

新潟および奥能登地域における微動アレー探査

Microtremor array surveys in the Niigata and Okunoto regions

堀川晴央¹・杉山長志²・馮少孔²・徳丸哲義³

Haruo Horikawa¹, Takeshi Sugiyama², Shaokong Feng² and Tetsuyoshi Tokumaru³

Keywords: microtremor array survey, S-wave velocity structure, Okunoto region, Niigata region

要旨

地震基盤までの S 波速度構造を推定することを目的として、新潟地域と奥能登地域のそれぞれ 2 サイトにおいて微動アレー探査を実施した。収録した微動の上下動成分からレーリー波の位相速度を求め、この位相速度が基本モードのものと仮定して、S 波速度構造を推定した。新潟地域の 2 サイトでは、地震基盤は 6km 程度、工学的基盤は 80m 前後と推定された。奥能登地域の 2 サイトでは、地震基盤は 1.2km 程度、工学的基盤は 80m 前後と推定された。

1. はじめに

被害を伴う M6-7 クラスの内陸地震は、日本海側でも発生している（例えば、宇佐美，2003）。近年では 2004 年中越地震，2007 年能登半島地震，2007 年中越沖地震といった被害地震が続発している。

今後の地震に備える上で、精度の良い地震動予測が重要であり、そのためには地震波速度構造ができるだけ詳しくわかっていることが必要である。しかし、大都市が多く存在する太平洋側に比べて、地震動予測で重要な S 波速度構造に関する情報が日本海側では不足している。そこで、地震基盤に至るまでの S 波速度構造に関する情報を得るため、第 1 図に示す新潟地域、奥能登地域の各 2 サイトにおいて微動アレー探査を実施した。本論ではその結果を報告する。

2. 観測諸元

微動のアレー観測は 2010 年 1 月に実施した。人

工ノイズを避けて良質の長時間記録を得るため夜間に観測し、8 時間以上の記録を取得できた。

地震計は Lennartz Electronic 社製 LE-3D/5S を使用し、上下動成分および水平動 2 成分（東西成分，南北成分）を観測した。微動の収録には白山工業株式会社製の LS-8000SH を用いた。本機は 16 ビット A/D 変換，GPS による時刻校正機能を有している。

地震計のアレー配置は、正三角形をなすよう円周上に 3 台置き，その円の中心に 1 台置くことを基本とした。実際には，1 回の観測において半径が異なる 4 つの同心円上に地震計を設置した。そして，円の半径（アレー半径）を変えて観測を複数回実施し，広い周波数帯域にわたって解析できるようにした。本研究で用いたアレー半径を第 1 表に示す。

3. 位相速度の推定

微動アレー観測で得られた記録のうち上下動成分を用いて，微動に含まれるレーリー波の位相速度を推定した。取得した微動記録に対して，着目している周波数によって通過帯域が異なるバンドパスフィルターを適用した上で波形を切り出し，空間自己相関法（SPAC 法）および拡張空間自己相関法（例えば，Okada，2003）を適用した。

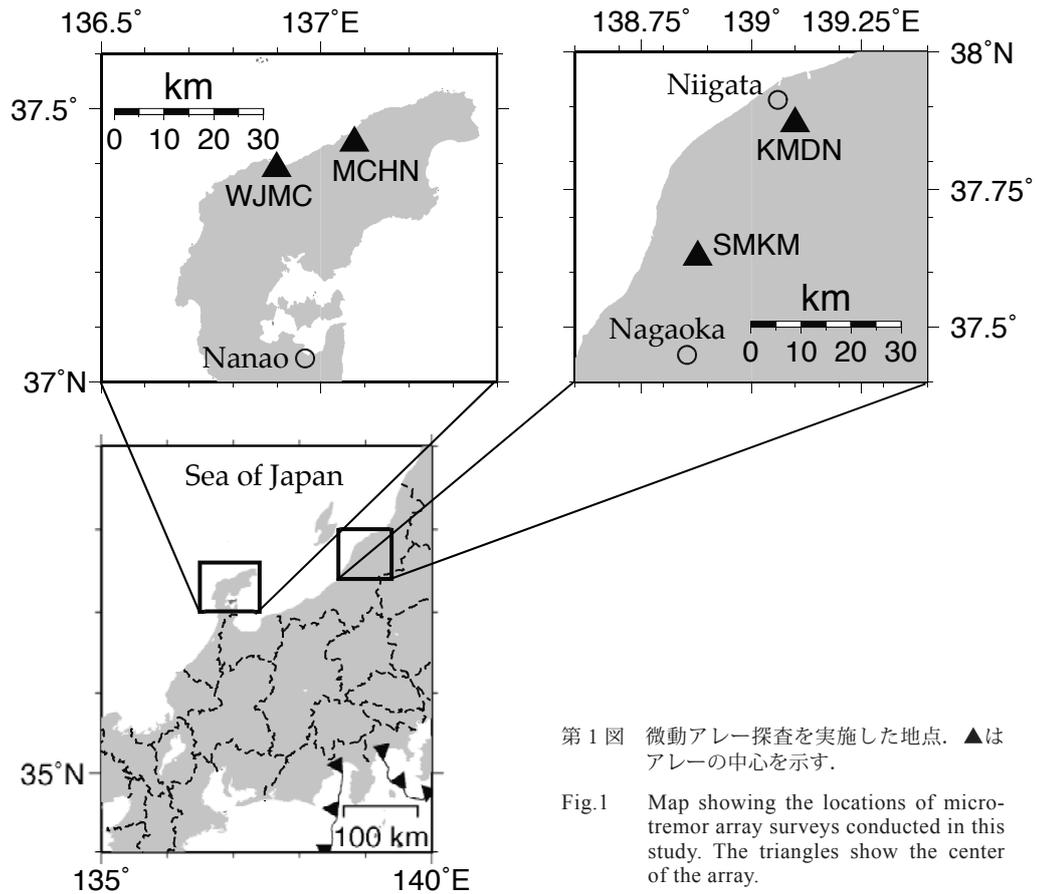
得られた位相速度の分散曲線を第 2 図に示す。新潟地域では 0.15-10Hz，奥能登地域では概ね 0.22-5.5Hz にわたる分散曲線が求められた。

新潟地域の KMDN サイトの分散曲線と SMK サイトの分散曲線は似ており，似た速度構造であることが示唆される。特に 0.3Hz 以下では位相速度はほとんど

¹産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・地震研究センター（AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center）

²中央開発株式会社（Chuo Kaihatsu Corporation）

³徳丸技術士事務所（Tokumaru Professional Engineer Office）



第 1 表 本研究で実施した微動アレー観測におけるアレー半径.

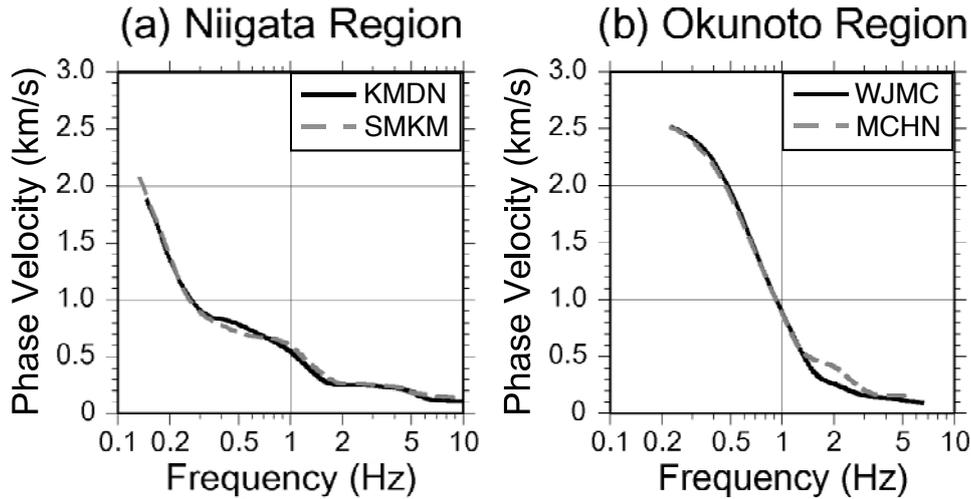
Table 1 Array radii in the microtremor array observations conducted in this study.

Site name	Array name	Array radii (m)
KMDN	L	3464.2, 2598.2, 1732.1, 866.1
	M	1732.1, 866.1, 288.7, 115.5
	S	115.5, 46.2, 23.1, 5.8
SMKM	L	3464.2, 2598.2, 1732.1, 866.1
	M	1732.1, 866.1, 288.7, 115.5
	S	115.5, 46.2, 23.1, 5.8
WJMC	L	1443.4, 894.9, 303.1, 144.3
	S	173.2, 57.7, 28.9, 14.4
MCHN	L	1443.4, 894.9, 303.1, 144.3
	S	173.2, 57.7, 28.9, 14.4

ど同じ値が得られている。奥能登地域でも同様に、2つのサイトで似た位相速度が得られている。

新潟地域で得られた分散曲線と奥能登地域で得られたものと比較すると、低周波側を中心に広い周波数帯

域にわたって、新潟地域で得られた位相速度の方が、奥能登地域で得られたものよりも低いことがわかる。



第2図 微動アレー観測で得られたレーリー波の位相速度分散曲線。(a) 新潟地域, (b) 奥能登地域。

Fig.2 Dispersion curves of Rayleigh wave derived from the microtremor array observation conducted in this study. (a) Niigata region, (b) Okunoto region.

4. S波速度構造の推定

得られた位相速度の分散曲線がレーリー波の基本モードのものに見え、また、地下構造として水平成層構造を仮定して、S波速度構造を推定した。位相速度の計算に必要なP波速度と密度はLudwig et al. (1970)によりS波速度の関数として与えた。

S波速度のほかに層厚を推定すべきモデルパラメータとしている。速度構造を構成する層数を変えて予想的に速度構造を推定し、本解析に用いる最終的な層数を決定した。具体的には、新潟地域では9層、奥能登地域では6層とした。

分散曲線からS波速度構造の推定には、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた(Yamanaka and Ishida, 1996)。競争する個体にはたらく淘汰圧により、世代を重ねるにつれて「適者生存」がはかられる生物進化を模して、最適なモデルを探索する手法がGAである(例えば、Goldberg, 1989)。本研究に即して記述すると、S波速度や層厚を変えることでいくとおりも考えられる速度構造の1つ1つが生物の個体に対応する。そして、観測から得られた位相速度と仮定した水平成層構造より計算される位相速度との差を適応度の指標として用いる。

GAによる最適モデルの探索結果は初期世代を構成する個体群によって異なることがあるため、個体群の内訳が異なる100とおりの初期世代を用いて探索することを、各サイトに対して実行した。そして、山中・石田(1995)に従い、各回で適応度が最も高い速度

構造を拾い上げ、その平均を本研究での最終解とした。

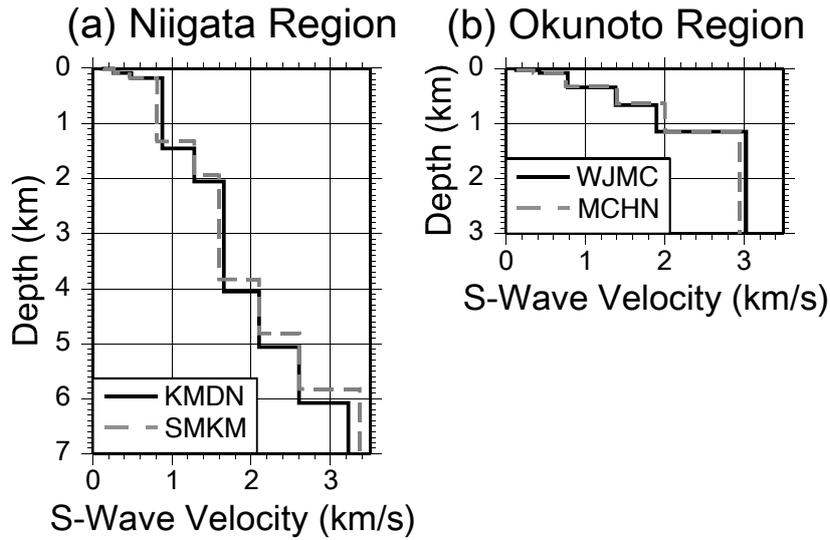
最終解のS波速度構造を第3図に示す。分散曲線の類似性から示唆されるように、新潟地域の2サイトで推定された速度構造は互いに似ている。地震基盤はいずれも6km程度であり、その深度までの堆積層の速度も0.1km/sも変わらない。工学的基盤の深さ(S波速度が0.45km/sを超える深さ)は80m(KMDNサイト)、90m(SMKMサイト)でほとんど変わらない。

奥能登地域で推定された速度構造も同様に2つのサイトでは互いに似ている。地震基盤は共に1.2km程度であり、地震基盤に至るまでの各層のS波速度も似た値をとっている。工学的基盤の深さ(S波速度が0.6km/sを超える深さ)は85m(WJMCサイト)、75m(MCHNサイト)で大きく変わらない。

観測から得られた位相速度を第3図に示す速度構造から計算される位相速度と比較したものを第4図に示す。いずれのサイトでも、観測より得られた位相速度と計算された位相速度との一致は良い。

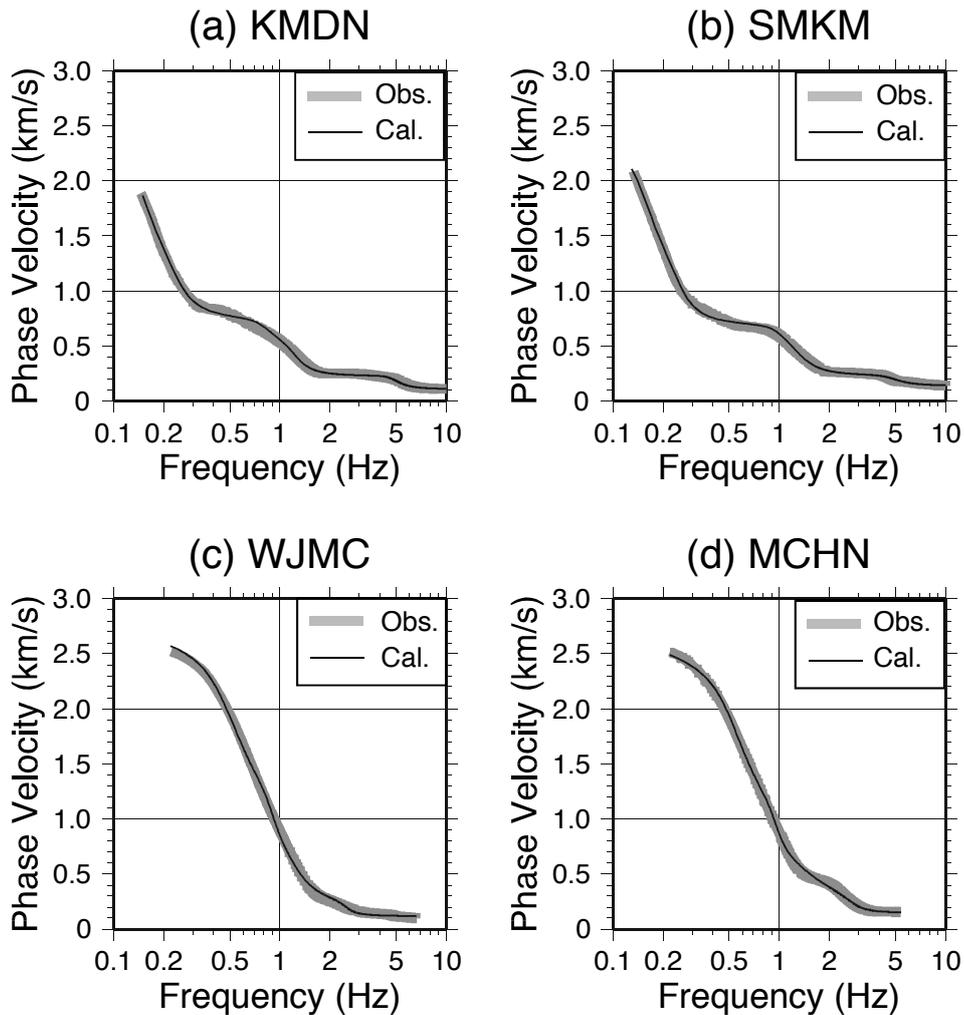
5. 今後の課題：結びにかえて

新潟地域、奥能登地域のそれぞれ2サイトで微動アレー探査を実施し、地震基盤までのS波速度構造を推定した。本研究では、通常の解析と同様に、基本モードが卓越すると仮定して速度構造を推定したが、この仮定が必ずしも成り立つわけではないことが報告されている(例えば、杉山ほか, 2006; 馮ほか, 2007)。最近、横井(2009)は複数モードの混在を許容する解析手法を提唱した。さらに、検層により速



第 3 図 第 2 図に示した位相速度から推定された S 波速度構造。(a) 新潟地域, (b) 奥能登地域。

Fig.3 S-wave velocity structures inferred from the phase velocities shown in Fig. 2. (a) Niigata region, (b) Okunoto region.



第 4 図 観測から得られた位相速度 (灰色の太線) と推定された速度構造から計算された位相速度 (黒の細線) との比較。(a) KMDN, (b) SMKM, (c) WJMC, (d) MCHN.

Fig.4 Comparison of observed phase velocities (bold gray lines) and calculated phase velocities from the velocity structures shown in Fig. 3 (thin black lines). (a) KMDN, (b) SMKM, (c) WJMC, (d) MCHN.

度構造がわかっている地域で取得した微動記録を解析し、基本モードが卓越するという仮定のもとでは誤った速度構造が得られる場合でも、自身の理論にもとづく解析では正しい構造が得られることを示した。今後、本研究で取得したデータに対しても同様の解析を行い、S波速度構造をより厳密に推定した上で、各サイトの近隣で得られた微動アレー探査結果との比較、地質構造との対比を行い、当該地域におけるS波速度構造に関する考察を進めたい。

謝辞

今回の観測と解析にあたり、輪島市総務部監理課、輪島市建設部都市整備課、輪島市教育委員会、輪島市立松陵中学校、気象庁輪島測候所、新潟市教育委員会、新潟市立亀田西小学校、燕市教育委員会、燕市立島上小学校にご尽力いただき、様々な便宜を図っていただいた。また、地元住民の方々には敷地の一部を借用させていただいた。本報告の図は Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を用いて作成した。以上記して感謝いたします。

文献

- 馮 少孔・杉山長志・堀川晴央・山中浩明 (2007) 空間自己相関法位相速度解析結果に及ぼす低周波数域高次モードの影響. 物理探査学会学術講演会講演論文集, 117, 51-54.
- Goldberg, D. E. (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. 412 pp., Addison Wesley.
- Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake, (1970) Seismic refraction. in The Sea: Ideas and observations on progress in the study of the seas. edited by A. E. Maxwell. 53-84, Wiley.
- Okada, H. (2003) The microtremor survey method. 135 pp., Society of Exploration Geophysics, Tulsa.
- 杉山長志・馮 少孔・徳丸哲義・関口春子・堀川晴央・吉田邦一・吉見雅行・国松 直 (2006) 高田平野における微動アレー探査—振幅応答を考慮するマルチモードインバージョンの適用事例—. 物理探査学会学術講演会講演論文集, 115, 31-34.
- 宇佐美龍夫 (2003) 最新版日本被害地震総覧 [416]-2001. 東京大学出版会, 605 pp.

Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. EOS Trans. AGU, 79, 579.

山中浩明・石井 寛 (1995) 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析. 日本建築学会構造系論文集, 468, 9-17.

Yamanaka, H., and H. Ishida (1996) Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 436-444.

横井俊明 (2009) 微動の相関解析により得られる表面波分散曲線の地震波干渉法理論に基づくドualモード・インバージョン. 物理探査, 62, 521-530.