電気と磁気でみる地球内部

海半球観測研究センター　歌田　久司

1. はじめに

地球の中はどうなっているのか，あるいは，地球の中では何が起っているのかを，さまざまな手段で調べるのも地震研究所の研究の重要な目的の一つです．本日の私の話では，電気や磁気の観測という手段が地球の研究にどのように用いられているのかを紹介したいと思います．「電気と磁気」と聞いて意外に感じられる方も多いかと思いますので，少し例え話で説明しましょう．皆さんが飛行機に乗る前に金属類を身に付けたまま検査のゲートをくぐると，ピーとブザーがなって係員の身体検査が始まります．あの機械では，電気と磁気の性質を利用して金属を探知しています．金属は電気を通しやすい，あるいは電流を流しやすいという性質があります．電流は磁気を作ることができ，逆に磁気の時間変化は電圧あるいは電流になります．磁気の時間変化を電磁波として与えると，金属の中には電流が発生して，電磁波を歪ませます．金属がなければこのようなことは起りませんから，ちょっとした工夫をして測定するとごく小さな金属でも感知することができます．宝探しや地雷の探知で用いる道具もほぼ同様の原理で動作します．同じ原理を地球にあてはめると，金属資源を探査する手段として実際に利用することができますし，もっと一般的に「地球の内部構造」を調べることもできます．

さて、昔から，磁石あるいは磁気の力というのは不思議なものとされてきました．どのくらい昔からかというと，古代ギリシャ，プラトンやアリストテレスなどの哲学者が自然の原理を考えていた頃からです．磁石は，磁石同志が引き付け合うだけでなく，鉄を引き付けます．手で物に力を伝える時には，その物に触れる必要がありますが，磁石は離れている磁石や鉄を引き付けます．つまり相手に触れずに力を及ぼすのが，とても不思議なことに思われたのです．実は，磁石と磁石の間に働く力は単なる引力ではありません．ご存じのように磁石にはＮとＳという２つの異なる磁極があって，同じ極同志は反発します．皆さんは，ハイキングなどに行った時，方角を知る時に磁気コンパスを使われると思います．磁気コンパスのＮ極は地球上のどこでもおおよそ北の方角を示しますが，このことは北極あたりにＳ極が，南極あたりにＮ極があることを意味します．つまり地球は全体が磁石になっているということができます．前置きはこのくらいにして本題に入り，地球全体の磁石としての性質に関するお話から始めたいと思います．

2. 地球磁場の発生を探る

磁石の針が北を指すという性質は，紀元前２世紀ころの中国（始皇帝の頃）ですでに知られていたということです．地球全体が磁石になっていることが明らかになったのが16ー17世紀ころです．ちょうどエリザベス一世の治世（シェイクスピアと同時代）に，イギリスの科学者ギルバートが実験によって示し（図1)，本に著わしました．どういう仕組みで地球の磁場（地磁気）が発生しているのかについては，20世紀の中頃以降になって急速に研究が進んだ分野です．

地磁気の分布は，地球中心に棒磁石をおいた場合のものとよく似ていますが，本当にそうなっているわけではありません．「富士山の青木ヶ原では磁気コンパスが効かない」という話をきいたこ

とがある方も多いと思いますが，火山から噴出する溶岩は強い磁気を帯びている場合があります．これは永久磁石ですから，地球の中が永久磁石になっている可能性はあるわけです．しかし，温度を変えながら溶岩の磁性の測定をしてみると，温度とともに弱くなり多くの場合に 600℃くらいで

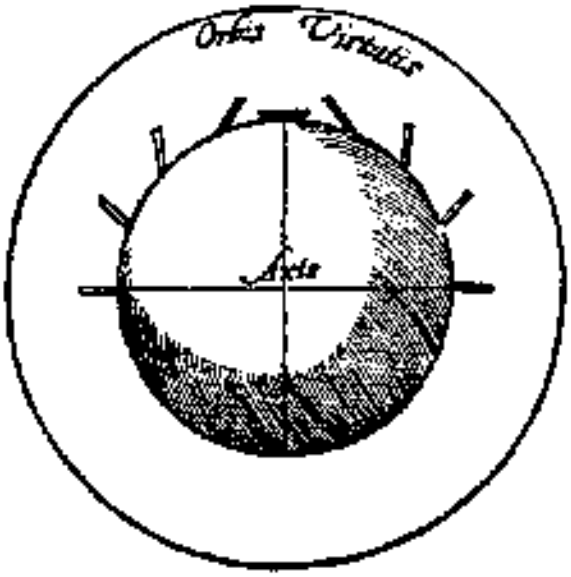

図 1　ギルバートによる模型実験の図．球形にくり抜いた磁石の周りの磁針の向きが地球上の伏角の分布と一致することを示した．

磁性がなくなってしまうことがわかります．地球の内部は，深さとともに高温になっているので，全体として永久磁石が存在することはできないことがわかります．地球の磁場が時間変化していることも永久磁石では説明できません．時間変化をするどころか，地質時代を通しておよそ百万年に一回の頻度で N 極と S 極の極性が反転した（図 2，地磁気の逆転）ことも知られています．

答えを明かすと，地球の磁場は外核に流れる電流で発生している，つまり，地球は電磁石になっているのです．地球の内部構造のおさらいをすると，地表から地殻・マントル・外核・内核に分けることができることはご存じだと思います．地球中心部の核は鉄を主成分としていますが，外核は流体（溶けた状態）で内核は固体という違いがあります．流体の外核では，活発な運動があると考えられています．プレート運動でマントル対流のスピードは，1 年に 1 cm から 10 cm と見積もることができます．これに対して，外核の運動速度は時速 1 m くらいにもなると考えられています．マントルの動きに比べ圧倒的に速いことがわかりますね．このスピードの見積もりは，「地磁気の西方移動」という観測データが元になっています．

先ほどから，「磁気コンパスの針が北を指す」という話をしていますが，厳密にはこれは正しく

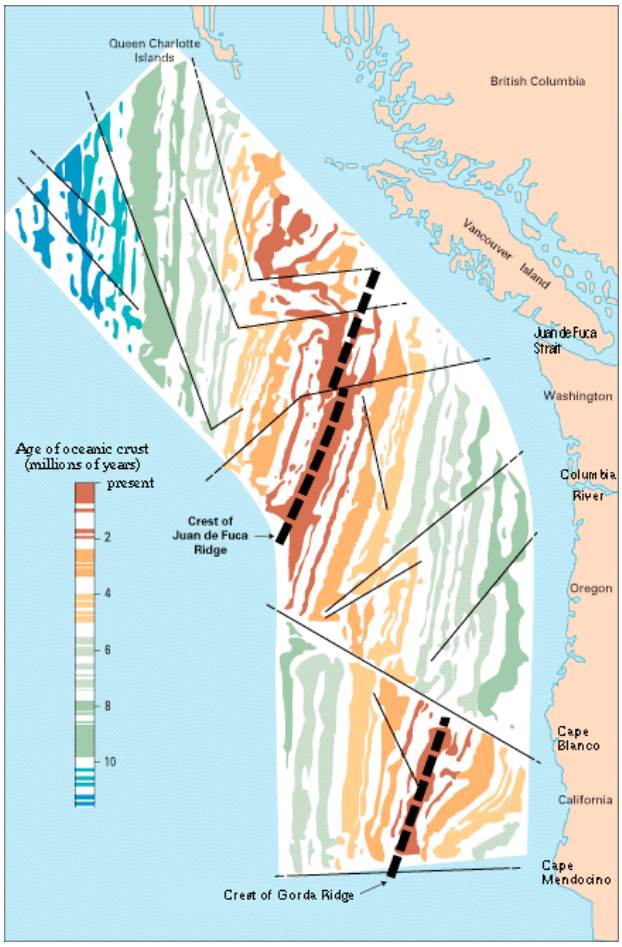

図 2　海底に残された地磁気逆転の歴史．中央海嶺で海底ができる時，海洋地殻の玄武岩はその時の地磁気の方向に磁化される．海洋底拡大とともに海底は中央海嶺から左右に移動するので，正反の縞模様ができ，離れた場所ほど古い時代の地磁気の方向に磁化している．

ありません．針が指す方角と真の北の方角（これは地球の自転軸の方角）との間の角度を「偏角」とよびます．偏角は，場所によって違いますし，時間的にも変化しています．コロンブスらが活躍した大航海時代以降最近まで，磁気コンパスは航海の必需品で，偏角が場所によって異なることも当時から知られていました．それだけでなく，航海日誌にはその時々における偏角の測定値が記録されています．それらの記録によれば，ヨーロッパとアメリカ大陸の間の大西洋には，偏角が極大になる場所があり，その位置（経度）は時代とともに西方へ動いたことが判ります．その移動速度は，およそ千年で地球を一周（３６０°）するくらいになります．この移動が外核の表面でおこっていると思うと，先ほどの時速１m くらいの速度になるというわけです．つまり，地磁気のパターン（偏角が最大になる場所）の移動は，外核の流れに乗っているためと仮定したことを意味します．川の流れの速いところでは渦ができますが，渦が流れに乗って動いて行くと，渦を見て流れの速さがわかります．渦を磁場におきかえたこの仮定が正しいという厳密な証明はなされていませんが，他に方法がないという理由もあって，この値が広く用いられています．

このように，地球の磁場は外核が鉄を主成分とする導体の流体でできているため，導体の運動と磁場の間の電磁誘導によって運動エネルギーが磁場のエネルギーに変換されて発生していると考えることができます．さらに，運動の元として大事なのは，地球の自転と対流の効果であると考えられます．自転の効果の説明は省略して，対流の効果を説明しましょう．対流運動とは，表面に重いものがあると沈み，底に軽いものがあると浮くという半径方向の運動です．底をあたためて表面を冷やすと起る対流を「熱対流」と呼びます．対流は熱を効率良く運ぶので，外核とマントルの対流によって地球は全体として徐々に冷えています．その結果、約２５億年くらい前に，地球の中心が鉄の固化する温度にまで冷え，内核ができ始めたものと考えられています．内核はそれ以降，次第に大きくなってきました．外核は鉄を主成分としますが，それ以外にもいろいろな元素が溶けています．内核表面で鉄が固化すると，あとに一緒に溶けていた鉄よりも軽い元素の割合が多い部分が残され，これは周囲よりも軽いので浮かび上がります．この浮かび上がる運動も対流の一種で，「組成対流」と呼びます．

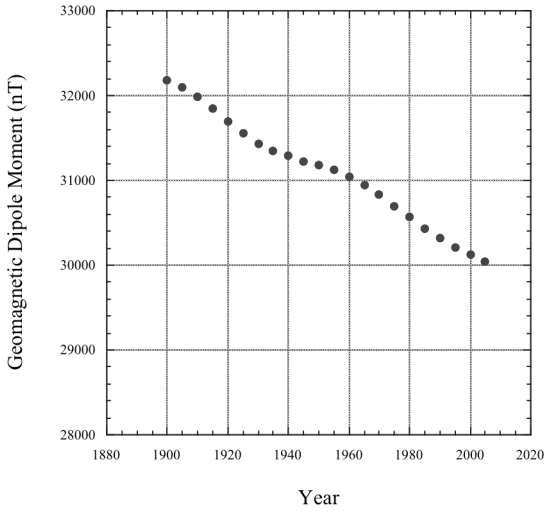

図 3　最近約百年間の地球（双極子）磁場強度の変化．

最近では，外核の流体運動によって磁場が発生するメカニズムをコンピュータシミュレーションで再現（ダイナモ計算などと呼ばれます）しようという取り組みが行なわれるようになっています．コンピュータの能力の飛躍的な向上とともに，ダイナモ計算も精密かつ大規模になってきましたが，外核と同じ条件での計算の実現はまだ先のことだと言われています．最近百年あまりの地球磁場の強さはほぼ一様に減少しています（図 3）が，このまま無くなってしまうのかどうかを天気予報のように数値的に予測することも，将来可能になるかも知れません．

この分野で地震研究所が行なっている，ユニークな観測を紹介します．それは，外核の変動を電

圧の観測で捉えようという試みです．電圧の観測といってもテスターを使って測定するわけではなく，地球を相手にする場合は，数千 km もの長さのケーブルの両端を接地（アース）して，アース間の電圧を精密に測り続けるのです．こんなに長いケーブルを自前で引くことはできませんので，KDDI などの電話会社が使っていた電話回線用の海底ケーブルが運用停止になったものを譲り受けて観測に利用しています（図 4）．外核の変動は，最も時間スケールの短いものでも 30ー60 年程度であると考えられているので，このような測

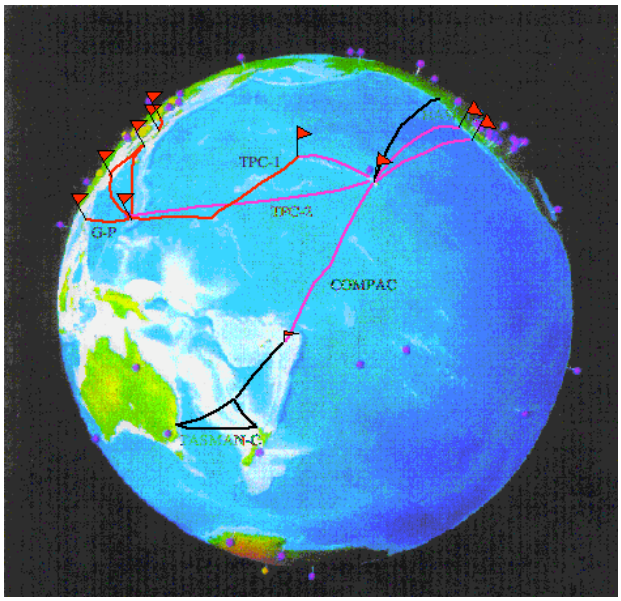

図 4　地球の電圧を測定している，太平洋の海底ケーブルネットワーク．

定は気長に続ける必要があります．今すぐ成果になるわけではありませんが，磁場の観測だけでは得ることのできない貴重な情報を将来もたらしてくれるでしょう．

3. マントルの不均質を探る

普段感じることはありませんが，地球は太陽からの荷電粒子の流れ（太陽風と呼びます）の中にいます．磁場は運動する荷電粒子に対して反発力を与える性質があるため，地球の磁場によって，太陽風は途中で跳ね返され、地表に直接吹きつけることはありません．ちなみに、火星は固有の磁場がないので，太陽風によって大気がはがされてしまい，生物が住めない環境になっています．

太陽の活動の変化によって太陽風の圧力が急激に増大したりすると，地球磁場の振動を起こすことがあります．変動量は地球磁場の強さの百分の一程度かそれよりも小さいものでしかありません．したがって，磁気コンパスの針をじっと目を凝らしてみても，その動きを目で捉えることは難しいと思います．この振動は，地球内部に電磁誘導を起こします．高精度の観測を行って電磁誘導の様子を調べることにより，地球内部の構造を電流の流れやすさを示す物理量（電気伝導度といいます）で見ることができます．

医療分野では，CT あるいは MRI スキャンという技術で体の断面を撮影（トモグラフィーと呼びます）することができるようになって，治療に著しい進歩をもたらしました．地球内部を研究する場合でも，内部の断面の写真をとることによって得られる知見は重要です．地球科学の分野では，地震波の伝わり方を調べて 3 次元的に地球内部構造を見る方法が，20 年あまり前から行なわれるようになり，現在では詳しい図が得られるようになっています．

例えば，図 5 は地震波の P 波の伝わり方で描いたトモグラフィーで，赤い所は伝わる速度が遅い部分，青い所は速度が速い部分を表します．仮にこの不均質が温度だけによっているとすると，赤い所は温度が高く，青い所は温度が低いと解釈できます．例えば，この図の日本列島の下で青い部分が J の字を引き延ばしたようになっているのは，沈み込む冷たい海洋プレートであると考えられます．この図は，沈み込んだプレートは，マントルの中をどこまでも突っ込んで行くのではなく，上部マントルと下部マントルの境界付近で一度横たわって溜まるらしいことも示しています．こ

れが映画の「日本沈没」では「メガリス」という名前でよばれたもので，大きくなったメガリスが一気に落ち込む時一緒に日本列島も巻添えにするというのが，映画のストーリーでした．

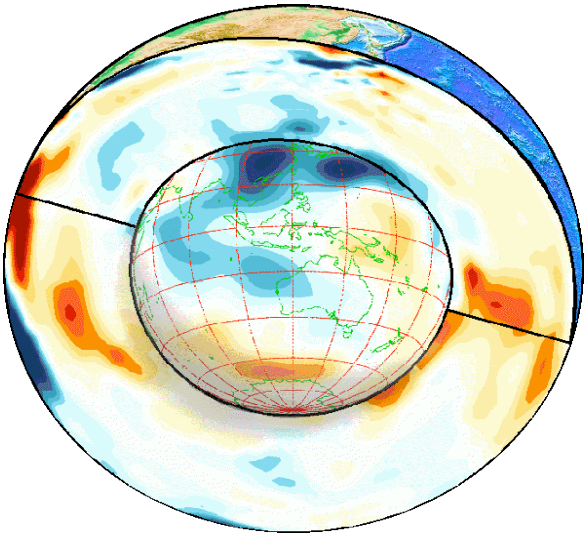

図 5　地震の P 波の伝わり方で見た地球内部構造. 伝わり方は, 青い部分では速く, 赤い部分では遅い.

実際の地球内部の不均質構造は，温度の効果だけでなく，さまざまな要因によってできています．従って，1 種類の画像しか得られなければ，要因を区別することはできませんが，多種類の画像が得られれば，原理的には画像の種類の数までの要因に分けることが可能になります．地震波を使った方法では，P 波の速度だけでなく S 波速度や減衰などで画像を描く方法も開発されています．

地球内部で発生している電磁誘導を観測して電気伝導度のトモグラフィーができれば，地震波を使う方法とは全く独立な画像が得られることが期待されます．この画像を得るためには，太陽活動の影響による地球磁場の変動が地球内部に起こした電磁誘導を観測によって調べる必要があります．時間変動の周期の違いによって見える深さが異なります．上部マントルを見るためには 1 時間から 10 時間くらいの周期変動，上部マントルから下部マントルへの遷移層（深さ 400ー660km に対応）を見るためには，数日から数十日の周期の変動を解析します．このくらいの長い周期のデータ解析をするためには、1 年以上の長期観測が必要です．ここでは，後者，すなわちマントル遷移層に着目して行なった研究から，最近の成果を紹介します．

電気伝導度も，地震波と同様に平均的には半径方向のみに値が変化する，球対称な分布をしているので，地球上のどこで観測しても磁場や電場の変化はおおまかにはこの平均的球対称（1 次元）構造で予想されるものになります．しかし，これを精密に調べると，場所によって誘導電流の強弱があることがわかります．この誘導電流の強弱から，地球内部の電気伝導度不均質を見積もることになります．地震研では，このような研究をするために 1997 年から 2002 年にかけて「海半球計画」というプロジェクトを実施して，太平洋地域に地震・電磁気・測地（GPS など）の総合的観測ネットワークを構築しました．こうして得られた観測データから，世界で始めてマントル遷移層の 3 次元的な電気伝導度分布を求めました．図 6 は，フィリピンーマリアナーハワイを通る断面で，左に P 波の速度構造，右に電気伝導度構造を比べたものです．それぞれ，速度が遅く電気を通しやすい部分が赤で，速度が速く電気を通しにくい部分が青で示されています．細かな違いはあるものの，二つの独立な画像にはよい対応が見られ，大局的にはこれらの構造が温度の不均質によってできていると説明することができます．ただ一か所だけ，フィリピン海下の遷移層上部にある非常に電気を通しやすい部分は，温度だけではどうしても説明できません．

では，温度以外の何が原因なのかが問題になります．いろいろな解釈が可能ですが，今最も有力な考えと思われる一つが，水の効果です．最近の高温高圧実験によれば，遷移層の物質は重量比で数%もの水を貯え得ることが示されました．また，水を含んだ状態では，含まない状態よりも電気伝

導度が著しく増大することも実験で明らかにされています．実験値を参考にして図 6 の電気伝導度分布を水の分布に変換すると，赤の濃い所は最大 0．3 重量%程度もの水の存在量に対応することが示されました．

なぜ，水の存在を問題にするのでしょう．地球は「水の惑星」と呼ばれるくらい，地球および生命にとって水はなくてはならないものですが，地球内部にとっても，水は重要な働きをしています．例えば，日本列島のような島弧の火山のマグマの発生は，沈み込む海洋プレートの地殻の部分に含まれている水を含む鉱物が高圧下で分解して吐き出した水によって島弧下のマントルの物質の融点（溶け始めの温度）を下げる結果であると考えられています．マントル深部の岩石は水を含むと強度が低下する（流れやすくなる）効果がある

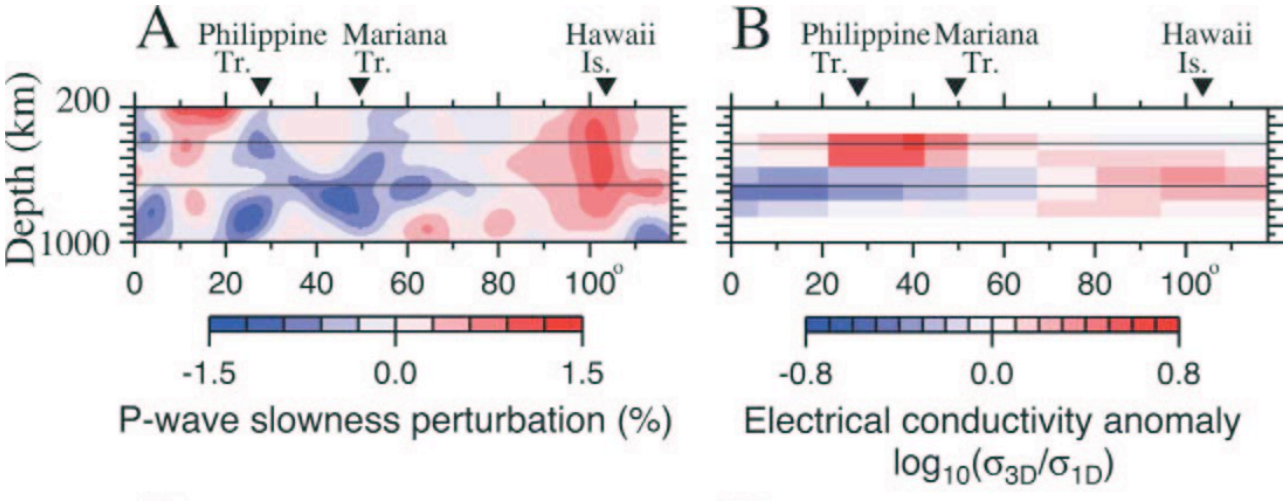

図 6　フィリピン・マリアナ・ハワイを通る断面で比べた，P 波速度構造（左）と電気伝導度構造（右）．いずれも深さ 200km から 1000km の範囲を表示している．

ので，どのくらいの量の水が遷移層を含むマントル深部に存在するのかは，マントル全体の活動を考える上で重要な意味を持つことになります．また，水はいろいろなものをよく溶かすという化学的な特徴があるので，地球全体の物質の循環を考える上でも水の分布は重要なのです．

さて，このように大量の水が本当にフィリピン海下の遷移層にあるとしたら，どうやって運ばれたのかも重要な問題になります．まだ，地球上のいろいろな場所で調べられているわけではありませんが，丁度ここが沈み込み帯にあたることから，沈み込む海洋プレートとともに水が遷移層まで運ばれたというのが有力な考えです．

こういう具合に想像力を膨らますといろいろなストーリーが考えられます．しかし，観測を行って地球内部に関する情報をできる限り正確に取り出すのが我々の役目です．実際，遷移層の電気伝導度構造の解析はまだ始めたばかりですので，まだまだ改善すべきところが沢山あります．特に、地球の磁場や電場の観測点は，海半球計画で建設したものを含めてもまだまばらで，上に紹介した異常構造も充分な解像度で得られたものではありません．

改めて見わたせば，地球上のどこでも観測点が不足しており，我々観測屋のやるべきことはいくらでもあります．しかし，手当り次第にやるわけにも行きませんので，現在は日本周辺特にフィリピン海に焦点を絞って，海底地震の研究グループと協力して海底電磁気の長期機動観測を行っています．この観測では，地震研究所が開発した海底広帯域地震計（OBS）と海底電磁力計（OBEM）という観測装置（図 7）を，一度にそれぞれ十台以

上使って 1 年間海底に設置して行う観測を 3 回繰り返し，合計 3 年分の長期データを取得することを目指しています．観測は 2005 年の秋に開始して，2008 年の秋に終了する予定です．このデータの解析により，図 6 よりもはるかに鮮明な画像を得て，沈み込み帯におけるマントル遷移層への水輸送などの問題の解明に貢献したいと考えています．このような大規模な海底観測を，しかも地震観測と電磁気観測とを一度に行なうことができるのは世界中を見渡しても地震研究所だけと言っていいでしょう．

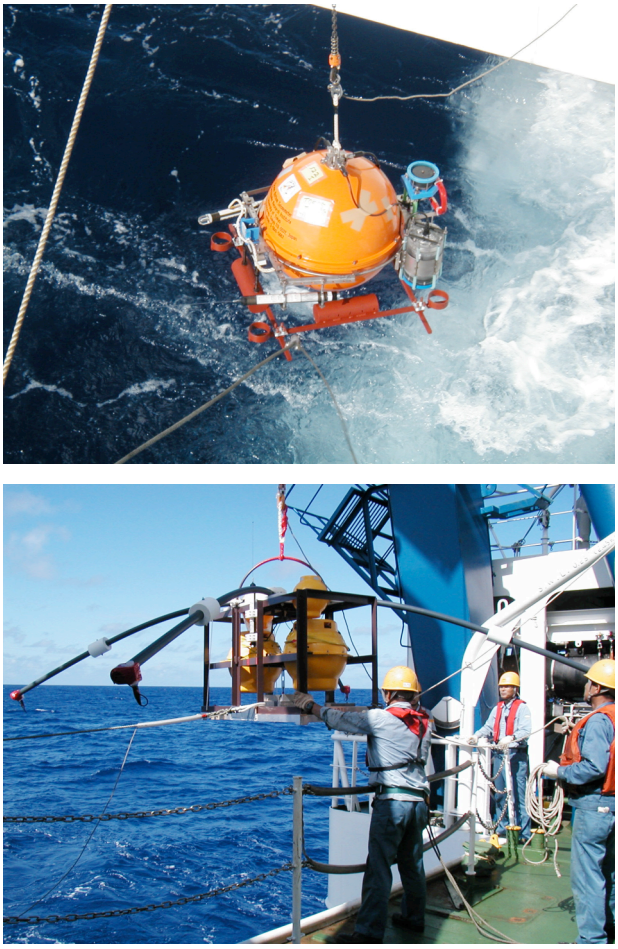

図 7　海底広帯域地震計（上）と海底電磁力計（下）．いずれも 6000m 以上の深海の水圧にも耐え，連続的に約 1 年間観測することができる．

4. まとめ

我々の住む日本列島は，地震活動が活発なだけでなく，世界でも有数の火山国でもあります．元をただせば，これら地震活動や火山活動には，海洋プレートの沈み込みとそれによって運ばれる水が重要な働きをしています．プレートの運動は，マントル対流が表面に表れたものです．地球の中心部では，マントルよりもはるかに速い動きで溶けた高温の鉄が動いており，地磁気を発生しています．マントルの活動と核の流体の活動とはお互い無関係に起っているのではなく，地球史を通じて両者の密接な関係はさまざまな形で表れていることが知られています．従って，地球全体の活動を理解するのが大切で，地震研究所だけでなく世界中の研究者が解明のための努力をしています．本日の私の話はそのような研究の中から磁気や電気の観測を用いた方法を紹介しました．