

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560688

研究課題名(和文)新しい微動アレー観測手法・CCA法の実用化に関する研究

研究課題名(英文) Study on practical application of the CCA method, a new analysis method for array observations of microtremors

研究代表者

神野 達夫 (Kanno, Tatsuo)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80363026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：微動観測記録に対して、従来のSPAC法と新しいCCA法の両方を適用した結果を比較し、半径が小さなアレーではCCA法は優れた位相速度の推定能力を発揮するが、数百mのアレーでは両者には差がないこと、同じ半径であれば、CCA法によって位相速度を推定できるRayleigh波の周波数帯は低周波数側にシフトし、高周波数側の解析能力はSPAC法の方が高いこと、両手法を併用することで、推定できる位相速度の周波数範囲を広げることができること、観測記録のSN比を適切に管理すれば、CCA法では従来の半径100m程のアレーを20～40mに縮小することができることを示した。

研究成果の概要(英文)：Analysis results for observed microtremors by the CCA method were compared with those by the SPAC method, and the following knowledge was provided.

1. When the array of the small radius is used, the CCA method shows superior estimation ability of the phase velocity, but with the array of radius of more than 100m, ability of both methods does not have the difference. 2. When the same array radius is used, the frequency band of the Rayleigh wave where the CCA method can estimate phase velocity shifts to the low frequency side, and, the SPAC method have higher ability of analysis in the high frequency range. 3. The combination of both methods widens a frequency range of the estimated phase velocity. 4. If the SN ratios of the observed microtremors are managed appropriately, the CCA method can reduce the array radius of approximately 100m to 20-40m.

研究分野：地震工学

キーワード：微動アレー観測 地下構造 CCA法 SPAC法

1. 研究開始当初の背景

建物や都市の耐震性の向上には、その地域における適切な強震動予測が重要である。近年では地震調査研究推進本部から日本全国を概観する地震動予測地図やこの作成に利用された強震動予測ツールや地下構造に関する情報が公開されている。これによって国内の地震防災力は大幅に底上げされたが、大都市とそれ以外の地方都市の間では依然として大きな格差が存在する。また、1995年兵庫県南部地震以降、日本全体が地震の活動期に入ったとの指摘もある。このような状況下において、我々に被害をもたらす地震の危険性は日本中どこにおいても同じであると考えるべきであり、地震防災対策の地域格差は看過できない問題である。

このような格差を解消する一つの方策として、強震動予測に必要な地下構造調査の経済的な負担を軽減することが考えられる。そのために大きな役割を果たすのが、微動アレー観測による地下構造調査である。この地下構造調査は、S波速度構造の推定が可能なことや経済性に優れるなどの利点を持つが、他の手法を補完するための方法という位置づけがほとんどである。これは、微動アレー観測によって推定される地下構造が1次元構造であることが一因であるが、展開するアレーの面的な密度を上げることで、2・3次元の地下構造モデルを構築することは可能である。そのためには、微動アレー観測のさらなる効率化が求められる。

一般に微動アレー観測では、浅部から深部までの地下構造を推定する場合、数十mから数十kmまでの非常に広い範囲の波長の表面波を観測することが必要となる。一つの円形アレーで捉えられる表面波の波長は限られるため、十数mから数kmまで何種類もアレー半径を変えながら、微動を観測しなければならない。そのため、一つの半径のアレーで捉えられる表面波の波長範囲が広くなれば、展開するアレーの半径の種類を減らすことができ、観測の作業効率は向上する。

また、微動アレー観測では、アレー全体に平面波的に伝播する表面波の観測が目的となるため、アレーを構成する各観測点に固有の振動源やアレー内部の強力な振動源はノイズとなる。しかし、数百m級以上の大きなアレーでは、このようなノイズを排除できないため、交通量の多い市街地では、ノイズが比較的少ない夜間での観測やノイズの影響を受けていない記録を出来るだけ多く得るために長時間の観測が必要となる。しかし、一つの半径のアレーで捉えられる表面波の波長範囲が広くなれば、アレー半径を小さくすることができる。すると、一般の交通の影響を受けにくく、アレー内部の振動源も少ない比較的狭い閉鎖空間での観測が可能になり、位相速度の推定精度の向上が期待できる。

観測された微動記録から表面波の位相速度を推定する方法として、近年、従来に空間

自己相関法 (SPAC法) などに比べ、より広い範囲の波長の表面波を捉える事が可能なCCA法が開発された^{など}。この方法が本格的に実用化されれば、微動アレー観測による地下構造調査の効率化に大きく貢献すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、既往の研究等により地下構造や表面波の位相速度が明らかな地点での新たな観測および既存の微動アレー観測データから、CCA法の表面波位相速度の推定精度、適用範囲、観測作業の効率化の検証等を行い、CCA法の実用化を目指す。そのために、筆者がこれまでに行ってきた微動アレー観測のデータや新たに行う微動アレー観測のデータにCCA法を適用し、従来のSPAC法による結果との比較から、CCA法について、以下の事項を明らかにする。

- (1) 表面波の位相速度の推定精度
- (2) 位相速度が推定可能な表面波の波長範囲とアレー半径の関係
- (3) 位相速度抽出手法の違いによる求められた位相速度の違いが最終的に推定される地下構造に与える影響
- (4) 観測作業の効率化の程度

3. 研究の方法

本研究では、まずこれまでにSPAC法の適用を前提に中国地方の各県(図1)で行われた微動アレー観測のデータに対してCCA法を適用する再解析を行う。そして、SPAC法を用いた場合の解析結果と、CCA法を用いた場合の解析結果の比較から、CCA法によって導かれたRayleigh波位相速度の精度検証およびCCA法によって位相速度が推定可能な表面波の波長範囲とアレー半径の関係について検討する。次に、過去にSPAC法の適用を前提に微動アレー観測が行われた小田原市、苫小牧市、金沢市など(図1)において、新たにCCA法の適用を前提とした微動アレー観測(アレー半径は2~40m)を実施する。なお、これらの地点では過去に10~2,000mのアレー半径での観測が行われ、SPAC法によって解析が行われている。先述の再解析結果と併せて、SPAC法の解析結果とCCA法の解析結果を比較することで、位相速度抽出手法の違いによる求められた位相速度の違いが最終的に推定される地下構造に与える影響について、および観測作業の効率化について検討する。

4. 研究成果

- (1) 表面波の位相速度の推定精度

中国地方の各県で実施された微動アレー観測(アレー半径は、15~500m)で得られたデータにSPAC法ならびにCCA法を適用し、得られたRayleigh波の位相速度の違いを図2に示す。アレー半径が小さくなるにつれて解析方法による差は小さくなり、半径

30m 未満の比較的小さなアレーに関しては、ほとんど違いは見られない。これは、アレー半径が小さくなるにつれて、相対的に SN 比が高くなるのが要因として考えられ、この SN 比が高いほど、2 つの解析方法による Rayleigh 波の位相速度に違いが見られないことが確認された。

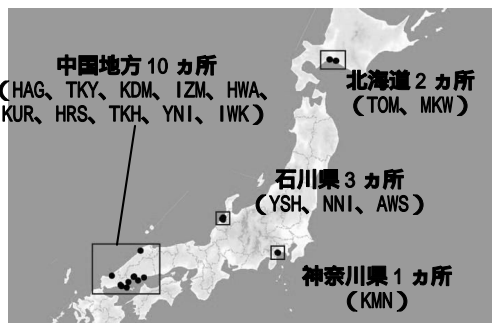


図 1 微動アレー観測を実施した地点

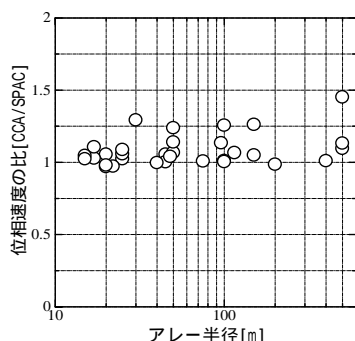


図 2 両手法によって推定された Rayleigh 波位相速度の比較

(2) 位相速度が推定可能な表面波の波長範囲とアレー半径の関係

図 3、図 4 に各アレーでの SPAC 法と CCA 法で推定可能であった Rayleigh 波の波長範囲の上限値と下限値の比較結果を示す。図 3 が上限値の比較である。CCA 法の方が SPAC 法よりも同一半径のアレーにおいて a 値が大きい。すなわち、同じ半径ならば、CCA 法の方がより長い波長の Rayleigh 波を捉えることができ、KDM の S アレーや TKY の P アレーなど特に半径の小さなアレーにおいて、それが顕著に表れている。波長の長い Rayleigh 波は深部の地下構造に影響を受けるため、これは同一半径のアレーにおいて、CCA 法の方が SPAC 法よりも深部の地下構造に関する情報を抽出可能であることを示している。よって、CCA 法を用いることにより、アレー半径の縮小による微動探査効率の向上の可能性がうかがえる。

図 4 は下限値の比較であるが、SPAC 法の方が CCA 法に比べ同一半径のアレーにおいて a 値が小さい。すなわち、同じ半径ならば SPAC 法の方がより短い波長の Rayleigh 波を捉えることができ、特に半径 200m 以上の比較的大きなアレーにおいてそれが表れて

いる。波長の短い Rayleigh 波は浅部の地下構造に影響を受けるため、このことは、同一半径のアレーにおいて SPAC 法の方が CCA 法よりも浅部の地下構造に関する情報を抽出可能であることを示している。

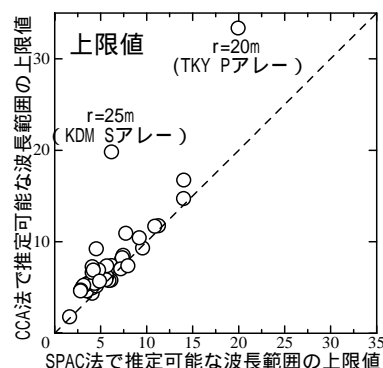


図 3 各アレーにおいて両手法で推定可能であった Rayleigh 波位相速度の波長範囲の上限値の比較

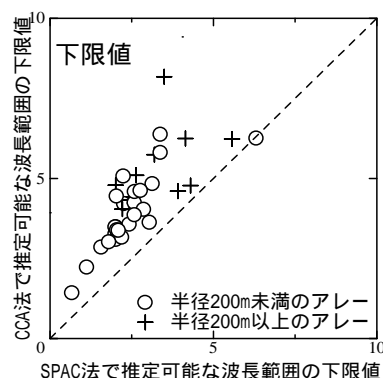


図 4 各アレーにおいて両手法で推定可能であった Rayleigh 波位相速度の波長範囲の下限値の比較

(3) 位相速度抽出手法の違いによる求められた位相速度の違いが最終的に推定される地下構造に与える影響

図 1 に示す中国地方の 10 箇所、石川県 (3 箇所)、神奈川県 (1 箇所)、北海道 (2 箇所) で観測された微動記録を用いる。まず各アレーにおける、分散曲線を推定する際に用いた Rayleigh 波位相速度の最も波長が長い点で分散曲線を分割し、分割点より高周波数側をその半径以下のアレーを用いて求める事が出来る分散曲線とする。この分散曲線から最下層の S 波速度を徐々に増加させ、試行錯誤的に S 波速度構造を求め、その最下層の値をこのアレーで求められる最大の S 波速度とし、両方法による位相速度に対して各アレーで求められる最大の S 波速度を調べた。

図 5 に、各アレーにおける最大の S 波速度とアレー半径の関係の例を示す。中国地方の地点では、特に半径 100 m 以上のアレーにおいては、SPAC 法と CCA 法でアレーごとに求められる S 波速度に大きな差はない。KUR

の 20 m、150 m、IZM の 200 m のアレーでは、CCA 法による S 波速度が SPAC 法を上回るが、これは CCA 法によって位相速度が推定可能な Rayleigh 波の波長域が長波長側にシフトしていることによる。TOM、NNI、KMN では、CCA 法によって 40 m 以下のアレーから求められる S 波速度が、SPAC 法による半径 100 m 程度のアレーの結果と同等、もしくは大きく上回る。特に NNI では、CCA 法による 5~20 m のアレーの S 波速度が、SPAC 法の 80~250 m のアレーによる値と同程度で、CCA 法による 40 m のアレーにおいては、SPAC 法による 700 m のアレーの結果を超える。

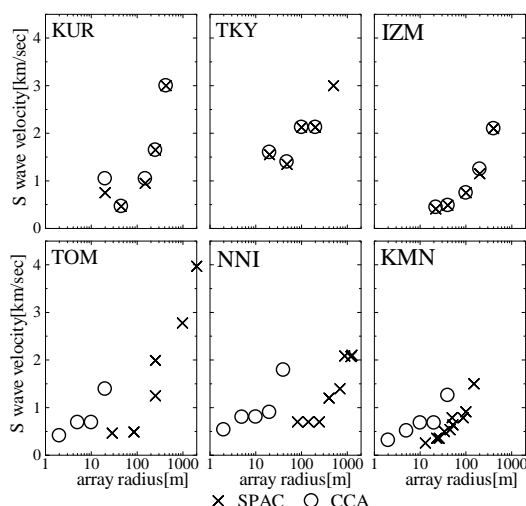


図5 各アレーでの求められる S 波速度の最大値とアレー半径の関係の解析方法の違いによる比較

図6に各観測点のアレーごとに求められる最も長い波長を半径で正規化した値と SN 比の関係を示す。両者には一定の相関がみられ、SN 比が高くなるにつれて、アレー半径に対して求められる波長も長くなっており、これによってアレーごとに推定される S 波速度の違いが生じたと考えられる。CCA 法による推定結果が特に優れていた TOM、NNI、KMN は、どの点も高い SN 比を有している。TOM はサッカーコート程の広場で早朝に、NNI では閑静な住宅地内の広い運動公園で観測を行っており、両地点ともに微動アレー観測にとって理想的な閉鎖空間であったこと起因していると考えられる。

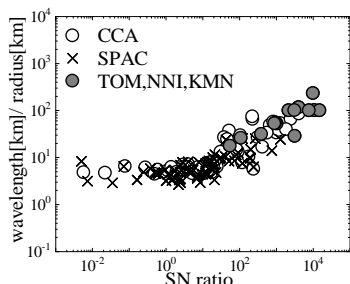


図6 各アレーにおける波長の最大値と SN 比の関係

(4) 観測作業の効率化の程度

(2) の検討より、同一半径のデータであれば、CCA 法によって位相速度を推定できる Rayleigh 波の周波数帯は低周波数側にシフトし、高周波数側の解析能力は SPAC 法の方が高いことが明らかになった。したがって、CCA 法と SPAC 法を併用するによって、より広い帯域の Rayleigh 波位相速度の推定が可能になり、観測時に使うアレー半径の種類を減らすことにつながる。

一方、(3) の検討より、半径 2~40 m のアレーから推定された S 波速度は、CCA 法が SPAC 法を上回り、場所によっては 4~50 倍程度の半径のアレーと同程度の S 波速度を求める事が可能であった。これは観測された微動の SN 比に大きく依存しており、観測時にこの管理を適切に行えば、CCA 法を用いることで従来の SPAC 法の適用を前提とした半径 100m 程のアレーを 20~40 m に縮小するといった観測の効率化が可能である。

<引用文献>

Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, 1957, 415-456.

Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, Geophysics, 69, 2004, 1535-1551.

神野達夫、工藤一嘉、高橋正義、笹谷努、凌甦群、岡田廣：微動アレー観測による足柄平野の地下構造の推定、物理探査学会学術講演会論文集、1999、342-346.

神野達夫、畑山健、津野靖士、工藤一嘉、前田宜浩、笹谷努、古村孝志、坂上実：長周期地震動成因解明のための苫小牧・勇払平野における深部地盤構造調査、日本地震工学会・大会梗概集、34、2005.

神野達夫、先名重樹、森川信之、成田章、藤原広行：金沢平野における 3 次元地下構造モデル、物理探査、56-5、2003、313-326.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

田川佳典、神野達夫、微動アレー観測における CCA 法と SPAC 法による Rayleigh 波位相速度の比較、都市・建築学研究：九州大学大学院人間環境学研究院紀要、第 26 号、2014、41-47、査読有 DOI 及び URL なし

〔学会発表〕(計 3 件)

田川佳典、神野達夫、微動アレー観測における CCA 法が推定される地下構造に与える影響、日本建築学会九州支部研究報告、2015 年 3 月 1 日、熊本県立大学(熊本県・熊本市) DOI 及び URL なし

田川佳典、神野達夫、微動アレー観測における CCA 法と SPAC 法による Rayleigh 波位相速度の比較、日本建築学会大会学術講演、2014 年 9 月 13 日、神戸大学(兵庫県・神戸市) DOI 及び URL なし

田川佳典、神野達夫、微動アレー観測における CCA 法と SPAC 法による Rayleigh 波位相速度の比較、日本建築学会九州支部研究報告、2014 年 3 月 2 日、佐賀大学(佐賀県・佐賀市) DOI 及び URL なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

神野 達夫 (KANNO, Tatsuo)

九州大学大学院・人間環境学研究院・教授

研究者番号：80363026