

## 微動アレー観測におけるCCA法とSPAC法による Rayleigh波の位相速度の比較

田川, 佳典  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

神野, 達夫  
九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1515823>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 26, pp.41-47, 2014-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン :  
権利関係 :

# 微動アレー観測におけるCCA法とSPAC法によるRayleigh波の位相速度の比較

## Comparison of Phase Velocity of Rayleigh Waves Based on CCA Method and SPAC Method in Array Observation of Microtremors

田川佳典\*, 神野達夫\*\*

Keisuke TAGAWA and Tatsuo KANNO

The accuracy of phase velocity of Rayleigh waves estimated by the CCA method was inspected by comparing with the SPAC method. Microtremors data in this study was observed at 13 earthquake observation sites in the Chugoku district. As a result, wavelength of Rayleigh waves obtained by the CCA method was longer than that by the SPAC method. Therefore, in case of same radius array, the CCA method could obtain information of deeper underground structure than the SPAC method. However, the analysis result of the CCA method was inferior or equal to the SPAC method in short wavelength ranges. Therefore, the performance of the CCA method may be poor to that of the SPAC method under low signal-to-noise ratio condition.

**Keywords** : Array observation of microtremors, Underground structure, Rayleigh wave, SPAC method, CCA method

微動アレー観測, 地下構造, Rayleigh波, SPAC法, CCA法

### 1 はじめに

近年、東北地方太平洋沖地震をはじめとする大規模な地震が多発し、甚大な被害をもたらしている。我が国では、南海トラフ沿いの巨大地震の発生が危惧されており、今後起こりうる地震動を適切に予測し、巨大地震に対する防災対策を講じることは急務である。特に、地震動は地下構造の影響を受けて大きく増幅することが知られており、地震による建物被害に密接に関係するため、適切な地震動の予測、さらには地震防災対策を講じるには地震基盤から地表までの地下構造を的確に把握することが重要である。

これまで比較的深部の地下構造を知るための手段として、反射法あるいは屈折法などの弾性波探査や、深部ボーリングなどが利用されてきたが、市街地での適用が困難であることや調査に係る経済的負担が大きいことなど、それぞれに欠点がある。その中で、微動アレー観測<sup>1),2),3)</sup>による地下構造の推定は、地盤増幅特性を評価する上でPS検層と同程度の地下構造の把握が期待でき、それらの欠点を補う事が出来る。しかし、現在多くの利用実績がある微動データの解析方法の一つである空間自己相関法 (SPAC 法)<sup>1),2),3)</sup>は、観測の際、

観測点配置に厳しい制約があり、周辺の地形や交通状況によっては適切なアレー配置が困難な場合がある。

そこで近年、新しい解析方法である中心なし円形アレー法 (CCA 法)<sup>4),5),6)</sup>の提案により、アレーサイズの縮小が可能となり、微動アレー観測の効率化が期待されている。しかし、まだ適用例は少なく、本格的な実用化には至っていない。本研究ではCCA法の実用化に向けて、中国地方の13ヵ所で行われた微動アレー観測のデータについて、SPAC法とCCA法の2通りの解析を行い、微動から抽出されたRayleigh波の位相速度の比較を行う。

### 2 微動アレー観測の概要

微動アレー観測では、微動に含まれる表面波の分散性を利用する。地表面に配置された微動計で多点同時に微動を観測し、得られた微動データを解析することにより表面波の分散性を求める。この分散性は地下構造の影響を受けているため、これを満足する地下構造を逆解析的に求めることができる。微動アレー観測による探査深度はアレー半径に依存している。例えば、深部の地下構造を推定するためには、それに影響を受ける長い波長の表面波を捉えなければならず、半径の大きなアレーを用いて観測する必要がある。しかしア

\* 都市共生デザイン専攻 修士課程

\*\* 都市・建築学部

レー半径が大きくなるにしたがって、アレー内を伝播する微動のSN比<sup>6)</sup>(詳細は後述)は低下する。

本研究の対象地域は広島県、山口県、島根県内の13の地震観測点の周辺地域である。観測にはJEP-6A3-10(ミットヨ、感度10V/g)、GPL-6A3P(ミットヨ、AD:24bit、収録機能のみ使用)の組み合わせを4セット用い、各機材の時刻校正はGPSで行った。また、微動計の配置はSPAC法の適用を前提としており、図2のSPAC法の配置例のように半径rの円の中心に1点、円周上に等間隔に3点の計4点に微動計を配置し、観測点ごとに複数のアレー半径を用いて観測を行った。各観測点の詳細を図1、表1に示す。

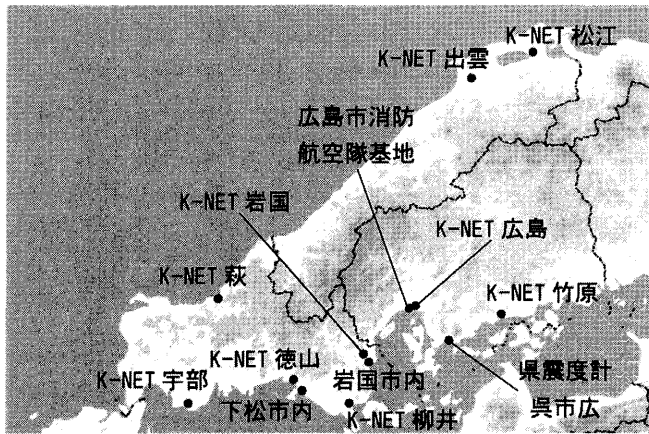


図1 各観測点の位置

### 3 解析方法

Rayleigh波の位相速度の推定にはいくつかの解析方法が存在するが、本研究では多くの利用実績のあるSPAC法と近年提案されたCCA法を用いる。

#### 3.1 SPAC法

SPAC法はAki(1957)によって考案された、定常確率過程論に基づく円形アレー観測とデータ解析法の応用によりRayleigh波の位相速度を推定する方法である。

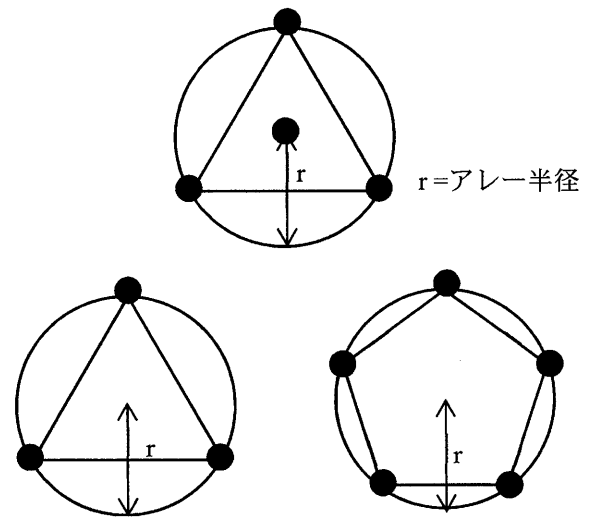


図2 微動計配置例  
(上段: SPAC法 下段 CCA法)

表1 各観測点の諸元

観測点略称	アレー半径(m)	観測時間(分)	観測点略称	アレー半径(m)	観測時間(分)	観測点略称	アレー半径(m)	観測時間(分)	
K-NET宇部(UBE)	500(X)	54	K-NET柳井(YNI)	500(X)	60	県震度計 呉市広(KUR)	427(X)	60	
				250(L)	59		250(L)		
K-NET萩(HAG)	400(X)	60		100(M)	21		150(M)		
	200(L)	30		50(S)	29		45(S)		
	100(M)	59		17(P)	30		20(P)		
	45(S)	30		岩国市内(IWK)	30(M)	30	500(X)	60	
15(P)	15(S)				250(L)		50		
K-NET徳山(TKY)	500(X)	60		広島市消防航空隊基地(HWA)	500(X)	60	K-NET竹原(TKH)	150(M)	60
					200(L)			17(P)	30
	100(M)	30			K-NET出雲(IZM)	400(X)		60	
	48(S)		30(S)			200(L)			
	20(P)		10(P)		100(M)				
下松市内(KDM)	150(L)	30	K-NET広島(HRS)	500(X)	60	K-NET松江(MTE)	400(X)	60	
	75(M)			250(L)	59		200(L)		
	25(S)			115(M)	60		100(M)		
K-NET岩国(K-IWK)	96(M)	30		50(S)	30		25(P)		30
	50(S)			20(P)					
	25(P)								

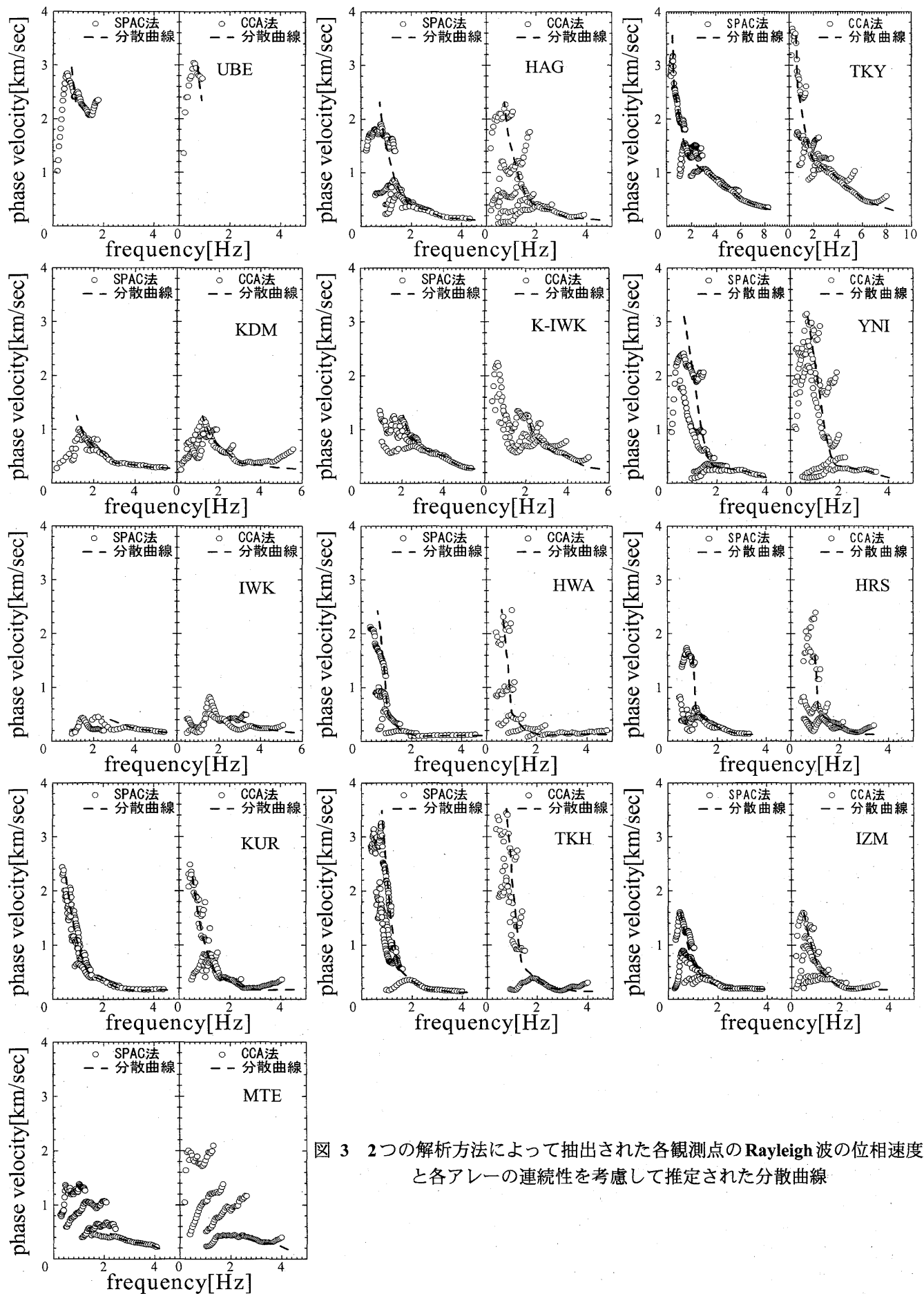


図 3 2つの解析方法によって抽出された各観測点のRayleigh波の位相速度と各アレーの連続性を考慮して推定された分散曲線

観測の際、微動計の配置には制約があり、図2のSPAC法での微動計の配置例のように、円周上に等間隔に3つ、その中心に1つ微動計を配置する。観測の際、この形状を維持しなくてはならないため、アレー半径が大きくなるほど、観測点の地形や交通状況に影響を受け、適切なアレー配置が困難な場合がある。

本研究ではSPAC法適用の前処理として、観測により得られた微動の加速度記録に、解析対象の周波数帯に応じたバンドパスフィルターを掛けて積分し速度に変換する。そして速度記録をアレーサイズに応じたいくつかの解析区間に分け、微動計ごとのフーリエスペクトルを求め、時間的、空間的に安定している部分を解析対象区間とした。また、空間自己相関関数を求めるにあたって、平滑化のためにParzen Windowを用い、そのバンド幅は試行錯誤的に決定した。

### 3.2 CCA法

CCA法はCho *et al.* (2004)によって考案された方法で、観測の際には図2のCCA法での微動計配置例のように微動計を円周上に3点、ないしは5点配置する。SPAC法の解析可能な波長範囲がアレー半径の10倍程度であるのに対し、CCA法はSN比が良好な観測環境であれば、アレー半径の数十倍に及び、SPAC法より安定して広帯域の波長のRayleigh波を抽出することができる。よってCCA法を用いれば、SPAC法を用いた微動アレー観測よりも小さいアレー半径で、SPAC法と同等の深さの地下構造を推定することが理論上可能となる。なお本研究におけるCCA法の解析には微動解析ツールBIDO<sup>7),8)</sup>を使用した。

### 3.3 SN比の算出

本研究では、Cho *et al.* (2006)にしたがって観測された微動のSN比を、微動解析ツールBIDO<sup>7),8)</sup>を用いて算出する。本研究で扱うSN比は、円形アレーの中心と円周上の微動計による記録のコヒーレンスを、ノイズとシグナルのアレー内の広がりを表す指標と考え、これを利用する。

まず観測された円周上の微動記録を、中心点から円周沿いの微動計を見たときの北からの角度に依存する重みを付けて方位平均する。次に、微動記録をいくつかのブロックに分け、ブロックごとに中心と円周でシグナルとノイズのパワー比(SN比)を求める。そして、各ブロックで得られたSN比の対数平均をとり最終的なSN比とした。

## 4 Rayleigh波の位相速度の抽出結果

図3に2通りの解析方法によって各アレーから抽出されたRayleigh波の位相速度と、その連続性を考慮して観測点ごとに推定した1つの分散曲線(以降、これを単に分散曲線と呼ぶ)を示す。同図の左側はSPAC

法によって抽出されたRayleigh波の位相速度と分散曲線、右側にはCCA法によって抽出されたRayleigh波の位相速度と分散曲線である。県震度計呉市広(KUR)、K-NET出雲(IZM)、K-NET徳山(TKY)では、各アレーから抽出されたRayleigh波の位相速度に連続性が高く、観測環境が比較的良好であったと推察される。しかし、K-NET宇部(UBE)は機材の不調による欠測、K-NET松江(MTE)は観測環境が良好でなかったためRayleigh波の位相速度に連続性が見られず、分散曲線の推定が不十分であった。

## 5 2つの解析方法によるRayleigh波位相速度の比較

抽出されたRayleigh波の位相速度は、大局的には周波数が高くなるにしたがって増加し極大に至る。その後単調に減少し極小に至り、再び増加する。抽出されたRayleigh波の位相速度で理論的に正しいとされているのは、極大と極小の間の単調減少の部分である。今回、SPAC法とCCA法を比較するにあたって、Rayleigh波の位相速度の極大と極小の間で単調減少の区間を各アレーで特定し、分散曲線との整合性を考慮して、各解析方法で推定可能であったRayleigh波の位相速度の範囲とし、この区間を比較対象区間とした。なお区間が定まらないアレーに関しては比較対象から除外した。

以上のように設定した比較対象区間において次の2種類の比較を行った。

- i. 各アレーそれぞれの解析方法で推定可能であったRayleigh波の波長範囲を比較する。ただし、各アレー半径 $r$ で正規化した値(ここでは $a$ 値と呼ぶ)を用いる。
- ii. 設定した比較対象区間の周波数帯において2つの解析方法のRayleigh波の位相速度を比較する。

### 5.1 推定可能な波長範囲の比較

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。上限値の比較を見ると、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、下松市内(KDM)のSアレーやK-NET徳山(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。

次に下限値の比較を見ると、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 5 に SPAC 法と CCA 法で推定可能であった波長範囲の上限値から下限値を差し引いた値を示す。下松市内 (KDM) の S アレー、K-NET 徳山 (TKY) の P アレーでは CCA 法で推定可能であった波長範囲が SPAC 法を大きく上回った。しかし、その他のほとんどのアレーでは、半径の大小にかかわらず、CCA 法で推定可能であった波長範囲は SPAC 法のそれと同等かそれ以下であるアレーが多かった。

このような要因の一つに SN 比の影響が考えられる。

図 6 に K-NET 徳山 (TKY)、県震度計呉市広 (KUR)、K-NET 出雲 (IZM) で得られた各アレーの SN 比の違いを示す。3 つの観測点に共通して、アレー半径が大きくなるにしたがって、相対的に SN 比が低下していることが分かる。これはその他の観測点でも同様であり、このアレー半径の拡大による SN 比の低下が、CCA 法が SPAC 法に比べ、特に半径 200m 以上のアレーにおいて、短い波長の Rayleigh 波を抽出できず、推定可能であった波長範囲が狭まった要因と考えられる。

また、図 7 に示す各観測点の S、P アレーの微動記録から得られた SN 比の比較を見ると、下松市内 (KDM) の S アレー、K-NET 徳山 (TKY) の P アレーに共通して、他の観測点のアレーに比べ SN 比が高くなっており、このことが、この 2 つのアレーにおいて、CCA 法により推定可能であった波長範囲が SPAC 法のそれを大きく上回った要因として考えられる。

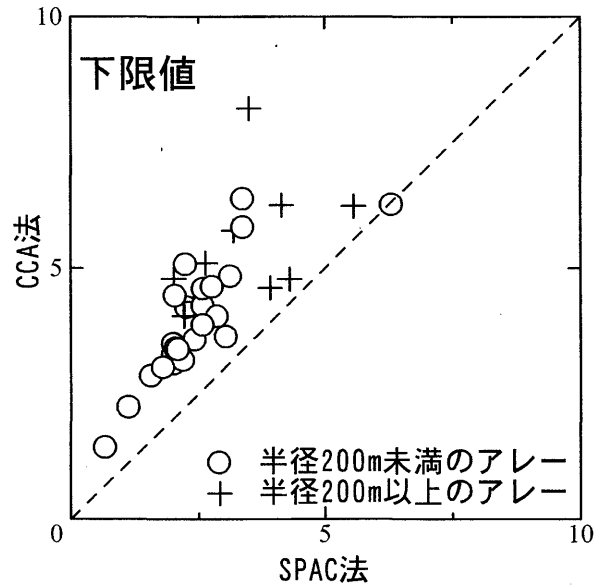
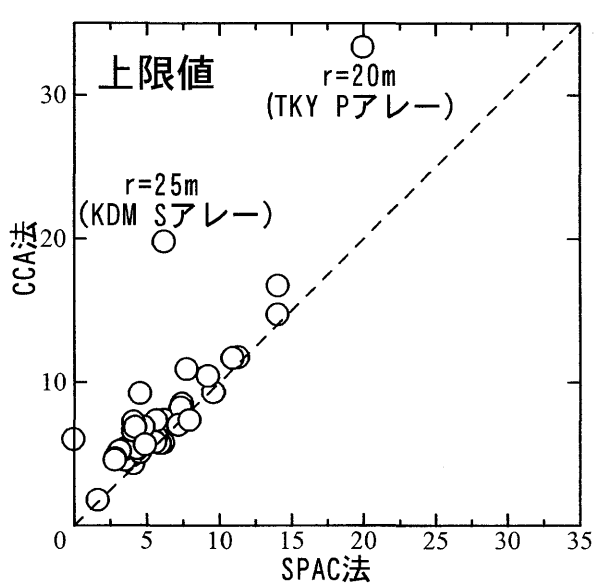


図 4 各アレーにおいて 2 つの解析方法で推定可能であった Rayleigh 波の波長範囲の上限値と下限値を各アレー半径で正規化した値の比較

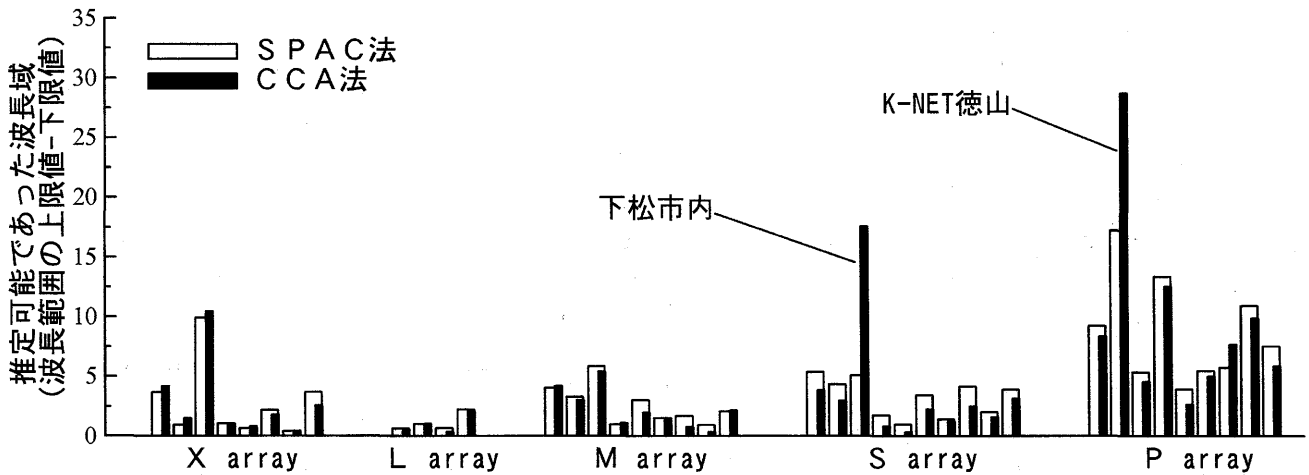


図 5 SPAC 法と CCA 法で推定可能であった Rayleigh 波の波長範囲の比較

以上より、CCA法の解析性能はSN比に大きく左右され、これが高い微動データであれば、CCA法がSPAC法を大きく上回る解析性能を発揮することが確認された。CCA法を用いて、浅部の地下構造情報を得るには、車や人の通行が遮断された閉鎖空間（グラウンドや公園など）において今回の観測で展開したものよりも小さな半径のアレーで観測を実施する、あるいは人や車の交通量の少ない深夜の時間帯に観測を実施するなど観測点付近でのノイズを減らすことによって、SN比を向上させる必要がある。

### 5.2 解析方法による Rayleigh 波の位相速度の違い

図8に2つの解析方法による Rayleigh 波の位相速度の違いを示す。図を見ると、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、前述の図6より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

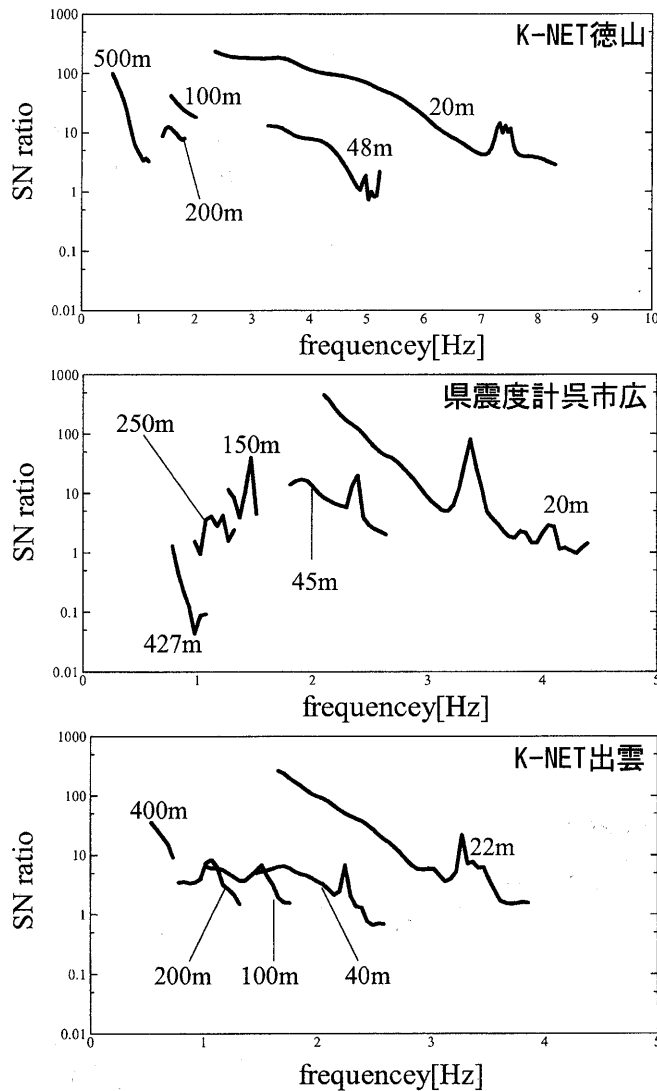


図6 観測点ごとのアレー半径の違いによるSN比の違い

法による Rayleigh 波の位相速度の違いが見られないことが確認された。

## 6 まとめ

中国地方の広島県、山口県、島根県における13カ所の地震観測点の周辺地域で微動アレー観測を行い、得られた微動記録をもとにSPAC法とCCA法を適用して Rayleigh 波位相速度を抽出し、2つの解析方法に対し2

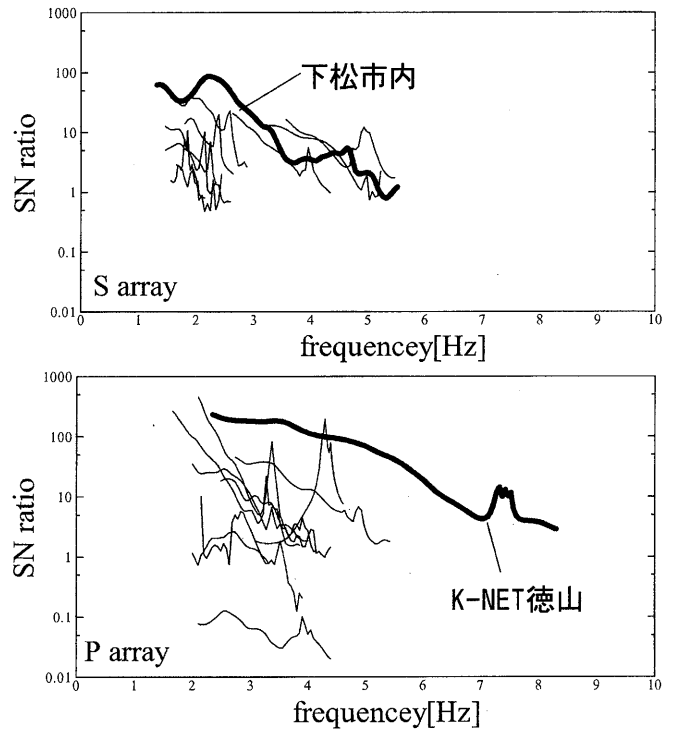


図7 各観測点のSアレー（上）とPアレー（下）の微動記録から得られたSN比の比較

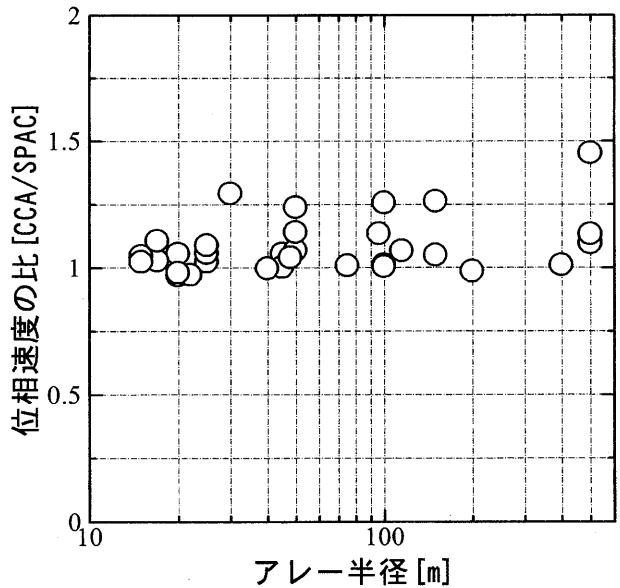


図8 2つの解析方法による Rayleigh 波位相速度の違い

種類の比較を行った。CCA 法による解析結果は、一部のアレーを除いたほとんどの観測点において、SPAC 法より長波長の Rayleigh 波を捉える事が出来ており、同一半径のアレーにおいて SPAC 法よりも深部の地下構造に関する情報を得ることが可能であることを、実測データを用いて確認した。これは微動アレー観測の効率を向上させる可能性を示唆している。しかし、CCA 法は SN 比の影響を大きく受け、SPAC 法に比べ短波長の Rayleigh 波を捉える事が出来ておらず、ほとんどのアレーにおいて、2つの解析方法で推定可能であった波長の幅の違いは見られなかった。一方、SN 比が高い観測データにおいては、CCA 法は SPAC 法より広帯域の波長を捉える事が出来ており、Rayleigh 波の位相速度の違いが見られなかったことから、SN 比が高い観測を行うことができれば、CCA 法の本来持つ解析性能を十分に発揮することが確認された。半径が比較的大きなアレーで SN 比の高い観測を行うことは難しく、現状では、CCA 法は浅部の地下構造を SPAC 法より手軽に推定できる方法であると考えられる。

#### 謝辞

微動アレー観測の際には、九州大学都市環境リスク学研究室ならびに広島大学建築防災学研究室の方々の協力を得た。さらに産業技術総合研究所の長郁夫氏には解析プログラム BIDO の提供の他、様々な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

1) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic

waves, with special reference to microtremors, Bull. E. R. I., 35, 415-456, 1957

- 2) 岡田広：長周期微動利用の地下深部構造探査法のための現場解析システムとソフトの開発研究、平成 7 年度～平成 9 年度科学研究費助成金〔基盤研究 (A)(2)〕研究成果報告書、85p.、1998
- 3) 日本地震工学会、微動利用技術研究委員会：微動の利用技術、250p.、2011
- 4) 多田卓、澤入雅弘、篠崎祐三：極小微動アレー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、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 265-266、2007
- 5) Cho, I., T. Tada, and Y. Shiozaki: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseism, GEOPHYSICS, VOL. 69, NO. 6, pp. 1535-1551, 2004
- 6) Cho, I., T. Tada, and Y. Shiozaki: Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 111, B09315, 2006
- 7) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, GEOPHYSICS, VOL. 78, NO. 1, 2013
- 8) Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki: New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2169p., 2010

(受理：平成26年5月29日)



