土木学会論文集A Vol.65 No.3,784-796,2009.8

計測震度と最大加速度による地震動の周期特性の評価

西川　隼人[1]・宮島　昌克[2]

[1]正会員　舞鶴工業高等専門学校（〒625-8511　京都府舞鶴市字白屋234）
E-mail:nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

[2]正会員　金沢大学教授　理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192　石川県金沢市角間町）
E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

本論文では計測震度と最大加速度のみ収集している自治体観測点を想定して，これらの地震動指標から地震動の周期特性を把握するために，実効加速度と最大加速度の比(最大加速度比)と地震動の卓越周期の関係を調べた．まず，最大加速度比と地震動スペクトルの関係を調べ，スペクトル形状と最大加速度比が関連していることを明らかにした．

続いて，地震観測記録からフーリエスペクトルと速度応答スペクトルのピーク周期を求め，最大加速度比との対応を調べたところ，最大加速度比の変化が震度フィルターの形状と概ね対応していることが分かった．最後に最大加速度比と実効加速度をパラメータとする周期1～2秒の速度応答スペクトル評価式を提案し，単一の地震動指標の場合に比べて高い精度で応答スペクトルを評価できることを明らかにした．

Key Words : *JMA seismic intensity, PGA, local government sites, periodic characteristic of earthquake ground motion*

1. はじめに

気象庁震度階は1995年兵庫県南部地震を契機に，翌1996年4月から体感や被害状況によって評価される震度から加速度波形によって評価される計測震度に変更された．また，市町村単位で震度を計測するために1995～1996年にかけて，自治省消防庁(当時)によって市町村を対象に震度計が整備された．自治体観測点は気象庁やK-NET観測点とともに震度情報ネットワークを構成しており，地震時の初動体制の確保などに活用されている[1]．

計測震度の導入や震度情報ネットワークの整備以降，複数の被害地震が発生しているが，これらの地震では計測震度と構造物被害との対応があまり良くないことが報告されており[2]，同一の計測震度でも構造物の被害率に大きな差があるケースが見られる．最近発生した地震を例に見ると，2007年能登半島地震と2008年岩手・宮城内陸地震では震度6強の揺れが観測されているが，同じ震度6強でも観測点付近の被害率には大きな差が出ている．

これらの観測点における被害率の違いの要因の一つとして，同一の震度でも地震動の周期特性が大きく異なっていたことが考えられる．境ら[2]は木造家屋や低層構造物の地震被害にはこれらの塑性時の固有周期に対応する周期1秒程度の地震動が大きな影響を及ぼしていることを指摘している．一方，計測震度は主に周期0.1～1秒の地震動に対応しており，構造物被害に大きな影響を及ぼす周期帯以外の地震動成分を含んでいる[2]．そのため，計測震度と被害との対応が良くない場合や同一の震度でも被害に大きな差が生じる場合があるものと考えられる．

地震発生時に迅速に地震波形を回収できる観測点では，波形からスペクトルを評価するなどして，地震動の周期特性を把握することが可能であるが，多くの自治体観測点では地震波形をすぐに回収できるシステムが十分に整備されていない．都道府県の中には自治体観測点で地震動の卓越周期を収集している場合もあるが，そのような都道府県は全体の6割程度である[1]．

一方，全ての都道府県の自治体観測点で計測震度のデータが収集されており，最大加速度も45都道府県で回収されている[1]．最大加速度と計測震度から地震動の周期1秒程度の地震動強さを評価できれば，これらの地震動指標しか得られていない自治体観測点でも，地震発生時に周辺の被害状況を従来よりも正確に把握できる可能性がある．また，このような自治体観測点を対象に過去の被害地震における地震動と観測点周辺の構造物被害の関係を調べる際に利用できるものと考えられる．

これまで地震観測記録に基づき地震動指標同士の関係式が求められており[3)~8)]，中には最大加速度や計測震度などから，ある周期の応答スペクトル平均値の評価式を提案しているものもある[4), 5), 6), 8)]．しかし，これらの式の多くは周期1秒付近のスペクトルを対象としたものではなく，もっと広い周期帯を対象としたものである．周期1秒前後を対象としている式[8)]もあるが，評価式のパラメータの最大速度は約9割の都道府県で収集されていないことから，ほとんどの自治体観測点で適用できない．

著者ら[9)]は，2007年能登半島地震などの観測記録に基づいて，自治体観測点でも得られる計測震度や最大加速度から周期1秒前後の速度応答スペクトルを推定している．この論文の中で，対象とした地震観測記録ごとに，実効加速度 A_0 (=$10^{(I-0.94)/2}$， I は計測震度)と最大加速度 PGA の比(以降，最大加速度比)を求め，速度応答スペクトルのピーク周期との対応を調べている．最大加速度比はピーク周期1～2秒付近で大きくなる傾向にあり，計測震度算出の際に用いるフィルター(以降，震度フィルター)の振幅の形状と概ね対応している．スペクトル平均値の推定の際には，このような最大加速度比の特性を利用している．

この研究では，速度応答スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応を調べているが，震度フィルターには加速度波形をフーリエ変換したものを掛けているので，加速度のフーリエスペクトルかパワースペクトルのピーク周期を対象として最大加速度比との対応を確認する必要があると考えられる．

また，著者らの研究[9)]では最大加速度と最大速度の積(PGA・PGV)と計測震度 I の間の経験式[7)]に基づいて，最大加速度比の物理的意味を検討しており，周期2秒付近までは地震動の卓越周期と最大加速度比が概ね正比例の関係にあることを示している．しかし，周期2秒以降では震度フィルターにおけるローカットフィルターと対応しているので，これよりも長周期では両者は正比例の関係になっていない．最大加速度比から地震動の周期特性を評価する上で，周期2秒以降についても卓越周期と最大加速度比の関係を理論的に説明できるようにする必要があろう．

本論文では著者らの研究[9)]における課題に取り組むとともに，この研究で解析対象に含まれていない地震を新たに解析対象に加え，最大加速度と計測震度によって地震動の周期特性を評価する．まず，卓越周期と最大加速度比の関係を理論的に導くとともに，数値計算により導いた両者の関係を検証する．

続いて，既往研究[9)]で取り扱った応答スペクトルだけでなくフーリエスペクトルを対象にピーク周期を求め，これを地震動の卓越周期と考え，最大加速度比との対応を調べる．既往研究[9)]では9地震を解析対象としたが，本研究ではこれらの地震の他に6地震を対象に加えた．また，既往研究で対象としなかった震度0～4の地震観測記録も解析対象とする．

最後に最大加速度比と地震動の周期特性との関係を地震動評価に利用する例として，構造物被害に大きな影響を及ぼすことが指摘されている周期1～2秒[2)]の速度応答スペクトルの評価を示す．

2. 最大加速度比と地震動の卓越周期に関する考察

本章では地震動の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の形状と対応することを理論的に説明するとともに，数値計算によって確認する．

(1) 正弦波に対する検討

ここでは正弦波について最大加速度比の物理的な意味を検討する．まず，卓越振動数 f_0，振幅 A のサイン波 ($A\sin(2\pi f_0 t)$)を考える．これをフィルター処理する前の波 $f(t)$ とする． $f(t)$ に計測震度の計算と同様の処理を行う． $f(t)$ をフーリエ変換したものに震度フィルターをかけ，逆フーリエ変換して，フィルター波 $g(t)$ を求める．震度フィルターは振動数 f を変数とする実数だけからなる関数であり，ここでは $H(f)$ と定義する． $H(f)$ は以下の3つのフィルターの積で表わされる[10)]．

加速度と速度の中間の特徴を表すフィルター

$$(1/f)^{0.5} \tag{1}$$

ハイカットフィルター

$$1/(1+0.694x^2+0.241x^4+0.0557x^6+0.009664x^8+0.00134x^{10}+0.000155x^{12})^{0.5} \tag{2}$$

ローカットフィルター

$$(1-\exp(-(f/0.5)^3))^{0.5} \tag{3}$$

式(2)の x は $f/10$ である．計算の都合上，フィルター処理する前の波を $f(t)=A\exp(2\pi i f_0 t)$ とする．なお，オイラーの公式より， $\mathrm{Im}[A\exp(2\pi i f_0 t)]=A\sin(2\pi f_0 t)$ の関係が成り立つ． $f(t)$ をフィルター処理して得られる波 $g(t)$ は以下の式で表わされる．

$$g(t)=\int_{-\infty}^{\infty} H(f)F(f)\exp(2\pi i f t)df \tag{4}$$

$F(f)$ は $f(t)$ をフーリエ変換したものであり， $f(t)=A\exp(2\pi i f_0 t)$ の場合は $F(f)=A\delta(f-f_0)$ である． $H(f)$ は実数だけからなっているので，式(4)は次のようになる．

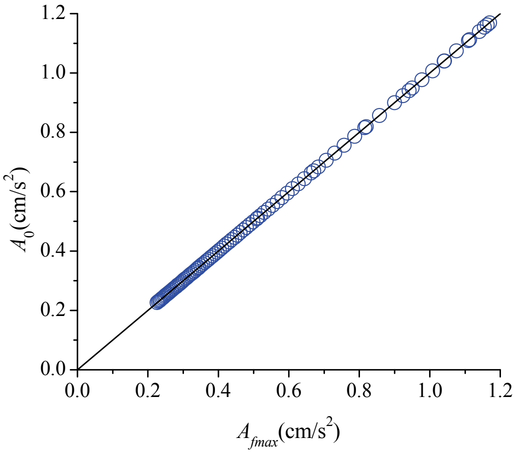


図-1 フィルター波の最大振幅と実効加速度の関係

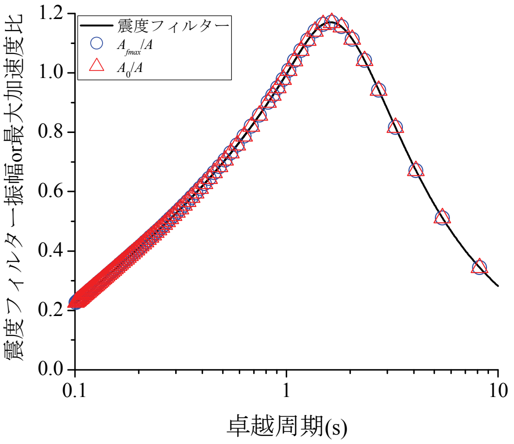


図-2 震度フィルターと A_{fmax}/A，A_0/A

$$g(t)=\int_{-\infty}^{\infty}H(f)A\delta(f-f_0)\exp(2\pi ift)df$$
$$=H(f_0)A\exp(2\pi if_0t) \qquad (5)$$

入力波はサイン波であるので，式(5)の $\exp(2\pi if_0t)$ の虚部をとるとフィルター処理した波 $g(t)$ は次のようになる．

$$g(t)=H(f_0)A\sin(2\pi f_0t) \qquad (6)$$

以上の計算から，サイン波($A\sin(2\pi f_0t)$)をフィルター処理して求められる波 $g(t)$ は $A\sin(2\pi f_0t)$ に $H(f_0)$ を乗じて得られることが分かる．フィルター波の最大振幅を A_{fmax} とすると，これは $H(f_0)A$ で与えられる．よって，卓越振動数 f_0 のフィルター波 $g(t)$ の最大振幅 A_{fmax} と原波形 $f(t)$ の振幅 A の比 A_{fmax}/A は $H(f_0)$ と等しくなる．また，振幅 A が1のサイン波を用いて，A_{fmax} と計測震度算出の際に求める実効加速度 A_0 の対応を調べたところ，**図-1**のように両者はほとんど同じ値となる．この結果から，サイン波($A\sin(2\pi f_0t)$)の A_0/A は $H(f_0)$ とほとんど一致することが分かる．

以上で導いた A_{fmax}/A と $H(f_0)$ の関係が成り立つかどうか調べるために，卓越振動数 f_0 が異なる複数のサイン波に対して計測震度を求める際の計算を行い，f_0 に対する A_{fmax}/A や A_0/A と震度フィルター $H(f_0)$ の対応を調べた．なお，A_{fmax} や A，A_0 は振幅1のサイン波から求めた値である．**図-2**に震度フィルターと任意の卓越周期 $T_0(=1/f_0)$ に対する A_{fmax}/A や A_0/A の対応を示す．同図から明らかなように周期に対する A_{fmax}/A や A_0/A の変化は震度フィルターの形状とほとんど一致していることが分かる．

(2) 非定常波に対する検討

前節では正弦波について最大加速度比と震度フィルターの対応を調べたが，実際の地震波は正弦波と異なり非定常波である．ここでは非定常波について，最大加速度比と震度フィルターの対応を検証する．任意の地震波を $f(t)$，それに計測震度算出に用いるフィルターによる処理を施した波を $g(t)$ とする．パーセバルの定理によって，地震波の自乗平均値とパワースペクトル密度の間には次の関係が成り立つ．

$$\sigma_f{}^2=\int_{-\infty}^{\infty}G(f)df \qquad (7)$$

$$\sigma_g{}^2=\int_{-\infty}^{\infty}H(f)^2G(f)df \qquad (8)$$

σ_f^2 と σ_g^2 はそれぞれ $f(t)$ と $g(t)$ の自乗平均値である．$G(f)$ は $f(t)$ のパワースペクトル密度である．式(7)と(8)の比の平方根をとると，次のようになる．

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_f}=\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}H(f)^2G(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty}G(f)df}} \qquad (9)$$

また，Cartwright and Longuet-Higgins[11]に従うと，$f(t)$ と $g(t)$ の自乗平均値の平方根と最大振幅の期待値の関係は次の式で表わされる．

$$E[A_{max}]=g_f\cdot\sigma_f \qquad (10)$$
$$E[A_{fmax}]=g_g\cdot\sigma_g \qquad (11)$$

式(10)，(11)の左辺はそれぞれ，A_{max} と A_{fmax} の期待値，g_f と g_g はピークファクターであり，次式によって与えられる．

$$g_i=\sqrt{2\ln N_i}+\gamma/\sqrt{2\ln N_i} \qquad (12)$$

$$N_f=t_d\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}f^2G(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty}G(f)df}} \qquad (13)$$

$$N_g=t_d\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}f^2H(f)^2G(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty}H(f)^2G(f)df}} \qquad (14)$$

式(12)の添え字iはfとgに対応する．t_dは地震波の継続時間，γはオイラー定数(=0.5772)である．

式(9)，(10)，(11)から以下の関係が得られる．

$$\frac{E[A_{fmax}]}{E[A_{max}]}=\frac{g_g}{g_f}\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}H(f)^2G(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty}G(f)df}} \tag{15}$$

ここで$E[A_{max}]=A_{max}$，$E[A_{fmax}]=A_{fmax}$とした場合，g_fとg_gの比が1に近い値であれば，式(15)は以下のように近似できる．

$$\frac{A_{fmax}}{A_{max}}\fallingdotseq\sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty}H(f)^2G(f)df}{\int_{-\infty}^{\infty}G(f)df}} \tag{16}$$

式(16)の関係が成り立つかどうか調べるために，模擬波を作成し，式(15)の$E[A_{max}]=A_{max}$，$E[A_{fmax}]=A_{fmax}$とした場合の右辺と左辺の値を比較する．模擬波は任意のパワースペクトル密度をターゲットとする非定常波とする．パワースペクトル密度$S_f(f)$はKanai[12]が提案した次式により計算する．

$$S_f(f)=\frac{f_g^{\ 4}+4h_g^{\ 2}f^2f_g^{\ 2}}{(f^2-f_g^{\ 2})^2+4h_g^{\ 2}f^2f_g^{\ 2}}S_0 \tag{17}$$

f_gは$S_f(f)$のピーク振動数(Hz)，h_gはスペクトルの拡がりを表す係数，S_0はスペクトル強度である．**図-3**にf_gが0.2，5Hz，S_0が1，h_gが50，5，0.5，0.05の場合の$S_f(f)$を示す．同図から分かるように，h_gが小さいほど，$S_f(f)$のピークが明瞭となり，f_gの波が卓越しやすい．h_gが大きいとf_gの振幅とそれ以外の振動数の振幅の差が小さくなり，このようなスペクトルを有する波は様々な振動数の波から構成されることになる．地震波の位相は乱数によって与え，式(17)のパワースペクトル密度に基づき定常波を作成する．

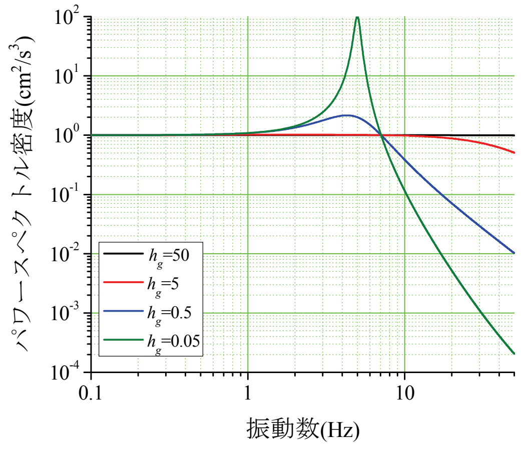
求めた定常波に対して次式で表わされる包絡曲線$E(t)$[13]をかけ，非定常波を作成する．

$$E(t)=\begin{cases}(t/t_b)^2 & (t<t_b)\\ 1 & (t_b<t<t_c)\\ \exp(\ln(0.1)(t-t_c)/(t_d-t_c)) & (t_c<t<t_d)\end{cases} \tag{18}$$

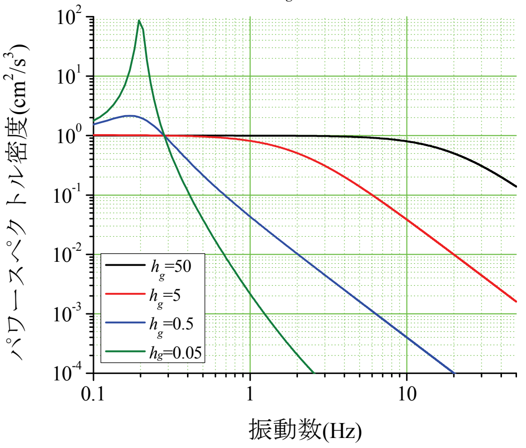
t_bは主要動部までの時刻，t_c-t_bは主要動継続時間である．ここでは$t_c=4t_b$とし，t_dは81.92秒とする．**図-4**にt_bが3秒の場合の$E(t)$を示す．

式(15)，(16)の関係を調べるために，$S_f(f)$のパラメータh_gとf_gを変化させて，複数の模擬波を作成する．f_gは0.1～10Hzにて，対数軸で20等分し，f_gを21通り考える．h_gは50，5，0.5，0.05の4通りとし，模擬波に非定常性を考慮するための包絡曲線をt_b=1，3，5の3通りとした．よって，252通りの模擬波を作成することになる．任意の$S_f(f)$をターゲットとする模擬波について，初期位相を100通り変えて，波を作り，100波それぞれから求めたA_{max}，A_{fmax}，A_0の平均値から，その模擬波の最大加速度比を求めた．

図-5に計算した252の模擬波について式(15)の右辺によって求めた値と式(15)において$E[A_{max}]=A_{max}$，$E[A_{fmax}]=A_{fmax}$とした場合の左辺の値を比較した結果を示す．また，**図-6**にピークファクターの比g_g/g_fを示す．



(a) f_g=5Hz



(b) f_g=0.2Hz

図-3 パワースペクトル密度$S_f(f)$[12]

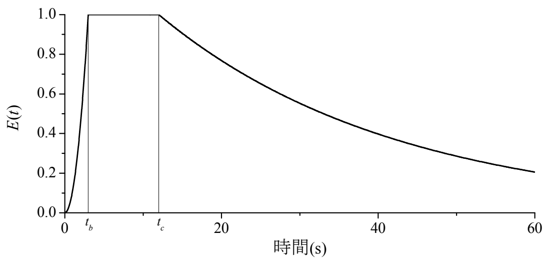


図-4 包絡曲線$E(t)$[13]

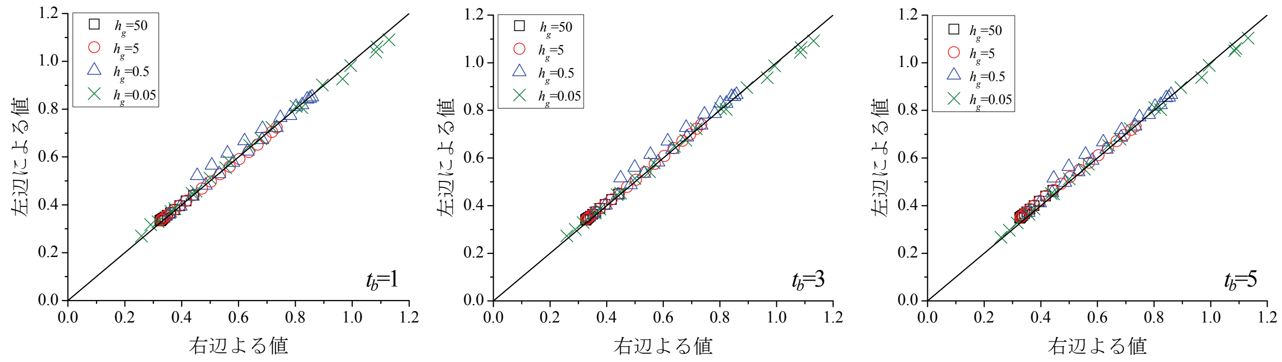


図-5 式(15)の右辺と左辺による計算値の比較

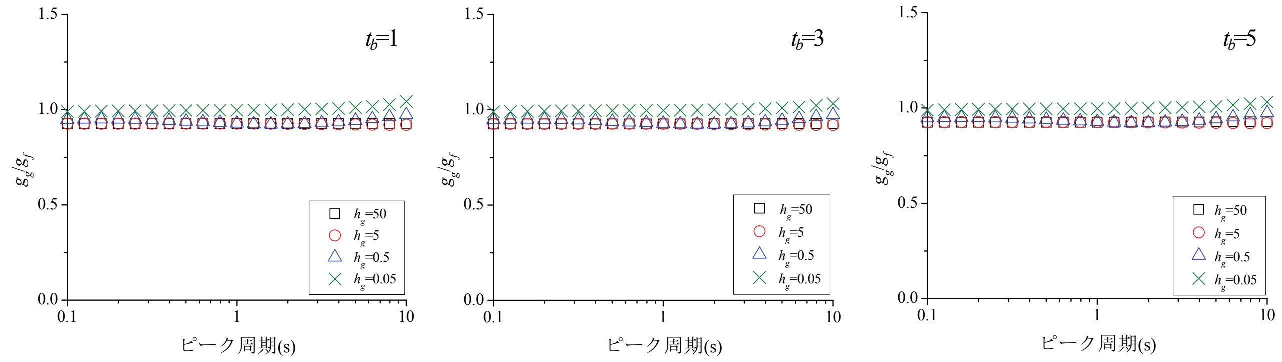


図-6 ピークファクター比g_g/g_f

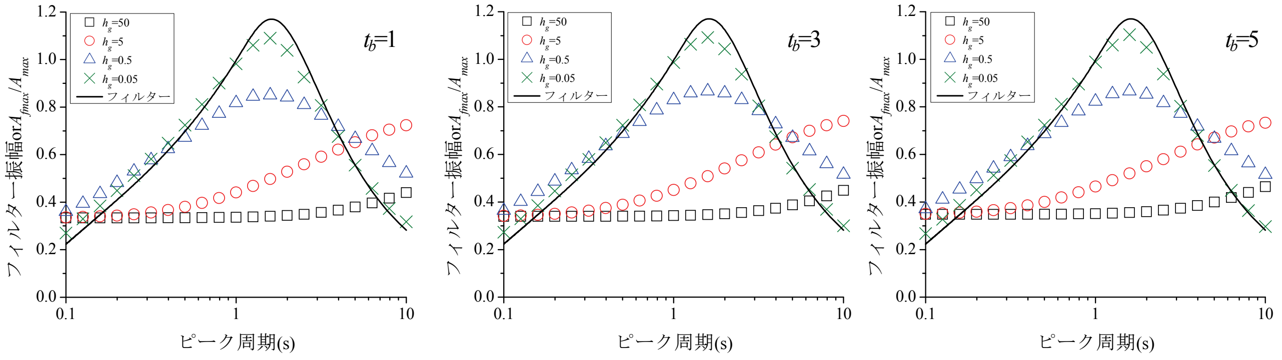


図-7 ピーク周期とA_{fmax}/A_{max}の対応

g_g/g_fもA_{max}などと同様に任意の$S_f(f)$をターゲットとする模擬波を100通り作成した場合の平均値である．**図-5**を見ると，右辺と左辺による値の対応が少し悪いものもあるが，全体的に見ると両者がよく対応していることが分かる．また，**図-6**から，t_bによらずg_g/g_fが概ね0.9～1.0に分布していることが分かる．

以上の計算結果から，式(16)の関係が概ね成り立っており，A_{fmax}/A_{max}の値が$G(f)$と$H(f)$によって，大きく支配されることが分かる．なお，$f(t)$が正弦波である場合，パワースペクトル密度$G(f)$は正弦波の卓越振動数f_0でのみ振幅を持つので，式(16)から$A_{fmax}/A_{max} \fallingdotseq H(f_0)$となり，前節で導いた結果と対応する．

続いて，$S_f(f)$のピーク周期(=$1/f_g$)とA_{fmax}/A_{max}の対応を調べる(**図-7**)．同図を見ると包絡曲線のパラメータt_bによるピーク周期とA_{fmax}/A_{max}の対応の違いは特に見られないが，h_gによって，ピーク周期とA_{fmax}/A_{max}の対応が大きく異なっている．h_gが小さくなるにつれて，ピーク周期によるA_{fmax}/A_{max}の傾向が異なるようになり，基本的にはh_gが小さくなるに従い，A_{fmax}/A_{max}が震度フィルターに近づく傾向にある．これはh_gが小さくなるほど，f_gのスペクトル振幅が相対的に大きくなり，f_gに対応する震度フィルター振幅がA_{fmax}/A_{max}に反映されるためだと考えられる．

図-8のピーク周期とA_0/A_{max}の対応を見ると，A_{fmax}/A_{max}の場合と同様に，h_gによってピーク周期とA_0/A_{max}の対応が異なり，包絡曲線のパラメータt_bによる違いは小さい．**図-9**のピーク周期とA_0/A_{fmax}の対応を見ると，h_gが小さく，ピーク周期が長いほど，A_0/A_{fmax}

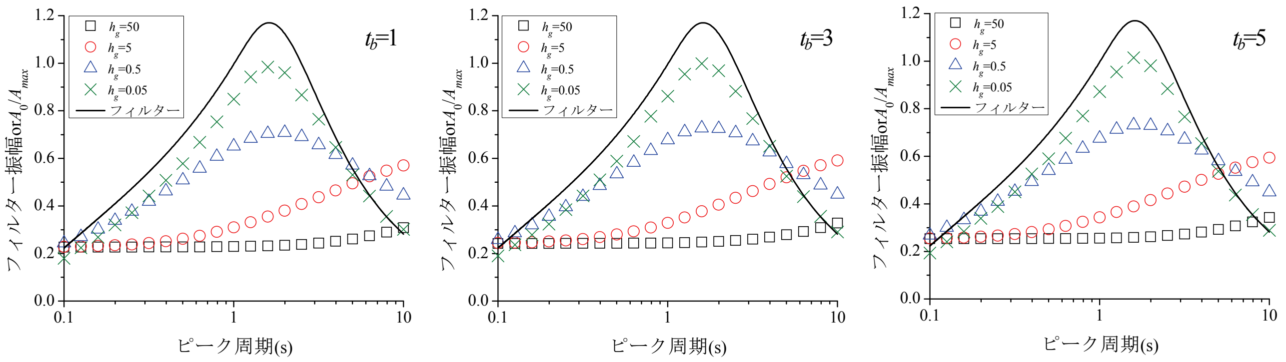


図-8　ピーク周期とA_0/A_{max}の対応

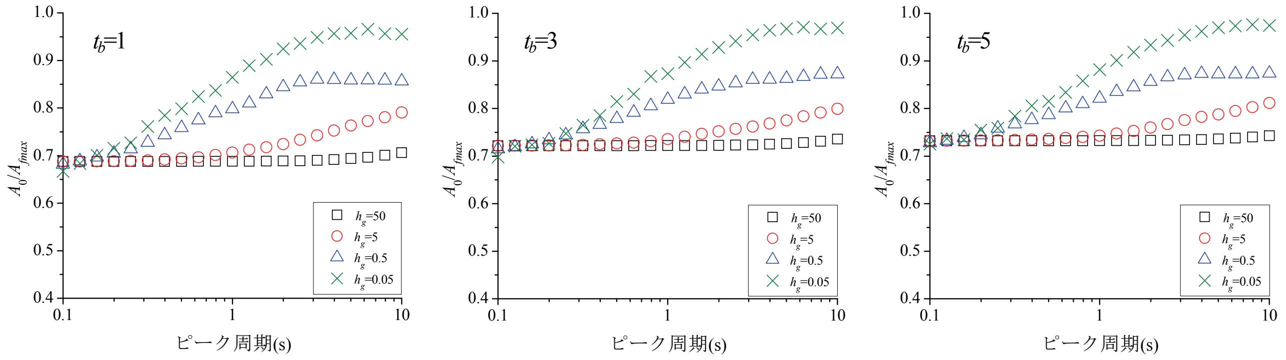
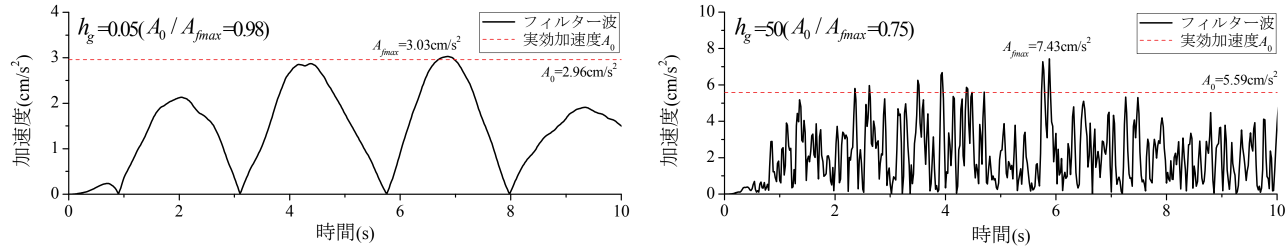
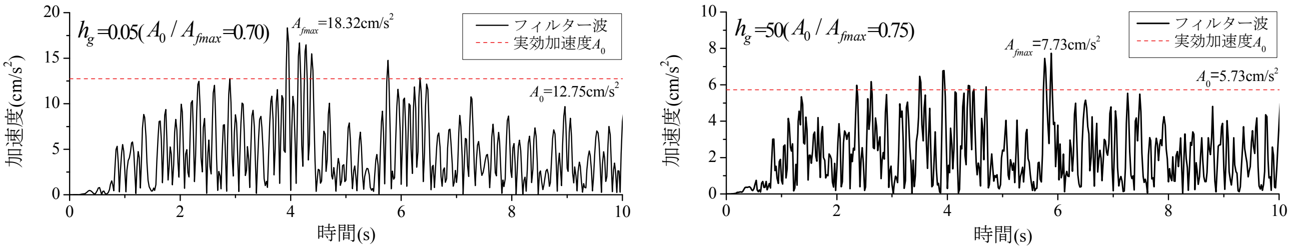


図-9　ピーク周期とA_0/A_{fmax}の対応



(a)　ピーク周期 5s(f_g=0.2Hz)



(b)　ピーク周期 0.2s(f_g=5Hz)

図-10　フィルター波とそのA_{fmax}とA_0 (t_b=1)

が大きくなっていることが分かる．t_bによって，多少はピーク周期とA_0/A_{fmax}の傾向が異なるが，その違いは小さい．

ここでh_gやピーク周期によるA_0/A_{fmax}の違いを地震波形から見ることにする．図-10にh_gが50と0.05，f_gが0.2, 5Hzの場合のフィルター波と実効加速度を示す．フィルター波の振幅は絶対値であり，包絡曲線のパラメータt_bは1である．まず，h_gが0.05，f_gが0.2Hzのフィルター波を見ると，波の振幅の変化が緩やかなので，A_0とA_{fmax}にそれほど違いがなく，A_0/A_{fmax}がかなり大きい．しかし，f_gが同じでも，h_gが大きい波(h_g=50)ではピーク振動数以外にも様々な振動数の成分が含まれており，短周期の波も現れている．そのため，h_g=0.05の波に比べて振幅の増減が激しく，A_0/A_{fmax}が小さくなっている．

次にf_gが5Hzのフィルター波を見てみる．h_gが0.05の波は特定の振動数成分が卓越しており，振動数が高い波であることから，振幅の増減の周期が短く，A_0/A_{fmax}が小さい．一方，h_gが50の場合は0.05に比べて，f_g以外の

振動数成分が多く，振動数の低い成分も影響するため，振幅の変動が緩やかになり，その分A_0/A_{fmax}が大きくなっているものと考えられる．h_gが50の場合，f_gが異なっていても，地震波の形状に大きな違いがないのは，図-3に示すようにスペクトル特性にあまり違いがないためであると考えられる．

以上の非定常波の最大加速度比に関する検討から明らかなように，A_{fmax}/A_{max}には地震波のスペクトル形状が大きな影響を及ぼし，スペクトルのピーク振動数の振幅が相対的に大きいほど，A_{fmax}/A_{max}は震度フィルターの値に近づく．また，A_0/A_{max}にはスペクトルの振幅やピーク振動数の影響が大きく，地震波の位相特性による影響が小さいことが明らかになった．

3. 加速度フーリエスペクトル，応答スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応

2章で理論的に導いた地震動の卓越周期と最大加速度比の関係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ために，本章では観測記録に基づいて，フーリエスペクトル，速度応答スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応を調べる．なお，ここでは地震動の卓越周期とスペクトルのピーク周期が等しいと仮定する．

また，2章の検討から明らかなように，最大加速度比には地震波の位相特性も影響するが，地震波のスペクトル特性に比べれば影響が小さいので，今回はその影響を考慮しないこととする．

(1) 解析データ

表-1に解析に用いた地震とそれぞれのデータ数を示す．解析に用いたデータは気象庁，防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netの観測記録であり，データ数は合計で10663である．2003年9/26十勝沖の地震(M_w=7.3)と2004年10/23新潟県中越地方の地震(M_w=6.3)はそれぞれ2003年十勝沖地震と2004年新潟県中越地震の最大余震である．表-2に震度階ごとのデータ数を示す．同表から明らかなように，震度2，3のデータが多く，全データの半数以上を占めている．なお，2008年岩手・宮城内陸地震の気象庁の観測記録は震度5弱以上のものだけであるので，他の地震に比べてデータ数が少ない．

表-1 各地震のデータ数

	地震名	M_w	K-NET	KiK-net	気象庁
1	2000年鳥取県西部地震	6.6	292	201	116
2	2001年芸予地震	6.8	298	205	90
3	2003年5/26宮城県沖の地震	7.0	406	351	106
4	2003年7/26宮城県北部の地震	6.1	196	169	35
5	2003年十勝沖地震	7.9	347	262	68
6	2003年9/26十勝沖の地震	7.3	285	251	51
7	2004年9/5紀伊半島沖の地震	7.2	383	271	132
8	2004年9/5東海道沖の地震	7.5	407	317	140
9	2004年新潟県中越地震	6.6	319	268	145
10	2004年10/23新潟県中越地方の地震	6.3	292	240	97
11	2005年福岡県西方沖地震	6.6	293	253	129
12	2005年8/16宮城県沖の地震	7.1	450	372	222
13	2007年能登半島地震	6.7	382	315	152
14	2007年新潟県中越沖地震	6.6	387	286	102
15	2008年岩手・宮城内陸地震	6.9	325	245	10

注：M_wは防災科学技術研究所F-NET[14]によるものである．

表-2 震度階ごとのデータ数

震度階	データ数	震度階	データ数
震度0	483	震度5弱	268
震度1	1913	震度5強	157
震度2	3427	震度6弱	56
震度3	2927	震度6強	15
震度4	1415	震度7	2

(2) 観測スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応

表-1に示す各データに対して最大地動加速度(*PGA*)と実効加速度A_0を求めるとともに，加速度フーリエスペクトルと速度応答スペクトルで最大振幅が現れる周期(ピーク周期)を求めた．ピーク周期は周期0.1～10秒を対象に求めた．なお，本研究では広く用いられている減衰定数5%の速度応答スペクトルを解析対象とした．これらのスペクトルは水平2成分と上下成分をベクトル合成して用いた．スペクトルは各地震記録において，波形全体から評価した．なお，フーリエスペクトルを求める際には元の地震波形に後続の0をつけて，2の累乗になるように調整した．また，バンド幅0.1HzのParzen Windowによってフーリエスペクトを平滑化した．

図-11に震度階ごとの加速度フーリエスペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応，図-12に速度応答スペクトルの場合の対応を示す．震度1～4ではピーク周期は周期10 秒程度までの範囲にあるが，震度5弱～7ではこれより低震度のデータに比べて，ピーク周期の短いデータから構成されている．

ここで図-13に各震度の地震観測記録におけるフーリエスペクトルのピーク周期とモーメントマグニチュードM_w，震央距離の割合を示す．まず，ピーク周期について見ると，各震度における0.5秒以下の記録の割合は震度の増加に伴い，高くなり，逆に2秒以上の記録は少なくなっている．M_wと震央距離の割合を見ると，M_wは震度による違いは特に見られないが，震央距離は震度の増大に伴い，250km以上のデータの割合が減っている．震央距離が大きいほど表面波が卓越しやすいことから，250km以上のデータの割合が多い低震度では，ピーク周

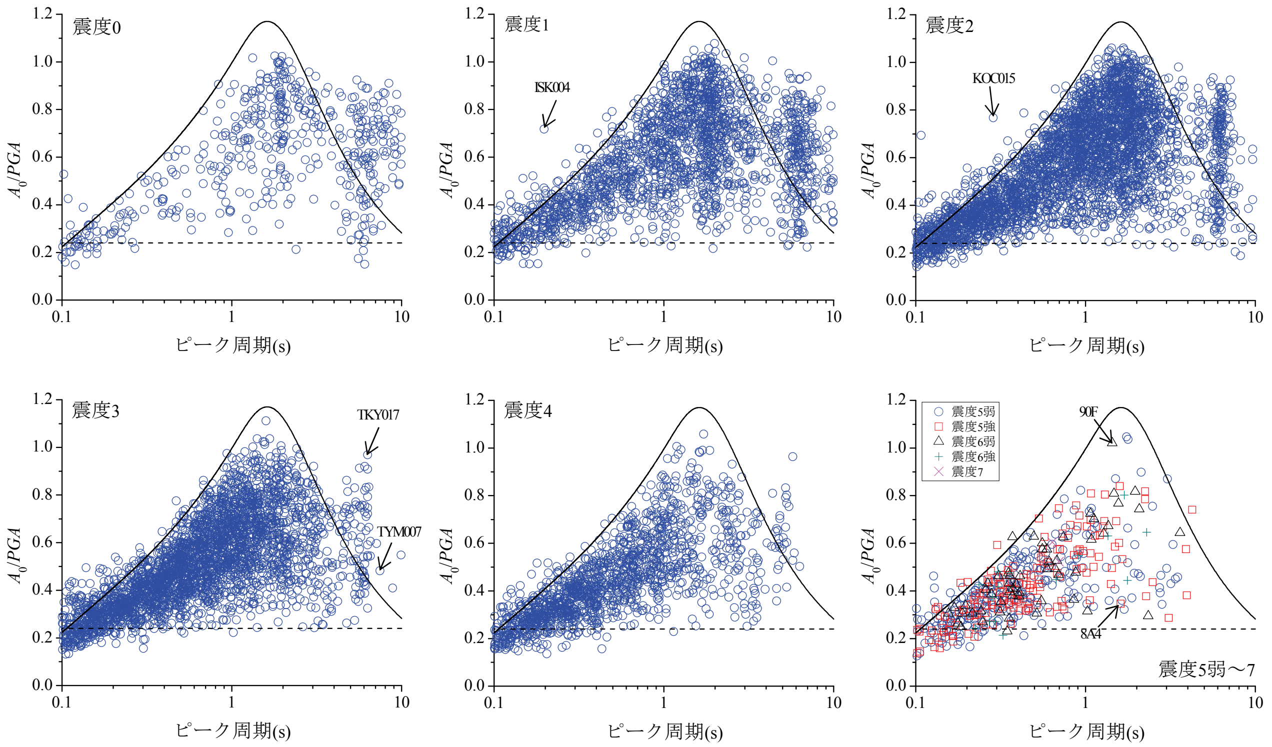


図-11 フーリエスペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応

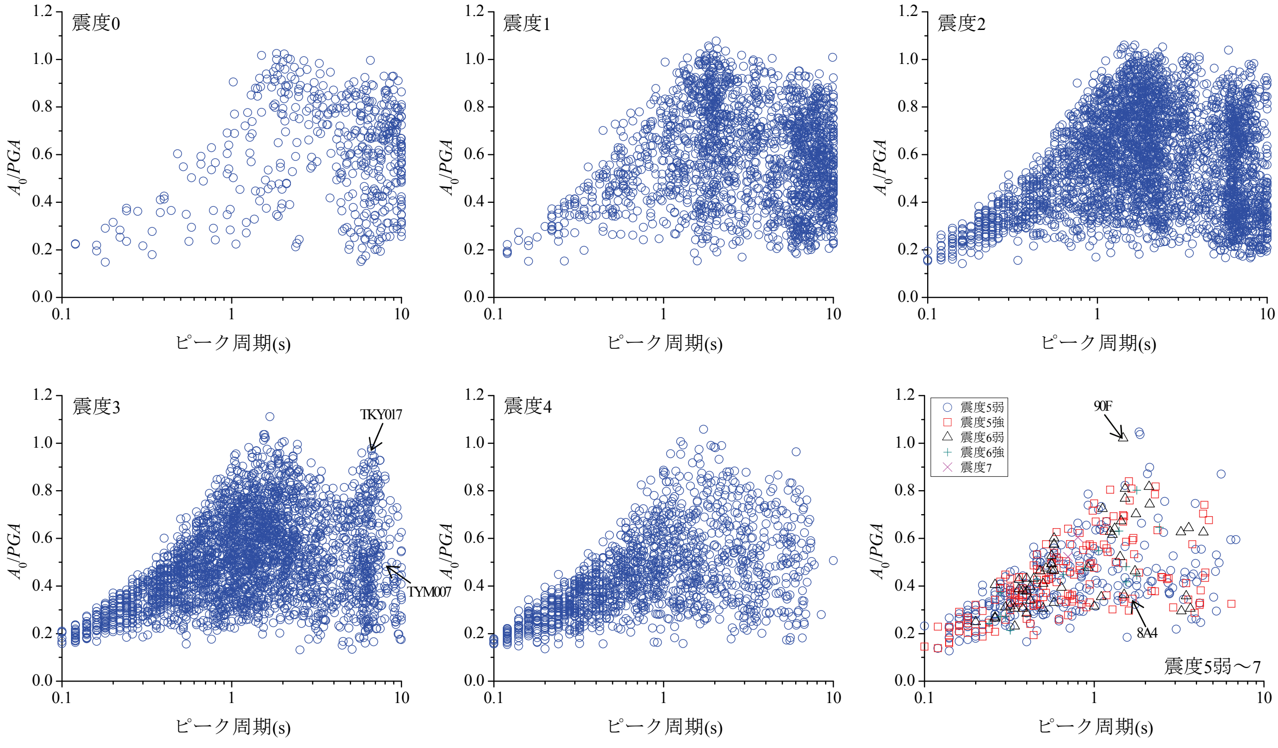


図-12 速度応答スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応

期が2秒以上の長周期のデータが多くなったものと考えられる．ここでは示さないが，震度ごとに速度応答スペクトルのピーク周期の割合を調べたところ，フーリエスペクトルに比べて，ピーク周期の長い記録が多く含まれていた．これは速度応答スペクトルの方がフーリエスペクトルよりも，長周期の振幅が大きくなるためであると推測される．

続いて，ピーク周期と最大加速度比の対応を見ると，いずれのスペクトルでも短周期側で最大加速度比が小さく，1秒付近までは周期が長くなるにつれて最大加速度比が大きくなっている．周期1～2秒付近で最大加速度比が最も大きくなっており，それよりも長周期になると最大加速度比が低下する傾向にある．フーリエスペクトルに着目して見ると，大半のデータが震度フィルター(実

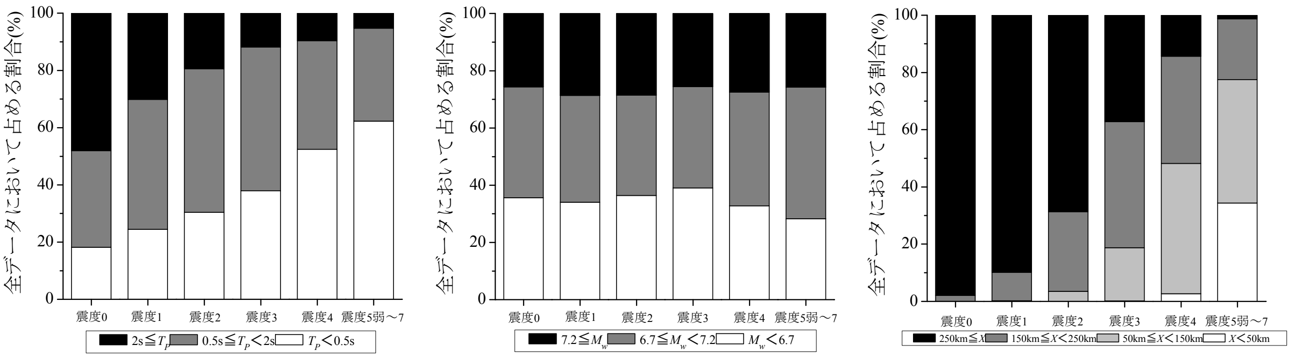


図-13 各震度の地震記録におけるピーク周期 T_P，震央距離 x，M_W の割合

線)とホワイトノイズから計算した最大加速度比(破線)の間に分布している．また，周期3秒以降では最大加速度比は震度フィルターよりも大きな値になっており，2章で模擬地震波に基づき求めたピーク周期と最大加速度比の関係と概ね一致したものとなっている．

図-11，**12**から分かるように，同一の周期でも最大加速度比にばらつきがあり，長周期側でばらつきが大きく，2章の検討で示したようにスペクトル形状による影響が大きいものと考えられる．ピーク周期が1～2秒とこれよりも長周期側にピークがあり，最大加速度比が大きく異なる観測記録ペアを例にスペクトルを見てみる(**図-14**)．

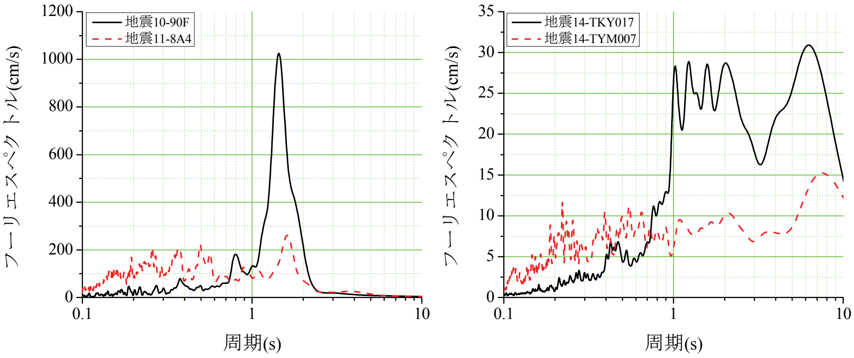
まず，ピーク周期が1～2秒にある90F(JMA南魚沼市六日町)と8A4(JMA涌谷町新町)のスペクトルを見る．前者の最大加速度比は0.98であり，後者は0.34である．90Fはスペクトルで約1.4秒に明瞭なピークが見られ，ピーク振幅は他の周期に比べて著しく大きい．一方，8A4では1.6秒付近に見られるピークの振幅が0.1～1秒の振幅と比べて大きな差はない．

続いて，ピーク周期が1～2秒よりも長周期側にあるTKY017(K-NET辰巳)とTYM007(K-NET富山)のスペクトルを見る．TKY017の最大加速度比は0.97，TYM007は0.48である．TKY017のフーリエスペクトルは6秒付近にピークが見られるが，周期1～2秒の振幅がピーク振幅とそれほど違いがない．応答スペクトルを見ると，フーリエスペクトルほどではないが，周期1～2秒の振幅が周期1秒以下の振幅に比べて，明らかに大きい．TYM007のスペクトルを見ると，TKY017と違い周期1～2秒の振幅は他の周期と同じレベルである．

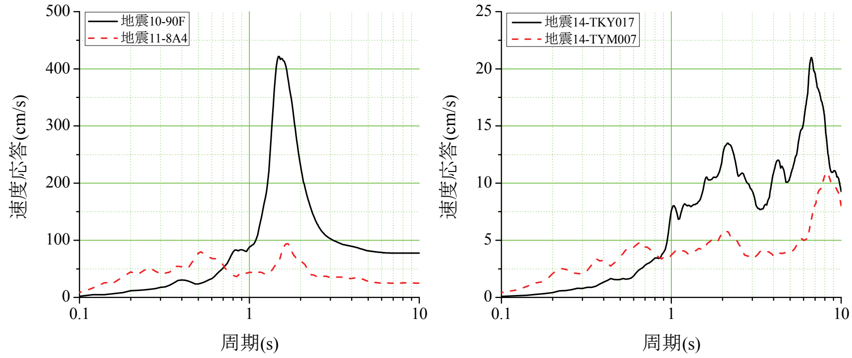
ピークが1秒よりも短周期にあるスペクトルの最大加速度比のばらつきは，1秒よりも長周期に比べて小さいが，中には最大加速度比が非常に大きなデータもある．そのデータのスペクトル(**図-15**，K-NET宿毛(KOC015)，K-NET能都(ISK004))を見るとフーリエスペクトルには短周期にピークがあるものの，ピーク振幅はそれよりも長周期側の振幅と大きな差はない．これまでの検討から明らかなように，周期1～2秒の振幅が相対的に大きい場合，最大加速度比が大きくなる．**図-15**のスペクトルでは周期1～2秒付近のスペクトル振幅は相対的に見ると，ある程度大きいため，最大加速度比がピーク周期の割に大きくなったものと推測される．なお，応答スペクトルではピークが1～2秒付近に現われている．これは応答スペクトルはフーリエスペクトルに比べて，長周期の振幅が強調されるためであり，ピーク周期が長周期側に出やすい．**図-11**，**12**を比較しても，このことが確認できる．同じ地震観測記録でも，フーリエスペクトルと応答スペクトルではピーク周期が大きく異なる場合があり，最大加速度比との対応が変わってくるものと考えられる．このようにピーク周期は不安定なものであり，これが最大加速度比のばらつきの要因の一つになっている可能性がある．

以上のスペクトルの比較から，最大加速度比が大きいほど，スペクトルの周期1～2秒の振幅が他の周期に比べて相対的に大きいことが予想される．このことを確認するために最大加速度比に対する周期1～2秒の平均振幅と他の周期帯の平均振幅の比(スペクトル比)の対応を調べた(**図-16**)．ここではフーリエスペクトルと応答スペクトルを対象に，1～2秒と0.1～1秒，1～2秒と0.1～10秒を対象にスペクトル比を求めた．**図-16**の直線は最大加速度比とスペクトル比の常用対数の関係式によるものである．フーリエスペクトルの場合は周期0.1～1，1～10秒いずれの場合も最大加速度比とスペクトル比に明瞭な相関が見られる．応答スペクトルでは0.1～10秒を対象とした場合，両者に相関が見られない．応答スペクトルはフーリエスペクトルに比べて全体的に振幅の変化が小さく，また，長周期側でも振幅がそれほど低下しない．そのため，0.1～10秒を対象とした場合は最大加速度比に対してスペクトル比の変化が小さく，両者に相関が見られなかったものと考えられる．ただし，計測震度と相関が高いとされる周期0.1～1秒を対象とした場合は最大加速度比とスペクトル比に相関が見られた．

本章での地震観測記録による検討結果から，フーリエスペクトル，応答スペクトルのピーク周期に対する最大加速度比の変化が震度フィルターの形状と対応しており，

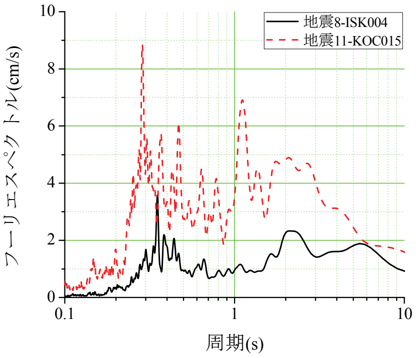


(a) フーリエスペクトル

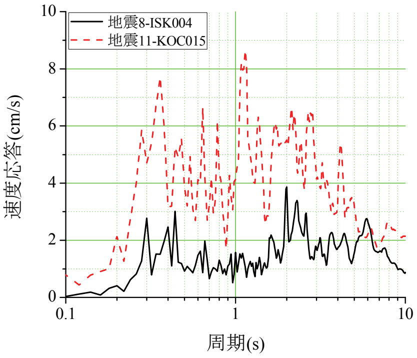


(b) 速度応答スペクトル

図-14 最大加速度比が大きく異なる観測点ペアのスペクトル(凡例の地震10，11，14は**表-1**の地震番号に対応している)



(a) フーリエスペクトル



(b) 速度応答スペクトル

図-15 ピーク周期が短周期にあり最大加速度比の大きい観測点のスペクトル

また，最大加速度比が大きいほど，スペクトルの周期1～2秒の振幅が他の周期の振幅に比べて相対的に大きいことが明らかになった．既往研究[4), 5), 6), 8)]では地震動指標とスペクトルの対応についての理論的な検討はなされていないが，本研究では最大加速度比とスペクトルの対応を理論的に導いた上で，地震観測記録に基づき両者の対応を調べた．

4. 周期1～2秒の速度応答スペクトルの評価

前章の検討結果から明らかなように，最大加速度比の大きい地震観測記録のスペクトルでは，周期1～2秒の振幅が他の周期に比べて相対的に大きい傾向が見られた．ここでは，このような最大加速度比と地震動の周期特性の関係を地震動評価に利用する例として，構造物被害と相関が高いとされる周期1～2秒の速度応答スペクトル[2)]の推定結果を示す．

1章で述べたようにほとんどの自治体観測点では最大加速度などの地震動指標データが収集されている．これまで，このような地震動指標とある周期の応答スペクトル平均値の関係式が求められている[4), 5), 6), 8)]．これらの研究で提案された式の多くは単一の地震動指標をパラメータとしているが，本研究では地震動指標の他に最大加速度比をパラメータに含め，周期1～2秒の速度応答スペクトルの評価式を求める．評価式は次のように，ほとんどの自治体観測点で得られる実効加速度と最大加速度比をパラメータとする．

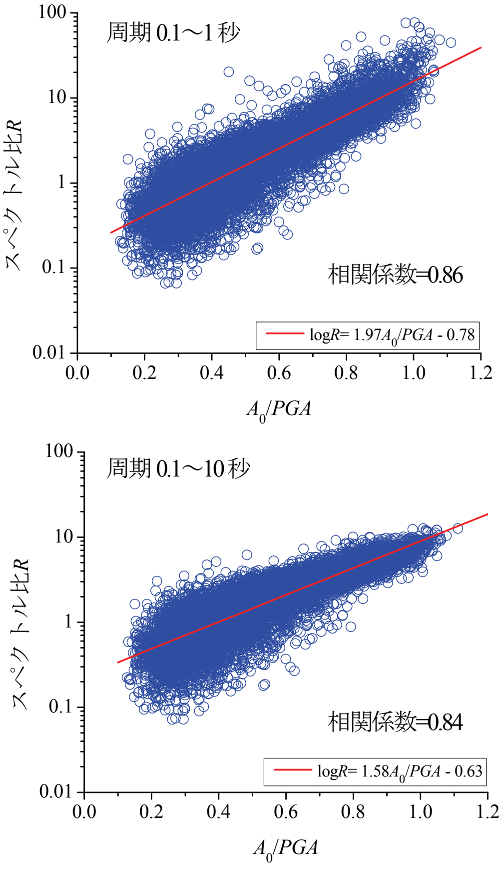
$$\log \bar{S}_{v1-2} = C_1 \log A_0 + C_2 (A_0 / PGA) + C_3 \tag{19}$$

$\bar{S}_{v1-2}$ は周期1～2秒の速度応答スペクトル(水平2成分ベクトル合成)の平均値であり，C_1～C_3 は回帰係数である．**表-3**に式(19)の回帰係数，$\log \bar{S}_{v1-2}$ の観測値と予測値の相関係数と標準誤差，**図-17**に観測値と予測値の対応を示す．なお，標準誤差SEは以下のように定義される．

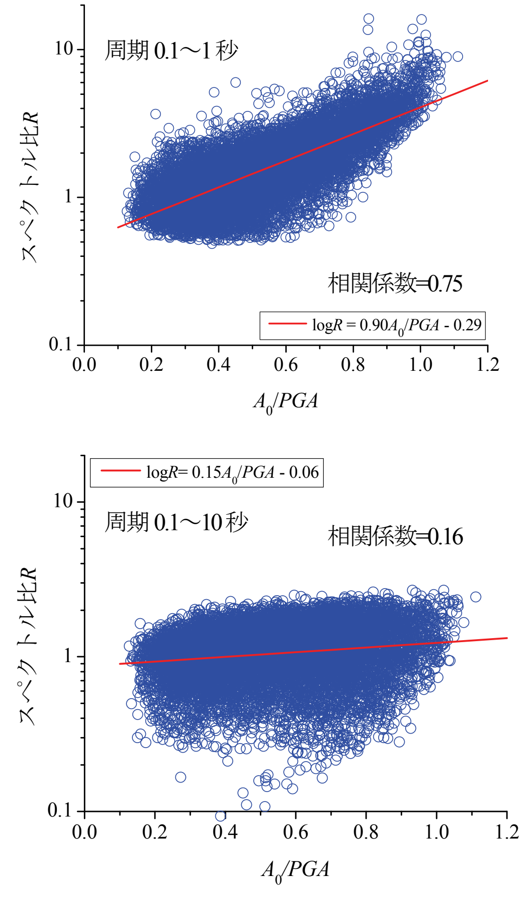
$$SE = \sqrt{S_r / (n-k-1)} \tag{20}$$

ここでnはデータ数，S_r は観測値と予測値の残差二乗和，kは評価式のパラメータ数である．**表-3**に示すように式(19)を用いた場合，$\log \bar{S}_{v1-2}$ の観測値と予測値の相関係数は0.88であり，観測値と予測値の相関がかなり良いことが分かる．式(19)において，右辺第2項を A_0 / PGA ではなく，$\log(A_0 / PGA)$ とした場合も相関係数や標準誤差はほとんど同じであった．

続いて，従来の多くの研究のように，単一の地震動指標によって，速度応答スペクトルの平均値を評価する場合の観測値と予測値の相関係数，標準誤差を求める．評価式を次に示す．



(a) フーリエスペクトル



(b) 応答スペクトル

図-16 最大加速度比とスペクトル比の対応

$$\log \bar{S}_{v1-2} = C_4 \log A + C_5 \qquad (21)$$

ここでC_4，C_5は回帰係数，Aは地震動指標であり，A_0かPGAである．相関係数はA_0の場合は0.77，PGAでは0.32であり，式(19)を用いた場合に比べて相関が低い．標準誤差はA_0では0.20，PGAでは0.29であり，式(19)の場合よりも大きい．また，**図-18**のように$\bar{S}_{v1-2}$の観測値と予測値の対応が式(19)を用いた場合(**図-17**)に比べて悪いことが分かる．

ただし，式(19)は式(21)に比べて自由度が1つ大きく，それが予測精度の違いに影響している可能性がある．ここでは*AIC*(赤池情報量基準) [15]を用いて，式(19)と式(21)の予測精度を比較する．*AIC*は以下の式で表わされる指標で，その値が小さいほど，最適な評価式と言える．

$$AIC = n \ln(S_r / n) + 2k \qquad (22)$$

表-4に式(19)，(21)で評価した場合の*AIC*を示す．この表から分かるように，式(19)を用いた場合に*AIC*が最も小さい．*AIC*を基準に考えた場合，$\log \bar{S}_{v1-2}$の評価において，式(19)が最適であることが分かる．

以上の検討から明らかなように，最大加速度比を評価式に考慮した場合，実効加速度A_0や最大地動加速度PGAのみをパラメータとした場合に比べて，高い精度で周期1～2秒の速度応答スペクトルを評価できることが明らかになった．本研究で提案した式(19)を用いれば，最大加速度と計測震度しか得られていない場合でも，地震発生後すぐに周期1～2秒の速度応答スペクトルを精度良く推定でき，被害状況の把握に利用できるものと考えられる．

また，計測震度導入後に発生した被害地震で地震波形が残っていない自治体観測点の周期1秒程度の地震動を推定し，構造物被害との対応を検証する上でも活用が期待できる．

5. まとめ

本論文では最大加速度と計測震度しか得られていない自治体観測点を想定して，これらの地震動指標から被害予測において重要な周期1～2秒の地震動特性を評価する手法を提案した．検討では，著者らの研究で提案した実効加速度と最大加速度の比(最大加速度比)の物理的な意味を再度，検討するとともに，この研究で対象としなかった6地震の観測記録をデータに追加して，解析を実施した．また，既往研究で解析対象としなかったフーリエスペクトルについても検討を行った．

まず，ある卓越振動数を持つ正弦波について，最大加

表-3 回帰係数と $\log \bar{S}_{1-2}$ の観測値と予測値の相関係数および標準誤差

C_1	C_2	C_3	相関係数	標準誤差
1.01	0.86	-0.83	0.88	0.15

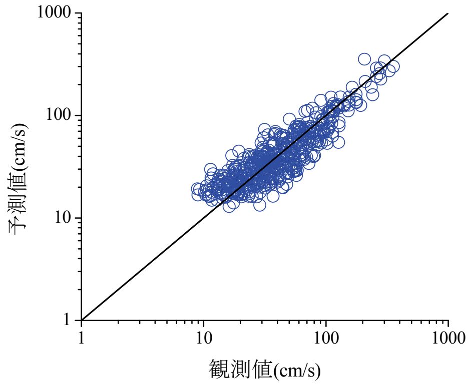
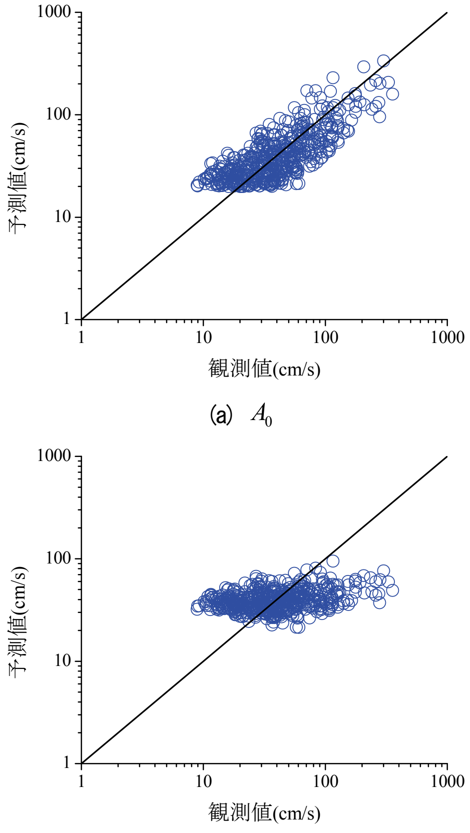


図-17 式(19)を用いた場合の $\bar{S}_{v1-2}$ の観測値と予測値の対応



(a) A_0

(b) PGA

図-18 式(21)を用いて $\log \bar{S}_{1-2}$ を評価した場合の観測値と予測値の対応

表-4 式(19), (21)で $\log \bar{S}_{v1-2}$ を評価した場合の *AIC*

式(19)	式(21)$A = A_0$	式(21)$A = PGA$
-1898	-1602	-1218

速度比がその卓越振動数に対する震度フィルターの振幅値と等しくなることを理論的に導き，卓越振動数が異なる複数の正弦波に対する計算によって確認した．実際の地震波は正弦波と異なり非定常波であるので，任意の非定常波について，最大加速度比の意味を検討した．その結果，最大加速度比が地震波のスペクトル形状に大きく依存する指標であり，スペクトルのピーク振幅が相対的に大きいほど，最大加速度比が震度フィルターの振幅に近づくことを明らかにした．

続いて，過去の被害地震や規模の大きな地震の観測記録に基づいて，加速度フーリエスペクトルや速度応答スペクトルのピーク周期と最大加速度比の対応を調べた．ピーク周期と最大加速度比の対応を見ると，短周期側で最大加速度比が小さく，1秒付近までは周期が長くなるにつれて最大加速度比が大きくなっている．周期1～2秒付近で最大加速度比が最も大きくなる傾向があり，それよりも長周期になると最大加速度比が低下している．このようなピーク周期に対する最大加速度比の変化は震度フィルターの形状と全体的に見て，対応していることが明らかになった．

周期1秒以降では同程度の周期でも最大加速度比に大きなばらつきが見られ，そのばらつきがスペクトルの形状と関係していることを示した．また，ピーク周期が同じくらいで最大加速度比が大きく異なる観測記録ペアのスペクトルを比較したところ，最大加速度比が大きい観測記録のスペクトルでは周期1～2秒の振幅が他の周期の振幅に比べて，相対的に大きいことが分かった．解析対象とした全記録に対して，同様の傾向が見られるかどうか調べるために，スペクトルの周期1～2秒の平均振幅と周期0.1～1秒，0.1～10秒の平均振幅の比(スペクトル比)を求め，最大加速度比との対応を調べた．その結果，応答スペクトルで周期1～2秒と0.1～10秒を対象とした場合のスペクトル比と最大加速度比には相関が見られなかったが，それ以外のケースでは最大加速度比とスペクトル比の間に相関が見られた．

以上の検討結果から，最大加速度比によって周期1～2秒の他の周期に対するスペクトル振幅の相対的な大きさを評価できる可能性がある．なお，地震の規模が大きい場合，長周期側のスペクトル振幅が大きくなることから，最大加速度比の値に影響を及ぼすものと考えられる．また，地震観測記録に基づく検討ではスペクトルのピーク周期や形状に着目して，最大加速度比との対応を調べたが，地震波の位相特性の影響も考えられる．今後は地震の規模や地震波の位相特性の最大加速度比への影響を調べていく予定である．

最後に計測震度と最大加速度のみ得られている自治体観測点を想定し，計測震度を求める際に計算する実効加速度と最大加速度比をパラメータとする評価式によって

周期1～2秒の速度応答スペクトルを評価した．その結果，従来の研究のように最大加速度や実効加速度のみをパラメータとした場合に比べて，最大加速度比を考慮した場合の方が高い精度でスペクトルを推定できることを明らかにした．

本論文で提案した評価式を用いれば，最大加速度と計測震度しか得られていない場合でも，地震発生後すぐに被害と相関の高い周期1～2秒のスペクトル平均値を精度良く推定できる．また，過去の被害地震で地震波形が残されていない自治体観測点の地震動と構造物被害の対応を検証する上で評価式を活用できるものと考えられる．

謝辞：本研究では気象庁，および防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netの地震観測記録を使用させて頂きました．査読者の方々からは貴重なご意見を頂きました．金沢大学大学院の森本吉輝氏には解析の際にご助力頂きました．記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 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.
2) 境　有紀，神野達夫，纐纈一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第585号，pp.71-76，2004.
3) 翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，No.1，pp.51-56，1999.
4) 菅原正晴，小林義尚，真下　貢：計測震度と各種地震動強さの指標との関係について，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 175-176，1999.
5) 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，pp.633-638，2002.
6) Karim, K. R. and Yamazaki, F. : Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, pp.1191-1212, 2002.
7) 藤本一雄，翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法，地域安全学会論文集，No.7，pp.241-246，2005.
8) 中澤正明，植竹富一，稲田　裕，渡辺孝英，福島美光：兵庫県南部地震での強度観測記録の応答スペクトルと最大振幅との関係，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 129-130，1998.
9) 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，pp.11-21，2008.
10) 気象庁：震度を知る　基礎知識とその活用，53p，ぎょうせい，1996.
11) Cartwright, D. E. and Longuet-Higgins, M. S. : The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.237, pp.212-232, 1956.
12) Kanai, K. : Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Vol.35, pp.309-325, 1957.
13) Jennings, P. C. and Housner, G. W. and Tsai, N. C. : Simulated earthquake motions, Technical Report, *E. E. R. L.*, Pasadena, 1968.
14) 防災科学技術研究所　広帯域地震観測網F-net：http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/.
15) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, IEEE, *Trans. on Automatic Control*, AC-19, No.6, pp.716-723, 1974.

(2008. 10. 15 受付)

EVALUATION OF PERIODIC CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION USING JMA SEISMIC INTENSITY AND PEAK GROUND ACCELERATION

Hayato NISHIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

The present paper proposes a ratio of effective acceleration A_0 to PGA(A_0/PGA) to evaluate periodic characteristics of earthquake ground motion by using JMA seismic intensity and PGA. A relationship between A_0/PGA and spectrum of earthquake ground motion was theoretically studied. It is clarified that the shape of spectrum of earthquake ground motion correlate with A_0/PGA. Next, a relationship between A_0/PGA and peak period of fourier and velocity response spectrum were examined. Moreover, it was found that A_0/PGA have a positive correlation to the relative amplitude of spectrum for period 1 to 2s. Finally, we proposed an equation of the average amplitude of velocity response spectrum for period 1 to 2s($\bar{S}_{v1-2}$) as parameters of A_0/PGA and logA_0. We verified that the proposed equation can evaluate $\bar{S}_{v1-2}$ more accurately than that using only logA_0 or logPGA.