

# 横浜市高密度強震ネットワーク観測点における 微動を用いた地盤の平均S波速度の推定

紺野 克昭<sup>1</sup>・鈴木 貴博<sup>2</sup>・鎌田 泰広<sup>3</sup>・長尾 毅<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (〒135-8548 江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: konno@sic.shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup>(株) アレックス (〒101-0032 東京都千代田区岩本町2-6-10)

<sup>3</sup>川崎市 (〒210-8577 川崎市川崎区宮本町1)

<sup>4</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

はじめに、横浜市の高密度強震計ネットワーク (Y-NET) の全150観測点を対象に、PS検層より得られる表層30mの平均S波速度 ( $V_s30$ ) と地震記録から得られる加速度最大値および速度最大値の増幅倍率の関係を調べている。次に、市街地でも容易に実施できるL字形のアレイ微動観測をY-NETの全観測点で行い、通常、円形アレイでの微動記録に対して適用される空間自己相関法をL字形アレイでの微動記録に適用し、レイリー波の位相速度を推定している。この位相速度から $V_s30$ を推定し、PS検層から得られる $V_s30$ との比較を行うことにより、 $V_s30$ の推定方法としてのL字形アレイ観測の適用性を検討している。最後に、 $V_s30$ を用いた簡便な加速度最大値、速度最大値の推定方法を提案し、その適用性の検討を行っている。

**Key Words :** average S-wave velocity, site amplification factor, microtremor, array observation, peak ground motion

## 1. はじめに

近年、表層地盤の平均S波速度を地震動評価に用いることが行われている<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。これは、経験的に、地盤の平均S波速度と地震動強さの指標 (加速度最大値、速度最大値、SI値など) とには相関が見られることに基づいている。この相関性に基づき、基準地盤に対する地震動強さ指標の増幅倍率と平均S波速度の関係式が提案されてい<sup>5), 6), 7), 8)</sup>。任意の地盤における地震動評価は、距離減衰式から推定される工学的基盤での地震動強さ指標に上記の関係式から得られる増幅倍率をかけることにより行うことができる。これらの地震動強さ指標と構造物の損傷度の関係についても多くの研究がある<sup>9)</sup>。したがって、構造物の耐震性評価において、平均S波速度の利用も可能であると考えられる。しかし、地震動に影響を及ぼす地盤特性は、実際にはS波速度構造をパラメータとする周期の関数であるのに対し、上記の増幅倍率は平均S波速度のみの関数である。そのため、平均S波速度から得られる地震動強さ指標は、すべ

での地震、地盤において適切に求められているとは限らない。そこで、本論文の第2章では、横浜市の高密度強震計ネットワーク<sup>10)</sup> (以下、Y-NETと呼ぶ) で得られた47地震の地震記録を用いて、各観測点で行われているPS検層より得られる表層30mの平均S波速度 (以下、 $V_s30$ と呼ぶ) と加速度最大値および速度最大値の増幅倍率との関係を調べている。

地盤の平均S波速度の推定には、原理的には地盤のS波速度構造が必要である。しかし、S波速度構造の推定は、ボーリングを伴うPS検層を必要とするため、経済的な負担が大きい。また、標準貫入試験のN値から経験式を用いてS波速度を推定する方法もあるが、間接的な推定のため誤差が大きい可能性があり、これもボーリングを伴うので経済的な負担は大きい。経済的負担が比較的少ない方法としては、微動探査法がある。この方法は、はじめに、地表面に複数のセンサーを配置して得られた微動の同時記録に対し、空間自己相関法<sup>11)</sup>あるいは周波数一波数解析<sup>12), 13)</sup>を適用し、微動に含まれるレイリー波の位相速度を推定する。次に、この位相速度を説明

する S 波速度構造を逆解析により推定するという方法<sup>14)</sup>である。微動探査法は、ボーリングを伴わないので比較的、低コストで実施することができる。しかし、逆解析が非線形の逆解析であるため、解の一意性や初期モデルの依存性などの問題を含んでおり、十分な精度を期待できない可能性もある。

S 波速度構造を用いないで平均 S 波速度を推定する方法もいくつか提案されている。ひとつは、地形種別、標高などの地理的指標を用いて平均 S 波速度を推定する方法である<sup>15)</sup>。これらの地理的指標は、デジタルデータベース化がなされており<sup>3), 16)</sup>、実際に広域を対象としたサイスミック・マイクロゾーンーションに利用されている<sup>2), 4)</sup>。ただし、データベース化は、一般に 1km~0.5km 程度のメッシュ単位で行われているので、推定される平均 S 波速度の空間的な分解能は比較的粗くなってしまふ。

一方、任意の地点の平均 S 波速度を比較的簡単に推定する方法として、常時微動を用いる方法が提案されている<sup>17)</sup>。この方法は、上述の微動探査法で得られるレイリー波の位相速度から、直接、平均 S 波速度を推定する方法である<sup>18)</sup>。長尾・紺野<sup>17)</sup>は全国の港湾および空港地域において PS 検層の実施されている 22 地点において本手法を適用し、その有効性を示している。ただし、位相速度の推定に空間自己相関法を用いているため、2 地点を除いて、後述するような円形アレイ観測を行っている。ただし、この円形アレイ観測を市街地において実施することは困難な場合が多い。紺野<sup>19)</sup>は円形アレイ観測ではなく、L 字形アレイ観測から得られる微動記録に対しても空間自己相関法が適用できることを理論的に示している。L 字形アレイ観測は円形アレイ観測に比べ、実施の容易性は格段に向上するが、実際の適用性の検討はほとんど行われていない。そこで、本論文の第 3 章では、Y-NET の 150 観測点において L 字形アレイ微動観測を行い、平均 S 波速度の推定精度の観点から、その適用性の検討を行っている。

最後に、本論文の第 4 章では、 $V_s30$  を用いた簡便な加速度最大値、速度最大値の推定方法を提案し、その適用性の検討を行っている。

以上、本論文は、[1]  $V_s30$  と増幅倍率の関係 (2 章)、[2]  $V_s30$  の簡便な推定方法 (3 章)、[3]  $V_s30$  を用いた振幅最大値の推定方法 (4 章)、の 3 つの内容で構成されている。 $V_s30$  を軸に、第 2 章では  $V_s30$  が利用できる根拠を示し、第 3 章では簡便法におけるその推定精度を明らかにし、第 4 章ではその活用方法を提案している。

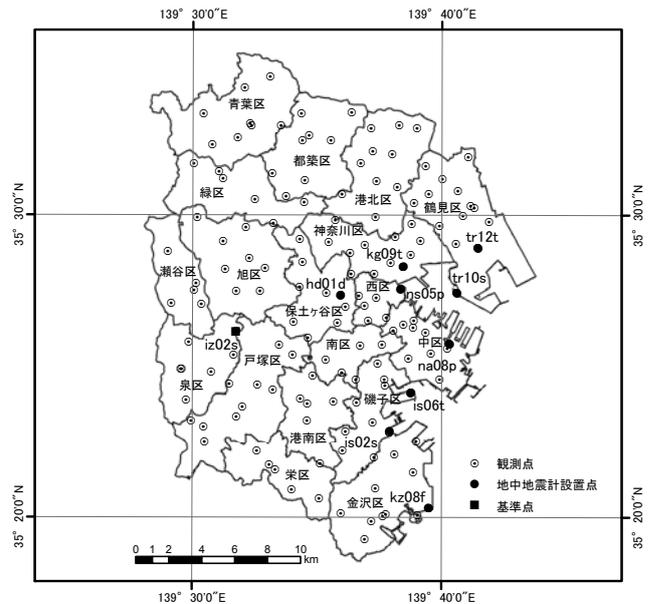


図-1 横浜市高密度強震計ネットワーク (Y-NET)

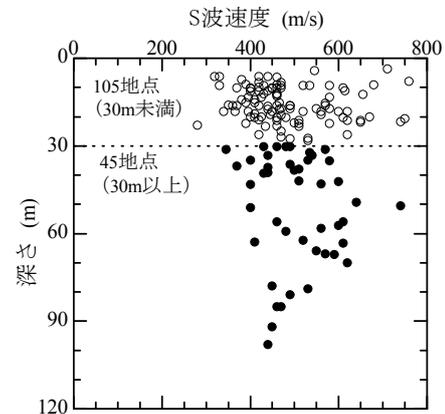


図-2 各観測点における PS 検層の深さと最下層の S 波速度の関係

## 2. 表層 30m の平均 S 波速度と地盤増幅倍率の関係

本章では、Y-NET の地震観測点 150 地点の PS 検層から得られる  $V_s30$  と地震記録から評価される地盤増幅倍率との関係を検討する。なお、PS 検層から得られる  $V_s30$  を以下では  $V_s30ps$  と記す。

### (1) PS 検層から得られる表層 30m の平均 S 波速度

Y-NET は、横浜市 (面積約 430km<sup>2</sup>) 内の計 150 地点の地震計で構築されている<sup>10)</sup>。図-1 に観測点の位置を示す。各観測点では PS 検層が行われている。図-2 に PS 検層の深さと最下層での S 波速度の関係を示す。PS 検層は、1 地点を除き、S 波速度 300m/s 以上の層まで行われていることが分かる。 $V_s30ps$  を評価するには深さ 30m までの PS 検層結果が必要で

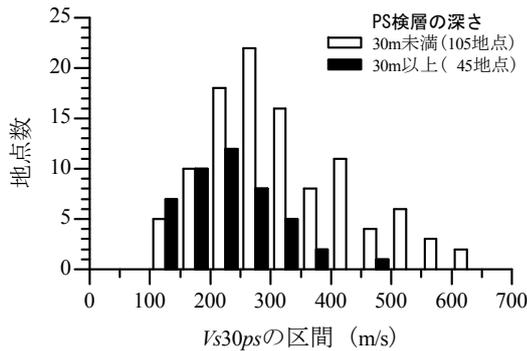


図-3 PS 検層から得られた  $Vs30ps$  のヒストグラム

あるが、同図より深さ 30m 以上の PS 検層が行われた地点は 45 地点で、残りの 105 地点では PS 検層の深さは 30m 未満であることが分かる。そこで、本研究では、PS 検層の深さが 30m 未満の地点については、年縄ら<sup>20)</sup>の方法に基づき、PS 検層の最下層の下に厚さ 5m の中間層を置き、その下に上総層群上面に対応する基盤層が分布していると仮定した。この基盤層の S 波速度は 700m/s とした。中間層の S 波速度は、PS 検層の最下層の S 波速度と 700m/s との平均としている。 $Vs30ps$  の算出は、次式を用いている。

$$Vs30ps = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{H_i}{Vs_i}} \quad (1a)$$

$$30 = \sum_{i=1}^N H_i \quad (1b)$$

ここで、 $N$  は深さ 30m までの層数、 $H_i$ 、 $Vs_i$  はそれぞれ第  $i$  層での層厚、S 波速度である。算出される  $Vs30ps$  には、当然、PS 検層の精度に起因する誤差が含まれるが、上述の 105 地点については、上記の仮定に起因する誤差も含まれる。そこで、以下では、PS 検層の深さが 30m 以上と 30m 未満の地点を区別して、解析や考察を行っている。

$Vs30ps$  のヒストグラムを図-3 に示す。PS 検層の深さが 30m 以上の地点の多くは  $Vs30ps=100\sim350$ m/s の範囲にあり、30m 未満の地点の多くは  $Vs30ps=100\sim550$ m/s の範囲にある。また、深さ 30m 以上の地点での  $Vs30ps$  の平均値は 229m/s であるのに対し、深さ 30m 未満の地点では 319m/s と大きいことが分かる。これは、深さ 30m 未満の地点において人工的に S 波速度 700m/s の層を加えたことも考え

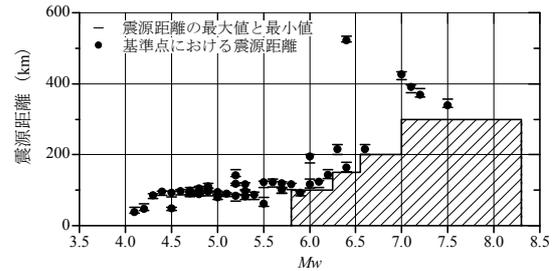


図-4 47 地震のモーメントマグニチュード  $Mw$  と基準点までの震源距離および震源距離の範囲 (斜線部分は、司・翠川<sup>23)</sup>が使用している地震動データベースの  $Mw$  の範囲と震源距離の上限値の関係を示している)

られるが、図-2 から分かるように比較的浅いところで S 波速度の速い層がでていたためと考えられる。

(2) 地震記録を用いた地盤増幅倍率の評価方法

本研究で検討に用いた 47 個の地震の諸元<sup>21), 22)</sup>を表-1 に示す。なお、地震の選定は、全 150 点での地震観測が稼動した 1997 年 5 月から 2005 年 9 月までの地震で、全観測点の 9 割にあたる 135 観測点以上、かつ、後述の基準点で地震記録が得られていることを条件に行っている。表-1 から分かるように、EQ44 を除くと加速度最大値の平均は  $5\sim36$ cm/s<sup>2</sup> と比較的小さい値を示している。しかし、EQ1, 9, 13, 22, 31 では 1~4 地点で、EQ44 では 36 地点で加速度最大値は  $100$ cm/s<sup>2</sup> 以上となっており、これらの地点の増幅倍率には地盤の非線形性の影響も含まれている可能性が考えられる。そこで、以下の地盤増幅倍率の評価において、これらの地点は解析から除いている。したがって、本研究における地震記録から評価される地盤増幅倍率は地盤が線形領域であるときの増幅倍率といえる。

本研究では、地盤増幅倍率を基準点の地震動の振幅最大値に対する各観測点での振幅最大値の比として定義する。振幅最大値としては、加速度最大値および速度最大値を用いている。基準点は、S 波速度約 600m/s の軟岩がほぼ露頭し、 $Vs30ps=633$ m/s と Y-NET の中で最も大きな値を示している iz02s (図-1 の■印) としている。図-4 に 47 地震のモーメントマグニチュード ( $Mw$ ) と基準点までの震源距離および震源距離の範囲を示す。何れの地震も基準点と各観測点の震源距離の差は 18km 以下と震源距離に対して小さい。しかし、振幅最大値には若干の距離減衰の影響が見られた。そこで、距離減衰の影響をできるだけ取り除くため、距離減衰式を用いて基準点

表-1 本研究で検討に用いた地震の諸元

EQ	日時	震源位置			M <sub>j</sub>	M <sub>w</sub>	震央地域名	観測 点数	震源 距離 (km)	水平合成の加速度最大値 (cm/s <sup>2</sup> )			
		北緯	東経	深さ (Km)						最大	最小	平均	標準 偏差
1	1997/07/09/18:36	35° 33.2'	140° 7.5'	77	4.8	5.0	千葉県北西部	145 (144)	86-97	123.8	3.2	16.4	12.0
2	1997/08/09/05:34	35° 49.9'	139° 30.0'	67	4.9	5.0	埼玉県南部	137	73-88	68.8	2.5	15.1	9.2
3	1997/09/08/08:40	35° 33.4'	140° 0.1'	109	5.1	5.2	東京湾	145	113-120	47.7	3.5	15.4	7.7
4	1998/01/14/02:17	35° 36.9'	140° 13.9'	78	5.0	4.9	千葉県北西部	149	93-106	29.6	3.9	12.7	5.5
5	1998/01/16/10:57	35° 13.1'	140° 19.1'	53	4.7	4.5	千葉県南部	148	81-98	45.0	3.4	13.6	7.0
6	1998/05/03/11:09	34° 57.6'	139° 10.5'	5	5.9	5.5	伊豆半島東方沖	150	55-79	45.5	3.6	10.3	5.8
7	1998/05/16/03:45	34° 56.2'	139° 55.3'	73	4.8	4.7	千葉県南部	150	89-107	67.7	5.3	20.3	10.4
8	1998/06/14/22:17	35° 27.8'	140° 44.9'	46	5.7	5.7	千葉県東方沖	146	106-124	11.9	2.1	5.0	1.8
9	1998/08/29/08:46	35° 37.9'	140° 1.7'	65	5.3	5.3	東京湾	149 (146)	73-85	138.8	13.5	35.9	18.7
10	1998/11/08/21:40	35° 37.8'	140° 2.3'	80	4.7	4.7	東京湾	150	87-98	97.0	6.3	30.6	17.5
11	1998/11/28/00:22	35° 39.7'	140° 5.4'	65	4.5	4.3	千葉県北西部	144	76-90	47.4	2.1	9.9	6.4
12	1999/05/22/09:48	35° 27.5'	139° 10.6'	21	4.3	4.1	神奈川県西部	148	35-52	71.5	2.7	15.8	11.2
13	1999/09/13/07:56	35° 35.8'	140° 9.5'	76	5.1	5.3	千葉県北西部	150 (149)	87-99	145.6	7.1	31.5	17.7
14	2000/02/11/20:57	35° 29.9'	139° 2.6'	17	4.4	4.2	山梨県東部	149	43-62	51.2	2.5	12.0	8.3
15	2000/06/03/17:54	35° 41.3'	140° 44.7'	48	6.1	6.1	千葉県北東部	148	108-127	35.9	4.7	14.7	6.2
16	2000/07/01/16:01	34° 11.4'	139° 11.6'	16	6.5	6.2	新島・神津島近海	141	132-158	21.4	2.5	6.0	3.1
17	2000/07/15/10:30	34° 25.4'	139° 14.5'	10	6.3	6.0	新島・神津島近海	149	106-131	43.2	3.0	13.5	7.7
18	2000/07/21/03:39	36° 31.7'	141° 7.1'	49	6.4	6.0	茨城県沖	149	177-200	21.7	2.9	7.7	3.1
19	2000/07/30/21:25	33° 58.2'	139° 24.6'	17	6.5	6.4	三宅島近海	147	152-179	22.5	2.7	7.3	3.1
20	2000/09/29/08:56	35° 32.0'	139° 42.3'	86	4.6	4.8	神奈川県東部	148	86-90	63.5	3.5	13.8	7.6
21	2001/04/03/23:57	35° 1.4'	138° 5.6'	30	5.3	5.2	静岡県中部	135	138-158	16.0	1.8	5.0	2.3
22	2001/09/18/04:23	35° 27.4'	139° 48.6'	42	4.4	4.5	東京湾	144 (143)	43-51	128.2	4.0	23.1	17.2
23	2002/05/19/05:00	35° 38.7'	140° 12.7'	72	4.6	4.6	千葉県北西部	146	87-101	54.0	3.3	13.7	6.8
24	2002/06/14/11:42	36° 12.9'	139° 58.6'	57	5.1	4.9	茨城県南部	146	98-119	24.5	2.0	9.5	4.5
25	2002/07/13/21:45	35° 59.9'	140° 7.4'	65	4.8	4.8	茨城県南部	143	92-110	28.9	2.0	9.2	4.8
26	2003/05/12/00:57	35° 52.1'	140° 5.1'	47	5.3	5.2	茨城県南部	149	70-89	41.4	3.7	12.7	6.0
27	2003/05/17/23:33	35° 44.3'	140° 39.0'	47	5.3	5.3	千葉県北東部	146	102-121	26.1	2.1	7.9	4.2
28	2003/05/26/18:24	38° 49.2'	141° 39.0'	72	7.1	7.0	宮城県沖	148	411-434	27.8	4.5	13.2	4.9
29	2003/08/18/18:59	35° 48.2'	140° 6.5'	69	4.8	4.8	千葉県北西部	148	84-100	51.5	3.1	14.3	7.6
30	2003/09/20/12:54	35° 13.1'	140° 18.0'	70	5.8	5.7	千葉県南部	147	92-107	83.9	5.8	28.5	12.9
31	2003/10/15/16:30	35° 36.8'	140° 2.9'	74	5.1	5.1	東京湾	147 (143)	82-93	146.2	8.1	32.6	21.0
32	2003/11/12/17:26	33° 9.8'	137° 2.0'	395	6.5	6.4	紀伊半島沖	148	518-533	29.9	0.8	11.5	5.1
33	2004/07/17/15:10	34° 50.2'	140° 21.3'	69	5.5	5.6	房総半島南東沖	145	109-131	84.0	5.1	18.8	10.5
34	2004/08/06/03:23	35° 36.9'	140° 3.3'	75	4.6	4.7	千葉県北西部	142	83-94	70.2	4.0	20.1	12.2
35	2004/09/05/19:07	33° 1.9'	136° 47.8'	38	7.1	7.2	紀伊半島沖	135	363-386	11.7	2.2	5.5	2.2
36	2004/09/05/23:57	33° 8.2'	137° 8.4'	44	7.4	7.5	東海道沖	143	333-357	15.8	2.7	6.7	2.5
37	2004/10/06/23:40	35° 59.3'	140° 5.3'	66	5.7	5.7	茨城県南部	142	91-108	74.1	4.8	19.9	10.1
38	2004/10/23/17:56	37° 17.5'	138° 52.0'	13	6.8	6.6	新潟県中越地方	144	201-229	32.9	3.3	11.2	5.1
39	2004/10/23/18:34	37° 18.3'	138° 55.8'	14	6.5	6.3	新潟県中越地方	145	200-229	25.5	3.0	9.5	4.2
40	2005/02/16/04:46	36° 2.3'	139° 53.3'	46	5.3	5.4	茨城県南部	148	74-95	98.7	3.9	28.5	16.2
41	2005/04/11/07:22	35° 43.6'	140° 37.2'	52	6.1	5.8	千葉県北東部	140	102-120	21.1	2.9	9.2	3.7
42	2005/04/11/15:34	35° 34.1'	140° 11.0'	73	4.4	-	千葉県北西部	143	86-98	37.8	2.4	12.0	6.9
43	2005/06/20/01:15	35° 44.0'	140° 41.6'	51	5.6	5.5	千葉県北東部	141	107-126	30.2	2.9	11.4	5.5
44	2005/07/23/16:34	35° 34.9'	140° 8.3'	73	6.0	5.9	千葉県北西部	142 (106)	84-96	620.6	23.4	88.4	60.7
45	2005/07/28/19:15	36° 7.5'	139° 50.7'	51	5.0	4.9	茨城県南部	140	84-105	41.8	1.9	12.3	7.2
46	2005/08/07/01:05	35° 33.5'	140° 6.8'	73	4.7	4.7	千葉県北西部	144	82-94	83.9	5.1	21.4	11.6
47	2005/08/16/11:46	38° 9.0'	142° 16.7'	42	7.2	7.1	宮城県沖	143	374-397	47.1	7.1	19.5	7.6

注1) 日時、震源位置、M<sub>j</sub>、震央地域名は気象庁<sup>21)</sup>より、M<sub>w</sub>は防災科学技術研究所<sup>22)</sup>より引用している。  
 注2) 観測点数の( )内の数字は、水平合成の加速度最大値が100cm/s<sup>2</sup>未満の観測点数を表している。

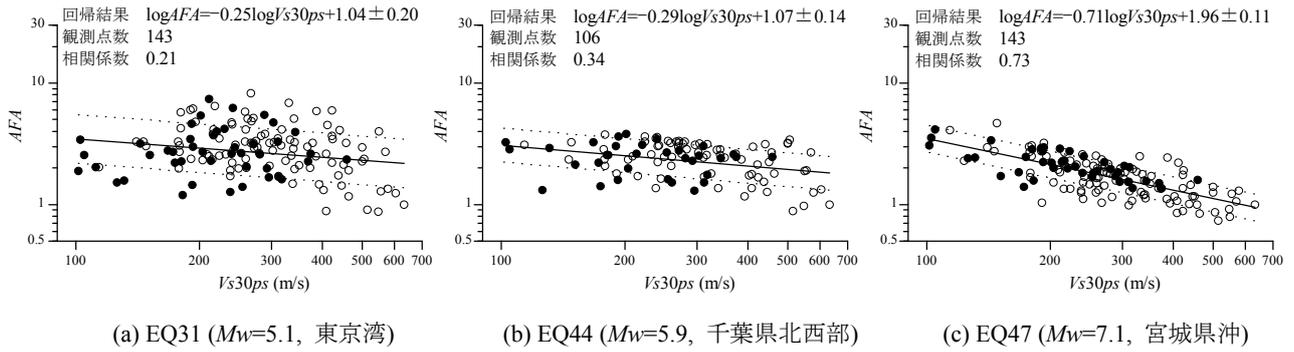


図-6 加速度最大値に関する地盤増幅倍率  $AFA$  と平均 S 波速度  $Vs30ps$  の関係 (○印は PS 検層の深さ 30m 未満の地点, ●印は 30m 以上の地点)

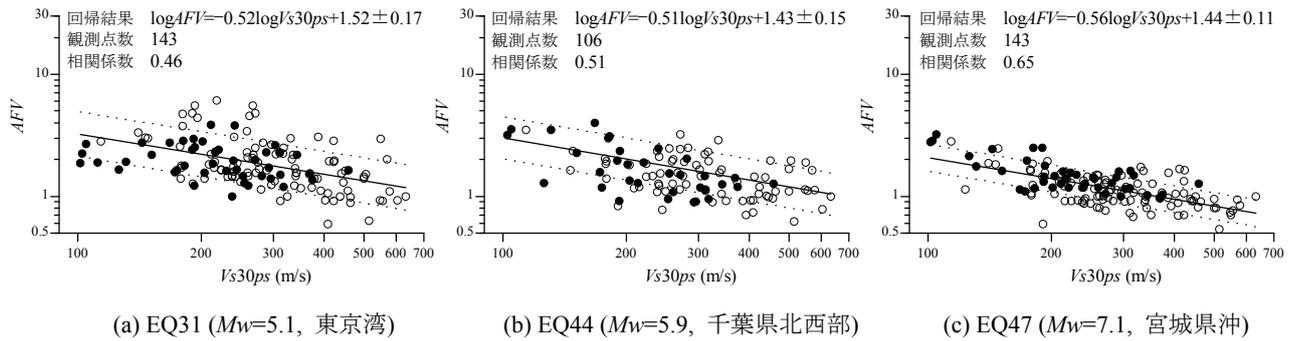


図-7 速度最大値に関する地盤増幅倍率  $AFV$  と平均 S 波速度  $Vs30ps$  の関係 (○印は PS 検層の深さ 30m 未満の地点, ●印は 30m 以上の地点)

の振幅最大値を各観測点でのそれに変換することを試みている。加速度最大値に関する地盤増幅倍率(以下,  $AFA$  と呼ぶ)の定義式を以下に示す。

$$AFA_i = \frac{Aobs_i}{Aobs_r \times \frac{Acal_i}{Acal_r}} = \frac{Aobs_i}{Aobs_r} \frac{Acal_r}{Acal_i} \quad (2)$$

ここで,  $Aobs$  は地震動の水平 2 成分のベクトル和の加速度最大値,  $Acal$  は距離減衰式から得られる加速度最大値である。添え字の  $r$  は基準点,  $i$  は  $i$  番目の観測点であることを示している。なお, 式(2)の第 2 式の分母は上述の変換に対応する。同様に, 速度最大値に関する地盤増幅倍率(以下,  $AFV$  と呼ぶ)を次のように定義する。

$$AFV_i = \frac{Vobs_i}{Vobs_r \times \frac{Vcal_i}{Vcal_r}} = \frac{Vobs_i}{Vobs_r} \frac{Vcal_r}{Vcal_i} \quad (3)$$

ここで,  $Vobs$  は地震動の水平 2 成分ベクトル和の速度最大値,  $Vcal$  は距離減衰式から得られる速度最大

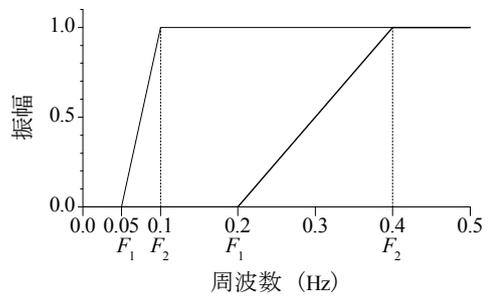


図-5 ローカットフィルター

値である。なお, Y-NET の地震記録は加速度波形であるため速度波形を得るには数値積分を行う必要がある。今回は, 周波数領域での数値積分を行っており, その際には図-5 に示した 2 通りのローカットフィルター ((1)  $F_1=0.05\text{Hz}$ ,  $F_2=0.1\text{Hz}$ ; (2)  $F_1=0.2\text{Hz}$ ,  $F_2=0.4\text{Hz}$ ) を用いている。

本研究では,  $Acal$ ,  $Vcal$  を求める際の距離減衰式として, 司・翠川の式<sup>23)</sup>を用いている。図-4 には, 司・翠川が使用している地震動データベースのマグニチュードの範囲と震源距離の上限値を斜線部分で示している。同図から, ほとんどの地震記録が斜線部分の外側にあり, 距離減衰式の適用範囲外になっ

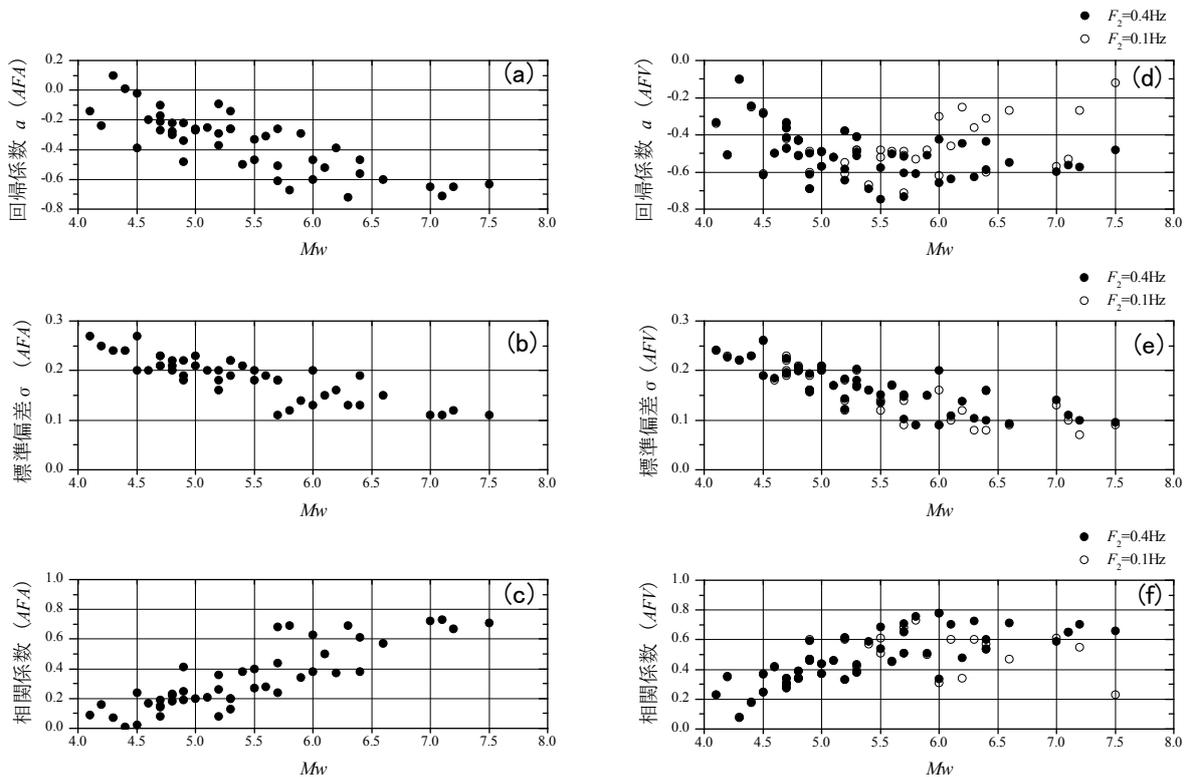


図-8 地盤増幅倍率  $AFA$ ,  $AFV$  と平均 S 波速度  $Vs30ps$  の回帰分析から得られる回帰係数  $a$ , 標準偏差  $\sigma$ , 相関係数とモーメントマグニチュード  $Mw$  の関係

ていることが分かる。したがって、この使用にあたっては注意を要するが、他の多くの距離減衰式<sup>24)</sup>も同様な適用範囲であることや加速度最大値、速度最大値の両者について提案されていることなどから、本研究では司・翠川の式を用いている。なお、表-1には、気象庁マグニチュード( $Mj$ )とモーメントマグニチュード( $Mw$ )を記載しているが、司・翠川の式は  $Mw$  をパラメータとして使用している。

(3) 地盤増幅倍率と平均 S 波速度の関係

図-6 に  $Mw = 5, 6, 7$  程度の 3 つの地震(EQ31, 44, 47)における  $AFA$  と  $Vs30ps$  の関係を示す。図中の直線は、次の回帰モデルを用いて得られた結果を示している。

$$\log AFA = a \log Vs30ps + b \pm \sigma \quad (4)$$

ここで、 $a$ ,  $b$  は回帰係数、 $\sigma$  は標準偏差である。いずれの地震でも、 $Vs30ps$  が大きくなると  $AFA$  は小さくなる傾向が見られる。特に  $Mw7.1$  の EQ47 では、他の 2 つの地震に比べ、標準偏差が小さく、相関係数が大きいことが分かる。このことは、 $AFA$  と  $Vs30ps$  の関係は、地震の規模に依存する可能性が示唆され

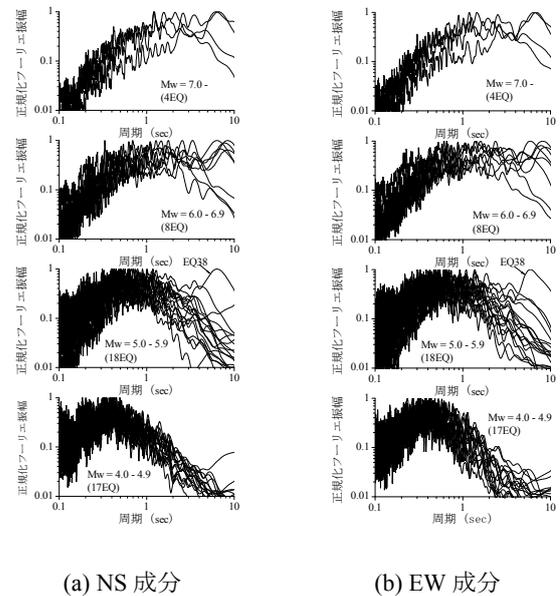


図-9 基準点 iz02s における地震規模ごとの正規化された加速度フーリエ振幅スペクトル

る。なお、○印は PS 検層の深さ 30m 未満の地点、●印は 30m 以上の地点を表しているが、全体的に  $AFA$  と  $Vs30ps$  の関係に両者の差異はあまり見られない。

同様に、 $AFV$  と  $Vs30ps$  の関係について図-7 に示す。なお、ローカットフィルターは  $F_1=0.2Hz$ ,

$F_2=0.4\text{Hz}$  を使用している.  $AFA$  と同様に  $Vs30ps$  が大きくなると  $AFV$  は小さくなる傾向が見られ, 地震規模が大きくなるほど標準偏差は小さく, 相関係数は大きくなる傾向にあることが分かる. そこで, 他の地震についても同様な傾向が見られるのかを議論するために, 47 個の地震の標準偏差, 相関係数および回帰係数  $a$  と  $Mw$  の関係を 図-8 に示す. 図-8 (c), (f) から  $AFA, AFV$  とともに,  $Mw$  が大きくなるほど,  $Vs30ps$  との相関性が高くなることが分かる. この理由を少し考えてみる. 鈴木ら<sup>25)</sup>は, Y-NET の PS 検層モデルに対する地盤応答解析から, 入力地震波の卓越周期が長いほど,  $Vs30ps$  と加速度最大値の増幅倍率との相関性が高くなることを示している. 図-9 には, 基準点 iz02s における 47 地震の正規化された加速度フーリエ振幅スペクトルを地震規模ごとに示しているが, 地震の規模が大きくなるにつれて長周期成分が卓越してくることが分かる. したがって,  $Mw$  が大きいほど入力地震動に長周期成分が卓越し, それにより  $Mw$  が大きいほど相関係数は大きくなる傾向が見られたと考えられる. なお, 図-8 (f) から分かるように  $Mw$  が 6 程度より大きくなると  $F_1=0.05\text{Hz}, F_2=0.1\text{Hz}$  のローカットフィルターを使用した  $AFV$  と  $Vs30ps$  の相関係数は低下する傾向が見られる. これらの地震では, 速度最大値は, 主に S 波からなる主要動部分ではなく, 主に表面波からなる後続波部分に現れていた. これらの地震は, 震源距離が 100km 以上と長いため, 実体波に比べて幾何減衰しにくい表面波が卓越したためと考えられる. これらの表面波は周期 3 秒以上で卓越しており, 振幅最大値は地下深部までの影響を受け, たかだか表層 30m の S 波速度構造にはそれほど影響されないためと考えられる.

図-8 (c), (f) から増幅倍率と  $Vs30ps$  との間に相関係数にして 0.7 程度の相関が見られる  $6.6 \leq Mw \leq 7.5$  の 5 地震から得られる  $a, \sigma$  の平均値を用いて, 以下の関係式を提案する.

$$\log AFA = -0.65 \log Vs30 + 1.82 \pm 0.12 \quad (5)$$

$$\log AFV = -0.55 \log Vs30 + 1.54 \pm 0.11 \quad (6)$$

ただし, 適用範囲は  $6.6 \leq Mw \leq 7.5$ ,  $114\text{m/s} \leq Vs30 \leq 633\text{m/s}$  である. また,  $AFV$  については,  $F_1=0.2\text{Hz}, F_2=0.4\text{Hz}$  のローカットフィルターを通した波形に対する増幅倍率であることに注意する必要がある. なお, 図-6 (c), 図-7 (c) から分かるように, 地震ごとの回帰式は基準点の  $Vs30=633\text{m/s}$  で増幅倍率=1 を通るとは限らない. これは, 基準点においても, 振幅最大値はばらつきを持つためと考

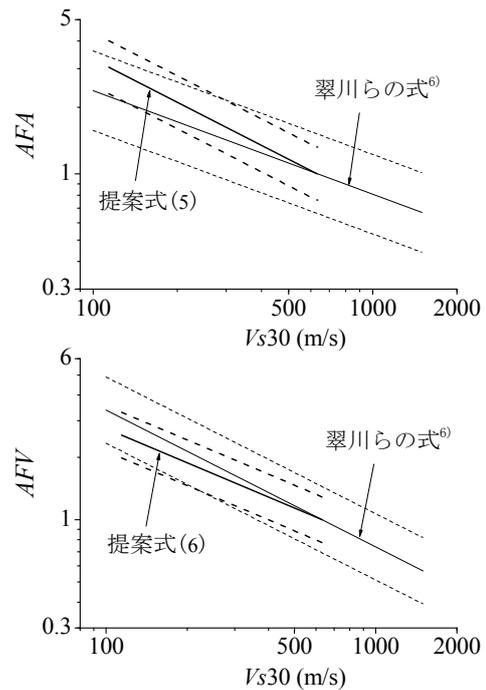


図-10 提案式と既往の関係式との比較

えられる. そこで, 本研究では, 回帰式は  $Vs30=633\text{m/s}$ , 増幅倍率=1 を通るものとし, 回帰係数  $b$  の値を調整した.

既往の関係式としては翠川ら<sup>6)</sup>の式がある. 翠川らの式は, 1987 年千葉県東方沖地震 ( $Mj=6.7$ ) で得られた地震記録より求めており, 基準地盤は  $Vs30=600\text{m/s}$  程度で, 適用範囲は  $100\text{m/s} \leq Vs30 \leq 1500\text{m/s}$  としている. 図-10 には, 本提案式と翠川らの式を  $Vs30=633\text{m/s}$  で  $AFA, AFV$  が 1 になるように換算して表示している. 破線は標準偏差の範囲を示している. 翠川らの式と比較すると, 提案式は加速度最大値では傾きが大きく, 速度最大値では傾きが小さいことが分かる. また, 両者とも提案式の標準偏差は小さいことが分かる. 提案式と翠川らの式との違いは, 検討した地域・地震の違いと考えられ, 今回の提案式は横浜市により適したものとなっていると考えられる.

### 3. L 字形アレイ微動観測を用いた $Vs30$ の推定方法の精度の検討

前章では, 加速度最大値, 速度最大値の増幅倍率と  $Vs30$  の関係式を提案した. この関係式を任意の地盤で利用するには,  $Vs30$  の推定が必要となる. 本章では, Y-NET の地震観測点 150 箇所において L 字形

アレイ微動観測を行い、その微動記録から  $Vs30$  を推定し、PS 検層から得られる  $Vs30$  と比較することにより、L 字形アレイ観測を用いる  $Vs30$  の推定方法の適用性を検討する。

(1)  $Vs30$  の推定方法

本推定方法は、微動のアレイ観測記録から基本モードレイリー波の位相速度を推定し、波長 40m における位相速度（以下、 $C40$  と呼ぶ）を  $Vs30$  とする方法<sup>18)</sup>である。はじめに、本推定方法の理論的背景について説明する。Y-NET の 150 地点の PS 検層モデルから理論位相速度を計算し、これらから得られる  $C40$  と PS 検層モデルから得られる  $Vs30ps$  の関係を図-11 に示す。両者の相関係数は 0.98 と非常に高い相関があることが分かる。図-12 に PS 検層の深さと  $C40/Vs30ps$  の関係を示す。図中には、PS 検層の深さが 30m 未満と 30m 以上に分けて、それぞれの  $C40/Vs30ps$  の平均値と標準偏差も示してある。2 つの区分で平均値、標準偏差に若干の違いはあるが、全体的に、平均値は 1 程度、標準偏差は 0.1 程度であることが分かる。したがって、 $C40$  から  $Vs30$  が推定可能であることが示唆される。ただし、標準偏差が 0.1 程度なので、 $C40$  から  $Vs30$  を推定する過程において、1 割程度の誤差が含まれる可能性があることに注意する必要がある。以上から、任意の地点において、基本モードレイリー波の位相速度が推定できれば  $Vs30$  の推定が可能となることが分かる。

次に、微動のアレイ観測から位相速度を推定する手順について述べる。Y-NET のある横浜市は建物が密集した地域であるため、複数のセンサーを配置することは困難である。そこで、今回は、比較的少ないセンサーでも位相速度の推定が行える空間自己相関法（以下、SPAC 法と呼ぶ）を用いている。SPAC 法は、センサーを円の中心とこの円の上に等間隔にセンサーを置いた円形アレイ観測を行うことを条件としている<sup>11)</sup>。しかし、街中で円形にセンサーを配置するのは非常に難しいので、本研究では、Y-NET の全観測点において、図-13 に示すように 3 つの速度センサー（図中の 3, 4, 5ch）を L 字形に配置した L 字形アレイ観測を行っている。なお、微動の水平動と上下動のスペクトル比（以下、H/V スペクトルと呼ぶ）を求めるために水平動の観測（図中の 1ch, 2ch）も同時に行っている。微動の H/V スペクトルからは、地盤の卓越周期の推定が可能となる<sup>26), 27)</sup>。

SPAC 法のためのアレイ観測においては、3ch と 4ch 間、3ch と 5ch 間の長さは同じくする必要があり、この長さをアレイ半径と呼ぶことにする。アレイ半径  $r$  は、5, 10, 15m の 3 通りとしている。各アレイ

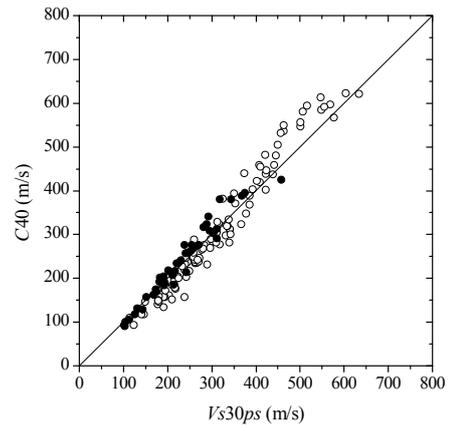


図-11 基本モードレイリー波の波長 40m における理論位相速度  $C40$  と  $Vs30ps$  の関係 (○印は PS 検層の深さ 30m 未満の地点, ●印は 30m 以上の地点)

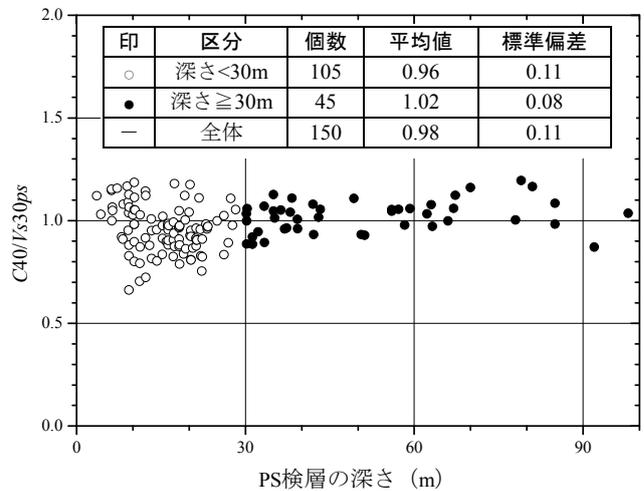


図-12 PS 検層の深さと  $C40/Vs30ps$  の関係

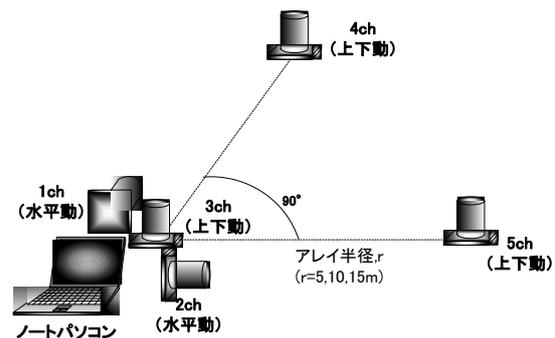
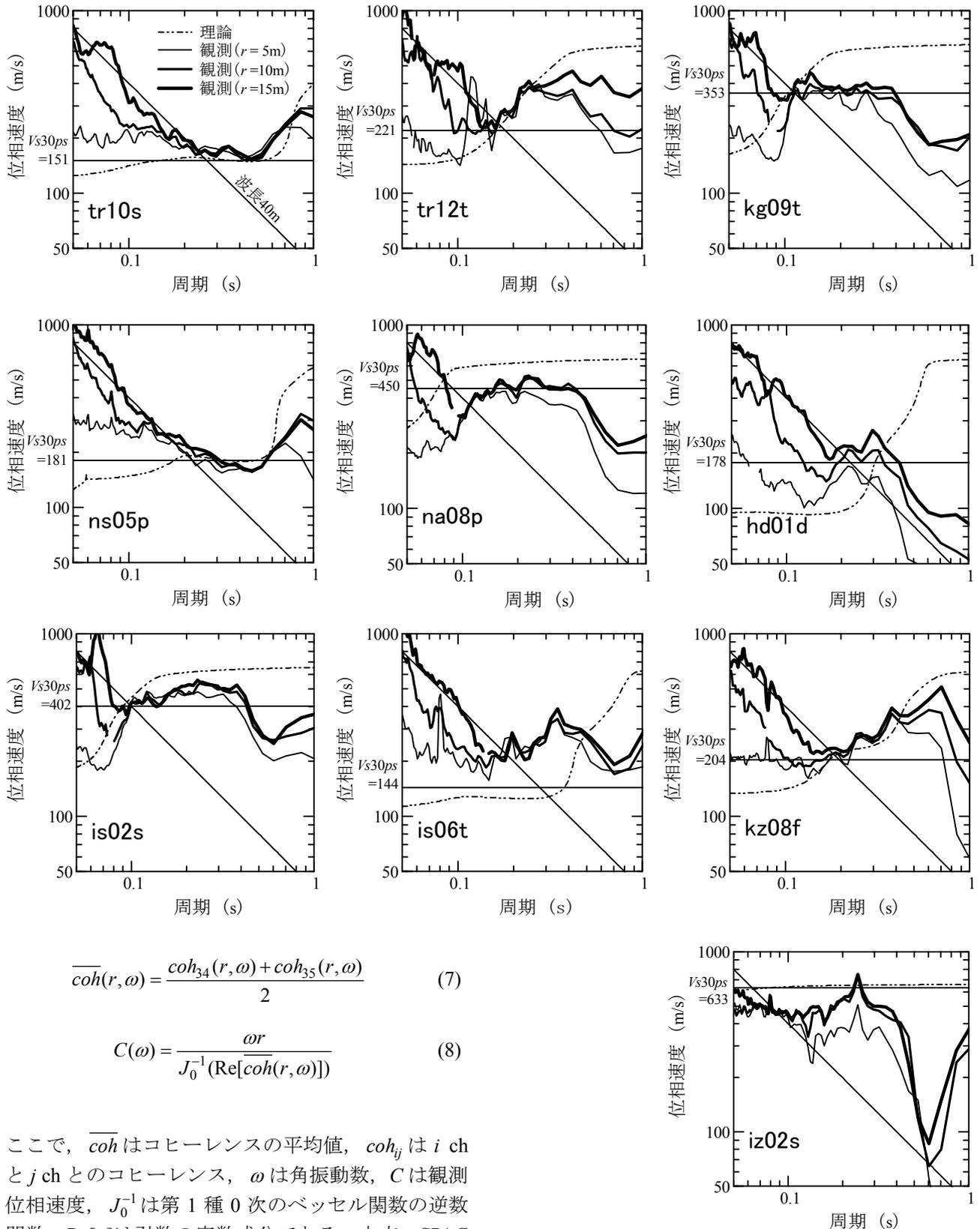


図-13 微動観測におけるセンサーの配置図

半径で、327.68 秒間の常時微動測定を 3 回行っている。サンプリング周波数は 200Hz である。位相速度の推定は次式によって行っている<sup>19)</sup>。

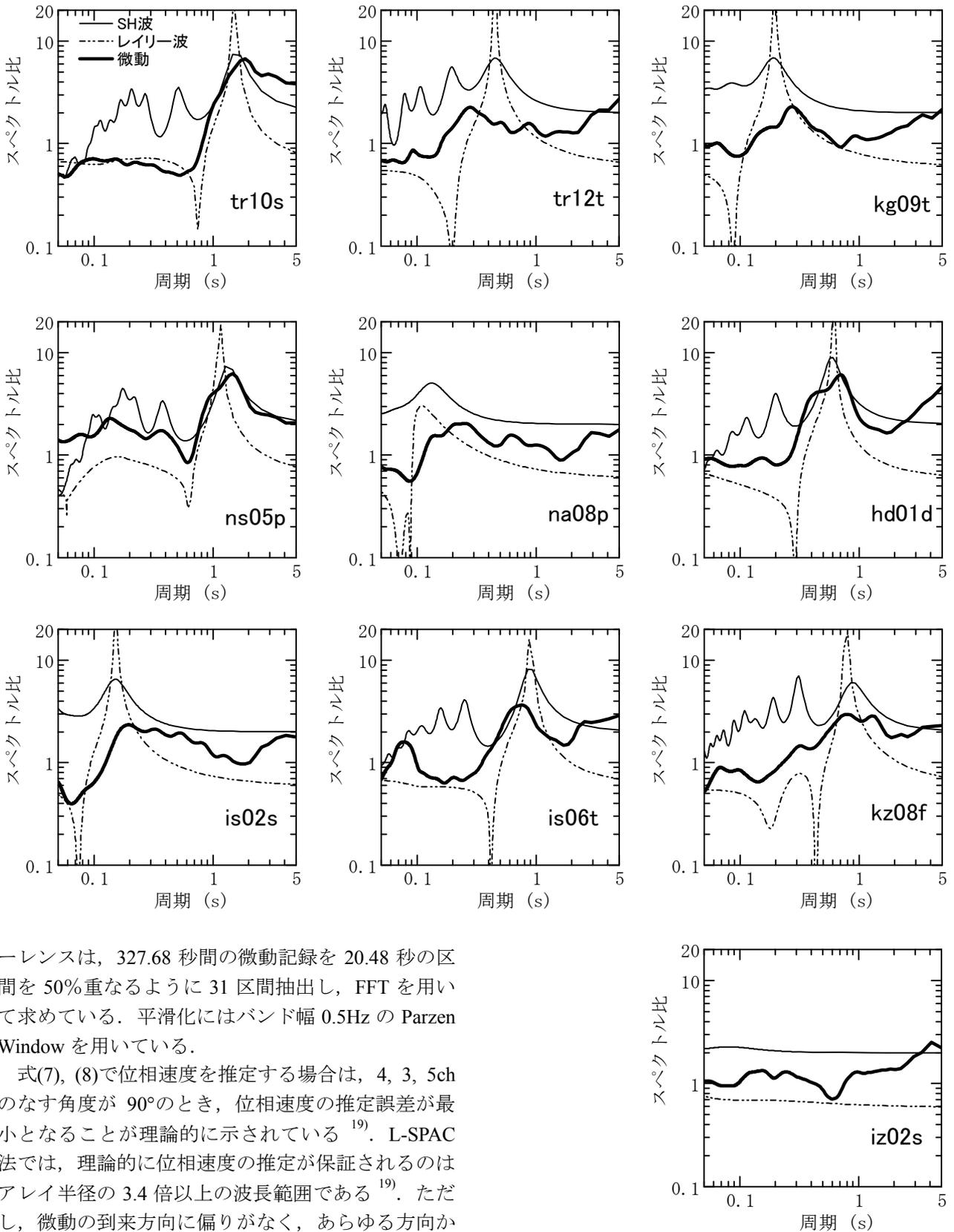


$$\overline{coh}(r, \omega) = \frac{coh_{34}(r, \omega) + coh_{35}(r, \omega)}{2} \quad (7)$$

$$C(\omega) = \frac{\omega r}{J_0^{-1}(\text{Re}[\overline{coh}(r, \omega)])} \quad (8)$$

ここで、 $\overline{coh}$ はコヒーレンスの平均値、 $coh_{ij}$ は  $i$  ch と  $j$  ch とのコヒーレンス、 $\omega$ は角振動数、 $C$ は観測位相速度、 $J_0^{-1}$ は第1種0次のベッセル関数の逆数関数、 $\text{Re}[\cdot]$ は引数の実数成分である。本来、SPAC法は円形状のアレイ観測で得られた微動記録に対して適用されるのに対し、本研究では、L字形のアレイ観測から得られる観測記録に対してSPAC法を適用する。L字形のアレイ観測記録に適用するSPAC法を本論文ではL-SPAC法と呼ぶことにする。コヒ

図-14 地中地震計設置点と基準点における観測位相速度と理論位相速度（図中の横実線は  $V_{s30ps}$  を示している）



ーレンスは、327.68秒間の微動記録を20.48秒の区間を50%重なるように31区間抽出し、FFTを用いて求めている。平滑化にはバンド幅0.5HzのParzen Windowを用いている。

式(7)、(8)で位相速度を推定する場合は、4、3、5chのなす角度が90°のとき、位相速度の推定誤差が最小となることが理論的に示されている<sup>19)</sup>。L-SPAC法では、理論的に位相速度の推定が保証されるのはアレイ半径の3.4倍以上の波長範囲である<sup>19)</sup>。ただし、微動の到来方向に偏りがなく、あらゆる方向から到来している場合は、アレイ半径の2倍以上の波長を検出することができる。Y-NETのPS検層モデルから求まるC40は91~622m/sであるので、波長=位相速度×周期の関係式から、C40に対応する周期は0.44~0.064secと比較的短周期である。これらの

図-15 地中地震計設置点と基準点における微動とレイリー波のH/VスペクトルとSH波の増幅特性

表-2 基準点および地中地震計設置点における微動，PS 検層から得られた  $Vs30$  と微動 H/V スペクトル，SH 波の増幅特性のピーク周期

観測点	ボーリングの深さ (m)	$Vs30mt$ (m/s)	$Vs30ps$ (m/s)	$\frac{Vs30mt}{Vs30ps}$	$Tmt$ (sec)	$T_{SH}$ (sec)	$\frac{Tmt}{T_{SH}}$
tr10s	62.3	167	151	1.11	1.86	1.58	1.18
tr12t	30.3	244	221	1.10	0.28	0.46	0.61
kg09t	18.3	357	353	1.01	0.27	0.19	1.42
ns05p	59.3	242	181	1.34	1.46	1.37	1.07
na08p	21.3	364	450	0.81	0.25	0.13	1.92
hd01d	18.3	181	178	1.02	0.71	0.59	1.20
is02s	10.4	404	402	1.00	0.20	0.15	1.33
is06t	15.3	223	144	1.55	0.76	0.89	0.85
kz08f	57.2	225	204	1.10	0.79	0.89	0.89
iz02s	10.3	510	633	0.81	-	0.08	-

注) 比の値が  $1.00 \pm 0.20$  の間にあるところに網掛けしている。

周期帯の微動発生源として考えられる自動車，トラックなどは四方八方に存在していると考えられるので，C40 の推定方法として L-SPAC 法は有効と考えられる。なお，4, 3, 5ch のなす角を  $60^\circ$  とした場合は，式(7)の代わりに次式を使うことにより，位相速度の推定精度を向上させることができる。

$$\overline{coh}(r, \omega) = \frac{coh_{34}(r, \omega) + coh_{35}(r, \omega) + coh_{45}(r, \omega)}{3} \quad (9)$$

この場合は，微動の到来方向に偏りがある場合でも，アレイ半径の 2 倍以上の波長を検出可能である<sup>19)</sup>。したがって，オープンスペースがある場合は，センサーを正三角形の頂点に設置することが望ましい。

(2) Y-NET における微動から推定した  $Vs30$  の精度

図-1 中の●印で示した 9 地点では，地中にも地震計が設置されており，鉛直アレイ地震観測が行われている。今後，微動と地震動との関係などの詳細な検討も可能であると考え，本論文では，これらの地点の観測位相速度と微動の H/V スペクトルを例示することにする。はじめに，この 9 地点と基準点 iz02s の観測位相速度と PS 検層モデルから得られた理論位相速度を図-14 に示す。図中の横実線は  $Vs30ps$  を示している。理論位相速度と波長 40m となる位相速度を示した直線との交点における位相速度が C40 となる。 $Vs30ps$  と C40 は，na08p と hd01d で若干異なるが，それ以外の地点では比較的近い値を示していることが分かる。

SPAC 法では，アレイ半径  $r$  の約 2 倍から数倍ま

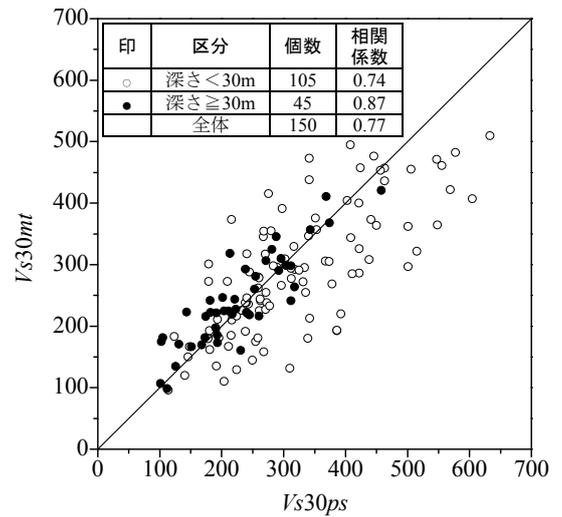


図-16  $Vs30ps$  と  $Vs30mt$  の関係

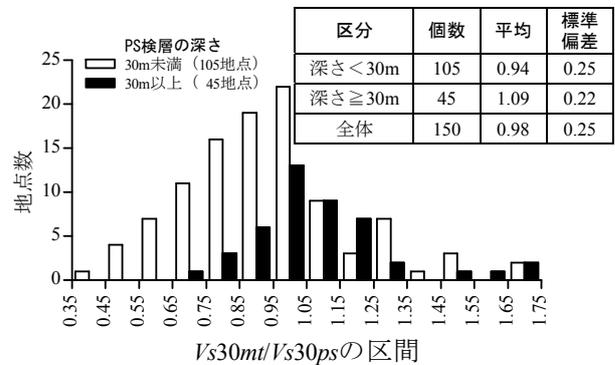


図-17  $Vs30mt/Vs30ps$  のヒストグラム

での波長範囲での位相速度の推定が可能であるが，L-SPAC 法で得られた観測位相速度も理論位相速度と比較的一致した tr10s, tr12t, kg09t, ns05p, is02s, kz08f での結果から，今回着目している周期範囲 (0.06~0.4 秒程度) 内では，L-SPAC 法は SPAC 法と同程度の適用性をもっていると考えられる。上述の通り微動を用いた  $Vs30$  の推定方法は，観測位相速度と波長 40m となる位相速度を示した直線との交点である C40 を  $Vs30$  とする方法である。なお，微動を用いた本推定方法で得られる  $Vs30$  を以下では  $Vs30mt$  と記す。

これらの観測点の  $Vs30ps$ ,  $Vs30mt$  とこれらの比  $Vs30mt/Vs30ps$  をまとめたものを表-2 に示す。 $Vs30mt/Vs30ps$  は，概ね 0.8~1.2 の間にあることが分かる。図-12 に示したように  $C40/Vs30ps$  は 0.1 程度の標準偏差を持つ。また，微動から推定される位相速度にも，微動に含まれる高次モードのレイリー波の影響<sup>28)</sup>や観測システムに起因するノイズなどにより誤差が含まれている可能性がある。したがって，微

動を用いた  $Vs30$  推定方法には、これらに起因した誤差が含まれることに注意する必要がある。

図-15にはこれらの観測点における微動の H/V スペクトルを示している。同図には、PS 検層モデルから得られる SH 波の増幅特性、レイリー波の理論 H/V スペクトルも示してある。微動とレイリー波の H/V スペクトルの形状は比較的調和していることから、PS 検層モデルは概ね妥当であると考えられる。微動の H/V スペクトル、SH 波の増幅特性ピーク周期を  $T_{mt}$ ,  $T_{SH}$  とし、表-2 には各地点の  $T_{mt}$ ,  $T_{SH}$  とこれらの比  $T_{mt}/T_{SH}$  が示されている。この 10 地点に関しては、 $T_{mt}/T_{SH}$  は、 $Vs30_{mt}/Vs30_{ps}$  に比べるとばらつきが大きいことが分かる。

図-16 に 150 地点の  $Vs30_{mt}$  と  $Vs30_{ps}$  の関係を、PS 検層の深さ区間で印をかえて示している。両者の相関係数は、PS 検層の深さが 30m 未満の地点については 0.74 であるのに対し、30m 以上では 0.87 と比較的大きいことが分かる。図-17 に PS 検層の深さ区間ごとの  $Vs30_{mt}/Vs30_{ps}$  のヒストグラムを示す。深さ 30m 以上の地点の  $Vs30_{mt}/Vs30_{ps}$  の平均値は 1.09 であり、 $Vs30_{mt}$  は  $Vs30_{ps}$  に比べて約 1 割大きいことが分かる。一方、深さ 30m 未満の地点については、平均値が 0.94 と  $Vs30_{ps}$  に比べ若干小さいことが分かる。全体の平均値はほぼ 1 で、標準偏差は 0.25 である。

以上、Y-NET における検討結果から、L-SPAC 法から得られる  $Vs30_{mt}$  は、概ね  $Vs30_{ps}$  に一致することが分かった。ただし、その推定精度は、 $Vs30_{mt}/Vs30_{ps}$  の標準偏差において 0.25 程度である。

長尾・紺野<sup>17)</sup>は、全国の港湾および空港地域の 22 地点でアレイ微動観測を行い、 $Vs30_{mt}/Vs30_{ps}$  の平均はほぼ 1、標準偏差は 0.10 であったことを報告している。この 22 地点中 20 地点は、通常用いられている円形アレイ微動観測が行われており、 $Vs30$  の推定精度の面では、円形アレイ観測の方が優れていると考えられる。今後、同一地点で同時に円形アレイ観測と L 字形アレイ観測を行い、両者から得られる  $Vs30$  の精度を検討することを今後課題として挙げておく。

#### 4. 地震動評価への適用例

本章では、Y-NET の各観測点において、提案式(5)、(6)を用いて加速度最大値、速度最大値の推定を行い、これらの推定値と観測値とを比較することにより提案式の地震動評価への適用性を検討する。

##### (1) 加速度最大値、速度最大値の推定方法

はじめに、ある観測点（以下、観測点 S と呼ぶ）で地震観測が行われており、ある地震で加速度最大値  $Aobs_s$ 、速度最大値  $Vobs_s$  が得られたとする。この地震の震源位置、 $M_w$  は既知とする。観測点 S での  $Vs30$  を  $Vs30_s$  とする。基準地盤 ( $Vs30=633m/s$ ) に対する加速度最大値、速度最大値の増幅倍率は、 $Vs30_s$  を式(5)、(6)に代入することにより得られ、それぞれを  $AFA_s$ ,  $AFV_s$  とおくことにする。地点  $i$  における  $Vs30$  が既知とすれば、式(5)、(6)より地盤増幅倍率  $AFA_i$ ,  $AFV_i$  が得られ、次式より地点  $i$  における加速度最大値、速度最大値の推定値を得ることができる。

$$Aest_i = AFA_i \times \frac{Aobs_s}{AFA_s} \times \frac{Acal_i}{Acal_s} \quad (10)$$

$$Vest_i = AFV_i \times \frac{Vobs_s}{AFV_s} \times \frac{Vcal_i}{Vcal_s} \quad (11)$$

ここで、 $Aest_i$ ,  $Vest_i$  は地点  $i$  における加速度最大値、速度最大値の推定値、 $Acal_s$ ,  $Vcal_s$  は距離減衰式から得られる観測点 S での加速度最大値、速度最大値である。

##### (2) 適用例

式(5)、(6)の適用範囲は  $M_w=6.6\sim 7.5$  であるため、この範囲の地震である EQ28, 35, 36, 38, 47 の地震について、上記の方法を適用する。今回は、観測点 S を基準点  $iz02s$  とし、Y-NET の各観測点の振幅最大値を上記の手法で求め、観測値と比較する。

はじめに、各観測点の増幅倍率を  $AFA_i=1$ ,  $AFA_s=1$  とすることにより、地盤増幅倍率を考慮しない場合の加速度最大値の推定値と観測値の関係を図-18 に示す。観測値に比べ、推定値の変動範囲は狭いことが分かる。これは、推定値では距離減衰の補正のみしか考慮されていないからである。また、図中には相関係数を示しているが、EQ38 では 0.47 と比較的大きな値を示しているが、他の地震では 0.07~0.29 とそれほど両者に相関性は見られない。次に、各観測点の  $Vs30$  として  $Vs30_{ps}$ ,  $Vs30_{mt}$  を用いて地盤の増幅倍率を考慮した場合の加速度最大値の推定値と観測値の関係をそれぞれ図-19, 図-20 に示す。EQ38 を除いて、 $Vs30$  を用いた地盤増幅倍率を考慮することによって、相関性は大きく向上することが分かる。ただし、 $Vs30_{mt}$  よりも  $Vs30_{ps}$  を用いた方が相関性は高いことが分かる。

同様に、地盤増幅倍率を考慮しない場合の速度最大値の推定値と観測値の関係を図-21 に示す。EQ28 を除いて、相関係数は 0.02~0.23 と相関性が低いことが分かる。次に、各観測点の  $Vs30$  として  $Vs30_{ps}$ ,

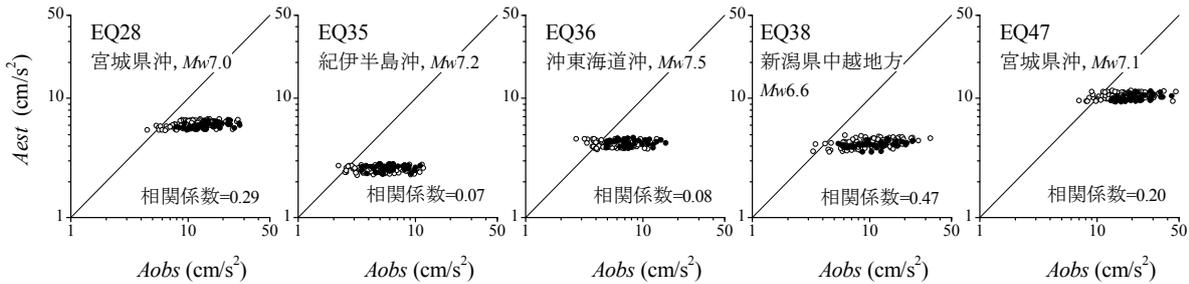


図-18 加速度最大値の観測値と地盤増幅倍率を考慮しないで求めた推定値の関係 (○印は PS 検層の深さ 30m 未満の地点, ●印は 30m 以上の地点)

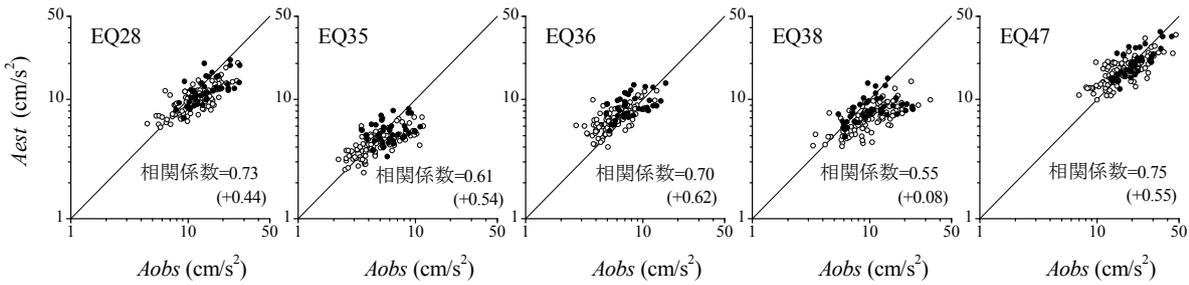


図-19 加速度最大値の観測値と  $Vs30ps$  を用いた推定値の関係 (カッコ内の数字は, 地盤増幅倍率を考慮しない場合の相関係数との差)

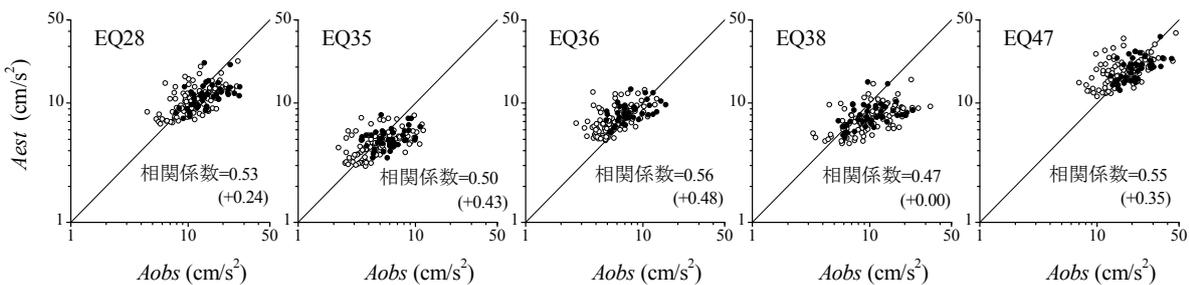


図-20 加速度最大値の観測値と  $Vs30mt$  を用いた推定値の関係 (カッコ内の数字は, 地盤増幅倍率を考慮しない場合の相関係数との差)

$Vs30mt$  を用いて地盤の増幅倍率を考慮した場合の速度最大値の推定値と観測値の関係をそれぞれ図-22, 図-23 に示す。EQ28 を除いて,  $Vs30$  を用いた地盤増幅倍率を考慮することによって, 相関性は大きく向上することが分かる。ただし, 加速度最大値の場合と同様に,  $Vs30mt$  よりも  $Vs30ps$  を用いた方が相関性は高いことが分かる。

以上より, 上記の方法で求めた加速度最大値, 速度最大値の推定値は,  $Vs30$  を利用することにより, その推定精度は向上することが分かる。しかし, L 字形アレイ微動観測から得られる  $Vs30mt$  を用いた場合は,  $Vs30ps$  を用いた場合より, 相関係数にして 0.1~0.3 程度, 相関性が低いことが分かる。

なお,  $Vs30ps$  を用いた方が相関性が高い理由として,  $Vs30ps$  を用いて作成した地盤増幅倍率の推定式を利用していることが考えられる。以下の式は, 提

案式(5), (6)と同じ手順で,  $Vs30mt$  を用いて作成した地盤増幅倍率と  $Vs30mt$  の関係式である。

$$\log AFA = -0.54 \log Vs30mt + 1.51 \pm 0.14 \quad (12)$$

$$\log AFV = -0.48 \log Vs30mt + 1.34 \pm 0.12 \quad (13)$$

上式を用いて, 図-20, 図-23 と同様に観測値と  $Vs30mt$  を用いた推定値の比較も行った。その結果は,  $Vs30mt$  から得られた関係式を用いているにも関わらず, 図-20, 図-23 とほぼ同じ分布で, 相関係数もほぼ同じであった。したがって, 振幅最大値の推定には,  $Vs30mt$  よりも  $Vs30ps$  の方が現時点では適用性が高いといえる。

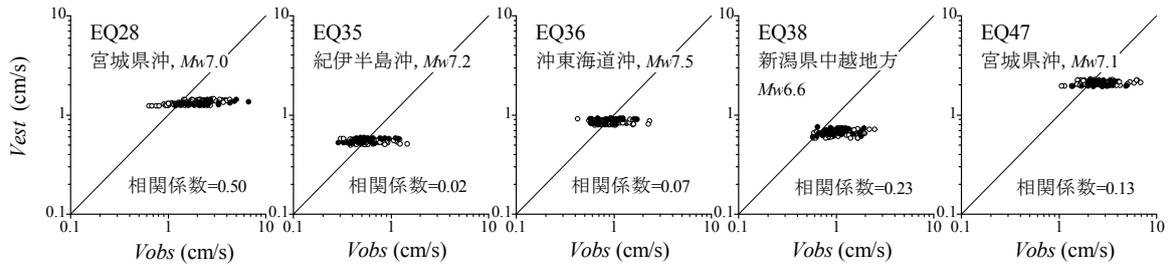


図-21 速度最大値の観測値と  $V_{s30}$  を考慮しないで求めた推定値の関係 (カッコ内の数字は、地盤増幅倍率を考慮しない場合の相関係数との差)

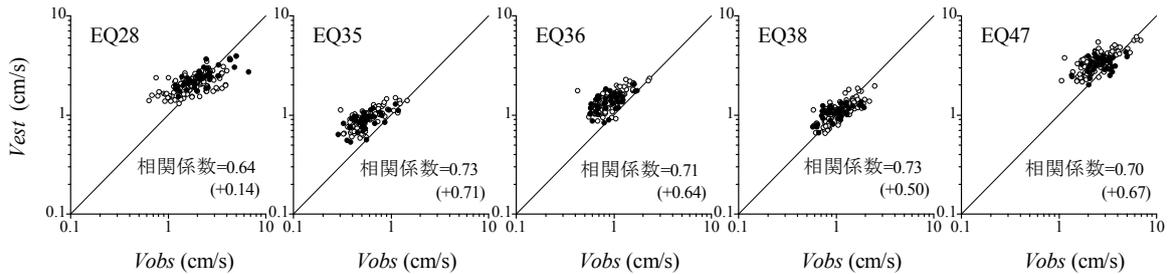


図-22 速度最大値の観測値と  $V_{s30ps}$  を用いた推定値の関係 (カッコ内の数字は、地盤増幅倍率を考慮しない場合の相関係数との差)

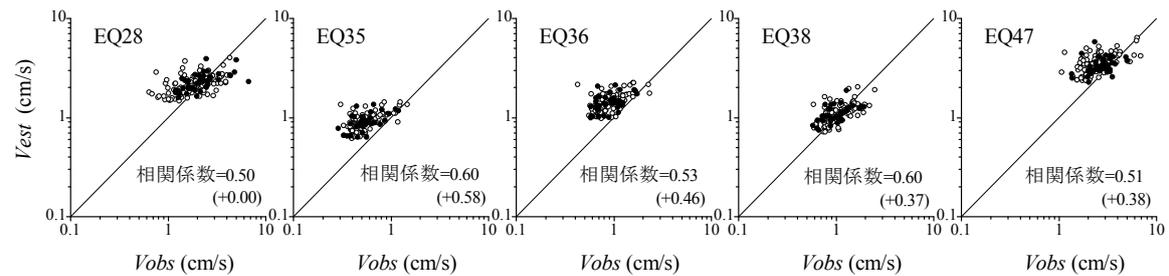


図-23 速度最大値の観測値と  $V_{s30mt}$  を用いた推定値の関係 (カッコ内の数字は、地盤増幅倍率を考慮しない場合の相関係数との差)

## 5. 結論

本論文では、横浜強震ネットワーク (Y-NET) の 150 地点の地震記録を用いて、表層 30m の平均 S 波速度  $V_{s30}$  と加速度最大値、速度最大値の増幅倍率の関係を検討し、 $V_{s30}$  と増幅倍率の関係式を提案している。また、検討例の少ない L 字形アレイ微動観測を用いる  $V_{s30}$  の推定方法の精度の検討を Y-NET における 150 地点の PS 検層結果を用いて検討している。最後に、 $V_{s30}$  を用いた加速度最大値、速度最大値の簡便な推定方法を提案し、その適用性の検討を行っている。本研究で得られた結論を列挙すると以下の通りである。

(1) 地震記録から得られる加速度最大値の増幅倍率  $AFa$ 、速度最大値の増幅倍率  $AFV$  と  $V_{s30}$  の相関性は、モーメントマグニチュード  $M_w$  に依存し、 $M_w$

が大きくなるほど、相関性は高くなる傾向が見られる。

(2)  $AFa$ ,  $AFV$  と  $V_{s30}$  の相関係数が 0.7 程度を示した  $6.6 \leq M_w \leq 7.5$  の 5 地震を用いて  $V_{s30}$  と  $AFa$ ,  $AFV$  の関係式を提案している。

(3) L 字形アレイ微動観測から得られた  $V_{s30mt}$  と PS 検層から得られた  $V_{s30ps}$  との比  $V_{s30mt}/V_{s30ps}$  の平均値は約 1、標準偏差は 0.25 であった。

(4) 提案した加速度、速度最大値の推定方法において、 $V_{s30}$  を用いた地盤増幅倍率を考慮することにより、最大値の推定精度は大きく向上することが分かった。

(5) 加速度最大値の推定値と観測値の相関係数は、 $V_{s30ps}$  を用いた場合で 0.55~0.75、 $V_{s30mt}$  を用いた場合で 0.47~0.56 を示し、 $V_{s30ps}$  を用いた場合に比べ  $V_{s30mt}$  を用いた場合では推定精度が低いことが分かった。

(6) 速度最大値の推定値と観測値の相関係数は、 $Vs30ps$  を用いた場合で 0.64~0.73,  $Vs30mt$  を用いた場合で 0.50~0.60 を示し、加速度と同様に、 $Vs30ps$  を用いた場合に比べ  $Vs30mt$  を用いた場合では推定精度が低いことが分かった。

現時点では、L 字形アレイ微動観測から得られる  $Vs30$  を用いた加速度最大値、速度最大値の推定精度は決して高くはない。これは、L 字形アレイから得られる  $Vs30$  の推定精度に起因している。L 字形アレイはその実施の容易性において優れている。今後、L 字形アレイ微動記録から、より精度よく  $Vs30$  を推定するための解析手法の開発が課題である。

**謝辞：** 常時微動観測の実施におきましては、芝浦工業大学学部生木曾恵介君、須藤亮君、濱崎綾君、福田託朗君（いずれも観測当時）の協力を得ました。本研究では、横浜市で観測された高密度強震計ネットワークで観測された地震波形データ、および防災科学技術研究所の F-net Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果を利用しました。今回使用した PS 検層データは、横浜市総務局災害対策室より提供して頂きました。本研究の一部は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構、および文部科学省科学研究費の補助を受けて実施したものです。ここに記して感謝申し上げます。

**参考文献**

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 447 号, pp.51-56, 1993.
- 2) 内閣府: 地震被害想定支援マニュアル (2001 改訂版), <http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>
- 3) 久保智弘, 久田嘉章, 柴山明寛, 大井昌弘, 石田瑞穂, 藤原広行, 中山圭子: 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化, および, 面的な早期地震動推定への適用, 地震 2, 56, pp. 21-37, 2003.
- 4) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 5) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 442 号, pp. 71-78, 1992.
- 6) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Oki, Japan Earthquake, Proceedings of the Ninth Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol.3, pp. 85-90, 1994.
- 7) 末富岩雄, 吉田望, 清水善久, 中山涉, 山崎文雄, 阿部晋, 鈴木誠: 横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討—卓越周期との関係—, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 157-160, 1999.
- 8) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの地震記録

- に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 1 号, pp. 11-22, 2006.
- 9) 室野剛隆, 芦谷公稔: 早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定方法の開発, 鉄道総研報告, 第 16 巻, 第 8 号, pp. 7-12, 2002.
- 10) 高秀秀信, 阿部進, 中島徹也, 乾晋: 高密度強震計ネットワークを利用した深部地下構造調査, 日本地震工学会論文集, 第 2 巻, 第 2 号, pp. 23-40, 2002.
- 11) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, Bulletin, Earthquake Research Institute, Vol.35, pp. 415-456, 1957.
- 12) Capon, J. : High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proceedings, IEEE, 57(8), pp. 1408-1418, 1969.
- 13) Lacos, R.T., Kelly, E.J. and Toksoz, M.N. : Estimation of seismic noise structure using arrays, Geophysics, Vol.34, No.1, pp. 21-38, 1969.
- 14) Horike, M. : Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, J. Phys. Earth., 33, pp. 59-96, 1985.
- 15) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 443 号, pp. 65-71, 1993.
- 16) 若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.
- 17) 長尾毅, 紺野克昭: 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No.696, I -58, pp. 225-235, 2002.
- 18) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No.647, I -51, pp. 415-423, 2000.
- 19) 紺野克昭: 地下構造推定に用いる 2 点間および 3 点間空間自己相関法に関する理論的検討, 土木学会論文集, No.654, I -52, pp. 367-375, 2000.
- 20) 年縄巧, 西田秀明, 翠川三郎, 阿部進: 横浜市高密度強震計ネットワーク観測点における強震動と常時微動のスペクトル特性の比較, 土木学会論文集, No.640, I -50, pp. 193-202, 2000.
- 21) 気象庁: 震度データベース検索, [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo\\_db/shindo\\_index.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html)
- 22) 防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網(F-net)データ, <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>
- 23) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 523 号, pp. 63-70, 1999.
- 24) 日本建築学会: 地盤震動—現象と理論—, pp. 380-386, 丸善, 2005.
- 25) 鈴木誠之, 紺野克昭, 長尾毅: 表層 30m の平均 S 波速度と地盤増幅率の関係, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I 部門, CD-ROM, 2004.
- 26) 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報告集, 第 439 号, pp. 81-87, 1992.
- 27) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地

盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集,  
No. 489, I -27, pp. 251-260, 1994.

(2006.5.22 受付)

- 28) 時松孝次, 新井洋: レイリー波とラブ波の振幅比  
が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響,  
日本建築学会構造系論文集, 第 511 号, pp. 69-75,  
1998.

## ESTIMATION OF AVERAGE S-WAVE VELOCITY OF GROUND USING MICROTREMORS AT STRONG-MOTION SITES IN YOKOHAMA

Katsuaki KONNO, Takahiro SUZUKI, Yasuhiro KAMATA and Takashi NAGAO

First, Average S-wave velocity in the uppermost 30 m ( $V_{s30}$ ) obtained from PS-logging data and site amplification factors for peak acceleration and velocity derived from strong motion records are compared at the dense strong-motion network sites in Yokohama (Y-NET). Next, a simple method for estimating  $V_{s30}$  is examined at Y-NET sites. This method involves placing 3 sensors in the shape of the letter 'L' for simultaneous microtremor observation. Finally, a method to estimate peak ground acceleration and velocity using  $V_{s30}$  is proposed and its applicability is investigated.