



## 2008年岩手・宮城内陸地震における一迫、衣川震度観測点の フーリエスペクトルと応答スペクトルの推定

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@g.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2008年岩手・宮城内陸地震において震度6強を観測しながら、地震波形が現存していない一迫、衣川震度観測点の加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定した。まず、マグニチュード6～7クラスの地殻内地震で得られた地震観測記録を用い、最大加速度、計測震度、地震動スペクトルの卓越周期によって加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定式を求めた。続いて、推定式を求める際のデータに含まれていない自治体観測点に対して、加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定したところ、観測値と概ね対応した。最後に一迫、衣川観測点の加速度フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定したところ、周期1秒以下の短周期成分が卓越することが明らかになった。

キーワード： 2008年岩手・宮城内陸地震、自治体観測点、最大加速度比、卓越周期、フーリエスペクトル、応答スペクトル

### 1. はじめに

2008年6月14日に岩手県南部で発生した岩手・宮城内陸地震(気象庁マグニチュード7.2、震源深さ8km)では最大震度6強を記録し、北海道から関東・中部地方にかけて有感であった<sup>1)</sup>。震度6強、6弱を記録した地震観測点は概ね震央距離50kmの範囲に分布しており、その内訳は気象庁2地点、自治体9地点、K-NET3地点、KiK-net4地点である。これらの観測点における地震波形記録、地震動スペクトルを分析することは地殻内地震での震源付近の強震動特性の把握や地震動と構造物被害の関係を調べる上で極めて重要である。しかし、上記の震度6強、6弱を記録した観測点で最も数の多い自治体観測点では地震波形が存在せず、地震動のスペクトル特性を十分に把握することができない。

著者らはこのような自治体観測点の応答スペクトルを推定するために、全国のほとんど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や最大地動加速度などをパラメータとする応答スペクトル推定式を提案している<sup>2)</sup>。境他は著者らの提案した手法を用いて、計測震度、最大地動加速度から地震波形の消失した

自治体観測点の加速度応答スペクトルを推定している<sup>3)</sup>。地震動と構造物の被害状況の対応を調べる上で加速度応答スペクトルは適した指標だと考えられるが、応答スペクトルは元の地震波の応答を表わすものであるため、地震動の本来の性質を調べるためには、フーリエスペクトルあるいはパワースペクトルを推定する必要がある。また、これらの研究では推定の際に地震動スペクトルの卓越周期(以降、卓越周期)や地震による震源特性の違いを考慮していない。

本論文では最大地動加速度、計測震度から得られる実効加速度の他に、既往研究で考慮されていない卓越周期や震源特性に関する項をパラメータとする加速度フーリエスペクトル(以降、フーリエスペクトル)の推定式を求め、岩手・宮城内陸地震で震度6強を記録した一迫、衣川震度観測点の地震動を推定する。また、フーリエスペクトルと応答スペクトルの関係を利用し、フーリエスペクトル推定値から加速度応答スペクトルを推定する。まず、フーリエスペクトルの推定式を既往研究<sup>4)</sup>で用いたマグニチュード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。加速度応答スペクトルは過去の地震観測記録から求めたフーリエスペクトル推定式とフーリエスペクトル、応答スペクトルの関係を利用して計算する。加速度応答スペクトルは減衰定数5%を対象に求める。また、地震波形があるが、フーリエスペクトルの推定式を構築する際の回帰データに含まれていない自治体観測点に対して、フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定して観測値と比較し、推定式の有効性を確認する。最後に岩手・宮城内陸地震における一迫、衣川震度観測点のフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定し、過去の地殻内地震において周辺で大きな被害が出た観測点のスペクトルと比較する。

## 2. 解析データとその地震動特性

### 2.1 解析対象地震と観測記録

本論文でフーリエスペクトル推定式構築に用いるデータは既往研究<sup>4)</sup>と同じものであり、対象とした地震は気象庁マグニチュードが6～7程度の地殻内地震で、最大震度は震度6弱以上である。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。図1に解析に用いたデータの最大地動加速度と計測震度の度数分布を示す。最大地動加速度は3成分を時刻歴で合成した場合の最大値である。最大地動加速度は140～450cm/s<sup>2</sup>の観測点が全体の7割を占めている。計測震度は大きくなるほど観測点の数が減少している。

### 2.2 最大加速度比と卓越周期、フーリエスペクトルの関係

著者らは地震波形の消失した自治体観測点における地震動の周期特性を推定するために、自治体観測点で得ることが可能な実効加速度や最大地動加速度などと地震動スペクトルの関係を調べており、任意の地震波  $f(t)$  においてパーセバルの定理と極値理論から次式が成り立つことを導いている<sup>2)</sup>。

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

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、 $F(f)$  は  $f(t)$  のフーリエスペクトル、 $H(f)$  は震度フィルターである。計測震度を計算する際に必要な実効加速度  $A_0$  は  $A_{fmax}$  と異なり0.3秒間の継続時間を考慮したものであるため、 $A_0$  は  $A_{fmax}$  と同じ値にはならないが、図2のように両者の相関係数  $R$  は0.9を超える高い値であることから、式(1)の  $A_{fmax}$  を  $A_0$  に置き換えても、この関係式は概ね成り立つものと考えられる。以降、 $A_0$  と  $A_{max}$  の比を最大加速度比  $r_a$  と呼び、検討に用いることにする。

震度フィルターのピークは周期1～2秒にあるため、フーリエスペクトルの周期1～2秒の振幅が相対的に大きいほど、 $r_a$  が大きくなる。従って、フーリエスペクトルの卓越周期が周期1～2秒にある場合

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			回帰係数 番号
							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	5
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	6
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	7
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	8
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	9
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	10
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	11
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	8
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	12

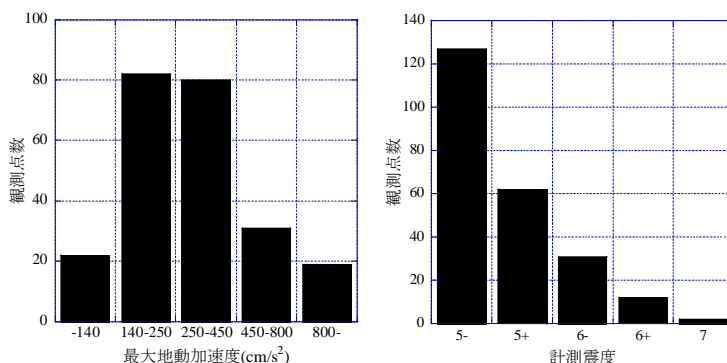


図1 最大地動加速度と計測震度の度数分布

に $r_a$ が大きくなるものと考えられる。このことを調べるために、今回、対象とした地震観測記録に対して卓越周期と最大加速度比の関係を求めた。図3に各地震観測記録の卓越周期と最大加速度比の対応を震度フィルターと合わせて示す。卓越周期はフーリエスペクトルにおいて周期0.1～10秒の範囲で振幅が最大となる周期である。フーリエスペクトルは地震波形から163.84秒間を取り出し、計算に用いた。地震波形の記録時間が163.84秒間を下回る場合は後続の0をつけてデータ数を調整した。また、フーリエスペクトルはバンド幅0.1HzのParzen Windowで平滑化した。最大地動加速度は水平2成分の最大振幅の大きい方の値を用いた。図3を見て分かるように卓越周期は0.1～4秒の間に分布している。最大加速度比は卓越周期が震度フィルターのピークのある周期1～2秒に近いほど大きくなる傾向があり、同じ卓越周期の最大加速度比のばらつきも周期1～2秒の場合で大きくなっている。一方、卓越周期0.1秒付近の最大加速度比は多くが0.1～0.2の範囲にあり、他の卓越周期に比べてばらつきが小さい。卓越周期が短周期にある地震波形の計測震度を計算する場合、震度フィルターによってスペクトルの短周期側の振幅がかなり低減されるため、最大地動加速度に比べて実効加速度、計測震度が小さくなってしまふ。そのため、卓越周期0.1秒付近では、最大加速度比の値が大きにならない。

卓越周期が同じでも地震動スペクトルの振幅特性にばらつきがあるが、基本的には卓越周期の振幅が相対的に大きくなるものと考えられる。従って、周期1～2秒の振幅が相対的に大きい場合は最大加速度比が大きくなり、周期0.1秒のような短周期での振幅が相対的に大きい場合は最大加速度比が小さくなるものと推測される。最大加速度比とスペクトル振幅の相対的な大きさの関係を検証するために、各観測記録に対してフーリエスペクトルのある周期のスペクトル振幅と周期0.1～10秒のスペクトル振幅平均値との比(以降、 $r_s$ とする)を求め、最大加速度比との対応を調べた。例として、図4に周期0.1秒、0.3秒、1.5秒の場合の最大加速度比 $r_a$ と $r_s$ の常用対数値の対応を示す。同図には、回帰分析によって求めた $r_a$ と $r_s$ の常用対数 $\log_{10}r_s$ の関係式による値(実線、破線)を合わせて示す。周期0.1秒を見ると、 $\log_{10}r_s$ は $r_a$ が小さいほど大きく、周期1.5秒では逆に $r_a$ が大きくなるほど $\log_{10}r_s$ も大きくなっており、 $r_a$ と $\log_{10}r_s$ に相関関係が見られることが分かる。一方、周期0.3秒の場合は回帰式による値に対して観測値がかなりばらついており、 $r_a$ と $\log_{10}r_s$ にあまり相関が見られない。図5に上記の3つの周期以外に対しても $\log_{10}r_s$ を $r_a$ の2次関数で表した場合の観測値と推定値の相関係数を示す。全体の中で周期0.1秒付近や周期0.7

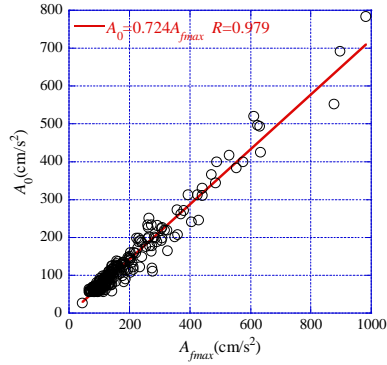


図2  $A_{fmax}$ と $A_0$ の対応

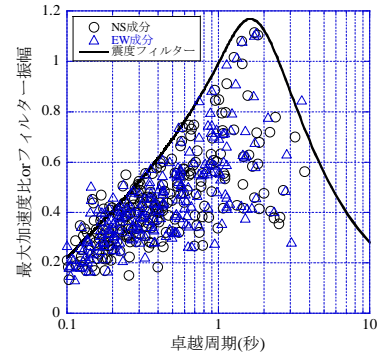


図3 卓越周期と最大加速度比 $r_a$

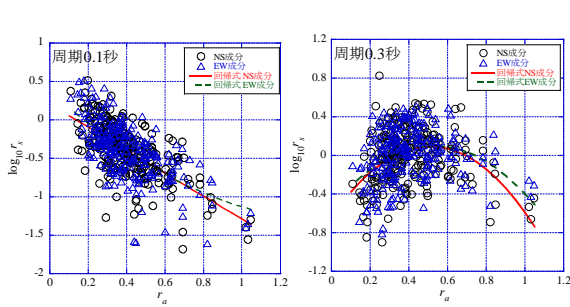


図4  $r_a$ と $\log_{10} r_s$ の対応

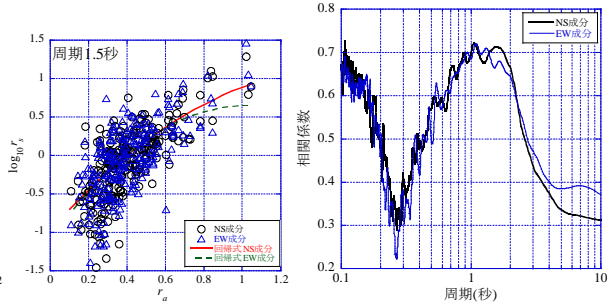


図5  $\log_{10} r_s$ の観測値と推定値の相関係数

～2秒で相関が高く、周期0.2～0.4秒と周期2.6秒以降で相関が低い。今回、解析に用いたフーリエスペクトルでは周期0.2～0.4秒の振幅が相対的に大きいものが少ないため相関が低くなったものと考えられる。また、周期2.6秒以降については卓越周期がこの範囲にあるデータが少ないため明瞭な相関関係が見られず、低い相関係数の要因になったものと推測される。このように相関の低い周期もあるが、周期0.1秒や周期1秒付近では相関が見られることから、フーリエスペクトル推定の際に $r_a$ を利用できるものと考えられる。

### 3. 最大加速度比と卓越周期によるフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定

#### 3.1 フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定手法

2章の検討から、周期0.1秒や周期1秒付近では、最大加速度比とフーリエスペクトルの相対的な大きさに相関が見られることから、これらの周期のフーリエスペクトルを推定する際に最大加速度比を活用できるものと考えられる。そこで本論文では最大加速度比 $r_a$ を考慮したフーリエスペクトル推定式を統計的に求めることにする。推定式はスペクトル形状を表す式と最大地動加速度や $r_a$ 、地震による震源特性の違いを考慮するための項から成り立っている。スペクトル形状を表す式と最大地動加速度は櫻井、松田<sup>5)</sup>が提案しているパワースペクトルの式(スペクトル形状を表す式や加速度自乗平均値などによる式)を参考に推定の際に用いた。フーリエスペクトル $F(T)$ の常用対数が以下の式で表されるものとし、表1に示す234のデータに基づき重回帰分析によって右辺の係数を求める。

$$\log_{10} F(T) = c_1(T) \log_{10} PGA + c_2(T) r_a^2 + c_3(T) r_a + c_4(T) \log_{10} G(T) + \sum_{i=1}^8 c_{i+4}(T) l_i \quad (2)$$

$$G(T) = \frac{1 + T_g^2 / T^2}{\sqrt{(1 - T_g^2 / T^2)^2 + 4h_g^2 T_g^2 / T^2}} \quad (3)$$

ここで $c_1(T) \sim c_{12}(T)$ は回帰係数であり、NS、EW成分それぞれに対し周期0.1～10秒を対象に求める。 $PGA$ は最大地動加速度( $\text{cm/s}^2$ )である。 $r_a$ は実効加速度を最大地動加速度(水平2成分の最大振幅の大きい方の値)で除した値、 $G(T)$ は澤田他<sup>6)</sup>が提案したサイト増幅特性の関数であり、 $T_g$ は関数のピーク周期、 $h_g$ はピークの形状を決めるパラメータである。 $T_g$ はフーリエスペクトルの卓越周期と仮定し、 $h_g$ は0.1とした。 $c_5(T) \sim c_{12}(T)$ は地震ごとの震源特性の違いなどに起因するスペクトル特性の差異を考慮するための係数である。ただし、鹿児島県北西部地震(表1の番号1、2)は発生地域や地震の規模に大きな違いがないので係数を求める際は一つの地震として扱った。新潟県中越地震と新潟県中越沖地震も同様の理由で一つの地震として対応する係数を求めた。 $l_i$ はダミー変数であり、 $i$ は表1の回帰係数番号に対応しており、回帰係数番号 $i$ の地震では1、それ以外の場合は0である。

図6に回帰係数、図7に観測値と式(2)による推定値の相関係数と標準偏差を示す。図6の回帰係数を見ると、 $c_1(T)$ は対象周期全域で変化が小さい。 $c_4(T)$ も周期0.1～1秒では変化が小さいが、周期1秒以上では周期が長くなるほど値が大きくなっている。これは卓越周期が1秒以上のデータが少ないこと、周期が長くなるほど $\log_{10} G(T)$ の値が0に近づくことが要因だと考えられる。続いて、 $r_a$ に関する係数の影響を見るために、式(2)右辺の第2項と第3項の和を求めた(図8)。図8を見ると $r_a$ が大きくなるほど、短周期と長周期の値が相対的に小さくなり、 $r_a=1$ の場合は震度フィルターのピーク振幅のある周期1～2秒の値が相対的に大きくなっており、 $r_a$ が大きいほど地震動スペクトルの周期1～2秒の振幅が相対的に大きくなるという特性と対応している。

次に回帰係数 $c_5(T) \sim c_{12}(T)$ を見ると、周期1秒よりも短周期では各係数の違いがあまり見られないが、1秒よりも長周期側では規模の小さい地震の係数( $c_5(T)$ 、 $c_7(T)$ 、 $c_9(T)$ )が他の係数に比べて小さいことが分かる。これは地震の規模が小さいほど震源スペクトルのコーナー周期が短周期側にシフトすることに起因しているものと考えられる。また、同じ地震でもNS成分とEW成分が異なっているが、これは水平2成分で震源の放射特性や破壊伝播効果などが異なるためだと考えられる。続いて、観測値と推定値の相関係数を見ると、周期3秒よりも短周期側ではほとんどで相関係数が0.75を超えており、相関が

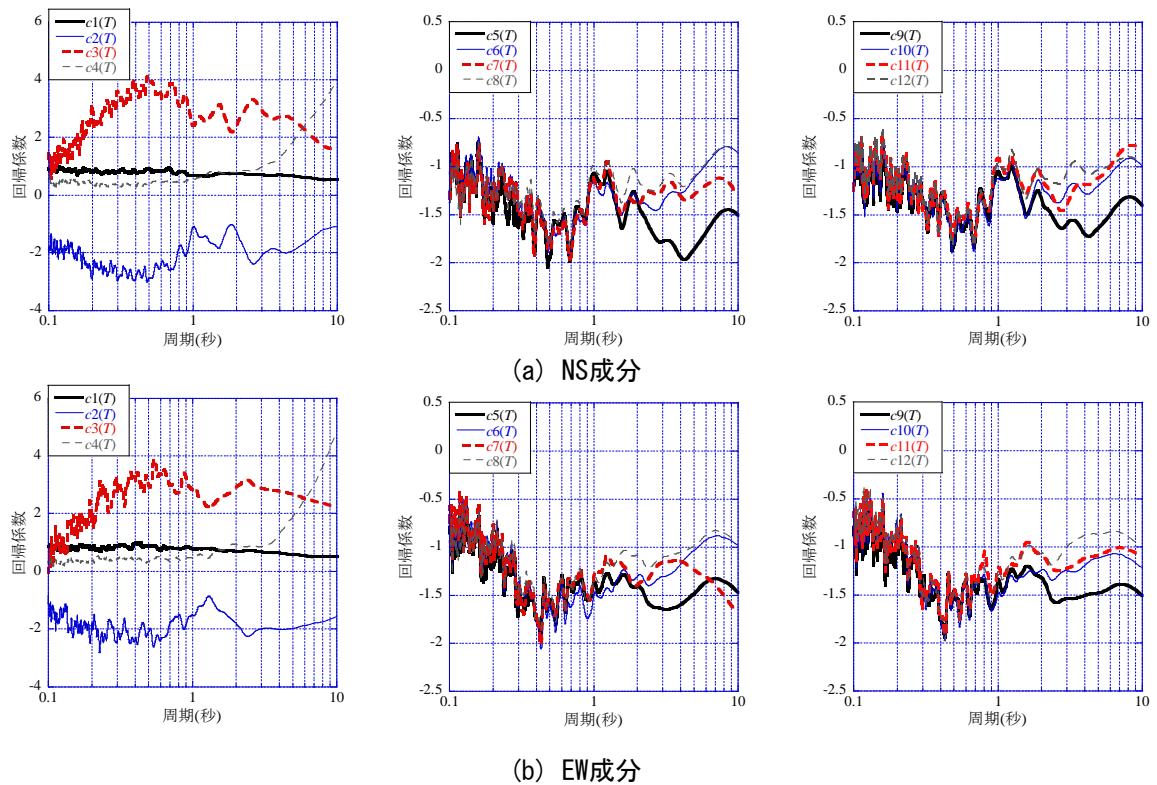
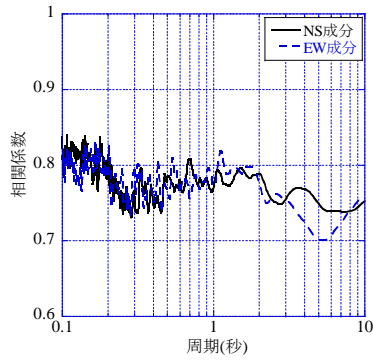
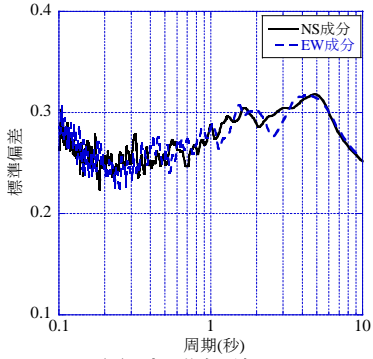


図6 回帰係数





(a) 相関係数



(b) 標準偏差

図7 フーリエスペクトルの観測値と推定値の相関係数と標準偏差

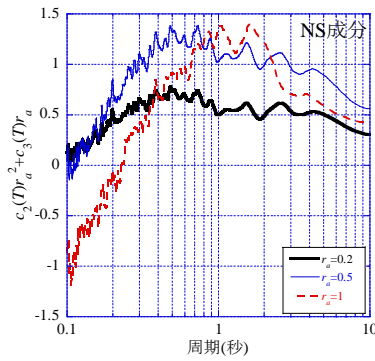


図8  $G_2(T)r_a^2 + G_3(T)r_a$

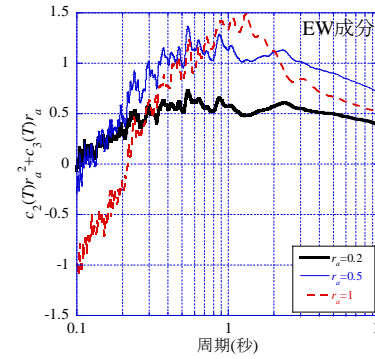
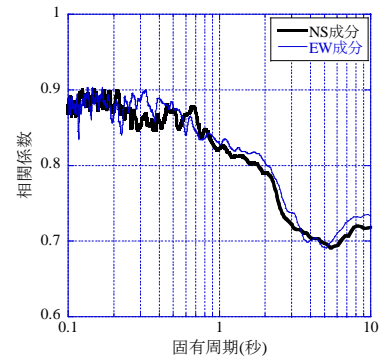
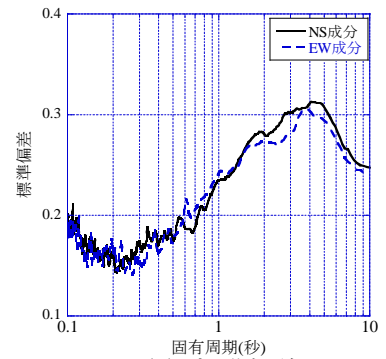


図8  $G_2(T)r_a^2 + G_3(T)r_a$



(a) 相関係数



(b) 標準偏差

図9 応答スペクトルの観測値と推定値の相関係数と標準偏差

見られることが分かる。周期3秒よりも長周期で相関が低下している要因として、この周期に卓越周期の存在するデータがほとんどないこと、 $r_a$ と $\log_{10}r_s$ の相関が低いため $r_a$ のフーリエスペクトル推定精度向上への寄与が小さかったことが考えられる。

式(2)の推定式はフーリエスペクトルを対象としたものであるが、フーリエスペクトルと応答スペクトルの関係を利用すれば、加速度応答スペクトルの推定が可能であると考えられる。ここでは式(2)とフーリエスペクトルと応答スペクトルの関係を利用して、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの推定を試みる。加速度フーリエスペクトルは減衰定数0%の速度応答スペクトルに近似することが知られている。加速度フーリエスペクトルを減衰定数0%の速度応答スペクトルとし、角振動数を乗じることにより、擬似加速度応答スペクトルを求める。ただし、得られた擬似加速度応答スペクトルは減衰定数0%であるので、5%の場合の値を求める際は何らかの補正が必要である。ここでは大崎他<sup>7)</sup>が提案している次の補正関数を用いて、応答スペクトルの減衰定数に関する補正を行う。

$$R(h,T) = \frac{1}{\sqrt{1 + c_{h1}(h - 0.05)\exp(-c_{h2}T/T_e)}} \quad (4)$$

ここで $R(h,T)$ は減衰定数に関する補正関数、 $h$ は応答スペクトルの減衰定数であり、ここでは0とする。 $T$ は周期(秒)、 $T_e$ は地震動の有効継続時間(秒)であり、次式によって求める。

$$T_e = 10^{0.31M - 1.2} \quad (5)$$

$M$ はマグニチュードである。今回、式(4)によって減衰定数の違いによる補正を行うが、補正係数のパラメータは大崎他の値をそのまま使うのではなく、本論文で対象とした観測記録を用いてパラメータの値を調整した。全データ(NS、EW成分234×2個)を用い、以下の関数が最小になるように、パラメー

タ  $c_{h1}$ 、 $c_{h2}$ を求めた。

$$error = \sum_{i=1}^{234 \times 2} \{ \log_{10} S_{ai}(T) - \log_{10} F_i(T) \times 2\pi/T \times R(h,T) \}^2 \quad (6)$$

$error$ は誤差二乗和、 $S_{ai}(T)$ は*i*番目のデータの固有周期*T*の加速度応答スペクトル、 $F_i(T)$ は*i*番目のデータの固有周期*T*のフーリエスペクトルである。計算の結果、 $c_{h1}$ は15.4、 $c_{h2}$ は3.5となった。

図9に加速度応答スペクトルの観測値と上記の方法によって求めた推定値の相関係数と標準偏差を示す。観測値と推定値の相関係数はフーリエスペクトルの場合と同様に常用対数値である。図9を見て分かるように、固有周期3～7秒では相関係数が0.7を下回っている周期もあるが、固有周期0.1～2秒では相関係数が0.8～0.9の範囲にあり、比較的、推定精度が良いことが分かる。

図10と図11にフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの観測値(黒い実線)と推定値(青い実線)の一部を示す。また、図の右上に観測点名と表1の地震番号と計測震度(括弧内の数字)を示す。まず、フーリエスペクトルを見ると、推定値は概ね観測値に沿った値となっており、全体的に見ると、両者は対応していることが分かる。加速度応答スペクトルでは境港市東本町、KiK-net東成瀬の観測値と推定値のピーク周期が合っていない。境港市東本町のフーリエスペクトルには周期0.4秒と1.8秒にピークがあるが、式(2)は単一のピークしか考慮できないので、推定値では周期0.4秒のピークを評価できず、その結果、応答スペクトルもこの周期付近では観測値と推定値の対応が悪い。また、KiK-net東成瀬は最大振幅が際立って大きいため $r_a$ が小さくなり、そのため、短周期成分が過大評価となっている。しかし、これら以外では両者のピーク周期が概ね対応しており、各周期の振幅も大きな違いはなく、提案した手法によって観測値を概ね推定できていることが分かる。

### 3.2 回帰データに含まれていない自治体観測点のスペクトル推定

本論文の目的は地震波形の残っていない自治体観測点のフーリエスペクトル、加速度応答スペクトルを推定することである。そのため、式(2)の推定式を求める際の回帰データ(気象庁、K-NET、KiK-net観測記録による)に含まれていない観測点に対して、推定式を適用できるかどうか確認する必要がある。そこで地震波形が収集されており、なおかつ、気象庁地震年報に計測震度、最大地動加速度、卓越周期が記載されている自治体観測点が複数ある2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震を対象に自治体観測点のフーリエスペクトル、加速度応答スペクトルを推定し、観測値と比較する。表2に対象とした自治体観測点の情報を示す。計測震度、最大地動加速度、卓越周期は地震年報<sup>8)</sup>・<sup>9)</sup>に記載されている値である。

図12に2004年新潟県中越地震、図13に2007年新潟県中越沖地震における自治体観測点のフーリエスペクトル、加速度応答スペクトルの観測値と推定値を示す。フーリエスペクトル、加速度応答スペクトルの計算手順は2章と同様である。図12、13を見ると、多くの観測点で推定値が観測値の特徴を概ね再現できており、式(2)の構築の際の回帰データに含まれていない観測点のフーリエスペクトル、加速度応答スペクトル推定においても提案手法が適用できるものと考えられる。ただし、新潟県中越地震の広神村今泉や中越沖地震の柏崎市高柳町岡野町のように最大地動加速度のNS、EW成分の値に大きな違いがある観測点では、観測値と推定値の差が大きくなっている。 $r_a$ は実効加速度を最大地動加速度のNS、EW成分の大きい方の値で除して求めているので、スペクトル推定の際に最大地動加速度が大きい方の成分の影響を受けやすい。NS、EW成分の最大地動加速度の差が小さい場合はよいが、上述の広神村今泉のように両成分の最大地動加速度の差が大きい場合はスペクトルの推定精度に悪影響を及ぼす可能性がある。このような地震観測点の対象地震とそれ以外の同規模の地震で得られた最大加速度比を比較し、対象地震の最大加速度比の値を吟味する必要がある。また、今回、解析に用いたデータでは卓越周期が2秒以上のものが少ないので、中越沖地震の刈羽村割町新田のように卓越周期付近での推定精度が悪い可能性がある。今後は卓越周期が長周期側にある地震観測記録を回帰データに追加することにより、卓越周期が長周期の場合の推定精度の向上を図っていく予定である。

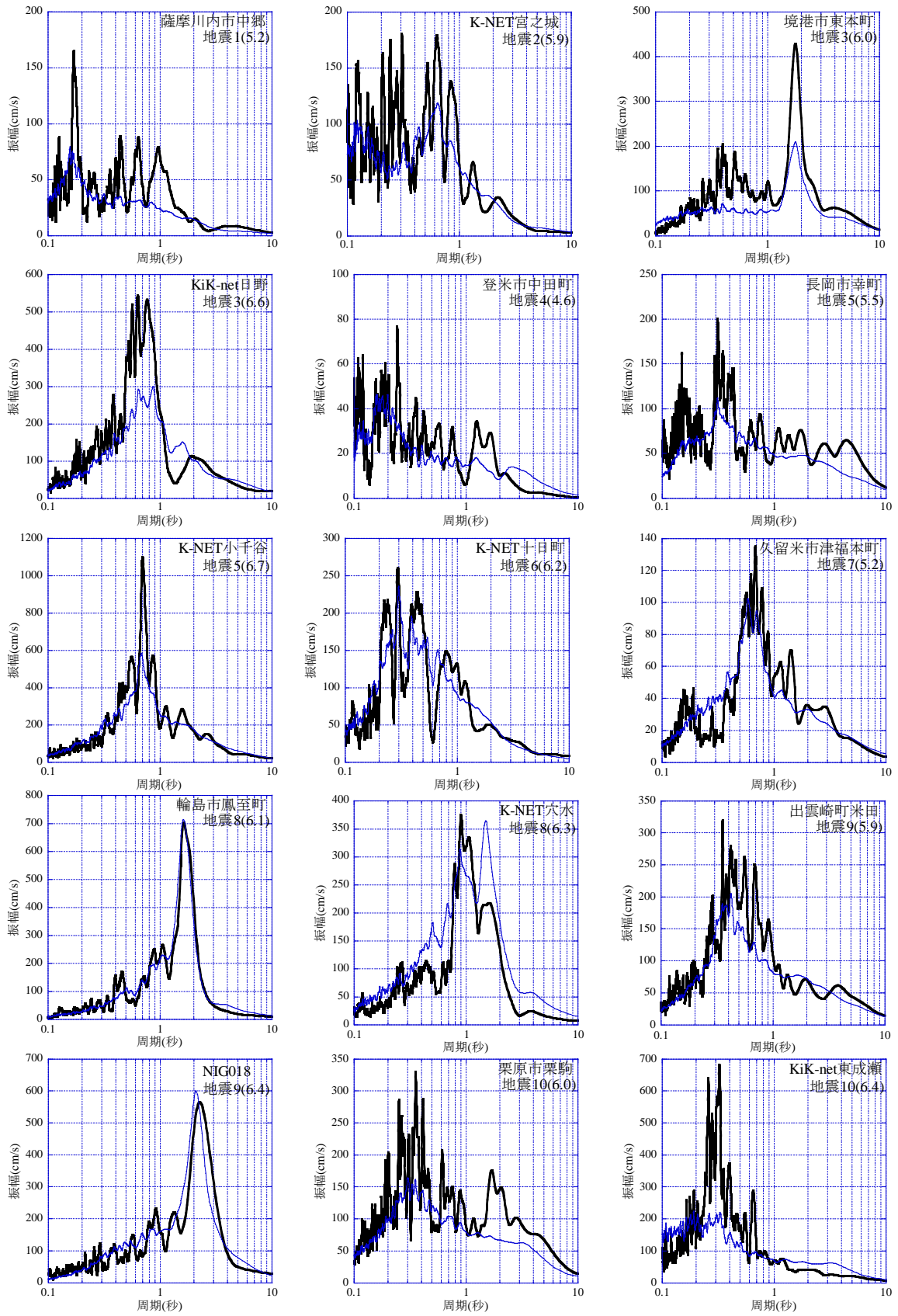


図10 加速度フーリエスペクトルの観測値(黒い実線)と推定値(青い実線)



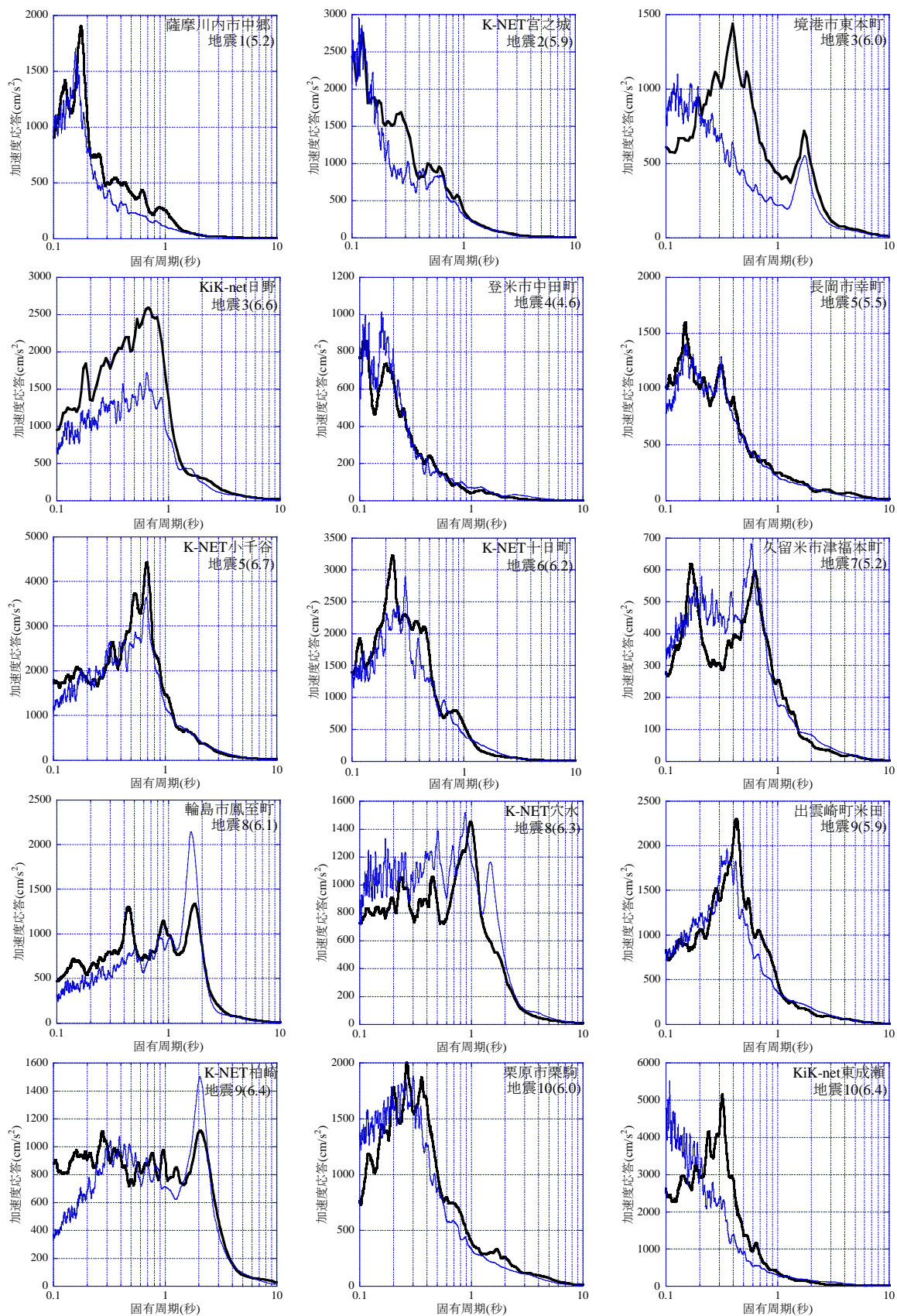


図11 加速度応答スペクトルの観測値(黒い実線)と推定値(青い実線)

表2 2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震の自治体観測点の情報

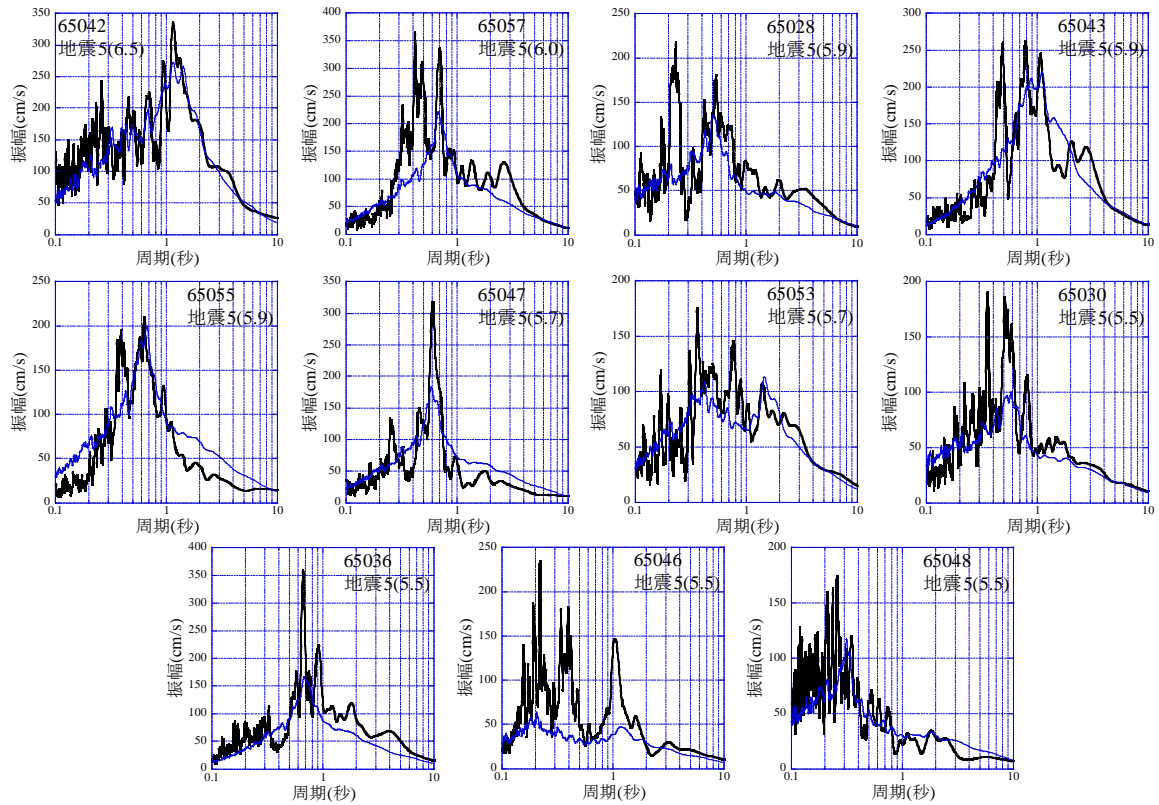
地震名	観測点名	観測点 コード	計測震度	$r_a$	最大地動加速度( $\text{cm/s}^2$ )		卓越周期(秒)	
					NS	EW	NS	EW
2004年新潟県 中越地震	川口町川口	65042	6.5	0.360	1141.9	1675.8	1.0	1.3
	新潟小国町法坂	65057	6.0	0.490	394.6	691.8	0.7	0.7
	十日町市千歳町	65028	5.9	0.260	1161.0	665.0	0.5	0.5
	堀之内町堀之内	65043	5.9	0.652	462.9	400.0	0.8	1.1
	新潟中里村田沢	65055	5.9	0.404	617.7	747.8	0.7	0.6
	守門村須原	65047	5.7	0.424	565.6	433.3	0.6	0.6
	新潟川西町水口沢	65053	5.7	0.352	681.4	648.7	0.4	1.4
	栃尾市大町	65030	5.5	0.249	665.7	764.6	0.6	0.5
	新潟三島町上岩井	65036	5.5	0.551	283.3	345.7	0.7	0.7
	広神村今泉	65046	5.5	0.207	352.4	918.4	1.1	0.2
入広瀬村穴沢	65048	5.5	0.192	992.3	758.9	0.3	0.3	
2007年新潟県 中越沖地震	柏崎市西山町池浦	65059	6.2	0.486	840.7	878.6	0.7	0.7
	長岡市小国町法坂	65057	6.1	0.620	503.7	613.2	0.5	0.7
	刈羽村割町新田	65058	6.0	0.729	464.9	374.1	2.9	2.3
	上越市柿崎区柿崎	65010	5.8	0.602	297.0	447.1	1.4	1.2
	上越市吉川区原之町	65013	5.8	0.606	308.2	444.3	0.8	0.9
	長岡市山古志竹沢	65041	5.7	0.686	349.5	319.0	0.7	0.7
	長岡市上岩井	65036	5.6	0.580	280.9	368.3	0.8	0.7
	柏崎市高柳町岡野町	65056	5.6	0.299	715.9	357.5	0.8	0.7
	上越市三和区井ノ口	65019	5.5	0.709	206.4	268.9	0.8	1.4
	長岡市中之島	65034	5.5	0.550	346.2	318.3	0.8	0.8
出雲崎町川西	65039	5.5	0.545	349.6	317.3	0.9	0.7	

#### 4. 2008年岩手・宮城内陸地震の一迫、衣川震度観測点に対する提案手法の適用

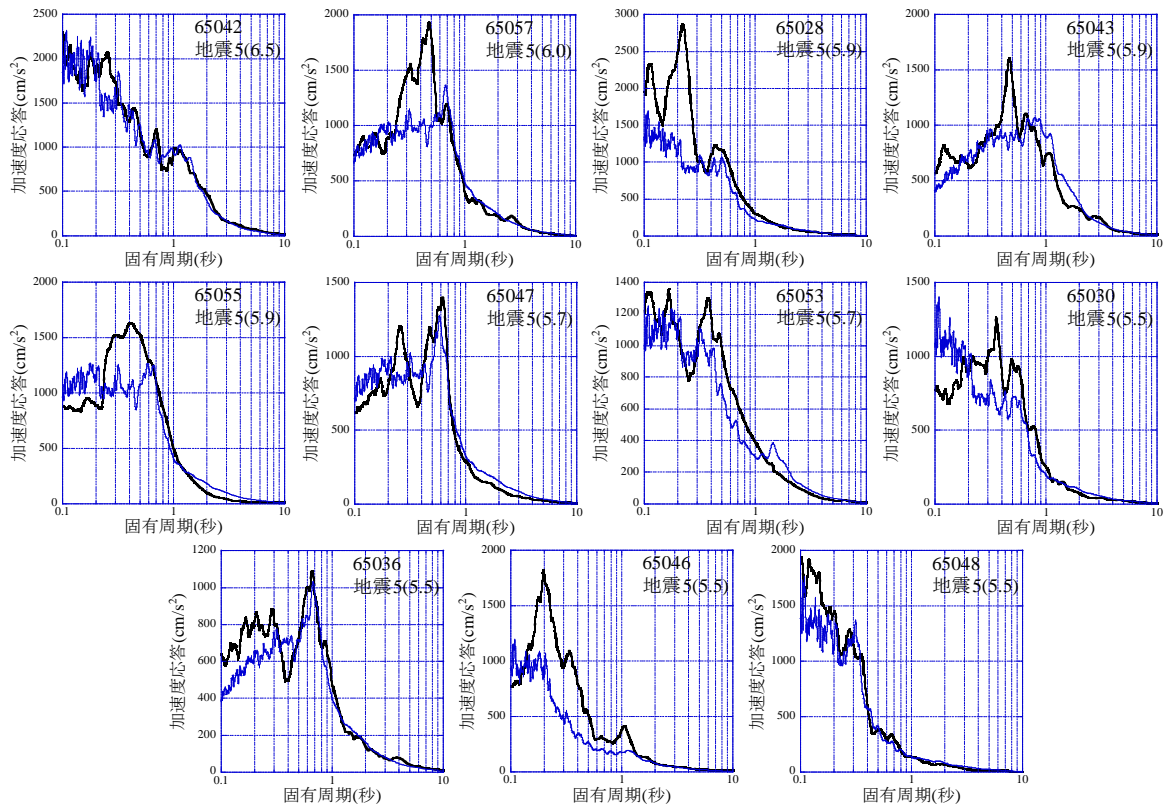
##### 4.1 最大加速度周期と卓越周期の対応

3章の検討結果から、自治体観測点でも収集可能な最大地動加速度、計測震度、卓越周期からフーリエスペクトル、加速度応答スペクトルを概ね推定できることが明らかになった。本章では提案した手法を用い2008年岩手・宮城内陸地震で震度6強を記録しながら地震波形が消失した一迫、衣川震度観測点のフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定を試みる。自治体観測点の一部の地震動情報は地震年報のデジタルデータによって得ることができる。表3にデジタルデータに記載されていた一迫、衣川震度観測点の地震動情報の一部を示す。最大地動加速度、計測震度は記載されているが、卓越周期は載っておらず、最大加速度周期(あるいは振動数)が記載されている。最大加速度周期は最大地動加速度を記録した正10秒間での卓越周期と定義されている。岩手・宮城内陸地震本震の卓越周期は不明だが、地震年報<sup>10)</sup>のデジタルデータには2008年7月～12月の期間については最大加速度周期だけでなく卓越周期も記載されている。これは震度計の設置環境が悪化したために、気象庁によって設置された臨時観測点による記録だと考えられる。そこで上記の期間の最大加速度周期と卓越周期の対応を調べ、最大加速度周期が卓越周期の代替として利用できるか調べることにする。図14に2観測点で得られた最大加速度周期と卓越周期の対応を示す。図中の破線は岩手・宮城内陸地震での最大加速度周期である。最大加速度周期と卓越周期の対応を見ると、両者が倍以上異なっているものもあるが、一迫はNS成分は約9割、EW成分は8割、衣川は両成分とも約9割が一致している。図14の地震で岩手・宮城内陸地震と規模が最も近い岩手県沿岸北部の地震( $M_{JMA}=6.8$ )では最大加速度周期と卓越周期が一致している。

次に、図15、16に示すこれらの観測点の微動H/V<sup>11)、12)</sup>を見ると、一迫震度観測点では周期3.41秒に卓越周期が見られる<sup>11)</sup>が、図14ではこの卓越周期に対応するものは見られない。2つのH/Vの成分は不明であるが、周期1秒よりも短周期を見ると0.4～0.5秒付近で卓越周期が見られる。岩手・宮城内陸地震の最大加速度周期はNS成分が0.5秒、EW成分が0.8秒であり、微動H/Vの卓越周期に比べて周期が長い。水平成分の最大地動加速度は $800\text{cm/s}^2$ 前後と大きいので、地盤の非線形化の影響で周期が長くなった

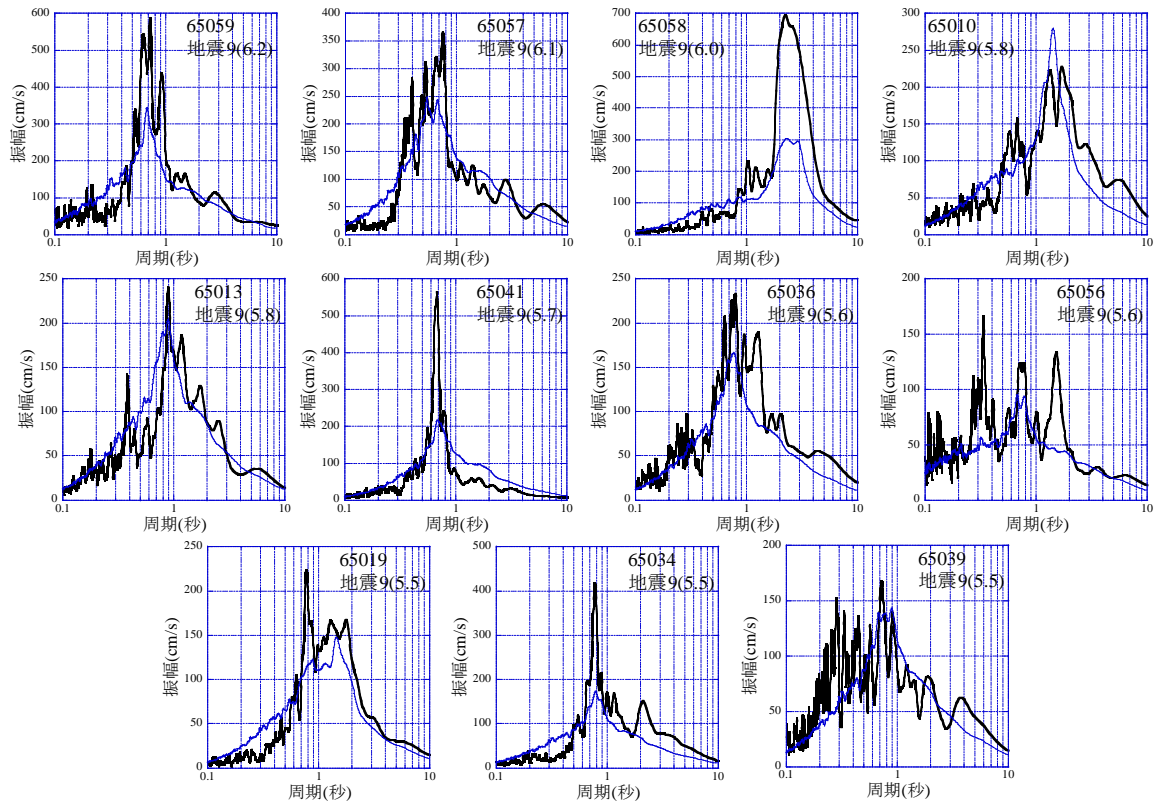


(a) フーリエスペクトル

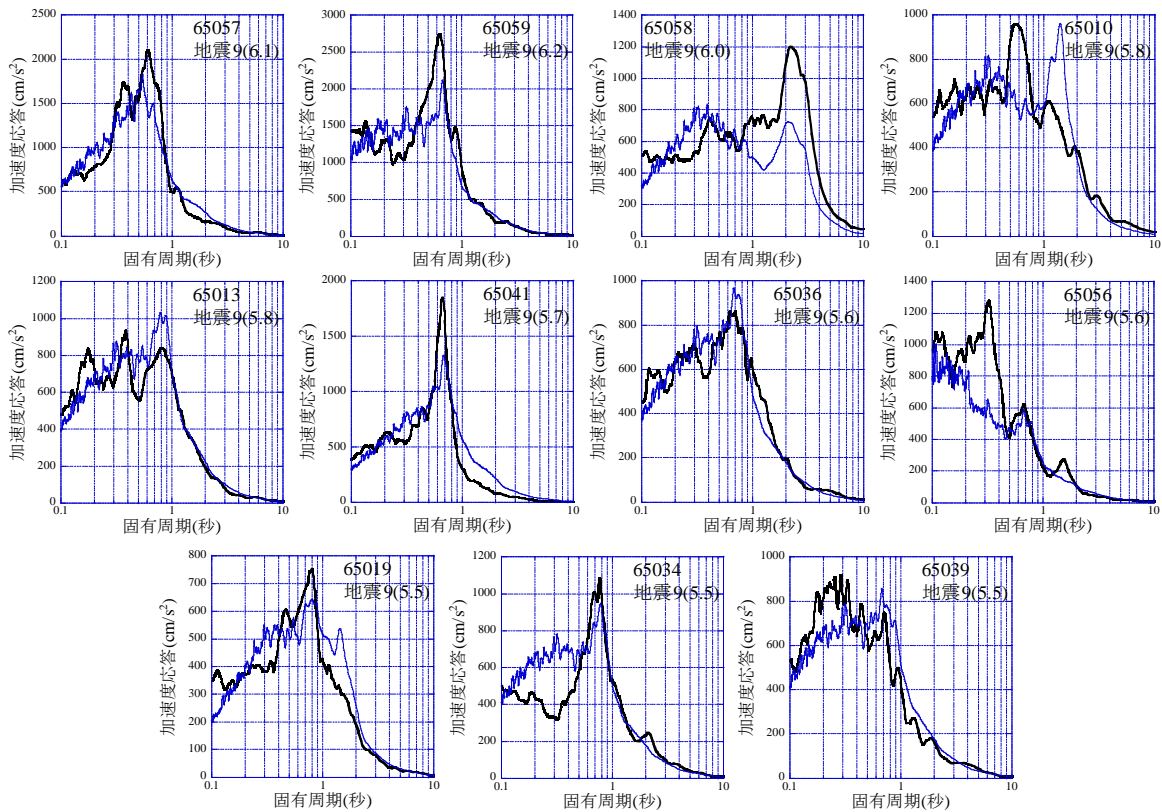


(b) 加速度応答スペクトル

図12 2004年新潟県中越地震の自治体観測点の観測値(黒い実線)と推定値(青い実線)



(a) フーリエスペクトル



(b) 加速度応答スペクトル

図13 2007年新潟県中越沖地震の自治体観測点の観測値(黒い実線)と推定値(青い実線)



表3 地震年報<sup>10)</sup>における一迫、衣川震度観測点の地震動情報

観測点名	計測震度	$r_a$	最大地動加速度( $\text{cm/s}^2$ )		卓越周期(秒)		最大加速度周期(秒)	
			NS	EW	NS	EW	NS	EW
栗原市一迫	6.2	0.518	823.3	793.4	-	-	0.5	0.8
奥州市衣川区	6.1	0.236	1607.6	1606.6	-	-	0.2	0.2

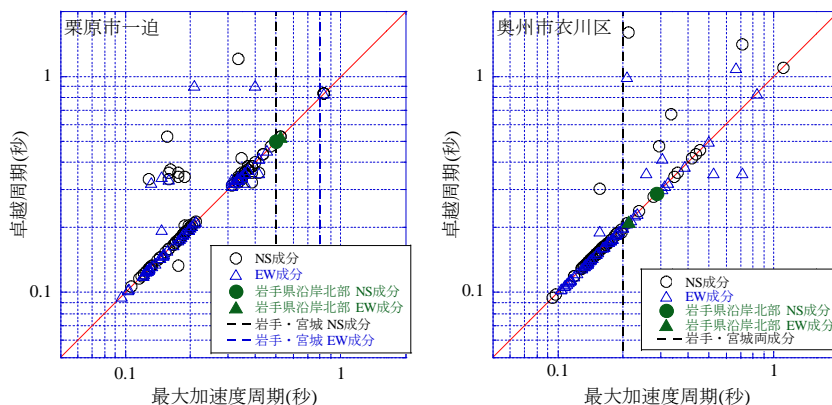


図14 最大加速度周期と卓越周期の対応

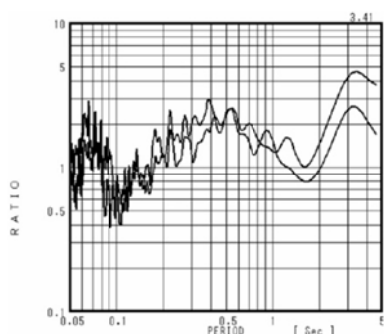


図15 一迫震度観測点の微動H/V<sup>11)</sup>

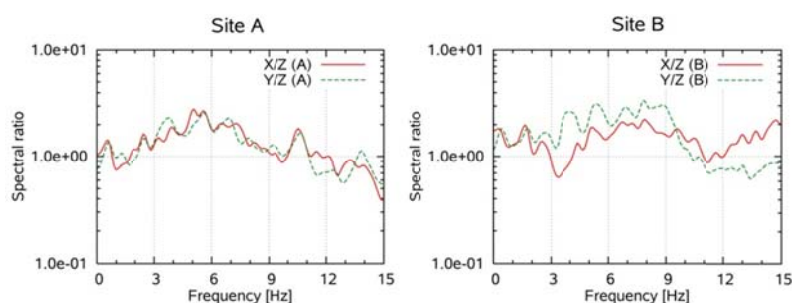


図16 衣川震度観測点の微動H/V<sup>12)</sup>

可能性がある。衣川震度観測点の微動H/Vを見ると、気象庁臨時観測点付近(SiteA)は5Hz付近(周期で0.2秒)、県の震度計付近(SiteB)は8Hz付近(周期で0.13秒)に卓越周期が見られる。最大加速度周期はNS、EW両成分とも0.2秒であるので、地震動H/Vのスペクトルの卓越周期とそれほど違いはない。以上のことから、岩手・宮城内陸地震における最大加速度周期は卓越周期と対応している可能性が高いと考えられるので、今回、最大加速度周期を卓越周期の代替として用いることにする。

#### 4.2 フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定

図17に表3の地震動情報と式(2)により推定したフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを示す。なお、表3から分かるように、両観測点ともNS、EW成分の最大地動加速度の値の差が小さいので、3.2で述べた最大地動加速度の違いによるスペクトル推定への悪影響は小さいものと考えられる。ただし、衣川震度観測点は高台にあるため、地形効果による地震動への影響が指摘されており<sup>12, 13)</sup>、また、県の震度計における計測震度は気象庁臨時観測点に比べて大きいことが指摘されている<sup>13)</sup>。今回、推定したフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルは県の震度計を対象としたものであり、周辺とは地震動特性が異なる可能性がある。

まず、フーリエスペクトルを見ると、一迫は周期0.7~0.8秒、衣川は0.2秒付近にピークがあり、ピーク振幅は250 $\text{cm/s}$ を超えている。加速度応答スペクトルは衣川では固有周期0.1~0.2秒で応答が大きい



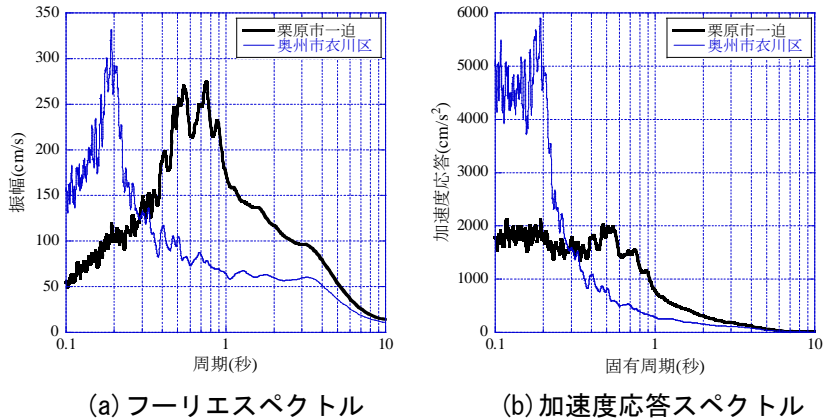


図17 一迫、衣川震度観測点のフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定値

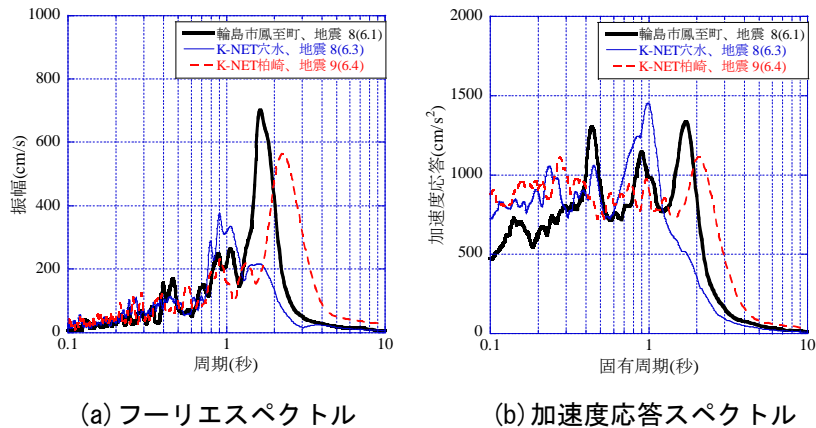


図18 表1の地震で震度6強を記録した観測点のフーリエスペクトルと加速度応答スペクトル

が、0.2秒を超えると応答が急激に低下しているのに対して、一迫は固有周期0.1～0.6秒で応答が大体1500～2000cm/s<sup>2</sup>の範囲で変動している。

次に表1の地震で震度6強を記録し、観測点周辺で大きな被害が出た地点のフーリエスペクトル、加速度応答スペクトル(図18)と図17の推定値を比較する。比較の対象とした地震観測点は2007年能登半島地震の気象庁観測点の輪島市鳳至町、K-NET穴水、2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎であり、観測点周辺の木造建物全壊率はそれぞれ4.7%、18.8%<sup>14)</sup>、5.29%<sup>15)</sup>という大きなものであった。一方、一迫、衣川震度観測点の周辺では建物の屋根瓦のずれや外装材の剥落、落下などの軽微な被害が出たものの、全壊あるいは大破した建物は見られなかった<sup>3)</sup>。輪島市鳳至町などの観測スペクトルと比較すると、一迫は周期0.1～0.7秒、衣川は周期0.1～0.3秒で観測値を上回っており、この周期の地震動が周辺建物の軽微な被害に影響を及ぼした可能性がある。しかし、木造家屋の大きな被害と相関が高いとされる周期1～1.5秒<sup>16)</sup>では一迫、衣川震度観測点の推定値が図18の観測値に比べて小さく、周期1秒付近での振幅の差が木造建物の全壊率の違いの要因の一つになった可能性がある。

## 5. まとめ

本論文では2008年岩手・宮城内陸地震で震度6強を記録しながら地震波形が消失した2つ自治体観測点、一迫、衣川震度観測点のフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの推定を試みた。まず、M6～7クラスの地殻内地震で得られた震度5弱以上の地震観測記録を基に統計的な解析によって加速度フ

ーリエスペクトルの推定式を求めた。また、応答スペクトルとフーリエスペクトルの関係を利用して、加速度応答スペクトル推定手法を提案した。続いて、推定式構築の際の回帰データに含まれていない地震観測点に対して、提案手法によってフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを求め、観測値と比較したところ、多くの観測点では推定値が観測値の特徴を概ね再現していた。ただし、NS成分とEW成分の最大地動加速度の差が大きい場合は最大加速度比が小さめの値となり短周期成分が過大評価されたものや、卓越周期が長周期側にあるデータでは観測値と推定値の対応が悪いものがあった。水平2成分の最大地動加速度の差が大きい場合は対象地震とそれ以外の同規模の地震の地震動データを比較し、最大加速度比の値を吟味する必要がある。また、今回用いた解析データには卓越周期が長周期側にあるものが少ないので、今後、卓越周期が長周期にある解析データを増やすことにより、推定精度の向上を図る予定である。

最後に岩手・宮城内陸地震における一迫、衣川震度観測点に対して提案手法によってフーリエスペクトルと加速度応答スペクトルを推定した。これらの観測点の推定値を能登半島地震、新潟県中越沖地震において観測点周辺で木造建物に大きな被害が出た地震観測点の観測値と比較したところ、一迫は周期0.1～0.7秒、衣川は周期0.1～0.3秒で観測値を上回った。しかし、木造建物の大きな被害と相関が高いとされる周期1～1.5秒の振幅は一迫、衣川震度観測点の推定値は能登半島地震、新潟県中越沖地震の観測値に比べて小さく、この周期での振幅の差が観測点周辺の木造建物の全壊率の違いの要因の一つになった可能性がある。

## 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。弘前大学 片岡俊一先生には画像ファイルと文献をご提供頂きました。3名の査読者および編集委員の方々から有益なご意見を頂きました。衷心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 気象庁：災害時地震速報 平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震、2008年。
- 2) 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。
- 3) 境 有紀、青井 淳、新井健介、鈴木達矢：2008年岩手・宮城内陸地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性、日本地震工学会論文集、第10巻、第4号、2010年、pp.14-53。
- 4) 西川隼人、宮島昌克：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-、日本地震工学会論文集、第11巻、第1号、2011年、pp.1-13。
- 5) 櫻井一成、松田 敏：遺伝的アルゴリズムによる統計的ランダム入力地震動モデルの作成、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、2010年、pp.3873-3880。
- 6) 澤田 勉、平尾 潔、辻原 治、三神 厚：最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法、土木学会論文集、No.682、2001年、pp.311-322。
- 7) 大崎順彦、渡部 丹、内木鉄臣：減衰定数と応答スペクトル形状との関係、日本建築学会学術講演梗概集、No.53、1978年、pp.607-608。
- 8) 気象庁：地震年報 2004年、財団法人 気象業務支援センター、2005年。
- 9) 気象庁：地震年報 2007年、財団法人 気象業務支援センター、2008年。
- 10) 気象庁：地震年報 2008年、財団法人 気象業務支援センター、2009年。
- 11) 小堀鐸二研究所：2008年岩手・宮城内陸地震調査報告、2008年、pp.64-68。
- 12) 片岡俊一、山本英和、上原子晶久、佐野 剛：衣川震度観測点に関する調査報告、東北地域災害科学研究、第45巻、2009年、pp.105-110。

- 13) 片岡俊一、山本英和、佐野 剛、上原子晶久：奥州市衣川総合支所における臨時地震観測、東北地域災害科学研究、第46巻、2010年、pp.69-74.
- 14) 境 有紀、野尻真介、熊本 匠、田中佑典：2007 年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性、日本地震工学会論文集、第8巻、第3号、2008年、pp.79-106
- 15) 境 有紀、川岡裕康、林 佑樹、飯塚裕暁：2007 年新潟県中越沖地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動の対応性、日本地震工学会論文集、第8巻、第4号、2008年、pp.59-93.
- 16) 境 有紀：建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討-2007年能登半島地震、新潟県中越沖地震のデータを加えて-、日本建築学会構造系論文集、第642号、2009年、pp. 1531-1536.

(受理：2011年3月31日)  
(掲載決定：2011年9月26日)

## **Evaluation of Fourier and Response Spectra at Ichihama and Koromogawa Seismic Intensity Observation Sites During the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008**

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 evaluate an acceleration Fourier and response spectra at Ichihama and Koromogawa seismic intensity observation sites which observed JMA seismic intensity of 6 upper but seismic waveform records don't exist during the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008. Firstly, formula to evaluate acceleration Fourier and response spectra are developed using peak ground acceleration, JMA seismic intensity and predominant period of earthquake spectra based on records obtained from crustal earthquakes with Magnitude of 6 to 7. Acceleration Fourier and response spectra are evaluated for another local government site which are not chosen for development of the formula. The evaluated values mostly agree with the observed ones. Finally, acceleration Fourier and response spectra are evaluated for Ichihama and Koromogawa observation sites. It is clarified that short period below 1 second was predominated in the evaluated spectra.

*Key Words: The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, Local Government Sites, Peak Acceleration Ratio, Predominant Period, Fourier Spectra, Response Spectra*