

電磁界変動研究に関する主張と提案：
反先行現象シンドローム、もっと広い周波数帯での観測、
そしてもっと精密な電気伝導度分布の解明へ向けて

名古屋大学理学部地球惑星科学 熊澤峰夫

Comments on the study of electromagnetic variations as earthquake precursors:
Towards anti-precursor syndrome, data acquisition in wider frequency ranges
and mapping of more accurate conductivity structures

Mineo Kumazawa Nagoya Univ., Dept. Earth & Planetary Sci.

地殻中の圧電気と流動電位による地震に関連した電磁場発生について、学生の時から私は大きな関心を継続的にもち続けてきたので、素人なりに意見がある。 それらをここで述べる。また、電気伝導度構造解明の考え方と新手法を提案する。

1 反先行現象シンドローム

先人によるこれまでの研究報告をレビューして、私は「地震に先行する電磁界変動は存在する」と確信をもっている。

しかし、それが実際に地震予知に使えるかどうかについて、私は懐疑的である。特に高度な産業社会をもち、高い確度の予知でなければ実用的でない日本では、「技術としての地震予知」を確立できるまでには、10²年オーダーの継続的研究を必要とするであろう、という見解である。これは見解であり証明も非証明もない。現在は互いに論証の手立てがないので、これを主張する、あるいは反論する議論はいくらでもできる。「できる-できない論争」には大抵「できる派」に賭ける私でも、実用技術としての予知ができることには賭けない。この立場からは、社会のためには「実用技術としての防災」を確立するのがよいという金森博雄氏らの意見に私は同調するのである。電磁界変動で地震予知がいずれかはできることが事実だとしても、実用的地震予知を求める社会に、それが今にもできそうだと錯覚を与えることは誠実なことではあるまい。すでに確立したかに見える技術が実は欠陥だらけだった、という実例をわれわれは知り過ぎている。電磁界変動と地震の関係は、テクノロジーはもとよりサイエンスとしても、まだ模索研究の段階にある、と私には見える。

一方「HOW TO と問う実用技術」としてでなく「WHY と問う科学」としてみたら、地震に先行してもしなくても「地下に原因のあるかもしれない電磁界変動の研究」は、地球科学分野における最も挑戦的な研究課題であって大いに推進すべきであると考え。というのは、「何故、電磁界変動が起こることがあるのか?」「地震に先行しているように見える場合があるのにコサイスイスミックには少なく見えるのは何故か?」などについて、いろいろな考えはあってもどれも明らかではない。全く不思議だ。既存の理屈でステップを追って行く律儀なサイエンスの対象になじまない風貌をしている。「サイエンスの土俵にのっていないものをサイエンスにするのが最高のサイエンス」だとすれば、こんな不思議な自然現象を目前にしたら興奮するのが研究者の性というものだ。したがって、先行現

象の研究はそのWHY研究に最も適したやり方を考えて推進したいと考えるのである。そこで、先行現象を追いかけている方々の現在のやりかたのいくつかは不適切ではないかと考えるのだ。例えば、ひとつの電磁界変動が、地震発生の予兆として時間的に関連付けにくい時刻に観測された場合、無理に関連付けるとか、残念ながらずれているという発言（ユーモアか？）が学会でてくるのは誠におかしいことだと思われる。それを軽く批判するキーワードを私は「予兆シンドローム」としたのである。

2 波形スペクトルまでの観測指向

特に地表の電磁場は人口源を含めてノイズに満ちている。したがってその観測は限られた狭い周波数帯域内で行なわれることが多い。これは、観測技術上は合理的な方法であろう。しかし、昨今の観測結果の報告をみるとそれぞれ異なった周波数帯域では情報伝播経路も含めて現象の異なる側面をみているらしい、ということがわかってきた。しかも現象は一つとは限らない可能性もある。そこで、電磁現象のものを理解しようとするれば、いろいろな周波数帯域でどう見えるか、それを観測して相互関係も調べてみようという発想になるであろう。

このような場合、波形の全スペクトルとまでは言わないが、いろいろな帯域の観測を「相互に比較検討できるように行なう」ことが最も大きな情報を得る方法だと考える。もっとも、研究室によって扱うのに得意な周波数領域があり、また見たい現象について特定の考え方があるだろう。また、研究経費とマンパワーにも限りがあるだろう。したがって、原理的、技術的には可能でも一つの研究グループが全部観測するのが適切であるとは考えられない。しかし、異なる研究グループの観測結果が相互に比較対照できるように観測が計画されなければなるまい。現状はそうならないように素人目には見えるのである。SEMS NETのグループではそういうこともご検討頂くのがよいと思う。最近の計測技術の進展を考えると、周波数帯域をかなり広くとったダイナミックレンジの大きい計測が比較的簡単にできるようになっている。次に来るべき観測には、区切った複数の周波数バンドで波形までを観測し、とにかく現象をもっと深くとらえる工夫がもっとあってよい。

地震学との共通点の対比で考えてみる。地震学では、地震波動の観測に基づいて震源の位置とモーメント（大きさと波の放射パターン）の時間関数など、地震発生を記述するパラメーターを決定し、放射した波動の情報伝播の解析から地球内部の弾性波速度の空間分布を導き出す。地震波速度の不均質は通常数%程度で最大10%に留まるが、その速度分布構造自体が地球のダイナミックな特性を示すので、トモグラフィーは特に最近質量共に大きな研究課題になっている。地震波のエミッションでは、このように構造と情報伝播経路と震源パラメーターがセットとして分離して決められるので、地震発生の場合と原因までを含めた物理を組織的に研究する方法論が確立していると言える。そこで、電磁変動のエミッションについても、同じような考え方の方法論が成立すりか検討してみたい。

電磁放射の場合の観測量は、電気伝導度構造と放射源の特性が極めて強くリンクしているから、両者を分けて解析することは容易ではない。しかも電磁現象では地震の場合と異なって大きなイベントが稀にしか発生しない。電磁波は弾性波に比べて減衰が著しく、伝播速度が速いために10年前の技術では送時の決定など極めて困難であった。これらの状況が電磁的現象の解明を困難にしてきたのであろう。しかし、これらの困難のうちで

テクノロジーの進歩で解決できる問題と自然の摂理としてわれわれには解決できないものを分けて考える。われわれに解決できないことの典型は大きなイベントが稀にしかないので、この条件のもとでわれわれに何ができるか考える。構造と放射源のからみについては、一方がわかっていると他方が求めやすい事情は電磁変動でも力学的変動でも同じである。そこで、あらかじめ地殻中の電気伝導度分布構造を決めておいてイベントの発生を待機するのが合理的で、これからの研究戦略ではないかと考える。ここで「イベントの発生をどのように待機するか」という問へのひとつの答えがこのセクションで述べた「広い周波数で観測すべきだ」という主張のポイントである。これとセットになる「あらかじめ電気伝導度構造を決めておく」という主張を受けて、それを行なう「具体的な手段」について提案するのが次のセクションの内容である。

3 電気伝導度分布解明

3-1 その意義と考え方

地震に関連する電磁現象でも高層大気との相互作用で非常に重要な要因があるらしい。地表から上の電磁現象について私は全くの素人であるから、ここでの議論は固体地球内部のことだけに限定する。

固体地球内部の電磁気現象を研究する場合、電磁場が発生する場と伝播する場の構造を知っておくことは全ての基本であろう。それは電気伝導度の3次元分布構造であるから、われわれはその解明に重点的研究投資をなすべきである、と確信をもって主張する。電気伝導度分布は研究対象が存在する地域の地形図のようなものであり、地図は全ての基礎である。このような基盤なしにちゃんとした研究はできるはずがない。

地形図の等高線と等電気伝導度面を対比して考えてみよう。標高は±6 km 程度の範囲内でファクターの程度の地域差がある量なのに対して、電気伝導度は $10^0 \sim 10^8$ A/Vという何桁もの幅にわたる不均質性ををもっている。電気伝導度が桁で変わればそこで起こる電磁現象の現われ方も桁で変わってくるだろう。そういう場の凸凹が桁で不確かで、しかも極めて低い空間解像度しかない、というのが現状である。その道の専門家は電気伝導度分布の研究を一所懸命にやっていると言うだろうし、それは現状の事実である。しかし、次にどうするかという観点では「楽をして電気伝導度構造を解明するテクノロジーを考えればよい」ことになる。これは Conductivity Anomaly の頭字をとったCA研究会の課題である。しかし改めて考えてみると、CAと言う歴史的な名前は今となっては必ずしも適切ではない。テクトニックな場では凸凹があるのがノーマルなのであり、アノーマリーの代わりに Structure とし CA を CS とでも呼び変えたら研究者の意識も変わるであろう。要するに、電気伝導度の3次元地図づくりを提案したいのである。

「地図づくり」というのは研究者には受けない。研究ではない、という意識があるからであろう。しかし、恐らく、それは全く間違っている。分解能の高い精密な地図を作れば、自然に見えてしまう発見や、見なければ出ない発想が爆発すると予言できる。地図があれば、すでにあるアイデアや着想を実際に確かめる理論、理論計算、観測、観測データの解析などの洪水が予測される。同じ要素を示す地図でも、その分解能や精度が上がるたびに大きな飛躍が起こる。地図づくりは研究の基礎であると共に、研究そのものである。地球内部の地震波速度分布の不均質分布図（トモグラフィー）の精密化がマントルダイナ

ミックスに及ぼした大きなインパクトは一例に過ぎない。

では、「地図づくりを如何にやるか」考えよう。地図づくりが研究の基本であって、しかも研究そのものであるとしても、研究者が地図づくりの実務作業をすることはしばしば悲惨な結果をもたらすものだ。それは地震予知研究分野ではすでに経験済みだ。私の答えは次の3要素からなる。

- (1) 研究者が、地図づくりをする原理と方法を「研ぎ究める」こと。
- (2) その方法を使って、国家事業として地図づくりを行なうこと。
- (3) できつつある地図を使う電磁現象研究を(1)へフィードバックすること。

(1)を行なうことは、(2)と(3)を明確に意識した目標を設定した場合、研究者にとって決してつまらない仕事でなく、研究そのものとして大変面白いことではなかろうか。逆に、高い創造性と構想力を必要とする点でむしろ苛酷な課題かも知れない。(2)には、国際社会における国の文化的威信と市民の将来の安全がかかっている。地形図はかつての陸軍陸地測量部が、地質図は地質調査所が、天気図は気象庁が、それぞれ、その時代の最新の技術を用いて作成してきた。地震予知に関わってでは、例えば微小地震の分布地図作成を、上の(1)から(3)までの吟味検討することなく国立大学が散漫にやってきて苦慮する状況になっている、と私は見ている。最近のGPSによる地殻変動の地図づくりについては国土地理院が担当することになった。われわれは既に授業料を払って学習したのであるから、それを生かせばよい。

大学の特に理学部の研究者としては、上に述べた(1)に研究投資して何らかの飛躍的な方法を考えだせたらよいと考える。次の節では、このような試みの一つとして電磁アクロスを紹介し、その研究推進を提案する。

3-2 電磁アクロス-電気伝導度分布解明の新手法の提案

われわれはアクロスという制御信号源を用いた弾性波地下探査法を開発している^(1,2)。これは地球内部という対象に弾性波による照明を行ない、その弾性波の観測によって地震波速度構造をミルという考え方を原理的な面から徹底的に考察した結果導きだした愚直な手法である。アクロスは、われわれが「アクロス3点セット」と呼んでいる3要素(精密制御定常信号源+多チャンネルフーリエ成分観測記録システム⁽³⁾+複素存否セプストラム解析などのデータ解析法)からなる一つの観測技術体系を構成するものである。

アクロスの考え方は電気伝導度構造解明にもほとんど同じように使えることがわかり、しかも地震波のアクロスと合わせて用いることによって、地震予知研究に避けては通れない基礎的ツールになることがわかった⁽⁴⁾。したがって、弾性波をつかう地震学者が地震予知研究を行なうために、かりに電磁変動に関心がなくても地球電磁気学の研究者の応援を得なければならぬ、逆に、地震発生には関心がなく、電気伝導度構造しか興味のない研究者にも音波アクロスと電磁アクロスの組み合わせは有用なツールである。電磁アクロスは、結果的にはCSMT法と大変似ているように見えるが、考え方にはかなり異なる点がある。そこでアクロスの考え方を次に紹介しておく。

アクロスシステムの考え方 : アクロスの観測では、徹底した精密観測によって信号源と受信点の間の伝達関数(周波数領域)を離散周波数系列として決定する。その系列データの解析には二つのアプローチがある。第一はその観測データから、複数経路をとる複数の信号についてその群速度と位相速度による情報伝播時間を存否セプストラム法によ

って決め、そのレイパスの幾何光学的な解析によって波の速度構造を決定するものである。第二の方法は信号源の働きを準ノーマルモードの励起とみて、周波数領域の伝達関数を構造の順問題として与え、観測データを逆投影して構造を解くものである。幾何光学的な解析とノーマルモード的な解析とは目的とする構造の空間スケールと使う周波数領域によって適切に使いわけるのが適切である。

制御信号源：能動的な人工信号源のもつエネルギーは限られているので、ノイズに対して強い信号が必要である。最もロバストなのは周波数が精密にわかっている定常サイン波だから、地下照明用信号としては周波数と位相を絶対時刻（現実にはGPS時計）を基準にして精密に制御した定常的サイン波を用いるのである。現在行なっている弾性波アクロスの場合、数 Hz から 100 Hz 範囲の周波数範囲で、その周波数精度はすでに数マイクロヘルツ程度に達している。雑音のパワーは観測周波数幅に比例するので S/N は周波数幅に逆比例して上がる。例えば、信号周波数幅が 1 Hz の場合に対して、それが 1 μ Hz なら、S/N は 10^6 上がる。さらに、その信号の観測は 24 時間 365 日連続的に行ない、スタッキングによって信号の S/N の向上をはかるのである。受信信号のレベルはスタッキングによってデータ取得時間に比例して向上するのに対して、ノイズはその平方根にしか比例しないので、長時間観測によって S/N は向上する。24 時間の観測データは 15 分間の観測の場合に比べて S/N は約 10 倍向上する。長時間連続観測してデータを蓄積することには、地球内部の物性の微小な変動のモニターにもなっている。

狭帯域多チャンネル受信記録装置：信号を受信するセンサーは時間的に安定で徹底して精度の高いものが必要である。アクロスシステムの特長は、そのセンサーからの経時的デジタル出力信号を一気に多数の離散フーリエ成分だけにして TS STACKER (= Time Segment STACKing recodER、時間区間蓄積型記録装置) で記録する点にある。この記録装置では、絶対時刻に同期させて一定時間間隔に分割した入力信号を逐次加算記録することにより、分割時間間隔の中に整数個の周期をもつ信号だけを加算記録することになる。例えば、データのサンプリング周波数が 100 Hz で、分割時間が 100 s ならば、0.00 から 0.01 Hz おきにナイキスト周波数の 50.00 Hz まで、5000 個のフーリエ成分を記録したことに相当する。各フーリエ成分（チャンネル）のバンド幅は、データの総記録時間の逆数で与えられる狭帯域のフィルターを通したことと等価になっている。例えば、24 時間のデータ取得では、 $1/(86400 \text{ s}) \approx 10 \mu\text{Hz}$ が取得バンド幅になる。最も重要な点は、信号源と受信装置は共に絶対時刻に同期させてあるので、信号源と受信装置は同期しており、したがって、送信源での位相と受信点での位相の差の情報が観測データに含まれていることである。長時間のデータ取得によって、光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ で信号が 30 m 伝播して生じる 0.1 μs 程度の位相差を決定するのは容易であると考えられる。

現実の観測では、TS STACKER が取得する等間隔の離散フーリエ成分の波を同時送信し、伝達関数の周波数系列データを一気に取得するのである。例えば、一つの信号源から、9.50~10.50 Hz の範囲で 0.01 Hz おきに 101 個のフーリエ成分の信号を同時に送信し、もう一つ信号源から、49.50~50.50 Hz の範囲で 0.01 Hz おきに 101 個のフーリエ成分の信号を発信するとする。ある観測点の一個の TS STACKER でこれらの合計 202 個のフーリエ成分を混信することなく受信記録できる。この場合、10 Hz と 50 Hz のそれぞれの近傍における伝達関数とを同時に得られ、送受信点間の信号伝播速度が求められる。

複素存否セブストラム解析法：セブストラム（cepstrum は spectrum のスペルの一部を逆にした術語）はスペクトルから反射波の到達時間を決める手法として Bogert ら(1963) が提唱し、一時流行したが最近はその限界がわかり使う人はほとんどいなくなった。存否法は有限離散時間系列データの高分解能スペクトル解析法として開発され、地球の固有振動解析に使われ威力を発揮したものである。複素存否セブストラム解析は、上の二つを突き合わせて、複素離散周波数系列データから時間軸上に極在する複数の信号の時刻を決定する新しい解析手法である。これをここでわかるように説明するのは紙面不足で困難なので、別の機会に譲ることにして、ここでは、特に電磁アクロスの場合、どのような特長をもっているかを述べておこう。存否セブストラム解析では、極めて狭い周波数範囲（例えば 9.5~10.5 Hz）のアクロス観測で得られる離散周波数系列データ（もちろん高い S/N を必要とする）だけから、異なるパスを通して異なる時刻に到着する複数波群のそれぞれについて、群速度と位相速度の伝播時間と減衰係数を同時に決めることができる。従って、分散性が極めて高く減衰の著しい地中を通る電磁場の伝播の解析には掛け替えがないということである⁽⁵⁾。

アクロスのネットワーク：

地下の一定領域の構造を高い空間解像度と高い精度で解明するためには、多数の信号伝播経路の情報を必要とするのは原理的要請である。そのためには多数の信号源装置と多数の観測点からなるネットワークが必要になる。このような観測ネットワークと信号源ネットワークをルーチンで長期間（例えば 1 ヶ月間、1 年間 あるいはそれ以上）継続的に動作させてデータをスタッキングすれば、信号源と観測点間の精密な伝達関数が得られ、極めて詳しい地下の電気伝導度構造（あるいは地震波構造）が求められるはずである。それは同時に構造の微弱な時間変動をモニターすることにもなる。電気伝導度と地震波速度の分極までを含めて両方のモニターをすれば、地下の応力や水の分布とその変動を読み出せるだろう⁽⁴⁾。地震波の場合には、 10^{-8} 程度の潮汐歪みに応答する微小な地震波速度の変動の検出さえ実現可能で、想定される地震断層面近傍の地殻歪みや震源核のリモートセンシングモニターの他に、資源探査や地盤調査などにも有効であろう。

4 議論 - 地震予知研究に避けては通れない基礎

アクロスシステムの基本的な考え方を説明し、それが地下構造解明に非常に高いポテンシャルをもっていることを示したつもりである。この方法は（わかってしまえば）非常に単純明解な原理に基づいているので、それを実用的研究手段として具体化する技術開発研究を愚直に行なえば、分解能の高い地下構造解明の刷新的手法になると確信できる。そこで現在、名古屋大学を中心に大学院学生を含めた約 10 名の研究者が共同してこの研究を推進している。その進展は著しく速いので、2~3 年以内に標準的地下構造研究手法に仕立て上げられるものと予想している。その応用範囲は極めて広い。「国家事業としての国土基盤観測」によって、地下構造の「3次元地図づくり」に寄与できるであろう。それには、日本列島をおおう弾性波と電磁波のアクロスネットワークの構築が必要である。その継続的運用は、日本列島地下 3 次元構造常時モニターシステムとして機能するはずである。当面は 3-2 で述べた (1) に投資することが、技術としての地震予知にも WHY と問うサイエンスにも、結局は最も速い手堅い道であると主張したい。

文献

- (1) 熊澤峰夫、武井康子；精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究、その1 目的と原理、地震学会講演会要旨（福岡、H6.10）
- (2) 熊澤峰夫ら；アクロスシステム開発研究の現状報告、地球惑星合同学会講演会要旨（大阪、H8.3）
- (3) 山岡耕春ら；精密制御定常震源と時間区間蓄積記録装置のGPS刻時による遠隔同期計測実験、地震学会講演会要旨（水戸、H 8.9）
- (4) 小川克郎、熊澤峰夫；音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理的状態の常時リモートセンシングへむけて、地震学会講演会要旨（静岡、H8.9）
- (5) 小川克郎、熊澤峰夫、熊谷博之；電磁アクロス：電気伝導度構造解析の新技术、地球惑星合同講演会要旨（名古屋、H 9.3）

参考資料として電磁アクロスに関する講演要旨（4）と（5）を再録しておく。

文献（4）のコピー

1 いろいろな ACROSS: ACROSS (Accurately Controlled Routine Operated Seismic Source) は、地下にむけて定常的に放射する周期的な波動を観測して、波の速度（減衰特性を含む）構造とその微小な変化を検出できるものである。この原理と手法は、弾性波だけでなく地下を伝播する電磁波にも使える。要は、定常的サイン波がノイズに最も強い信号であることを徹底的活用する点にあるので、ACROSSの最後のSSをSignal Systemの頭字SSである、という変更をしたい。弾性波の場合には、ACoustic ACROSSだから単にACROSS、電磁波では ElectroMagneticの頭字をとってEM ACROSSと呼ぶことにする。

2 EMACROSSによるH₂Oのリモセン: 電磁波の速度は300 m/μsであるが、地殻内では、硫酸塩化合物とH₂Oの誘電率が大きく、電磁波の伝播速度は100 m/μs以下である。また、H₂Oの存在と高温の両方の効果によって電気伝導度も大きいため減衰が著しく、特に低い周波数では波動としての特性をもたない。しかし、このような場合でも ($\kappa \gg \epsilon \omega$ 、但し κ =電気伝導度、 ϵ =誘電率、 ω =角周波数) 情報伝達速度としての位相速度 v は定義され、点源からの情報伝播は $\exp[i\omega(t-r/v)](1/r) \exp(-r/\lambda)$ と表される。ただし、 $v = (2\omega/\mu\kappa)^{1/2}$ (μ =透磁率)、 $\lambda = (2/\mu\kappa\omega)^{1/2} = v/\omega$ は空間減衰係数である。 μ の値は岩石の状態であり変わらないので、 v と λ の値はほとんど κ と周波数で決まる。 κ が大きくなると、 v は弾性波速度とあまり変わらない程度までも下がり得る。GPS時計によって $\sim 0.01\mu\text{s}$ の時間計測が行えるので、 λ が小さく送信源からの信号振幅は小さくはなるが、電磁アクロスによって v を走時として測定できる。これは経路にそった平均的電気伝導度の情報をもっており、電気伝導度とその時間変化の3Dマッピングを実現できよう。この方法はCS-MT法と似ているが、信号源・観測点間の伝達関数を使う点で異なり、オングストローム法による熱拡散率測定と相似である。

地殻浅部の電気伝導度は主に岩石組織中に含まれるH₂Oの量で定まる。岩石中のH₂Oが方向性をもつ微小クラックを満たしているとすると、電気伝導度に異方性が存在し、それが v の分極ベクトル依存性として観測できる。すなわち、EMアクロスは、地殻中の水の量と分布状態を常時リモートセンシングする方法の一つである。

3 地殻応力のリモセン - 潮汐応答による校正の活用:

地殻の浅部では、潮汐歪みによって地震波速度と減衰特性が変化する。振幅と周期のわかった潮汐歪みへの応答感度は、深部ほど小さくはなるが、将来はアクロスで精密に観測できるであろう。特に異方性に関わる特性とその時間変動のトモグラフィーは、地殻内のテクトニックな歪みのリモートセンシングになる。しかし、弾性波アクロスだけでリモセン手法を確立するのは困難であろう。

4 地震波と電磁波を同時観測し統一的に解釈すること: 地殻内の物理的状態を反映する観測量（弾性波、電磁波速度）は、歪みとそれに応答するクラックとそれを充填する水の挙動の総合的效果に依存する。観測量を知りたい物理量に翻訳するために必要不可欠な要素として、次の二つの重要性を改めて認識する。(1) 物性を支配する物理過程を明かにする実験的、理論的研究(2) 弾性波と電磁波の両方の同時平行観測と統一的解析手法 地殻内の物理的状態の常時遠隔観測を実現することは、EislerやAkiらが夢に描いた固体地球科学の基礎である。その実現可能な手段として、アクロスの研究開発の位置付けと役割を明確にしておきたい。

文献(5)のコピー

電磁波アクロス (EM ACROSS) が地下構造の動態解明にもつ意義の重要性、およびそれが原理的技術的に成立することを、前回の秋の地震学会で報告した：意義は、音波アクロスと同時に用いることによって、地殻内の応力や水の状態の変動の観測的決定に相互補完関係にある手法としての目標設定にある。原理的な新機軸としては、アクロスの考え方と方法を用いることによって、波の伝播としてソース-レシーバ間の走時を従来の方法よりも高精度で決定できるとの考えを示した。今回は、電気伝導度が高い地殻内の電磁波には著しい減衰と分散があるにも関わらず、波線にそった伝播波としてその分散と吸収を精密に決定できること、および、従来の方法との比較における EM ACROSS の特長を提示する。

分散性減衰波としての性質： 地殻内では電気伝導度が高く、マックスウエルの波動式は拡散方程式に縮退する。

(1) 波数 k は $k = [-i\omega\mu(\sigma + i\epsilon\omega)]^{1/2} = -[i\omega\mu\sigma]^{1/2}$ (μ : 透磁率、 ϵ : 誘電率、 σ : 電気伝導度) である。位相速度 C ($1/C = (1-i)[\omega\mu\sigma/2]^{1/2}/\omega$) と群速度 U ($= 2C$) は共に周波数に大きく依存 (平方根に比例) し、減衰率 Q^{-1} は周波数に依存しない大きな定数 2 である。

(2) 電気伝導度の不連続面に媒質 1 から媒質 2 へ入射した場合、インピーダンス z ($= \sigma C \sim \sigma^{1/2}$) を使って波の反射係数 $R = (z_1 - z_2)/(z_1 + z_2)$ と透過係数 $T = 2z_2/(z_1 + z_2)$ が与えられる。これは減衰や分散の存在とは独立な性質である。

(3) 従って、拡散方程式で支配される領域でも、減衰と分散が大きいで、波動としての基本的性質は留めているので、レイパスとそれにそった反射、屈折や走時を考えることができ、それに基づいた解析が可能なのである。

複素存否セプストラム法： 信号発信源から受信点への周波数領域の伝達関数が、観測によって複素離散系列データとして与えられているとしよう。その狭い周波数巾 $[\omega_0 - \Delta\omega/2, \omega_0 + \Delta\omega/2]$ の中だけに存否セプストラム法を適用すると一般には複数の複素ケフレンシーが求められる。そのおのおのの実部は $\omega = \omega_0$ における群速度の走時 ($= x/U(\omega_0)$, x は波の伝播距離) を与え、虚部がその走時の波の減衰係数 $Q(\omega_0)$ を与える。また、 $\omega = \omega_0$ における振幅と位相からは、位相速度の走時 ($= x/C(\omega_0)$) とその減衰も得られる。この操作を広い周波数に亘っておこなうと、異なる伝播時間をもつ複数の波群について、群速度と位相速度の分散曲線、および減衰の周波数依存性が同時に求められる。これは理論的に証明され、数値実験で確認されている (熊谷 他、本合同学会発表)。

EM ACROSS： ここで提案する EM ACROSS とは次のようなものである。

(A) CSMT法の使用を、精密制御定常信号源-観測点間、および複数の観測点間の周波数領域伝達関数のデータ取得、と位置付けて徹底的に精密に行なう。具体的には、例えば $1 \sim 0.01 \mu\text{s}$ の同期精度で、信号源の発信周波数を例えば $\sim 1 \mu\text{Hz}$ まで精密に制御して、例えば $10^3 \sim 10^7$ 秒という長時間同期スタッキングによって、伝達関数の高精度周波数離散複素系列データを取得する。

(B) 波の反射透過屈折伝播によるさまざまな波線にそった走時とスペクトル変化を周波数の関数として複素存否セプストラム法で解析する。

(C) 遠地波については (B) の結果と波線理論を用いた構造解析逆問題として時間領域で、また、近地波などでは地下構造の波数構造を直接逆問題として周波数領域で解く。前者は微細構造解析に、後者は大局的構造解析に向いている。

Levy et al (1988) が MT 法に導入した reflectivity 法は、基本的にはパルス的な孤立波の伝播を想定し (仮想インパルスと称している) (2) で述べた反射係数を使った走時解析的な考え方に立つものである。reflectivity 法は理論的には健全であるが、(1) で述べた分散性が高く吸収の大きい地殻中の電磁波伝播の解析には、データ取得の問題も含めて現実的な困難があった。

EM ACROSS の特長： 高い S/N のデータ取得というアクロスの特長は特に減衰の著しい電磁波に有効だから、これまでよりも深部まで、かつ、より高精度の電気伝導度構造解析ができて当然である。特筆することは次の通りである。(1) 地下構造の不連続面における地震波の音響インピーダンスコントラストが $\sim 1\% \sim 10\%$ の程度でしかないのに比べて、電磁波の場合インピーダンスはオーダーで変化するので、反射係数は大きく (~ 1 or ~ -1) 反射法が有効である。(2) 電磁波の実効的分散と減衰が周波数の関数として求められる。電気伝導度の不連続面がある幅がある場合、そこからの反射走時と振幅の周波数依存性は不連続層内の構造解明などにさえ有効である。