

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19510184

研究課題名 (和文) 地下構造推定のための微動アレイ探査法の実用性向上

研究課題名 (英文) ENHANCING THE UTILITY OF MICROTREMOR ARRAY EXPLORATION METHODS FOR THE ESTIMATION OF SUBSURFACE STRUCTURES

研究代表者

多田 卓 (TADA TAKU)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・テクニカルスタッフ

研究者番号：40349840

研究成果の概要 (和文): 常時微動とは、地震が起きていないときにも常時発生している、人体に感じられないほど微小な地盤の揺れのことをいう。地表面で常時微動を計測することにより、地下の地盤構造を非破壊的に推定する諸手法を総称して「微動探査法」と呼ぶ。本研究では、広く知られている微動探査法の一つ「SPAC法」を発展させて、姉妹格に当たる新しい微動探査法を複数種類開発した。また、汎用性の高い微動解析用ソフトウェアを作成し、新姉妹手法をすべて盛り込んだ上で、学界内での普及に努めた。

研究成果の概要 (英文): Microtremors refer to very small vibrations of the ground surface, hardly perceptible to human bodies, that are taking place even when there is no earthquake. Microtremor exploration is a generic term for methods that help to infer subsurface soil structures non-invasively by measuring microtremors on the ground surface. In the present study, we have expanded the SPAC method, a popular method of microtremor exploration, and have come up with a number of new sister methods for microtremor exploration. We have also created versatile software for microtremor analysis, with all new sister methods incorporated, and have tried to promulgate its use within the scientific community.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：固体地球物理学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：物理探査、地盤、地震学、常時微動、アレイ観測、表面波、レイリー波、ラブ波

## 1. 研究開始当初の背景

地震発生時の被害規模は地震そのものの規模や震源特性だけでなく、各地点直下の地盤構造にも大きく左右される。深さ 1 km 以

上に及ぶような深部までの地下構造は、ボーリングや屈折法・反射法などの大がかりな地震探査法によって調査するのが普通であるが、これとは別に、数百 m 程度までの比較的

浅部の地盤構造を簡便かつ経済的に知ることのできる方法として、微動探査法が全世界的に注目されるようになってきている。

常時微動とは、地震が起きていないときにも常時発生している、人体に感じられないほど微小な地盤の揺れのことを呼び、その生因には風、波浪などの自然源と、車輛等の交通、建設・土木工事、稼働中の工場などの人工源の両方があることが知られている。常時微動の測定記録を用いて地下の地盤構造を推定する諸手法のことを、微動探査法と総称する。微動探査は、直接地盤に穴を穿つ「ボーリング」を必要とせず、また爆破等の人工振動源を用いなくてもよいという「パッシブ」性を特徴とし、それゆえに簡便さおよび実施コストの低さにおいて際立った長所を有する。伝統的に、日本が世界でも先導的な位置を占め続けた数少ない研究分野の一つである。

微動探査法のなかには、単一観測点ごとのデータを個別に解析する「H/V法」(Nakamura, 1989) などもあるが、本研究計画で扱うのは、複数台の地震計を一定の形状に従って地表面に並べたもの(アレイ)を利用する方法である。アレイを用いる有力な微動探査法には、Capon (1967, 1969) の開発した周波数-波数法(F-K法) および Aki (1957) の開発した空間自己相関法(SPAC法)の2系統がある。いずれも、データ解析によって直接的に得られるのは表面波(レイリー波とラブ波)の位相速度分散曲線であるが、この分散曲線を手がかりにして、地下の地盤構造を間接的に推定することができる。

F-K法は米国で開発されてほどなく全世界に広く普及し、早い時期から手法としての標準化が進んだが、これに対し SPAC法は理論的根拠がやや難解なこともあって、1980年代に北海道大学のグループが事実上の再発見をするまで、実際の応用例がほとんどなかった。1990年代に入ってようやく、日本国外でも応用例が散見されるようになったが、2000年代に入って SPAC法の普及は勢いを増しており、手法としての「使い勝手」を探るための研究も、世界的にかなりの活況を呈している。

F-K法と SPAC法を比べると、SPAC法のほうがより少数の地震計で精度良い解析を行うことができ、また解析可能な波長範囲も F-K法に比べて若干広いなど、効率の面で一日の長を有する。また SPAC法は歴史が長いながら、理論的根拠の整備や手法としての標準化がなお完成に至っていないことから、F-K法に比べて「若い」手法と言え、将来に向けての潜在的発展可能性も大きいと言えた。

我々のグループは本研究開始前の数年間に、SPAC法の理論的根拠をわかりやすく整理しなおすとともに、これを一般化して、きわ

めて普遍性の高い包括的理論体系を構築し、SPAC法をその一般理論の特殊ケースとして位置づけなおす(Cho et al., 2006a) など、理論研究の面で大きな貢献をしていた。またこの一般理論の枠組みをもとに、SPAC法の姉妹格に当たる微動探査の新技术、「CCA法」(Cho et al., 2004, 2006b) と「二重半径法」(Tada et al., 2006) を開発し、SPAC法系列の微動探査法が持つ潜在的可能性の地平を大きく切り開いていた。

本研究計画は、SPAC法系列の微動探査法をめぐって我々が携わってきた一連の研究の、いわば総仕上げを目指すものと位置づけられた。

## 2. 研究の目的

### (1) CCA法の理論的改良

我々が新規に開発した「CCA法」は、円形アレイで得られた微動の上下動記録の解析をもとにレイリー波の位相速度分散曲線を推定するものであるが、この手法がなおも理論的改良の余地を残していた。

CCA法によるレイリー波位相速度の推定精度は、一連の微動記録に無相関ノイズが混入することで低下する。この現象は低周波数帯域で特に顕著であり、CCA法による解析可能範囲の低周波側限界は、無相関ノイズの相対的なパワー(微動シグナルのパワーに対する比)によってほぼ決定される。我々の経験によれば、解析可能範囲の低周波側限界は通常の場合で、波長に換算して地震計アレイ半径の40-60倍程度に相当する。たとえば半径5mの円形アレイを用いた場合、波長200-300m程度に相当する低周波数のレイリー波まで、その位相速度を精度良く推定できると考えられる。これはF-K法やSPAC法など既存の類似手法に比べてもきわめて長い限界波長であり、低周波側に強いCCA法の特性を端的に物語っている。

だが、CCA法の基礎方程式を解く際に、無相関ノイズの影響を初めから補正するような仕組みにしておけば、CCA法の有効範囲の低周波側(長波長側)限界はさらに伸びるのではないかと我々は考えた。実際、つくば市での微動実測記録に補正CCA法を試験的に適用した結果、レイリー波速度がアレイ半径の数倍程度の波長まで、精度良く求まっているように見える事例もあった。もしも補正CCA法がそれほどの高い性能を一般に有するならば、たとえば地下数百mまでの地盤構造を推定するために、半径1m程度の小規模アレイで事足りることになり、微動探査法の有用性は飛躍的に伸びると期待される。だが他の事例では、補正CCA法を用いても有効上限波長が補正前よりほとんど伸びていないようなケースもあり、補正の有効性そのものに

疑問符を投げかけていた。

本研究計画では、補正 CCA 法が低周波数(長波長)帯域でいかなる場合に補正前よりも性能向上を示し、いかなる場合にそれを示さないかについて、多数の事例収集に基づき条件の洗い出しを行うことを目指した。その上で、補正 CCA 法を普遍性ある新しい微動探査法として世に問うために、理論面でどのような整備が必要なのかについて、慎重な考察を重ねることとした。

## (2) SPAC 法系列の微動探査法の新規開発

我々は SPAC 法を一般化して構築した包括的理論に基づき、SPAC 法の姉妹格に当たる「CCA 法」「二重半径法」という新しい微動探査法を 2 つ開発したが、理論上はこれら以外にもなお、複数種類の姉妹手法が考案可能であった。それらを実データに適用して有効性を確認した上で、新規手法として世に問いたいと考えた。

また、既存の SPAC 法、CCA 法、二重半径法はすべて、表面波(レイリー波、ラブ波)の位相速度を推定するためのものであったが、我々の理論によれば、円形アレイ特有のデータ処理法に基づきながら、表面波速度ではなく、微動の主到来方向を推定することのできる手法も、原理的には考案可能であった。既存の諸手法と一味違うそのような新しい解析手法を、確立することを目指した。

## (3) 地震計アレイの配置形状と、微動探査法の解析精度との関係解明

微動探査の手法としては広く普及している SPAC 法だが、その解析精度については、まだ十分な解明がされているとは言い難かった。円形アレイの円周部分に配置する地震計の数は一般に、微動シグナルがあらゆる方向から均等に到来する場合には少なくともよいが、特定の方位から来る成分が特に強い場合には、より多数の地震計が必要になる。だが具体的に、どのような場合に最低何個の地震計が実用上必要かに関しては、学界内で十分なコンセンサスが得られているとは言い切れなかった。

このような SPAC 法の解析精度の問題を、理論的考察、人工合成波を用いた数値シミュレーション、および実データ解析によって明らかにすることを目指した。同様の精度分析を、我々が開発した他の姉妹手法についても行うことを目標とした。

## 3. 研究の方法

### (1) CCA 法の理論的改良

CCA 法の基礎方程式を解く際に、無相関ノ

イズの影響を初めから補正するような仕組みを作り、「ノイズ補正 CCA 法」と名づけた。ノイズ補正 CCA 法は、補正前の CCA 法と比べて、低周波側(長波長側)での解析性能の伸びが期待される。ノイズ補正前と補正後の CCA 法を首都圏各地での微動実測記録に適用し、実際にそのような性能向上が見られるかどうかを事例ごとに検討した。各手法の性能は、地震計アレイ半径のおよそ何倍に相当する波長まで、レイリー波位相速度が精度良く求まるかによって評価した。

長波長側に強いというノイズ補正 CCA 法の利点がかもしも現実に発揮されるならば、非常に小さな地震計アレイを展開するだけで、相当の深部まで地下地盤構造を推定できる可能性が生まれることになる。そのような可能性を模索するため、半径わずか 30 cm という超小型の地震計アレイによる微動実測記録を解析した。

## (2) SPAC 法系列の微動探査法の新規開発

我々は本研究開始前に、SPAC 法の姉妹格に当たる「CCA 法」「二重半径法」という 2 つの新しい微動探査法をすでに発表・提唱していたが、理論上はこれら以外にもなお、複数種類の姉妹手法が考案可能であった。まずはこれらの姉妹手法に名前を与える必要があった。SPAC 法・CCA 法と同じように、微動の上下動記録をもとにレイリー波位相速度を推定することのできる手法を 3 つ取り上げ、それぞれ「H0 法」「H1 法」「V 法」と名づけた。これらを、首都圏各地で取得した微動の実記録に適用し、各手法の性能を比較した。各手法の性能は、地震計アレイ半径のおよそ何倍から何倍までに相当する波長範囲内で、レイリー波位相速度が精度良く求まるかによって評価した。

また、円形アレイ特有のデータ処理法に基づきながら、表面波速度ではなく、微動の主到来方向を推定することのできる探査手法を 2 つ取り上げ、それぞれ「Henstridge の円位相法」「CCA 円位相法」と名づけた。これらを、上述したのと同じ、首都圏各地での微動実測記録に適用した。結果の妥当性は、周辺の振動環境や、微動シグナルの到来方向を綿密に分析することのできる F-K 法との比較によって行うこととした。

## (3) 地震計アレイの配置形状と、微動探査法の解析精度との関係解明

SPAC 法の基礎理論に精緻な検討を加えることにより、微動測定条件と SPAC 法の解析精度との関係を明らかにすることを目指した。とりわけ

円形アレイの円周部分に配置する地震計

の数

微動到来方向の角度的な広がり  
無相関ノイズの混入  
解析に用いるデータの長さ  
の影響を定量化することに注意を払った。理論的考察から導いた結論を裏付けるために、実データ解析や人工合成波による数値シミュレーションも適宜行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) CCA法の理論的改良

「ノイズ補正 CCA法」の基礎方程式を書き下し、国際学術雑誌に発表した (Tada et al., 2007)。ノイズ補正 CCA法の方程式は、他の SPAC法・CCA法等の方程式と比べて、一つ顕著な特長を有する。SPAC法・CCA法等の方程式が、関数の逆演算によってレイリー波位相速度を推定する形になっているのに対し、ノイズ補正 CCA法の方程式では、関数の順演算だけでレイリー波速度が求められる。この特長は、手法の普及に当たって大きな利点になると期待される。

ノイズ補正前と補正後の CCA法を、首都圏 2地点での微動実測記録に適用した結果、片方の地点では、有効上限波長が地震計アレイ半径の 35 倍程度から、補正によって 60 倍程度にまで伸び、他方の地点でもアレイ半径の 25 倍程度から、補正によって 35 倍程度にまで伸びたことが確認された (Tada et al., 2007)。

ノイズ補正によって上限波長が伸びないケースがある理由も、理論的考察により解明された。具体的には、ノイズの相対パワーを推定する際の推定誤差が、相対パワーの値そのものよりも小さいのでなければ、ノイズ補正をしても上限波長は伸びないと考えられる (Tada et al., 2007)。

長波長側に強いというノイズ補正 CCA法の利点を活かすことができれば、超小型の地震計アレイを展開するだけで、かなりの深部まで地下地盤構造を推定できる可能性が生まれる。そのような可能性を模索するため、つくば市内の 3 地点で、半径わずか 30 cm の地震計アレイを使って取得した微動記録を解析した。その結果、波長数十 m から場合によっては 100 m 以上、アレイ半径 30 cm と比べれば実に 100 倍から 500 倍以上に達する長波長帯域に至るまで、レイリー波速度を良好な精度で推定することができた (長・他, 2008)。既往研究では最低でも数 m 規模のアレイが用いられてきたが、自動車の車体幅より小さな超小型アレイの実用性が本研究で示された以上、測定用地の選定や機材の展開が容易になり、今後はとりわけ都市部での機動的探査に恩恵が期待される。

##### (2) SPAC法系列の微動探査法の新規開発

既存の SPAC法、我々が以前に開発した CCA法に加えて、「H0法」「H1法」「V法」と名づけた 3 つの新しい解析手法を、首都圏 2 地点での微動実測記録に適用した。その結果、各手法の有効波長範囲は

H0法と SPAC法については、アレイ半径の 2-3 倍から 10 倍程度までの、短波長側の比較的狭い範囲

H1法については、アレイ半径の 7 倍から 30 倍程度までの、長波長側の比較的狭い範囲

CCA法と V法については、アレイ半径の 2-3 倍から 30 倍程度までの、非常に広い波長範囲

と判定された。これは、探査手法としては既存の SPAC法よりも、CCA法や V法のほうが性能的にすぐれている可能性を示す。同一のデータを解析しているにもかかわらず、有効波長範囲にこれだけ大きな差が現れた理由は、各手法の基礎方程式の数学的性質の差によって、ほぼ説明づけられた (Tada et al., 2007)。

また、円形アレイ特有のデータ処理法によって、微動の主到来方向を推定することのできる新しい探査手法「Henstridge の円位相法」「CCA 円位相法」を、上述したのと同じ、首都圏 2 地点での微動実記録に適用した。F-K 法との比較から、微動の主到来方向がおおむね妥当に推定されていることがわかった (Tada et al., 2007)。

本研究の最終年度には、SPAC法系列の姉妹新手法を開発する過程で、当初の研究計画では想定していなかった成果を挙げることができた。ラブ波速度等を簡便に推定することのできる、新しい微動探査法の発見である。

地表を伝わる表面波には、レイリー波とラブ波の 2 種類がある。標準的な SPAC法では普通、微動の上下動記録をもとに、レイリー波の位相速度だけを推定する。ラブ波の位相速度を推定する手法も、既存の SPAC法理論の枠内で知られているが、その手順はやや複雑であり、微動の上下動と水平動 2 成分、合わせて 3 成分の記録をもとに、3 つの方程式を連立して解かなければならない。

我々は、連立方程式を解かなくても、関数の単純逆演算により簡便にラブ波速度を求めることのできる方法を 3 種類発見し、それぞれ「SPAC+L法」「SPAC-L法」「CCA-L法」と名づけた。必要な入力データは、アレイ各点での水平動 2 成分記録だけであり、上下動記録は使用しない。また、微動に含まれるレイリー波とラブ波の相対的なパワー比を、連立方程式を解かないで単純順演算により求める手法も開発した。必要な入力データは、アレイ各点での上下動と水平動 1 成分記録 (中心点のみ全 3 成分記録) である (Tada et al.,

2009)。

微動探査によってレイリー波速度の分散曲線だけでなく、ラブ波速度の分散曲線やレイリー波・ラブ波のパワー比までもが簡便に推定できるようになれば、地下地盤構造に対する拘束条件がそれだけ増えることになり、地盤構造の決定精度が大きく向上するものと期待される。

本研究の締めくくりに当たっては、標準的な SPAC 法と、それをもとに我々が開発した一連の姉妹手法、「CCA 法」「ノイズ補正 CCA 法」「HO 法」「H1 法」「V 法」「SPAC+L 法」「SPAC-L 法」「CCA-L 法」「レイリー波・ラブ波パワー比推定法」その他を全部ひとまとめにして、汎用性の高い微動解析用ソフトウェアを作成し、これを BIDO と名づけて、学界内での普及に努めた (Tada et al., 2010)

### (3) 地震計アレイの配置形状と、微動探査法の解析精度との関係解明

SPAC 法の基礎理論に精緻な検討を加えた結果、微動測定条件と必要な地震計数との関係について、例えば次のような結論を導くことができた。

SPAC 法では、正三角形とその重心位置に計 4 個の地震計を置くのが標準的なアレイ配置とされているが、その場合、微動到来方向の角度的な広がり半幅が最低でも約 45 度あるか、あるいは半幅が 30 度程度でも、全方向から均等に到来する微動成分(等方成分)のパワーがピーク値の少なくとも 0.15 倍程度あれば、十分な解析精度が得られる。

わずかに 2 個の測定点を用いる簡便 SPAC 法の場合でさえ、微動到来方向の広がり半幅が最低でも約 140 度あるか、あるいは半幅が 30 度程度でも、等方成分のパワーがピーク値の少なくとも 0.5 倍程度あれば、十分な解析精度が得られる

(Cho et al., 2008)。

SPAC 法は長い実用の歴史を有するが、その測定条件と解析精度との関係については、これまで十分な理論的解明がなされておらず、ケース・バイ・ケースで経験的に判断されることが多かった。本研究で我々が導いた上述のような結論は、こうした経験知を客観的な判断基準に転化していくための一助になると期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki, Analysis of Love-wave components in

microtremors, *Joint Conference Proceedings, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, 査読無, 2010, pp. 115-124.

Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki, New circular-array microtremor techniques to infer Love-wave phase velocities, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 査読有, Vol. 99, No. 5, 2009, pp. 2912-2926.

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, 査読有, Vol. 61, No. 6, 2008, pp. 457-468.

Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki, Assessing the applicability of the spatial autocorrelation method: A theoretical approach, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, Vol. 113, No. B6, 2008, B06307, doi:10.1029/2007JB005245.

Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki, Beyond the SPAC method: Exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 査読有, Vol. 97, No. 6, 2007, pp. 2080-2095.

[学会発表](計 13 件)

Tada, T., Analysis of Love-wave components in microtremors, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE), 2010年3月3日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京)。

Tada, T., A novel circular-array method to infer Rayleigh-to-Love power partition ratios using ambient noise, American Geophysical Union 2009 Fall Meeting, 2009年12月16日, Moscone Center South (サンフランシスコ)。

多田 卓, 一般理論が切り開く微動アレイの可能性: レイリー波とラブ波のパワー比推定, 日本地震学会 2009年度秋季大会, 2009年10月23日, 京都大学(京都)。

長 郁夫, 一般理論が切り開く微動アレイの可能性: 解析ツール BIDO の公開, 日本地震学会 2009年度秋季大会, 2009年10月22日, 京都大学(京都)。

多田 卓, SPAC+L 法 微動水平動成分の円形アレイ観測によるラブ波位相速度の直接推定, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月18日, 幕張メッセ国際会

議場（千葉）。

Tada, T., Direct estimation of Love wave phase velocities using circular-array records of ambient noise, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, 2008年12月17日, Moscone Center North (サンフランシスコ)。

Tada, T., SPAC-derived formulae for the direct analysis of Love waves, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and the 2008 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, 2008年11月26日, つくば国際会議場(つくば)。

多田 卓, 空間自己相関法の適用可能性に関する一般理論と2点アレイ微動探査への応用, 日本地震学会2007年度秋季大会, 2007年10月25日, 仙台国際センター(仙台)。

多田 卓, SPAC法を超えて 新しい円形アレイ微動探査法の開発と実適用, 物理探査学会第117回(平成19年度秋季)学術講演会, 2007年10月6日, 北海道大学理学部(札幌)。

長 郁夫, 空間自己相関法の適用性を把握するための一般理論と2点アレイへの応用, 物理探査学会第117回(平成19年度秋季)学術講演会, 2007年10月6日, 北海道大学理学部(札幌)。

多田 卓, 極小微動アレイ観測による表面波位相速度の推定 その1. CCA法, ノイズ補正 CCA法, CCA円位相法, 2007年度日本建築学会大会(九州), 2007年8月29日, 福岡大学(福岡)。

澤入雅弘, 極小微動アレイ観測による表面波位相速度の推定 その2. 首都圏5サイトにおける適用例, 2007年度日本建築学会大会(九州), 2007年8月29日, 福岡大学(福岡)。

多田 卓, 新しい円形アレイ微動探査法の開発 極小アレイデータへの応用, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月19日, 幕張メッセ国際会議場(千葉)。

〔その他〕

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/bidodl.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田 卓 (TADA TAKU)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・テクニカルスタッフ

研究者番号：40349840

### (2) 研究分担者

長 郁夫 (CHO IKUO)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・研究員

研究者番号：10328560

篠崎 祐三 (SHINOZAKI YUZO)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：80026236

(H19 H20：連携研究者)

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：