

常時微動観測による S 波速度構造の精度に関する検討  
長野盆地におけるアンケート震度による評価

The examination into the accuracy of the S-wave velocity structure by microtremors observation  
-The estimation of questionnaire seismic intensity on Nagano basin-

田守 伸一郎 \*

*Shin'ichiro TAMORI*

In this research, the S-wave velocity structure model presumed by microtremors observation considers whether it is what has high accuracy in the Nagano basin where detailed underground structure isn't proposed, using the S-wave velocity structure model, the seismic wave observed in the past and questionnaire seismic intensity investigated by Japan Meteorological Agency. Consequently, it can be said that the accuracy of the S-wave velocity structure model presumed by **microtremors** observation in the Nagano basin is high.

*Keywords: Microtremors, S-wave velocity structure, Nagano basin, Questionnaire seismic intensity, Earthquake response*

常時微動 S 波速度構造 長野盆地 アンケート震度 地震応答

## 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、工学的基盤よりも深い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、特に地震動予測を行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。長野盆地を例にあげると、Asano ら<sup>2)</sup>によって松代群発地震地域における爆破観測による P 波速度構造が提案されている。また服部・島ら<sup>3)</sup>によって東京湾の地震と東海道はるか沖の地震記録から、地震時の長野盆地における強震観測点の地動の方向性を調べた研究や、松代群発地

震に関する多くの研究(たとえば金井・他<sup>4)</sup>)がおこなわれている。その他にも、長野市地盤図<sup>5)</sup>や長野市防災基本図<sup>6)</sup>によって地質や地形が明らかになっている。このように多くの研究がおこなわれてはいるものの、長野盆地における 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、近年では常時微動観測による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。

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、常時微動観測により推定された深部約 1000m までの S 波速度構造モデルが精度の高いものであるかどうかを検討する。

## 2. 概要

検討する方法としては、まず過去に起こった地震の観測波を利用し、推定された S 波速度構造モデルにおいて地震応答解析をおこない、盆地内各地における地表面の

\* 信州大学工学部 助教授 工学博士

地震応答加速度を求め、その応答波形を用い各メッシュにおける震度を計算する。また、気象庁松代地震観測所では長野県、長野市の震度特性を明らかにするためにアンケート方式により震度（以降アンケート震度）を調査しており、その震度と先に計算した震度とを比較検討し、推定されたS波速度構造モデルが精度の高いものかどうかを、評価しようというものである。

### 3. 解析に用いた地震記録

解析する地震はここ 10 年間で起こり、長野県内で震度 3 以上を観測したものである。起こった地震の発生日や震源地、地震を観測した場所の一覧を表 1 に示す。観測した地震は 6 種類であるが、観測した場所が複数点ある地震もあり、表 1 のように解析ケースは No. 1 ~ 10 の 10 ケースある。

長野市役所で観測された地震波形は科学技術庁防災科学技術研究所による強震ネットワーク（K - NET）<sup>7)</sup> の観測地点 NGN004 における観測データである。また松代地震観測所で観測された地震波形については、観測所の立地している場所が地震基盤の露出している場所にあることから、観測された波形は地震基盤上での波形とする。

### 4. 長野盆地の S 波速度構造モデル

今回検討する常時微動観測により推定された S 波速度構造モデルは田守伸一郎・中島忠大による『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』<sup>8)</sup> に示されている方法で推定されたもので、検討されている場所は安茂里から若穂の AW 測線（aw02 ~ aw 10）と豊野から篠ノ井の TS 測線（ts02 ~ ts26）及びその他の長野盆地各所（ngn01 ~ ngn42）とし、メッシュ間隔は 2.0km で、観測地点数は 54 地点である。図 1 に観測地点を示す。S 波速度構造を同定した場所は ○ で、今回 S 波速度構造モデルの精度について検討できた場所は ● である。

地震を観測した場所における深度約 1000m までの S 波速度構造モデルは以下のように推定した。まずボーリングデータのある浅部では、長

野市役所においては、K - NET<sup>7)</sup> の観測地点 NGN004 に掲載されている S 波速度構造のデータを用い、信大工学部、市立博物館においては、『長野市地盤図』<sup>5)</sup> より得

表 1 解析に使用した地震観測波の種類一覧

No.	地震発生日	震源地	地震を観測した場所
1	1999年1月28日	長野県中部	長野市役所
			信大工学部
			市立博物館
2	1998年7月1日	長野県北部	長野市役所
			信大工学部
			市立博物館
3	1998年2月21日	新潟県中越	長野市役所
4	1997年3月19日	長野県北部	長野市役所
5	1997年3月16日	愛知県東部	松代地震観測所
6	1993年2月7日	能登半島沖	松代地震観測所

表 2 フィルター処理の詳細

周期の効果を表す	$(1/f)^{1/2}$
ハイカット	$(1 + 0.694y^2 + 0.241y^4 + 0.0557y^6 + 0.009664y^8 + 0.00134y^{10} + 0.000155y^{12})^{-1/2}$
ローカット	$(1 - \exp(-(2 \times f)^3))^{1/2}$

(注)  $f$  は地震動の周波数（単位は、Hz）  
 $y$  は、 $f$  に 10 分の 1 を乗じた値

- S 波速度構造を同定した場所
- S 波速度構造を同定しアンケート震度と比較できた場所

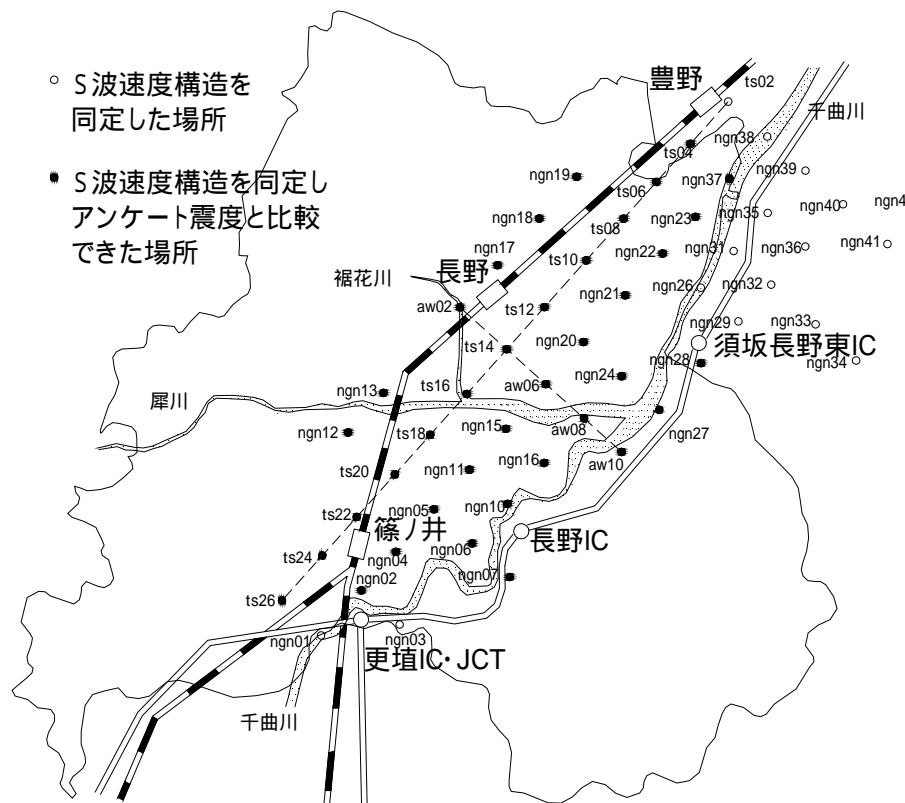


図 1 地盤モデルを推定した地点

たボーリングデータをもとに太田裕・後藤典敏両氏による実験式<sup>9)</sup>からS波速度構造を求める。またボーリングデータの無い深部については最寄りの常時微動観測地の地盤と同じ構造として推定した。

### 5. 1次元波動伝播モデルによる地震応答解析

各観測地点（各常時微動観測点と各地震観測点）の地表面と地震基盤との間の伝達関数を Haskell の理論<sup>10)</sup>によりマトリクスを用いて、推定された多層構造であるS波速度構造モデルのSH波について計算する。伝達関数を計算する際には、入射角を震源地と地震観測地との位置によって考慮する。震源地が観測地から遠いと入射角は大きくなり、各メッシュで真上に伝播する速度は遅くなる。逆に近いと入射角が小さくなり、各メッシュで真上に伝播する速度は速くなる。すなわち、同じ観測点でも解析する地震が違えば、多少伝達関数も変化してくる。震源までの距離が遠いと伝播する速度が遅くなるので、増幅率は全体的に小さくなる。

次に、観測した地震波を観測地点において計算した伝達関数によって地震基盤まで逆増幅させ、地震が地表面に伝わってくる前の地震基盤における波形を計算する。ただし、松代地震観測所では地震基盤上で観測されたものであるから、逆増幅させないで観測されたものが地震基盤における波形とする。次に求めた地震基盤での波形を長野盆地のS波速度構造モデルを推定した全ての各地点において、さきに計算した伝達関数を用い地表面まで増幅させる。このように各解析ケースの地震時の長野盆地における各地点での地表面の時刻歴応答加速度を求める。

### 6. 各メッシュにおける震度

各解析ケースで求めた地表面の時刻歴応答加速度の水平動2成分を用いて、各観測点メッシュの震度を計算する。求め方は気象庁が1996年に定めた方法で以下のとおりである。

地震応答解析で得られた水平動2成分それぞれの応答加速度波形にフーリエ変換、フィルター処理、逆フーリエ変換をおこなう。フィルター処理の詳細は表2に示す。このような処理をほどこした加速度波形をベクトル合成する。合成されたベクトル波形の絶対値がある値 $a$ 以上となる時間の合計を計算したとき、この合計時間が0.3秒となるように $a$ を求める。この $a$ から、式(1)より計測震度 $I$ を計算する。

$$I = 2 \log a + 0.94 \quad \text{----- 式(1)}$$

### 7. 気象庁によるアンケート震度との比較検討

アンケート震度とは、気象庁松代地震観測所がおこなっている長野県内及び長野市内の震度特性を把握するための調査によるものであり、長野県各市町村の協力を得て、アンケート方式により震度を求めているものである。原則として県内で震度3以上の地震を観測した場合、実施される。この調査は1984年以降おこなわれており、1999年までに計14回実施されている<sup>11)</sup>。

前節で求めた各メッシュでの震度とそれに対応している場所でのアンケート震度とを比較する。比較し、評価する方法として各メッシュでの誤差値：を求め、誤差値の標準偏差と誤差値の絶対値の最大値、平均値を用いる。誤差値は式(2)によって求める。

$$= \frac{I_k - I_a}{I_k} \quad \text{----- 式(2)}$$

$I_k$  : 計算した震度

$I_a$  : アンケート震度

表1のNo. , の解析ケースでアンケート震度と計算した震度を比較できた各観測点について、計算した震度とアンケート震度、誤差値を表3, 4にそれぞれ示す。観測地名の欄に記載されている名前は図1に示されている名前と一致している。No. の解析ケースの場合、アンケート震度と計算した震度とを比較できた場所は表3に示すように24ヶ所である。震度を比較した時の誤差はほとんど無く、計算した震度とアンケート震度の差は最大でも0.6となり、誤差値は80%以上が0.2以下となった。No. の解析ケースについては比較できた場所は表4に示すように25ヶ所である。このケースにおいても誤差値は小さくなり、84%が0.2以下であり、計算した震度とアンケート震度は良く対応している。

計算した震度はどの解析ケースでも、千曲川流域周辺のngn07, ngn22や裾花川が昔流れていたts12で大きくなった。これには川沿いにおいて軟弱な地盤の層が厚いことが考えられる。

解析した10ケースそれぞれの地震において計算した誤差値の絶対値の平均値、最大値と誤差値の標準偏差とを比較した結果を表5に示す。10ケースのうち平均値、最大値、標準偏差のいずれも最大となったNo. の解析ケースだが、ここで用いた地震の長野盆地でのゆれは小さかったため、誤差値が大きくなり、そのため誤差値の標準偏差や、誤差値の絶対値の平均値、最大値が大きくなったと考えられる。また、No. についても長野盆

地においては震度が小さかったため同様のことが言える。No. ~ は3つとも1999年1月28日に長野県中部で起きた同じ地震であり、この3つの地震においては誤差値の標準偏差や誤差値の絶対値の平均値、最大値、がそれぞれ小さな値を示し、計算した震度とアンケート震度とは非常に良く対応していると言える。その他の解析ケースについても誤差値やその標準偏差、誤差値の絶対値の平均値、最大値を見ると計算した震度とアンケート震度とは良い対応がとれていると言える。つまり、長野盆地において、常時微動観測により推定されたS波速度構造モデルは、精度の高いものであると言える。

### 8. 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、常時微動観測により推定された深部1000m程度までのS波速度構造が精度の高いものであるかどうかを検討した。その手法としては、常時微動観測によって推定された地盤モデルと過去に観測した地震波を使った、1次元波動伝播モデルによる地震応答解析をおこない地表面の応答加速度を求め、応答加速度を用い、実際に起こった地震の震度を長野盆地各所において計算した。次に計算し求めた震度と、気象庁松代地震観測所がおこなっている調査で、震度特性を明らかにするためのアンケート震度とを比較するというものであった。

震度を計算してアンケート震度とを比較するといった一側面からの検討をおこなった結果、長野盆地において常時微動観測によって推定された1000m程度の深部までのS波速度構造モデルは精度の高いものであるといえる。

#### 【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 服部秀人、国井隆弘、島坦：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
- 4) 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)(地震研究所彙報 第44号), pp.1269-1296, 1966

- 5) 長野県建築士会：長野市地盤図, 1973.
- 6) 長野市防災会議専門委員会：長野市防災基本図, 長野市, 1988
- 7) <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 8) 中島忠大、田守伸一郎：長野盆地における常時微動によるS波速度構造の推定、構造工学論文集, Vol.47B, pp.419-426, 2001.
- 9) 太田裕、後藤典俊：S波速度を他の土質の諸指標から推定する試み、物理探鉱, 第29巻, 第4号, pp.251-261, 1976.
- 10) Haskell, N. A. : The Dispersion of Surface Waves on Multi-layered Media, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 11) 涌井仙一郎、他：アンケート方式による長野県と長野市内の震度調査、気象庁精密地震観測室技術報告, 第6.12-17巻.

表3 No. の比較結果

観測地名	lk	la		観測地名	lk	la	
aw02	2.2	1.9	0.136	ngn21	2.0	1.8	0.100
aw06	2.1	1.7	0.190	ngn22	2.2	1.9	0.136
ngn02	2.0	2.1	-0.050	ngn24	2.2	1.6	0.273
ngn04	1.9	1.9	0.000	ts06	1.8	1.9	-0.056
ngn07	2.4	2.3	0.042	ts08	2.1	1.9	0.095
ngn11	1.9	2.0	-0.053	ts10	2.0	1.8	0.100
ngn13	1.7	1.7	0.000	ts12	2.5	1.9	0.240
ngn15	2.2	2.0	0.091	ts14	2.0	1.7	0.150
ngn16	2.0	2.0	0.000	ts18	1.8	2.0	-0.111
ngn17	2.0	2.0	0.000	ts20	2.2	1.6	0.273
ngn18	2.4	1.9	0.208	ts22	1.8	2.0	-0.111
ngn19	2.2	1.9	0.136	ts24	2.2	2.1	0.045

表4 No. の比較結果

観測地名	lk	la		観測地名	lk	la	
aw02	2.1	1.8	0.143	ngn19	2.6	2.2	0.154
aw06	2.6	2.3	0.115	ngn20	2.6	2.2	0.154
aw10	2.5	2.1	0.160	ngn22	2.6	1.8	0.308
ngn02	2.6	2.5	0.038	ngn28	2.4	2.2	0.083
ngn06	2.3	2.0	0.130	ts06	2.4	2.3	0.042
ngn07	2.6	1.8	0.308	ts08	2.8	2.3	0.179
ngn10	2.6	2.3	0.115	ts10	2.5	2.2	0.120
ngn11	2.3	2.0	0.130	ts12	2.8	2.1	0.250
ngn12	2.6	2.2	0.154	ts14	2.6	2.2	0.154
ngn13	2.3	2.3	0.000	ts16	2.4	2.8	-0.167
ngn15	2.3	2.0	0.130	ts18	2.3	2.4	-0.043
ngn17	2.4	2.1	0.125	ts24	2.8	1.9	0.321
ngn18	2.6	2.3	0.115				

表5 震度比較結果

No.	の平均値	の最大値	の標準偏差
	0.108	0.273	0.114
	0.152	0.333	0.089
	0.200	0.333	0.094
	0.232	0.419	0.107
	0.350	0.471	0.078
	0.146	0.321	0.107
	0.505	0.905	0.394
	0.289	0.519	0.280
	0.218	0.692	0.295
	0.114	0.368	0.129