

第4章 地震動分布の把握

4.1 長周期地震動と地盤構造との関係

本項の論文は、以下の論文として出版されたものを転載している。

(武藤大介・勝間田明男, 2015: 長周期地震動と地盤構造との関係について, 気象研究所研究報告, **66**, 1-14, doi:10.2467/mripapers.66.1)

長周期地震動と地盤構造との関係について

武藤大介*・勝間田明男** (気象研究所地震火山研究部)

* 現所属：文部科学省

** 現所属：気象研究所地震津波研究部

Relations between long-period ground motions and subsurface structures

by

Daisuke Muto* and Akio Katsumata**

Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

**Present affiliation: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Tokyo, Japan*

***Present affiliation: Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan*

(Received March 14, 2014; Accepted May 1, 2015; Published March 2, 2016)

Abstract

It is important to grasp ground motion distributions right after a major earthquake. Ground motion is very sensitive to subsurface structure, but because seismic stations are sparsely distributed, it is necessary to estimate ground motion distributions at sites with no stations from subsurface structure data at those sites and ground motions data recorded only at surrounding stations. In this study, we investigated relationship between ground motion and subsurface structure to estimate ground motion distribution applying corrections according to the subsurface structure differences. Maximum velocity responses with a period of 3 s or longer were correlated with the first natural period of the deep subsurface structure, but maximum velocity responses with a shorter period correlated more strongly with the average S-wave velocity in the upper 30 m (*AVS30*) than with the first natural period. However, the ratios of maximum velocity responses at one station to those at a nearby station often differed for different earthquakes, indicating that there is limitation in estimating the ratios of maximum velocity responses only from the subsurface structures. Moreover, we did not detect any notable correlations between the subsurface structures and the durations of the velocity responses. Although these results were obtained by using relative velocity responses, similar results were obtained when pseudo-velocity responses were used.

1. はじめに

顕著な地震が発生した際に、その地震動の大きさを迅速かつ正確に把握することは、被害の把握や効率的な救援・救助活動にとって極めて重要である。

おおそ周期 0.1 秒からせいぜい 2 秒程度の強震動の大きさを評価する手法としては、気象庁震度（以下、震度）、地表面最大加速度（PGA: peak ground acceleration）、地表面最大速度（PGV: peak ground velocity）などが知られており、特に震度は一般にも広く知られてい

る。震度は、平成の市町村合併以前の旧自治体に各 1 箇所以上（全国に約 4300 点）設置されている震度計で観測され、各地の震度は地震発生から概ね 5 分程度で気象庁から発表される。また、いずれかの震度計で最大震度 5 弱以上の揺れを観測する地震が発生した場合、おおむね 30 分以内に推計震度分布図を公表している（気象庁、2008）。これは、観測された計測震度をもとに、地盤の増幅度を考慮して、震度を面的に補間したものである。推計震度分布図により、震度計が設置されていない地域も含めて強震動を面的に把握することができる。

一方、おおそ周期 2 秒以上の長周期地震動の大きさを評価するには、地震動が構造物に与えるエネルギーを表す最大速度応答（たとえば、大崎、1994）がよく

Corresponding author: Akio Katsumata
Meteorological Research Institute
1-1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan
E-mail: akatsuma@mri-jma.go.jp

用いられる（たとえば、Jennings, 2003）。最大速度応答は加速度波形から計算可能で、独立行政法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）や気象庁が整備した全国の約 2400 点で算出可能である。従来、気象庁では長周期地震動の観測値について発表していなかったが、2013 年から、気象庁の強震観測網で観測された速度波形から求められた最大速度応答をホームページなどに公表している。しかし、たとえば関東地方及びその隣接県において、防災科研と気象庁の強震観測網を合わせても、観測点は平均して 12 km 間隔でしかなく、任意の地点の長周期地震動を知ることができない。そこで、推計震度分布図と同様に、観測値から長周期地震動の大きさを面的に補間して発表される情報が望まれる。

一般に地震動の大きさや継続時間は、地震の規模、震源距離（または断層面からの距離）、地盤構造（以下、構造）の 3 つに依存する。特に基盤地震動については表層地盤構造の影響が小さいので、地震の規模及び震源と観測点の位置関係で記述できる（たとえば、湯沢・工藤、2011）。

一方で、地表における地震動は観測点周辺の構造の影響を大きく受けると考えられる。そこで、たとえば片岡・佐藤（2007）は、PS 検層データをもとに地盤をいくつかの種類に分類した上で、地盤補正係数を求めている。また、片岡・他（2008）は、観測点毎に、観測記録の距離減衰式からのずれから全国の地点補正倍率を求めている。しかしこれらの方法では、観測点のない場所の地震動を推定するには不向きである。そこで、全国を網羅された構造をもとに、観測点のない場所の地震動を推定する方法を検討する必要がある。

周期が短いほど局所的な構造の影響を受け、周期が長いほど大規模な構造の影響を受けやすくなる傾向がある。そのため、周期が十分大きな帯域については、大まかな構造さえ分かっているならば、精度の高い面的補間（任意の地点の地震動の推定）ができることが期待される。そこで、既知の様々な構造を用いることによって、どの程度高い精度で地震動を推定できるかを調査した。

2. 調査対象とデータ

2.1 調査対象

長周期地震動の大きさを表す指標としては速度応答が広く用いられており、本論でもこれを用いた。速度応答の計算は、大崎（1994）によった。

各観測点において、あらかじめ定めた複数の周期における最大速度応答（速度応答の絶対値の時系列を取ったときの最大値）を求めた。

最大速度応答と構造との間に強い相関が認められれば、地表に離散的に位置する観測点の最大速度応答をもとに、構造を用いて、周囲の最大速度応答を推定することが可能となる。そこで、最大速度応答と構造との間での相関を調査した。

一方で、一般に長周期地震動は短周期の強震動に対

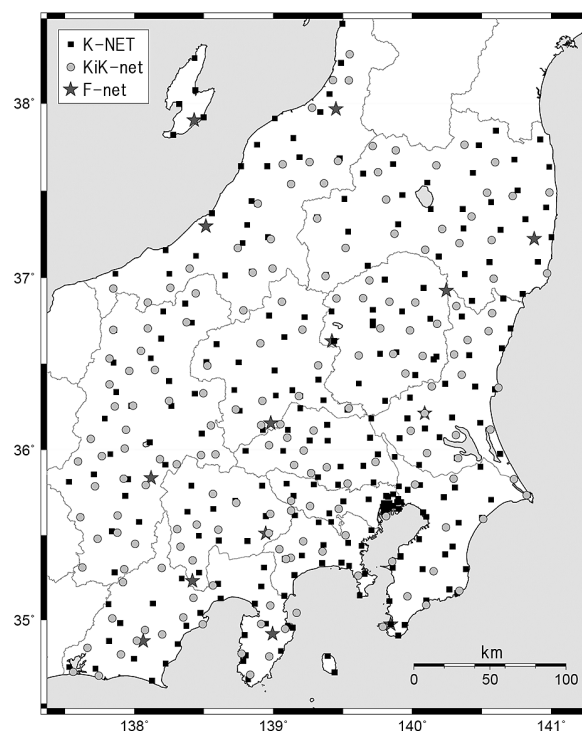


Fig. 1 Locations of the 444 stations (K-NET, KiK-net, and F-net) used in this study.

して継続時間が長いことが知られている。構造物への影響や人間の感じ方は、ある瞬間における速度応答の値（最大速度応答）だけでなく、その継続時間にも左右される。そこで、継続時間と構造との間での相関を調査した。継続時間の求め方は 4 節で述べる。

2.2 観測点と対象地震

地震動データは、気象庁強震観測網及び防災科研の強震観測網（K-NET, KiK-net）（Okada *et al.*, 2004）による観測波形を用いた。調査対象は地表における地震動に限り、工学的基盤上の基盤補正も行わないことにしたので、KiK-net のデータも地表のものに限定して用いた。

地震動の継続時間について調査する際は、2.5 節で述べる連続収録している防災科研の広帯域地震観測網（F-net）の観測波形を併せて用いた。

ここでは、観測点が概ね均等に配置されており、かつ大規模な沖積平野から山岳地帯まで多様な地形や構造を持つ関東地方を中心に調査を行った。用いた観測点は、関東甲信越 1 都 9 県と、静岡県、福島県の 444 点（K-NET 256 点、KiK-net 174 点、F-net 14 点）とした（Fig. 1）。

対象とするイベントは、2000 年以降に発生した M_w 6.3 以上の地震とし、関東地方で長周期成分について高い S/N 比が得られた 20 地震に限った（Table 1）。対象地震は、内陸地殻内の地震（深さ 20 km 以浅）、海洋プレート内の地震、海域のプレート境界の地震の 3 つに分類した。対象地震の震央分布と発震機構解（気象庁 CMT 解）を Fig. 2 に示す。

Table 1. Earthquake list. JMA CMT is referred to as M_w . Earthquake types are inland crust (Crust), intraplate (Intra), and interpolate (Inter). The circle in Duration indicates an event for which duration data at more than or equal to 15 stations were available (see Section 4.2). Model refers to references describing the source process model used: QJS, Seismological and Volcanological Department, JMA (2009); CCEP, Earthquake Prediction Information Division, JMA (2010). We regarded Event No. 13 as a point source.

No.	Origin Time (JST)	Area	M_w	Type	Duration	Model
1	2003/05/26 18:24	Northern Miyagi Pref.	7.0	Intra	○	Kikuchi and Yamanaka
2	2004/09/05 19:07	Off Kii Peninsula	7.3	Intra		Yamanaka
3	2004/09/05 23:57	Off Kii Peninsula	7.5	Intra		Yamanaka
4	2004/10/23 17:56	Mid Niigata Pref.	6.7	Crust	○	JMA (2005)
5	2004/10/23 18:34	Mid Niigata Pref.	6.4	Crust	○	JMA (2005)
6	2005/08/16 11:46	Off Miyagi Pref.	7.1	Inter	○	Yamanaka
7	2007/03/25 09:42	Off Noto Peninsula	6.6	Crust		QJS (2009)
8	2007/07/16 10:13	Off Southern Niigata Pref.	6.7	Crust	○	JMA (2009)
9	2008/05/08 01:45	Far East off Ibaraki Pref.	6.8	Inter		Yamanaka
10	2008/06/14 08:43	Southern Iwate Pref.	7.0	Crust		JMA (2010)
11	2008/07/19 11:39	East off Fukushima Pref.	6.9	Inter		Yamanaka
12	2009/08/11 05:07	Southern Suruga-Bay	6.3	Intra	○	CCEP (2010)
13	2009/08/13 07:49	East off Hachijojima Island	6.5	Intra		(Epicenter)
14	2011/03/09 11:45	Far East off Miyagi Pref.	7.3	Inter		Muto <i>et al.</i> (2014b)
15	2011/03/11 14:46	Far East off Miyagi Pref.	9.0	Inter	○	Yoshida <i>et al.</i> (2011)
16	2011/03/11 15:15	Far East off Ibaraki Pref.	7.7	Inter	○	Muto <i>et al.</i> (2014b)
17	2011/03/12 03:59	Mid Niigata Pref.	6.3	Crust	○	JMA
18	2011/04/07 23:32	East off Miyagi Pref.	7.1	Intra	○	Muto <i>et al.</i> (2014b)
19	2011/04/11 17:16	Eastern Fukushima Pref.	6.7	Crust	○	Muto <i>et al.</i> (2014a)
20	2011/07/10 09:57	Far East off Miyagi Pref.	7.0	Intra		Muto <i>et al.</i> (2014b)

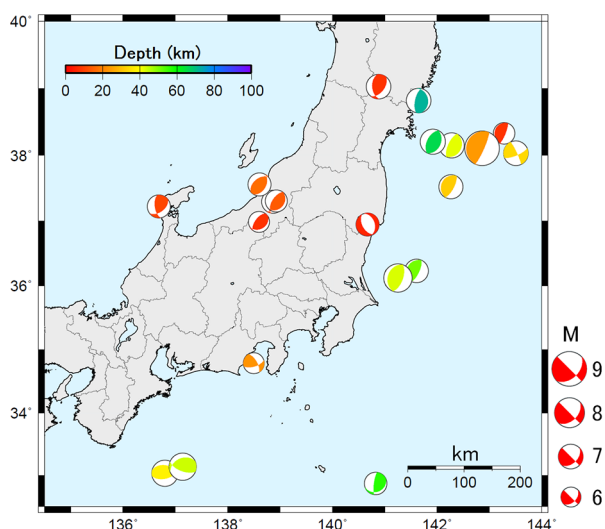


Fig. 2 Locations of the epicenters of the earthquakes used as data sources. The size of each focal mechanism diagram (JMA CMT) indicates the event magnitude, and the color indicates the focal depth.

2.3 速度応答について

速度応答の計算では、減衰定数を5%と設定した。

一般に速度応答と呼ばれているものは、ある固有周期を持つ構造物上部の地表に対する揺れに相当する相対速度応答と、空間内での揺れに相当する絶対速度応答に分けられる。本論では主として相対速度応答について調査しているが、両者の違いが結論に影響するかどうかについても調査した。ただし絶対速度応答を直接求める手法は一般的でないことから、ここでは絶対加速度応答を固有角振動数で除した擬似絶対速度応答(こ

れを単に擬似速度応答と言うことが多い。たとえば地盤工学会、1999。本論でも以下、擬似速度応答と言う)で検討を行った。結果については5.1節で検討する。

2.4 観測点方位

各地点の地震動を評価する際に、どの成分の波形を用いるかについて検討する。まず、ここで検討する長周期地震動の場合、上下動に対して水平動が大きいため、水平2成分の波形を用いる。その場合でも、(1) Radial 成分、(2) 水平2成分のうち最大振幅が大きい方、(3) 水平2成分の相乗平均、(4) 水平2成分の最大振幅の自乗和の平方根などいくつかの方法が考えられる。そこで2011年3月9日に発生した三陸沖の地震(No. 14)について、次の方法で調査した。

まず、各観測点において、方位角5度刻みで全方位について最大速度応答スペクトルを求めた。このうち、K-NETのIBR009観測点における結果をFig. 3に示した。色の違いは最大速度応答スペクトルを計算した方位を示している。上図は最大速度応答スペクトルであり、下図は周期ごとの全方位の相乗平均から見た各方位の最大速度応答の比を示している。どの方位で最大速度応答が最大となるかは、周期によりまちまちである。

また、周期2、5、10秒において、最大速度応答が最大となる方位を求め、結果をFig. 4に示した。ここから、Radial 成分との関連を見いだすことはできない。また、近接する観測点同士でも方位はまちまちである。

以上のことから、ある観測点における最大速度応答を評価する際は、方位の影響を受けない値を用いることが望ましいといえる。ここでは、単に1成分のみを用いるよりも方向依存性を平均的に緩和することを目的に、上で挙げた(3) 水平2成分の相乗平均を用いる

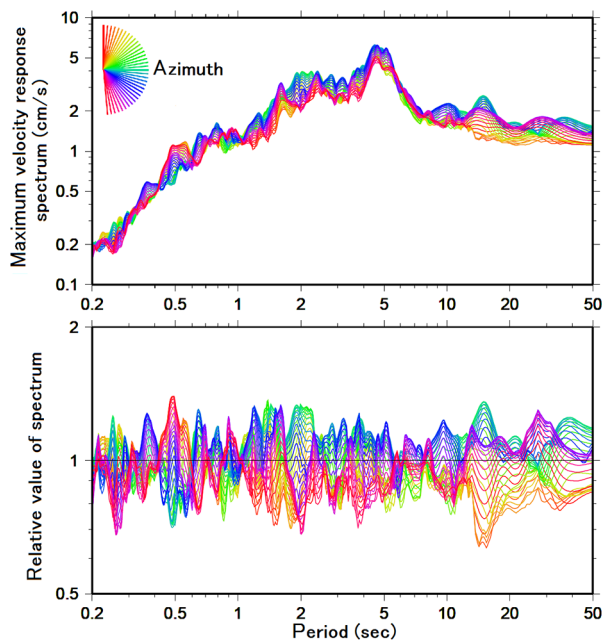


Fig. 3 Azimuthal variation of maximum velocity response spectrum. (Upper) The relative response spectra of the No. 14 event at station IBR009 calculated for every 5° of azimuth. (Lower) Value of the spectrum relative to the geometric mean according to period.

ことにした。

なお、ほとんどの観測点、周期において、方位による最大速度応答の違いは2倍未満である。この場合、(3) 水平2成分の相乗平均と、(4) 水平2成分の最大振幅の自乗和の平方根は、ほとんど差が生じないため、どちらで計算しても結果に大きな違いは生じないと考えられる。

2.5 波形収録時間の影響について

K-NET、KiK-net のデータはイベント収録であり、P 波の立ち上がり時刻以降に収録が開始された波形や、S 波が完全に収束する前に収録が終わった波形が多数ある。そこで、波形の収録時間が不十分な場合、最大速度応答にどの程度影響があるかを調査する必要がある。

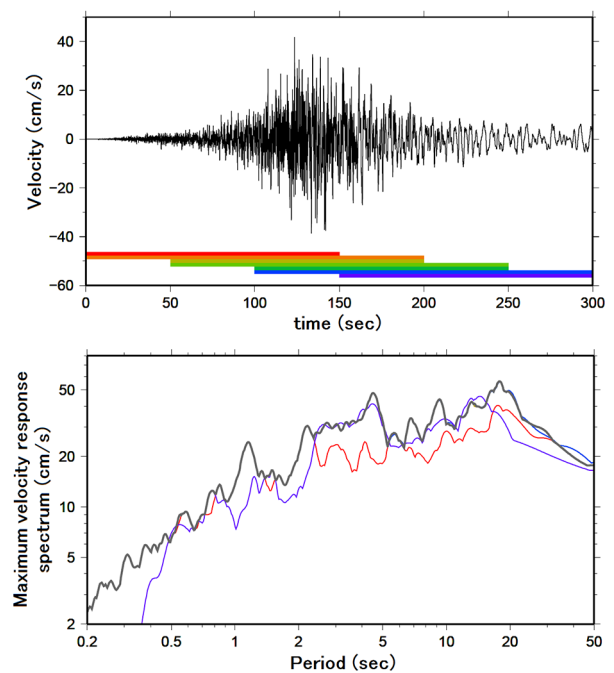


Fig. 5 Relationships between maximum velocity response spectra and the time windows used to calculate each spectrum. (Upper) Unfiltered waveform of the No. 15 event at CHBH11 station (KiK-net). The colored bars at the bottom show the time windows used to calculate velocity response spectra. (Lower) The Calculated maximum velocity response spectra for each time window (identified by color). The gray line is the spectrum for the whole waveform.

ここでは、P 波の立ち上がり時刻以前から十分な時間収録されている波形をいくつか選び、その波形のうちある特定の時間のデータから最大速度応答スペクトルを求めた。たとえば、Fig. 5 は平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (No. 15) における KiK-net の CHBH11 観測点 (地表) の南北成分の波形について、タイムウィンドウを変えながら最大相対速度応答スペクトルを求めた結果である。波形の図の下部に示した線は、最大速度応答スペクトルを求めるのに用いた波形の部分を示し、色を下図の最大速度応答スペクトル

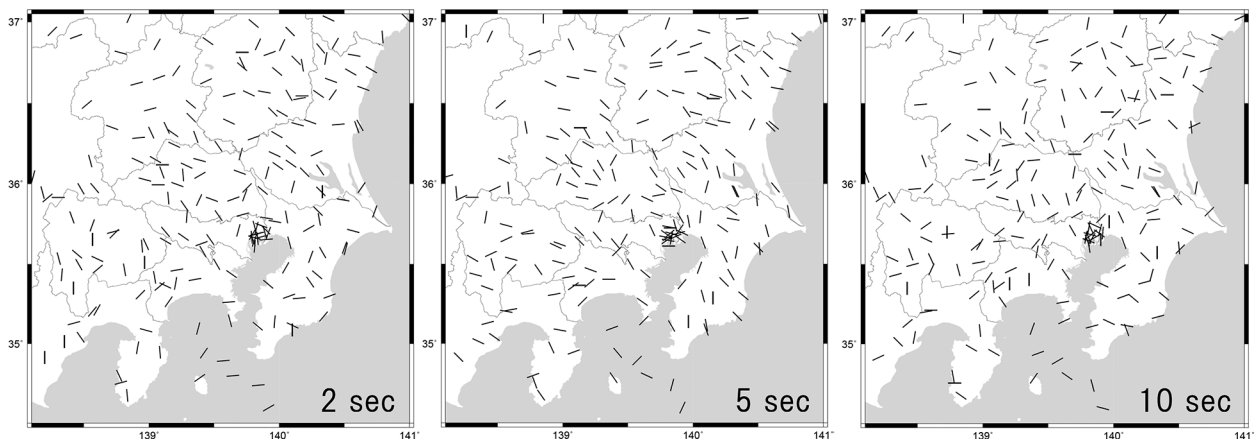


Fig. 4 The azimuths of maximum relative velocity responses of the natural period of 2, 5, and 10 s for the event No. 14. The relative velocity responses were calculated at every 5° of azimuth at all stations.

と一致させてある。灰色の太線は0–300秒まで全ての波形を使って求めた応答スペクトルである。これを見ると、時刻が100–200秒の部分の波形さえあれば、正しい最大速度応答スペクトルが求められることが分かる。異なる観測点や地震でも同様に検討を行った結果、最大振幅を記録した時刻を中心に大振幅（概ね最大振幅の2分の1以上）の区間を全て含む波形を用いれば、それ以外の区間がなくとも、最大速度応答を正しく求められることが分かった。

このことから、K-NET等のイベント収録であっても、S波の大振幅の区間が概ね収録されていると考えられる波形については、たとえP波部分が欠損していても、本調査で使用して差し支えないと考えた。

継続時間を求める際は、P波到達時刻から収録されているもののみを調査対象とした。収録終了時刻については4.2節で述べる。

2.6 構造

最大速度応答または継続時間との間での相関を調べる構造として、以下の3つの条件に当てはまるものを選んだ。すなわち、

- (1) ほぼ全国一律のデータがある、
- (2) データの空間分解能が観測点密度よりも十分密である、
- (3) 数値の大小で表されるデータである、

である。(1)については、将来全国を対象に長周期地震動の面的補間をすることを見据えているためである。また(3)の条件があるため、たとえば微地形区分の直接の使用は除外される。

ここでは以下の3つの構造を調査対象とした(Fig. 6)。

- (a) 深さ30mの平均S波速度($AVS30$) (松岡・若松, 2008)
- (b) 深部地盤構造の一次固有周期 (横田・他, 2011)
- (c) 地表におけるP波速度 (Matsubara and Obara, 2011)

3. 最大速度応答

3.1 調査方法

まず、2節で述べたとおり、K-NET及びKiK-netの波形記録から各観測点における最大相対速度応答を求める。周期は、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、7.0、10.0(秒)の10通りとした。擬似速度応答でも同じ調査をしているが、ここでは最大相対速度応答として記述する。

調査対象とした全地震について、各周期の最大速度応答を求めた。ここで、ある観測点 i の構造(たとえば $AVS30$)を G_i 、地震 e における周期 T 秒での最大速度応答を S_{eTi} とする。

まず、距離20km以内の観測点(以下、隣接する観測点と言う)の組 (i, j) を探す。また、地震によるすべり域の端から観測点 i または j までの水平距離のうち小さいほうが、 i, j の観測点間距離の10倍未満である場合は、調査対象から除外した。すべり域は、気象庁または菊池・山中もしくは山中(EIC/NGY地震学ノート)による震源過程解析結果をもとに、断層面上で最も大きくすべった部分の3分の1以上のすべりが推定された領域とした。

このように選ばれた (i, j) の組において、 $\log(G_j/G_i)$ と $\log(S_{eTj}/S_{eTi})$ との関係を調べる($\log$ は常用対数を表す。以降も同じ)。たとえば2011年3月9日の三陸沖の地震(No. 14)において、隣接する観測点の組全てについて、周期5秒での最大速度応答の比 $\log(S_{eTj}/S_{eTi})$ ($e=14$, $T=5.0$)と深部地盤構造の一次固有周期の比 $\log(G_j/G_i)$ との関係をFig. 7に示した。この例では正の相関が認められ、深部地盤構造の一次固有周期が大きくなるほど最大速度応答も大きくなることが分かる。このように $\log(G_j/G_i)$ と $\log(S_{eTj}/S_{eTi})$ の相関係数を各地震($1 \leq e \leq 20$)、各周期($0.5 \leq T \leq 10$)について求めた。相関が強いほど、最大速度応答は構造に依存することを表す。

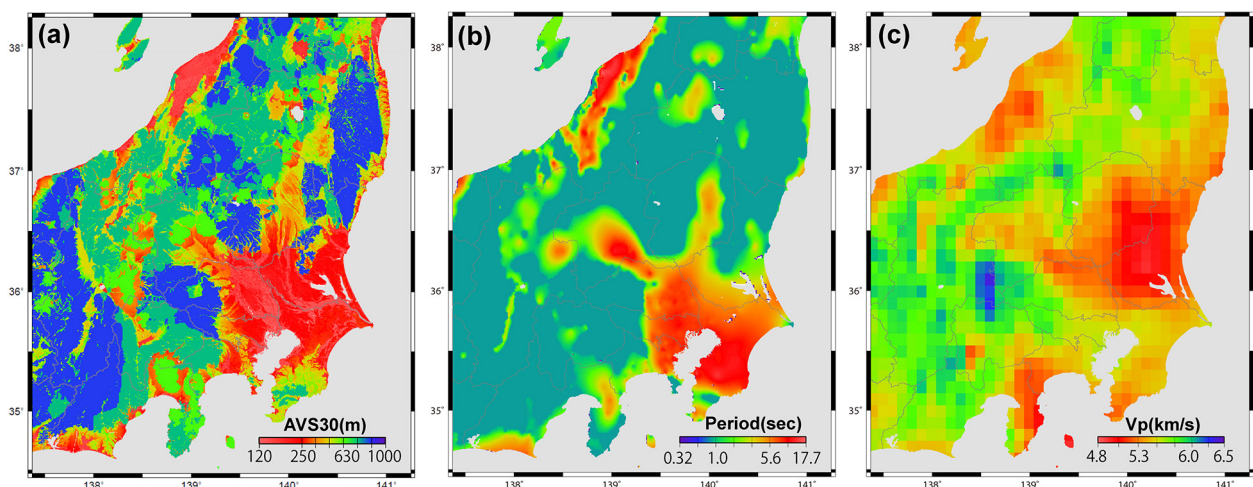


Fig. 6 Subsurface structures in the study area. (a) Average S-wave velocity of the upper 30 m ($AVS30$; Matsuoka and Wakamatsu, 2008). (b) The first natural period of the deep subsurface structure (Yokota *et al.*, 2011). (c) P-wave velocity at ground level (Matsubara and Obara, 2011).

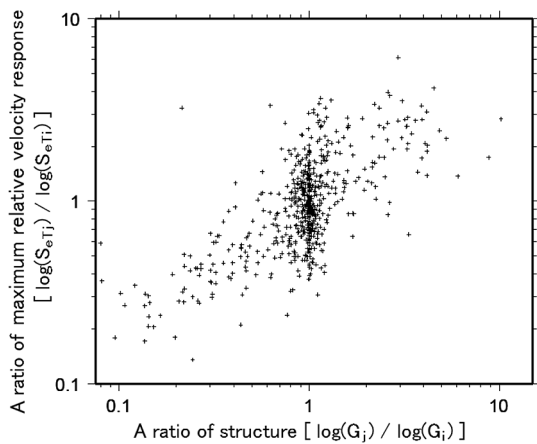


Fig. 7 Relationship between maximum velocity response (S_{en}) ratios and subsurface structure (the first natural period, G_i) ratios for pairs of nearby stations. Data for event No. 14 and a period of 5 s are shown.

3.2 結果

各地震・周期における最大速度応答の比 $\log(S_{en}/S_{en})$ と構造の比 $\log(G_i/G_i)$ との相関係数を Fig. 8 に示す。3 種類の構造のうち、概ね周期 3 秒未満では $AVS30$ との相関が最も強い（相関係数の絶対値が最も大きい）。一方、より長周期側では、深部地盤の一次固有周期との相関が強くなる傾向にある。

ただし内陸地殻内の 7 地震全てで周期 3 秒以上のときは深部地盤の一次固有周期との相関が最も強かったのに対し、海域の地震については長周期でも $AVS30$ との相関のほうが強い地震があった。特に 2009 年 8 月 11 日の駿河湾の地震 (No. 12) と、2009 年 8 月 13 日の八丈島東方沖の地震 (No. 13) については全ての周期で $AVS30$ との相関が最も強かった。

4. 継続時間について

4.1 調査方法

3 節と同様に、周期は、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、7.0、10.0 (秒) の 10 通りとした。各周期の相対速度応答の継続時間と、各構造との関係を求めた。継続時間の求め方は 4.2 節に示す。

調査対象とした全地震について、各周期の継続時間を求めた。ここで、ある観測点 i において、地震 e に

おける震央距離を X_{ei} 、周期 T 秒での継続時間を D_{en} とする。このとき、まず $\log(X_{ei})$ ($e = 1, 2, \dots, 20; i = 1, 2, \dots, n$) と $\log(D_{en})$ (同) との間での相関があることを確認し、両者の間で回帰式を得た。この回帰式を用いれば、各地震について、震央距離から継続時間を推定することができる。この推定値 D'_{en} とする。

次に、実際の継続時間と推定値との比の常用対数 $\log(D_{en}/D'_{en})$ を求め、これが各構造の常用対数 $\log(G_i)$ との間に相関があるかについて調査した。各地震、各周期について相関係数を求めた。相関が強いほど、継続時間は構造に依存することを表す。

4.2 継続時間の定義

継続時間はいくつかの定義を与えることができる。ここでは、(1) 震動によるエネルギーが収束するまで、(2) 一定以上の振幅が観測されている時間の 2 種類を採用した。

(1) 震動によるエネルギーが収束するまでの時間

震動によるエネルギーが収束するまでの時間を継続時間と見なすことができる。ここでは、Izutani and Hirasawa (1987) の方法を用いて、各帯域の速度応答時系列についてその継続時間を求めた。継続時間の開始は、S 波の到達時刻 ($t = 0$) とし、終了は規格化自乗積算曲線

$$H(t) = \int_0^t a(\tau)^2 d\tau / \int_0^{T_i} a(\tau)^2 d\tau \quad (1)$$

の値が 0.85 となる時刻 t とした。ここで $a(\tau)$ は速度応答時系列を指す。また、 T_i は振幅が十分に小さくなった時刻であり、ここでは P 波の到達時刻から 60 秒 (周期 2.5 秒以下の場合) または 120 秒 (周期 3 秒以上の場合) 以上経過した時刻 T に対して、

$$\int_0^{T-T_d} a(\tau)^2 d\tau \geq 0.95 \int_0^T a(\tau)^2 d\tau \quad (2)$$

を満たす最小の T を T_i と定義した。 T_d は 60 秒 (周期 2.5 秒以下の場合) または 120 秒 (周期 3 秒以上の場合) とする。

K-NET 等のイベント収録波形で、 T_i が求められないものについては、解析対象から除外した。

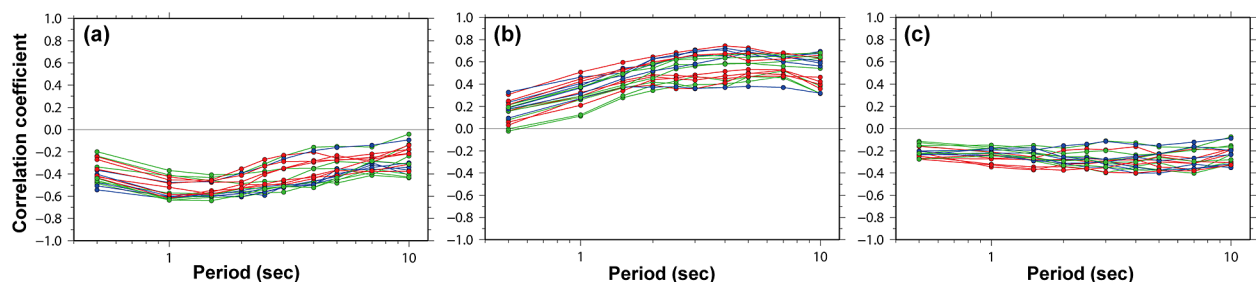


Fig. 8 Correlation coefficients between maximum velocity response and subsurface structure in relation to period for inland crust (red), intraplate (green), and interplate (blue) earthquakes. (a) $AVS30$ (Matsuoka and Wakamatsu, 2008), (b) the first natural period of the deep subsurface structure (Yokota *et al.*, 2011), and (c) P-wave velocity at the surface (Matsubara and Obara, 2011).

(2) 一定以上の振幅が観測されている時間

速度応答である一定値以上の振幅が観測されている時間を、ここでの継続時間と見なすことができる。継続時間の開始時刻は、基準となる振幅を初めて上回った時刻とする。また、対象とする周期の3波長分の時間にわたって基準振幅を上回らなかった場合、最後に基準振幅が上回った時刻を継続時間の終了時刻と見なす。その後再び基準振幅を上回れば、継続時間はその都度加算されることとする。

絶対応答と相対応答の違いはあるものの、ここでは気象庁が試行的に発表している「長周期地震動に関する観測情報」で用いられる長周期地震動階級の1に相当する振幅である、5 cm/sを仮に閾値として設定した。Table 1で○を付した地震は、全ての周期で、15観測点以上で閾値を超えた地震である（No. 1の地震の周期7秒の場合のみ、閾値を超えた観測点数は14）。これらの地震についてのみ調査を行った。

4.3 結果

継続時間の定義(1)を採用したとき、 D_{eti} と震央距離 X_{ei} との間にはっきりとした相関が認められる（Fig. 9）。また、震央距離で補正した継続時間 D'_{eti} と構造 G_i との相関係数をFig. 10に示す。短周期側では $AVS30$ との間に弱い負の相関が、深部地盤の一次固有周期との間に弱い正の相関が見られるが、いずれも長周期側では相関はほとんど認められない。

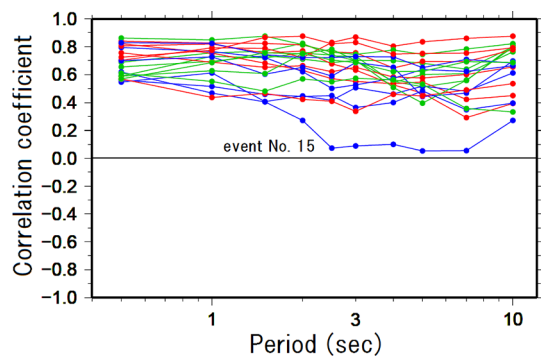


Fig. 9 Correlation coefficients between epicentral distance and duration (1) of the velocity response in relation to period. Duration (1) was defined by the method by Izutani and Hirasawa (1987). See Fig. 8 for definitions of the colors.

継続時間の定義(2)を採用したとき、 D_{eti} と震央距離 X_{ei} との間の相関係数は概ね $-0.4 \sim 0.0$ であり、相関があるとはいえない（Fig. 11）。しかしここでは相関があると見なした上で、震央距離による補正を行った。震央距離で補正した継続時間 D'_{eti} と構造 G_i との相関係数をFig. 12に示す。 $AVS30$ との間に弱い負の相関が、深部地盤の一次固有周期との間に弱い正の相関が認められる。内陸地殻内の地震に限っては、 $AVS30$ との間の負の相関、及び深部地盤構造の一次固有周期との間の正の相関がやや強い。

5. 議論

5.1 相対速度応答と疑似速度応答

3節では最大相対速度応答をもとに検討を行ったが、同様の検討を最大疑似速度応答でも行った。

Fig. 13は、平成16年（2004年）新潟県中越地震（No. 4）と平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（No. 15）における各観測点における相対速度応答スペクトルと疑似速度応答スペクトルの比較である。これを見ると、周期1秒付近においては、両者のスペクトルに大きな違いがない。より長周期側では、震央から近い観測点において、相対速度応答に比べて疑似速度応答の値が小さくなる傾向がある。

次に、3節と同様の調査を、疑似速度応答を用いて実施した。疑似速度応答を用いて構造との相関係数を

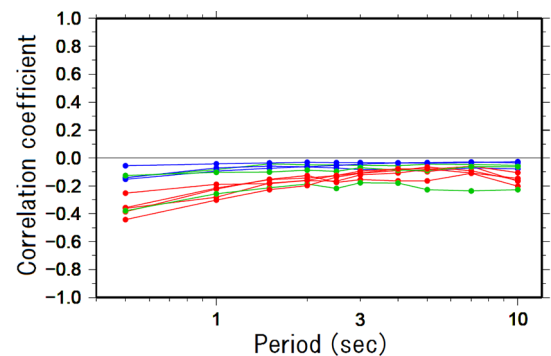


Fig. 11 Correlation coefficients between the epicentral distance and duration (2) of the velocity response. Duration (2) was obtained by using a threshold of 5 cm/s. See Fig. 8 for definitions of the colors.

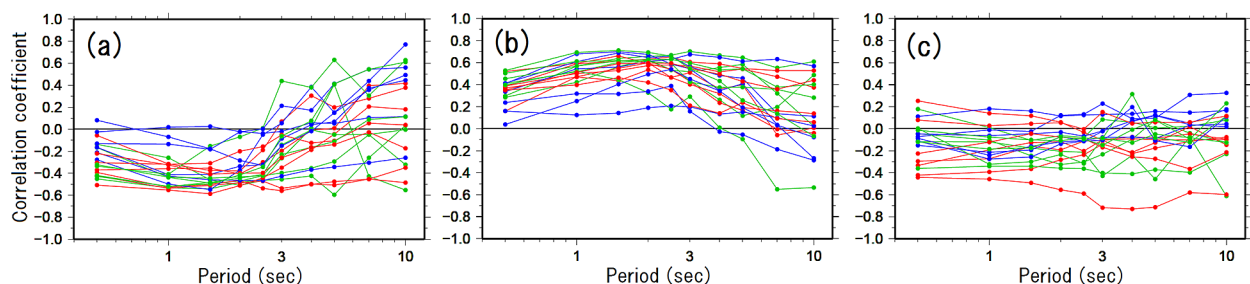


Fig. 10 Correlation coefficients between subsurface structures and the corrected durations (1) of the velocity response in relation to period. Duration was corrected for epicentral distance by using the results shown in Fig. 9. (a) $AVS30$ (Matsuoka and Wakamatsu, 2008), (b) the first natural period of deep subsurface structure (Yokota *et al.*, 2011), and (c) P-wave velocity at the surface (Matsubara and Obara, 2011). See Fig. 8 for definitions of the colors.

求めた結果を Fig. 14 に示す。相対速度応答を用いた調査結果 (Fig. 8) と同擬似速度応答 (Fig. 14) を比較すると、*AVS30* との関係で、最大擬似速度応答を用いたほうが長周期側での相関が弱くなる傾向が見られる。しかし、それ以外は両者とも似た傾向を示している。また、短周期側では *AVS30* と、より長周期では深部地

盤構造の一次固有周期との間での相関が強いという結論も変わらない。

なお、擬似速度応答とは、絶対加速度応答を固有角振動数で除したもので、擬似的な絶対速度応答にあたる (大崎, 1994)。絶対速度応答は、慣性系空間に対する速度応答であり、その固有周期における相対速度応

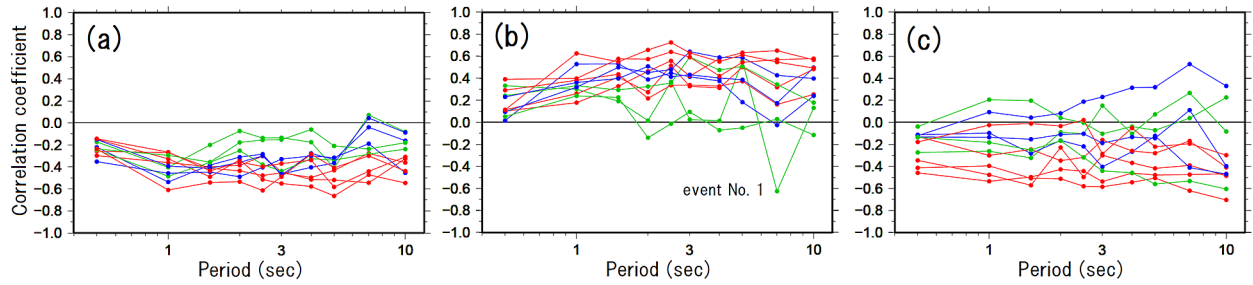


Fig. 12 Correlation coefficients between subsurface structure and the corrected duration (2) of the velocity response. Duration was corrected for epicentral distance by using the results shown in Fig. 11. (a) *AVS30* (Matsuoka and Wakamatsu, 2008), (b) the first natural period of deep subsurface structure (Yokota *et al.*, 2011), and (c) P-wave velocity at the surface (Matsubara and Obara, 2011). See Fig. 8 for definitions of the color.

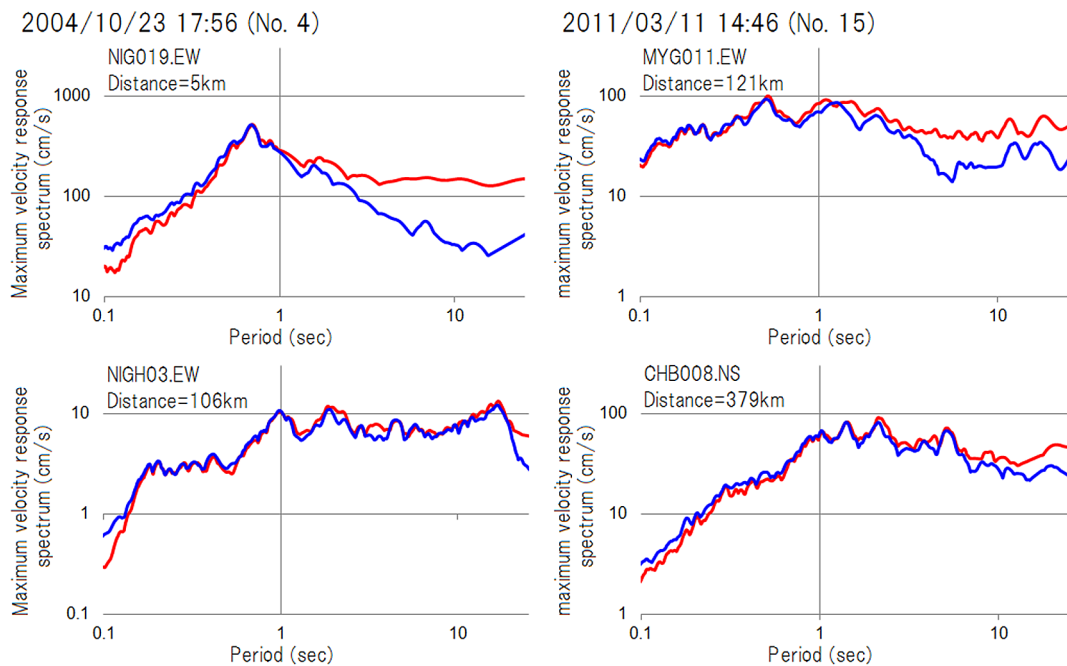


Fig. 13 Comparisons of maximum relative velocity response spectra (red lines) and maximum pseudo velocity response spectra (blue lines). Distances are epicentral distances.

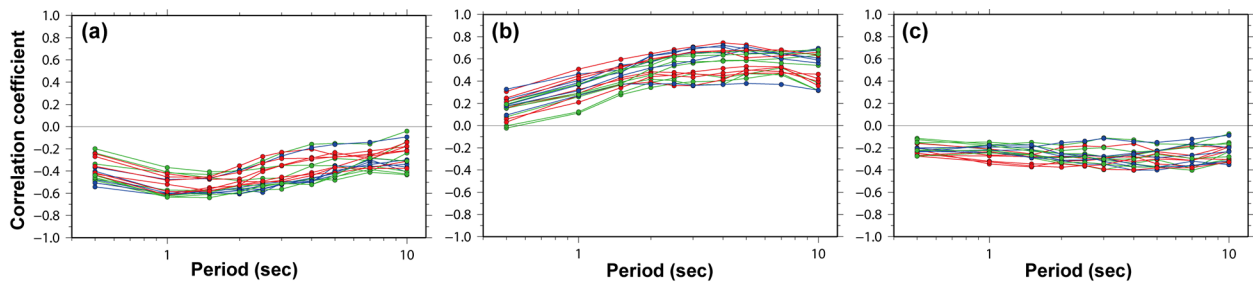


Fig. 14 Correlation coefficients between pseudo velocity responses and subsurface structures in relation to period. (a) *AVS30* (Matsuoka and Wakamatsu, 2008), (b) the first natural period of deep subsurface structure (Yokota *et al.*, 2011), and (c) P-wave velocity at the surface (Matsubara and Obara, 2011). See Fig. 8 for definitions of the colors.

答と、地動速度を足し合わせたものに相当する。ある固有周期における相対速度応答が地動速度よりも十分大きければ、相対速度応答と擬似速度応答は概ね一致する。固有周期よりも十分に短い周期の入力波が卓越する場合は、質点は空間に静止するため、絶対速度応答はゼロに近い値を取り、相対速度応答は地動速度と同程度の値を取るため、両者は一致しない。反対に、固有周期よりも十分に長い周期の入力波が卓越する場合は、絶対速度応答は地動速度に対応し、相対速度応答はゼロに近い値を取るため、両者は一致しない。

一般に、震央距離が同じならば、規模の小さな地震 ($M4 \sim 5$ 程度以下) は 1 秒未満の周期を持つ地震動の振幅が大きくなりやすく、地震の規模が大きくなるほど長周期地震動の振幅は大きくなる。 $M6 \sim 7$ 程度以上の地震では、周期数秒の地震動の加速度スペクトル振幅は、周期 0.5 ～ 1 秒程度の地震動の振幅と同程度となる (たとえば Anderson and Quaa, 1988; Anderson, 2003)。本論で検討した地震はすべて $M_w 6.3$ 以上で、周期数秒の地震動を励起しやすいものに限られる。また、本論で用いた波形は、震央距離が数十から数百 km と遠方で観測されたものが大半を占める。一般に長周期の波ほど距離減衰が小さくなるため (たとえば, Lay and Wallace, 1995)、遠方では短周期 (周期 1 秒程度以下) の地震動に比べて長周期 (周期数秒程度) の地震動が減衰しづらく残りやすい。

つまり、本論では、対象とした固有周期の範囲に重なる周期数秒程度の地震動が大きい波形を多数用いた調査であると言える。ゆえに、多くの観測点で、調査対象とした周期で相対速度応答と擬似速度応答の値が大きく変わらなかったと考えられる。それゆえ、相対速度応答と擬似速度応答で、構造との相関について結論は大きく変わらなかった。本論とは異なり、短周期の地震動が卓越する規模の小さな地震や、震源近傍の速度応答について検討する際は、相対速度応答と擬似速度応答 (あるいは絶対速度応答) の関係について、別途詳細に検討する必要があると考えられる。

5.2 構造との相関について

(1) 最大速度応答の相関

3 節では、最大相対速度応答は、概ね 3 秒を境に短周期側で $AVS30$ と、長周期側で深部地盤構造の一次固有周期との相関が強いことが明らかになった。

基盤における地震動から見た地表の地震動の増幅度 (地盤増幅度) を求める際、たとえば Joyner and Fumal (1984) は、表層地盤の S 波速度を用いている。この際、地表地盤の S 波速度を、対象とする周期の 4 分の 1 波長に相当する深さまでの地盤の平均 S 波速度としている。つまり、周期が長い波ほど、地表地盤の S 波速度を求める際、つまり地盤増幅度を求める際に、より深い構造が反映されることになる。 $AVS30$ はより浅い地盤の構造、深部地盤の一次固有周期はより深い地盤の構造を反映した値であるが、前者が短周期の最大速度応答と、後者が長周期の最大速度応答と相関が強いことは、それと整合する。

No.12 と No.13 の両地震は、いずれも海洋プレート内で発生した $M_w 6.5$ 以下の地震である。一般に海洋プレート内の地震は短周期の地震動が卓越し (たとえば、佐藤、2004)、規模の小さな地震でも短周期の地震動が卓越する。そのため、両地震の周期概ね 3 秒以上の相対速度応答は、単に短周期の地動速度を表している可能性があり (5.1 節参照)、見かけ上、 $AVS30$ との相関が強くなった可能性がある。

(2) 継続時間との相関

4 節では、継続時間の定義を (1) としたとき (Fig. 10) と (2) としたとき (Fig. 12) で、短周期側で大きな違いは見られなかったが、長周期側では違いが生じた。

定義を (2) とすると、震央距離が大きな地点では継続時間が 0 となる観測点が多く、調査には使用できない。ゆえに、必然的に震央距離が小さな観測点の比重が大きくなる。しかし、震央距離の小さな観測点では短周期の地動が卓越するため、長周期側では相対速度応答は単に地動速度を表している可能性がある (5.1 節参照)。つまり、定義 (2) を用いた調査結果の長周期側については、定義 (1) を用いた場合よりも信頼性が低い可能性があると考えられる。

5.3 構造を用いた速度応答の推定

(1) 最大速度応答の推定

Fig. 8 で、最大速度応答と、 $AVS30$ または深部地盤構造の一次固有周期との間に相関があることが分かった。そこで、全 20 地震、10 周期についてそれぞれ、隣接する観測点における最大速度応答の比 $\log(S_{eTj}/S_{en})$ と構造の比 $\log(G_j/G_i)$ との関係から導かれる回帰直線を求めた。回帰直線を

$$\log\left(\frac{S_{eTj}}{S_{en}}\right) = a \log\left(\frac{G_j}{G_i}\right) + b \quad (3)$$

と表したときの係数 a と b を Table 2 に示す。そして、各地震について得られた回帰直線の傾きと切片の平均値を用いた。ゆえに各構造データに対して、周期の違いで 10 通りの回帰直線を用いることになる。

任意の隣接する観測点の組において、両者の構造の比 (G_j/G_i) と、どちらか一方の点の最大速度応答 (S_{en}) が分かっているならば、この回帰直線を用いて他方の最大速度応答が求められる。そこで、隣接する観測点の組 (i, j) において、 G_i, G_j, S_{en} から観測点 j の最大速度応答を推定した値 (S'_{eTj}) と、観測点 j における実際の最大速度応答 (S_{eTj}) の関係を調査した。具体的には、 $\log(S'_{eTj}/S_{eTj})$ の標準偏差:

$$\sigma_s(e, T) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\log\left(\frac{S'_{eTj}}{S_{eTj}}\right) \right)^2 / n} \quad (4)$$

を求めた。ここで n は観測点の組 (i, j) の数である。また、母集団の相加平均は定義上ほぼ 0 であることから、ここでは式から省略した。この標準偏差が小さいほど、回帰直線を用いた最大速度応答の推定誤差が小さいこ

Table 2. The slopes (a) and intercepts (b) of regression lines between maximum velocity responses and subsurface structures. $AVS30$, average S-wave velocity of the upper 30 m; V_p P-wave velocity.

Period (sec)	$AVS30$		First natural period		V_p at ground level	
	a	b	a	b	a	b
0.5	-0.7569	-0.01123	0.1500	-0.03407	-7.582	-0.03397
1.0	-1.0675	0.02104	0.3399	-0.00891	-8.086	-0.01196
1.5	-1.0049	0.03261	0.4268	0.00628	-8.478	0.00185
2.0	-0.9148	0.03711	0.4769	0.01469	-8.853	0.00952
2.5	-0.8373	0.04154	0.4926	0.02201	-8.821	0.01654
3.0	-0.7941	0.05287	0.5021	0.03496	-8.975	0.02938
4.0	-0.7255	0.06288	0.5007	0.04725	-8.821	0.04146
5.0	-0.6592	0.05439	0.4892	0.04079	-8.453	0.03525
7.0	-0.6100	0.03942	0.4517	0.02682	-8.000	0.02177
10.0	-0.5662	0.04861	0.3966	0.03651	-6.958	0.03206

とを意味する。

ここでは気象庁の強震観測網のデータから最大速度応答を面的に補間することを想定した。まず K-NET 及び KiK-net の観測点を気象庁強震観測網程度の空間密度に間引きする。そして残った観測点の最大速度応答 (S_{en}) を使用して、間引かれた観測点 (ただし残った観測点いずれか 1 点以上からの距離が 20 km 以下である観測点に限る) の最大速度応答を推定する。推定方法は以下の 4 通りである：

- (1) S_{en} は S_{en} と同一と見なす
- (2) 地図描画ソフト GMT の surface 機能を用いて数学的に滑らかに補間する
- (3) 構造 G_i ($AVS30$) をもとに、回帰直線から推定する
- (4) 構造 G_i (深部地盤の一次固有周期) をもとに、回帰直線から推定する

これら 4 通りの推定方法のうち、上述の標準偏差 $\sigma_S(e, T)$ が最も小さい方法を明らかにした。

結果を Fig. 15 に示す。地震毎に多少の違いはあるものの、(1) 隣接する観測点で最大速度応答を同一と見なす場合や、(2) 数学的な補間に比べて、(3) $AVS30$ を

用いた推定や (4) 深部地盤の一次固有周期を用いた推定のほうが、標準偏差 $\sigma_S(e, T)$ は小さくなる傾向にある。また、短周期側では (3) の方法、長周期側では (4) の方法により $\sigma_S(e, T)$ が小さくなる。このことは、Fig. 8 で短周期側では $AVS30$ と、長周期側では深部地盤の一次固有周期との間での相関係数が高かったことと調和する。

(2) 継続時間の推定

Fig. 10 で、速度応答の震央距離で補正した継続時間 D'_{en} と、 $AVS30$ または深部地盤構造の一次固有周期との間に僅かながら相関があることが分かった。そこで、全 20 地震、10 周期についてそれぞれ、 $\log(D'_{en}/D'_{en})$ と $\log(G_i)$ との関係から導かれる回帰直線を求めた。各構造データについて 200 通りの回帰直線が得られるが、以降の計算では、地震ごと、周期ごとにそれをそのまま使い分けた。

任意の点において、震央距離 X_{ei} と構造 G_i が分かっているならば、この回帰直線を用いて継続時間 D'_{en} を推定することができる。そして、 D_{en} と D'_{en} の比の標準偏差：

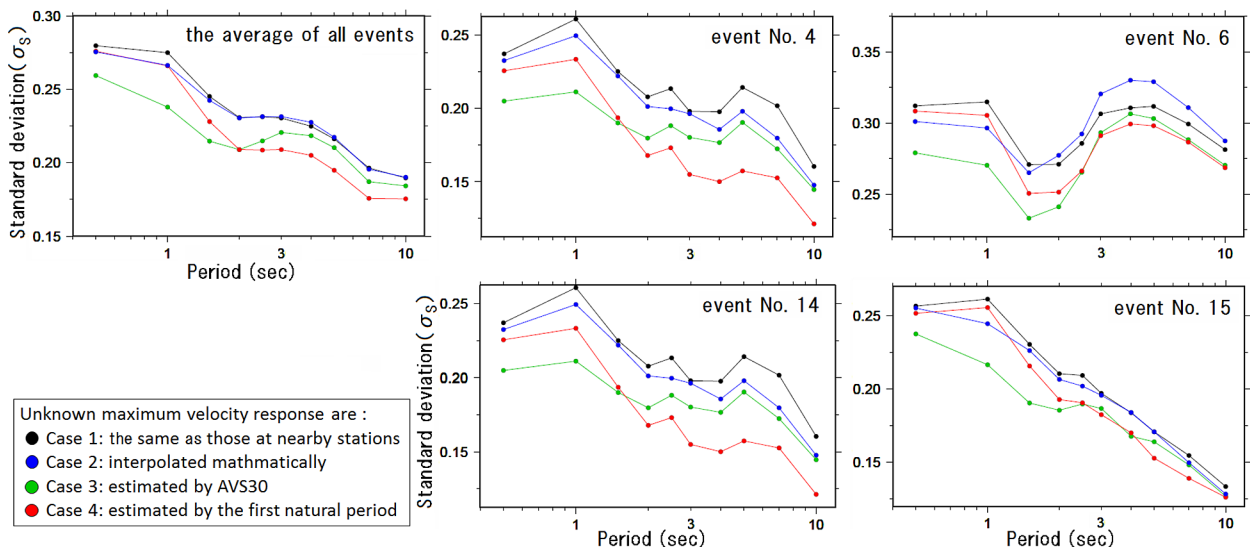


Fig. 15 Standard deviations of ratios of estimated to observed maximum velocity response values.

$$\sigma_D(e, T) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\log \left(\frac{D_{eTi}^G}{D_{eTi}} \right) \right)^2} / m \quad (5)$$

を求めた。ここで m は観測点の数である。また、母集団の相加平均は定義上ほぼ 0 であることから、ここでは式から省略した。この標準偏差 $\sigma_D(e, T)$ が小さいほど、回帰直線を用いた継続時間の推定誤差が小さいことを意味する。

継続時間 D_{eTi}^G の推定方法は以下の 3 通りとした：

- (1) D_{eTi}^G は D_{eTi} と同一と見なす
- (2) (D_{eTi}/D_{eTi}) と構造 G_i (AVS30) との回帰直線から推定する
- (3) (D_{eTi}/D_{eTi}) と構造 G_i (深部地盤の一次固有周期) との回帰直線から推定する

これら 3 通りの推定方法のうち、上述の標準偏差が最も小さい方法を明らかにした。

なお、継続時間を「(2) 一定以上の振幅が観測されている時間」と定義した場合では、多くの観測点で推定値 D_{eTi}^G や観測値 D_{eTi} が 0 となり評価が難しい。そこで、ここでは継続時間を「(1) 震動によるエネルギーが収束するまでの時間」と定義の場合についてのみ調査した。

結果を Fig. 16 に示す。地震毎に違いはあるものの、(1) 継続時間は震央距離にのみ依存すると見なした場合に比べて、(2) AVS30 を用いた推定や (3) 深部地盤の一次固有周期を用いた推定のほうが、標準偏差 $\sigma_D(e, T)$ は小さくなる傾向にある。(2) と (3) では $\sigma_D(e, T)$ に顕著な差は見られなかった。

5.4 隣接する観測点における最大速度応答の比

そもそも構造から最大速度応答を推定するには、地震によらず隣接する観測点における最大速度応答の比が一定であることが前提となる。この前提が成り立たない場合、3.1 節で述べた $\log(S_{eTj}/S_{eTi})$ は地震 e によって変化することを意味し、 e を変数に持たない $\log(G_j/G_i)$

から推定するのは困難である。

観測点の組 (i, j) における最大速度応答の比 S_{eTj}/S_{eTi} は、地震 e によってどの程度のばらつきを持つかを調べた。そこで地震によるばらつきの度合いを評価するために、標準偏差：

$$\sigma_q((i, j), T) = \sqrt{\sum_{e=1}^E \left(\text{avr} - \log \left(\frac{S_{eTj}}{S_{eTi}} \right) \right)^2} / E$$

ただし、 $\text{avr} = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E \log \left(\frac{S_{eTj}}{S_{eTi}} \right)$ (6)

を求めた。 E は隣接する両観測点において最大速度応答が得られている地震の数である。標準偏差 $\sigma_q((i, j), T)$ が小さいほど、観測点の組 (i, j) における最大速度応答の関係は、地震によらないことを意味する。なおここでは、隣接する両観測点において、少なくとも 10 地震で最大速度応答が得られている観測点の組を対象 ($E \geq 10$) とした。隣接する観測点の組は 1251 あるが、うち 1006 の組が条件を満たす。条件を満たす全ての組に対して $\sigma_q((i, j), T)$ を求め、その度数分布を示して検討する。

各観測点の組における最大速度応答の比の標準偏差は、Fig. 17 に度数分布として示した。標準偏差 $\sigma_q((i, j), T)$ が 0.1 のとき、同一観測点の組 (i, j) で、周期 T の最大速度応答の比が、地震によって $10(1.0 + 0.1)/10$ 、すなわち約 26% のばらつくことを示す。同様に、0.2 のとき約 58%、同 0.3 のとき約 100% (倍半分) のばらつきがあることを示す。Fig. 17 を見ると、全ての周波数で、標準偏差 $\sigma_q((i, j), T)$ はおよそ 0.05~0.3 まで広く分布している。また、観測点間の距離ごとに分けて表示した。観測点間の距離が小さいほど標準偏差が小さくなる傾向にあるが、5 km 以下の近距離であっても地震によって最大速度応答の比が大きくばらつく場合もある。

つまり、隣接する観測点における最大速度応答の比は地震ごとに異なる。これは、構造から隣接する観測

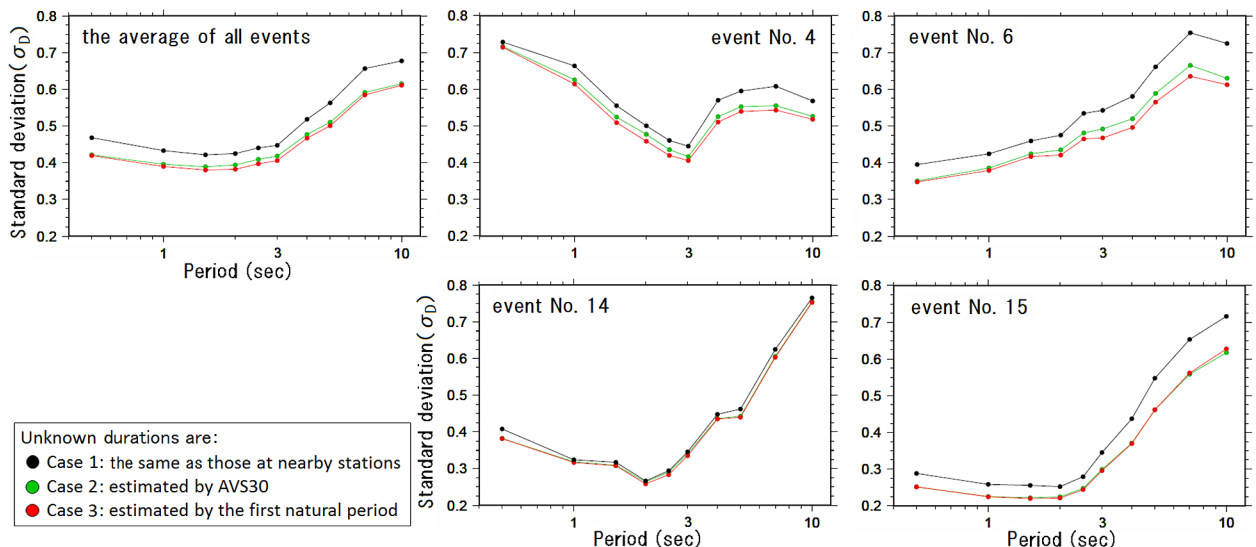


Fig. 16 Standard deviations of ratios of estimated to observed durations of the velocity response.

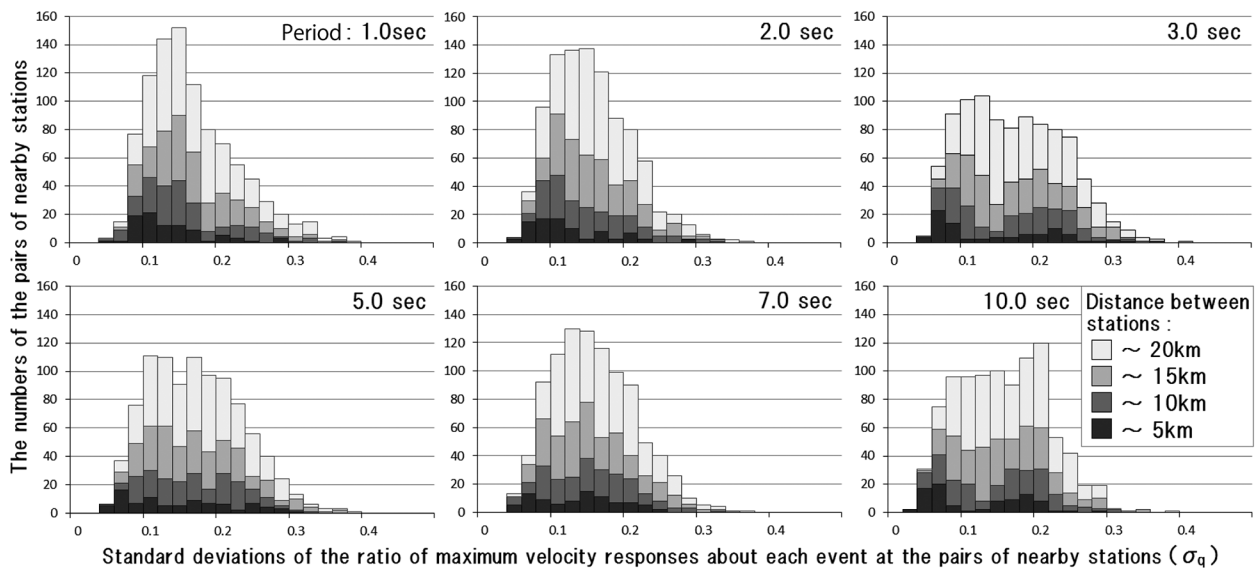


Fig. 17 Frequency distributions of standard deviations of maximum velocity response ratios of nearby station pairs for various earthquakes.

点の速度応答を推定するには限界があることを示している。

さらに、震源やメカニズムが似通っている2地震 ($e1$, $e2$) について、

$$r_{ij} = \log \left(\frac{S_{e2Tj}}{S_{e2Ti}} \right) / \log \left(\frac{S_{e1Tj}}{S_{e1Ti}} \right) \quad (7)$$

を求めた。2地震 ($e1$, $e2$) の組として、ここでは以下の4組を選んだ：

- (1) 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震 (No. 4) と、同日 18 時 34 分に発生した最大余震 (No. 5)：いずれも内陸地殻内で発生した地震で、両者の震央間の距離は約 6 km である
- (2) 2004 年 9 月 5 日 19 時 07 分に発生した紀伊半島沖の地震 (No. 2) と、同日 23 時 57 分に発生した東海沖の地震 (No. 3)：いずれも海洋プレート内で発生した地震で、両者の震央間の距離は約 34 km である
- (3) 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震 (No. 7) と、2011 年 3 月 9 日の三陸沖の地震 (No. 14)：いずれもプレート境界で発生した地震で、両者の震央間の距離は約 90 km である
- (4) 2008 年 5 月 8 日の茨城県沖の地震 (No. 9) と、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の最大余震 (No. 16)：いずれもプレート境界で発生した地震で、両者の震央間の距離は約 34 km である

Fig. 18 に、(2)に当たるものの一例を示した。横軸に No. 2 の地震における各観測点の組の最大速度応答の比 (S_{2Tj}/S_{2Ti}) を、縦軸に No. 3 の地震のそれ (S_{3Tj}/S_{3Ti}) を示しており、各点は個々の隣接する観測点の組である。つまり横軸は r_{ij} の分母、縦軸は分子に相当する。また、個々の点が破線上にあれば、両地震で最大速度応答の比が同じ ($r_{ij} = 1$) であることを示す。

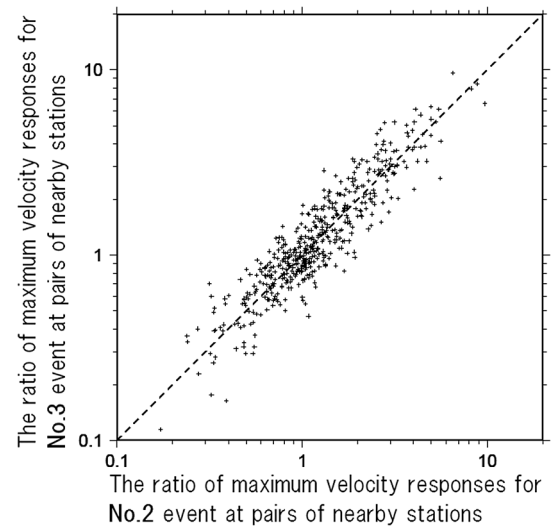


Fig. 18 Comparison of maximum velocity response ratios of nearby station pairs between No. 2 and 3.

ここでは全ての観測点の組について r_{ij} を算出し、その標準偏差：

$$\sigma_r((e1, e2), T) = \sqrt{\sum_{k=1}^n r_{ij}^2 / n} \quad (8)$$

を求めた。ここで n は、上で挙げた両地震について最大速度応答が求められている観測点の組 (i, j) の数である。 $\sigma_r((e1, e2), T)$ は Fig. 18 の各点の破線からのばらつきにほぼ相当し、この値が大きいほど、震源やメカニズムが似通っている地震でも、隣接する観測点の組で最大速度応答の比が一定しないことを意味する。

$\sigma_r((e1, e2), T)$ を求めた結果を Fig. 19 に示す。(1)、(2)、(4) で示した地震の組み合わせについては、標準偏差 $\sigma_r((e1, e2), T)$ は 0.1~0.2 の範囲に収まる。しかしそれでも、似通った地震であっても、隣接する観測点での

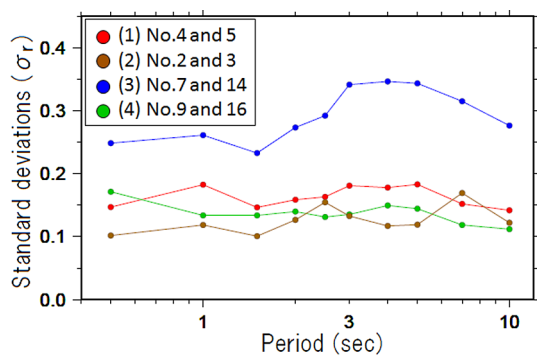


Fig. 19 Standard deviations of maximum velocity response ratios of nearby station pairs between similar earthquake pairs.

最大速度応答の比に数十パーセントの差が生じていることを意味する。また、(3)の組み合わせのように、最大速度応答の比がさらに大きくばらつく場合もあることが分かった。

一般に、観測される地震波は、震源特性、伝播特性、サイト特性の3つの要素によって記述される。ここで検討した震源やメカニズムが似通った地震の組では、震源特性や伝播特性に大きな差はないと考えられる。しかし、 $\sigma_r((e1, e2), T)$ が 0.1 以上の値を取るということは、震源特性や伝播特性の僅かな差でも、最大速度応答に影響を与えるということを示している。

5.5 構造を用いた最大速度応答の推定の有意性と限界

最大速度応答と構造との間には相関があることが示された (Fig. 8)。しかし、ある地点の最大速度応答を、構造をもとに隣接する観測点の値からそれを推定したときの推定精度 (その地点における実際の最大速度応答との比) は、隣接する観測点の値と同じと見なしたときと比べて、 σ_s で概ね 0.02 程度 (実際の最大速度応答の数パーセント) 改善するに過ぎない (Fig. 15)。隣接する観測点同士の最大速度応答の比は地震によって変化するため (Fig. 17)、構造という不変な量での推定には限界があると言える。

同様に、たとえば Hatayama and Kalkan (2011) は、2010 年の Mayor-Cucupah 地震でロサンゼルス周辺の基盤の浅い場所と深い場所の両方で顕著な長周期地震動を観測したことに触れ、地震動と構造の関係が単純でないことを指摘している。

隣接する観測点同士の最大速度応答の比が地震によって変化する理由として、地震のメカニズムの違いと、伝播経路の違いの2つが考えられる。たとえば平井・福和 (2012) は、楕円形をした大規模堆積盆地を設定して、3次元有限差分法での波形計算を行っている。その結果、震源方位の違いにより、速度波形の H/V スペクトルのピーク周期が最大 1 秒程度ずれることを示している。このように、堆積盆地のどの方位から波形が入射したかが盆地内の観測点の波形に大きな影響を与える可能性もある。

しかし、震源やメカニズムが似通っている地震の組

を選んで調査した結果 (Fig. 19) では、震源が似通り (伝播経路が似通り)、メカニズムが似通っていても、その比の標準偏差 $\sigma_r((e1, e2), T)$ は 0.3 を超える (いわゆる倍半分以上のばらつきを持つ) ことすらあることが分かった。伝播経路やメカニズムが似ていても、完全に一致しない限り、その比は劇的には小さくならないと言える。

6. まとめ

最大速度応答は概ね周期 3 秒未満では *AVS30* と、それより長周期では深部地盤構造の一次固有周期と相関が認められた。しかし同時に、構造と周囲の観測点の記録から、任意の地点の最大速度応答を求めることには限界があることも示された。速度応答の継続時間についても、*AVS30* 及び深部地盤構造の一次固有周期との間に若干の相関が認められたが、その関係は顕著とは言えない。

謝 辞

本調査を行うにあたり、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net) のデータを用いた。また、本調査で検討した構造の数値データは、地震ハザードステーション J-SHIS (松岡・若松、2008)、日本列島下の 3 次元地震波速度構造ウェブサイト (Matsubara and Obara, 2011) より取得した。横田・他 (2011) の数値データについては、応用地質株式会社の甲斐田康弘氏より提供いただいた。図の描画には Wessel and Smith (1998) による GMT を用いた。相対速度応答と絶対速度応答、擬似速度応答の関係については、気象研究所地震火山研究部の干場充之博士、青木重樹氏より有益なご助言を頂いた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- Anderson, J. G. and R. Quaas, 1988: Effect of magnitude on the character of strong ground motion: an example from the Guerrero, Mexico, strong motion network. *Earthquake Spectra*, **4**, 645–646.
- Anderson, J. G., 2003: Strong-Motion Seismology, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, pp. 937–966.
- Earthquake Prediction Information Division, JMA, 2010: The earthquake of Suruga bay (M6.5) on August 11 2008, *Report of CCEP*, **83**, 211–230. (in Japanese)
- Hatayama, K. and E. Kalkan, 2011: Long-period (3 to 10 s) ground motions in and around the Los Angeles Basin during the M_w 7.2 El Mayor-Cucupah Earthquake of April 4, 2010. *Proc. of the 4th IASPE/IAEE International Symposium*, University of California Santa Barbara.
- 平井 敬, 福和伸夫, 2012: 震源方位による大規模堆積盆地の震動形状の違い—3次元有限差分法シミュレーションによる検討—. *日本地震学会講演予稿集*, **89**.
- Izutani, Y. and T. Hirasawa, 1987: Use of strong motion duration for

- rapid evaluation of fault parameters. *J. Phys. Earth*, **25**, 171–190.
- Jennings, P. C., 2003: An introduction to the earthquake response of structures, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, pp. 1097–1125.
- JMA, The reports of source process analysis of remarkable earthquakes in and around Japan, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/index.html> (2013年7月15日閲覧). (in Japanese)
- JMA, 2005: Report on the mid Niigata prefecture earthquake in 2004, *Technical report of the Japan Meteorological Agency*, **127**. (in Japanese)
- JMA, 2009: Report on the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, *Technical report of the Japan Meteorological Agency*, **131**. (in Japanese)
- JMA, 2010: Report on the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, *Technical report of the Japan Meteorological Agency*, **132**. (in Japanese)
- Joyner, W. B. and T. E. Fumal, 1984: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion. *Proceeding of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, **2**, 777–783.
- 片岡正次郎, 佐藤智美, 2007: 海溝性地震を対象とした地震動強さの距離減衰特性の地域性に関する検討. *第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集*, 269–274.
- 片岡正次郎, 松本俊輔, 日下部毅明, 遠山信彦, 2008: やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正係率. *土木学会論文集 A*, **64**, 721–738.
- 菊池正幸, 山中佳子, EIC 地震学ノート, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/ (2013年7月15日閲覧).
- 気象庁, 2008: 推計震度分布図の迅速な発表について. <http://www.jma.go.jp/jma/press/0801/10b/suikijinsoku.pdf> (2014年1月29日閲覧).
- Lay, T. and T. C. Wallace, 1995: *Modern Global Seismology*. Academic Press, pp. 104–115.
- Matsubara, M. and K. Obara, 2011: The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate. *Earth Planets Space*, **63**, 663–667.
- 松岡昌志, 若松加寿江, 2008: 地形・地盤分類 250 m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ. 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936.
- Muto, D., H. Ueno, K. Tamaribuchi and K. Iwakiri, 2014a: Characteristics and factors of the earthquakes around the Northern Ibaraki Prefecture and Coastal Area of Fukushima Prefecture after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Quarterly Journal of Seismology*, **78**, 1–28. (in Japanese with English abstract)
- Muto, D., H. Ueno, Y. Kawazoe and K. Iwakiri, 2014b: The analysis of the source processes of the foreshocks and aftershocks of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Quarterly Journal of Seismology*, **78**, 29–44. (in Japanese with English abstract)
- Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara and A. Yamamoto, 2004: Recent progress of seismic observation networks in Japan –Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-. *Earth Planets Space*, **56**, 15–28.
- 大崎順彦, 1994: 新・地震動のスペクトル解析入門. 鹿島出版会, 299p.
- 佐藤智美, 2004: 宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定. *日本地震工学会論文集*, **4**, 1–4.
- Seismological and Volcanological Department, JMA, 2009: Report on the Noto Hanto Earthquake in 2007. *Quarterly Journal of Seismology*, **72**, 27–60. (in Japanese)
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998: New improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- 山中佳子, NGY 地震学ノート, http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/ (2013年7月15日閲覧).
- 横田 崇, 池内幸司, 矢萩智裕, 甲斐田康弘, 鈴木晴彦, 2011: 長周期地震動の距離減衰および増幅特性. *日本地震工学会論文集*, **11**, 81–101.
- Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto and S. Aoki, 2011: Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data. *Earth Planets Space*, **63**, 565–569.
- 湯沢 豊, 工藤一嘉, 2011: 長周期帯域 (1–15 秒) における基盤地震動の経験的予測式. *日本建築学会構造系論文集*, **76**, 661, 519–526.
- 地盤工学会, 1999: ジオテク ノート 9 地震動. 地盤工学会, 116p.

長周期地震動と地盤構造との関係について

武藤大介*・勝間田明男** (気象研究所地震火山研究部)

* 現所属：文部科学省

** 現所属：気象研究所地震津波研究部

顕著な地震の発生直後に地動の分布を把握することは重要である。地動は浅部地盤構造の影響を強く受けるが、地震計の分布は疎らであるため、地震計が存在しない地点においては、浅部地盤構造データを用いて、周辺の地震計の観測値から地動を推定することが望まれる。我々は、浅部地盤構造を考慮した補正を取り入れて様々な周期帯の地震動分布を推定するため、浅部地盤構造と地動の関係について調査した。その結果周期 3 秒以上の最大速度応答は深部地盤構造の一次固有周期と相関があることを見出した。また、それより短周期では、深さ 30 m の S 波速度 ($AVS30$) との相関が強いことが分かった。しかし近接する 2 観測点における最大速度応答の比は、しばしば地震によって異なる値を取る。これは、構造のみに頼った推定には限界があることを表す。他方、速度応答の継続時間と構造との間には顕著な相関は認められなかった。これらの結果は相対速度応答から得られたものであるが、擬似速度応答を用いても結果は同様である。