

平成 31 年 4 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18962

研究課題名(和文) 極小アレイを用いた新しい微動探査法の開発

研究課題名(英文) Development of a microtremor exploration method using miniature arrays

研究代表者

長 郁夫(Cho, Ikuo)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：10328560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：極小微動アレイによる深さ1m～10m程度の精度評価のために、過去の表面波探査地点と厳密に同じ地点で極小微動アレイ観測を実施した。具体的には、茨城県潮来市の人工造成地盤における表面波探査地点をターゲットとした。各手法で得られた位相速度分散曲線の比較により、半径0.6mの極小微動アレイによる浅い側の解析限界は、概ね深さ1m～2mとなることが示された。ただし、両手法では表面波の励起モードが異なるため、位相速度分散曲線の厳密な比較は困難との問題が明らかとなったため、(i)速度構造推定に関する2つの異なるアプローチの提案及び(ii)位相速度同定時のインコヒーレントノイズ補正に関する研究を追加、完成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面波探査(SW)法による位相速度分散曲線の比較に基づく極小微動アレイ(MMA)の浅い側の解析限界は、観測仕様、観測機材に依存するものの、本検討の場合は深さ1～2m程度と考えられた。また、それぞれの分散曲線に基づくS波速度構造の比較によれば、SW法とMMA法は、逆解析精度の範囲内で同様な結果を与える。上記の結果に基づけば、探査対象が深さ2m以上ならば、微動の極小アレイは、表面波探査に必要な観測機材や時間を削減できる代替法となり得る。現実には地盤の相違によるばらつきがあると考えられるが、本研究により、MMA法の新たな需要を創出するための探査限界のオーダーを把握できたと考える。

研究成果の概要(英文)：We performed microtremor observation with a miniature seismic array with radius less than 1 m at exactly the same site as the previous surface-wave-exploration site in order to evaluate the accuracy of a miniature microtremor array method for a depth range from 1 to 10 m. The experimental site was set on an artificial ground at Itako City, Ibaraki, Japan. From the comparison between those phase velocities, we found that the shallower limit of the analyzable depth range for a miniature microtremor array method with radius of 0.6 m lies at about 1 to 2 m in depth. However, it was also revealed that, since the excitation modes of the surface wave were different between those methods, the exact comparison of the phase-velocity dispersion curves was difficult. For this reason, we planned and completed additional research, (i) to develop two kinds of approaches to inferring an S-wave velocity structure and (ii) to correct the incoherent noise for identifying phase velocities.

研究分野：社会システム工学、安全工学、防災工学およびその関連分野

キーワード：微動アレイ探査 表面波探査 ノイズ補正 表層地質 浅部速度構造 平均S波速度

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は、2013年に、半径1m以下のごく小さい地震計のアレイ(群列)を用いてアレイ半径の数10倍、場合によっては100倍以上に達する長波長を扱える微動探査法を提案した<sup>1)</sup>。微動探査法とは、地表面に展開した地震計のアレイ(群列)を用いて、いつでもどこでも存在する常時微動を測定し、得られた記録の解析から表面波の位相速度を同定することによって地盤構造を推定する探査法である。解析される波の最大波長は探査深度の最大値を規定する一方、アレイサイズに依存する。通常の微動探査法のアレイサイズは10mから数kmで(表1)、アレイ半径の10倍以下の波長しか解析できない。しかし、極小アレイを用いれば、車輛の背後に展開できるほど小さなアレイ(写真1;半径0.6m)で深さ数10mに達する地盤構造を推定できる。よって、大量で稠密なデータが簡単に得られる。当然ながら従来の微動探査よりも水平方向の分解能が高い。提案手法は「常識外れの小さいアレイで想定外の深さまで探査できる新しい手法」ということになる。そこでここではこれを「極小アレイを用いた新しい微動探査法」と呼ぶ。このアイデアを提案する際、我々は、小さいアレイで推定できる最大深度、すなわち深い側の解析限界に焦点を当ててきた。これは、特に地震時の揺れの評価を見据え、極小アレイで評価すべき地盤構造の深さスケールを数10m(工学的基盤まで)と規定したためである。しかし、液状化ポテンシャルの評価や建築物の安全性評価等への適用を見据えると、それよりも一桁浅いスケールの地盤構造を高精度で評価することが重要となる。



写真1 極小アレイ

### 引用文献

1) Cho, I., S. Senna and H. Fujiwara (2013). Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, **78**, KS13-KS23.

### 2. 研究の目的

本研究では、半径1m以内の極小アレイを用いた微動探査による深さ1~10m程度の精度を評価し、それに基づいて極小アレイの浅い側の探査深度限界を評価することを目的とする。ただし、精度が低い場合ノイズ補正等のデータ処理による精度向上と観測機材の工夫による精度向上とをそれぞれ試みる。

### 3. 研究の方法

実データを用いた精度評価のほか、精度向上のための理論の開発、観測機材面からの実験的検討を行う。具体的には、過去の表面波探査地点と厳密に同じ位置で極小アレイ探査を実施し、探査結果を比較することで極小アレイの探査精度を評価する。精度が低い場合、数値シミュレーション等でその原因を追及し、理論開発による改善の余地を探る。それと並行して、極小アレイを高周波数帯域に適用するにあたってアレイを構成する地震計のタイプ(サーボ型と動コイル型)依存性等の諸問題を検討する。最後に、様々な観測データを用いて開発理論及び実験結果を検証する。

### 4. 研究成果

(1) 極小微動アレイによる深さ1m~10m程度の精度評価のために、過去の表面波探査地点と厳密に同じ地点で極小微動アレイ観測を実施した。サーボ型加速度計(JU410)を使ったケースと動コイル型ジオフォン(GS11D)をそれぞれ用いた。その結果、2つの測線に沿う複数地点で極小微動アレイによる位相速度は10Hz以上の高周波数帯域で表面波探査による位相速度に対して過大評価することが分かった。10-20Hzでは周波数帯域とともに徐々に乖離が大きくなり、20Hzで平均20%過大評価した。JU410による乖離はGS11Dよりも大きかった。1/3波長則で概算すると、浅い側の解析限界はGS11Dで0.7~1m、JU410で2~2.5mとなることが明らかとなった(長他, 2017)。

(2) ただし、上記の比較を実施する過程で、両手法では表面波の励起モードが異なるため、位相速度分散曲線の厳密な比較は困難との問題が浮上した。この問題への対応として、速度構造推定に関する2つの異なるアプローチ(平均像を推定するための経験的アプローチと情報量規準に基づいて高分解能を得るための統計的アプローチ)を開発した。

「2つのアプローチ」のうちの1つ目は、安全サイドでの簡易アプローチである。すなわち、JU410で極小アレイを構成する場合に限っては、数Hzから20Hzまでの周波数帯域を用いれば

安全に適切な構造を推定できるはずであるので、その範囲で（平均的な）速度構造を推定する手段として、10m 程度の深さレンジごとに平均 S 波速度を推定する方法を提案した(長, 2018a)。このアプローチを 2016 年熊本地震直後に実施した微動アレイ観測で得られたデータに適用し、学術論文にとりまとめた(Cho et al., 2018)。2 つ目のアプローチは、より一般的で厳密だが、やや複雑な方法である。すなわち、情報量規準に基づいて位相速度分散曲線を構成するモードおよび層構造を客観的に解釈する逆解析法を提案した(長・岩田, 2017; Cho and Iwata, 2018a)。これらの方法により、極小微動アレイと表面波探査でそれぞれ得られる速度構造モデルの客観的な比較が可能となった。そして、実際に潮来の微動データに適用したところ(Cho and Iwata, 2018b)、逆解析精度の範囲内で、両手法は同程度の結果を出すことが分かった。

(3) また、位相速度同定時のインコヒーレントノイズ補正法を開発する研究を追加した。これは「3. 研究の方法」で述べた「精度が低い場合、数値シミュレーション等でその原因を追及し、理論開発による改善の余地を探る」に関わる成果である。具体的には、Extended Spatial Autocorrelation method (ESAC 法)で複数の自己相関係数—自己相関法(微動アレイ探査で良く用いられる位相速度解析法の名称)で位相速度を得るために生成される中間量—を用いて、インコヒーレントノイズを加味した観測方程式を連立させて解く方法を提案した(長, 2018b; Cho, 2018)。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

Cho, I., 2018, Compensating for the Impact of Incoherent Noise in the Spatial Autocorrelation Microtremor Array Method, Bull. Seismol. Soc. Amer. **109**, 199-211, doi: <https://doi.org/10.1785/0120180153>

Cho, I., A. Urabe, T. Nakazawa, Y. Sato, and K. Sakata, 2018, Simple assessment of shallow velocity structures with small-size microtremor arrays: Interval-averaged S-wave velocities, Exploration Geophysics, doi:10.1071/EG18020

Cho, I. and T. Iwata, 2018a, Development and numerical tests of a Bayesian approach to inferring shallow velocity structures using microtremor arrays, Exploration Geophysics, doi:10.1071/EG18011

Cho, I. and T. Iwata, 2018b, A Bayesian approach to microtremor array methods for estimating shallow S wave velocity structures: Identifying structural singularities. J. Geophys. Res., **124**, 527-553. <https://doi.org/10.1029/2018JB015831>

### 〔学会発表〕(計4件)

長郁夫・岩田貴樹, 2017, 微動アレイデータを用いた浅部速度構造のベイズインバージョン法の開発, 日本地震学会秋季大会.

長郁夫・横田俊之・稲崎富士・尾西恭亮, 2017, 極小微動アレイと表面波探査法による位相速度の比較: 極小微動アレイ短波長側の解析限界把握に向けて, 物理探査学会第137回学術講演会論文集.

長郁夫, 2018a, 上下動微動アレイ探査の精度: 平均区間S波速度の簡易解析法をたたき台とした議論, 地球惑星科学連合2018年大会.

長郁夫, 2018b, 拡張SPAC法のインコヒーレントノイズ補正, 日本地震学会秋季大会.

### 〔図書〕(計 件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。