

令和元年6月14日現在

機関番号：82405

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06643

研究課題名(和文) 機動観測を可能とする短時間計測地震波干渉法の開発

研究課題名(英文) Development of an estimation technique on propagation velocity with short-time measurement for mobile observation

研究代表者

白石 英孝 (Shiraishi, Hidetaka)

埼玉県環境科学国際センター・研究推進室・研究推進室長

研究者番号：60415396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震防災や資源探査等に使われる地下探査技術のうち、2つの観測点間を伝わる震動(地震波、微動)の伝搬速度(群速度、位相速度)を計測して地下構造を推定する探査技術の簡便化を図るための検討を行った。その結果2観測点だけの短時間観測による伝搬速度計測の実現には至らなかったが、複数の観測点を直線上に配置し(2観測点を連担配置)、その外部に少数の補助観測点を設けることで、観測点間の伝搬速度の変化を捉えられる簡便な探査法の実現可能性を見いだした。この探査法は本研究の計測法と従来法(例えば直接同定法)を相補的に用いるものであるが、実用化できれば局所的な構造変化を簡便に検出するものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地震被害の予測等に必要な地下構造の推定技術に関するものであり、現行技術における観測点配置や計測時間長に係る課題の緩和・解消を図るために行ったものである。その結果、本研究で導いた推定技術と従来法を相補的に活用することで、新たな調査方法を実現できる可能性を見いだした。この方法を実用化することで、直線を主体とする簡便な観測点配置と短時間の計測で局所的な構造変化を容易に検出できる可能性があるため、地震被害予測等に必要な地下構造情報の収集に役立つものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have examined to simplify the exploration techniques which estimate the underground structures with measuring the propagation velocities (group velocities, phase velocities) of waves (seismic waves, tremors) between two stations. These exploration techniques are mainly used in the field of earthquake disaster prevention or resource explorations.

As a result, we have found the feasibility of a simple estimation technique that can capture changes in the propagation velocity between stations deployed along straight line, though it could not reach the implementation of the propagation velocity measurement with short-time observation at only two stations.

This exploration technique requires the conventional technique (for example, direct estimation method) complementary to estimate parameters of wave sources, however if it can be put to practical use, it is considered that local structural changes can be easily detected.

研究分野：地球計測工学

キーワード：地球計測 地震波干渉法 複素コヒーレンス関数 微動探査

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

1. 研究開始当初の背景

地震災害への対処や資源探査等で使われる地下探査技術の一つ、地震波干渉法は、2つの観測点間を伝わる地震波や地盤微振動(微動)の伝搬速度を計測して地下構造を推定する技術で、2つの観測点間の相互相関がグリーン関数(一方を加振源、他方を出力とした場合の応答関数)に近似的であるという理論を基礎とし、主に地震観測網を用いて広域の地下構造の推定に使われている。この方法は、特別な加振装置を必要とせず、また既設地震観測網を活用できるという利点から、多くの地域で適用が試みられている。しかし、解析段階での十分な SN 比を確保するには数ヶ月もの長期間の平均化処理が必要であるため、高い時間分解能を得ることは困難であり、また任意地点における短時間計測での地下構造推定に適用することも難しい状況にある。

2. 研究の目的

現行の地震波干渉法では、時空間分解能に大きな制約があることから、申請者らは新たな視点でその改善策を検討した。その結果、長期間の平均化処理の本質は、観測記録に含まれる未知の震源特性の抑制にあり、震源情報を積極的に活用した解析法を導くことができれば、短期間の観測でも十分な SN 比を確保できる可能性があると考えた。

一方、申請者らが過去の研究で導いた位相速度の計測理論では、2つの地点の観測記録から得られる複素コヒーレンス関数(Complex Coherence Function: CCF)と呼ばれる量には震源情報(震源のパワー比と方位角)が含まれていることが示されている(白石・松岡(2005))。また、CCF の時間領域の表現を用いることで、地震波干渉法における基本的な特性を表現することも確認されている(白石・浅沼(2007))。したがって申請者らの理論に基づいて震源情報を抽出し、それを地震波干渉法などの伝搬速度推定技術に適切に活用することができれば、2点アレイでの機動観測を可能とする新たな推定法を開発することができるものと考えられる。そこで本研究では、新たな伝搬速度推定法を開発することを目的として、次に示す検討を行った。

3. 研究の方法

(1)震源情報の抽出

本研究では、2観測点間の CCF の理論式(白石・松岡(2005))を用いて検討を行った。これは、CCF が地震波干渉法の基本的特性と親和性が高く、また周波数領域の定式を用いることで式の扱いが容易になると考えたためである。

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\gamma) &= J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n J_{2n}(kr) \sum_{\ell=1}^L \lambda_{\ell} \cos 2n\theta_{\ell} \right\} \\ &= J_0(kr) - 2J_2(kr) \sum_{\ell=1}^L \lambda_{\ell} \cos 2\theta_{\ell} + 2J_4(kr) \sum_{\ell=1}^L \lambda_{\ell} \cos 4\theta_{\ell} - \dots \end{aligned}$$

ここで、 $\operatorname{Re}(\gamma)$: 複素コヒーレンス関数の実部、 J : 第1種ベッセル関数、

k : 波数、 r : 観測点間距離、 L : 震源の数、 λ_{ℓ} : ℓ 番目の震源の寄与率
 θ_{ℓ} : ℓ 番目の震源の方位角(到来方向)

この理論式に基づいて伝搬速度推定に係る基礎的検討および数値実験を行い、震源パラメータ(震源の数 L 、寄与率 λ_{ℓ} 、方位角 θ_{ℓ})を少数で近似する場合の誤差の挙動、近似した震源パラメータを用いての伝搬速度の推定および推定精度の検討を行った。その結果、震源パラメータの推定値に含まれる誤差は、震源の空間的な広がり依存すること、また、その誤差を適切に推定できれば、伝搬速度の推定を行える可能性があることがわかった。

(2)震源のモデル化

地下構造の推定には、不時発生する地震波よりも常時存在する微動を用いたほうが計測の自由度が高く計測時間の短縮を図ることも可能であるため、実務上は有利と考えられる。そこで検討対象を微動としたが、その一方で、微動の震源は一般には多数存在するため、2点観測だけですべての震源パラメータを正確に推定することは難しいものと考えられた。そこで、震源パラメータと位相速度を別々に推定するのではなく、一括推定する方法を検討することとした。具体的には、2点観測による観測値と理論値との誤差を最小とするパラメータ(震源パラメータおよび位相速度)を探索によって一括推定する方法を検討した。ここで、震源パラメータについては、式中のベッセル関数に乘じられたで括られた項が理論上-1~1の範囲の値をとるため、この項全体をひとつのパラメータとして解を探索することとした。これにより震源の特性(方位角や強度分布)は失われるが、計算は容易となる。

この方法を数値実験及び実フィールドで得られた観測記録に適用した結果、数値実験で設定した位相速度及び実フィールドの観測記録に SPAC 法を適用して推定された位相速度とも、2点アレイから推定された位相速度の分散傾向と概ね調和する傾向が認められた。ただし、位相速度の誤差がやや大きく、実用上はこれを低減する必要があると考えられた。

そこで、さらに震源パラメータの表現方法を再検討し、物理的な厳密性はやや欠けるものの、2つのパラメータ(震源の方位角と強度分布の幅)だけで震源特性を表す簡易モデルを解析に用

いることとした。その結果、解析を行う際の数式の取り扱いを簡便化することができた。

(3) 2点アレイによる位相速度計測

前節で述べた震源の簡易モデルを導入し、CCFの観測値と理論値との差を最小(または極小)とする位相速度をグリッドサーチによって求める方法の検討を行った。この方法を用いて数値実験を行ったところ、CCFの観測値と理論値との残差は、複数の極小値(複数解)をもち、その中には正解値が含まれているものの、正解値を特定するためには、震源パラメータの適切な処理が必要であることが分かった。ここで適切な処理とは、震源依存項の抑制または同定を意味する。これは観測対象を地震波とするか微動とするかによって異なる処理が必要になると考えられるが、特に微動については不特定多数の震源が対象となるため、震源の簡易モデルを用いても2点観測だけの同定は困難であることが予想された。そこで、観測方法を2点観測に限定せず、2点アレイを連担させたいわゆるリニアアレイを検討対象とし、さらには外部に補助観測点を設けた疑似リニアアレイに検討対象を拡張し、実用的な探査方法の開発に向けた検討を行うこととした。

(4) 疑似リニアアレイへの適用

ここで検討対象とした疑似リニアアレイとは、図1のように構成されるリニアアレイに、で表される補助観測点を設置した観測点アレイをさしている。この補助観測点を設けることで、リニアアレイ端部では三角形アレイを構成することができ、この三角形アレイを用いて位相速度の正解値に付随する震源パラメータを推定することができる。またそのパラメータを活用することで、2点アレイ部分については、(3)で述べた本研究の方法を適用して簡便に位相速度を推定できるものと考えられる。

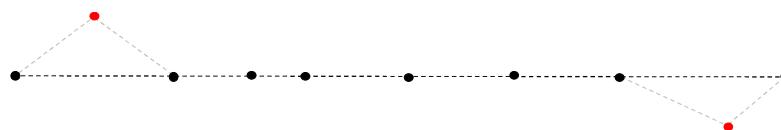


図1 疑似リニアアレイのイメージ

4. 研究成果

図2に示す疑似リニアアレイで得た実観測記録に、本研究の方法を適用した結果を例示する。



図2 検討対象とした疑似リニアアレイの例

図2の疑似リニアアレイでは、観測点 P1、P2、P3、P4 によってリニアアレイが構成され、P5 が補助観測点に相当する。また、観測点 P1、P2、P5 によって三角形アレイ (125) が構成されている。

図3に検討結果の一例を示す。P1、P2 で構成される2点アレイに「3. (3)」で述べた本研究の方法を適用すると、図3に細実線で示したように複数の推定値が得られる(図3では方位角 0 ~ 90 度の範囲を 2.5 度ピッチで探索)。また図中の は、三角形アレイ (125) から直接同定法(白石・浅沼(2009))によって得られた位相速度を示しており、これが正解値に相当する。

図4は図3の複数解から直接同定法の推定値を包含する角度範囲の解を抽出したもので、2 ~ 7Hz の帯域は概ね方位角 20 ~ 55 度の範囲の解に包含されていることがわかる。厳密には周波数ごとに適切な方位角の範囲を選定すべきであるが、ここでは説明の簡略化のため、この範囲を用いることとした。

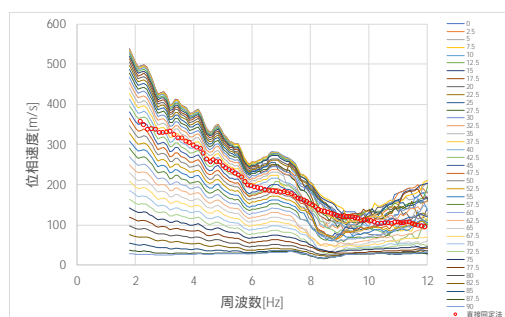


図3 2点アレイ (P1-P2) の複数解(細実線)と三角形アレイ (125) で推定された位相速度 (○)

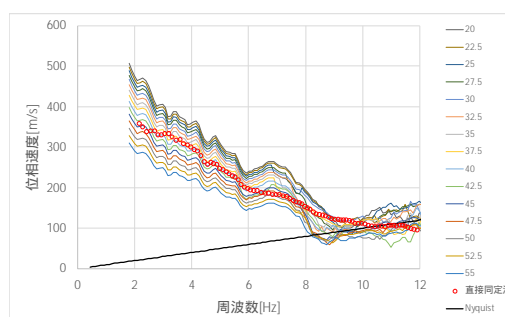


図4 複数解から 20 ~ 55 度の範囲を抽出 (黒実線はナイキスト限界)

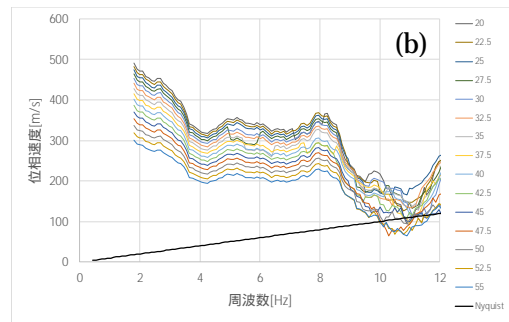
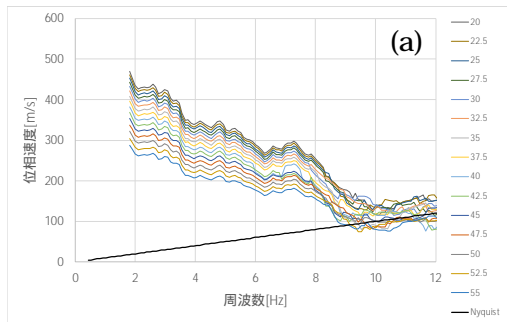


図5 2点アレイの解（方位角 20～55 度）
 (a) 2点アレイ P2-P3 の複数解
 (b) 2点アレイ P3-P4 の複数解

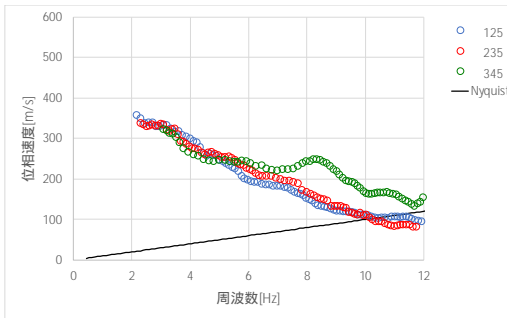


図6 補助観測点を加えた三角形アレイ
 による位相速度推定結果

なお、図中にはナイキスト限界（黒実線）を付記したが、概ね 9Hz 以上にエリアジングの影響が現れている。

図5の(a)、(b)は、それぞれ2点アレイ P2-P3 および P3-P4 から本研究の方法によって得られた複数解から、図4と同様に方位角 20～55 度の範囲にある解を抽出して示したものである。図5(a)は図4と比べて分散傾向に大きな違いは見られない。しかし図5(b)では 5～8Hz 付近で位相速度が大きく増加し、分散の傾向が大きく変化していることがわかる。これは、リニアアレイの P3-P4 区間において伝搬場に大きな相違があることを示していると考えられる。

図6は、図5の結果の妥当性を確認するために、2点アレイ P2-P3 および P3-P4 に補助観測点 P5 を加えた2つの三角形アレイ（235 および 345）について、直接同定法を適用し位相速度を求めた結果を 125 の結果と合わせて示したものである。図から、125 と 235 の結果はほぼ一致するが、345 で得られた位相速度は他よりも大きく増加しており、図5(b)の傾向と調和していることがわかる。

本研究の結果から、「3.(3)」で述べた比較的簡便な推定法であっても、2点アレイでの計測により位相速度の分散傾向を把握しうることが明らかになった。これにより、アレイ内に含まれる局所的な伝搬場の変化については、分散傾向の変化として良好にとらえることができるものと考えられる。ただし、震源パラメータの推定には既存手法の援用が必要であり、また方位角範囲の決定や複数解からの位相速度の決定などについては、定量的な評価方法を整備していく必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

白石英孝、2点アレイによる位相速度計測法の基礎的検討、日本地球惑星科学連合2018年大会、HTT19-P04、2018.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白石 英孝 (SHIRAISHI Hidetaka)
 埼玉県環境科学国際センター・研究推進室・室長
 研究者番号：60415396

(2) 研究協力者

浅沼 宏 (ASANUMA Hiroshi)
 八戸 昭一 (HACHINOHE Shoichi)
 石山 高 (ISHIYAMA Takashi)
 濱元 栄起 (HAMAMOTO Hideki)