

大規模堆積盆地の微動アレイ探査における CCA法, nc-CCA法, V法の適用性の検討 - 大阪南部地域での探査データを用いて -

吉見 雅行¹

¹ (独) 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7)
E-mail:yoshimi.m@aist.go.jp

大阪南部地域にて実施された微動アレイ観測データをSPAC法, CCA法, nc-CCA法, V法にて解析し, 各手法の解析能の違いを調べた. 観測アレイ半径は10mから1000m程度であり, 深さ1 km内外までの堆積層のS波速度の推定を目的としたものである. 全ての半径のアレイ観測を統合したSPAC法による位相速度推定結果を真値と仮定し各手法の解析能を比較した, その結果, 半径50m程度以下のアレイ観測ではCCA法とV法の解析可能波長は4点SPAC法の2倍以上であることがわかった. 一方, 半径100m以上のアレイ観測ではCCA法, nc-CCA法, V法はSPAC法と同程度の解析能力を有することがわかった.

Key Words : Array microtremor survey, circular array, SPAC, CCA, nc-CCA, V-method, Osaka basin, dispersion curve

1. はじめに

地震動予測において対象地域のS波速度構造の解明は重要な課題である. S波構造の探査手法は, ボーリング孔を用いた検層, レシーバ関数法, S波反射法, 表面波探査, 微動アレイ探査等があるが, なかでも微動アレイ探査は最も広汎に適用されている探査手法である(例えば1),2),3).

微動アレイ探査にて地震基盤の深度が数kmに達する堆積盆地で堆積層のS波速度構造を推定する場合, 十数mから数kmの相関距離を持つアレイ観測が必要である. 解析手法としてF-K法⁴⁾を用いる場合は観測点設定の自由度が高いが, 解析結果の解釈には熟練を要する, 一方, SPAC法⁵⁾⁶⁾は頑健な解析が行えるが, 観測点を円周上の等間隔点と円の中心に設置する必要があり観測点設置の自由度が低い. SPAC法では位相速度が推定可能な表面波の波長はアレイ半径の2~5倍程度に限定される⁷⁾ため, 多数の半径のアレイ観測を実施しなくてはならないが, 観測ではノイズの大きな場所や立入り不可能な場所を避ける必要があり, 都市部のみならず郊外でも観測点の設定に困難を伴うことがある. もし, 探査精度を犠牲にせずアレイ数を削減できればSPAC法を

用いる微動アレイ探査の作業性は向上する.

さて, Choら⁸⁾によるSPAC法の一般拡張理論をうけて, CCA法^{9),10)}, nc-CCA法¹¹⁾, V法¹¹⁾等の新たな位相速度解析手法が提案されている. SPAC法では観測データから求まるSPAC係数と位相速度が第一種0次ベッセル関数で関連付けられるのに対し, CCA法, nc-CCA法, V法ではいずれも係数と位相速度は第一種0次ベッセル関数(もしくはその自乗)を第一種1次ベッセル関数の自乗で除したもので関連付けられる. SPAC法は低周波数領域で分解能が極端に低下するが, これらの手法では低周波数領域にて係数が大きく変動するためノイズフリーの状況では分解能は低下しない. 実際, CCA法は半径30cmの極小半径のアレイ観測において相関距離の500倍もの波長の表面波が解析可能であったことが報告されている¹²⁾. もし, 半径数十m以上の微動アレイでも同様な解析性能が示されるのならば, 観測アレイ数を大幅に削減できることになる. また, これらの手法はSPAC法と同様のジオメトリのアレイに適用可能であるため, 既往の観測データを再活用できることになる.

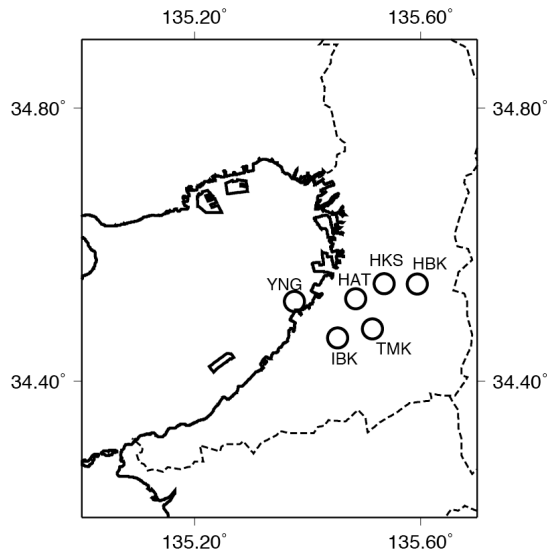


図-1 大阪南部地域微動アレイ探査地点

本稿では、基盤深度までの堆積層のS波速度構造解明を目的として大阪南部地域で実施された微動アレイ探査データ¹³⁾にSPAC法、CCA法、nc-CCA法、V法等を適用し、各手法にて解析可能な波長とアレイ半径との関係等を調べ報告する。なお、比較解析には手法開発者により公開されているソフトウェア (BIDO 2.0)¹⁴⁾を利用する。

2. 大阪南部地域における微動アレイ探査¹³⁾

(1) 微動アレイ観測の概要

大阪南部地域の6地点 (YNG: 泉大津市夕風町, HAT: 堺市中区八田荘, HKS: 堺市東区日置荘, HBK: 羽曳野市羽曳が丘, IBK: 和泉市いぶき野, TMK: 堺市南区富蔵) にて微動アレイ探査が実施された。図1に探査地点を、表1に探査諸元を示す。基本的なアレイ形状は正三角形の3頂点と重心1点からなる4点アレイであり、多くの地点にて中心点を共有する多重アレイ (二重アレイ: 7点アレイもしくは三重アレイ: 10点アレイ) が設定されている。アレイの最大半径は基盤深度が1kmを超えると想定されるHAT, HKS, HBKでは1000m程度、同様に基盤深度が1kmを超えるYNGでは設置場所の制約から最大半径766m、基盤深度の浅いIBK, TMKでは400mおよび300mとされた。連続的な位相速度分散曲線が得られるよう、これら最大半径から半径を順次0.5倍程度に減じながら、半径が10~20mになるまで複数のアレイが設定された。

観測は上下動を対象に2010年11月5日~10日および2011年5月14, 15日の昼間に行われた。2010年11月の観測ではセンサにサーボ型速度計VSE-15D1 (東京測振製, 1000V/kine) データロガーにLS-7000XT (白山工業製, 24bit, GPS時刻校正) が使用された。

表-1 大阪南部地域微動アレイ探査諸元

アレイ名	アレイ半径		観測日	測定時間 (分)	sample (Hz)
	(m)				
YNG-L1	766		2011.05.15	160	100
YNG-M	450		2011.05.15	95	100
YNG-L	750, 400		2010.11.07	125	100
YNG-S	120, 60		2010.11.07	70	200
YNG-N	30, 10		2010.11.09	35	200
	1000, 595,				
HAT-L	299		2010.11.06	69	100
HAT-M	130		2010.11.06	37	100
HAT-S	97.5		2010.11.06	50	200
HAT-N1	51		2010.11.06	44	200
HAT-N2	17		2010.11.06	34	200
	1000, 600.25				
HKS-L	1000, 600.25		2010.11.08	120	100
HKS-M	600.25, 310		2010.11.08	80	100
HKS-S	167.5, 82.5		2010.11.08	50	100
HKS-N	54, 18		2010.11.10	28	200
	300, 145.25,				
HBK-L	956		2011.05.14	150	100
HBK-M	600		2011.05.14	112	100
HBK-LM	600, 310, 120		2010.11.10	59	100
HBK-N	60, 20		2010.11.10	62	200
	400, 200, 100				
IBK-M	400, 200, 100		2010.11.09	60	100
IBK-S	93		2010.11.09	35	200
IBK-N	45, 15		2010.11.09	47	200
	300, 145.25,				
TMK-M	75		2010.11.05	91	100
TMK-N	60, 20		2010.11.05	42	200

2011年5月の観測ではセンサはVSE-15D6 (東京測振製) に変更された。サンプリング周波数は半径100m程度以下では200Hz, それ以外は100Hzであった。測定時間は半径300m以上で60分以上, それ以外では30分程度であった。

(2) SPAC法による位相速度推定結果

観測データにSPAC法を適用し位相速度を求めた。近傍を通過する交通車両ノイズなどの明らかなノイズが含まれるデータは除外した上で、可能な限り長時間のデータを解析に使用した。トレンドと高周波ノイズの除去を目的としたバンドパスフィルターを施した上で、16,384個のデータ (163.84秒もしくは81.92秒) を基本解析区間としてSPAC係数を計算し、解析に用いた全データを統計的に処理して平均的なSPAC係数を求めた。SPAC係数とベッセル関数との関係式から周波数毎の位相速度を算定した。同心多重

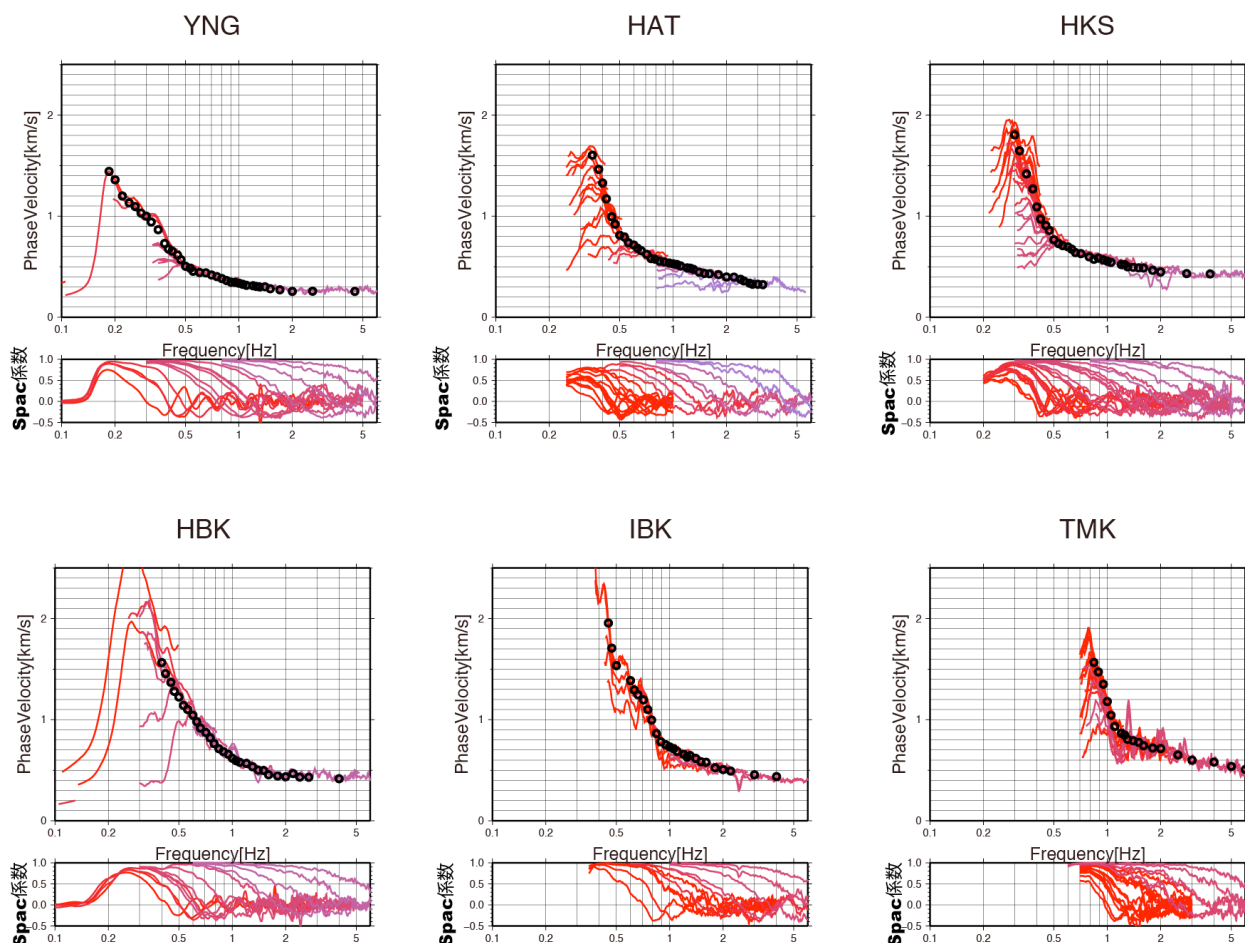


図-2 SPAC法による推定位相速度（白抜き丸），アレイ毎の位相速度算定結果（上パネルの実線）およびアレイ毎のSpac係数（下パネルの実線）．暖色系の線ほど大きなアレイ半径に対応する．

アレイの解析に際しては、相関距離の等しい観測データの組をすべて考慮した。図-2に各地点の推定位相速度、アレイ毎の位相速度算定結果およびアレイ毎の空間自己相関（SPAC）係数を示す。各アレイのSPAC係数は低周波数側でおおむね0.9以上を示しており、十分な精度の解析が行えていることがわかる。多数の相関距離（アレイ半径）での観測を統合することで、すべての地点で連続性のよい位相速度が推定された。

3. CCA法，nc-CCA法，V法による位相速度推定

(1) 解析方法

本節での解析にはBIDO 2.0ソフトウェアを用いた。ソフトウェアの仕様にに基づき、観測データを4点アレイ毎に分けて解析した。同心多重アレイを考慮した第2節の解析に比べて相関距離の組数は少なくなっている。解析に際しては観測データからのトレンド成分や交通ノイズ等の除去はソフトウェアのデフォルト機能にて行っている。基本解析区間は基本的に第2節と同じとした。

なお、4点アレイではCCA法，nc-CCA法，V法，

SPAC法のほかに、H0法，H1法などの解析も適用されるが、ここでは扱わない。

(2) 位相速度推定結果

各手法による位相速度算定結果を図-3にすべて重ねて示す。各図中には前節（図-2）のSPAC法による推定位相速度も示した。本節における解析は同心多重アレイを考慮しておらず相関距離の組が少ないにも関わらず、図-2の解析結果と遜色なく位相速度が算定できている。また、4手法ともに同様な位相速度が算定されている。

探査地点毎の結果の詳細を述べることは本題からは外れるが、HBKアレイについては1点言及しておきたい。本節におけるHBKアレイの位相速度算定結果は周波数0.5～1.0 Hzの帯域にて前節の推定位相速度から上方に、すなわち位相速度が大きい側にずれている。CCA法等だけでなくSPAC法の解析結果もずれていることから、手法の違いによるものではなく、解析コードの違いに起因する可能性がある。ただし低周波数側では両者は良い対応を示す。半径120m以下のアレイ観測に違いがあることから、探査地点の狭い範囲での地下構造の空間変化を捉えてい

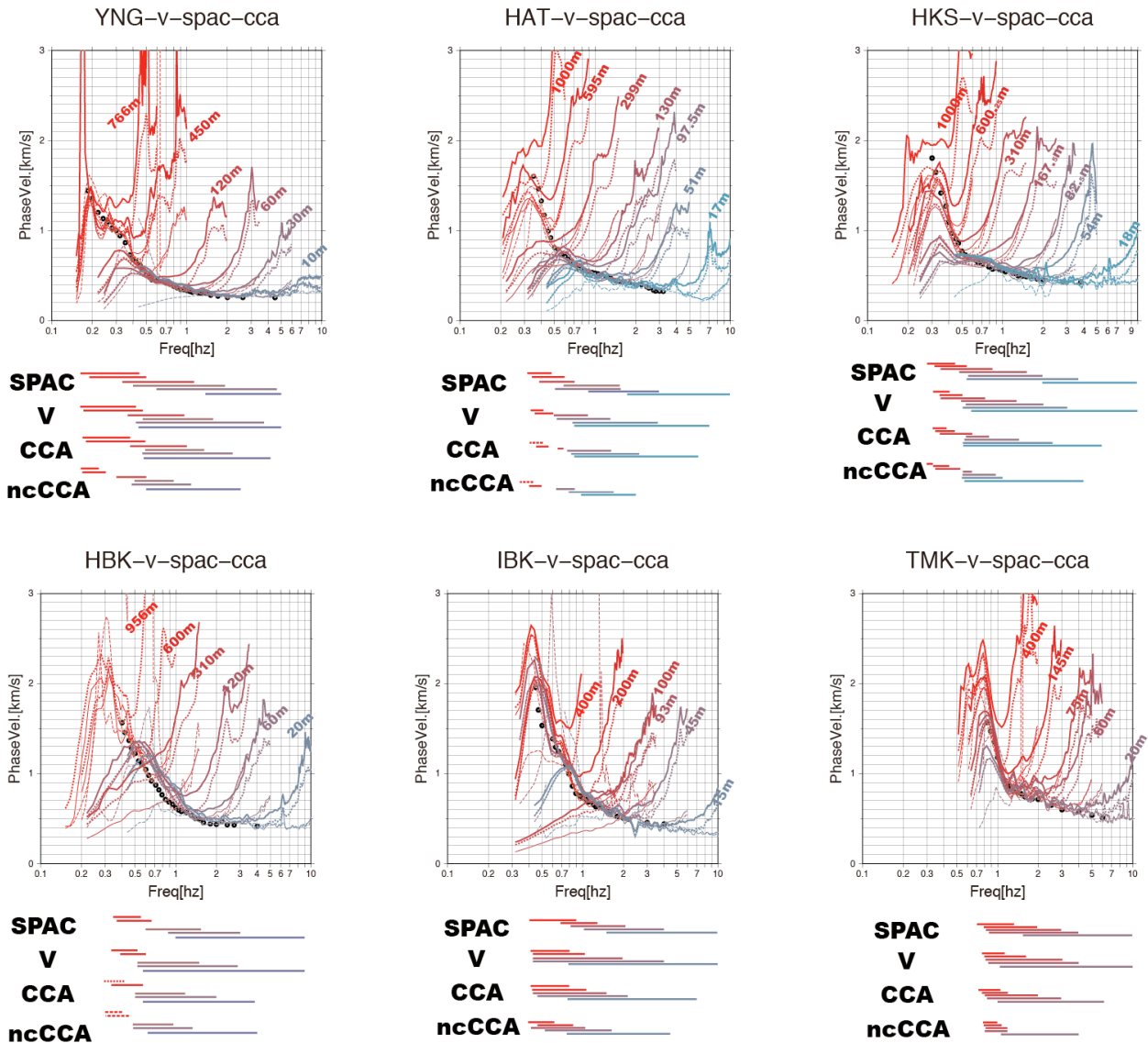


図-3 CCA 法, nc-CCA, V 法および SPAC 法による位相速度算定結果 (CCA 法: 太点線, nc-CCA 法: 太実線, V 法: 細鎖線, SPAC 法: 細実線) およびアレイ半径毎の解析可能周波数域 (各パネル下部). 白抜丸は図-2 の推定位相速度.

る可能性もある. したがって, 推定位相速度を再検討する必要があると考えられる.

次節にて各手法の位相速度推定能を比較する.

4. 各手法の位相速度推定能の比較

(1) 位相速度推定能の定義

各手法の位相速度推定能を調べるには, 位相速度の真値が必要である. しかし, いずれの探査地点においてもこの微動アレイ探査以外にS波速度を推定する探査・観測や検層は行われていないため, 位相速度の真値は不明である. そこで, ここでは全ての半径のアレイ観測データを用いたSPAC法による推定位相速度 (第2節) を暫定的に真値とみなす. なお, HBKアレイについては, 0.5-1.0 Hzの周波数帯域にて, 図-3で算定位相速度曲線が重なれば位相速度

が推定できたと考える.

このとき, 最大半径未満の半径のアレイ観測について, 真値に近い (概ね10%以内) 位相速度を推定できた周波数範囲を解析可能周波数域とする. 解析可能周波数と位相速度およびアレイ半径から解析可能な波長を求め, これを解析可能波長域とする.

(2) 各手法の位相速度推定可能範囲

図-3の各パネルの下側に各手法の位相速度の解析可能周波数域を, 図-4に波長に換算した解析可能波長域とアレイ半径との関係を示す.

まず, 解析可能周波数域 (図-3. 各パネル下部) に着目する. YNG, HAT, HKS, HBKの探査結果において, 周波数0.5 Hz付近を境に低周波側に分解能のあるアレイと高周波数側に分解能のあるアレイに分かれる. 高周波数側の分解能が高いのは半径100m程度

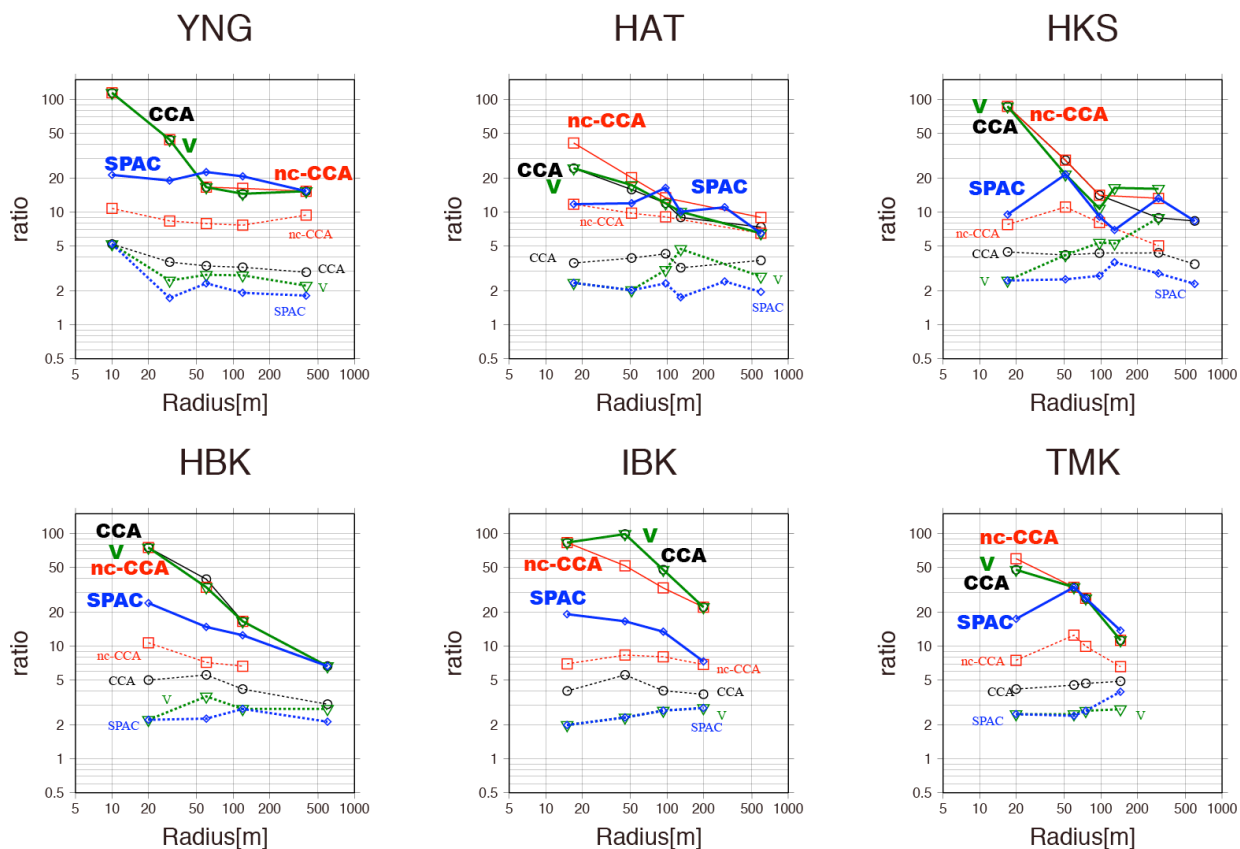


図-4 各アレイにおける CCA 法, nc-CCA 法, V 法, SPAC 法の解析可能波長域 (ratio * Radius) と観測アレイ半径との関係. 実線は解析可能波長域の上限値, 点線は解析可能波長域の下限値. 縦軸は解析可能波長域のアレイ半径比. 横軸はアレイ半径.

以下のアレイである. この周波数帯域では, SPAC法に比べて, V法およびCCA法の解析可能周波数域が顕著に低周波数側に延びている. 特に, V法の小半径アレイの解析可能周波数域が最も広い. 一方, 0.5Hzよりも低い周波数帯域に分解能があるのは半径100mを超えるアレイに限定される. この周波数帯域では4手法の解析可能周波数域に顕著な違いは見いだされない.

次に, 解析可能波長域 (図-4) に着目する. 図の縦軸は解析可能波長域のアレイ半径比である. なお, ここでのアレイ半径とは4点アレイの中心から各頂点までの距離を指す. ここでのSPAC法の解析では中心点と各頂点だけでなく, 頂点のみでもSPAC係数を求めたことに注意されたい. 解析可能波長域の下限はSPAC法とV法が最も低く, 次いでCCA法, nc-CCA法となる. 一方, 解析可能波長域の上限は, アレイ半径50m以下において, CCA法, nc-CCA法, V法はSPAC法のほぼ2倍以上となっている. 特に, アレイ半径10~20 m程度では, 半径の50倍以上もの波長まで解析できている. しかし, アレイ半径が100 mを超えると4手法の解析可能波長域の差は減少し, アレイ半径500 m付近ではほぼ同一になった.

(3) 考察

位相速度推定能は, 解析手法の特性と観測データの質 (S/N比, シグナルの強さとセンサの性能の影響が大きいと推察される) に影響される. ここで, データの質に関しては, 図-3に示されるSPAC係数が総じて0.4 Hzもしくは0.3 Hzよりも低周波数帯域で小さいことから, 観測に用いたシステムの性能が低周波数帯域で不十分であったことも考えられる. なお, 2011年5月のYNGの観測ではSPAC係数が0.2Hzでも0.8以上であるのにそれより低周波数帯域では急激に減少する. この周波数帯域の微動レベルは小さい¹⁵⁾ことが知られており, ノイズレベルの小さな広帯域地震計を用いるか, 台風などシグナルが強い時期に再測することを検討する必要があると考えられる. したがって, ここでは大半径のアレイの低周波数帯域での解析性能の差については考察を行わない.

一方, 0.5 Hzより高周波数帯域では, 手法により解析能に顕著な差がみられた. 特にV法は解析可能波長域が最も広く, CCA法, nc-CCA法と同程度の長波長解析性能とSPAC法と同程度の短波長解析性能とを併せ持つ.

したがって, アレイ観測の作業性を向上させるためには, 少なくともV法とSPAC法の使用を前提とし

たアレイ設計を行うとよい。すなわち、アレイは正三角形の頂点と重心からなる4点アレイとする。アレイ半径20 m以下では解析可能波長域は波長の30倍程度を見込めるため、一回り大きいアレイの半径を5倍から10倍にしても連続性の高い位相速度が算定できると見込まれる。

5. まとめと今後の課題

大阪南部地域にて実施された微動アレイ観測データをSPAC法, CCA法, nc-CCA法, V法にて解析し, 各手法の解析能の違いを調べた。全ての半径のアレイ観測を統合したSPAC法による位相速度推定結果を真値と仮定し各手法の解析能を比較した, その結果, 半径50 m程度以下のアレイ観測ではCCA法とV法の解析可能波長は4点SPAC法の2倍以上であることがわかった。特に半径20m以下ではV法, CCA法, nc-CCA法はアレイ半径の30倍以上の波長の位相速度を解析可能であることがわかった。一方, 半径100 m以上のアレイ観測ではCCA法, nc-CCA法, V法はSPAC法と同程度の解析能力を有することがわかった。V法とSPAC法の使用を前提とすれば, 少なくともアレイ半径100m以下のアレイは省力化できる。

今後は, 低周波数帯域すなわち大半径のアレイ観測へのCCA法, nc-CCA法, V法の適用性の検討が課題である。

謝辞: 微動アレイ探査は文部科学省委託研究「上町断層帯の重点的な調査観測」の一貫として実施されたものです。微動アレイデータの解析にはBIDO 2.0 (ダウンロード元: <http://staff.aist.go.jp/ikuo-chou>) を使用しました。

参考文献

- 1) 山中浩明, 佐藤浩章, 栗田勝実, 瀬尾和大: 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測 — 川崎市および横浜市のS波速度構造の推定 —, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.355-365, 1999.
- 2) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘淳: 常時微動アレイ観測による大阪堆積盆地深部S波速度構造のモデル化, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.31-40, 1998.
- 3) 吉見雅行, 吉田邦一, 関口春子, 堀川晴央, 竿本英貴, 松浦旅人: 微動アレイ探査で推定した大分平野

- のS波速度構造, 活断層・古地震研究報告, No. 8, pp. 295-315, 2008
- 4) Capon J.: High-Resolution Frequency-Wave number Spectrum Analysis, PROCEEDINGS OF THE IEEE., VOL.57, NO.8, pp.1408-1419, 1969.
- 5) Aki K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst.,35, pp.415-456,1957.
- 6) Okada, H.: The Microtremor Survey Method (translated by Koya Suto), Geophysical Monograph Series, No.12, Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- 7) 宮越研, 岡田広, 凌魁群: 微動探査法における推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲, 科研費報告書「地震時の地盤震動特性評価のための微動の勝つように関する研究」, pp 73-87, 1997.
- 8) Cho, I., Tada T., and Shinozaki Y.: A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, Geophys. J. Int., 165, pp. 236-258, 2006.
- 9) Cho, I., Tada T., and Shinozaki Y.: A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, Geophysics, 69, pp. 1535-1551, 2004.
- 10) Cho, I., Tada T., and Shinozaki Y.: Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, J. Geophys. Res., 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235, 2006.
- 11) Tada, T., Cho I., and Shinozaki Y.: Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, Bull. Seism. Soc. Am., 97, pp. 2080-2095, doi:10.1785/0120070058, 2007.
- 12) 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, 61, pp. 457-468, 2008.
- 13) 吉見雅行, 関口春子, 浅野公之, 堀川晴央, 岩田知孝, 木村治夫: 大阪平野南部における微動アレイ探査, 日本地球惑星科学連合2011年大会, SSS023-P26, 2011.
- 14) Tada, T., Cho I., and Shinozaki Y.: New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, TITech (http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publication/Doc/conference_7th.pdf), 2010.
- 15) Peterson J.: Observation and modeling of seismic background noise, Open-File Report 93-322, U.S. Department of Interior Geological Survey, 94 pages, 1993.

Resolution of the SPAC, CCA, nc-CCA and V-method for Microtremor Array Exploration on Deep Sedimentary Basin – Case of the Osaka Basin -

Masayuki YOSHIMI

We investigate the resolution of the phase velocity estimation methods: SPAC-, CCA-, nc-CCA-, and V-method, using data obtained with circular arrays of the vertical velocimeters deployed on the Osaka

basin. The resolution of CCA- and V-methods in terms of maximum wavelength are more than twice as that of the SPAC-method when array radius is less than 50 m. On the other hand, for the array radius larger than 100 m, four methods show similar resolution in terms of maximum wavelength.