいほど c の値も大きくなるが、 $D < w$ という幾何学的制約条件があることに注意。

象をおこし、その結果、岩片集団の浮上速度が、単一の岩片の浮上速度よりかなり大きくなる可能性がある。したがって、これらの効果を取り入れた、より厳密なモデルによる考察が今後必要である。

3. おわりに

水圧破碎による直接探査を実施するには、多くの未解決の問題をクリアしなければいけない。たとえ経済的・技術的問題は捨てるとしても、原理的な問題だけは、我々地球科学者が解決しておく義務がある。2.で述べたモデルでは、以下の原理的な未解決問題が無視されているので、今後詰める必要がある。

(1) 3次元の水圧破碎モデルによる解析: 2.では、2次元モデル(第3図)でクラックの伝播を考察した。しかし実際は、クラックは地球内部を3次元的に伝播する。したがって、流体の速度場や、クラックの伝播速度・開口量の y 方向(第1図)の依存性を考慮したモデリング(たとえばLee et al., 1990)が必要である。また、非静水圧的な広域応力場がクラックの伝播方向を3次元的にねじ曲げる可能性がある(高田, 1995)。したがって、必ずしもクラックは、コアに向か

ってまっすぐに伝播するとは限らない。今後は、広域応力場の効果をいれた3次元モデリングが必要である。

(2) 物性定数の決定：水圧破碎のモデリングで使用する物性定数には、地球深部(特に下部マントル)の温度・圧力環境における値が分かっていないものが多い。なかでも、そのオーダーさえ分かっていないものとして、(i) イオウや酸素を溶かしこんだ、鉄を主成分とするメルトの粘性係数と(ii) マントルを構成している岩石の、引っ張り破壊に対する破壊靱性がある。(i)は、クラックの伝播速度・開口量を支配するので(Nakashima, 1993a,b; Nakashima, 1995)、重要である。また第4図は、「破壊靱性は、粘性抵抗にくらべて十分小さい」という仮定に基づいている(Nakashima, 1993a; Nakashima, 1995)。この仮定は、下部マントル環境における(ii)の値が地殻環境におけるそれと同じオーダーなら正しいが、その保証は全くない。したがって今後は、下部マントルの環境における、(i)と(ii)の物性値を実験で測定する必要がある。

(3) 水圧破碎で生じたマントルの岩片のサイズ分布の推定：浮上してくる岩片を地上で待ち受けて回収するので、岩片のサイズ分布を見積ることは、サンプリング成果にかかわる重要な課題である。小さなスケール(たとえば数mm—数mのスケール)でのクラックの分岐・再結合が、マントルのFragmentationの原因である。したがって、この問題は、クラックの分岐・再結合の統計力学とみることができ、岩石の破壊強度の不均一性(Huang and Kim, 1993; Tzschichholz and Herrmann, 1995)や岩石の粘弾性(平田・吉野, 1995)が、水圧破碎におけるクラックの分岐に影響をおよぼすことはわかっている。しかし、それでも現在の破壊の物理学は、マントルの岩片のサイズ分布まで予言できる力を持っていない。岩石のような不均一物質の破壊の統計力学は、まだ研究がはじまったばかりであり(Herrmann and Roux, 1990; 佐野雅己, 1995)、今後の発展が望まれる。

「 $4.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ の鉄を手に入れるには、日本の国家予算の4500年分もの資金が必要だ。水圧破碎によるコア・プロジェクトは、経済的に見て到底実現不可能なので噴飯ものだ」と思う読者がおられるかも知れない。たしかに今の時点では実現不可能である。

しかし、ボーリングによる惑星深部へのアプローチが必ずしもうまくいっていない今、我々地球科学者は、新しい直接探査原理を模索・検討しなければならない。21世紀では、技術革新のおかげで経済的・技術的問題はクリアされ、ボーリングとは全く異なる原理による下部マントル・コアへの直接探査が可能になっているかもしれない。たとえば、地球上の鉄資源の代わりに小惑星帯の隕鉄をつかった安価なコア・プロジェクトが可能になっているかもしれない。したがって、「たとえ経済的・技術的側面からみれば現時点では実現は不可能でも、探査原理だけは地球物理学的に考察してまとめあげ、その成果を21世紀の子孫に引き渡す」というのが、20世紀を生きる我々の使命ではないだろうか。

謝辞：本稿に関して、誤りの指摘や適切なコメントをして頂いた査読者の方々に感謝いたします。

引用文献

- Carmichael, I.S.E, Nicholls, J., Spera, F.J., Wood, B.J. and Nelson, S.A. (1977) : High-temperature properties of silicate liquids : application to the equilibration and ascent of basic magma. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 286, 373-431.
- 浜口博之・森田裕一(1995) : ニイラゴンゴ火山の溶岩湖. *科学*, 65, 711-713.
- Herrmann, H. J. and Roux, S. (1990) : *Statistical Models for the Fracture of Disordered Media*. North-Holland.
- 平田隆幸・吉野 隆(1995) : 粘弾性体への破壊をともなった流体侵入 - 地球惑星科学における流体移動現象への応用 -. *地震*, 48, 81-90.
- Huang, J. I. and Kim, K. (1993) : Fracture process zone development during hydraulic fracturing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30, 1295-1298.
- 小出 仁(1982) : 流体貫入(ダイアピル)機構の解析とテクトニクス. *月刊地球*, 4, 15-22.
- Lee T. S., Advani S. H. and Lee J. K. (1990) : Three-dimensional modeling of hydraulic fractures in layered media: Part II-calibrations, parametric sensitivity and field simulations. *J. Energy Resour. Technol.*, 112, 10-19.
- Melchior, P. J. (1986) : *The Physics of the Earth's Core*. Pergamon Press, pp.60-63.
- Mendelsohn D. A. (1984) : A review of hydraulic fracture modeling-Part I : general concepts, 2D models, motivation for 3D modeling. *J. Energy Resour. Technol.*, 106, 369-376.
- 三輪茂雄(1981) : 粉体工学通論, 日刊工業新聞社.
- 中島善人(1992) : Core Project; 固体惑星深部の直接探査計画. *物性研究*, 57, 540-586.

- Nakashima, Y. (1993a) : Static stability and propagation of a fluid-filled edge crack in rock: implication for fluid transport in magmatism and metamorphism. *J. Phys. Earth*, 41, 189-202.
- Nakashima, Y. (1993b) : Buoyancy-driven propagation of an isolated fluid-filled crack in rock: implication for fluid transport in metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 114, 289-295.
- 中島善人 (1995) : 物理的側面からみた水圧破碎の総説, 地質ニュース, no. 494, 33-42.
- Nakashima, Y. (1995) : Transport model of buoyant metamorphic fluid by hydrofracturing in leaky rock. *J. Metamorph. Geol.*, 13, 727-736.
- Rubin, A. M. (1995) : Propagation of magma-filled cracks. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 23, 287-336.
- 斎藤清次・浦辺徹郎 (1996) : ロシアの超深層掘削の現場, 地質学雑誌, 102, No. 1, 口絵, III-IV.
- 佐野雅己 (1995) : 破壊の非線形ダイナミクスから統計物理へ, 応用物理, 64, 793-797.
- 佐藤壮郎 (1995) : 超深層ボーリングはなぜ必要か, 地質ニュース, no. 488, 10-13.
- Spence, D. A. and Turcotte, D. L. (1990) : Buoyancy-driven magma fracture : a mechanism for ascent through the lithosphere and the emplacement of diamonds. *J. Geophys. Res.*, 95, 5133-5139.
- Stevenson, D. J. (1981) : Models of the Earth's core. *Science*, 214, 611-619.
- 高田 亮 (1995) : クラックによるマグマの上昇, 科学, 65, 673-685.
- Tzschichholz, F. and Herrmann, H. J. (1995) : Simulations of pressure fluctuations and acoustic emission in hydraulic fracturing. *Phys. Rev. E* 51, 1961-1970.
- 浦辺徹郎・伊藤久男・宮崎光旗・池田隆司 (1995) : 国際陸上科学掘削計画 (ICDP) と日本列島における超深層掘削 (JUDGE計画), 地質ニュース, no. 488, 14-18.
- Valko, P. and Economides, M. J. (1995) : *Hydraulic Fracture Mechanics*. John Wiley & Sons.

NAKASHIMA Yoshito (1996) : Core Project: Sample-Return Mission to the Earth's Core by Hydrofracturing.

< 受付 : 1996年1月9日 >