

# 長野盆地における常時微動観測による S 波速度構造の推定

田守研究室 99TA335H 中島 忠大

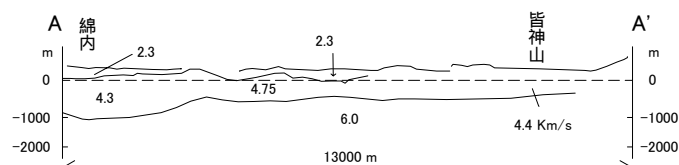
## 1. はじめに

近年、地震動の性質がごく限られた狭い範囲内においても差異が認められる場合があることが指摘され、注目されている。兵庫県南部地震の際に被害が集中した地域が発生した原因には、深部地盤構造の影響や地形効果が指摘されている<sup>1)</sup>。このようなことから、地震動を評価する際には工学的基盤よりも深い深部地下構造も含めた地域特性を十分に考慮することが重要であると考えられている。そうするためには、目的とする地域の地下構造、特に地震動予測をおこなう際に重要となってくる地盤の S 波速度構造を把握しておくことは必要不可欠である。しかし、日本のほとんどの地域では詳しい地下構造モデルが提案されていないのが現状である。長野盆地もその例外ではなく、多くの研究<sup>2)~6)</sup>がおこなわれてはいるものの、S 波速度構造については明らかになっていない。

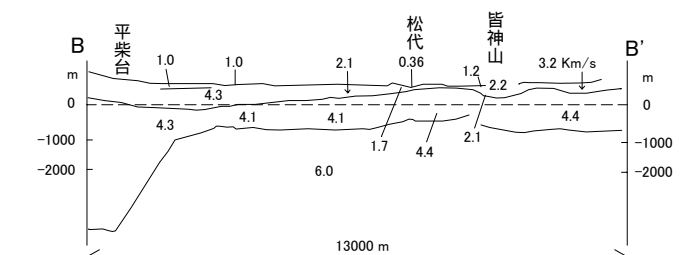
また、地下構造を知るためには、反射法探査、屈折法探査、直接ボーリングなどの方法が用いられてきたが、近年では常時微動による地下構造の推定法が多くの研究者によって提案され、利用されている。常時微動による地下構造推定法のうち、盛んに研究が進められ利用されている方法は、微動の上下動に対する水平動のスペクトル比 (H/V スペクトル比) を Rayleigh 波基本モードの H/V<sup>7)</sup>と調和させる方法<sup>8)</sup>と、アレイ観測により表面波の位相速度を推定し、その逆解析により S 波速度構造を推定する方法<sup>9)</sup>が挙げられる。H/V スペクトル比を利用する方法は観測が簡便であり、経時変化が少なく安定していること、アレイ観測による方法では S 波速度構造が直接求まるという利点がある。そのため、前者は移動観測<sup>10)</sup>などにより広範囲にわたって地下構造を捉える場合に多く用いられ、後者は局所的な S 波速度構造を明らかにする際に利用される。しかし、H/V スペクトル比のみを利用する方法では、微動の H/V スペクトル比と Rayleigh 波基本モードの H/V を調和させる際に、S 波速度構造に関する情報がほとんどない場合、うまく地下構造を推定できないことがある。また、アレイ観測により位相速度を推定する場合、理論的に水平成層構造が前提であるが、盆地などでは実際には不整形な地盤構造であることが予

想される。そのため、アレイ観測をおこなう場合、観測サイトの選定やアレイ半径を決定する際には、なるべく水平成層構造であると考えられる場所と範囲にすることが望ましい。

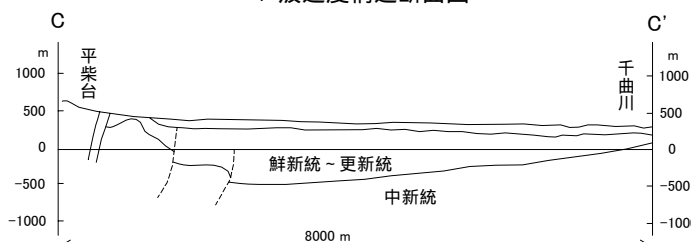
本研究では、詳しい地下構造モデルが提案されていない長野盆地において、1000m 程度の深部までを対象とした S 波速度構造を推定することを目的としている。そのための方法として、微動の H/V スペクトル比とアレイ観測による地下構造推定法を組み合わせる方法を用いるが、組み合わせ方が既往の研究<sup>11),12)</sup>と若干異なり、アレイ観測の準備段階として微動の 1 点移動観測をおこなうものとする。具体的には、まず、盆地内の広範囲にわたって常時微動の一点移動観測をおこない、H/V スペクトル比の形状から地下構造が類似している、およそ水平成層構造とみなせるような地域を明らかにする。次に、その結果によってアレイ観測をおこなう際の観測サイトや条件を決定し、微動のアレイ観測をおこなって推定した位相速度を逆解析することによって、今まで明らかになっていなかった長野盆地の S 波速度構造を推定する。



(a) 松代群発地震地域での爆破観測により得られた P 波速度構造断面図<sup>2)</sup>



(b) 長野市防災基本図地層断面図<sup>6)</sup>  
図 1 長野盆地における地下構造資料



## 2. H/V スペクトル比

2.1 1点移動観測概要 地下構造が類似して、およそ水平成層構造とみなせるような地域を明らかにするため、長野盆地内において1点移動観測をおこなった。観測測線を決定する際には、図1に示す断面図や地盤資料<sup>5),6)</sup>などからみて地震基盤が深いと思われる地域も含むようにして、安茂里から若穂(AW 測線)と豊野から篠ノ井(TS 測線)の2本設定した。観測点間隔は各測線ともに1.0Kmとし、全観測点の数は35点である。観測地点を図2に示す。観測は1999年の10月から11月にかけておこない、観測時間帯は不規則な人工振源が少なく、微動の定常性が良いとされる夜間とした。観測時間は各観測地点において1時間程度とし、A/D変換のサンプリング周波数は50Hzとした。観測には動コイル型速度計(水平動:UP-251、上下動:UP-252)と増幅器(TA-406S)を使用し、固有周期を5秒、観測特性を変位に設定し、水平動2成分と上下動1成分の同時観測をおこなった。

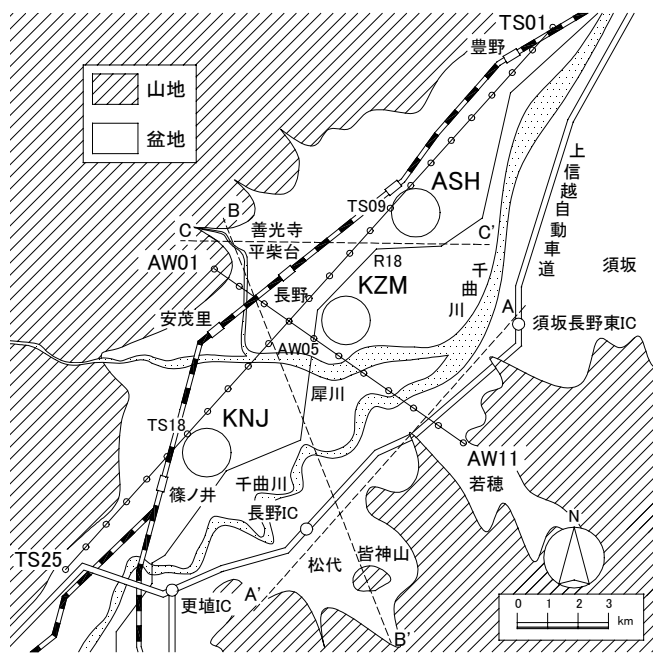


図2 観測地点

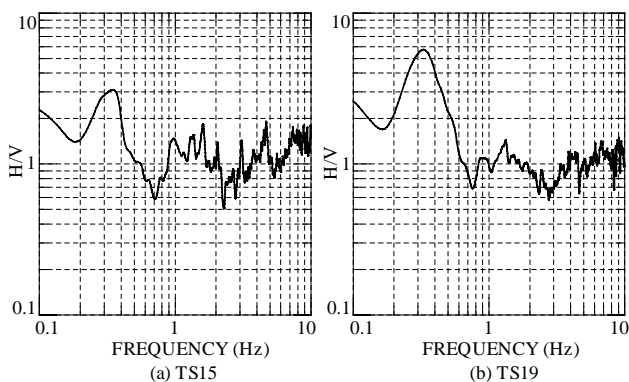


図3 微動のH/V スペクトル比

データの収録にはA/D変換機(DR-F1)を使用し、観測中はペンレコーダー(WR3701)でモニタリングした。

2.2 観測結果 観測データの処理には、観測データからノイズの影響が少なく定常性を保っていると思われる区間を1セット8192個(データ長約160sec)として10セット取り出し、FFTによって周波数領域に変換した。この10セットを平均してH/Vスペクトル比を求めた。この際、水平2成分については相乗平均して水平成分とした。なお、スペクトルの平滑化にはHanning Windowを30サイクルでかけている。

また、今回の観測結果では、観測点のS波速度構造に関する先駆的情報がないため、H/Vスペクトル比の形状のみに注目した。微動のH/Vスペクトル比の周期特性はRayleigh波基本モードのH/Vの周期特性を強く反映すると考えられている。そして、Rayleigh波のH/Vは地下構造のみに依存するものである。このことから、微動のH/Vスペクトル比の形状がほぼ同じである場合は、その場所の地下構造は類似していると考えられる。

観測結果を図3に示す。この図に示すように、H/Vスペクトル比の形状がほぼ同じである観測地点がいくつか確認された。中でも図3(a)と図3(b)に示すTS15からTS19までの区間は4.0Kmから5.0Kmの広範囲にわたっている。また、盆地中央部のAW03からAW06まで、さらにTS08、TS09などの区間も挙げられる。そのほかにも盆地端部以外の場所ではおよそ2.0Km間隔でほぼ同じ形状があらわれることがわかった。

## 3. アレイ観測

地下構造がおよそ水平成層構造であると考えられる地域において、常時微動のアレイ観測をおこなった。観測サイトは図2に示す川中島(KNJ)、風間(KZM)、朝陽(ASH)の3サイトである。今回設定したアレイの半径は25m、50m、100m、200m、300m、400m、600m、800mの計8種類である。これらを $r=50(25m, 50m)$ 、 $r=200(100m, 200m)$ 、 $r=600(300m, 600m)$ 、 $r=800(400m, 800m)$ の4つのグループに分けて観測をおこない、1回の観測につき観測点は各円周上に3点ずつと中心に1点で、合計7点の観測点を配置した。観測は2000年4月におこない、観測時間帯は不規則な人工振源が少なく、微動の定常性が良いとされる夜間とした。観測に用いた機器は東京大学地震研究所所有の3成分の過減衰・動コイル型加速度計JEP-6A3(工藤・他<sup>13)</sup>)(以降内部セン

サー) 収録装置 (DATAMARK LS-8000WD) さらには外部センサーとして1成分の過減衰・動コイル型加速度計 (V243S) である。これらの加速度計は参考文献<sup>13)</sup>により、0.1Hz から 10Hz までの周波数帯域は観測可能であることが示されている。微動観測ではこれに増幅器、ローパスフィルタを加えている。増幅器の倍率は 500~1000 倍で、内部センサーでは 10Hz、外部センサーでは 5Hz のローパスフィルタを通してている。観測成分は上下動 2 成分と水平動 1 成分で、上下動 2 成分のうち 1 成分は外部センサーによって観測されたものである。観測時間は各観測サイトともに  $r=50$  では 45 分、 $r=200$  と  $r=600$  では 60 分、 $r=800$  では 90 分間とし、A/D 変換のサンプリング周波数は 50Hz で収録した。なお、アレイ観測データの同時性は GPS 信号による内蔵時計校正をおこなって確保した。どの観測点においても GPS 信号の受信状態には問題はなく、良好であった。

#### 4. 位相速度の推定

4.1 解析概要 アレイ観測から表面波の位相速度を推定する解析法には周波数-波数法 (F-K 法<sup>15)</sup>) と空間自己相関法 (SPAC 法<sup>16)</sup>) があるが、今回はその 2 つの方法により解析をおこなった。解析に用いたデータは上下動成分のみで、 $r=50$  は内部センサー、 $r=200$ 、 $r=600$ 、 $r=800$  は外部センサーの記録を用いた。いずれの記録も 0.1Hz から 10Hz のバンドパスフィルタをかけて積分を施し速度に変換した。このデータから各グループで微動の定常性が保たれている区間を 1 セット 8192 個 (約 160se) で 20 から 30 セット取り出し、解析に用いた。

4.2 解析結果 F-K 法、SPAC 法により推定された位相速度を図 4 に示す。このように、KNJ、KZM、ASH とともに F-K 法による結果と SPAC 法による結果はほとんど同じであった。これは既往の研究結果<sup>8)</sup>と一致する。また、どちらの方法でも 0.5Hz から 4.5Hz までの周波数帯のうち、ほとんどの周波数に対して位相速度を推定することができた。このこ

とから、効率よくアレイ観測がおこなえたと言える。

#### 5. 位相速度の逆解析

F-K 法、SPAC 法により推定された位相速度はほとんど同じであったため、逆解析には F-K 法による結果を用いた。逆解析には遺伝的アルゴリズム (GA) による方法<sup>17)</sup>を用いた。適応度の評価には計算される Rayleigh 波の位相速度と観測から求めた位相速度の誤差の 2 乗平均値を用いた。Rayleigh 波の位相速度を計算する際、地盤の P 波速度、S 波速度、層厚、密度の情報が必要であるが、これらの中で位相速度に対しての影響が大きい S 波速度と層厚を変数とし、P 波速度は孤崎らの式<sup>18)</sup>によって S 波速度と連動させ、密度は一定とした。変数はそれぞれ 64 で離散化し、6bit からなる 2 進数に変換して GA による逆解析をおこなった。長野盆地の代表的な層分けと S 波速度と層厚に関する探索範囲と密度を表 1 に示す。地下構造の層分けには地盤資料<sup>5),6)</sup>から判断して 5 層構造を仮定した。初期世代の個体数は 50 個とし、世代交代は 100 回繰り返した。これを乱数の初期値を変えて 10 回の試行をおこない、その平均を逆解析結果とした。これにより求められた Rayleigh 波の理論分散曲線とアレイ観測から求めた位相速度の比較を図 5 に、その S 波速度構造を表 2 に示す。観測された位相速度と逆解析による Rayleigh 波の理論分散曲線はほぼ一致している。また、図 1(a)A-A'断面から見て取れるように、長野盆地では地震基盤と考えられる深い層は A' A の方向で A' 地点付近からしばらくほぼ一定の深度が続き、A 地点付近で深度

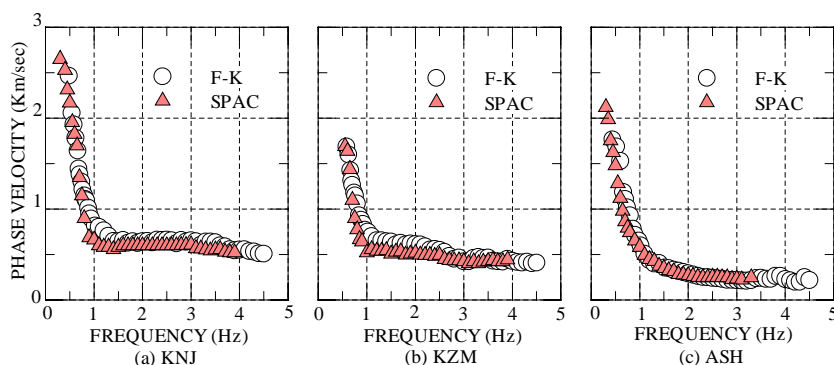


図 4 F-K 法と SPAC 法で求めた位相速度の比較

表 1 文献による層構造と逆解析の探索範囲

	文献による層構造		逆解析の探索範囲		
	地質年代 (万年前)	層名	S波速度 (m/s)	層厚 (m)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
第1層	完新世・後期更新世 (現代)	完新統・上部更新統	100 ~ 400	10 ~ 50	1.8
第2層	中期更新世 (20 ~ 35)	南郷層	200 ~ 800	20 ~ 100	2.0
第3層	前期更新世 (80 ~ 115)	豊野層	500 ~ 1500	200 ~ 700	2.1
第4層	鮮新世 (160 ~ 330)	猿丸層	800 ~ 3000	400 ~ 1000	2.3
第5層	中新世 (500 ~ 650)	小川層 (西部)・別所層 (東部)	2000 ~ 4500		2.5

が増している。この傾向は観測によって得られた地震基盤と考えられる層の深さにも現れており、既往の研究<sup>2)</sup>との対応も良いと言える。

また、図6に示すように、求められたS波速度構造からHaskellの理論<sup>7)</sup>によって計算されるRayleigh波のH/Vは、アレイ観測に先立っておこなった移動観測による常時微動のH/Vスペクトル比とも非常によく対応しており、推定したS波速度構造は妥当であると言える。

## 6. まとめ

本研究では、詳しい地下構造モデルが提案されていない長野盆地において、1000m程度の深部までを対象としたS波速度構造を推定した。その手法として、微動のH/Vスペクトル比とアレイ観測による地下構造推定法を組み合わせる方法を用いた。

この方法は、1)盆地内の広範囲にわたって常時微動の一点移動観測をおこない、H/Vスペクトル比の形状から地下構造が類似していて、およそ水平成層構造とみなせるような地域を明らかにする。2)その結果によってアレイ観測をおこなう際の

観測サイトや条件を決定し、微動のアレイ観測をおこなって推定した位相速度を逆解析することによってS波速度構造を推定する、というものである。

この方法は、地下構造が明らかになっていない地域において常時微動のアレイ観測により表面波の位相速度を推定し、その逆解析によりS波速度構造を推定する方法を利用する場合、効率よくアレイ観測をおこなうために有効であり、その結果の信頼性も増すものと考えられる。

### 参考文献

- 川瀬博、林康裕：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.480，pp.67-76，1996。
- Shuzo ASANO, Susumu KUBOTA, Hiroshi OKADA, Mitsuo NOGOSHI, Hiroyoshi SUZUKI, ICHIKAWA Kanenori, and Hideo WATANABE: Underground Structure in the Matushiro Earthquake Swarm Area as derived from Explosion Seismic Data, Geo. Serv. Jap. Spec. Report, 5, 1969.
- 服部秀人、国井隆弘、島垣：長野盆地における地震時の振動特性，土木学会第47回年次学術講演会，pp.792-793，平成4年9月。
- 金井清、平能金太郎、吉沢静代、浅田鉄太郎：松代地域における強震計観測結果 第1報，東京大学地震研究所 松代地震の研究(2)(地震研究所集報 第44号)，pp.1269-1296, 1966。
- 長野県建築士会：長野市地盤図，長野県建築士会，1973。
- 長野市防災会議専門委員会：長野市防災基本図，長野市，1988。

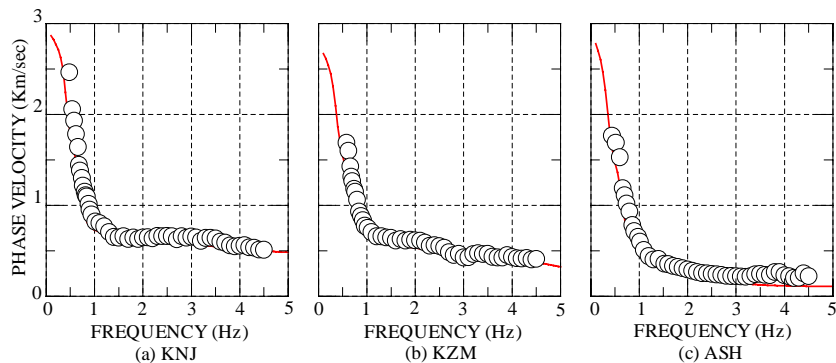


図5 逆解析により求めたRayleigh波の理論分散曲線とアレイ観測から求めた位相速度の比較

表2 逆解析によるS波速度構造

	KNJ		KZM		ASH	
	Vs(m/s)	深さ(m)	Vs(m/s)	深さ(m)	Vs(m/s)	深さ(m)
第1層	292	18	227	21	109	16
第2層	538	77	478	91	238	63
第3層	750	503	656	369	719	520
第4層	2450	960	1247	909	1694	1401
第5層	3211		3016		3172	

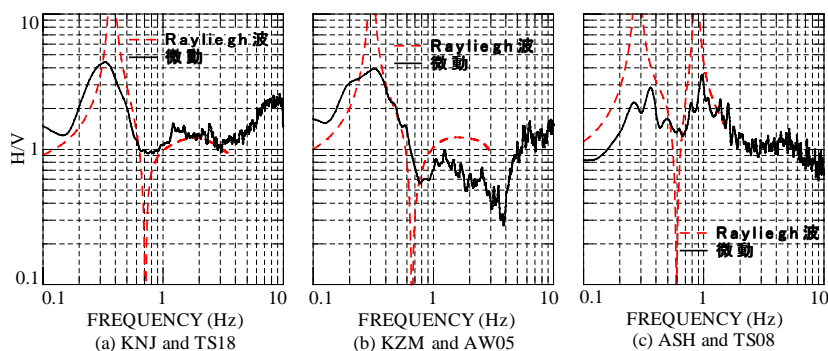


図6 Rayleigh波のH/Vと微動のH/Vの比較

- Haskell, N.A., The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 時松孝次、宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文集，第439号，pp.81-87, 1992。
- 岡田廣、松島健、森谷武男、笹谷努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，第43巻，第6号，pp.402-417, 1990。
- 時松孝次、岩田暁洋：1点移動観測に基づく釧路市での2次元S波速度構造の推定，第32回地盤工学研究発表会(熊本)，pp.843-844, 平成9年7月。
- 赤松純平、盛川仁、西村敬一、尾上謙介、蔣榮群、羅奇峰、中村正夫、李康龍：脈動から推定された中国雲南省麗江盆地の地下構造 - 1996年麗江地震(M7.0)による被害の分布との関係 - ，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.891-896, 1998。
- 時松孝次、新井洋、浅香美治：微動から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性，日本建築学会構造系論文集，第491号，pp.37-45，1997年1月。
- 工藤一嘉、高橋正義、坂上実、神野達夫、鹿熊英昭、坪井大輔：機動強震観測のための動コイル型加速度計の開発と性能試験，機動強震アレイ観測のための軽量小型強震計の製作と観測・解析マニュアルの作成，科学研究費補助金(基盤研究(A))研究成果報告書(07558056) pp.1-24，1998。
- 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
- Capon, J., High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis., Proc. IEEE, 57, pp.1408-1418, 1969.
- AKI, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors., Bull. Earthq. res. Inst., 35, pp.415-456, 1957.
- 山中浩明、石田寛：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，第468号，pp.9-17, 1995。
- 孤崎長、後藤典俊、小林芳正、井川猛、塚家正則、斎藤徳美、黒田徹、山根一修、奥住宏一：地震動予測のための深層地盤P・S波速度構造の推定，自然災害科学，9-3, pp.1-17, 1990。