

物理探査 ニュース

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

Geophysical Exploration News October 2020 No.48

目次

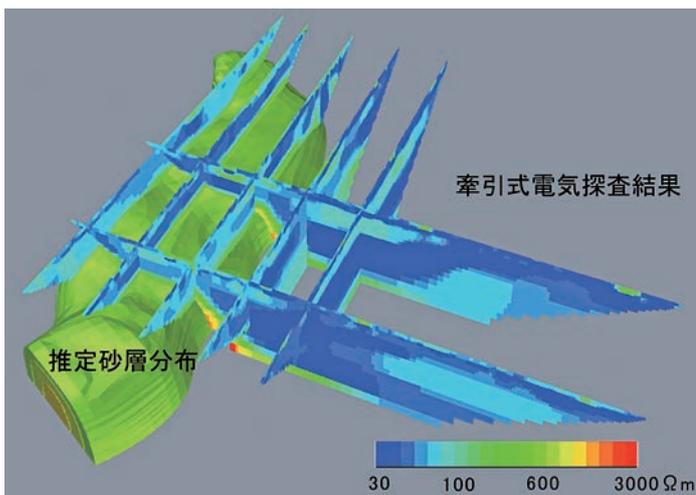
わかりやすい物理探査

電気探査(その4:電気探査の最新動向)	1
研究の最前線 薬液注入の浸透過程を監視するための 比抵抗トモグラフィの時系列解析法の提案	4
新技術紹介 最新型ブロードバンドバイブレーター震源 のご紹介	6
現地レポート ネパール調査紀行	8
現地レポート ベトナム微動観測記(その3)	10
お知らせ、編集後記	12

物理探査 手法紹介

わかりやすい物理探査 電気探査(その4:電気探査の最新動向)

応用地質株式会社 島 裕雅、櫻井 健



巻頭図 Ohm Mapperによる堤防基盤調査例
高比抵抗部を砂層分布域として推定

1. はじめに

前回までに、電気探査の原理から始めて、一次元、二次元、三次元探査、そして、それらの精度や分解能についてお話ししてきました。

最終回となる今回は、電気探査の最新動向、特に実用性を高めるための測定システムの進歩と適用分野を広げる四次元探査に関して説明します。

2. 測定システム

電気探査は、二次元探査が主流になり、徐々に三次元探査に移行していますが、その際に問題となるのは大量のデータを如何に効率よく測定し、解析するかです。特に測定は、現場での電極やケーブルの設置という人力作業が関係しますし、通電周期は探査深度や地盤の分極現象といった探査原理に関係しますから、単に計算機が高速になれば解決するというわけではなく、物理探査の専門家が解決する必要があります。

2.1 通常の電気探査

通常というのは、最大探査深度がだいたい5mから100mまで(せいぜい200m)を想定しています。探査対象となるのは、地下水や地下開発に伴う地下の構造探査、あるいは地滑りなどの災害調査等です。

この場合、多数の電極を1mから10m程度の等間隔に設置し、全ての電極をケーブルでつないで、集中制御で測定します。その2で示した二次元探査の測定模式図を参照してください。

2.2 ごく浅い電気探査

ごく浅い探査というのは、最大探査深度が2mとか5mとかいった場合で、堤防の漏水とか土壌汚染あるいは遺跡調査等を想定しています。電極を0.2m間隔に設置する場合、100m進むのに、電極を500回打設する必要がある、とても大変な作業になります。

そこで、電極を直接打設するのではなく、**図1**に示すような

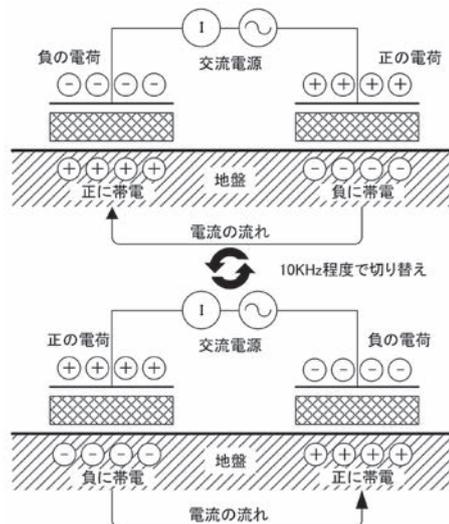


図1 キャパシタ電極の測定原理模式図

キャパシティブカップリングを利用して、ケーブルや金属板を電極代わりに牽引しながら測定するキャパシタ電極システムが実用化されています。キャパシタが飽和する前に極性が切り替わるように、10kHz程度の交流電圧を印加すると、地盤に交流電流が流れます。通電周波数が10kHz程度で、探査深度が5mと浅い場合は、高周波数成分が地下深部で減衰する表皮効果は考慮しなくても大丈夫です。

図2には、5深度分の電極を一度に牽引できるシステムを示します。歩行速度程度で牽引できるので、効率的に測定できます。

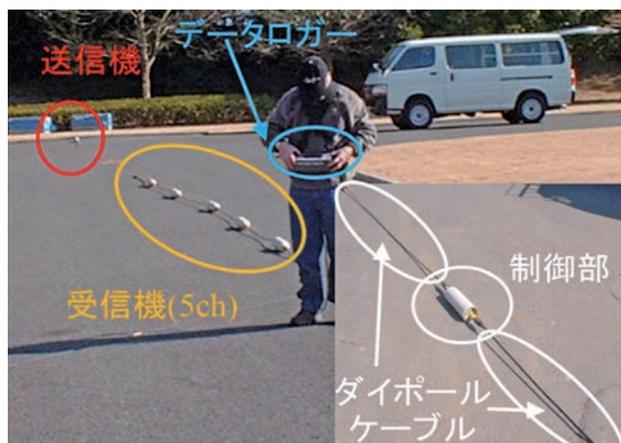


図2 キャパシタ電極を用いた測定システム

堤防の漏水構造を調査するために、堤内に複数の測線を配置して電気探査を実施しました。測定ではGeometrics社製Ohm Mapperシステムを用いました。二次元探査結果を組み合わせ作成したフェンスダイアグラムを巻頭図に示します。漏水の原因となる堤防基盤面に潜在する旧河道に堆積した砂層の分布が、高比抵抗体の分布として捉えられています。

2.3 かなり深い電気探査

最大探査深度が200mを超すような場合は、電極を25mとか50m毎に設置する必要があります。これらの電極を集中制御するために重たい多芯ケーブルを山岳地に展開するのは大変な作業です。加えて、落雷や小動物にかじられたりする被害が発生します。

この問題を解決するためには、測定点毎に独立したノード型

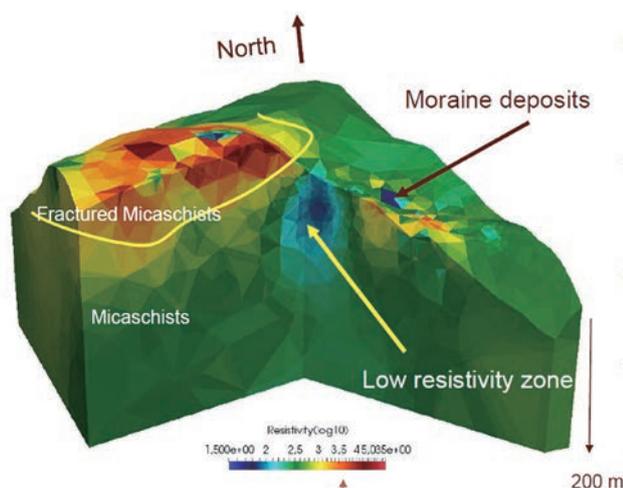


図4 独立ノード型電気探査装置による三次元地滑り調査例 (フランスアルプス、IRIS Instruments社提供)

測定システムを使用するのが有効です。このシステムは、その2で新しい三次元探査測定システムとして紹介しました。当然、本システムはケーブルの設置が大変な大規模な三次元探査にも適しています。

フランスアルプスの大規模な地滑り機構の解明のために実施した三次元探査例を図4に示します。この調査では、大規模な地滑り土塊だけでなく断層に起因する湧水機構も解明されました。

以上で紹介した浅部探査から深部探査までの、それぞれの測定上の課題と解決策をまとめると表1の様になります。

表1 探査深度毎の測定上の課題と解決策

探査区分	探査速度	探査対象/利用分野	課題
浅い探査	0.5m~5m	堤防漏水、土壌汚染、遺跡	電極を小さな間隔で正確に設置するのが大変
通常の探査	2m~100m	地下水、地下構造、地滑り	三次元探査の測定は時間がかかる
深い探査	20m~500m	トンネル地山、鉱物資源	長いケーブルを設置するのが大変。特に山の中。



探査区分	解決策	利点
浅い探査	多連のキャパシティブカップリング電極を牽引	<ul style="list-style-type: none"> 測定が迅速(歩く速度) 電極の相対位置が固定(正解)
通常の探査	多くの電極をケーブルでつないで自動集中制御	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルをセットしてしまえば迅速な自動測定
深い探査	ケーブルレスで同期した独立型測定システム	<ul style="list-style-type: none"> 受信はケーブルレス自動測定 カップリングが小さく分極現象の測定に向く

キーポイント

- ・ 測定の効率化は、現場作業や探査原理に関係するので、物理探査の専門家が解決する必要があります。
- ・ 測定の効率化のためには、探査深度毎に改良された測定システムを使い分けると便利です。

3. 四次元探査

電気探査は、地盤の飽和度変化や間隙内流体の比抵抗変化に敏感であり、こうした変化が予想される状況で比抵抗の時間変化を捉えて、飽和度や間隙内流体の変化を可視化することができます。こうした探査は、三次元探査に時間を加えた四次元探査と呼ばれており、迅速で正確な自動測定システムの普及に伴い、実用化されつつあります。飽和度の変化は、地下水の変動を反映するため、地滑り機構の解明や地滑り対策工の検証、そして堤防の漏水調査に利用され始めています。間隙内流体の変化は、地盤に注入したトレーサーの追跡や薬液注入範囲の可視化に利用され始めています。

3.1 比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲評価

地下の比抵抗を精度良く探査しようとするれば、その3で説明した通り、できるだけ異なる方向から通電して、異なる場所で電位を測定する必要があります。そのために、電極を地表だけでなく、探査対象をできるだけ取り囲むようにボーリング孔やトンネルを利用して配置して測定を行う方が有利で、比抵抗トモグラフィと呼ばれています。

なお、時間変化が発生している箇所が小さかったり、時間変化が小さかったりする場合にも比抵抗変化を精度よく解析するためには、測定誤差をできるだけ小さくするだけでなく、測定条件

や解析条件を同じにして、データの変化が比抵抗の変化だけと見做せるようにする必要があります。

薬液注入範囲が比抵抗モグラフィによりどのように可視化されるかを評価するために実施した模型実験を示します。図5aに示すように、砂で満たした水槽の中に6本のボーリング孔を想定して、それぞれに孔中電極を配置し、No.1孔、No.2孔、No.3孔の各々上下2カ所、計6カ所から薬液を注入しました。改良体1、2、5、6の形成のために薬液を注入した後で比抵抗モグラフィを実施し、上面スライス位置での比抵抗分布を図5bに示します。比抵抗が低いところを寒色で示しています。低比抵抗域は改良体1と2に相当し、改良体3はまだできていないため、低比抵抗にはなっていません。

改良体3と4の形成のために薬液を注入した後に再度比抵抗モグラフィを実施した結果を図5cに示します。新たに比抵抗が低下したところが改良体3に相当しています。

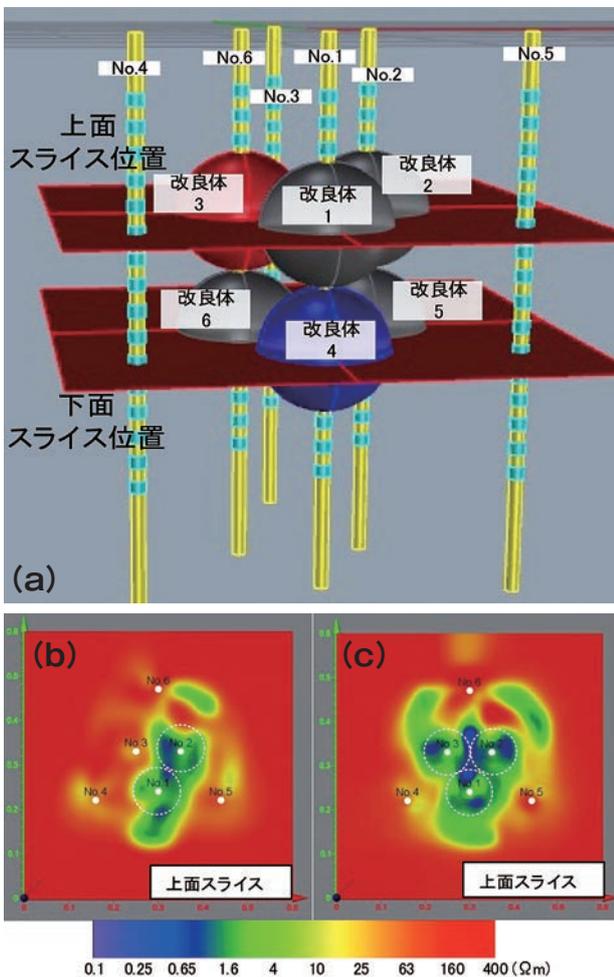


図5 比抵抗モグラフィによる改良体可視化模型実験

- 模型地盤内の電極配置と改良体計画分布
- 改良体1、2、5、6を生成した後の比抵抗分布(上面スライス)
- 全て改良体を生成した後の比抵抗分布(上面スライス)

キーポイント

- 比抵抗の時間変化を捉えることで、飽和度や間隙内流体の変化や動きを可視化することができます。
- 時間変化を捉えるためには、測定や解析条件を同じにして、比抵抗の変化だけを抽出する必要があります。

4. 今後の展望

比抵抗は、前述したように地下水等の間隙流体の有無や変化には敏感です。また、その1で述べたように、比抵抗は、地滑りや断層調査等に有用な情報を提供します。しかし、地盤の比抵抗は、様々な要因で変化しますので、比抵抗だけから土質や岩盤を特定することは困難です。

ところで、地盤の構造と構成要素の属性を地盤モデルとして表現することができれば、地盤を掘削して建設するトンネルのような地下構造物だけでなく、地盤の上に建設される構造物の安全性や性能(強度、変形特性、液状化の可能性、耐震性能等)を地盤と一体のものとして評価することが可能になります。

図6に地中レーダ探査と電気探査結果を組み合わせた地盤モデルの例を示しました。調査した場所は、つくば博の跡地に建設された、応用地質株式会社につくばオフィスの敷地内です。電気探査の結果では、浅部に低比抵抗部が推定されていますが、ここはつくば博当時のパビリオンの地下1階部分に良く一致するため、埋め戻し土と解釈されます。

この土地を利用する際には、浅部の埋設管などの支障物や埋め戻し土の土量などの情報が必要ですので、地中レーダ探査と電気探査という分解能の異なるデータを組み合わせた地盤モデルを作成しています。

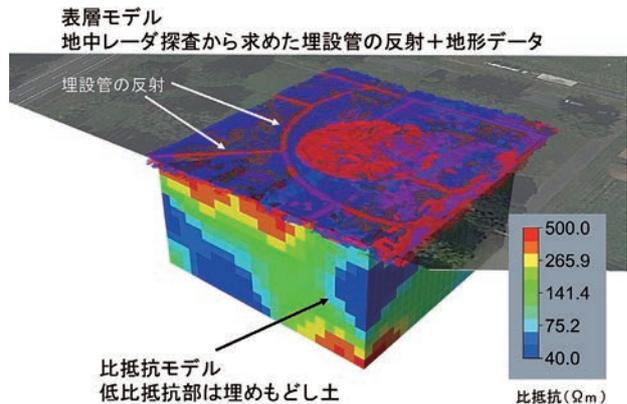


図6 地盤モデルの例

地盤モデルは、一般的には、露頭や地形観察にボーリング調査結果を加えて作られています。しかし、ボーリングは線の情報であり、これを三次元に拡張して地盤モデルを作成するには、ボーリング孔の間を空間的に補間する必要があります。一方、物理探査は、三次元的な物性分布の情報を提供しますが、得られる物性値は、空間的に平滑化されたある範囲の平均値です。

こうした空間的な広がりも精度も分解能も異なる情報を単に比較するのではなく、両方の情報を一緒に解析して、より確からしい地盤モデルを推定する方が合理的であり、そうした試みが進められています。

例えば、地表踏査やボーリング調査の情報に電気探査の情報を加えて三次元地盤モデルを作り、地盤の強度的な情報が必要であれば地震探査の情報も加えてその有用性を高めることが考えられています。また、建設工事の掘削情報や切羽情報、さらには維持・管理段階の情報も加えて地盤モデルの信頼度を継続的に向上させ、構造物の効果的な設計、施工、維持管理に役立てる試みが始まっています。その中で、地下を三次元的に捉えることのできる物理探査の役割はますます重要になると思われます。



令和元年度
論文賞

薬液注入の浸透過程を 監視するための比抵抗 トモグラフィの時系列解析法の提案

株式会社奥村組(東京都立大学博士後期課程) 清水 智明

1. はじめに

このたび、令和元年度の物理探査学会論文業績賞(論文賞)を頂きましたので、その内容を簡単にご紹介したいと思います。

この論文は薬液注入の注入状況を比抵抗トモグラフィによりリアルタイムに可視化するための解析手法の提案を取りまとめたものです。薬液が地盤内に注入されると比抵抗が低下する性質を利用して地盤内の比抵抗分布の変化を捉えます。従来の解析手法の場合、シャッターを開け続けて写真を取るとぼやけてしまうのと同じように、計測対象の比抵抗が測定中に時々刻々変化するとうまく可視化できませんでした。注入中にリアルタイムに計測する場合も、時々刻々地下の比抵抗が変化するため、やはりうまく可視化できません。カメラのシャッターであれば、すぐに閉めれば正しく感光しますが、比抵抗トモグラフィの場合、多数の電極において通電し、その時の電位を他の電極で計測するため、電極を切り替えるなどが必要で、計測には相応の時間を要するため、感光に要する時間の極めて長いフィルムと言えます。この論文では、この課題を解決するための方法を提案しました。

2. 提案に至った背景

2009年、私は設計施工一括型の公共工事において設計責任者として従事していました。その工事は幹線道路の交差点直下における耐震補強工事で、液状化対策として共同溝の下に1.5か月かけて薬液注入を行うものでした。発注者から改良体の出来形を点ではなく面で確認できる方法を検討するようにとの要望を受け、注入の開始から完了までの期間で一定の頻度で比抵抗トモグラフィを実施することを提案し、了承されました。平日は昼夜で注入を行っていましたので、測定は土日等の休工期を利用して行いました。理由は上記で述べた通り、注入中は比抵抗分布が変化するため測れないと考えたからです。成果は概ね良好で、時間とともに注入範囲が広がっていく様子を可視化できました。発注者の方々からも好評で、私は得意満面で現場所長のところへ行きました。ところが、予想に反して「これって注入中はできないんだよね?」と残念そうな顔をしていました。なんとか解決できないかと思いつつ数年が経過した後、ふと解決法を思いつき、プログラムを書き換えて試行してみたところ、うまくいきそうなので、本格的に取り組んで

みることにしました。その方法とは注入期間中連続的に測定し続け、測定中に比抵抗が変化しても適切な可視化が可能な逆解析方法(以下、提案解析法とする)です。その成果を取りまとめたのがこの論文です。

3. 提案解析法の骨子と性能

比抵抗トモグラフィの解析では、測定中に比抵抗分布が変化しない状態の下で測定されることが前提条件となっていますが、薬液注入と並行して行う測定では、測定中に比抵抗分布が変化するため、厳密にはこの前提条件は成り立ちません。そこで、注入時間を複数の時間ステップに区分し、時間ステップごとに比抵抗分布を求めることによって、一定の比抵抗分布を仮定している前提条件との乖離を小さくしようとします。しかし、時間ステップを短く取れば、1つの時間ステップの測定データ数が不足し、逆解析の精度が低下するため、問題を解決できません。反対に時間ステップを長く取れば、通常の薬液注入では浸透速度が速く測定中に比抵抗の分布が変化するため、上記の前提条件を満足せず、正しい結果が得られません。したがって、いずれにしても正しい結果を得にくいことが予想されます。この問題を解決するために提案解析法を使用します。

提案解析法の特徴は主として以下の3点です。

特徴1：時間ステップ毎に個別に観測方程式を解くのではなく、全ての時間ステップを一体の観測方程式で解く

特徴2：求めるパラメータを比抵抗そのものではなく、比抵抗の時間変化量とする

特徴3：1つの時間ステップの中では比抵抗は一定と仮定するのではなく、比抵抗が変化することを許容し、時間ステップの中での測定時刻の違いを考慮した観測方程式を立てる

ここで、**特徴1**における全ての時間ステップを一体の観測方程式で解くこととは、従来の逆解析方法との違いを以下のように説明できます。はじめに、従来の逆解析方法では、各時間ステップで得られた計測データを時間ステップ毎に個別に逆解析します。これをここでは従来解析法と定義します。これに対し、時系列解析法ではそれまでに測定された全測定データを用いてそれまでの全時間ステップの比抵抗分布をまとめて求めます。つまり、**図1**に示すように、従来解析法と同様に定義される2次元のセルを時間軸であるz軸方向に積層した立体セルの比抵抗を求めます。

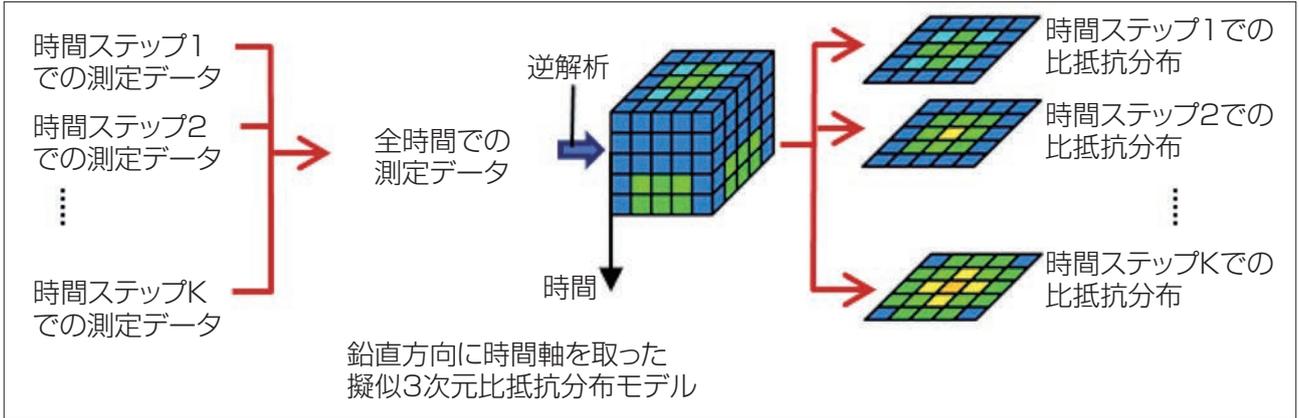


図1 提案解析法概念図

これらにより、以下の効果が期待できます。

特徴1については一体の観測方程式を解くことで、正則化の過程において時間的に滑らかに変化する制約が与えられるため、従来解析法のように各時間ステップを単独で解いた場合に生じる比抵抗分布の偽像を防ぐ効果が期待できます。

特徴2については比抵抗トモグラフィの逆問題は求める比抵抗分布に線形従属性が強く、悪条件となることが多いことから、比抵抗そのものを求めるのではなく、比抵抗の時間変化量を求めることで線形従属性が弱められ、観測値との残差を小さくできるのではないかと考えました。

さらに、**特徴1**と**特徴2**をあわせて行うことで、透水係数が大きい場合等で1つの時間ステップあたりの計測データが少な過ぎて分解能が低下する際に1つのパラメータに関連する計測データが増えることで精度を向上できる可能性があります。

特徴1では、従来解析法と同様に、各時間ステップの中では比抵抗が一定と仮定していますが、実際には時間ステップの中でも比抵抗は変化するため、そのことに伴う誤差が生じる可能性があります。そこで、**特徴3**として、時間ステップ内で比抵抗が変化することを許容し、それに伴って順解析値やヤコビアンが変化することを考慮して各測定データの測定時刻ちょうどでの順解析値、ヤコビアンを用いた観測方程式を立てて誤差を抑制することとしました。

数値実験による有効性の検証結果を図2に示します。地中の一点から薬液が拡散していく様子を模擬したのですが、従来解析法より提案解析法の方が正解の分布に近いことが分かります。詳しくは論文の方で記載していますが、諸々のパラメータを変えても、あるいは従来解析法以外の手法(ここではカルマンフィルタ)と比較しても提案解析法の優位性は変わりませんでした。

4. おわりに

現在、私は東京都立大学博士後期課程で薬液注入の信頼性向上をテーマに学位取得を目指しており、今回発表した論文はその研究の一環です。しかし、提案解析法は薬液注入に限らず様々な時系列で取得された比抵抗モニタリングデータに対しても応用可能である可能性が高いと考えています。

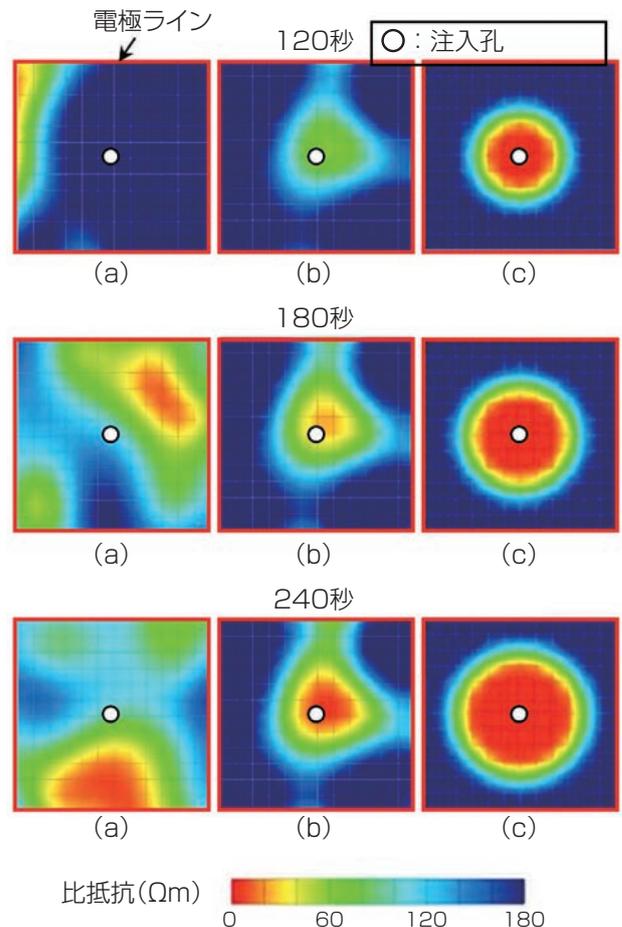


図2 時間ステップ毎の比抵抗分布の推移 ((a): 従来解析法、(b): 提案解析法、(c): 正解比抵抗)

最新型ブロードバンドバイブレーター 震源のご紹介

株式会社地球科学総合研究所 計測部 村上 文俊



写真1 INOVA社UNIVIB2の外観

皆さんこんにちは。ここでは私ども、株式会社地球科学総合研究所(以降JGIと略記する)が2020年に導入しました最新型のブロードバンドバイブレーター震源についてご紹介したいと思います。

バイブレーター震源とは、1950年初頭に米国CONOCO社によって開発された、陸上地震探査用の弾性波振動発生装置のことで、当初は水平方向に並べて配置した偏心重り2個を、それぞれ逆方向に高速回転することで水平方向の振動をキャンセルし、鉛直方向の振動のみを発生する機械式の装置として開発されたものが始まりとなります。1950年代の後半には、現在のバイブレーター震源と同じように、サーボバルブと油圧アクチュエーターにより振動を発生させる機構となり、1960年代にはこれに振動制御装置が追加されることで、地震探査用弾性波震源としての実用性が飛躍的に高まりました。いわゆる油圧サーボによる振動制御法の確立により、バイブレーター震源の有効性が広く認知され、1970年代以降、現在に至るまで、ほとんどの調査に適用されるようになっていきます。

国内では、石油資源開発株式会社(以降JAPEXと略記する)が1974年に米国IVI社製Y-900バイブレーター震源を導入したのが始まりとなります。1983年にJAPEXの子会社としてJGIが設立され、物理探査部門の一部を引き継いだ後、更新機としてIVI社製Y-2400を導入、2002年にはIVI社製HEMIを導入し現在に至ります。またその間の2003年には、道幅の狭い道路で発振作業ができる小中型のIVI社製EnviroVIBやS波バイブレーター震源など

も導入されています。JGIでは現在、大型P波バイブレーター震源であるHEMIを5台、小中型P波バイブレーター震源であるEnviroVIBを4台、S波バイブレーター震源を1台保有し、探査対象に見合った震源を提供しています。

さて、ここからは最新型のブロードバンドバイブレーター震源についてお話ししたいと思います。これまでの陸上地震探査では一般に6Hz~100Hz程度のリニアアップスイープが採用されていますが、最近では地下深部構造調査や中・浅部高分解能地下構造調査、FWI(Full Waveform Inversion)による速度モデルの高精度化によるイメージング向上などの需要に応えるため、より低い周波数から高い周波数まで精度良く発振する技術が求められるようになっていきます。JGIでは、バイブレーター震源を1Hzから400Hzまでの広い周波数帯域で発振するための波形生成・発振制御技術の開発や低周波地震計の導入、FWI技術開発等を進め、広帯域地震探査(Broadband Seismic)の統合的な技術パッケージを構築してまいりました。更に2020年には最新型ブロードバンドバイブレーター震源(米国INOVA社UNIVIB2、以降UV2と略記する)を2台導入し、2021年には更に2台を追加導入する予定です。

バイブレーター震源の諸元比較表を表1に示します。

表1 バイブレーター震源の諸元比較表

型式	HEMI	EnviroVIB	UNIVIB2
全長	8.51m	6.1m	7.95m
全幅	2.46m	1.83m	2.31m
全高	3.23m	2.59m	3.01m
車両重量	18.740tons	約8.1tons	16.75tons
最小回転半径	7.38m	4.29m	5.34m
原動機排気量	8,800cc	4,500cc	4,480cc
マスストローク	3in	2.75in	4.0in
マス質量	5,000lbs	1,750lbs	4,029lbs
ベースプレート質量	4,100lbs	855lbs	2,012lbs
ホールダウンウェイト	41,000lbs	15,000lbs	34,000lbs
周波数範囲	6-200Hz	10-250Hz	1-400Hz

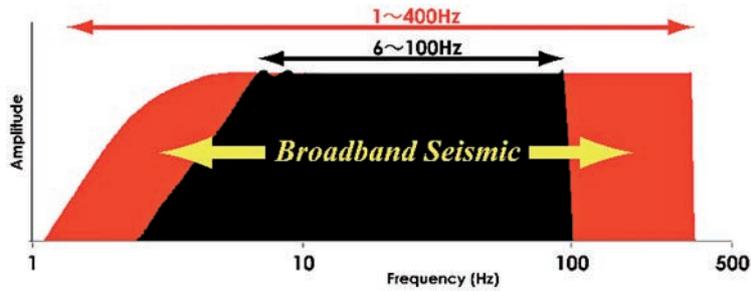


図1 UV2による発振周波数の広帯域化

UV2は、地震探査用途としては、2.5Hz~400Hzまでの振動を実効的に利用することができます(図1)。この震源は振動を生成するリアクションマスの質量が比較的大きく、また、振動のストロークが従来の機種より長いため、極低周波数において大型バイブレーター震源と遜色のない起振力を得ることができます。また、これまで陸上地震探査ではあまり利用されてこなかった200Hz~400Hzの高周波数帯域の発振を精度良く行うことができることから、浅層高分解能地震探査等への適用が期待されます。

なお、2Hzよりも低い周波数帯域では大きな力は出ませんが、橋梁などの大きな構造物の共振周波数計測などの用途に利用することができます。

油圧アクチュエーターが生成する広い周波数帯域の振動を地中に伝播するためのカップリング機構を写真2に示します。UV2は、従来機に比べ剛性の高いベースプレート(接地板)を採用し、複数のエアバッグを介して地面に押さえつける構造をとるため、発振中に油圧アクチュエーターのガタつきやグラつきが生じ難く、ベースプレートがまるで地面に吸い付いているかのように安定しています。

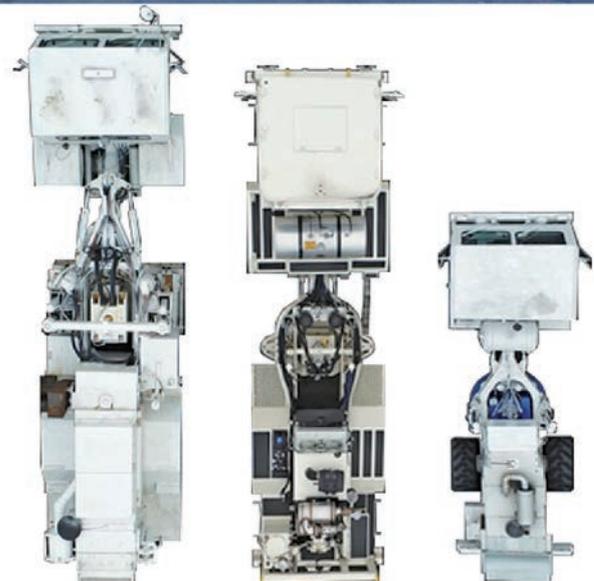


写真2 地面とのカップリング機構

そのため、ベースプレートのたわみ等に起因する無用なノイズを抑え、精度の高いグランドフォース振動を効率良く地面に伝播することができます。この特性は、地震探査記録の品質向上に少なからず寄与するものと考えられます。

UV2は写真3に示す通り、HEMI(大型)とEnviroVIB(小中型)の中間の大きさですが、最小回転半径は大型より2 mほど短く、車幅も小中型と同程度であることから、比較的小回りの利く震源と言えます。排気量は大型の半分、小中型と同程度で、騒音レベルも比較的強く抑えられています。一方、起振力は小中型の200%以上、大型の約83%と大きく、効率性と環境性の両立が図られています。

JGIでは2021年度より「UV2」4台体制によって、新たな広帯域地震探査を通じた地下構造の可視化に貢献していく所存です。



HEMI

UV2

EnviroVIB

写真3 バイブレーター震源の大きさの比較



ネパール調査紀行

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 吉川 猛

1. はじめに

「ネパールの調査」というと、2015年4月25日に発生したネパール地震(マグニチュード8.2)に関連した調査と想像されるかもしれませんが、実は全く関係ありません。目的は首都カトマンズから西へ約150kmのポカラという都市近郊で発生している陥没(Sinkhole)の調査であります。陥没は2013年11月から突然発生し始め、数えきれない陥没がハチノス状と呼べるほど群発しました(図1)。

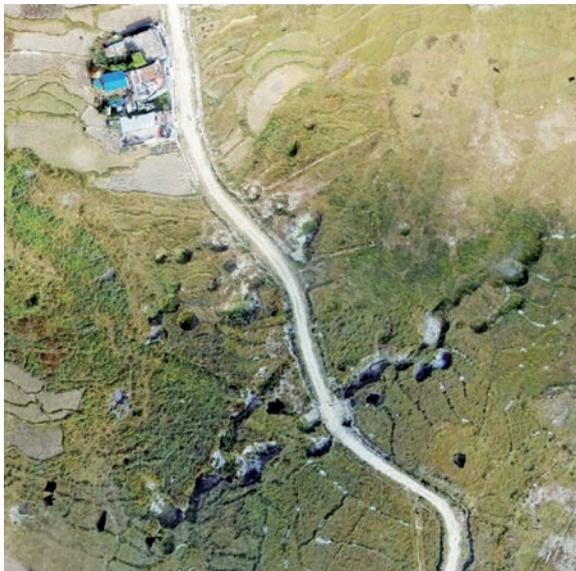


図1 陥没の様子(2015年11月頃)

調査結果については「ネパール、ポカラ地域における陥没発生地帯への表面波探査と地下流水音測定の適用、吉川ほか2016(第135回学術講演会)」など、いくつかの報告^{1~3)}や、動画(<https://www.youtube.com/watch?v=QvLwL3Ohou8>)がありますのでそちらをご覧ください。ここでは、ネパールの様子をお伝えしたいと思います。



図2 ネパールまでの空路

2. ネパールへの入国

私は羽田からバンコクを経由してネパールへ入国しましたが、バンコクからネパールへの空路は、最短距離を飛ばず、途中遠回りをしているように感じました(図2)。これは想像ですが、搭乗客にチョモランマを見せる計らいなのではと思います。

3. ネパールの車事情

ネパールには3種類のカーナンバーがあります。

【赤】は自家用車、自家用バイク、【緑】は外国人観光客専用車、【黒】は商用車(タクシー、バス)です。自家用車を持つ家庭は少ないですが、バイクは普及しています。市民の移動手段はバイクやバスが主体のようです。ところで、ネパールではバイクの運転者にはヘルメット着用義務が課せられているようですが、後部座席には義務はないようです(図3)。ちょっと怖いですね。



図3 バイクの様子

4. 動物天国

ネパールでは都市部、農村部を問わず、あちこちで動物を見かけます。牛、犬、猿、鶏、山羊など、どれも自由に闊歩しています。住宅街の牛とか、いったいどこで寝ているのでしょうか。ネパールで一番自由なのは動物かもしれません。なお、ネパールはヒンズー教徒が多く、牛は崇拝の対象であり、大事に扱われています(図4)。

5. ポカラの水道事情

水道インフラ整備は未だ不十分なようで、ポカラのよう

な大都市でも家に水道のない家庭が多いようです。早朝の共同水道には水汲みの市民が集まっていた(図5)。



図4 住宅街の牛



図5 早朝の水くみ場

6. フルーツ天国

高地のイメージが強いネパールですが、南国フルーツはふんだんに手に入ります(図6)。主にインドから輸入されるそうです。写真には写っていませんがリンゴも売っています。南方系と北方系のフルーツが手に入るのも特徴かも知



図6 街の八百屋

れません。街を歩いていると、行商のお兄さんが「マンゴー買わない? ライチはどう?」と声をかけてきます。調査期間中は毎朝、昼食用にフルーツを購入しました。

7. ポカラ観光

滞在したポカラのホテルからマチャブチャレ(6,993m)を拝むことができました(図7)。この山は神聖な山として登山が禁止されているそうです。そして、ポカラと言えばフェア湖。湖面は観光用ボートで賑わっています。



図7 マチャブチャレ(6,993m)

8. カトマンズの電線事情

旅行者に人気? のカトマンズの電線事情。新規のたびに増やし続けた結果なのでしょうか。猛烈に絡みまくっています(図8)。現在、Visit Nepal2020(ネパール観光年)に合わせ、美化事業の一環として一掃作業が行われているとか。



図8 絡みまくる電線

<参考文献>

- 1) Pokhrel R.M., et al.(2015). Preliminary Field Assessment of Sinkhole Damage in Pokhara, Nepal.
- 2) Kuwano R., et al.(2016). Investigation into The Multiple Recent Sinkholes in Pokhara, Nepal.
- 3) Yagiura Y., et al.(2016). Follow-up Survey of Sinkhole Damage in Pokhara, Nepal.



ベトナム微動観測記(その3)

産業技術総合研究所 長 郁夫

ベトナムでの微動観測

その1、2の報告の通り、高知大の久保慎人氏の紹介で、微動探査には素人のベトナム人Duong氏の計画につきあうことになりました。彼は素人なのに(だから?)「ベトナムの古都フエで140点の微動アレイを実施して浅部地盤を評価する」という大プロジェクトを立ててしまったのです。

ベトナムは日本のように南北に細長い国で、北部、南部にそれぞれ2大都市ハノイ、ホーチミンがあります。フエはちょうどその中間に位置する、ベトナム最後の王朝がおかれた都市です。フォン川を挟んで北半分が旧市街(古都)、南半分が新市街(生活圏)となっています(図1)。旧市街には世界遺産にも登録される王宮があり、国内外から多くの観光客が訪れます。一方、新市街は夜は歩行者天国のナイトスポットもあり華やかです(図2)。



図1 フエの新旧市街



図2 王宮付近(上)とナイトスポット付近(下)

Duong氏によると、フエ市周辺では北方のダムに関連する誘発地震が見られ、活断層もあります。冒頭のプロジェクトは観光地の安全確保と文化遺産保護の目的で開始されました。私たちはこれまでに2度の訪越でそれぞれ微動観測演習(ハノイ)、パイロット的微動観測(フエ)を実施しました。そして2度目の訪越の際に6台のジオフォンと小型データロガーを彼らに貸与して、雨季(5~10月)前にフエの全観測を終えるよう念を押して帰国しました。

フエでの本観測と解析結果

しかし、国の中心的な研究機関(VAST)でチーフリーダー(当時)を務めるDuong氏にとって微動観測のためにまとまった時間を取るのなかなか難しいようでした。尋ねると「ベトナムでは全ての予定は未定」と笑います。そのうち4月、5月が過ぎ、雨季に突入してしまいました。7月末、体調不良も重なってそんなことをすっかり忘れていた頃、Duong氏から連絡がありました。「今、フエで微動観測中。地震観測が忙しくてフエが後回しになった。それにしても今年は雨が多い。」そして8月後半に「微動観測完了」の吉報が入りました。

結局、Duong氏の研究チームは、2018年の6月から8月にかけて雨天を避けつつ間欠的に微動観測を実施したようです。実質的にのべ19日の観測だったようです。フエ市内およびその周辺を含む約11km×13kmの領域内の89地点で辺長3mおよび10mの三角アレイ、37地点で長さ12mの直線アレイを実施しました。センサーは4.5Hzジオフォンです。各地点で30分間観測しました。

これらのアレイ形状や観測時間等の仕様はこちらが提案したガイドラインを完全に踏襲したようでした。微動アレイでは彼らも「完全素人」を自認していますので、こちらもヒューマンエラーを防ぐべく、徹底的に簡略化した仕様を提案したのでした。彼らは観測手順やケーブル結線部の扱い等の細部まで完全にフォローしてくれて、その結果(と信じた)、彼らだけで、限られた機材で、彼らの職場のあるハノイから500kmも離れたフエで、126地点ものアレイ観測を完了したのです。感無量でした。

ただし、失敗もありました。日本から貸与したジオフォン以外にもDuong氏は地元の研究機関と機材をバーターして別途ジオフォンを手に入れ、それを使って全観測点で直線アレイも実施してくれていたのです。これは、私が技術開発的な色気で「たまに直線アレイも組んだらどうか」と提案したのに対し、忖度して全観測点で応えてくれた結果でした。なのに、このデータが全滅でした。ジオフォンのコネクタの緩みが問題だったようです。実際、このバーター・ジオ

フォンは私もノーチェック。そこに絵に書いたようなヒューマンエラー。心底悔やまれました。

ともかく、適切に得られたデータからレーリー波位相速度を同定し、各地点の結果から波長13m、25m、40mに対応する位相速度を読み取りました。それぞれ深さ10m、20m、30mまでの平均S波速度(AVS10、AVS20、AVS30)と解釈してマッピングすると、北半分は軟弱、南半分は硬質な地盤という明瞭な差が現れました(図3)。既存の地質分布(図4)とも調和的です。フエ王宮がある旧市街に特に軟弱な地盤が分布すること、新市街も北東部は軟弱なので注意が必要なことが定量的に示されたのです。この結果は、フエ市の安全のため、今後有効に活用されることでしょう。

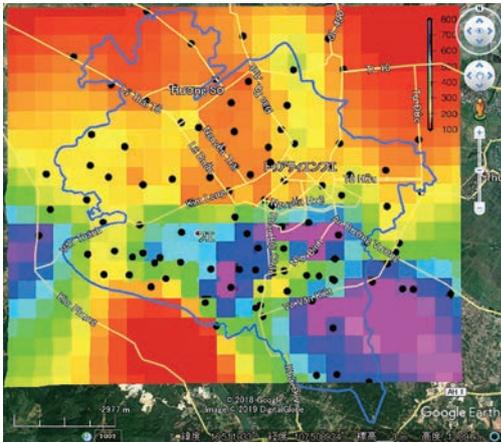


図3 AVS30の分布(データ追加前の暫定版)



図4 フエの地質図

微動アレイの追加とH/Vスペクトル

その年の暮れ、再びDuong氏から連絡が入りました。年が明けたら追加観測すること。図3ではフエ市の境界付近が外挿となっていますので、「フエ市の境界線の外側でもアレイをやる」らしいです。これには納得しましたが、「単点観測(H/Vスペクトル)もやる」とも言います。確かにそれには多くの効果が期待できますが、「まずはこの結果で満足してはどう?」と言うと、「計画申請書には500地点でH/Vスペクトルをやると書いてしまった」とのこと。なん

と!初めて聞きました。納得せざるを得ませんが、そんなにやれるでしょうか。バーター・ジオフォンのイタイ記憶が蘇ります。同年はプロジェクトの最終年度でしたので失敗は許されません。

心配になって私もフエに同行して機材検証と現場確認をしました。詳細は省略しますが、結局、アレイデータは165地点分に達し、Duong氏が必要としたフエ市境界付近のマッピングが完成しました。また、H/Vスペクトルのピーク周波数も地質分布やAVSと調和的でした。

この成果は、ベトナムではまだ数少ない「微動アレイに基づく」地盤のモデル化例であり、これほど大規模な例としては初でした。観測後につけてくれた地元フエ大学Nam(元)教授(地質学者。現在、フエ省科学技術局局長)も「これまでフエには物性値データがなかった。0が1になったのだ!」と感嘆してくれました(図5)。ですから、「あとは論文化だね」と現在は副所長になって更に多忙を極めるDuong氏の背中を押しているところです。



図5 議論するNam(元)教授(左)とDuong氏(右)。観測後、フエのレストランにて

おわりに

これまで、その1、2でも明記しませんでした。私は、Duong氏への技術支援を「素人でもできる微動アレイ・ガイドライン」作りの出発点にしようという密かな目標を持っていました。誇大妄想的ですが「素人でもOK」は「完全自動化」と表裏一体ですから、完全な客観化であって果ては「微動利用の科学」に辿り着くように感じられたからです。実際、終わってみるとちょっとは掴みが得られたようなそうでないような。ともかく面白いライフワークを得たような楽しい気分になりました。

一方、素人ガイドラインよりも技術者育成が大事という視点も必要です(排反ではないと思います)。そのためには指導側と参加側に共通する具体的な目標とコミュニケーション環境、そして向上心や忍耐力(メンタル)が不可欠です。これを肌で感じる事ができたことはたいへん貴重な経験でした。この場をお借りして共同研究者の大久保慎人氏とDuong氏及びそのスタッフに感謝申し上げます。

広告掲載のお知らせ

物理探査ニュースでは賛助会員の皆様の広告を募集します。製品や技術をフルカラーで宣伝することが可能です。広告掲載についてご興味をお持ちの方は学会事務局までお問い合わせください。

◆ 広告掲載条件 ◆

- ①掲載スペース：0.5ページもしくは1ページ
- ②掲載料：0.5ページ16,500円(税込み)、1ページ33,000円(税込み)
- ③掲載時期：毎年7月号を予定
- ④募集時期：通年



お知らせ

第143回(2020年度秋季)学術講演会

1. 会期
2020年11月25日(水)～11月27日(金)
2. 会場
オンライン開催となりますので、各自でインターネット環境をご用意ください。なお、発表には「著作権、特許出願関係、権利関係等の情報」が含まれる場合もあるため、発表内容の録画・録音・画面キャプチャー等は禁止いたします。
3. 参加事前登録
2020年11月4日(水)締切
オンライン開催のため、事前登録のみで会場登録がありません。ご注意ください。

詳しくは学会HPをご覧ください
<http://www.segi.org/event/lecture/2020/07/143.html>

第14回SEGJ国際シンポジウム

1. 会期
2021年10月18日(月)～10月21日(木)
2. 会場
北海道大学 学術交流会館(札幌市)

編集後記

春の緊急事態宣言より約半年、人の移動が増えたのを実感します。10月上旬に国内出張した際は、GoToトラベルもあるのか、飛行機はほぼ満席でした。満室の宿も多くあり、泊まる場所を探すのに少し苦労しました。

一方で、学会講演会や講習会は感染予防の観点によりオンラインでの実施が増えました。お知らせの通り、物理探査学会の11月の学術講演会もオンライン開催です。オンライン成人式を検討する自治体もあるそうで、この流れはしばらく続きそうですね。

先日、オンラインでの勉強会に参加しましたが、参加者数が従来の会場開催に比べてかなり増加していました。ネット環境さえあれば、自宅でも、外出先でも、何なら現場にいても(!?)聴講できますし。感染予防のための方策ですが、距離や移動時間といった参加へのハードルを低くする効果もあったと言えます。

ただ、一つ残念なのは懇親会がなくなり、色々な方と会える機会が減っていることでしょうか。もう少し気軽にお酒を飲めるようになるのを待っている今日この頃です。

(ニュース委員会委員 江元 智子)



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写したい方は、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48号 2020年(令和2年)10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@segi.org
 ホームページ : <http://www.segi.org>