

物理探査 ニュース

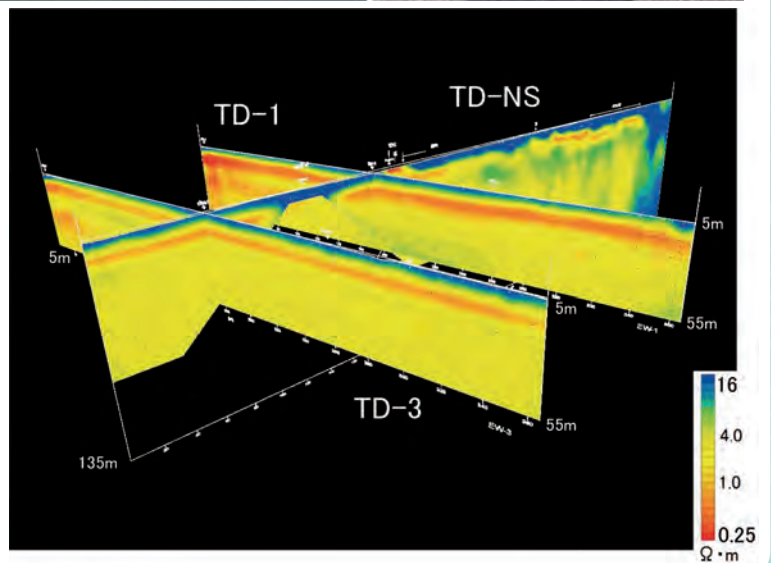
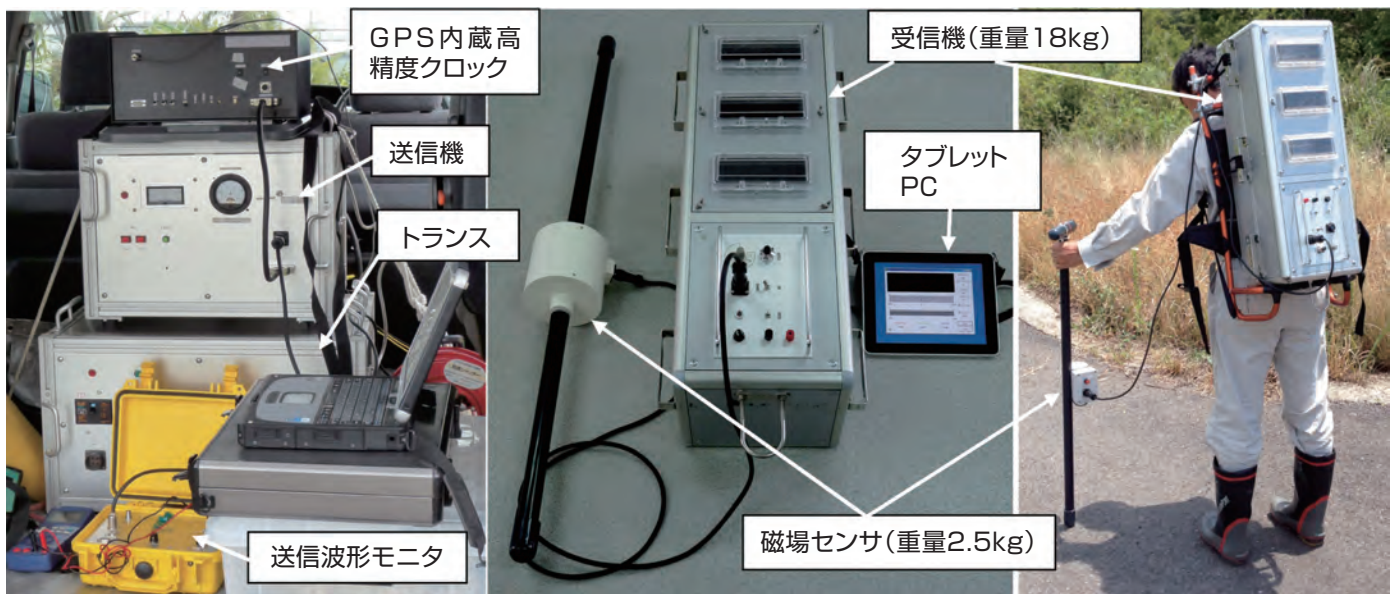


公益社団法人 物理探査学会
Society of Exploration Geophysicists of Japan

目次

わかりやすい物理探査「微動探査4」	1
現場レポート	
時間領域電磁探査装置の研究開発(1)	5
研究の最前線	9
ワンデーセミナー報告	11
第1回若手ワーキンググループ討論会	13
お知らせ・編集後記	15

Geophysical Exploration News April 2015 No.26



表紙説明：【可搬式時間領域電磁探査装置(PTDView)の概要】

(上左)送信装置、(上中央)受信装置、(上右)受信風景、(下左)送信風景、(下右)探査結果の例

写真提供：ネオサイエンス(詳しくは本号の現場レポートをご覧ください)

微動探査講座



電力中央研究所 地球工学研究所

佐藤 浩章

これまで、微動探査の一般的な実施や解析の方法、また探査深度に合わせた適用方法、実務において利用しやすいより簡便な方法など、3回に分けて紹介してきました。本テーマタイトルにありますように、まずは是非やってみていただきたいと思います。一方で、微動探査を用途に応じて、どのように使っていけばよいのかが、重要になってきます。そこで、まず、微動探査で得られる地下構造がどのようなものであるかという点について、改めて考えてみたいと思います。

微動探査では、微動観測の際にアレイ配置した地震計の範囲、すなわち、ある一定の拡がりをもった領域内を伝播するレイリー波の平均的な位相速度データを取得します。地下の速度構造の推定は、取得された位相速度を用いて行うため、得られる構造も位相速度が平均なデータであることと同様に一定の拡がりをもつ領域内の平均的な構造になります。このことは、例えばPS検層であればボーリング孔位置、地震探査であれば受振点直下の構造、さらには受振点範囲の2・3次元的な構造の変化を推定できるのとは異なっていることを認識しておく必要があります。したがって、例えば建設地点の平均的な地下の速度構造を知るといった用途が、微動探査を適用する目的として考えられます。しかしながら、ボーリング掘削や特殊な計測装置、大規模な起振器などを必要とせず、地表に地震計を短時間設置するだけで、地下の速度構造が把握出来るという微動探査の長所は大変魅力的であるため、平均的な構造の枠を超えて微動探査を活用するような方法も増えてきています。以下では、そのいくつかについて紹介します。

1. チェーンアレイ探査

微動探査では、地震計を展開した範囲を平均的な1点の

構造として推定することから、その範囲内での2・3次元の地下構造の変化を、反射法地震探査のように捉えることはできません。しかしながら、微動アレイ観測を効率的に高密度に複数の場所で実施することにより、観測点直下の地下構造を反映した位相速度の変化から、2・3次元の地下構造の変化も捉えられる可能性がでてきます。そうした考えで提案されている微動探査の1つがチェーンアレイ探査です¹⁾。図1は、チェーンアレイ探査における地震計配置の一つの例で、正三角形の頂点だけをつなぎ合わせた効率的な配置になっています。

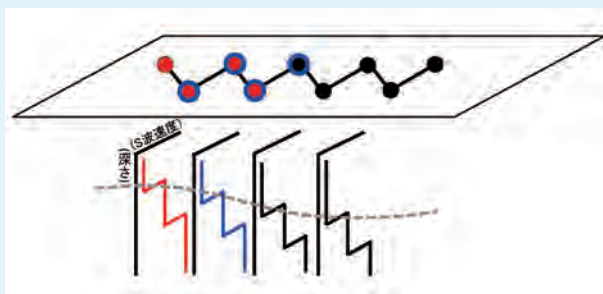


図1 チェーンアレイ探査の配置と概念図

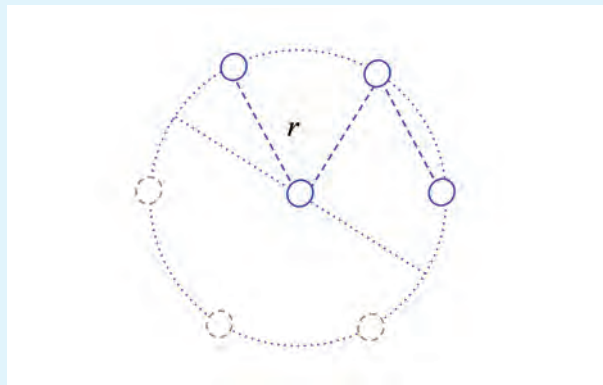


図2 チェーンアレイにおける半円形アレイ

チェーンアレイ観測における位相速度の推定は、図1の同じ色の点、すなわち4台の地震計を1ユニットとした解析で行われます。この1ユニットの地震計配置は、図2のような半円形アレイ²⁾と呼ばれるアレイ配置になります。半円形アレイは、図2に示すように、文字通り円形アレイを半分にした観測で、位相速度の推定範囲が、もともとの円形アレイと同程度、すなわち空間自己相関係数が $-0.304 (J_0(\pi))$ となる周期までの推定が可能な効率的な方法です²⁾。また、解析方法も、従来の円形アレイを仮定したSPAC法と変わりませんので、実用上、従来のSPAC法ができれば、すぐに適用することができます。この方法では、図1のように、解析対象となる4台の地震計による1ユニットについて、位相速度を推定し、地下の速度構造を求めます。始点と

なる地震計を1台ずつ順次移動し、それぞれのユニットについて、同様に、位相速度を推定しそして地下の速度構造を推定することにより、2次元な地下構造の変化を捉えられることとなります

このようにチェーンアレイ探査は、半円形アレイを利用することにより、2次元測線的な地震計展開が効率的に工夫されているだけでなく、地震計の空間的な拡がりを通常の円形アレイの3分の2に抑えた上で同程度の探査深度を確保する点で大変優れた方法といえます。実際、上町断層帯という逆断層構造を横断するようにチェーンアレイ探査を適用した例では、断層の東側に西側に乗り上げる逆断層の特徴と調和的なイメージング結果が得られたとの報告³⁾もありますので、今後の適用が期待されます。

2. 地震記録を援用した微動探査

既に人工的な構造物が多く存在するような場所では、**図1**のような測線の展開は難しく、2・3次元な構造探査が難しくなります。また、微動探査で2・3次元な構造の変化を捉えるためには、構造が平均化される範囲をできるだけ小さくすることが必要となるので、アレイサイズとともに、必然的に探査深度は小さくなり、深い構造の変化を捉えることが難しくなります。このように、既設の構造物が存在し、かつ狭い範囲での深い構造の変化を調査することが難しいのは、微動探査に限ったことではありませんが、微動探査は一つのポイントの構造を決定するために複数の地震計を必要とすることから、観測の実施はよりハードルが高く、容易ではありません。そこで、こうした既設の構造物が多い地点での探査において、地震記録を援用した微動探査が効果的である場合があります。

図3には、第2回で微動探査の実施例として紹介した発電所における地表地震観測点(●)と微動アレイ観測位置(△)を示します。**図3**のように、地震観測点は既設の構造物を避けて、比較的自由に設置することができるので、深部構造の探査を目的とした微動のアレイ観測の展開範囲内(**図3**の△)に、2・3次元の構造の変化を捉えることを目的とした地震観測点を3力所以上設置できています。**図4**は、**図3**の各地震観測点で得られた記録から求めたレシーバー関数を代表点について並べたものです⁴⁾。レシーバー関数とは、地震観測点の直下の速度構造の境界で変換された波によって構成された波形で、水平成分の記録を上下成分の記録でデコンボリューションすることによって得られます⁵⁾。**図4**をみると、各地震観測点のレシーバー関数に共通にみられる顕著な位相(**図4**中の●印)の到達時間に違いがみ

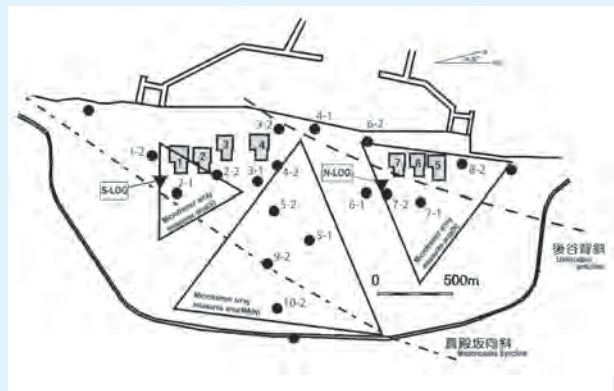


図3 既設発電所での調査における微動探査(△)と地震観測点位置(●)

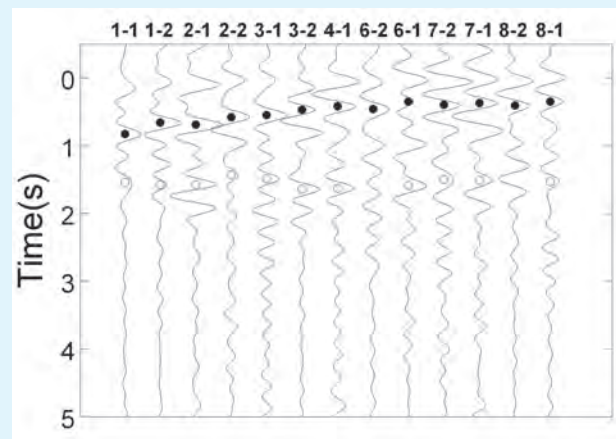


図4 各地震観測点で得られたレシーバー関数

られ、これが地下の共通の速度境界面の深さの違いに関連する情報となります。

そこで、地震観測点で得られたレシーバー関数と微動探査で用いられる位相速度と組み合わせた逆解析によって地下構造を推定することがよく行われます⁶⁾。**図5**は、**図3**の各地震観測点においてレシーバー関数と微動探査による位相速度の同時逆解析を行った結果によるS波速度構造を示します⁷⁾。

図5から、地震観測記録を援用することにより、通常構造が平均化されるアレイの範囲内においても、それぞれ異なる深い構造が推定されています。また、**図5**の灰線で示されているPS検層の結果と比較すると、地震記録を援用した同時逆解析によって、少なくとも1km程度までは、PS検層と調和的なピンポイントの構造が推定できていることとなります。このように、微動探査を用いて深い構造の変化を推定する際に、地震記録は大変有効な情報となります。

さらに、地震記録を援用することで微動探査における位相速度の逆解析の非一意性の問題を軽減できるといった利点もあります。**図6**は、位相速度だけを逆解析した場合と

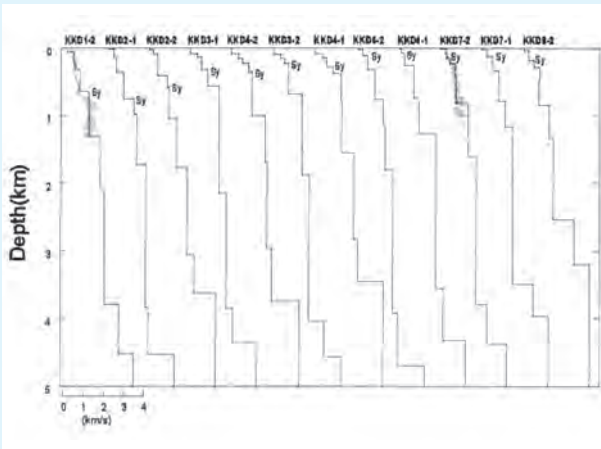


図5 各地震観測点で得られたS波速度構造

レシーバー関数と位相速度を同時逆解析した場合における地下構造パラメータ(S波速度と層厚)の誤差局面の変化ですが⁸⁾、**図6の左側**に示す位相速度だけの場合、層厚を決定するのが難しいことがわかります。一方、レシーバー関数を援用した場合、層厚に対する拘束が付加され、誤差曲面には解を一意的に決定するための極小解が明瞭となっています。このように、位相速度の地下構造パラメータに対する誤差曲面と異なる形状をもつ観測量を効果的に組み合わせることで逆解析に用いることが微動探査の精度の向上には有効であることも付け加えておきます。

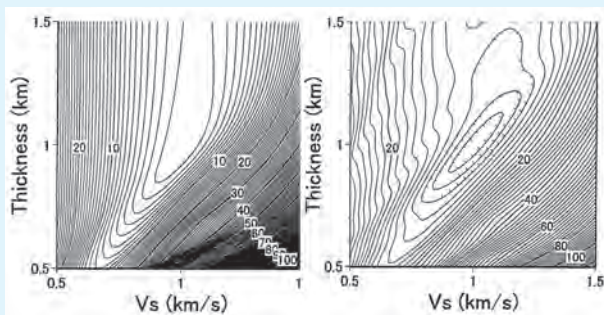


図6 位相速度のみの場合(左)、地震記録を援用した場合(右)の誤差曲面の変化

3. 地震波干渉法を援用した微動探査

近年、2つの観測点で得られた常時微動記録の相互相関からグリーン関数を合成する地震波干渉法が、地下構造探査に応用された事例が多く報告されています。地震波干渉法の適用事例としては、おもに、2点間の相互相関より得られたグリーン関数から、観測点間の平均的な構造を反映した群速度を推定する事例が多くみられます。この場合、表面波の分散性がグリーン関数に表れるよう、比較的大きな観測点距離(例えば10km以上)が必要となります。そのた

め、群速度が反映する構造は、通常の微動探査よりさらに空間的に大きな領域が平均化されたものとなり、かなり大局的な構造として推定されます。そこで最近では、地震波干渉法から微動探査で用いる位相速度を推定することも行われています⁹⁾。

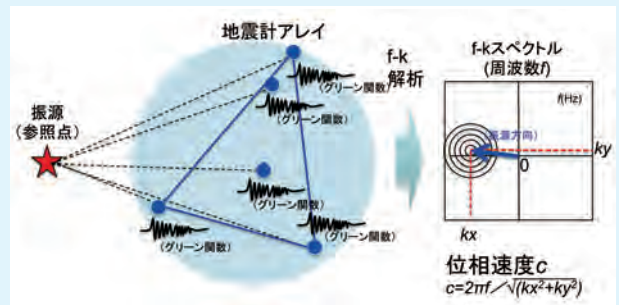


図7 地震波干渉法を用いた位相速度の推定方法

ここでは、例として、著者らが若狭湾地域を対象に位相速度を推定した方法について紹介します¹⁰⁾。例えば、**図7**に示すように、微動探査におけるアレイ観測と同様、調査対象地点にある拡がりを持って微動アレイ観測を展開し、その際、アレイ観測の外に参照点として観測点を1点余分に設けます⁹⁾。そして、この参照点とアレイ観測内の各観測点のペアによる2点間のグリーン関数を求めます。このように、参照点での記録を共通に用いたアレイ観測内の相互相関は、**図7**のように参照点を振源とするグリーン関数になっていることが考えられます。そこで、地震記録の表面波成分を用いたアレイ解析と同様に、位相速度を求めることができます。

図8には、参照点を西側に設置し、東側に5地点のアレイ観測を実施して得られたグリーン関数について**f-k**スペクトル解析を行った結果を示します。図から、優勢な表面波の到来方向を表す2次元波数スペクトルのピークは、唯一、アレイ観測の中心から参照点の方向にのみ現れ、参照点を共通としたアレイ内の各観測点の相互相関がグリーン関数として得られていることがわかります。

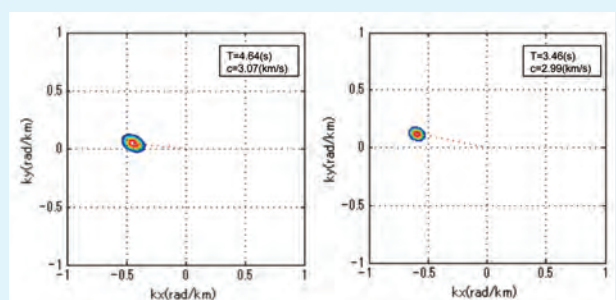


図8 地震波干渉法によるグリーン関数のf-kスペクトル解析結果 同じ解析の異なる2つの周期での例

図9には、グリーン関数のf-kスペクトル解析で得られた位相速度(□)とグリーン関数を求めたアレイ観測内の1つの観測点において、通常の微動探査で推定された位相速度(●)が示されています。両者は、よく一致し、このケースでは微動探査による位相速度を補完する周期帯域での位相速度が地震波干渉法によるグリーン関数から得られています。このように、地震波干渉法は、同じく常時微動を用いた方法として、微動探査の一つの有効な方法と考えられます。

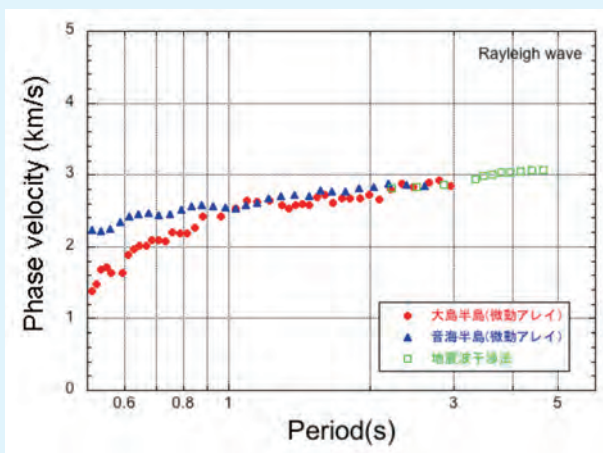


図9 地震波干渉法と微動探査による位相速度

4. 極小微動アレイ探査

微動探査では、PS検層のごとく1点(ピンポイント)における直下の速度構造を調査することも、厳密には難しいといえます。微動探査を用いて、ある1点における直下の速度構造を調査しようとする場合、上で述べたように、地震計を展開する範囲を小さくし、構造が平均化される範囲を縮小してピンポイントに近い構造を得る極小微動アレイ探査が考えられます。ただ、これまでも述べたように、地震計を展開する範囲、すなわちアレイサイズ(アレイ半径)は、微動探査の探査深度に大きく関係するため、PS検層のようにピンポイントの構造を追求すればするほど、探査深度が浅くなるといったことが生じます。そこで、極小微動アレイの一つの方法として、第3回で紹介した小さなアレイ半径でも効率よく長波長のレイリー波の位相速度が推定できるCCA法の活用が考えられています。実際、アレイ半径30cmのCCA法を用いた極小アレイ観測による微動探査から、アレイ半径の500倍を超える波長のレイリー波の位相速度が推定され、深さ50m程度までの構造の推定が出来た事例も報告されています¹¹⁾。ただし、現状では、観測地点や機材、外的な条件によって位相速度の推定範囲が変化

するため、いつでもどこでも数十mオーダーでの探査が可能な訳ではありません。とはいえ、図10のように、半径30cmといえば、ボーリング孔を用いたPS検層並みにピンポイントです。また複数実施することにより2・3次元的な構造の変化の推定も可能ですので、今後の発展が期待されます。



図10 極小微動アレイの様子
(電中研・栗山氏撮影)

参考文献

- 1) 林 久夫・松岡達郎・水落幸広・小野雅弘: 微動アレイ探査法の拡張の試み—チェーンアレイ探査法の適用について—, 地盤工学会誌, 58(8), 10-13, 2010.
- 2) 岡田 広・松岡達郎・白石英孝・八戸昭一: 微動アレイ探査のための空間自己相関法: 半円形アレイの適用について, 物理探査学会第109回学術講演会論文集, 183-186, 2003.
- 3) 原口 強・松岡達郎・南雄一郎・小野雅弘: チェーンアレイ微動探査法による上町断層地下構造のイメージング, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 181-182, 2010
- 4) 佐藤浩章・東 貞成・植竹富一・徳光亮一・引間和人: 高密度地震観測記録のレーザー関数解析による柏崎刈羽原子力発電所のPS-P時間分布, 第7回日本地震工学会大会-2009梗概集, 176-177, 2009.
- 5) Langston, C. A.: Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, J. Geophys. Res., 84, 4749-4762, 1979
- 6) Özalaybey, S, Savage, M. K., Sheehan, A. F. Louie, J. N. and Brune, J. N.: Shear-Wave Velocity Structure in the Northern Basin and Range Province from the Combined Analysis of Receiver Functions and Surface Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 87, 183-199, 1997.
- 7) Sato, H., S. Higashi, T. Uetake and K. Hikima: Identification of 1D velocity structures in Kashiwazaki-Kariwa NPS based on dense earthquake observation and microtremor array measurements, Proc. of the 11th SEGJ International Symposium, 565-568, 2013.
- 8) 山中浩明: 微動と他種観測のデータの同時逆解析の試み, 物理探査学会第3回地震防災シンポジウム講演論文集, 86-96, 2007.
- 9) Yamanaka, H., K. Kato, K. Chimoto and S. Tsuno: Estimation of surface-wave phase velocity from microtremor observation using an array with a reference station, Exploration Geophysics, 2014, <http://dx.doi.org/10.1071/EG14069>.
- 10) 佐藤浩章・栗山雅之・東 貞成・岡崎 敦: 地震波干渉法による表面波の分散性データを用いた若狭湾地域の深部地盤構造の推定, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, OS3-Thu-PM1-2, 2014.
- 11) 長 郁夫・多田 卓・篠崎祐三: 極小アレイによる新しい微動探査法: 浅部地盤平均S波速度の簡便推定, 物理探査, 61(6), 457-468, 2008.



時間領域電磁探査装置の研究開発(1) — 可搬式探査装置の原理・手法(地上探査編) —

有限会社ネオサイエンス 城森 明

1. はじめに

センサを持って歩くだけで、もし、地下が可視化できるならば、なんと素晴らしいことでしょうか。それは将来の夢でしょうか？我々は、時間領域電磁(Time Domain Electromagnetic(略してTDEM))探査が、その可能性を秘めた探査方法ではないかと考えて研究開発を進めています。

時間領域電磁探査は、地面に非接触でも地下の探査が可能であり、短時間で測定が可能な探査方法です。

今回、本誌をお借りして地上に送信源を敷設した時間領域電磁探査装置の研究開発に関して、(1)では、原理、測定方法、地上電磁探査、(2)では、空中電磁探査をご紹介させて頂こうと考えています。

2. 時間領域電磁探査とは

電磁探査とは、変化する磁場を大地に与えることによって大地に誘導される磁場や電場(電磁応答)を測定して、大地の比抵抗構造を求める探査方法です。また、時間領域では、大地の電磁応答を時間の関数として測定して地下の比抵抗構造を求めます。

電磁探査の長所は、非接触でも探査が可能であることであり、時間領域の長所は、高速で測定が可能であることです。したがって、時間領域電磁探査は、大地に接触せずに短時間で測定ができるため、より多くの地点での測定が可能です。

これらの長所から、時間領域電磁探査は、高密度に測点を設ける必要がある3次元探査として、また、高速で測定しなければならない空中探査として適している探査方法であると考えられます。

2.1 原理

電磁探査は、その原理が電磁気学の分野であり、数学的な知識が重要となりますが、それは専門書にお任せするとして、ここでは、そのイメージを理解することを目指して話を進めさせて頂きます。

(1)電磁気の基本

①電流が磁場を作る(アンペールの法則)。

電線に電流を流すと、その回りに磁場が生じます。電線をコイルにすれば、電磁石になります(図1)。

②磁場の変化が電流を作る(ファラデーの法則)。

輪にした電線に磁石を通したり、近付けたりして輪の中の磁場に变化を与えると、その電線に電流が流れます。

輪にした電線を導体の板、磁石を電磁石として、変化する磁場を作るために、電磁石に交流を流せば、板に渦状の電流が発生します(図2)。

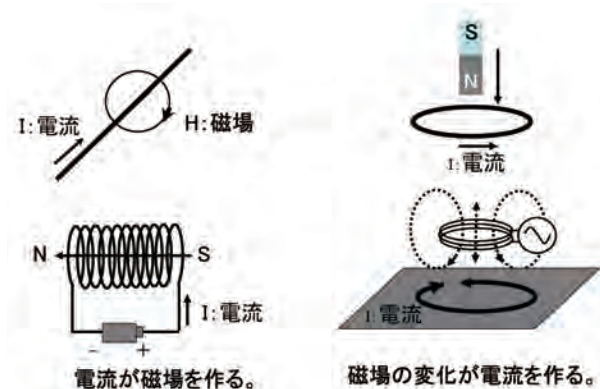


図1 アンペールの法則

図2 ファラデーの法則

ここで、②の現象を詳しく見ると、板に渦状の電流が生じたのは、板に電圧(誘導起電力)が生じたためです。この時の電流を誘導電流と呼びます。この誘導電流(I)は、板に発生した電圧(E)と板の電気抵抗(ρ)の比($I=E/\rho$)となり、誘導電流は板の電気抵抗の逆数となります。

(2)探査原理

電磁探査は、電磁誘導を利用した探査方法です。

電磁探査では、磁場の与え方には様々ありますが、②の板が大地に代わります。大地に変化する磁場を与えると、大地に誘導起電力が発生して誘導電流が生じます。この電流は、①の原理により、さらなる磁場を発生します。ここで、最初に与える磁場を1次磁場、誘導電流から発生した磁場を2次磁場と呼びます(図3)。

時間変化する磁場(1次磁場)→大地に誘導起電力が発生→大地に誘導電流が流れる。→誘導電流により磁場(2次磁場)が発生

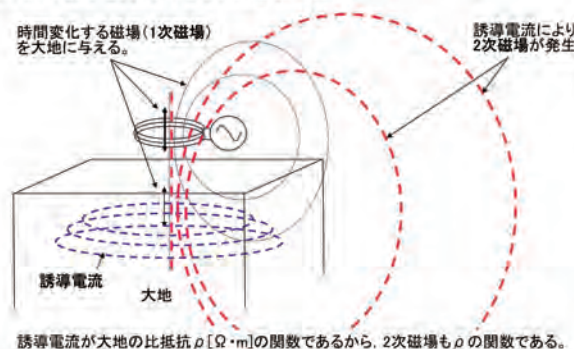


図3 1次磁場と2次磁場

誘導電流は大地の電気抵抗(比抵抗)の情報を含まれます。したがって、2次磁場も比抵抗の情報を含まれます。すなわち、誘導電流あるいは2次磁場を測定すれば、大

地の比抵抗を求めることができます。

探査深度は、電磁波の拡散深度(δ_{TD})と緩和時間(t)の関係から見積もられており、(1)式が得られています。ここで拡散深度が探査深度に相当します。この式より、緩和時間が長ければ探査深度が深いことが分かります。

$$\delta_{TD} = \sqrt{2t\rho/\mu} \dots\dots\dots (1)$$

ρ : 大地の比抵抗 μ : 透磁率

2.2 測定方法

測定方法からみて、電磁探査には周波数領域と時間領域があります。周波数領域電磁探査は、送信源から特定の周波数の電磁波を送信して、大地の電磁応答を測定する方法です。ここでは、両者の測定方法を比較して時間領域の特徴について述べます。

(1) 時間領域の測定とその長所

周波数領域の測定では、1次磁場を送信した状態で2次磁場を測定します。この状態では、大地の比抵抗構造の情報を含んだ2次磁場が、強い1次磁場とともに測定されるので、1次磁場を弱める測定方法が必要となります。しかし、時間領域の測定では、図4のように送信電流の通電と遮断を繰り返して、1次磁場を遮断した時間帯に2次磁場を測定するので、その必要性がなくなります。

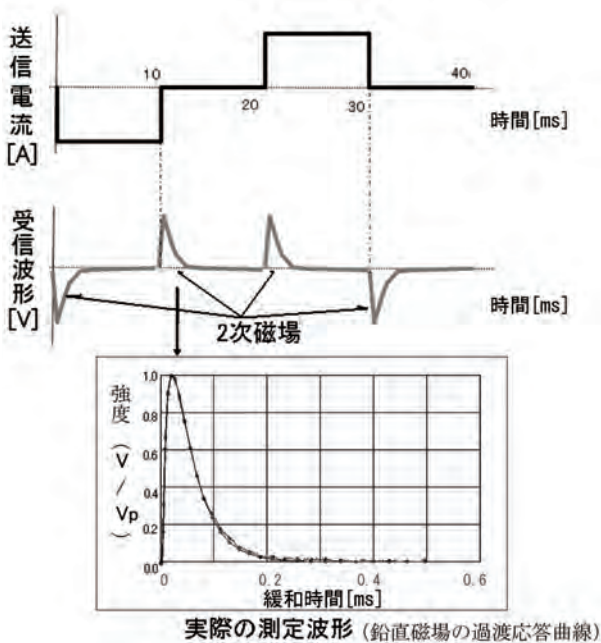


図4 送受信波形と2次磁場

また、周波数領域では、周波数が探査深度と関係するので、探査深度を変えるために多数の周波数の電磁波を使用して測定する必要があり、測定に時間が掛かりますが、時間領域では、電流遮断時に発生する磁場の変化(過渡応答)のみによって測定を行うために測定時間が短縮できます。

(2) 測定機器

(1)のような長所がある反面、測定機器には高精度の測定技術が求められます。以下に深度数10~数100mを探査対象として研究開発したTDEM(PTDView)装置について説明します。

図5が測定機器のブロック図であり、写真1が研究用に開発した機器の写真です。

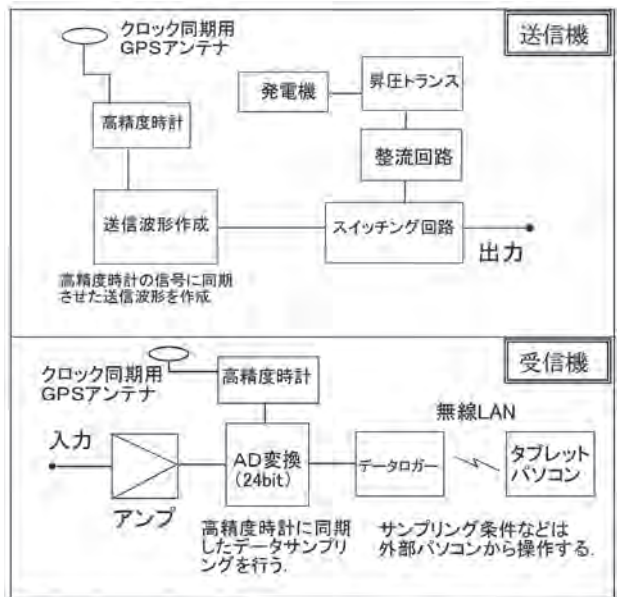


図5 測定機器のブロック図

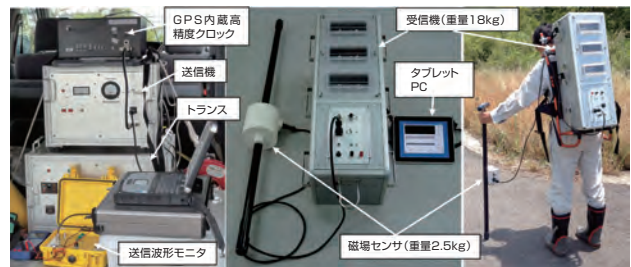


写真1 TDEM探査装置

ここで、受信機の分解能、特に送信機と受信機の時間同期が重要となります。開発した機器では、時間同期はGPSの1秒パルスを使用しています。

写真の受信機は、空中探査にも使用できるようにチャンネル数は12チャンネル、防振対策も施されたものとなっています。地上で使用するには、少しオーバースペックです。

測定は、**図6**の模式図に示すように、1次磁場を発生する送信源を設置します。送信源は両端を電極で接地して、ケーブルで繋いだものです。ケーブルに電流を流すことで、その回りに1次磁場を発生させます。2次磁場は、地面から浮かせた磁場センサで受信します。測定はセンサを地面に設置する必要がなく、舗装された地表面の上でも測定が行えるのが特徴です。

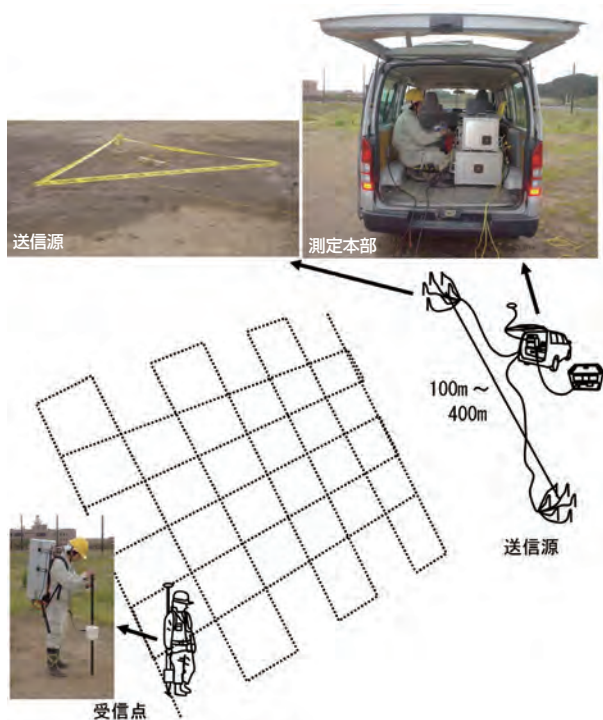


図6 TDEM測定模式図

2.3 解析方法

解析は、測定値(過渡応答曲線)と水平多層構造での理論曲線を用いて、2つの曲線が整合する最適な地下比抵抗構造モデルを求めます(1次元解析)。

ここで、測定値は鉛直成分の過渡応答曲線です(**図4**)。理論曲線は周波数応答の値に機器応答を加味した値を計算して逆フーリエ変換により求めた曲線です。

3.検証実験

水平多層構造の解析が成立すると考えられる場所で比抵抗構造の検証を行いました。

実験地区は、標高1~4mの低地であり、南北190m×東西365mの敷地です(**図7**)。

実験地区は新第三紀の地層を基盤として、その上部には粘性土を主とした沖積層や盛土が厚さ20m程度で分布

します。また、実験地区は、海岸線より100m程度陸側に入ったところであり、地下水には塩分が混入していると考えられます。

実験地区では東西方向に測線長365mを2測線、南北方向に実験敷地外を含む測線長600mを1測線、測点間隔は5mで合計269点、測線長の合計1300mの測定を1日で行いました。また、TDEMとの比較データとしては、2次元比抵抗探査を測線長365mを2測線、電極間隔は5m、電気検層(EC試験)は9地点の測定を行いました。

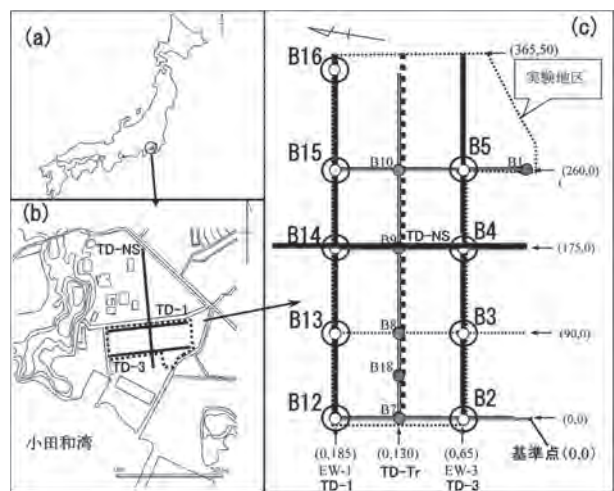


図7 検証実験位置図

○ 実験結果

図8は、TDEM探査の各測点の結果をコンタリングして3次元で示します。

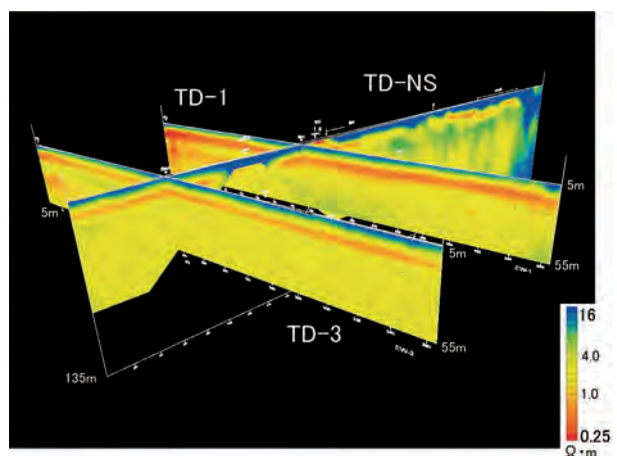


図8 探査結果

TDEMの測定結果は、表層から標高0mでは、主に10 [$\Omega \cdot m$]以上の高比抵抗を示して、その値は浅くなるほど高くなる傾向を示しています。標高0m以深では、標高

−4〜−10m付近で比抵抗は最小値(約1 [$\Omega \cdot m$])を示して、それより深くなるにつれて比抵抗が上昇する傾向を示しています。

図9は、2次元比抵抗探査、電気検層(EC検層)、TDEMで求められた比抵抗値を比較して示します。図より、3種の異なる比抵抗測定の結果は、良く整合していることが読み取れます。これよりTDEM探査の測定と解析が正常に行われていることが確認できました。

上記の実験地区以外の様々な比抵抗の場所で探査を行った結果、深度分解能は地盤の比抵抗が低ければ表層の深度分解能が向上すること、逆に、高ければ表層の深度分解能は低下しますが、より深部までの探査が可能となることが分かってきています。

現地調査でのコストパフォーマンスについては、アスファルト舗装上での測定も可能であり、2次元比抵抗探査と比較して調査速度が6〜10分の1程度と早いことが分

かってきています。

4.まとめと課題

電磁探査は電磁誘導を利用した探査であるので空気層には反応しません。したがって、大地に非接触でも大地の比抵抗構造の測定が可能です。一方、鉄管などの反応が強いために、それら人工物の探査は容易ですが、逆に、反応が強すぎるために、その近辺の解析された比抵抗構造に歪みをもたらす場合があります。このように電磁探査には長所と短所がありますが調査地区を3次的に把握するには効率の良い探査法であることが分かってきました。今後は、3次元解析の開発が課題であると考えています。

今回は、時間領域電磁探査を用いた空中探査についてお話をさせていただきます。

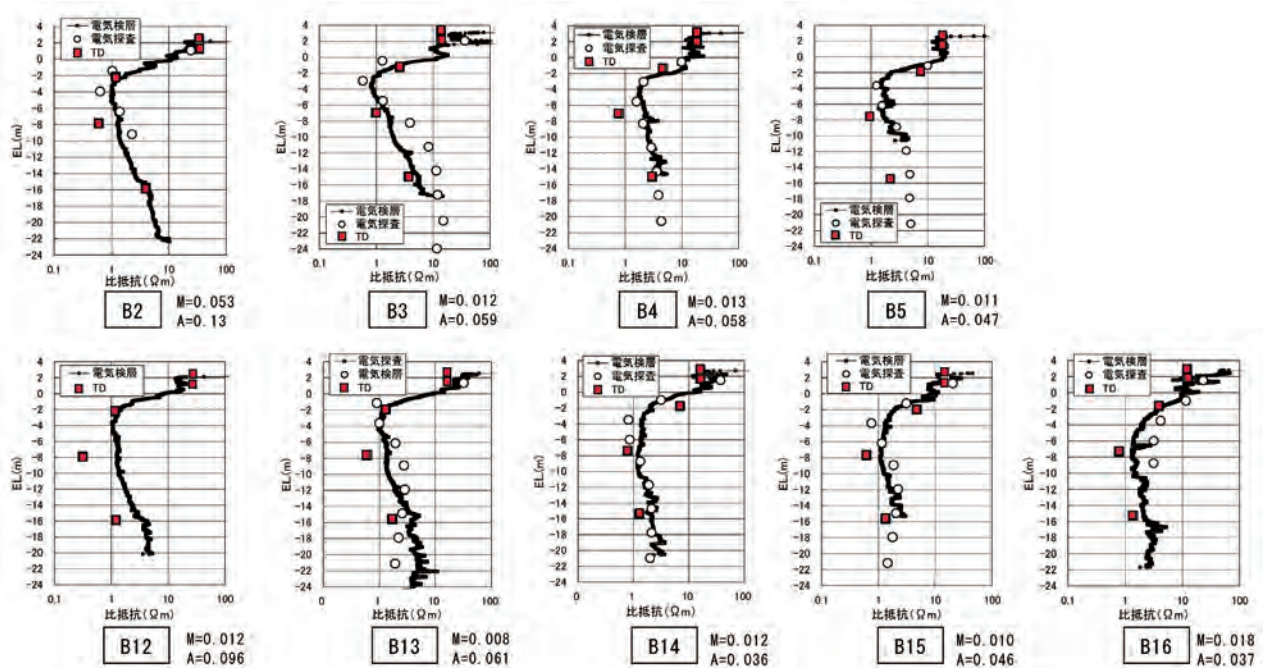


図9 探査結果の比較
 ■電気検層(EC検層)、○電気探査(2次元比抵抗探査)、■TD(TDEM探査)

<参考文献>

Anderson, W. L.(1974): Electromagnetic field about a finite electric wire source,U.S.G.S. Rep. GD-74-041.
 佐々木裕(1999): 差分法による周波数領域電磁探査法の3次元モデリング, 物理探査, Vol.52, No5, p.421-431.
 鈴木浩一, 佐藤浩章, 窪田健二, 近藤浩文, 佃 十宏(2011): 沿岸域堆積軟岩地点の物理探査法による地質構造調査, 電

力中央研究所報告, N10010, p.1-28.
 城森 明, 鈴木浩一, 山口 寛, 城森信豪, 近藤隆資(2013): 3次元探査のための高速測定可能な可搬式時間領域電磁探査(PTDView)装置の開発と検証実験, 応用地質, Vol.54, No.4, p.154-167.

低周波数帯域における S波伝播経路のQ値の推定

第54回(平成25年度)物理探査学会奨励賞

物理探査 65, 53-66 (2012)



北海道大学大学院理学研究院
附属地震火山研究観測センター
重藤 迪子

1. はじめに

震源断層から放出された地震波は、伝播経路の影響を受けて減衰し、地表に達します。その減衰は幾何減衰と内部減衰および散乱減衰に区別されます。幾何減衰は地震波が伝播する距離と共にその振幅が減少することを示します。他方、内部減衰および散乱減衰は地震波が媒質内を伝播する際に吸収および散乱する現象を示し、これらの地震波の1サイクル当たりの減衰は、Q値という媒質固有の値で表されます。Q値が小さい程、減衰が大きいことを示します。

伝播経路のS波のQ値(Q_s 値)は、強震動予測において必要なパラメータの一つであり、その適切な設定が求められます。既往研究結果から、伝播経路の平均的な Q_s 値は、高周波数帯域(約1Hz以上)では、主に伝播経路の不均質性に起因する散乱減衰が卓越し、周波数に依存することが指摘されています。一方で、低周波数帯域(約1Hz未満)では、解析例が少なく、「低周波数帯域の Q_s 値は高周波数帯域のそれと同様の傾向を示すのか?」「高周波数を対象に得られた Q_s 値の周波数依存性を低周波数側にそのまま外挿して良いのか?」など、未解明な点が多いのが現状です。

2. 伝播経路の影響を受けた地震波

図1に、伝播経路の影響を強く受けている地震観測記録のフーリエスペクトルの一例を示します。九州地方の南

北を横切る火山前線(火山フロント)の直下約150kmのフィリピン海プレート内で発生したスラブ内地震(2009年薩摩半島西方沖の地震)における観測記録のS波速度フーリエスペクトルを、火山フロントの前弧側(東側)と背弧側(西側)に位置する等震央距離の観測点ペアで比較しています。周波数0.1~10.0Hzの範囲で見ると、0.5Hz程度では両者の振幅は同程度ですが、高周波数側になるに従い、大きな振幅差が生じていることがわかります。前弧側の観測点では殆ど振幅が減衰していないのに対して、背弧側の観測点では急激に振幅が減衰しています。これは、前弧側の観測点に達する地震波は、プレート内の低減衰(高Q)領域を伝播するのに対して、背弧側の観測点に達する地震波は火山フロント直下のマントルウエッジと呼ばれる高減衰(低Q)領域を通ることによってとされています。しかし、この伝播経路の Q_s 値の差異は、高周波数帯域では顕著に表れていますが、低周波数帯域では僅かであり、先に述べた高周波数帯域と低周波数帯域の Q_s 値の関係については、それぞれ個別に評価して検討する必要があります。この地震観測記録がこの研究を始めるきっかけとなりました。

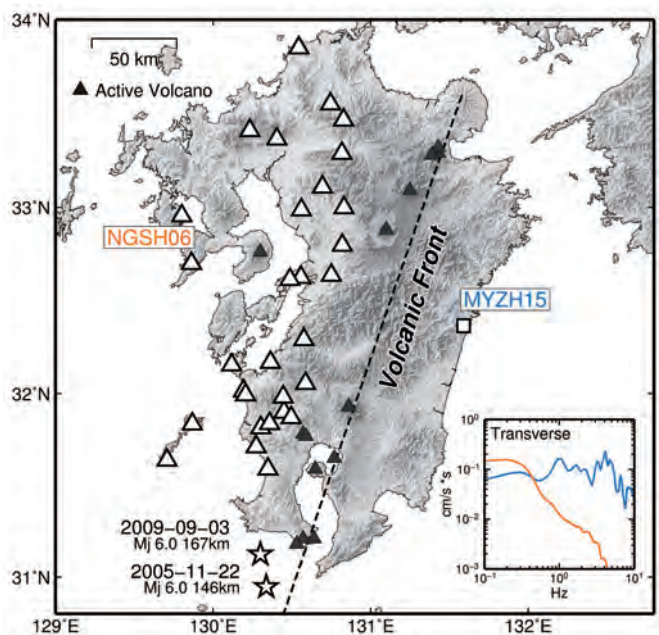


図1 本研究の対象地域と解析に使用した2地震(星印)および観測点(白抜三角)
右下に、2009年薩摩半島西方沖の地震における等震央距離の観測点ペア(NGSH06: 橙色とMYZH15: 青色)のS波速度フーリエスペクトルの比較を示しています。

3. 低周波数帯域の Q_s 値の推定手法

地表で観測される地震動は、震源の特性と震源から地震基盤までの伝播経路の特性、地震基盤から地表までの堆積層中での増幅特性の3つの特性で表わされ、伝播経路特性を評価するためには、他の特性を精度よく評価するか、または取り除く必要があります。近年、強震観測網の高密度な整備、震源モデルや深部地盤構造モデルが各機関で公開され、伝播経路以外の影響を個別に評価することが可能になりつつあります。

そこで私たちは、地震観測記録から低周波数帯域の Q_s 値を推定する新たな手法を提案しました。1 Hz未満の低周波数帯域でのS波スペクトルは、主に震源のS波放射特性および深部地盤構造によるサイト増幅特性に強く影響されます。提案手法では、減衰の無い完全弾性体(Q_s 値は無無限大)と適切な震源および深部地盤構造モデルを仮定して、理論波形を計算し、その理論スペクトルに対して観測スペクトルの比をとることで、幾何減衰、S波放射特性、深部地盤構造によるサイト増幅特性を同時に補正します。この際、補正された観測S波スペクトル O_{obs}/O_{syn} の対数値は以下の式で表され、伝播経路の減衰効果 Q_s のみを含む量となります。地震観測記録より既知であるS波走時 T に対する補正されたS波スペクトルの対数値の傾きから、周波数 f 毎の Q_s を推定できます。

$$\log\left(\frac{O_{obs}(f)}{O_{syn}(f)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_s(f)}(\log e)T + C$$

手法の概念はとても簡単です。実際の地震観測記録を対象とした解析で問題となるのは、理論S波スペクトルの計算に用いる地下構造モデルや震源パラメータの不確かさが結果に与える影響です。それらは、式の切片 C に補正誤差として表れます。解析では、サイト増幅特性がより単純なSH波を対象とし、速度記録のTransverse成分の長周期S波の1サイクル用いることで、補正誤差を小さく抑えています。

先に述べたように、地震観測記録には3つの特性が含まれており、本研究の成否は震源特性及びサイト増幅特性の評価の精度に依存することから、今後それらの精度向上に伴い、本提案手法における推定精度も向上することを期待されます。サイト増幅特性の評価のためには、観測点直下の精度の高いS波速度構造モデル構築が重要であり、今回対象とした九州では行う機会がありませんでした

が、冒頭の写真のように、北海道各地で微動・表面波を用いた地下構造探査を実施しています。

4. 九州地方背弧側における低周波数帯域の Q_s 値

最後に、この手法を九州地方南部の火山フロント直下で発生したやや深発のスラブ内地震(図1)による観測記録に適用し、九州地方背弧側マントルウエッジの低周波数帯域における Q_s 値を推定しました。図2に補正した観測スペクトルとS波走時の関係、この傾きから求めた Q_s 値を図3に示します。本研究の結果は、0.2~0.3Hzの周波数範囲で約50であり、既往の高周波数帯域の結果と調和しています。しかし、本研究の対象領域と既存の研究の対象領域が鉛直方向で大きく異なっているため、高周波数側と低周波数側の Q_s 値の関係について、現時点では明確な答えは得られません。今後、解析例の蓄積が進むことが望まれます。

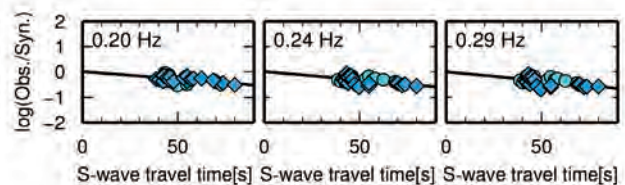


図2 補正した観測スペクトルとS波走時の関係

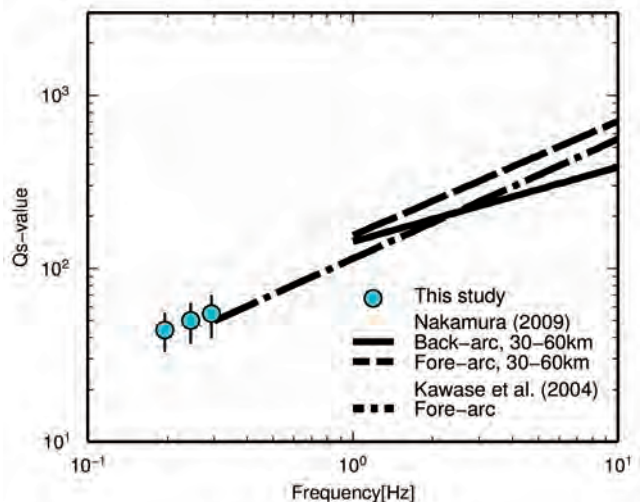


図3 本研究で推定した九州地方背弧側における低周波数帯域の平均 Q_s 値(青丸)
九州地方を対象とした既往の高周波数帯域の Q_s 値との比較を同時に示しています。

ワンデーセミナー「河川堤防における統合物理探査 ～統合物理探査による河川堤防の安全性評価～」開催報告

事業委員会

当学会では毎年1回、テーマを決めて一日かけて行うセミナーを開催しています。今年は、河川堤防の統合物理探査をテーマとして、平成27年2月9日に東京大学山上会館で開催されました。講演は全部で5件ありました。

電磁探査も併用する必要があり、これについても詳しい説明がありました。わかりづらいといわれる電磁探査の説明をとでも丁寧にされていて、良く理解できました。理論だけでなく、実際の現場作業における留意点なども示されました。



齋藤会長による挨拶と稲崎富士氏による講演

基調講演

河川堤防の弱点箇所抽出への統合物理探査の活用 稲崎 富士氏

午前中に基調講演として土木研究所の稲崎富士氏より河川堤防の構造的特徴と被災形態についての説明がありました。堤体の特徴はふたつあり、ひとつは長大であること、もうひとつは堤体内部が不均質であることについて指摘されました。このような河川堤防に対して安全性評価を行うために物理探査を効率良く適用するために考案されたのが統合物理探査です。既にご存じの方もいらっしゃると思いますが、河川堤防の場合は表面波探査と電気探査を併用します。両方とも牽引式と呼ばれる効率の良い測定方法です。また物理探査データだけでなく、土質データや地歴データなども参照して、文字どおり様々なデータを統合した物理探査であることも示されました。

午後は、ケーススタディとして4件の講演がありました。

講演①

統合物理探査に用いられる探査手法と現場作業

山下 善弘氏

最初は応用地質の山下善弘氏より牽引式表面波探査と電気探査について解説がありました。比抵抗が低い地域では



山下善弘氏(左)と新清晃氏(右)による講演

講演②

統合物理探査への堤防技術者からの期待

新清 晃氏

2番目の講演は、応用地質の新清晃氏による講演でした。土質・地盤・堤防技術者からの視点ということで、個人的には最も期待した講演でした。まず堤防とはどのようなものなのかを説明するために、平成24年7月14日に起きた九州北部豪雨に伴う矢部川の決壊事例が示されました。ここでは越流しなくても堤防決壊に至るプロセスとして、基礎地盤の横断方向の不連続性について説明があり、堤防は均質な基礎地盤の上に築堤されたものではないことが良く理解できました。また、堤体は様々な材料が混在していること、築堤履歴が良くわからないこと、などが具体的な事例とともに説明され、基調講演の内容がより深まりました。次に堤防の安全性照査手法の説明がありました。安全性照査手法では堤体内部の不均質や基礎地盤の三次元構造が重要であり、これまでの安全性照査手法では把握しきれないため、統合物理探査のような手法が重要であると指摘されました。その中で筆者が大変重要であると思ったのは、土質あるいは河川管理技術者が考えているスケールと通常実施される物理探査のスケールには違いがあって、両者の齟齬が課題であるという指摘です。すなわち、土質あるいは堤防の技術者は、ボーリングデータなど数センチメートルから十数センチメートルというスケールで堤防や基礎地盤をみています。一方、物理探査の技術者は数メートルから、せいぜい数十センチメートル(?もっと粗いのでは?)というスケールです。この違いが、土質技術者からは「物理探査は使えない」、他方物理探査技術者からは「土質データは細かすぎで対比できない」といった認識の違いが生じるように思います。

講演②

関東地方整備局における河川堤防統合物理探査の適用と課題

飯塚 隆志氏

3番目の講演は、国土交通省関東地方整備局関東技術事務所の飯塚隆志氏による講演でした。そもそも何故、関東地方整備局で統合物理探査を始めたのかということから始まり、これまでの経緯が示されました。

また、「河川堤防の維持管理において最も重視されていることは統一の閾値による管理であり河川毎に閾値が変わる統合物理探査は現場の理解が得られにくい」という物理探査技術者にとって厳しい課題を述べられ、現状の安全確認手法は熟練した技術者による目視観察であることが紹介されました。関東地方整備局職員を対象として毎年行っている統合物理探査現地研修および解析講習会のアンケート結果では、各河川管理事務所の職員の生の声を紹介して頂き、大変参考になりました。



飯塚隆志氏(左)と林宏一氏(右)による講演

講演
④

統合物理探査の河川堤防調査への適用上の留意点 ～物理探査における解析誤差とその土地質調査における扱い～ 林 宏一氏

最後にGeometricsの林宏一氏による講演がありました。物理探査の基礎技術であるインバージョン(逆解析)の基礎の説明から始まりました。エクセルを使って線形最小自乗法と非線形最小自乗法の計算がスクリーン場で実演され、普段インバージョンに縁の無い方にも雰囲気は良く伝わったと思います。インバージョンの方法に起因する解析誤差の原因について説明がありました。これには「非一意性」や

「初期モデル依存性」などの問題があり、その対応には「拘束条件の設定」などの対処法があることが説明されました。他にも分解能や誤差の問題についても具体例を交えて解説され、初めての方にも分かり易かったと思います。河川堤防における統合物理探査は物理探査で得た物性値から堤防管理に必要な土質定数を推定する手法ですが問題点や課題も多々あり、より精度を向上させるための検討、たとえばクロスプロット解析の改良に関する最新の研究の紹介もありました。統合物理探査が今後広く使われるための提案として、統計的手法の適用とそれを行うためのデータベース構築の必要性なども提案されました。データベースを上手に利用すれば、効率の良い探査計画を立案できるだけでなく、経時変化も定量的に把握できます。加えて、スマートフォンやタブレット端末などを利用すると現地で物理探査データを簡単に閲覧できるので、目視観察の精度も向上させることも可能になるといった今後の展望についても示されました。

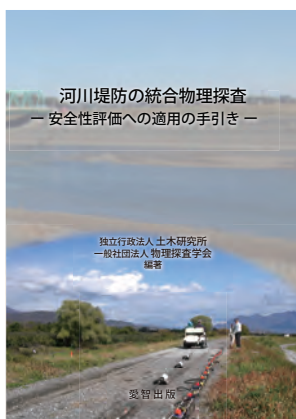
今回のセミナーは物理探査技術者・研究者だけでなく、ユーザー側からの講演もありました。そのため中身が濃いというだけでなく、物理探査について多面的なとらえ方ができたものと思います。物理探査の研究者・技術者が陥りがちな(ひとりよがり?)考えに気づかされました。

セミナー修了後には、講師・参加者による交流会が行われました。ワンデーセミナーで交流会を開催したのは初めてです。交流会には関東技術事務所の山元所長も参加されました。また、統合物理探査研究委員会の元委員長で現在の事務局長である渡辺文雄氏も駆けつけてくださいました。

(文責:事業委員会 鈴木敬一、撮影:吉川猛)

書籍案内

『河川堤防の統合物理探査』 —安全性評価への適用の手引き—



編著:独立行政法人 土木研究所
公益社団法人 物理探査学会
体裁:B5版、120頁、総カラー印刷
発売:2013年3月30日
価格:2,800円(税別)
出版:愛智出版

◎内容と特色

河川堤防の特徴と被災の実態を紹介し、地盤性状の異なる河川事例も紹介しながら、河川堤防の安全性評価に適した統合物理探査の目的・測定・データ処理を数多くのカラーの図版・写真も使って解説した。新しく研究・開発されてきた統合物理探査の手法を適用することによって、河川堤防の要改良区間を効率的かつ経済的に抽出することが可能となった。山と河川が極めて多い我が国においては、河川堤防決壊による被災を防ぐために全国の河川堤防を常に点検・整備することは国家的課題である。本書に記された知識と技術が関係方面において活用され、河川堤防の質的整備が一層推進されるよう期待される。

◎販売対象者

国・自治体において河川堤防の建設・保守・管理に携わる土木部門の専門家、河川堤防の保守・管理に携わる土木事業者・コンサルタントの技術者、大学工学部の土木工学・社会基盤工学・環境工学の研究者

第一回 若手ワーキンググループ討論会



図1 学会事務局での討論会
右から2番目が著者

物理探査学会では2014年度の事業の一環として本学会の今後10年を見据えて将来計画を検討する「物理探査学会の将来を語る若手ワーキンググループ」(以下WG)を設立いたしました。学会の将来を考えるといった趣旨の下に大学、研究所、資源・土木・農業などの企業といった幅広い分野から30~40歳の若手会員を募り、討論を行っています。これまでは電子メールにて学会の抱える課題について意見を交わしておりましたが、電子メールによる意見交換では難しい局面もありました。そのため2014年度秋の学術講演会で顔合わせを行い、また2015年1月にはWGメンバーが集まる機会を設け、討論を行いましたので紹介したいと思います。

“学会の将来を討論する”といっても漠然としているため、本WGで検討する主題として以下の3点を掲げ各自の意見を交わすことから始めました。

- 1) 学会が抱える問題点
- 2) 学会活動に何を望む?
- 3) 学会の将来はどうなる?

まず1)の問題点ですが、本学会の会員数減少とそれに伴う発表・論文数の減少を挙げる意見が多かったです。WGメンバーの物理探査学会への入会理由を確認したところ、大学等の研究内容の発表する場を求めて、あるいは企業に入社した際の上司の勧めのどちらかでした。これにより学会会員数を増やすためには、大学や企業に所属する若手研究者・技術者に対し、学会に加入するアドバンテージを提示することが大事だという点を確認しました。また、若い世代の会員が少ないとの声も聞こえました。本WGを設立し参加者を募る際にも候補者そのものが少なかったように聞いています。日本の人口構造と同様

シュルンベルジェ株式会社 鳥居 健太郎

に、物理探査学会においても若い世代の人材育成が急務なのかもしれません。

2)の学会活動に望むこととして、肯定的な3つの意見が出されました。1点目としては他の業種・企業などの方との交流を図れるといったもので、自分の研究内容に関して議論したい、同業他社の方との人脈を構築したいといった意見が多数でした。2点目としては学会の本質とも言える研究発表の場が挙げられました。大学や研究所などでは研究発表が成果を測る指標となるでしょうから当然のことかもしれません。3点目は逆に企業側が最新の知見やケーススタディ等の情報を得る場を求めているというものでした。以上3点を鑑みますと、研究サイドと企業サイドが情報交換を行いwin-winの関係を築き上げることが学会の将来を考える上で重要であるように感じました。

3)の学会の将来についてですが、1)で挙げられたように会員数減少に始まり、現在の規模や会員数を維持できないようであれば、その結果として衰退が予想されます。会員数を維持できるよう大学や企業に働きかけるのも1つの有効な手段ですが、他学会との連携を深めるのも有効ではないかとの意見が出されました。本学会で扱う研究内容や技術はニッチな分野かもしれませんが、専門性に特化することでこれまで物理探査学会に参加できなかった石油・土木・建築分野の方にも参加していただき、裾野を広げることができるのではないかという意見が出されました。学会の存続理由や有意性を見直すことで繁栄に結びつける手段を検討しても良いのかもしれません。

2014年度は以上のような討論を行って参りました。誰もが真剣に学会の将来について検討し意見を出してくれました。今後も本WGを継続し、これからの学会の繁栄にますます貢献していきたいと考えています。



図2 秋の学術講演会@清水での討論会

WGグループメンバー紹介



氏名：新色 隆二(にいし りゅうじ)
2011年10月 石油資源開発(株) 入社
2012年11月 (株)地球科学総合研究所 出向



氏名：小西 千里(こにし ちさと)
1997年4月 応用地質株式会社 入社

●どのような仕事をしているか

反射法地震探査のデータ取得・処理作業がメインです。春から夏にかけて現場に出てデータ取得を行い、秋頃から年度末にかけて取得データを解析することが多い気がします。また、学会参加も推奨されており、業務内容は積極的に学会で発表させていただいています。

●物理探査(or現在の仕事)との出会い

修士1回生のとき、会社から研究室にインターンシップの募集がかかり、秋田での三次元反射法地震探査のデータ取得現場に参加したことがきっかけで、会社の一員になりたいと思うようになりました。当時は資源開発分野への関心が薄く、研究室のOB会の幹事を優先しようとし、指導教官の山中先生(物探学会副会長)に諭されたことは今でも覚えています。あのインターンシップがなければ、今こうして振り返ることもなかったと思います。まさに人生の転機だったわけで、山中先生には未だに頭が上がりません。

●最近ハマっていること

職場にフットサルの厚生班があり、月2回程度活動しています。練習会後のビールは最高です。また現場に出た際は、一人でご当地の飲み屋に行き、おいしい地酒と肴を食すことが楽しみです。仕事は大変ですが、モチベーションを保ちながら日々充実した生活を過ごしています。

●どのような仕事をしているか

研究開発のほか、調査業務の現場作業から解析・解釈、報告書作成までを行っています。2011年から2014年夏まで、研修派遣としてアメリカのスタンフォード大学に留学させていただきました。帰国後は堤防の統合物理探査などの現場で汗をかいています。

●物理探査(or現在の仕事)との出会い

大学では地震学の研究室に所属していましたが、学会活動は皆無でした。会社に入ってから、まず自分の意思で地震学会に入会しましたが、物理探査学会への入会は知らぬ間(強制?)だったような記憶があります。最近はまだ気構えず積極的に学会発表を行うように心掛けています。

●最近ハマっていること

アメリカ滞在中にクラフトビールにはまりました。様々な種類のビールが安く買えるため、スーパーマーケットのビールコーナーに毎日のように通いました。残念ながら、帰国後は発泡酒になってしまいましたが、少し頑張った日や週末くらいはビールを買って帰っています。



お知らせ

平成27年度物理探査セミナー

1. 会 期：平成27年7月7日(火)～7月9日(木)
2. 会 場：東京大学山上会館
セミナーの内容と申込方法は近日中にご案内いたします。

第12回物理探査学会国際シンポジウム

～Geophysical Imaging and Interpretation～

1. 会 期：平成27年11月18日～20日
2. 会 場：東京大学伊藤国際学術研究センター

シンポジウムのお知らせ

「土地地質図の信頼性に関する課題と対策」

—物理探査の活用による土地地質調査の信頼性向上と効率化に向けて—
応用地質学会・物理探査学会 共催

日 時：平成27年6月12日(金) 13:00～17:40

場 所：東京大学柏キャンパス 新領域環境棟FSホール(千葉県
柏市柏の葉5-1-5)

参加費(予稿集込み)：両学会とも正会員3,000円
学生会員2,000円
意見交換会(会費5,000円)

参加の事前登録はありません。当日、現地で参加料ならびに交流会費をお支払いください。詳しくは物理探査学会HPを御覧ください。

会誌「物理探査」への投稿募集中

既にお知らせしておりますが、物理探査学会賞に新たに事例研究賞が創設されました。

会誌に掲載された「技術報告」と「ケーススタディ」が対象となりますので、奮ってご投稿下さい。

(会誌編集委員会)

「物理探査ニュース」の表紙写真を募集中

物理探査ニュースでは、会員の皆様から表紙の写真を募集します。物理探査に関連した表紙を飾るにふさわしい写真をお持ちの方はご連絡ください。技術紹介や企業紹介等の1～2ページ程度の記事とのセットでの投稿もお待ちしています。

ご応募は物理探査学会事務局 office@segj.org までお願いいたします。

(ニュース委員会)

【物理探査ニュース23号に関するお詫びと訂正】

いつも物理探査ニュースをご愛読いただきありがとうございます。さて、物理探査ニュース23号の春季学術講演会報告記事におきまして物理探査学会奨励賞を受賞した新色隆二さんのお名前が間違ってお掲載されておりました。ここにお詫びを申し上げます。訂正させていただきます。

(ニュース委員長 高橋 明久)

編集後記

読者の皆様が今号をご覧になるときは6月も大分過ぎた頃と思います。

これを執筆している私は5月中旬なのに既に台風が日本に上陸してひと暴れし、涼しい空気も蹴散らして暑い真夏真っ盛りのような天候の中にいます。日差しが頭皮に痛いですね。

皆様もこれから調査観測のご予定があると思いますが、こんな暑さなので熱中症にお気を付けください。

今号の“若手ワーキンググループ討論会”の記事の中で“他の業種・企業などの方との交流を図れる”という意見

がありました。ふと思いついたのが23号に掲載されていた“潜入レポートOil Ladyの会”です。企業も年齢層も違う方々が和気藹々とされている感じが伝わる記事でした。私の会社でも女子会ができたようなのですが、こういう会同士が集える場があると面白いのでは思いました。

皆様の身近に会社にユニークな会の情報がありましたら、ニュース委員会に教えてください。

私も男子会を結成して・・・。

あああ、これじゃただのおじさんの飲み会かぁ。

(ニュース委員会委員：田澤 教)

著作権について

本ニュースの著作権は、原則として公益社団法人物理探査学会にあります。本ニュースに掲載された記事を複製したい方は、学会事務局にお問い合わせ下さい。なお、記事の著者が転載する場合は、事前に学会事務局に通知頂ければ自由にご利用頂けます。

物理探査ニュース 第26号 2015年(平成27年)4月発行

編集・発行 公益社団法人物理探査学会

〒101-0031

東京都千代田区東神田1-5-6 東神田MK第5ビル2F

TEL：03-6804-7500 FAX：03-5829-8050

E-mail：office@segj.org

ホームページ：http://www.segj.org

facebook：https://www.facebook.com/pages/公益社団法人-物理探査学会/1385775308349693