



## 自治体観測点を対象とした最大加速度比と卓越周期を用いた 加速度応答スペクトル推定手法の検討

-地殻内地震を対象として-

西川隼人<sup>1)</sup>、宮島昌克<sup>2)</sup>

1) 正会員 舞鶴工業高等専門学校、技術職員 博士(工学)  
e-mail : nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

2) 正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系、教授 工博  
e-mail : miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

### 要約

本論文では地殻内地震において自治体観測点で消失した地震波形の加速度応答スペクトルを推定するために、従来の研究で用いられている最大加速度比に加え、地震動スペクトルの卓越周期と構造物の固有周期との関係を考慮した応答スペクトル推定手法を提案した。加速度応答スペクトルを推定したところ、最大加速度比、卓越周期と構造物の固有周期との関係をパラメータとした推定式を用いた場合、最大加速度比のみの式に比べて、推定値と観測値の相関が高く、スペクトル形状もおおむね評価することができた。

キーワード： 最大加速度比、卓越周期、加速度応答スペクトル、自治体観測点、地殻内地震

### 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に、公的機関や民間企業によって地震観測点が急速に整備され、震源近傍の大振幅の地震波形などの貴重なデータが得られるようになった。現在、地震観測点の中で自治体に設置されている震度計は他機関のものに比べて密に設置されており、震度7や震度6強のような非常に大きな揺れを多く記録している。しかし、自治体観測点では計測震度や最大地動加速度などの地震動指標のデータはあるものの、地震波形が消失したケースが多く見られる。特に地殻内地震では2000年鳥取県西部地震や2007年能登半島地震のように震度6強、6弱を記録しながら地震波形が消失してしまった自治体観測点が複数見られる。

著者らは全国の9割以上の都道府県の自治体観測点で収集している計測震度、最大地動加速度と地震動スペクトルの関係を調べており、計測震度を計算する際に算出する実効加速度と最大地動加速度の比(最大加速度比)が地震動スペクトルの形状と密接な関係があることを明らかにしている<sup>1)</sup>。著者らはこのような最大加速度比の特性を利用して、地震波形が残っていない自治体観測点の周期1秒前後の速度応答スペクトルを推定している<sup>1), 2)</sup>。また、青井・境はこの手法を利用して、加速度応答スペクトルを推定し

ている<sup>3)</sup>。これらの研究に用いた手法は実効加速度や最大地動加速度をパラメータとする回帰式を用いて応答スペクトルを計算するものであり、少ないパラメータで簡便に周期1秒程度の応答スペクトルを精度良く推定できる。ただし、計算において、地震動スペクトルに関する情報を直接取り込んでいないことから、応答スペクトルの形状を十分に評価できないケースが見られた。

自治体観測点の震度計には計測震度や最大地動加速度の他に地震動スペクトルの卓越周期(以降、卓越周期と呼ぶ)や最大加速度周期(最大加速度を記録した正10秒区間の波形の卓越周期)のように地震動の周期特性に関する指標を取得できるものがある。全国の6割程度の都道府県が震度計から卓越周期を収集しており<sup>4)</sup>、一部の自治体観測点の卓越周期や最大加速度周期は計測震度、最大地動加速度とともに気象業務支援センターが発行している気象庁地震年報のデジタルデータに記載されている。卓越周期と構造物の固有周期(以降、固有周期と呼ぶ)が近いほど、その固有周期の応答が相対的に大きくなり、逆に両者が離れていると、その構造物の応答が相対的に小さくなることが予想される。従って、卓越周期と固有周期の相互関係が分かれば、最大加速度比のみ用いる場合に比べて、応答スペクトルを精度良く推定できるものと考えられる。また、計測震度、最大地動加速度、卓越周期という少ないパラメータで簡単に応答スペクトルを推定できれば、地震発生直後の地震動推定にも活用できる可能性がある。

本論文では、加速度応答スペクトルの推定においてスペクトル形状をより正確に推定するために、最大加速度比の他に卓越周期と固有周期をパラメータに加えた応答スペクトル推定式を提案する。これにより少ないパラメータで簡便かつ精度の良い応答スペクトル推定式を構築することを目指す。応答スペクトルの推定式はマグニチュード6~7クラスの内陸地殻内地震で観測された地震動データにより構築する。地殻内地震を対象とした理由は、先に述べたように2000年鳥取県西部地震などの複数の地殻内地震で震度6強あるいは6弱を観測した自治体観測点の地震波形が消失しており、地震被害を解明する上でこれらの自治体観測点の地震動を推定することが極めて重要だと考えたためである。

本論文では次の流れで検討を行った。まず、簡単なパワースペクトルのモデルと実観測記録を用いて、最大加速度比とパワースペクトルや震度フィルターとの関係など、最大加速度比の基本的な性質を調べる。続いて、最大加速度比と加速度応答スペクトルの関係を調べるとともに、卓越周期と固有周期の関係が応答スペクトルに及ぼす影響を検証する。最後に上記の検討結果に基づき最大加速度比や卓越周期と固有周期の関係を表わすパラメータとする加速度応答スペクトルの推定式を求め、得られた推定式による加速度応答スペクトルを観測値や既往研究による手法を用いた場合の結果と比較する。

## 2. 最大加速度比とパワースペクトルの関係

### 2.1 模擬地震波による最大加速度比とパワースペクトルの評価

ここでは最大加速度比とパワースペクトル形状の関係や最大加速度比の物理的な意味を模擬地震波による計算結果に基づき説明する。著者らは任意の地震波 $f(t)$ の最大加速度比がパーセバルの定理と極値理論から次式で表されることを導いている<sup>1)</sup>。

$$\frac{A_{fmax}}{A_{max}} \doteq \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} G(f) df}} \quad (1)$$

ここで $A_{max}$ は $f(t)$ の最大振幅、 $A_{fmax}$ は $f(t)$ に震度フィルターによる処理を施した波の最大振幅、 $f$ は振動数(Hz)である。また、 $G(f)$ は $f(t)$ のパワースペクトル、 $H(f)$ は震度フィルターである。著者らは模擬地震波を用いた計算結果により、式(1)の関係が概ね成り立つことを確認している<sup>1)</sup>。ここでは模擬地震波のパラメータを増やして、式(1)の関係を調べることにする。模擬地震波は式(2)に示すKanaiが提案したパワースペクトル<sup>5)</sup>をターゲットにして作成する。図1にパワースペクトルの一例を示す。

$$G(T) = \frac{1 + 4h_g^2 T_g^2 / T^2}{(T_g^2 / T^2 - 1)^2 + 4h_g^2 T_g^2 / T^2} S_0 \quad (2)$$

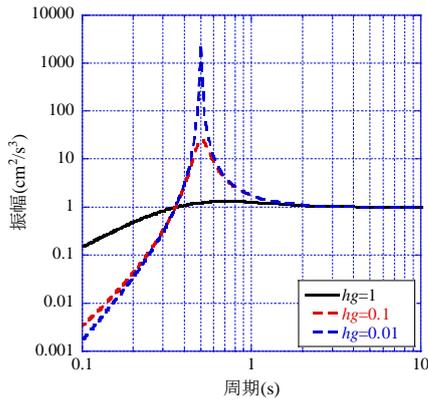


図1 Kanaiのパワースペクトル<sup>5)</sup>

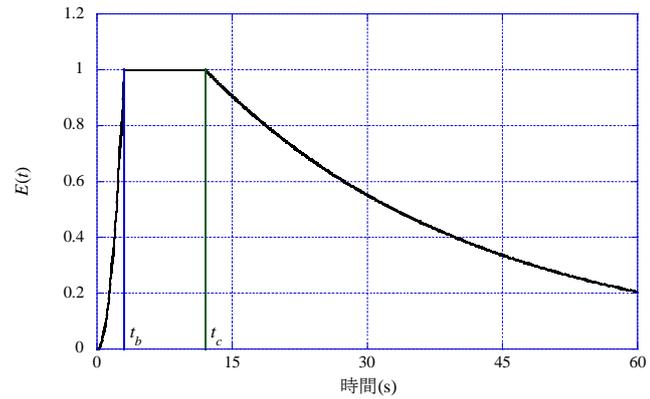


図2 包絡曲線<sup>6)</sup>

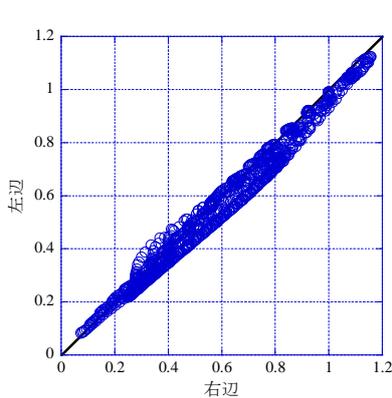


図3 式(1)の両辺の対応

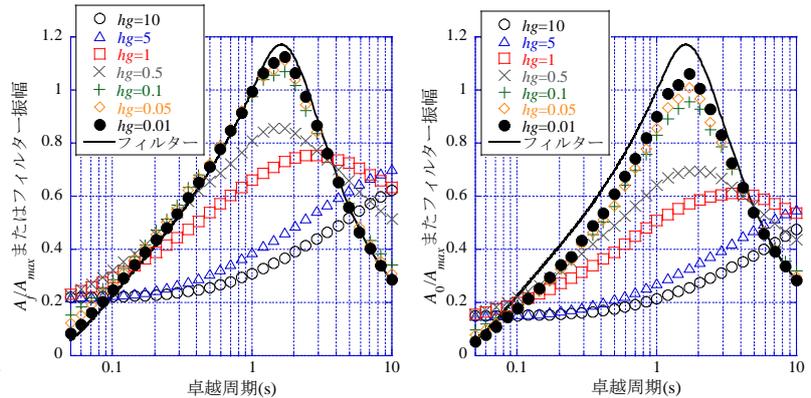


図4 卓越周期と  $A_{fmax}/A_{max}$ 、 $A_0/A_{max}$  の対応

$T_g$ は $G(T)$ の卓越周期(s)、 $h_g$ はスペクトルのピーク振幅を規定する係数、 $S_0$ はスペクトル強度、 $T$ は周期である。模擬地震波の位相は乱数によって与えて、式(2)のパワースペクトルに基づき定常波を作成し、定常波にJenningsの提案した包絡曲線<sup>6)</sup>をかけて、非定常波とした。ここで包絡曲線 $E(t)$ は以下の式で表される。

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_b)^2 & (t < t_b) \\ 1 & (t_b < t < t_c) \\ \exp(\ln(0.1)(t-t_c)/(t_d-t_c)) & (t_c < t < t_d) \end{cases} \quad (3)$$

$t_b$ は主要動部までの時刻、 $t_c-t_b$ は主要動継続時間である。 $t_c=4t_b$ とし、地震波の継続時間 $t_d$ は81.92秒とした。図2に $t_b$ が3秒の場合の $E(t)$ を示す。図3に式(2)のスペクトルを有する模擬地震波によって計算した $A_{fmax}/A_{max}$ と式(1)の右辺の対応を示す。式(2)の $S_0$ は1とし、 $T_g$ は0.05~10sで、対数軸で30等分して、31通り計算した。また、 $h_g$ は10~0.01を対象に対数軸で30等分して、31通り計算した。図3から明らかなように、全体的に見て $A_{fmax}/A_{max}$ と式(1)の右辺がよく対応していることが分かる。

続いて、卓越周期 $T_g$ やスペクトルのピーク振幅を規定する $h_g$ による $A_{fmax}/A_{max}$ と $A_0/A_{max}$ の変化を調べる。ここで $A_0$ は実効加速度であり、震度フィルターによる処理を施した波において、継続時間0.3秒間を考慮した場合の値である。図4に卓越周期ごとの $A_{fmax}/A_{max}$ と $A_0/A_{max}$ 、および震度フィルターを示す。同図を見ると、 $h_g$ が小さいほど、 $A_{fmax}/A_{max}$ と $A_0/A_{max}$ が震度フィルターに近づく傾向にあり、 $h_g$ が0.01の場合の $A_{fmax}/A_{max}$ は震度フィルターと概ね一致している。卓越周期と $A_{fmax}/A_{max}$ 、 $A_0/A_{max}$ の対応を見ると、震度フィルターのピーク周期周辺では $h_g$ の変化に伴い $A_{fmax}/A_{max}$ と $A_0/A_{max}$ が大きく変化しているが、卓越周期0.1秒付近では $h_g$ による変化が小さくなっている。また、全体を見ると $A_0/A_{max}$ は $A_{fmax}/A_{max}$

に比べて小さいが、形状はよく似ている。このことから、 $A_0 / A_{max}$  は  $A_{fmax} / A_{max}$  と同じく地震動スペクトルの形状と密接に関わっていることがうかがえる。

## 2.2 地震観測記録から見る最大加速度比とパワースペクトルの特徴

2.1の式(1)の関係式や図4に示す卓越周期と最大加速度比の対応が実際の地震観測記録においても成り立つかどうか調べる。表1に本論文で解析対象とする地震の諸元や解析データ数を示す。対象とする地殻内地震は気象庁マグニチュードが6~7程度の地震であり、震度6弱以上の揺れが観測されている。解析対象とした地震観測点は表1の地震において震度5弱以上の揺れを記録した気象庁、K-NET、KiK-netの観測点であり、データ数は合計で234である。

表1 解析対象地震の諸元

	地震名または発生地域	発生日時	$M_{JMA}$	震源深さ (km)	緯度 (°)	経度 (°)	データ数		
							気象庁	K-NET	KiK-net
1	1997年鹿児島県北西部地震	1997年 3月26日17時31分47.9秒	6.6	12	31.9717	130.3583	3	11	0
2	1997年鹿児島県北西部地震	1997年 5月13日14時38分27.5秒	6.4	9	31.9483	130.3017	2	10	0
3	2000年鳥取県西部地震	2000年10月 6日13時30分17.9秒	7.3	9	35.2733	133.3483	9	16	12
4	宮城県北部	2003年 7月26日07時13分31.5秒	6.4	12	38.4050	141.1700	3	6	1
5	2004年新潟県中越地震	2004年10月23日17時56分0.3秒	6.8	13	37.2917	138.8667	9	17	7
6	新潟県中越地方	2004年10月23日18時34分5.6秒	6.5	14	37.3050	138.9300	4	10	6
7	2005年福岡県西方沖地震	2005年 3月20日10時53分40.3秒	7.0	9	33.7383	130.1750	6	13	4
8	2007年能登半島地震	2007年 3月25日09時41分57.9秒	6.9	11	37.2200	136.6850	5	12	2
9	2007年新潟県中越沖地震	2007年 7月16日10時13分22.5秒	6.8	17	37.5567	138.6083	9	14	6
10	2008年岩手・宮城内陸地震	2008年 6月14日08時43分45.3秒	7.2	8	39.0283	140.8800	11	16	10

図5に解析対象とした全データから求めた卓越周期(NS成分)と最大加速度比、震度フィルターの対応を示す。観測記録による最大加速度比は実効加速度を最大地動加速度(水平2成分と上下成分を時刻歴でベクトル合成した際の最大振幅)で除したものである。図5を見ると、全体的に見て卓越周期に対する最大加速度比の変化が震度フィルターと対応しており、模擬地震波による計算結果(図4)と似たような傾向を示していることが分かる。卓越周期ごとに最大加速度比の変動を見ると、短周期側で震度フィルターよりも大きいものが見られ、模擬地震波による計算結果と少し傾向が異なるが、フィルターのピーク周期付近で最大加速度比の変動が大きくなっているという点は同じである。

次に卓越周期が震度フィルターのピーク周期付近(1.4~1.7秒)と卓越周期が短周期側(0.1~0.13秒)にあるパワースペクトル(最大値で正規化)を見る(図6)。図6の凡例は各地震記録の最大加速度比である。卓越周期が1.4~1.7秒のパワースペクトルを見ると、卓越周期が同程度でありながら、地震記録によってスペクトル形状が大きく異なっている。例えば最大加速度比が0.408と1.021の記録のパワースペクトルでは、前者の振幅が0.01~1であるのに対して、後者の振幅は $10^{-6}$ ~1と大きく変動している。一方、卓越周期が短周期側(0.1~0.13秒)のパワースペクトルを見ると、いずれの記録もパワースペクトルの振幅が大体0.001~1の範囲にあり、卓越周期が震度フィルターのピーク周期付近にあるスペクトルに比べて、スペクトル形状に大きな違いがない。続いて、図6の(1)、(2)の地震観測記録の最大加速度比を見ると、卓越周期が1.4~1.7秒の場合は0.369~1.021と大きく変化しているが、卓越周期が0.1~0.13秒の場合は0.163~0.321であり、最大加速度比の変化が小さい。卓越周期が1.4~1.7秒のパワースペクトルは震度フィルターのピーク周期付近に卓越周期があるので、卓越周期の振幅が相対的に大きい記録は、最大加速度比が大きくなる。卓越周期が0.1~0.13秒のパワースペクトルはフィルターのピーク周期付近の振幅に大きな違いがなく、卓越周期よりも短周期側の振幅に差があったとしても、震度フィルターの短周期側の振幅が小さいので、全体的に見てスペクトル形状による最大加速度比への影響は小さいものと考えられる。

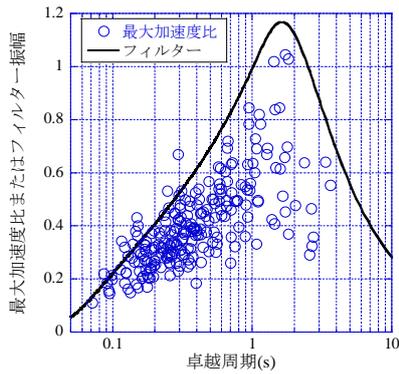
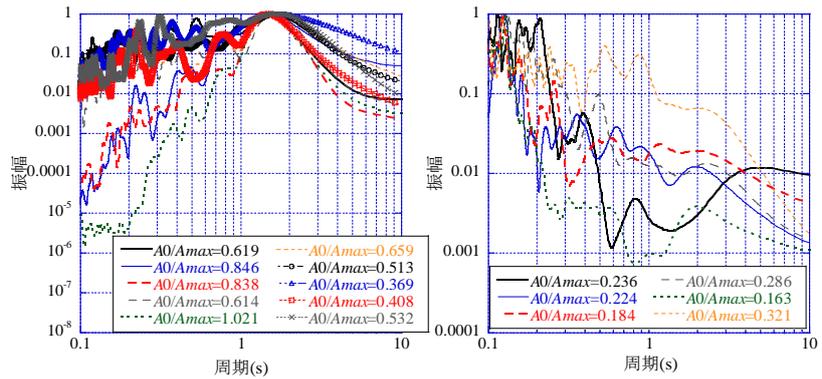


図5 観測記録の卓越周期と最大加速度比の対応



(1)  $T_g=1.4\sim 1.7$ 秒 (2)  $T_g=0.1\sim 0.13$ 秒  
図6 正規化パワースペクトル

### 3. 最大加速度比と加速度応答の対応

#### 3.1 模擬地震波による評価

ここでは本論文で推定を試みる加速度応答スペクトルと最大加速度比( $A_0 / A_{max}$ )との対応を調べる。2章で作成した模擬地震波を用いて、減衰定数5%、固有周期 $T$ の絶対加速度応答 $S_a(T)$ を計算し、模擬地震波の最大振幅 $A_{max}$ で除した指標 $\bar{S}_a(T)$ と最大加速度比との対応を調べる。なお、 $S_a(T)$ は固有周期0.1~3秒を対象に対数軸で20等分した21個の周期に対して計算した。

図7に模擬波から計算した最大加速度比と $T$ が0.1、0.65、1.8秒の場合の $\bar{S}_a(T)$ の対応を示す。卓越周期による最大加速度比と $\bar{S}_a(T)$ の対応の違いを見るために、卓越周期を6通りの範囲に分類して傾向を見ることにする。凡例は卓越周期の範囲である。 $T$ が0.1秒の場合は最大加速度比が0.2付近で、 $\bar{S}_a(T)$ が最も大きくなっており、最大加速度比が大きくなるほど、 $\bar{S}_a(T)$ が1に近づいている。 $T$ が1.8秒の場合は最大加速度比が大きくなるほど、 $\bar{S}_a(T)$ も大きくなっていく。また、いずれのケースでも卓越周期の範囲に固有周期が含まれる場合に $\bar{S}_a(T)$ が最も大きくなっており、固有周期と卓越周期の相対的な関係が $\bar{S}_a(T)$ に影響を及ぼしていることが分かる。

#### 3.2 観測記録による評価

続いて、地震観測記録から計算した最大加速度比( $A_0 / PGA$ )と $\bar{S}_a(T)$ の対応を見る。 $\bar{S}_a(T)$ は模擬波の場合と同じく、固有周期0.1~3秒で21個計算した。なお、模擬波では最大振幅を $A_{max}$ と表記したが、観測記録の最大地動加速度は $PGA$ とする。図8に各地震観測記録のNS成分を用いて計算した $\bar{S}_a(T)$ と最大加速度比との対応を示す。最大加速度比は2章と同じく実効加速度と地震波3成分を時刻歴で合成して得られた最大振幅から求めた。図8を模擬地震波により求めた結果(図7)と比較すると、細かな部分では異なるが、両者は同じような傾向を示しており、固有周期によって最大加速度比と $\bar{S}_a(T)$ の関係が大きく異なることがうかがえる。紙面の都合で省略するが、EW成分についてもNS成分と同じ傾向が見られた。

また、模擬地震波による計算結果と同じく、固有周期と卓越周期の範囲が同じ場合に $\bar{S}_a(T)$ が大きくなる傾向にあり、周期特性の影響がうかがえる。周期特性の影響を詳しく調べるために、 $\bar{S}_a(T)$ の最大値周辺のデータを抽出し、卓越周期や固有周期、 $\bar{S}_a(T)$ との対応を調べる。卓越周期と固有周期を用いて周期特性を表す指標として次式を用いる。

$$W_T = |1 - T / T_g| \quad (4)$$

$W_T$ は周期特性を表す指標であり、固有周期 $T$ と卓越周期 $T_g$ の比が1に近いほど値が0に近づく。図9に $T$ が0.1、0.65秒における $\log_{10} W_T$ と $\log_{10} \bar{S}_a(T)$ の対応を示す。 $T$ が0.1秒の場合は最大加速度比が0.15~0.25、0.65

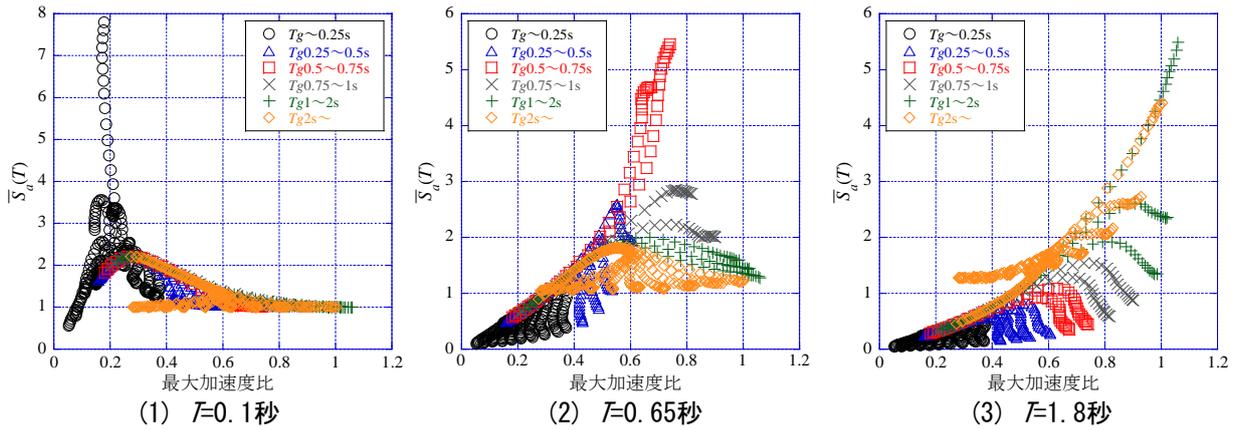


図7 模擬地震波による最大加速度比と $\bar{S}_a(T)$ の対応

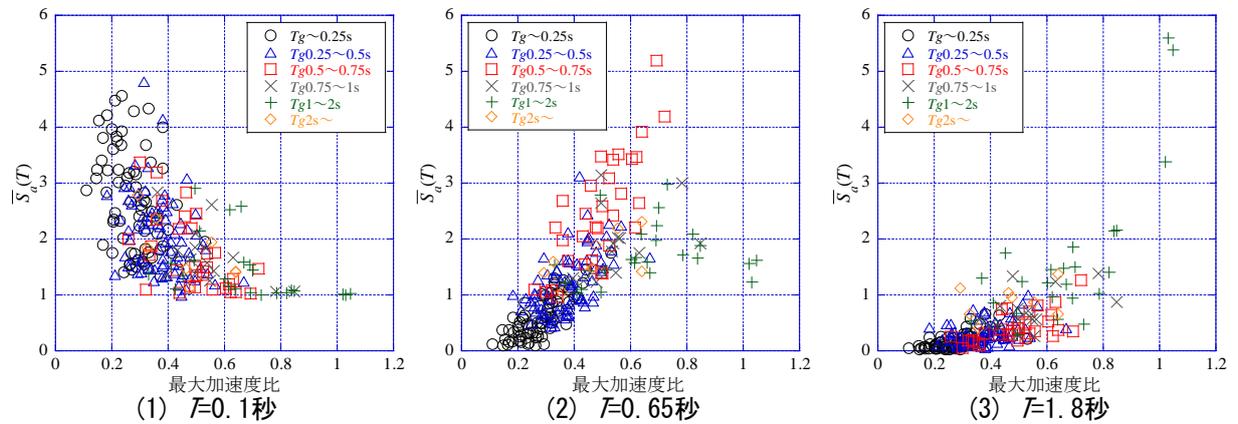


図8 地震観測記録による最大加速度比と $\bar{S}_a(T)$ の対応

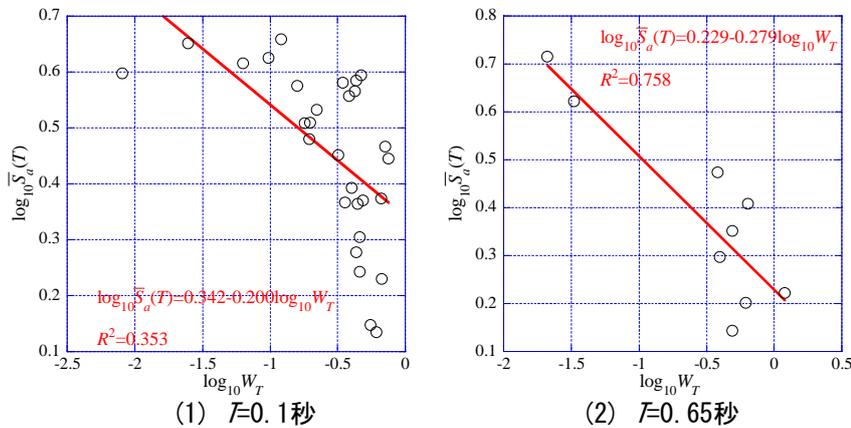


図9  $\log_{10} W_T$  と  $\log_{10} \bar{S}_a(T)$  の対応 (図中の  $R^2$  は決定係数)

秒の場合は0.65～0.75の範囲のデータである。本論文で用いた解析データは卓越周期が短周期にある観測記録が多いことから、最大加速度比が0.65～0.75のデータは0.15～0.25に比べて少なくなっている。なお、 $T$ が1.8秒の場合は $\bar{S}_a(T)$ の最大値周辺のデータが少なかったため、図9に示していない。図9から明らかのように、いずれのケースも $\log_{10} W_T$ が小さいほど、 $\log_{10} \bar{S}_a(T)$ が大きくなる傾向にあり、固有周期 $T$ と卓越周期 $T_g$ の比が1に近いほど $\log_{10} \bar{S}_a(T)$ が大きくなるのが分かる。ただし、最大加速度比が0.15～0.25の場合、 $\log_{10} W_T$ が-0.5以下で $\log_{10} \bar{S}_a(T)$ のばらつきが大きくなっている。これは卓越周期が同じ程度でも地震動スペクトルの形状にかなり違いがあるためだと考えられる。

#### 4. 最大加速度比と卓越周期による応答スペクトルの推定

##### 4.1 最大加速度比と卓越周期による $\bar{S}_a(T)$ の推定式構築

これまでの模擬地震波と地震観測記録による考察から、加速度応答には最大加速度比だけでなく、固有周期と卓越周期の相互関係が強く影響を及ぼしており、最大加速度比が同じ程度の場合、固有周期と卓越周期の比が1に近いほど、 $\bar{S}_a(T)$ が大きくなる傾向が見られた。このことから、加速度応答を推定する際に固有周期と卓越周期の関係を考慮することにより、最大加速度比のみから応答を推定する場合に比べて推定精度が向上するものと考えられる。

そこで本論文では最大加速度比の他に、固有周期と卓越周期から計算する $W_T$ をパラメータとする次式によって $\bar{S}_a(T)$ の推定を試みた。

$$\log_{10} \bar{S}_a(T) = c_1(T) \log_{10} r_a + c_2(T) r_a + c_3(T) \log_{10} (W_T + c_0) + c_4(T) W_T + c_5(T) W_T^2 + c_6(T) \quad (5)$$

$c_i(T)$ は回帰係数( $i=1\sim 6$ )、 $c_0$ は定数、 $\bar{S}_a(T)$ は固有周期 $T$ の絶対加速度応答を最大地動加速度 $PGA$ で正規化したもの、 $r_a$ は最大加速度比( $A_0/PGA$ )である。式(5)の第1、2項目は既往研究の応答スペクトル推定式と同じ形<sup>1), 2), 3)</sup>とした。第3～5項は図9に示す $\log_{10} W_T$ と $\log_{10} \bar{S}_a(T)$ の関係式に非線形性を考慮するため、 $W_T$ と $W_T^2$ を加えたものである。式(5)にさらに $r_a$ 、 $W_T$ の項を加えた場合、次節で示す $\bar{S}_a(T)$ の推定値と観測値の相関係数や $AIC$ (赤池情報量基準)<sup>7)</sup>に大きな違いが見られないことから、式(5)を用いた。NS、EW成分、それぞれを対象に式(5)の回帰係数を重回帰分析によって求めた。回帰係数は表1に示す地震の234の観測記録を用い、 $\bar{S}_a(T)$ を計算した21の固有周期それぞれに対して求めた。また、重回帰分析の際に $c_0$ を0～1.0まで0.05刻みで変化させ、観測値と予測値の標準偏差が最小となる $c_0$ を求めた。図10にNS成分を対象に式(5)によって求めた $T=0.1$ 、0.65、1.8秒に対する $\bar{S}_a(T)$ の推定値と観測値の対応を示す。図10を見ると $T=0.1$ 秒の場合は $\bar{S}_a(T)$ の推定値 $\bar{S}_a^p(T)$ と観測値 $\bar{S}_a^o(T)$ の対応はそれほどよくないが、0.65、1.8秒の場合は $\bar{S}_a^p(T)$ と $\bar{S}_a^o(T)$ の相関係数が0.8を超えており、良好な相関を示している。

表2と図11に重回帰分析の結果、得られた式(5)の回帰係数を示す。なお、 $c_0$ はNS成分では0.05、EW成分では0.1となった。図11を見ると、 $r_a$ に関する係数 $c_1(T)$ は固有周期0.1～0.5秒付近の間で大きくなっていき、固有周期0.3秒～3秒付近で2前後の値となっている。 $c_2(T)$ は震度フィルターのピーク周期付近で係数が大きく、固有周期0.3秒以降に関しては震度フィルターと似た形状となっている。 $W_T$ に関する係数を見ると、 $c_3(T)$ はほとんどの周期で値が負になっている。 $c_4(T)$ は固有周期0.1～0.2秒で係数が小さく、逆に $c_5(T)$ は固有周期0.1～0.2秒で係数が大きくなっており、両者とも固有周期が長くなるほど係数が0に近づく傾向にある。 $T_g$ が0.2秒、2秒の場合の式(5)の第3、4、5項の和を見ると(図12)、第3、4、5項の和のピーク周期は概ね $T_g$ と一致しており、加速度応答の伝達関数のような形状を示している。

続いて、 $\bar{S}_a(T)$ の計算対象とした21個の $T$ に対して、式(5)から求めた $\bar{S}_a^p(T)$ と $\bar{S}_a^o(T)$ の相関係数と統計モデルの良さを評価する指標の一つである $AIC$ を求める。図13に相関係数、図14に $AIC$ を示す。図13、14には $W_T$ の有無による $\bar{S}_a(T)$ の推定精度の違いを調べるために、既往研究<sup>1), 2), 3)</sup>のように $r_a$ だけをパラメータとする式(6)による推定値と観測値の相関係数や $AIC$ を合わせて示す。

$$\log_{10} \bar{S}_a(T) = c_1(T) \log_{10} r_a + c_2(T) r_a + c_3(T) \quad (6)$$

図13から明らかなように、いずれの固有周期でも式(5)を用いた方が観測値と推定値の相関係数が高くなっている。式(5)を用いた場合の相関係数の傾向を見ると、固有周期0.1～0.23秒では大半で相関係数が0.7を下回っており、他の周期に比べて相関が低い。加速度応答スペクトルは短周期の振幅が相対的に大きくなりやすいので、 $W_T$ を考慮しても $\bar{S}_a(T)$ の推定に対する影響が他の周期に比べて小さく、相関が低くなったものと考えられる。続いて、図14の $AIC$ を見ると、いずれの固有周期でも式(5)が式(6)よりも $AIC$ が小さく、推定パラメータに固有周期と卓越周期を考慮した式(5)の方が $\bar{S}_a(T)$ の推定において優れていることが分かる。

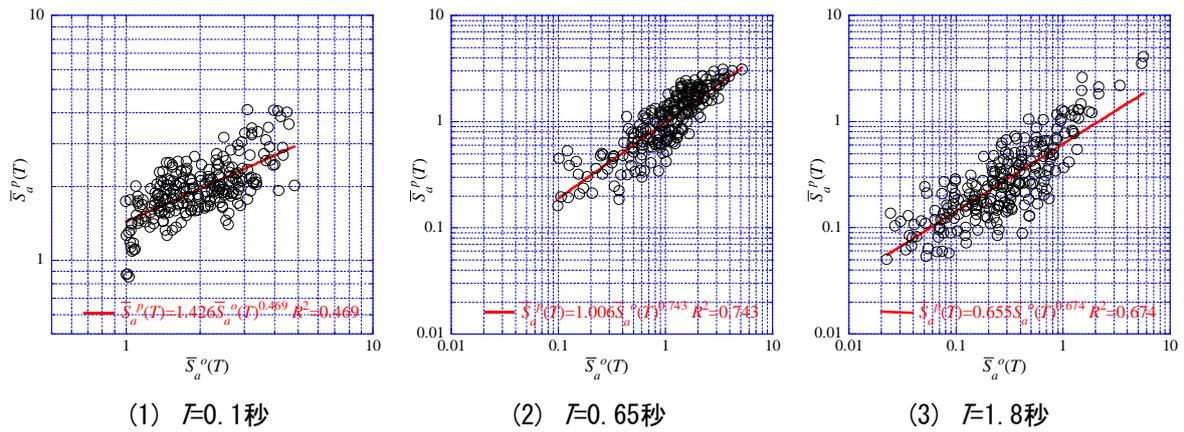


図10  $\bar{S}_a(T)$ の観測値と推定値の対応

表2 式(5)の回帰係数(左NS成分、右EW成分)

固有周期	$c_1(T)$	$c_2(T)$	$c_3(T)$	$c_4(T)$	$c_5(T)$	$c_6(T)$
0.100	0.135	-0.620	0.136	-1.024	0.604	1.008
0.119	0.343	-0.804	-0.139	-0.427	0.340	0.888
0.141	0.688	-1.030	-0.120	-0.493	0.377	1.159
0.167	1.071	-1.251	-0.358	0.007	0.074	1.187
0.197	1.423	-1.450	-0.349	0.115	-0.039	1.388
0.234	1.765	-1.668	-0.279	0.057	-0.006	1.631
0.277	2.111	-1.757	-0.253	-0.047	0.042	1.834
0.329	2.315	-1.848	-0.204	-0.072	0.025	1.964
0.390	2.430	-1.744	-0.265	-0.020	0.014	1.886
0.462	2.538	-1.746	-0.195	-0.125	0.031	1.958
0.548	2.596	-1.747	-0.203	-0.105	0.020	1.943
0.649	2.444	-1.488	-0.157	-0.115	0.017	1.739
0.770	2.104	-1.063	-0.129	-0.110	0.011	1.380
0.912	2.052	-0.853	-0.193	-0.071	0.008	1.156
1.081	2.070	-0.781	-0.272	-0.041	0.005	1.029
1.282	1.963	-0.694	-0.300	-0.025	0.003	0.865
1.520	1.862	-0.504	-0.370	0.001	0.001	0.643
1.801	1.602	-0.228	-0.376	-0.001	8.0.E-04	0.369
2.135	1.863	-0.568	-0.435	0.011	2.6.E-04	0.528
2.531	2.045	-0.904	-0.474	0.016	6.8.E-05	0.638
3.000	1.884	-0.857	-0.553	0.021	-1.2.E-04	0.491

固有周期	$c_1(T)$	$c_2(T)$	$c_3(T)$	$c_4(T)$	$c_5(T)$	$c_6(T)$
0.100	0.028	-0.653	0.057	-1.060	0.854	0.853
0.119	0.375	-0.896	0.701	-1.968	1.237	1.648
0.141	0.687	-1.060	-0.535	0.011	0.261	0.848
0.167	0.976	-1.208	-0.726	0.480	-0.067	0.863
0.197	1.224	-1.267	-0.252	-0.112	0.084	1.361
0.234	1.568	-1.384	-0.450	0.120	-0.006	1.382
0.277	1.561	-1.187	-0.429	0.079	-0.001	1.285
0.329	1.946	-1.417	-0.372	0.029	0.008	1.539
0.390	2.188	-1.525	-0.313	-0.010	0.011	1.675
0.462	2.318	-1.488	-0.306	0.003	0.005	1.670
0.548	2.552	-1.570	-0.392	0.040	0.001	1.706
0.649	2.518	-1.450	-0.383	0.016	0.004	1.613
0.770	2.159	-0.954	-0.392	0.036	0.001	1.181
0.912	2.414	-1.013	-0.474	0.070	-0.002	1.191
1.081	2.280	-0.849	-0.446	0.038	0.000	1.030
1.282	1.860	-0.487	-0.444	0.027	0.000	0.652
1.520	2.208	-0.812	-0.539	0.040	0.000	0.851
1.801	2.398	-0.947	-0.625	0.052	-6.0.E-04	0.908
2.135	2.337	-0.988	-0.559	0.030	-5.3.E-05	0.846
2.531	2.325	-1.148	-0.512	0.019	1.5.E-04	0.816
3.000	2.315	-1.210	-0.554	0.020	5.9.E-05	0.776

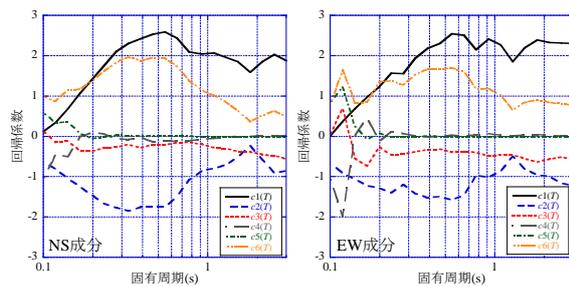


図11 式(5)の回帰係数

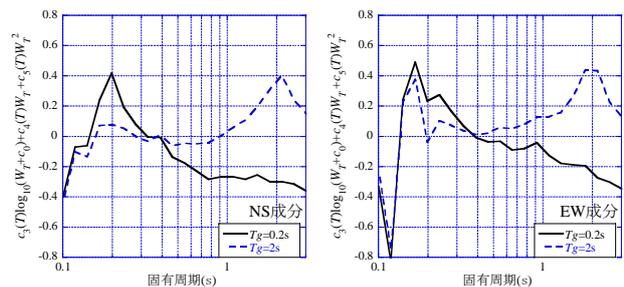


図12 式(5)の第3、4、5項の和

## 4.2 加速度応答スペクトルの推定値と観測値の比較

4.1で得られた式(5)、(6)により $\bar{S}_a(T)$ を計算し、最大地動加速度を乗じることによって、絶対加速度応答を推定する。図15に式(5)、(6)を用いて推定した加速度応答スペクトルと観測値によるスペクトルの一部を、図16に全解析データを対象に求めた加速度応答スペクトルの推定値と観測値の相関係数を示す。

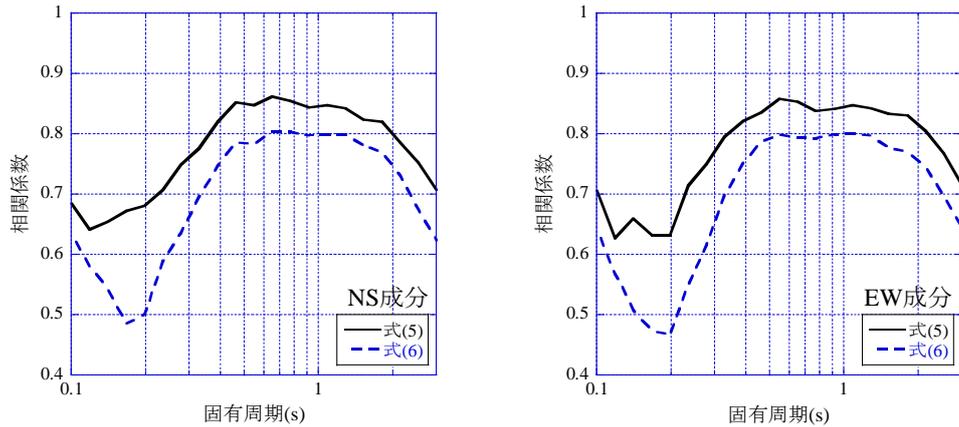


図13  $\bar{S}_a(T)$ の観測値と推定値の相関係数

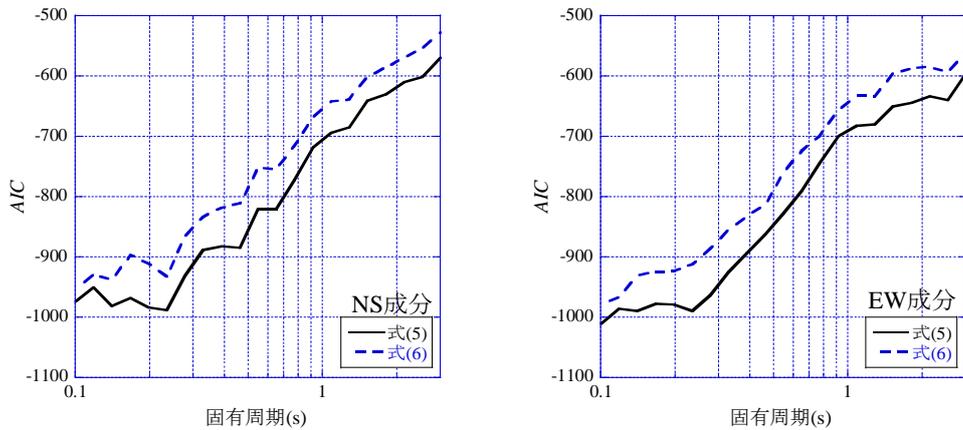


図14 式(5)、(6)に対するAIC

図15の応答スペクトルはNS、EW成分を幾何平均したものである。また、図の右上の英数字は観測点コードと表1の地震番号であり、括弧内の数字は計測震度である。まず、図15を見ると、多くの観測点で式(5)による推定値の方が明らかに観測値との対応が良く、形状が観測値に沿ったものとなっている。また、式(6)による推定値では応答スペクトルのピーク周期が観測値とかなりずれているものもあるが、式(5)の場合は推定値と観測値でピーク周期が対応しており、推定の際に卓越周期と固有周期の関係を考慮した効果が表れている。固有周期1秒以上にピークが見られるE9E(地震3)やNIG018(地震9)では式(5)と式(6)で推定結果が大きく異なり、式(5)による推定値では固有周期1秒以上にあるピークの振幅が観測値と概ね一致していることが分かる。ただし、ISK005(地震8)、AKTH04(地震10)のように応答スペクトルのピーク周期よりも短周期側で応答を過大評価している推定結果もあることから、今後、原因を調べた上で推定精度の向上に努めていきたい。続いて、図16の固有周期ごとの応答スペクトルの観測値と推定値の相関係数を見ると、同図から明らかなように式(5)による推定値と観測値の相関係数は、いずれの周期でも式(6)による値を上回っており、固有周期2秒付近までは概ね相関係数が0.8を超えている。なお、図16における固有周期0.1~0.39秒の相関係数は図13の値に比べて0.2~0.3ほど大きい。これは $\bar{S}_a(T)$ を求める際に $\bar{S}_a(T)$ に乘じる最大地動加速度が加速度応答スペクトルの短周期成分と相関が高い<sup>8)</sup>ためだと考えられる。

#### 4.3 自治体観測点の加速度応答スペクトルの推定

本節では気象庁、K-NET、KiK-netの地震観測記録から構築した加速度応答スペクトル推定式によって、自治体観測点の加速度応答スペクトルを推定する。今回、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖

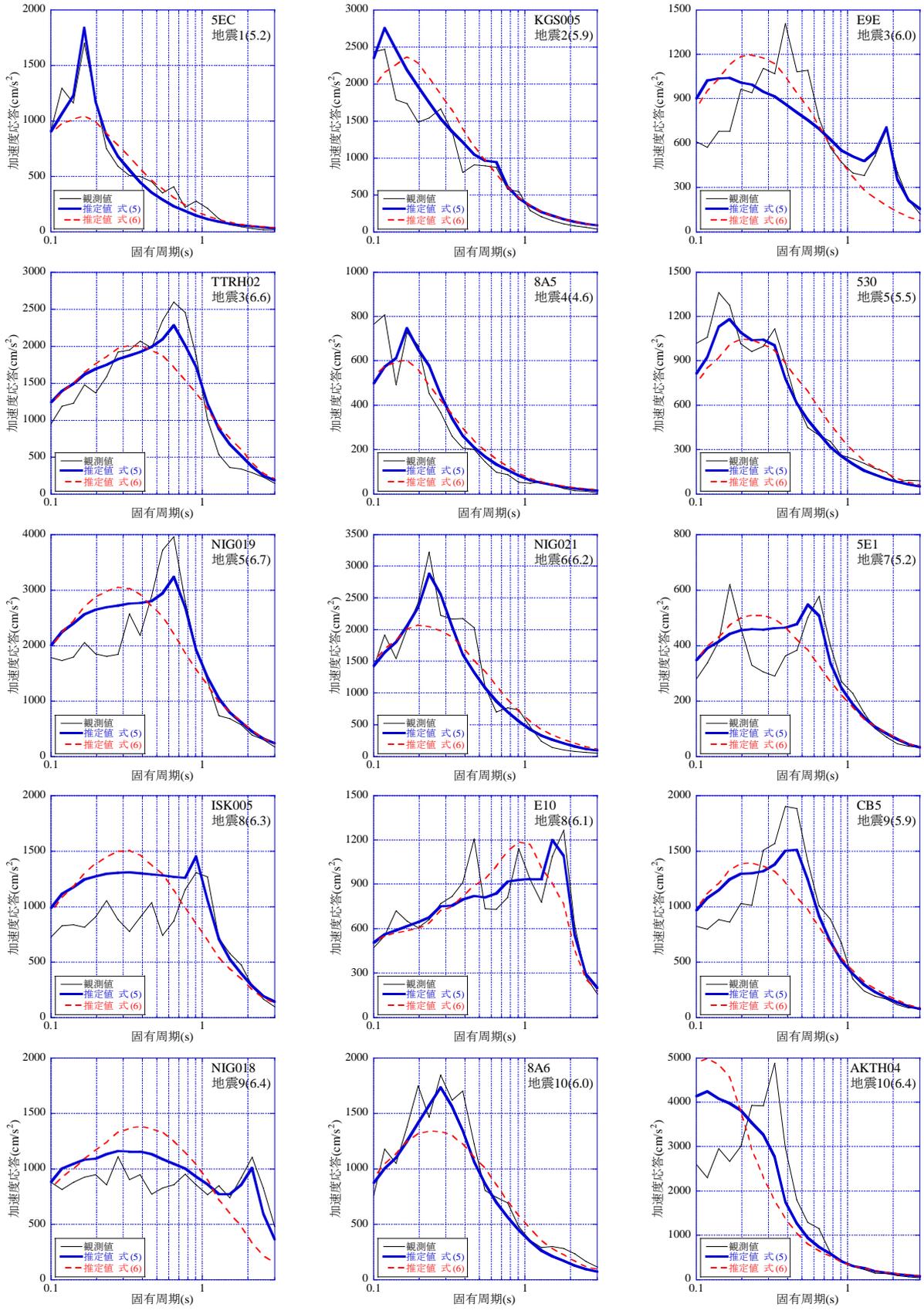


図15 加速度応答スペクトルの観測値と推定値 (图中、右上の英数字3桁は気象庁、英語3桁数字3桁はK-NET、その他はKik-net観測点のコード)

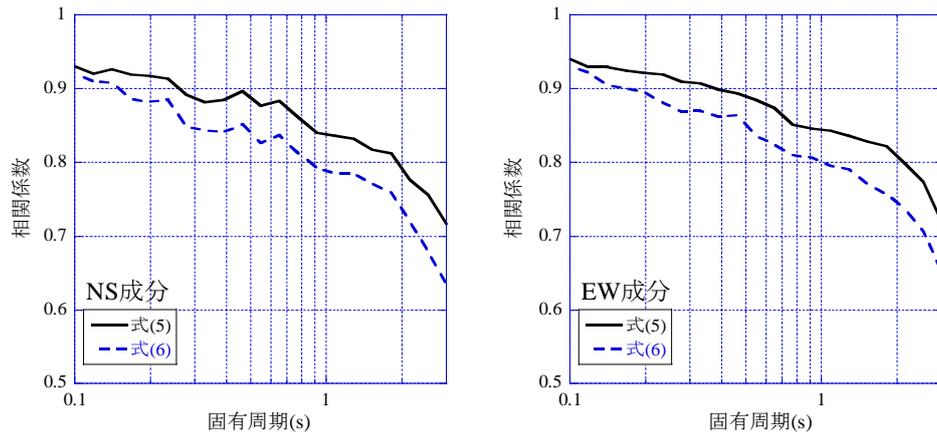


図16 加速度応答スペクトルの観測値と推定値の相関係数

地震、2008年岩手・宮城内陸地震を対象に、地震波形が得られている自治体観測点の中で計測震度が上位3つの観測点の加速度応答スペクトルを推定する。図17に加速度応答スペクトルの観測値と式(5)、(6)による推定値を示す。川口町川口と山古志村竹沢はそれぞれ固有周期0.2秒、1.8秒で式(5)による加速度応答スペクトルの推定値が観測値と2倍程度異なっているが、それ以外の観測点では観測値と式(5)による推定値がある程度、対応しており、本論文で求めた式(5)が自治体観測点の加速度応答スペクトルの推定に利用できることが分かった。

これまでの検討から、本論文で提案した応答スペクトル推定手法によって最大地動加速度、計測震度、卓越周期という3つの地震動指標だけで、加速度応答スペクトルの振幅や形状を概ね推定できることが明らかになった。推定式は簡便なものであることから、表計算ソフトでも容易に計算でき、地震発生時すぐに先の3つの地震動指標が得られる環境であれば、発生後、迅速に加速度応答スペクトルを推定することができる。また、気象庁地震年報などから上記の地震動指標が得られる場合は過去の地震の地震観測点の応答スペクトル推定に対しても適用することが可能である。

## 5. まとめ

本論文では地震波形が残っていない自治体観測点の加速度応答スペクトルを推定するために、従来の研究で用いられている最大加速度比に加え、地震動スペクトルの卓越周期と構造物の固有周期との関係を考慮した加速度応答スペクトル推定手法を提案した。検討では震度6強、6弱を記録しながら波形が消失した自治体観測点が多く見られた地殻内地震を対象として解析を行った。解析の結果、最大加速度比、卓越周期と固有周期の関係をパラメータとした応答推定式を用いた場合、最大加速度比のみの式に比べて、精度良く、加速度応答スペクトルを推定することができ、スペクトルの形状をある程度、評価できた。また、推定式を構築する際のデータに含まれていない自治体観測点を対象に加速度応答スペクトルを推定したところ、推定値と観測値はある程度、対応した。

今回の検討は過去の地震で波形の消失した自治体観測点の加速度応答スペクトルを目的としているが、提案手法では計測震度、最大地動加速度、卓越周期が分かれば簡単に加速度応答スペクトルを推定できることから、場合によっては地震発生後早期の加速度応答スペクトル推定にも利用できる可能性がある。今後は提案手法による推定精度の向上に取り組むとともに、2000年鳥取県西部地震や2003年の宮城県北部の地震などで地震波形が消失した自治体観測点を対象に、気象庁地震年報などから得られる地震動指標を用い、加速度応答スペクトルを推定する予定である。

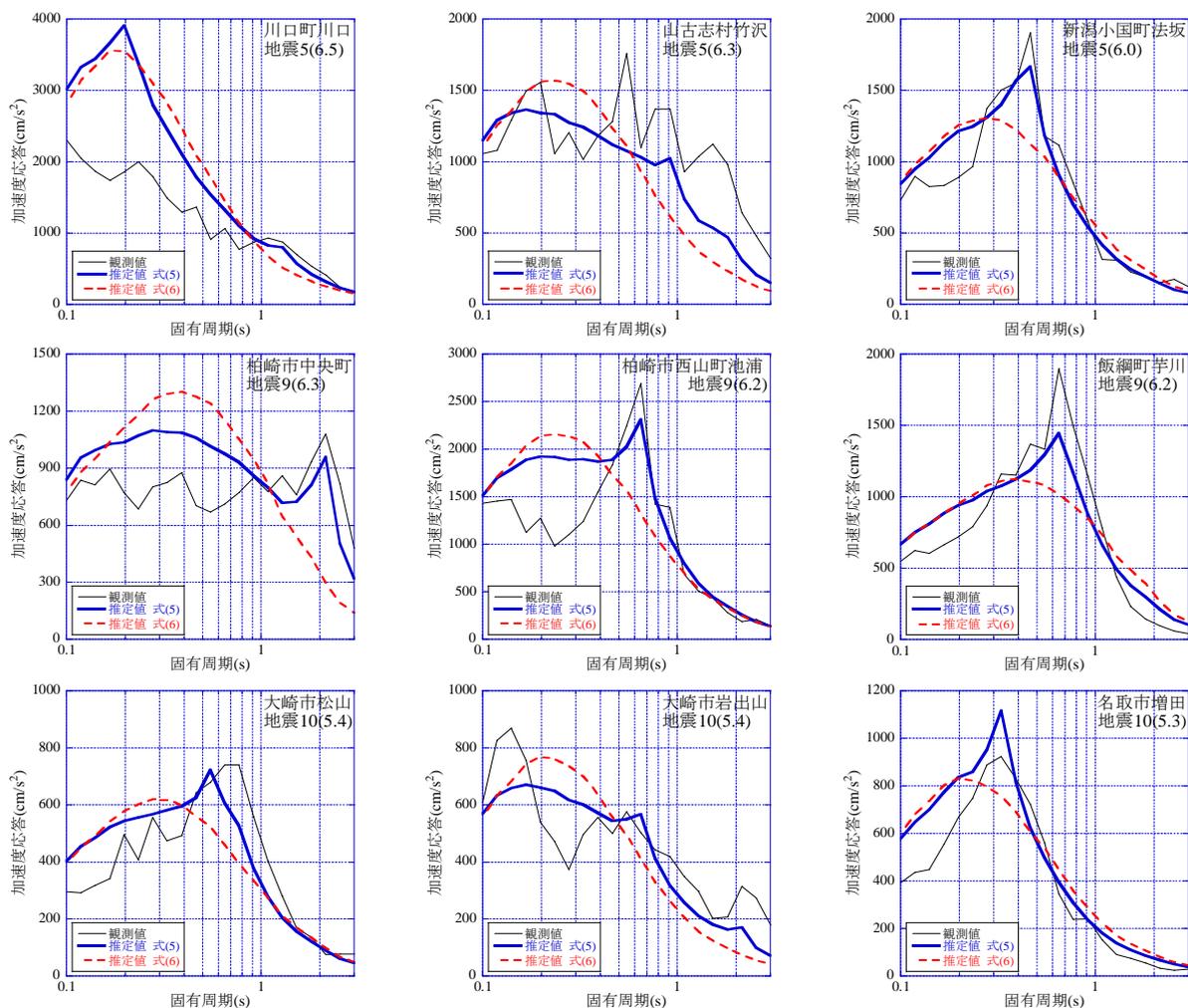


図17 自治体観測点の加速度応答スペクトルの観測値と推定値

## 謝 辞

本論文の作成に当たって、気象庁、地方自治体、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの地震波形を使用させて頂きました。また、3名の査読者の方々から貴重なご意見を頂きました。記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 西川隼人、宮島昌克：計測震度と最大加速度による地震動の周期特性の評価、土木学会論文集A、Vol. 65、No. 3、2009年、pp.784-796.
- 2) 西川隼人、宮島昌克：2007年能登半島地震における自治体観測点を対象とした周期1秒前後の速度応答スペクトルの推定、日本地震工学会論文集、第8巻、第2号、2008年、pp.11-21.
- 3) 青井 淳、境 有紀：波形が失われた観測点における地震動強さとスペクトルを推定する方法（その2）波形が失われた観測点の地震動特性の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009年、pp.309-310.
- 4) 総務省消防庁：次世代震度情報ネットワークのあり方検討会最終報告書、2006年.
- 5) Kanai, K. : Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Vol.35, 1957, pp.309-325.
- 6) Jennings, P. C. and Housner, G. W. and Tsai, N. C. : Simulated earthquake motions, Technical Report, *E. E. R. L.*, Pasadena, 1968.

- 7) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, *IEEE, Trans. on Automatic Control*, AC-19, No.6, 1974, pp.716-723.
- 8) 大井昌弘、野畑有秀、水谷 守、藤原広行：強震記録から見た地震動強さの指標間の関係、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp.633-638.

(受理：2010年4月28日)  
(掲載決定：2010年11月1日)

## **A Study on Evaluation of an Acceleration Response Spectrum at Local Government Sites Using Peak Acceleration Ratio and Predominant Period of Spectrum for Crustal Earthquake**

NISHIKAWA Hayato <sup>1)</sup> and MIYAJIMA Masakatsu <sup>2)</sup>

1) Member, Maizuru National College of Technology, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Kanazawa University, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

In this study, we propose a method of evaluation of an acceleration response spectrum at local government sites which lose seismic waveform records in case of crustal earthquakes. The proposed formula considers the relation between the predominant period of spectrum and the natural period of structure as a parameter in addition to  $A_0/A$  (a ratio of effective acceleration to *PGA*) used in the past studies. The result of analysis shows the proposed method can evaluate not only the peak value but also the shape of response spectrum.

*Key Words: Peak Acceleration Ratio, Predominant Period, Acceleration Response Spectrum, Local Government Sites, Crustal Earthquake*