

地震動指標の地盤増幅度と微動H/Vスペクトル による増幅スペクトル推定 —石川県内の地震観測点を対象として—

西川 隼人¹・森本 吉輝²・宮島 昌克³

¹正会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234)

E-mail: nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

²株式会社IHI (〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1-1)

³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

本論文では地震波形が得られていない自治体観測点を対象に、最大地動加速度と計測震度の地盤増幅度と微動H/Vスペクトルによって増幅スペクトルを推定する手法を提案した。まず、中部地方の地震観測点の記録を用いて、回帰分析により、最大地動加速度と計測震度の地盤増幅度、応答スペクトルの増幅スペクトルを求めた。続いて、地盤増幅度と増幅スペクトルの相関関係を調べたところ、周期1秒付近までは両者に良好な相関が見られた。周期1秒より長周期の増幅スペクトルの推定精度を向上させるために、微動H/Vスペクトルを周期をパラメータとする関数で近似させて、増幅スペクトルの推定に用いた。地盤増幅度と微動H/Vスペクトルの近似関数をパラメータとする式によって増幅スペクトルを推定したところ、周期1秒以上での推定精度が向上した。

Key Words : local government observation sites, amplification factor, site spectrum, microtremor

1. はじめに

近年の地震観測網の発達により、良質かつ大量の地震動データが入手できるようになり、地震観測記録を用いて経験的に増幅スペクトル(地震動スペクトルのサイト特性)を評価する試みが日本各地で行われるようになった^{1)~5)}。ただし、経験的な増幅スペクトル評価の多くは気象庁やK-NET, KiK-netを対象としたものであり、これらの観測網に比べて高密度に展開している自治体観測点を対象とした研究は多くない。この要因の一つとして首都圏などの一部の都府県を除く全国の自治体観測点の多くで、増幅スペクトル評価に必要な地震波形を収集するシステムが十分に整備されていないことが挙げられる。

著者らは全国の9割以上の自治体観測点で計測震度と最大地動加速度を収集していること⁶⁾に着目して、これら地震動指標の地盤増幅度を用いた増幅スペクトル推定式を提案している⁷⁾。提案した手法は地盤増幅度と増幅スペクトルの相関関係を利用したものであり、この手法を用いれば、地震波形の収集が難しい自治体観測点に対しても経験的な増幅スペクトルを推定することが可能で

ある。しかし、提案した推定式では増幅スペクトルの形状や周期1秒以上の増幅度は十分に評価できなかった。構造物被害には周期1秒程度の地震動が大きな影響を及ぼすことが指摘されている⁸⁾ことから、地震被害予測の観点から見ても、周期1秒以上の増幅スペクトルの推定精度を向上させることは極めて重要である。

著者らの研究で周期1秒以上の増幅スペクトルや形状を十分に評価できなかった要因の一つとして、評価の際に増幅スペクトルの周期特性に関する情報、例えば地盤の卓越周期などを考慮しなかったことが考えられる。任意地点の卓越周期などの地盤震動特性を評価する方法として常時微動観測記録の水平スペクトルと鉛直スペクトルの比、いわゆる微動H/Vスペクトル⁹⁾が広く用いられている。表層と基盤に明瞭なコントラストが存在する地盤ではH/Vスペクトルのピーク周期が地盤の1次固有周期やS波増幅特性の1次周期と対応することが指摘されている^{10), 11)}。また、微動H/VスペクトルがS波の増幅特性に対応する⁹⁾、あるいは相似の関係が見られることが指摘されており¹²⁾、微動H/Vスペクトルは増幅スペクトルや地震動評価に度々用いられている^{13)~15)}。ただし、これ

らの研究において、微動H/Vスペクトルと地震動指標の地盤増幅度を用いて、増幅スペクトルを評価したものは見当たらない。

本論文では、一部の自治体観測点のように地震波形の収集が困難な地震観測点の増幅スペクトルを推定するために、地震動指標の地盤増幅度と微動H/Vスペクトルをパラメータとする増幅スペクトル推定式を提案する。微動H/Vスペクトルを用いて増幅スペクトルの形状を考慮することにより、地盤増幅度のみから増幅スペクトルを推定する場合に比べて、周期1秒以上の増幅スペクトルやスペクトル形状の推定精度を向上させることを本論文の目的とする。ここでは堂下ら¹⁶⁾が過去に常時微動観測を行った石川県内の気象庁、K-NET、KiK-net観測点を対象に増幅スペクトルの推定式を構築する。

2. 増幅スペクトルと地盤増幅度の評価

(1) 解析データ

解析対象とした地震は西川ら¹⁷⁾と同じものであり、能登半島地震やその余震の他に1997年～2009年にかけて中部地方で発生した45の地殻内地震である。図-1に解析対象地震と観測点分布、表-1に解析対象とした地震の諸元を示す。気象庁マグニチュード4.1～6.9、震源深さは0～21kmである。解析対象とした地震観測点は西川ら¹⁷⁾でも対象としたK-NET79点、KiK-net61点の他に、堂下ら¹⁶⁾が常時微動測定を行った石川県内の気象庁観測点10点である。対象とする地震観測点では表-1に示す45の地震のうち、5つ以上の地震で記録が得られている。対象地震に地域的な偏りが見られるが、西川ら¹⁷⁾が評価したサイト増幅特性(フーリエスペクトルに関する増幅特性)⁹⁾は様々な地域で発生した地震の観測記録による野津・長尾⁹⁾のサイト増幅特性と大きな違いはなかった。

図-2に解析対象とした記録の最大地動加速度(NS成分)と計測震度の頻度分布を示す。図-2から分かるように対象とした観測記録には最大地動加速度が200cm/s²を超える大振幅のものがいくつか含まれている。振幅の大きな観測記録では地盤の非線形化の影響が含まれている可能性がある。そこで最大地動加速度が200cm/s²を観測記録を含む場合と含まない場合に分けて、地盤増幅度や増幅スペクトルを求めたが、解析結果にほとんど違いが見られなかったため、最大地動加速度が200cm/s²を観測記録を含むデータセットによって検討を行った。

(2) 解析手法

地震動スペクトルのサイト特性である増幅スペクトルは加速度応答スペクトルを対象に求める。また、地盤増幅度は最大地動加速度と計測震度を対象に求めることと

表-1 地震の諸元

	地震発生日時	発生地域	M _{JMA}	緯度(°)	経度(°)	震源深さ(km)
1	1997年12月19日22:07:55.1	石川県西方沖	4.5	36.3150	136.2233	13
2	1998年11月16日08:08:33.6	能登半島沖	4.8	37.6733	137.4150	12
3	1999年11月7日03:34:1.6	福井県沖	5.0	36.0583	135.7933	15
4	2000年3月24日23:00:21.5	福井県嶺北	4.2	35.9067	136.7533	9
5	2000年6月5日09:54:41.2	福井県嶺南	4.9	35.7200	136.1100	9
6	2000年6月7日06:16:43.2	石川県西方沖	6.2	36.8250	135.5617	21
7	2000年6月22日20:36:27.5	石川県西方沖	4.6	36.8317	135.5383	18
8	2001年6月13日02:51:58.9	石川県西方沖	4.5	36.8233	135.5967	20
9	2002年8月18日09:01:1.8	福井県嶺北	4.7	36.1283	136.1767	11
10	2002年11月17日13:47:53.9	石川県加賀地方	4.7	36.3017	136.6733	8
11	2004年10月5日08:33:51.4	福井県嶺北	4.8	35.9333	136.3767	12
12	2005年6月20日14:04:28.0	岐阜県美濃中西部	4.6	35.7567	136.8550	9
13	2005年6月20日21:38:24.8	岐阜県美濃中西部	4.3	35.7583	136.8567	9
14	2006年1月1日22:56:54.4	福井県嶺北	4.1	35.9117	136.7550	10
15	2006年2月16日23:10:45.4	岐阜県美濃中西部	4.4	35.6883	136.4217	14
16	2006年2月18日16:21:10.6	岐阜県美濃中西部	4.1	35.6883	136.4183	13
17	2007年1月22日02:16:7.8	岐阜県美濃中西部	4.5	35.7333	136.3367	13
18	2007年3月25日09:41:57.9	能登半島沖	6.9	37.2200	136.6850	11
19	2007年3月25日09:56:31.0	石川県能登地方	4.7	37.2283	136.7233	10
20	2007年3月25日15:43:30.5	石川県能登地方	4.5	37.2933	136.7717	9
21	2007年3月25日18:11:45.1	石川県能登地方	5.3	37.3033	136.8383	13
22	2007年3月26日02:14:54.2	能登半島沖	4.2	37.1567	136.6683	12
23	2007年3月26日07:16:36.4	能登半島沖	5.3	37.1667	136.4883	0
24	2007年3月26日14:46:34.6	能登半島沖	4.8	37.1650	136.5517	9
25	2007年3月26日18:02:52.5	能登半島沖	4.6	37.2750	136.7000	6
26	2007年3月28日08:08:14.5	石川県能登地方	4.9	37.2217	136.7083	13
27	2007年3月28日10:51:2.6	能登半島沖	4.6	37.1750	136.6117	10
28	2007年3月28日13:05:31.0	能登半島沖	4.7	37.2817	136.6817	7
29	2007年3月31日08:09:46.9	石川県能登地方	4.4	37.2333	136.7583	13
30	2007年4月2日02:51:44.3	能登半島沖	4.2	37.2100	136.6883	12
31	2007年4月6日15:18:17.7	石川県能登地方	4.3	37.2667	136.7900	12
32	2007年4月6日21:42:10.7	石川県西方沖	4.7	37.0950	136.4250	7
33	2007年4月11日22:11:57.5	石川県西方沖	4.3	37.0733	136.4267	8
34	2007年4月28日09:27:24.6	岐阜県美濃中西部	4.6	35.7283	136.6250	10
35	2007年5月2日20:44:38.2	石川県能登地方	4.7	37.3300	136.7617	7
36	2007年5月11日02:12:27.2	石川県西方沖	4.5	37.1183	136.3117	11
37	2007年6月11日03:45:13.8	能登半島沖	5.0	37.2433	136.6533	7
38	2007年6月22日03:34:14.3	石川県西方沖	4.6	36.8767	136.6667	8
39	2007年7月9日16:00:34.2	石川県能登地方	4.2	37.3233	136.7567	10
40	2007年8月31日23:36:57.2	若狭湾	4.4	35.9150	135.6967	16
41	2007年12月21日14:22:54.5	福井県嶺北	4.5	35.9383	136.3483	7
42	2007年12月21日16:01:8.6	福井県嶺北	4.2	35.9383	136.3483	7
43	2008年1月26日04:33:25.3	石川県能登地方	4.8	37.3183	136.7733	11
44	2008年3月17日07:00:53.9	石川県西方沖	4.5	37.0683	136.2100	7
45	2009年2月18日06:47:7.0	岐阜県美濃中西部	5.2	35.6617	136.3133	9

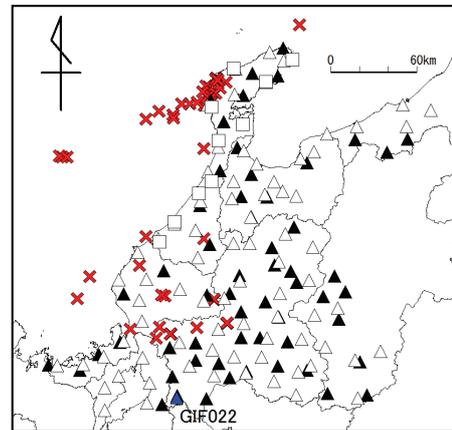


図-1 解析対象とした地震観測点と震央分布
(□気象庁, △K-NET, ▲KiK-net, ×震央)

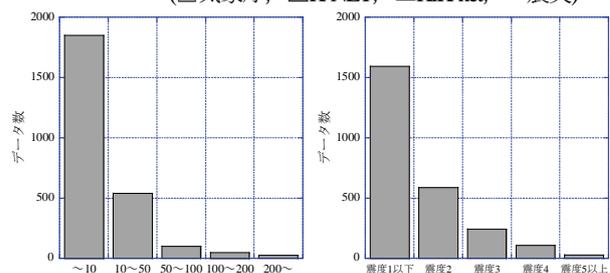


図-2 最大地動加速度、計測震度の頻度分布

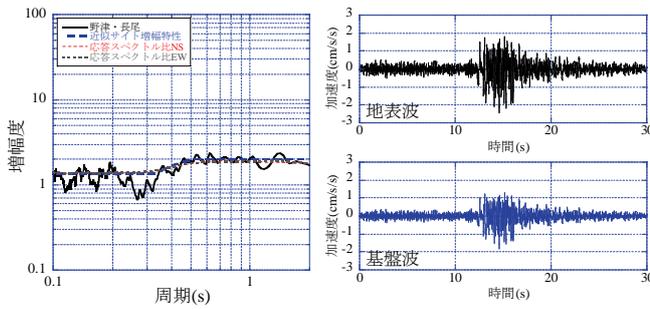


図-3 GIF022のサイト増幅特性⁵⁾

図-4 GIF022の地震波形

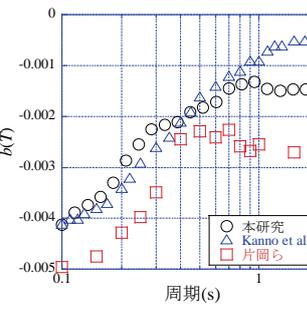


図-5 $b(T)$

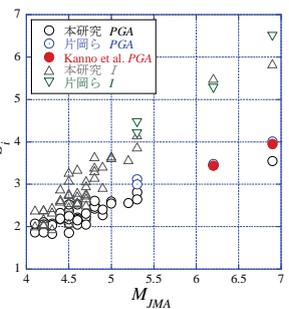


図-6 M_{JMA} と S_i^k の関係

する。増幅スペクトルと地盤増幅度はこれまでの著者らの手法⁷⁾と同じく、地震動指標が震源特性に関する項、距離減衰に関する項(内部減衰と幾何減衰)とサイト特性に関する項の和で表されるとし、各項を二段階回帰分析の1段階目の手法¹⁸⁾によって評価した。最大地動加速度と計測震度は式(1)、応答スペクトルに対しては式(2)を用いた。

$$A_{ij} = S_i^k - \log_{10} R_{ij} + b^k R_{ij} + g_j^k \quad (1)$$

$$\log_{10} S_{ajj}(T) = \log_{10} S_i(T) - \log_{10} R_{ij} + b(T)R_{ij} + g_j(T) \quad (2)$$

A_{ij} は i 番目の地震における j 番目の観測点の最大地動加速度 PGA の常用対数 $\log_{10} PGA$ か計測震度 I である。また、 $S_{ajj}(T)$ は周期 T の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)である。 $S_{ajj}(T)$ は地震観測波形の全区間を対象に、周期 0.1~2 秒の区間を対数軸で 20 等分し、21 個計算した。自治体観測点の多くで PGA は 3 成分合成値と 3 成分それぞれの値が収集されていることから、 PGA は NS, EW 成分を対象とした。それに伴い、 $S_{ajj}(T)$ も水平 2 成分それぞれ対象とする。式(1)の上添え字 k は対象とする地震動指標を区別するためのもので、 $\log_{10} PGA$ の場合は A 、計測震度では I である。

式(1)の S_i^k 、式(2)の $S_i(T)$ は i 番目の地震の震源に依存する係数、 R_{ij} は i 番目の地震における j 番目の観測点の断層最短距離(km)である。能登半島地震における断層最短距離 R_{ij} は国土地理院の断層モデル¹⁹⁾に基づく計算値である。その他の地震については地震の規模が小さいので、震源断層を点震源とみなし、 R_{ij} として震源距離を用いる。式(1)、(2)の b^k と $b(T)$ は内部減衰に対応する係数、 g_j^k と $g_j(T)$ は j 番目の観測点のサイト特性に関する係数である。式(2)では各係数を T ごとに評価する。 PGA の地盤増幅度 F^A は $10^{S_i^A}$ 、 I の地盤増幅度 F^I は g_j^I 、増幅スペクトルは $10^{S_i^I(T)}$ で定義される。サイト特性は各観測点で方向による違いが大きいことがあるので、回帰係数を求める際、 g_j^A と $g_j(T)$ は NS, EW 成分それぞれで独立とした。その他の回帰係数は方向によらず、共通の値とした。なお、式(2)でフーリエスペクトルを対象とした場合は回帰係数の物理的な意味が明確であるが、応答ス

ペクトルでは非線形性が強いことから、回帰係数の物理的意味が不明確である。そこで、式(2)の回帰係数の物理的意味を次節の解析結果において検討することとする。

式(1)、(2)を求める際に S_i^k と g_j^k あるいは $S_i(T)$ と $g_j(T)$ にトレードオフの関係があるために、両者を一意的に求められない。そこで、基準となる観測点を定め、その観測点の g_j^k や $g_j(T)$ を拘束条件として、回帰分析を実施した。本論文では K-NET 上石津(GIF022)を基準観測点とした。この観測点は図-3に示す野津・長尾⁵⁾のサイト増幅特性(地震基盤を基準とする相対的な増幅特性)から分かるように周期による増幅度の変動が小さく、その値も小さいことから、基準観測点として適していると考えられる。

式(2)の係数を求める際に、野津・長尾⁵⁾のサイト増幅特性を近似したサイト増幅特性(図-3の破線)を GIF022 のサイト増幅特性として与え、拘束条件とする。近似サイト増幅特性の増幅度は周期 0.1~0.33 秒、0.5~2 秒は野津・長尾によるサイト増幅特性のそれぞれの周期帯での平均値である。また、0.33~0.5 秒の増幅度は 0.33 と 0.5 秒の増幅度から求めた回帰直線により与えた。ただし、野津・長尾⁵⁾のサイト増幅特性がフーリエスペクトルから求めたものであるのに対して、本研究では加速度応答スペクトルを対象に増幅特性を評価する。ここで GIF022 の地表波形と地表波形をフーリエ変換したものを近似サイト増幅特性で除して、逆フーリエ変換して得られる波形から両者の応答スペクトルの比を求め、野津・長尾⁵⁾のサイト増幅特性と比較する。図-4に GIF022 の観測波と近似サイト増幅特性による処理を施した地震波の一例を示す。地表波は観測波、基盤波は処理した波である。地震波形は 1999 年 11 月 7 日に発生した地震(表-1の 3 番目の地震)で得られたものである。応答スペクトル比はサイト特性に対応するものであり、8 地震の記録から求めた値を平均した。応答スペクトル比は図-3に示すように近似サイト増幅特性とほとんど等しくなったことから、近似サイト増幅特性を回帰分析の際の拘束条件として用いても問題がないと考えられる。

式(1)の係数を求める際、GIF022 の NS 成分の g_j^A と g_j^I を 0 とした。この時に GIF022 の地震基盤面における PGA 、

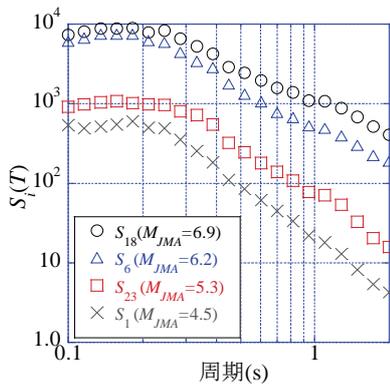


図-7 $S_i(T)$

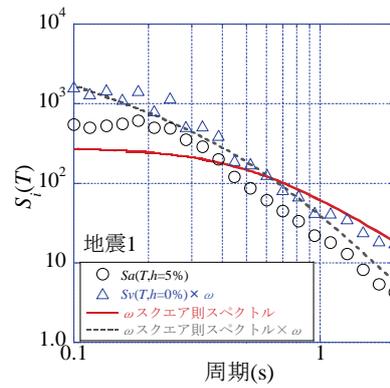
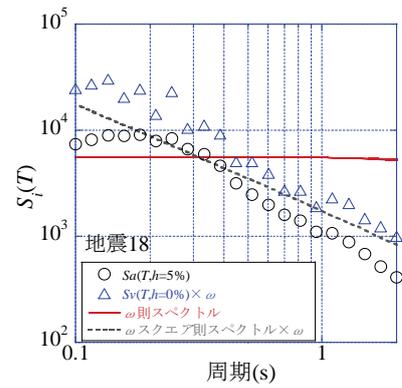


図-8 $S_i(T)$ と ω スクエア則に従う震源スペクトルの比較



I を求めるために次の計算を行う。地表波形をフーリエ変換したものを図-3の近似サイト増幅特性で除して、逆フーリエ変換し、得られた波形から PGA , I を計算する。得られた PGA , I が地震基盤面相当の層での値となる。以上の拘束条件を与え、回帰分析により得られる各観測点の係数はGIF022のサイト特性を基準とした相対的な値となる。

(3) 解析結果

回帰分析の結果、得られた b^A は-0.0039, b^I は-0.0109であった。 b^A は既往研究^{18), 20), 21)}では-0.003~ -0.004, b^I は片岡らの研究²⁰⁾では-0.0102であるので、本研究の結果は過去の研究と大きな違いがない。図-5に本論文の $b(T)$ と式(2)と同タイプの式を用いている既往研究^{20), 21)}の値を示す。同図を見ると本研究の $b(T)$ は、周期0.4~0.5秒まではKanno et al.²¹⁾の値と概ね等しく、それよりも長周期側ではKanno et al.と片岡らの中間的な値になっている。 $b(T)$ の値の違いの要因としては解析対象地震の違いなどが考えられる。

図-6に地震ごとに得られた係数 S_i^k と M_{JMA} の対応を、図-7には $S_i(T)$ の一例を示す。図-6には片岡らとKanno et al.による S_i^k を合わせて示す。同図を見ると M_{JMA} と S_i^k には明瞭な相関関係があり、また、既往研究の値と大きな違いがないことが分かる。次に図-7を見ると地震の規模が大きくなるほど、 $S_i(T)$ が大きく、傾きが緩くなっていることが分かる。ここで地震の規模による $S_i(T)$ の変化を ω スクエア則に従う震源加速度フーリエスペクトルから考える。フーリエスペクトルと減衰定数0%の速度応答スペクトルはほぼ等しい^{例えは²²⁾}こと、速度応答スペクトルに角振動数 ω を乗じることにより擬似加速度応答スペクトルが得られることから、フーリエスペクトルと加速度応答スペクトルの間には近似的に次の関係が成り立つ。

$$F(T) = S_v(T, h=0\%) = \delta(T) S_v(T, h=5\%) = \frac{\delta(T) S_a(T, h=5\%)}{\omega} \quad (3)$$

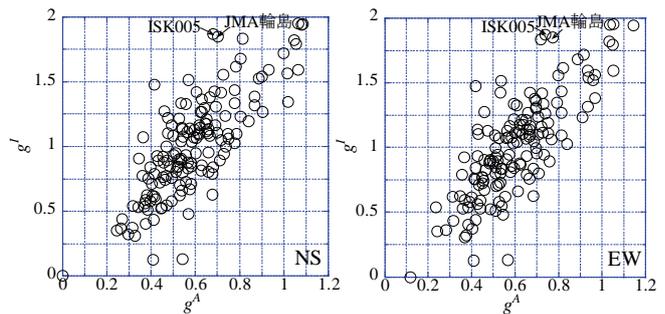


図-9 g^A と g^I の対応

$F(T)$ は加速度フーリエスペクトル, $S_v(T, h=0\%)$, $S_v(T, h=5\%)$ はそれぞれ減衰定数0%, 5%の速度応答スペクトルである。また, $\delta(T)$ は減衰定数の違いによる補正係数, $S_a(T, h=5\%)$ は減衰定数5%の加速度応答スペクトルである。 $F(T)$ と $S_a(T, h=5\%)$ が震源特性, 伝播経路特性, サイト特性の積で表されるとし, 伝播経路特性とサイト特性が同じとした場合, $S_a(T, h=5\%)$ の震源特性は $F(T)$ の震源特性に $\omega/\delta(T)$ を乗じたものと等しくなる。このことを確認するために, $S_a(T, h=5\%)$ ではなく, $F(T)$ とほぼ等しい $S_v(T, h=0\%)$ を対象に式(2)を求めた際に得られる $S_i(T)$ に ω を乗じたものと $S_a(T, h=5\%)$ を対象とした場合の $S_i(T)$ を比較する。

図-8に表-1の地震1, 地震18を対象とした場合の $S_i(T)$ および $S_v(T, h=0\%)$ を対象とした場合の $S_i(T)$ に ω を乗じたもの, ω スクエア則に従う震源スペクトルと ω スクエア則に従う震源スペクトルに ω を乗じたものを示す。それぞれ, 図中の凡例では $S_a(T, h=5\%)$, $S_v(T, h=0\%) \times \omega$, ω スクエア則スペクトル, ω スクエア則スペクトル $\times \omega$ と表している。なお, 震源スペクトルを求める際に必要となるコーナー振動数は地震モーメントとの経験式²³⁾から評価した。地震モーメントはF-NET²⁴⁾による値である。また, 震源スペクトルには振幅を調整するために定数をかけている。図-8を見て分かるように $S_a(T, h=5\%)$ を対象とした場合の $S_i(T)$ と $S_v(T, h=0\%)$ を対象とした場合の $S_i(T)$ に ω を乗じた

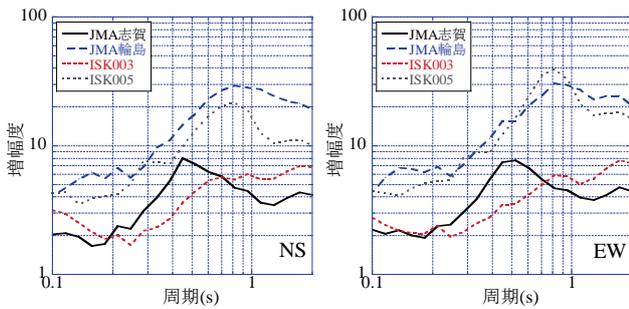


図-10 増幅スペクトル

ものは振幅は違うものの、似た形状を示している。また、周期0.5~2秒における傾きは ω スクエア則に従う震源スペクトルに ω を乗じたもの(図中凡例の ω スクエア則スペクトル $\times \omega$)の傾きと大体同じとなっている。以上から、地震の規模による $S_j(T)$ の変化は ω スクエア則に従う震源スペクトルに ω を乗じたものによって、概ね説明できることが分かった。

続いて、解析で得られた g^A と g^I の対応を図-9に、 $S_{aj}(T)$ の増幅スペクトルの一例を図-10に示す。増幅スペクトルは2007年能登半島地震で震源近傍に位置していた4観測点の値を示した。 g^A は0~1.14の範囲にあり、増幅度に換算すると1~139である。また、 g^I は0~1.95程度の値であり、 g^A との間に正の相関が見られることが分かる。能登半島地震で観測点周辺の被害が大きかったJMA輪島とK-NET穴水(ISK005)の地盤係数を見ると、 g^I は全体で大きなレベルにあるが、 g^A は全観測点の平均値(NSは0.602, EWは0.615)よりも0.1~0.2大きい程度である。これは g^I が同程度の観測点に比べて、増幅スペクトルの長周期成分が大きいことを示唆している。

図-10の増幅スペクトルを見ると、JMA輪島とISK005の増幅スペクトルでは構造物被害と相関が高いとされる周期1秒⁸⁾前後で大きな増幅度となっている。K-NET輪島(ISK003)はJMA輪島と距離が1km程度しか離れていないが、増幅スペクトルが大きく異なっている。また、JMA志賀はISK003と増幅スペクトルの形状は異なるが、増幅度のレベルは同程度となっている。JMA志賀は4観測点の中で最も断層最短距離が小さいが、観測点周辺の被害程度はJMA輪島やISK005よりも小さく、これらの観測点の増幅スペクトルの違いが被害程度の違いの要因の一つになった可能性が考えられる。

観測値と回帰式による推定値の標準偏差は式(1)でPGAを対象とした場合は0.216, I で0.419, $S_{aj}(T)$ では対象周期で0.21~0.25の範囲にあった。これらの値は片岡ら²⁰⁾による結果(PGAで0.169, I で0.328, $S_{aj}(T)$ では対象周期で0.155~0.190)と比べるとやや大きい。安中ら²⁵⁾やShabestari and Yamazaki²⁶⁾, 佐藤ら²⁷⁾による結果(PGAで0.275~0.298, I で0.511~0.544, $S_{aj}(T)$ で0.20~0.26)と比較するとPGA, I は小さく、 $S_{aj}(T)$ は同程度

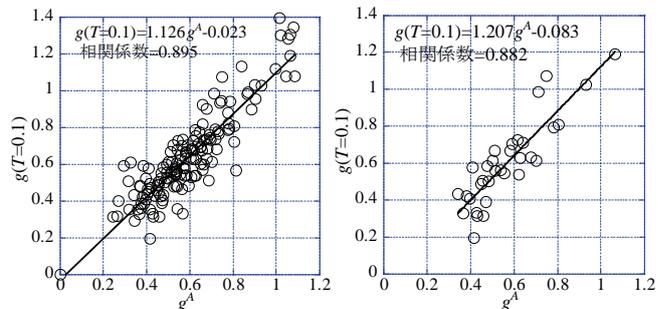


図-11 式(4)による推定値と観測値の対応(周期0.1秒)
(1)全対象観測点 (2)石川県内の観測点

である。解析対象地震などが異なるので単純に比較できないが、本論文で得られた回帰式による推定精度は既往研究と同じ程度だということが分かる。

3. 増幅スペクトル推定手法の提案と適用

(1) 地盤増幅度と増幅スペクトルの相関関係

著者らは地震動指標の地盤増幅度と増幅スペクトルに相関があることを利用し、最大地動加速度と計測震度の地盤増幅度から増幅スペクトルを推定している⁷⁾。本論文でも地盤増幅度を増幅スペクトルの推定に用いるが、まず、本論文で求めた地盤増幅度と増幅スペクトルに相関が見られるかどうかを確認する。

地盤増幅度や増幅スペクトルの評価対象とした観測点に対して、2章で観測記録を用いて回帰分析により得られた g_j^A や g_j^I と $g_j(T)$ の関係式を回帰分析により求め、2章で観測記録を用いて求めた $g_j(T)$ と関係式による推定値の相関係数を評価する。関係式は次のとおりである。

$$g_j(T) = c_1(T)g_j^A + c_2(T) \quad (4)$$

ここで $c_1(T)$, $c_2(T)$ は回帰係数である。例として、図-11に2章で観測記録から求めた g_j^A と周期0.1秒の $g_j(T)$ の対応、式(4)から求めた $g_j(T)$ の推定値を示す。解析結果は全対象観測点と石川県内の観測点に対して求めたものである。図中の点が観測値(2章で観測記録を用い回帰分析により評価した値)であり、直線が式(4)から求めたものである。観測値と関係式による推定値の相関係数は0.9に近い高い値となっている。

図-12に周期0.1~2秒に対して式(4)の関係式を求めた結果得られた相関係数を示す。式(4)の g_j^A が g_j^I の場合、観測値と推定値の相関係数は周期0.2秒までは0.8以上だが、それより長周期では急激に低下している。 g_j^I の場合は、 g_j^A に比べて、相関の高い周期が長周期側にシフトしている。さらに長周期側を見ると相関が低下しているものの、 g_j^A ほどではない。 g_j^I の方が長周期の相関係

数が高い要因として、計測震度を算出する際に用いるフィルター処理によって、加速度スペクトルに比べて周期の長い成分が強調されるためだと考えられる。以上から g_j^A の場合は周期0.1~0.2秒程度、 g_j^I では周期0.15~0.5秒付近では相関係数が0.7を超えている部分が多く、周期0.1~0.5秒の増幅スペクトルの推定に増幅度を利用できる可能性がある。

続いて、式(5)に示す g_j^A や g_j^I と $g_j(T)$ の関係式の係数を回帰分析によって求め、観測値と関係式による推定値の相関係数を周期ごとに求める。

$$g_j(T) = c_3(T)g_j^A + c_4(T)g_j^I + c_5(T) \quad (5)$$

ここで $c_3(T) \sim c_5(T)$ は回帰係数である。図-13にNS成分の g_j^A と g_j^I をパラメータとして求めた式(5)による推定値と観測値の相関係数を示す。周期0.7~0.8秒あたりまでは相関係数が概ね0.8を超えており、式(4)を用いた場合に比べて、全体的に相関が高くなっている。ただし、周期1秒以上では相関係数が他の周期に比べて低くなっており、著者らの研究⁷⁾の結果と同様の傾向を示している。周期1秒以上の相関係数の低下の要因の一つとして、式(5)において、増幅スペクトルのスペクトル形状に関する情報を取り込んでいないことが考えられる。この点を改善するために、微動HVスペクトルを増幅スペクトル推定に用いることにする。

(2) 微動HVスペクトルと増幅スペクトルの対応

前節で述べたように、地震動指標の地盤増幅度を用いて増幅スペクトルを推定する際に、周期1秒以上の推定精度を上げるために、地震観測点で測定した微動HVスペクトルを利用する。ここで対象とする地震観測点は石川県内の33地点である。増幅スペクトル推定に微動HVスペクトルを利用するにあたり、まず、微動HVスペクトルを次に示す関数²⁹⁾によって近似させて用いることにする。

$$G_m(T) = \frac{T_p^2/T^2}{\sqrt{(1-T_p^2/T^2)^2 + 4h_p^2 T_p^2/T^2}} \quad (6)$$

$G_m(T)$ は近似関数であり、周期 T ごとに値が与えられる。 T_p は $G_m(T)$ のピーク周期(s)であり、 h_p はピーク周期の増幅度を規定する係数である。微動HVスペクトルは増幅スペクトルと同じ周期0.1~2秒を対象とし、最大振幅で正規化して用いる。正規化した微動HVスペクトルを $G_m(T)$ でフィッティングさせるために、次に示す関数が最小となるような T_p と h_p を求める。なお、 $G_m(T)$ も最大振幅について正規化するために、 $G_m(T)$ に h_p を乗じる。

$$\{A_m(T) - G_m(T) \times h_p\}^2 \quad (7)$$

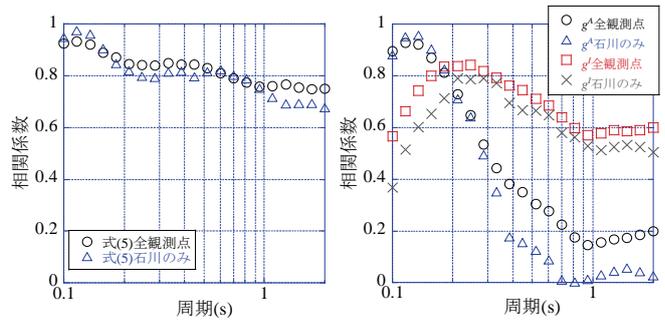


図-12 式(4)による推定値と観測値の相関係数

図-13 式(5)による推定値と観測値の相関係数

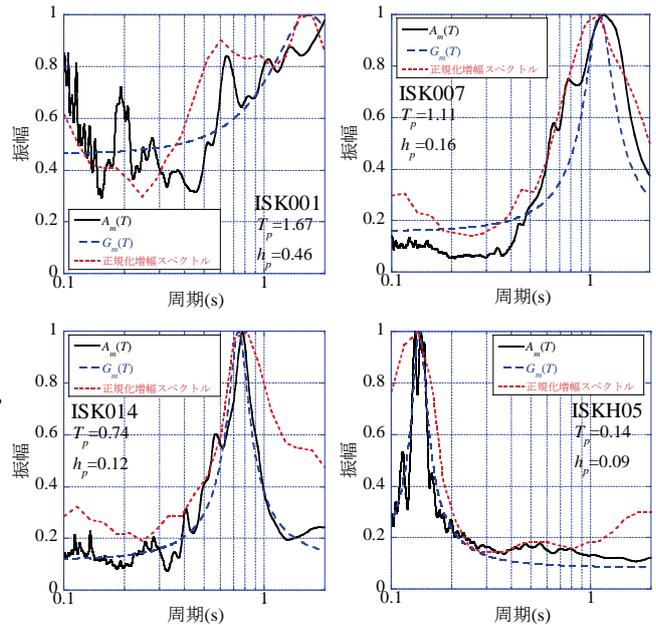


図-14 $A_m(T)$ と $G_m(T)$ 、正規化増幅スペクトルの対応

$A_m(T)$ は微動観測記録から求めたHVスペクトルを正規化したものである。式(7)の計算は T_p を0.1~2秒まで0.01秒刻みで変化させ191通り、 h_p を0.01~1の範囲で対数軸で30等分して31通り変化させ、5921通り式(6)を計算して、式(7)が最小となる T_p と h_p を探索した。

図-14に $A_m(T)$ と式(7)の計算で得られた T_p と h_p を用いて式(6)により求めた $G_m(T)$ に h_p を乗じたもの、及び、最大値で正規化した増幅スペクトル(NS成分)の例を示す。図-14から分かるように正規化した $G_m(T)$ によって、 $A_m(T)$ をよく近似できている。また、 $G_m(T)$ と正規化した増幅スペクトルの対応を見ると、ピーク周期が概ね一致しており、両者の振幅に大きな違いがない。ただし、正規化したものに関する比較であるので、絶対値で比較した場合、両者の振幅が大きく異なる可能性もある。よって、増幅スペクトルを推定する際に形状に関しては $G_m(T)$ によって考慮し、振幅については地盤増幅度によって調整することにより、増幅スペクトルの推定を試みる。

(3) 地盤増幅度と微動H/Vスペクトルによる増幅スペクトル推定

ここでは2章で観測記録を用いて評価した各観測点の g_j^A , g_j^I および前節で求めた $G_m(T)$ と増幅スペクトルの関係式を回帰分析によって求める. 関係式は以下に示すとおりである.

$$g_j(T) = c_6(T)g_j^A + c_7(T)g_j^I + c_8(T)\log_{10}G_m(T) + c_9(T) \quad (8)$$

$c_6(T) \sim c_9(T)$ は回帰係数である. 式(8)の添え字 j は微動H/Vスペクトルを観測した33観測点に対するものである.

図-15に式(5), (8)の回帰係数を, 図-16に式(5), (8)による $g_j(T)$ の推定値と観測値の相関係数を示す. 式(5), (8)による $g_j(T)$ の推定値はそれぞれの式の回帰係数と2章で観測記録を用いて評価した g_j^A , g_j^I , 式(8)の場合は g_j^A , g_j^I と前節で求めた $G_m(T)$ によって計算した値である. まず, 図-15の回帰係数を見ると, NSとEWは似た傾向を示している. g_j^A の係数 $c_3(T)$ と $c_6(T)$ は短周期ほど値が大きく, g_j^I の係数 $c_4(T)$ と $c_7(T)$ は g_j^A の係数に比べて長周期側の値が大きい. また, $\log_{10}G_m(T)$ の係数 $c_8(T)$ は長周期側に緩やかに大きくなっており, $c_5(T)$ と $c_9(T)$ は値にそれほど違いがないことが分かる. 続いて, 図-16を見ると, 周期0.1~0.5秒付近では両式による相関係数に大きな違いはないが, それよりも長周期では式(8)の方が相関が高くなっており, 周期1秒付近では相関係数が0.9前後と, 高い値になっている.

また, 評価モデル式の良さの指標の一つであるAIC(赤池情報量基準)²⁹⁾を式(5)と式(8)について周期ごとに求めると, 図-17のように周期0.6秒より長周期では式(8)の方がAICが小さく, 増幅スペクトルの長周期成分を評価する上で式(8)が式(5)よりも優れていることが分かる. なお, AICは次式によって計算した.

$$AIC = n \ln(S_r / n) + 2m \quad (9)$$

ここで n はデータ数, S_r は観測値と推定値の残差二乗和, m は評価式のパラメータ数である.

図-18に2章で観測記録を用い回帰分析によって求めたNS成分の増幅スペクトル(図-18の観測値)と式(5), (8)により求めた増幅スペクトル(図-18の推定値)の一部を示す. 式(5), (8)による増幅スペクトルの推定値にあまり違いが見られない観測点もあるが, ISK007やISK014のように増幅スペクトルの周期1秒前後にピークが見られる観測点では式(8)による推定値の方が観測値との対応が良いことが分かる.

図-18には式(8)の回帰式を求める際に対象とした地震観測点の増幅スペクトルの観測値と推定値を示しているが, 回帰の対象となっていない観測点に対しても, 式

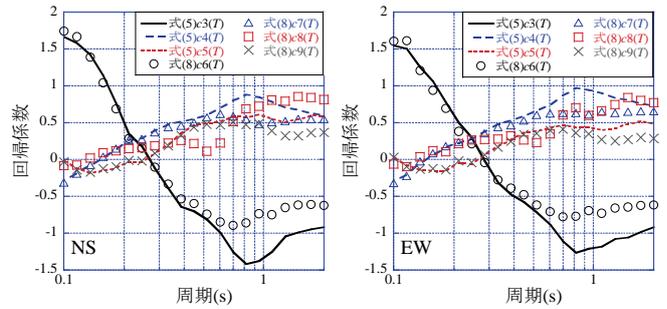


図-15 式(5), (8)の回帰係数

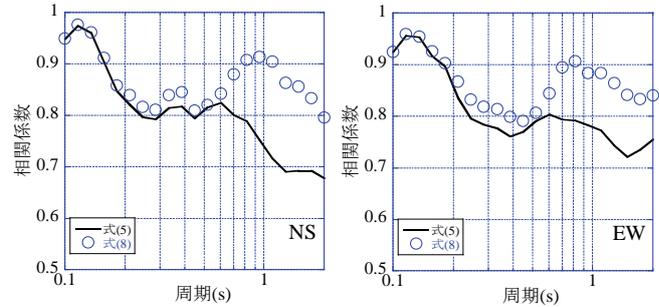


図-16 式(5), (8)による推定値と観測値と相関係数

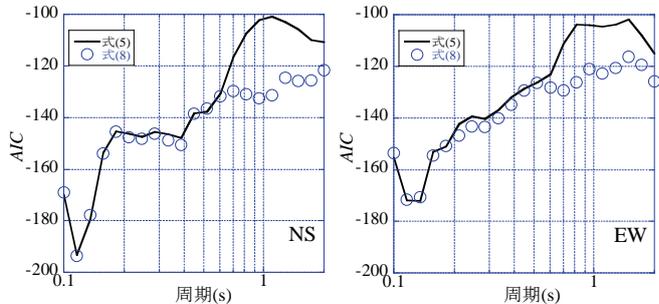


図-17 式(5), (8)に対するAIC

(8)によって増幅スペクトルを精度良く推定できるかどうか調べる. 今回, 能登半島地震で震度6強の揺れを記録した輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の地震観測点を対象に観測記録から求めた増幅スペクトルと式(8)を用い推定した増幅スペクトルを比較する. 輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の観測点で得られた地震観測記録から次式によって g_j^k と $g_j(T)$ を評価する.

$$g_j^k = A_{ij} - (S_i^k - \log_{10} R_{ij} + b^k R_{ij}) \quad (10)$$

$$g_j(T) = \log_{10} S_{ajj}(T) - (\log_{10} S_i(T) - \log_{10} R_{ij} + b(T) R_{ij}) \quad (11)$$

A_{ij} は観測記録から求めた最大地動加速度PGAの常用対数 $\log_{10}PGA$ か計測震度 I , $S_{ajj}(T)$ は周期 T の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)である. 式(10), (11)の係数 S_i^k , $S_i(T)$, b^k , $b(T)$ は2章で式(1), (2)を回帰分析によって求めた際に得られたものである. g_j^A と $g_j(T)$ はNS, EW成分それぞれに対して求める. 輪島市門前町の観測点では記録が得られている10地震, 七尾市田鶴浜町は5地震に対して, 式(10), (11)を用い g_j^k と $g_j(T)$ を求め,

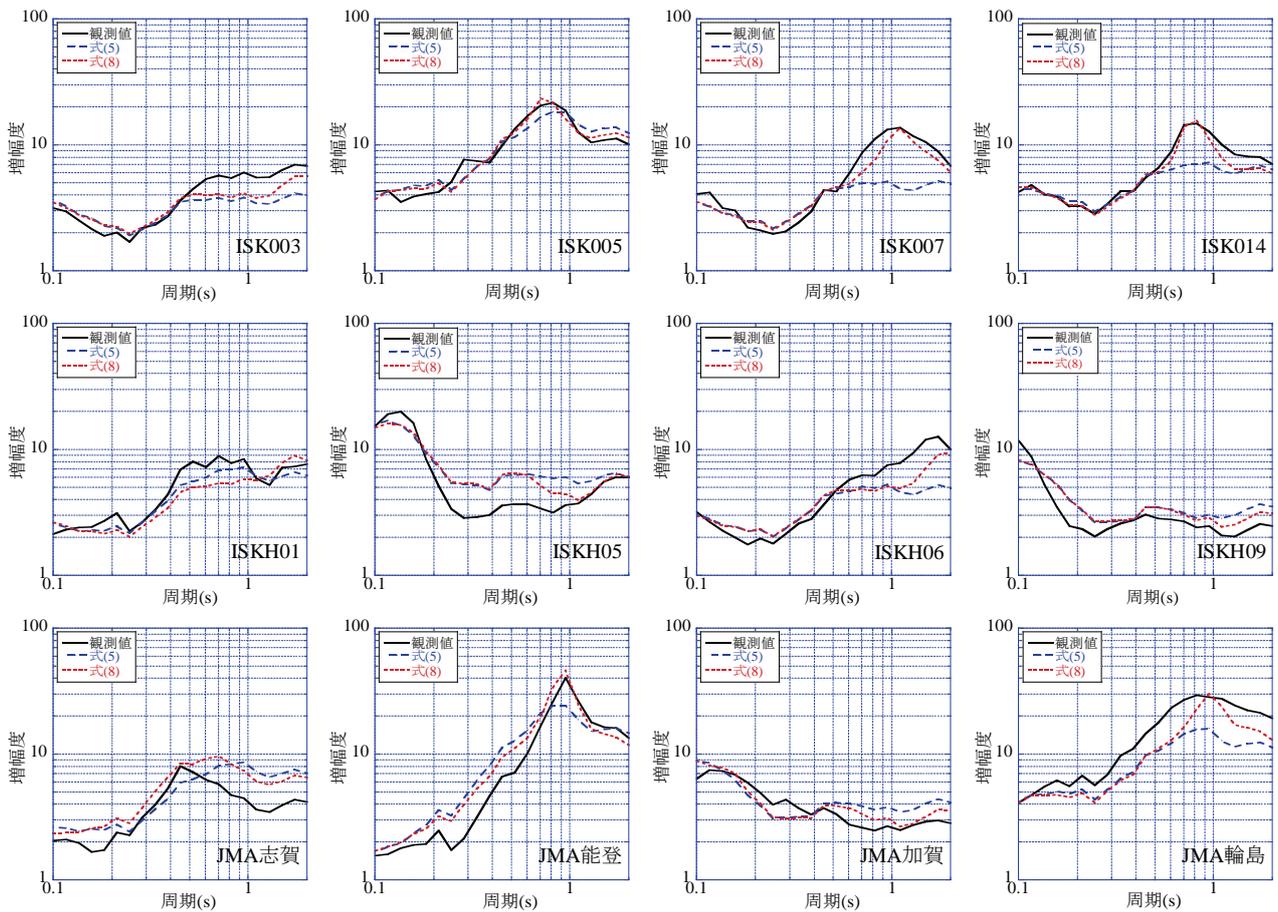


図-18 増幅スペクトルの観測値と式(5), (8)による推定値(NS成分)

これらの係数の算術平均を輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の g_j^k と $g_j(T)$ とする。

式(10)によって求めた g_j^k と $G_m(T)$, 式(8)を回帰分析によって求めた際に得られた回帰係数 $c_6(T) \sim c_9(T)$ によって $g_j(T)$ を求める。図-19に輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の地震観測点付近で観測した常時微動記録から求めた $A_m(T)$ と前節で述べた手順で求めた $G_m(T)$ を示す。

図-20に観測記録を用いて式(11)によって求めた増幅スペクトル(図-20の観測値)と, g_j^k と $G_m(T)$ を用いて式(8)によって推定した増幅スペクトル(図-20の推定値)を示す。同図を見ると, 観測値と推定値のピーク周期はややずれているが, 全体の形状や振幅に大きな違いがなく, この2つの観測点については式(8)によって精度良く増幅スペクトルを推定できたと言える。今後は式(8)を求める際に対象としなかった他の地震観測点に対しても, 同様の検討を行い, 式(8)による増幅スペクトルの推定精度を確認する予定である。

4. まとめ

本論文では地震波形の収集が困難な自治体観測点を想

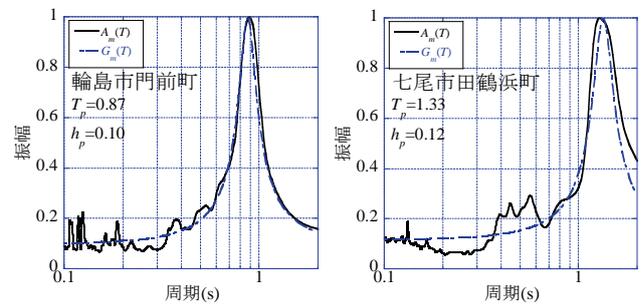


図-19 輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の $A_m(T)$ と $G_m(T)$

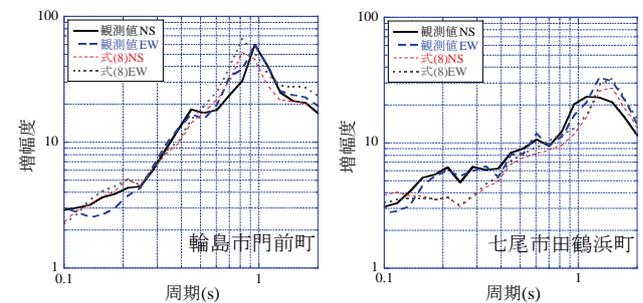


図-20 輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の増幅スペクトル

定して, 地震動指標の地盤増幅度と微動HVスペクトルから増幅スペクトルを推定する手法を提案した。まず, 中部地方の気象庁, K-NET, KiK-net観測点150点を対象に計測震度と最大地動加速度の地盤増幅度と加速度応答

スペクトルに対する増幅スペクトルを回帰分析により評価した。2007年能登半島地震で断層近傍に位置する地震観測点の増幅スペクトルの特徴を見ると、観測点周辺の被害が大きかったJMA輪島やISK005では周期1秒前後で大きな増幅が見られた。

距離減衰式を求めた際に得られた内部減衰に関する係数は計測震度と最大地動加速度では既往研究と比べて、ほとんど違いがなかったが、加速度応答スペクトルでは既往研究の中間的な値であった。内部減衰に関する係数には対象地域における伝播経路特性が反映されているので、他の地域で今回の解析結果を適用できない可能性がある。震源に依存する係数は計測震度と最大地動加速度を対象とした場合、既往研究と大きな違いがなかった。また、加速度応答スペクトルを対象とした場合の係数は ω スクエア則に従う震源スペクトルに ω を乗じたものによって、説明できることが明らかになった。

続いて、著者らの研究⁷⁾と同様に、最大地動加速度や計測震度の地盤増幅度と増幅スペクトルの相関関係を調べるとともに、これらの地盤増幅度をパラメータとする増幅スペクトル推定式を求めた。観測記録と推定式による増幅スペクトルの相関係数を計算したところ、短周期側で相関係数が0.9前後であり、周期1秒付近までは0.8前後であったが、周期1~2秒ではこれより短周期に比べて、相関が低くなった。

周期1秒より長周期での増幅スペクトルの推定精度を向上させるために、石川県内の33の地震観測点を対象に微動H/Vスペクトルを考慮した増幅スペクトル推定式を求めた。その結果、観測値と推定式による増幅スペクトルの相関係数は周期1秒前後でも、0.9前後と高い値になった。また、AICの計算結果から、増幅スペクトル推定式における微動H/Vスペクトルの有用性が確認された。最後に増幅スペクトル推定式を回帰分析で求める際に対象としなかった輪島市門前町と七尾市田鶴浜町の観測点に対して、推定式により増幅スペクトルを求めたところ、観測記録から求めた増幅スペクトルとよく対応した。

本論文では著者らが常時微動観測を行った石川県内の地震観測点のみを対象として、地盤増幅度と微動H/Vスペクトルから増幅スペクトルを推定したが、今後は近接する県の地震観測点でも常時微動測定を実施し、同様の検討を進める予定である。また、提案した増幅スペクトル推定手法を用いて、自治体観測点の増幅スペクトルを推定する予定である。

謝辞: 本研究では気象庁、及び、独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net観測記録を使用させて頂きました。3名の査読者には非常に有益なご意見を頂きました。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震2, Vol.39, No.4, pp.579-593, 1986.
- 2) 荘司雄一, 神山 眞: Small-Titanの観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.237-253, 2002.
- 3) 佐藤智美, 巽 誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 4) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第1号, pp.33-52, 2004.
- 5) 野津 厚, 長尾 毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 6) 消防庁: 次世代震度ネットワークのあり方検討委員会中間報告書, 2005.
- 7) 西川隼人, 宮島昌克: 自治体観測点で得られる地震動指標の地盤増幅度によるサイト特性の推定, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 1, pp.178-187, 2009.
- 8) 境 有紀, 吉岡伸悟, 額瀨一起, 壁谷澤寿海: 1999年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.549, pp.43-50, 2001.
- 9) 中村 豊: 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, pp.18-27, 1988.
- 10) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.81-87, 1992.
- 11) 若松邦夫, 安井 謙: 短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.471, pp.61-70, 1995.
- 12) Rodriguez, V. and Midorikawa, S.: Comparison of spectral ratio techniques for estimation of site effects using microtremor data and earthquake motions recorded at the surface and in boreholes, and microtremor data, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.32, No.11, pp.1691-1714, 2003.
- 13) 紺野克昭, 大町達夫: 常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.247-259, 1995.
- 14) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典: 宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.261-272, 2002.
- 15) 神山 眞, 松山忠司, 片岡俊一: アレー観測システムを利用したローカルサイト増幅に関する研究, 土木学会地震工学論文集, 第30巻, pp.38-51, 2010.
- 16) 堂下翔平, 宮島昌克, 北浦 勝: 石川県における地震観測点の特徴と計測震度に及ぼす影響, 日本地震工学会-2004梗概集, pp.42-45, 2005.
- 17) 西川隼人, 森本吉輝, 宮島昌克: 中部地方のK-NET, KiK-net観測点の地震記録に基づくスペクトルインバージョン解析, 第28回日本自然災害学会学術講演会,

- pp.7-8, 2009.
- 18) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.757-783, 1990.
 - 19) 国土地理院 : 平成 19 年(2007 年)能登半島地震を起こした震源断層の姿, http://www.gsi.go.jp/cais/notohanto-fault_model.html
 - 20) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明 : 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集A, Vol.62, No.4, pp.740-757, 2006.
 - 21) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y. : A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.96, pp.879-897, 2006.
 - 22) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, pp.149-151, 鹿島出版会, 1994.
 - 23) Takemura, M., Ikeura, T. and Uetake, T.: Characteristics of source spectra of moderate earthquakes in a subduction zone along the pacific coast of the southern Tohoku district, Japan, *J. Phys. Earth*, Vol.41, pp.1-19, 1993.
 - 24) 独立行政法人 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-netホームページ : <http://www.fnet.bosai.go.jp/>
 - 25) 安中 正, 大金義明, 林 孝幸, 岩口健司, 上園智大 : 計測震度の距離減衰式に基づく確率論的地震ハザードマップ, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.126-129, 2006.
 - 26) Shabestari, K. T. and Yamazaki, F. : Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.137-140, 1999.
 - 27) 佐藤智美, 片岡正次郎, 奥村俊彦 : K-Net強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.615-620, 2002.
 - 28) 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/I-56, pp.311-322, 2001.
 - 29) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, *IEEE, Trans. on Automatic Control*, AC-19, No.6, pp.716-723, 1974.

(2010.3.29 受付)

EVALUATION OF SITE SPECTRUM USING AMPLIFICATION FACTORS FOR EARTHQUAKE GROUND MOTION INDICES AND H/V SPECTRUM OF MICROTREMOR

Hayato NISHIKAWA, Yoshiki MORIMOTO and Masakatsu MIYAJIMA

In this study, we proposed a method to evaluate a site spectrum using amplification factors for peak ground acceleration and JMA seismic intensity, H/V spectrum of microtremor at local government observation sites where seismic waveform records were not stored. Firstly, the amplification factors and site spectra of acceleration response spectra at JMA, K-NET, KiK-net observation sites in the Chubu region were evaluated by a regression analysis. The amplification factors and site spectra have a good correlation at less than one second of period. In order to improve the evaluation to site spectra at more than one second of period, we used a function approximated by the H/V spectra as a parameter of the site spectra. The site spectra by a regression analysis using amplification factors and the approximated function were evaluated. The precision of evaluation at more than one second of period was improved.