



地震規模依存性を考慮した地盤増幅度評価式の改良と 観測増幅度との比較

西川隼人¹⁾、宮島昌克²⁾

- 1) 正会員 舞鶴工業高等専門学校、主任技術職員 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

著者らは震源スペクトルやサイト増幅特性と基盤と地表の地震動指標の比、いわゆる地盤増幅度の関係式を求めており、これに基づく増幅度評価式を提案している。本論文ではサイト増幅特性を変更して評価式を改良するとともに、改良した評価式によって計算した地盤増幅度とモーメントマグニチュード M_w の関係を調べた。その結果、最大地動速度の地盤増幅度は最大地動加速度に比べて、 M_w によって大きく変化することが明らかになった。続いて、提案した評価式による増幅度と観測記録を用い重複反射理論によって評価した増幅度を比較したところ、サイト増幅特性と重複反射理論による理論値が適合する場合、最大地動速度の計算増幅度と観測増幅度はよく対応した。

キーワード： 地盤増幅度、最大地動加速度、最大地動速度、地震動スペクトル、サイト増幅特性、モーメントマグニチュード

1. はじめに

これまでの研究で、最大地動加速度、最大地動速度などの地震動指標の地盤増幅度が地震の規模によって変化することが指摘されており^{たとえば1)}、紺野ら²⁾や翠川ら³⁾は地震観測記録から地震の規模に応じて表層の平均S波速度と地盤増幅度(S波速度=600m/s程度の解放基盤を基準)の関係式を求めている。これらの研究では、地震の規模による地震動の周期成分の違いが地盤増幅度に影響を及ぼしていることが指摘されているが、いずれも定性的な議論にとどまっている。一方、著者ら⁴⁾は地震規模と密接に関連している震源スペクトルのコーナー振動数 f_c と地盤増幅度の関係を調べるために、パーセバルの定理と極値理論に基づき f_c や震源スペクトルの高域遮断振動数 f_{max} などをパラメータとする増幅度評価式を求めた。評価式は紺野ら²⁾や翠川ら³⁾の研究と異なり地盤増幅度の基準層が地震基盤相当の層(S波速度=3000m/s程度の解放基盤)であるが、地震規模依存性のメカニズムは同じである。また、評価式は解放地震基盤面のスペクトルを基本としたものであるため、地盤増幅度は解放地震基盤面を基準とした値である。評価式によって f_c や f_{max} の地盤増幅度への影響を調べたところ、最大地動速度の方が f_c による影響が大きく、 f_{max} による影響は最大地動加速度の方が大きいことを明らかにしている。提案した増幅度評価式は f_c や f_{max} 、サイト増幅特性のピーク振動数をパラメータとする陽な式であることから、これ

らのパラメータを与えることにより解析的に増幅度を求めることが可能である。また、 f_c とモーメントマグニチュード M_w の関係式を用いることにより、 M_w による地盤増幅度の変化を知ることができる。

ただし、著者らの研究でサイト増幅特性として用いたKanai⁵⁾のスペクトルはピーク振動数よりも高振動数での増幅度の低下が著しく、観測記録によるサイト増幅特性や地盤情報から計算される理論増幅特性とは必ずしも対応していない。そのため、サイト増幅特性のピーク振動数が低振動数の場合は地震動指標の地盤増幅度が1を大きく下回るケースが見られた。また、この研究では理論的に地盤増幅度評価式を導いているものの、実際の地震観測記録から計算される地盤増幅度との対応を調べていない。提案した地盤増幅度評価式を地震動予測に適用するためには、サイト増幅特性としてより実際のもので対応するスペクトルを用いるとともに、評価式によって得られる地盤増幅度を実観測記録による値と比較する必要がある。

本論文ではサイト増幅特性として、Kanai⁵⁾のスペクトルよりも実際のサイト増幅特性と対応のよいスペクトルを用いて、増幅度評価式を求めるとともに、著者らの研究で行っていない評価式と地震観測記録から求めた地盤増幅度の比較を実施し、本論文で提案する増幅度評価式の適用性を検証する。解析では既往研究に基づき最大地動加速度、最大地動速度の増幅度評価式を求め、異なるサイト増幅特性による地盤増幅度の違いを調べるとともに、地盤増幅度の地震規模依存性を評価する。続いて、防災科学技術研究所KiK-netの地震観測記録とS波速度や減衰定数などの地盤定数を用いて増幅度を算出し、本研究で求めた評価式による地盤増幅度との対応を調べる。

2. 地震動スペクトルと地盤増幅度の関係

著者らは、パーセバルの定理と極値理論からある地点の地表面とS波速度=3000m/s程度の解放地震基盤における地震波の最大振幅の比、いわゆる地盤増幅度が次式で表わされることを導びくとともに、模擬地震波や観測地震波においても関係式が概ね成り立つことを示している^{4)、9)}。

$$F = \frac{A_s}{A_b} \doteq \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (1)$$

ここで F は地盤増幅度、 A_s は地表波の最大振幅、 A_b は解放基盤の地震波の最大振幅である。また、 $G(f)$ はその地点のサイト増幅特性、 $F_b(f)$ は解放基盤波のフーリエスペクトルである。

ここで $F_b(f)$ はBooreの研究¹⁰⁾に従い、次式で表わされるものとする。

$$F_b(f) = CM_0 \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f R}{Q_s V_s}\right) S(f) \quad (2)$$

$F_b(f)$ はS波のみから成り立つものとし、式(2)の C はラディエーションパターンなどをパラメータとする係数、 $1/R$ は幾何減衰に対応する。今回、ラディエーションパターンは地表と基盤ともに全方位の平均値を考える。 R は震源距離である。 M_0 は地震モーメント、指数項は内部減衰に対応し、 Q_s はS波の減衰の程度を表すパラメータ、 V_s は地震発生層のS波伝播速度、 $S(f)$ は震源スペクトルである。

同一地点における地表波のスペクトル $F_b(f)G(f)$ と基盤波のスペクトル $F_b(f)$ の C 、 M_0 、 R は同じ値であるので、両スペクトルの比をとることにより、これらはキャンセルされる。また、式(2)の指数項の Q_s は一般に Q_0^β (Q_0 は定数)と表わされるが、ここでは $\beta=1$ と仮定することにより、この指数項を定数と考える。これにより、式(1)は以下のように表すことができる。

$$F = \frac{A_s}{A_b} \doteq \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (3)$$

3. 地盤増幅度評価式の提案とモーメントマグニチュードとの対応

3.1 地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現

2章では地盤増幅度が震源スペクトルとサイト増幅特性によって表現できることを導いた。ここでは

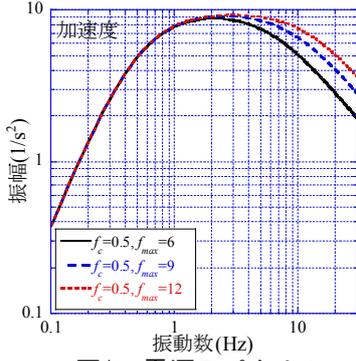


図1 震源スペクトル

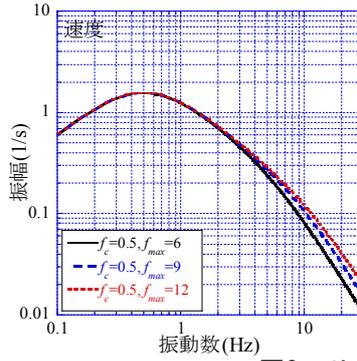
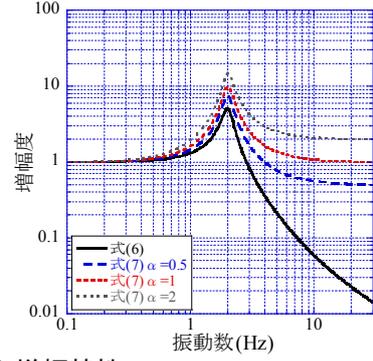


図2 サイト増幅特性



地盤増幅度を震源スペクトルやサイト増幅特性のパラメータによって陽な形で表すために、式(3)に基づき増幅度の定式化を試みる。定式化において震源スペクトルとして次の ω^2 則に従う式に高域遮断フィルターを考慮したものを用いる。

$$S_A(f) = \frac{(2\pi)^2 f_c^2 f^2}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (4)$$

$$S_V(f) = \frac{2\pi f_c^2 f}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (5)$$

$S_A(f)$ は加速度、 $S_V(f)$ は速度の震源フーリエスペクトルである。右辺第1項が ω^2 則モデル、第2項が高域遮断フィルターに対応する。同フィルター式として f_{max} の4次式などが用いられているが、本論文では式(4)、(5)のタイプの式を用いた。図1に震源スペクトルの一例を示す。 f_{max} が大きいほど、高振動数成分が大きいことが分かる。サイト増幅特性 $G(f)$ は著者らの研究⁴⁾では式(6)で表されるKanai⁵⁾の提案したスペクトルを用いた。

$$G(f) = \frac{f_g^4 + 4h_g^2 f_g^2 f^2}{\sqrt{(f_g^2 - f^2)^2 + 4h_g^2 f_g^2 f^2}} \quad (6)$$

f_g はサイト増幅特性のピーク振動数、 h_g はピーク振幅を規定する係数である。このスペクトルは式(3)の無限積分値を留数定理によって求める上で分母が適した形であるが、ピーク振動数よりも高振動数側では振幅が急激に低下しており、実際のサイト増幅特性と対応がよくない。そこで本研究では次の澤田ら¹¹⁾の提案した式をサイト増幅特性として用いることにした。

$$G(f) = \beta \sqrt{\frac{f_g^4 + 2\alpha f_g^2 f^2 + \alpha^2 f^4}{(f_g^2 - f^2)^2 + 4h_g^2 f_g^2 f^2}} \quad (7)$$

ここで α は高振動数側の増幅度を調整する係数、 β は全体の増幅度を調整する係数である。図2に $f_g=2\text{Hz}$ 、 $h_g=0.1$ の場合の式(6)と式(7)による $G(f)$ を示す。式(7)の α と β は1である。同図から分かるようにスペクトルは単一のピークから成っており、今回の検討ではサイト増幅特性が基本モードのみによるものと仮定する。図2を見てわかるようにKanai⁵⁾のスペクトルは f_g よりも高振動数側の増幅度が急激に低下しているが、今回用いた澤田ら¹¹⁾のサイト増幅特性は高振動数側の増幅度を調整でき、より実際のサイト増幅特性に近いものとなっていることが分かる。

続いて、式(3)右辺分母の無限積分値を留数定理によって加速度、速度に対して求める。加速度の場合の無限積分値は次のようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c)^4 f^4}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df = \frac{(2\pi)^5 f_c^4 f_{max}^2 (f_c + 2f_{max})}{4(f_c + f_{max})^2} \quad (8)$$

また、速度の場合は以下ようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c)^2 f^2}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df = \frac{(2\pi)^3 f_c^3 f_{max}^2}{4(f_c + f_{max})^2} \quad (9)$$

続いて、式(10)で表される式(3)右辺分子の無限積分値を留数定理により求める。

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^n f_c^4 f_{max}^2 (f_g^4 + 2\alpha f_g^2 f^2 + \alpha^2 f^4)}{(f_c^2 + f^2)^2 (f_{max}^2 + f^2) \{(f_g^2 - f^2)^2 + 4h_g^2 f_g^2 f^2\}} df \quad (10)$$

式(10)の n は加速度の場合は4、速度では2である。式(10)の無限積分の計算が煩雑になるので、留数定理による無限積分の公式¹²⁾を用いて値を求めた。

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df = \frac{(2\pi)^{n+1} f_c^4 f_{max}^2 M}{2\Delta} \quad (11)$$

ここで

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum_{i=1}^7 f_i \quad a_1 = 2f_c + 2h_g f_g + f_{max} \quad a_2 = 2h_g f_g f_c^2 + 2f_c f_g^2 + f_{max} f_c^2 + 4h_g f_g f_c f_{max} + f_{max} f_g^2 \\ a_3 &= f_c^2 + 4h_g f_g f_c + f_g^2 + 2f_c f_{max} + 2h_g f_g f_{max} \quad a_4 = -(f_c^2 f_g^2 + 2h_g f_{max} f_g f_c^2 + 2f_{max} f_c f_g^2) \quad a_5 = f_{max} f_g^2 f_c^2 \\ f_1 &= -f_{max}^2 f_c^4 f_g^4 \quad f_2 = -2a_1 a_4 f_{max} f_c^2 f_g^2 \quad f_3 = a_2 a_3 f_{max} f_c^2 f_g^2 \quad f_4 = a_2^2 a_4 \quad f_5 = -a_1^2 a_4^2 \\ f_6 &= -a_1 a_3^2 f_{max} f_c^2 f_g^2 \quad f_7 = -a_1 a_2 a_3 a_4 \end{aligned}$$

M は加速度では

$$M = -\beta^2 \left\{ \alpha^2 (a_4 a_5 + a_1 a_4^2 + a_3^2 a_5 + a_2 a_3 a_4) + 2\alpha f_g^2 (a_3 a_5 + a_2 a_4) + f_g^4 (a_5 + a_1 a_4) \right\} \quad (12)$$

M は速度では次のようになる。

$$M = -\beta^2 \left\{ \alpha^2 (a_3 a_5 + a_2 a_4) + 2\alpha f_g^2 (a_5 + a_1 a_4) + f_g^4 (a_2 - a_1 a_3) \right\} \quad (13)$$

なお、サイト増幅特性としてKanai⁵⁾の提案したスペクトルを用いた場合の M は加速度、速度で次のようになる⁴⁾。

$$M = -4h_g^2 (f_{max} f_c^2 f_g^2 a_3 + a_2 a_4) - f_g^2 (f_{max} f_c^2 f_g^2 + a_1 a_4) \quad (14)$$

$$M = -4h_g^2 (f_{max} f_c^2 f_g^2 + a_1 a_4) - f_g^2 (a_2 - a_1 a_3) \quad (15)$$

3.2 サイト増幅特性による地盤増幅度の違いとモーメントマグニチュードとの対応

ここでは3.1で導いた増幅度評価式を用いてサイト増幅特性の違いによる地盤増幅度の変化を調べるとともに、地盤増幅度の地震規模依存性を調べる。増幅度評価式のパラメータで f_c が地震規模と対応するものであるが、地震規模としてマグニチュードを使うことが多い。そこでモーメントマグニチュード M_w と地震モーメント M_0 、 f_c の関係式を用いて M_w と f_c の関係式を求め、 M_w から求めた f_c をパラメータとして、評価式から増幅度を求めることにより、 M_w と地盤増幅度の対応を見ることにする。以下の M_0 と f_c の関係式¹³⁾と M_w と M_0 (dyne・cm)の関係式¹⁴⁾を用いると、式(18)の M_w と f_c の関係式が得られる。

$$f_c = 10^{\{(23.38 - \log M_0)/3\}} \quad (16)$$

$$\log_{10} M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad (17)$$

$$f_c = 10^{\{(7.28 - 1.5M_w)/3\}} \quad (18)$$

増幅度評価式のパラメータの1つである f_{max} は地震規模に依存するかどうか意見が分かれているので、依存する場合と依存しない場合の両方のケースを考えて増幅度を評価した。 f_{max} が地震規模に依存する場合、次に示す地震モーメントとの関係式を用いて検討を行った¹⁵⁾。

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 \times M_0^{-0.12} \quad (19)$$

また、式(17)の M_w と M_0 の関係式¹⁴⁾により、 f_{max} と M_w は次式のように表すことができる。

$$f_{max} = 85.49 \times 10^{-0.18M_w} \quad (20)$$

異なるサイト増幅特性(図3)に対する最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度を M_w ごとに求めた結果を図4、5に示す。サイト増幅特性の h_g は0.1、 α と β は1である。また、 f_{max} は M_w に依存する場合と6Hz、

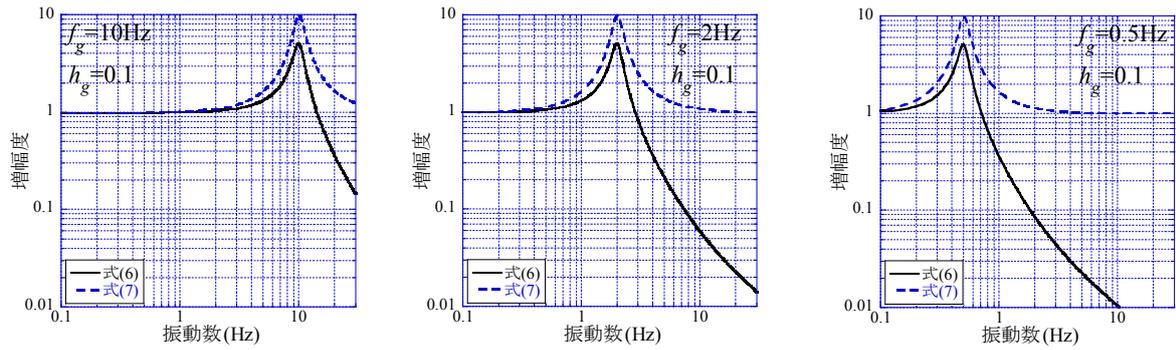


図3 地盤増幅度評価の際に設定したサイト増幅特性

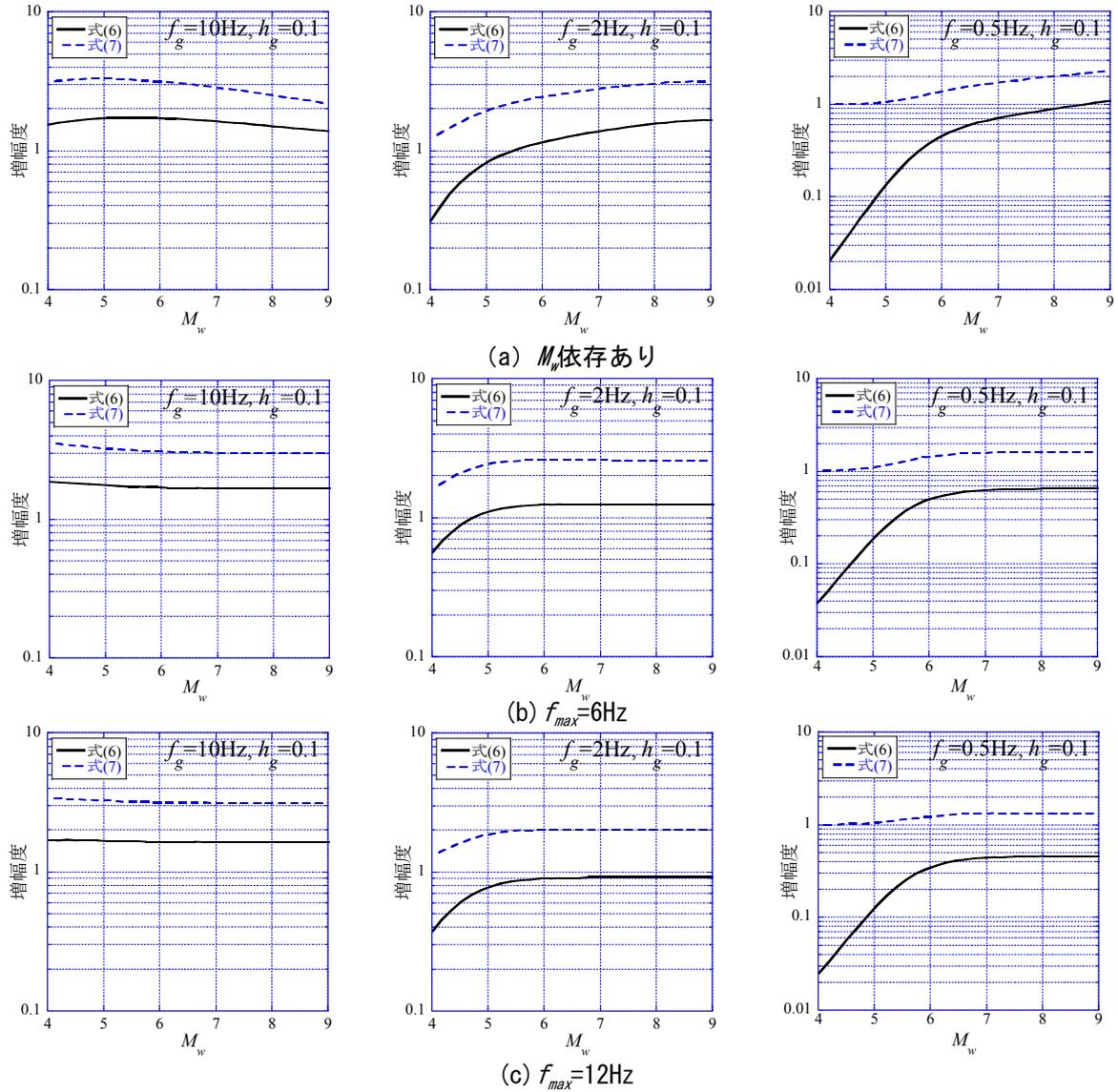


図4 M_w と評価式による最大地動加速速度の地盤増幅度の対応

12Hzの場合、それぞれについて地盤増幅度を計算した。

図4、5を見ると最大地動加速速度、最大地動速度ともにKanaiの式をサイト増幅特性とした場合の増幅度が澤田らに比べて小さくなっており、 f_g が小さくなるほど、その傾向が強くなっている。これは f_g が小さいほど、サイト増幅特性において増幅度が1を下回る振動数範囲が大きくなることによる。この特

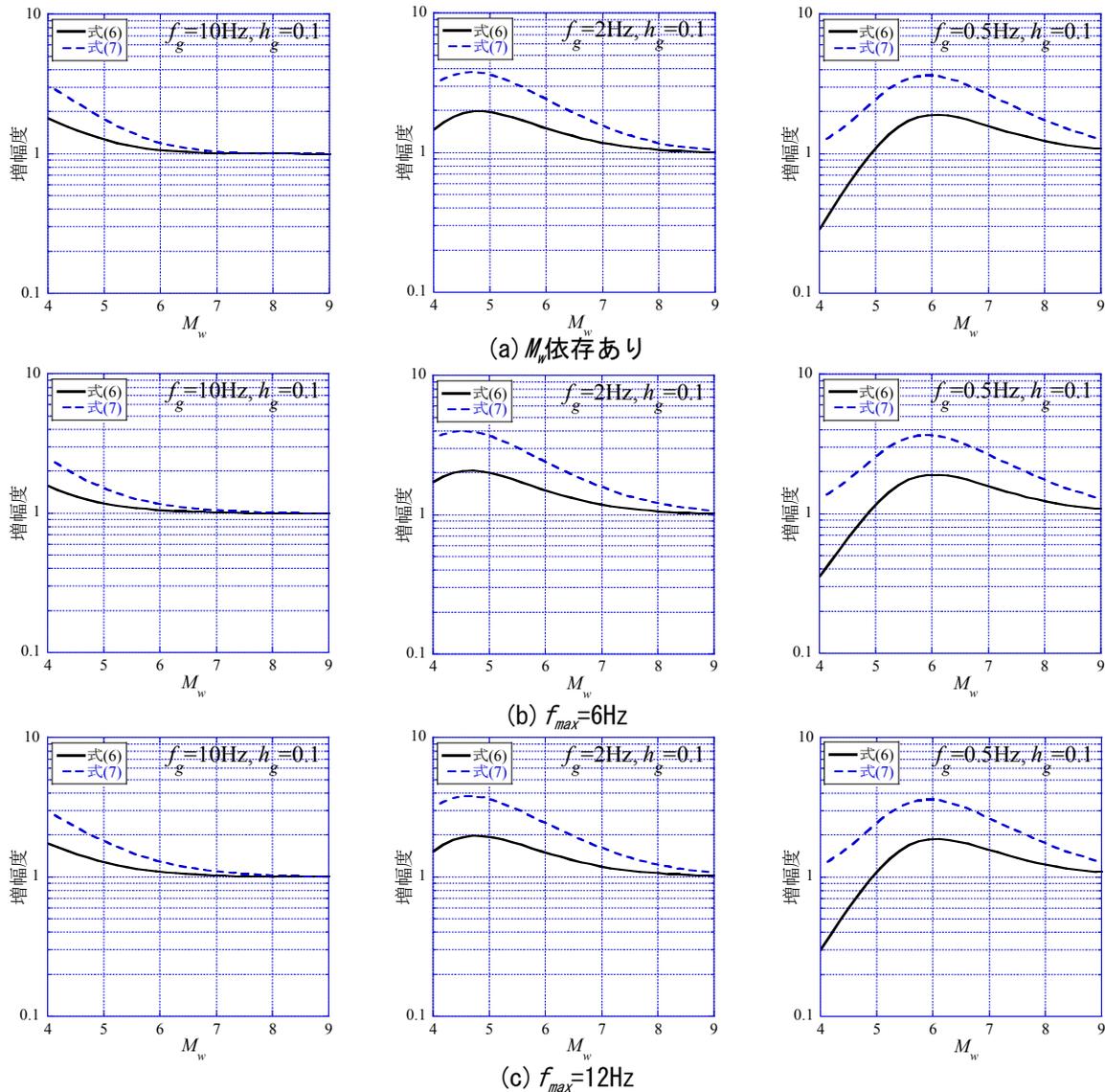


図5 M_w と評価式による最大地動速度の地盤増幅度の対応

徴は最大地動加速度の場合に顕著であり、 $M_w=4$ ではKanaiの式に対する増幅度は0.1を下回っている。このようにKanaiの式を用いた場合は増幅度が現実的な値に比べると著しく小さくなる場合があるが、澤田らの式を用いた場合はより実際の地盤増幅度に近い値となっていることが分かる。

続いて、 M_w による地盤増幅度の傾向を見ると、最大地動加速度は M_w による変化が小さいが、最大地動速度は変化が大きく、 f_g が小さくなるほど、増幅度が最大となる M_w が大きくなっている。 f_{max} による影響を見ると M_w が小さい場合は、その値によって増幅度が異なるが、 M_w が大きくなると増幅度への影響はほとんど見られない。

4. 提案式と観測記録による地盤増幅度の比較

2、3章では地震動スペクトルのパラメータと地盤増幅度の関係を導き、提案した増幅度評価式を用いて、サイト増幅特性による地盤増幅度の違いや M_w と地盤増幅度の対応を調べた。本章では提案する評価式による増幅度とKiK-netで得られた地震観測記録を用いて求めた増幅度を比較し、提案式の観測地盤増幅度への適用性を検証する。

本研究で提案した評価式は解放地震基盤面に対する地盤増幅度を求めるものであるため、増幅度の観測値との対応を調べる際には地表から地震基盤面までの地盤定数が明らかな観測点を解析対象と

表1 観測点情報と解析条件

観測点コード	観測点名	緯度(°)	経度(°)	M_w	期間	V_s (m/s)	データ数
AICH07	旭	35.2194	137.4039	4.0-8.7	1999/1/28-2011/3/15	3550	33
CHBH13	成田	35.8307	140.2980	4.0-7.9	2003/1/9-2011/12/22	2910	275
FKSH07	檜枝岐	37.0103	139.3755	4.0-8.7	2000/7/21-2011/11/28	3110	78
FKSH19	都路	37.4703	140.7227	4.0-7.9	2000/8/19-2011/12/22	3500	512
HRSH05	神辺	34.5566	133.4179	4.0-7.5	1999/10/30-2011/11/25	3120	26
HYGH11	山東	35.2925	134.9071	4.0-7.5	1999/3/16-2011/11/21	2660	25
IWTH03	岩泉	39.8020	141.6520	4.0-8.7	2000/7/30-2011/12/10	3310	219
MYGH03	唐桑	38.9207	141.6377	4.0-8.7	2001/4/3-2011/12/30	3020	272
MYGH04	東和	38.7860	141.3254	4.0-7.9	2000/9/17-2011/12/30	3200	339
MYGH11	河北	38.5158	141.3421	4.0-7.9	2001/2/5-2011/3/10	2720	189
MYGH12	志津川	38.6416	141.4428	4.0-7.0	2001/4/5-2011/3/10	3090	119
OKYH01	玉野	34.5070	133.8905	4.0-7.5	1999/7/16-2011/11/25	2840	34

する必要がある。そこで原子力安全基盤機構^{16), 17)}によって地震基盤相当の層までの地盤定数が求められているKiK-net観測点のうち、以下の条件を満たしている観測記録が20以上ある12地点を解析対象観測点とした。

- $M_w \geq 4.0$ の地震の記録
- 地盤の非線形化の影響を避けるために地表の最大加速度(3成分合成値)が 200cm/s^2 未満の記録
- 地表波の最大加速度(3成分合成値)が 5cm/s^2 以上の記録

M_w はF-net¹⁸⁾による値を用いた。表1に対象としたKiK-net観測点の記録の諸元を示す。表1の V_s は地中地震計が設置されている層でのS波速度である。表2に原子力安全基盤機構によって評価された各地震観測点の地盤定数を示す。減衰定数 h は h_0/f^n で表される。図6に表2に示す地盤定数を用いて重複反射理論によって求めた理論伝達関数と地表と地中の地震観測記録から求めたフーリエスペクトルの比を示す。理論伝達関数はSH波が鉛直入射した場合の値である。各観測点のスペクトル比は常用対数値の算術平均値と平均値に標準偏差を考慮した値である。フーリエスペクトルは地表と地中の地震波においてS波到達から10秒間を切り出して求めた。また、バンド幅0.1HzのParzen windowによってスペクトルを平滑化した。図6から多くの観測点で理論伝達関数はスペクトル比と概ね対応していることが分かる。

観測記録による最大地動加速度、速度の地盤増幅度はそれぞれ地表と基盤の加速度、あるいは速度時刻歴波形の水平2成分最大値の大きい方の値の比と定義した。速度時刻歴波形は加速度波形を用いフーリエ変換を利用した積分によって求めた。なお、積分の際には0.1~10Hzでフラットであり、両端にコサインテーパーを施したバンドパスフィルターをかけている。基盤の地震波形は地表の地震波形と地盤定数を用い、重複反射理論に基づく剥ぎ取り解析によって計算した。

提案した評価式と観測記録による増幅度を比較するにあたり、評価式の基本となる式(1)が今回対象とするデータにおいて適用できるか確認する。地表と剥ぎ取り解析によって求めた基盤の地震波形の最大振幅から最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度を求め、地表と基盤の波形から求めたフーリエスペクトルによって式(1)右辺を計算する。右辺の積分値は0.1~30Hzを対象に台形積分によって求めた。図7に今回対象とする全データに対して求めた式(1)の右辺(計算値)と左辺(観測値)の対応を示す。同図には計算値と観測値と常用対数の相関係数を合わせて示す。いずれも相関係数は0.9を超えており、両者の対応が良いことから、今回対象とするデータに対して式(1)を適用できるものと考えられる。

続いて、提案した評価式と観測記録から求めた地盤増幅度を比較する。評価式による地盤増幅度は、 f_c と f_{max} が M_w に依存するものとし、式(18)、(20)によって計算した。評価式の計算に必要なサイト増幅特性のパラメータ f_g 、 h_g 、 α 、 β は式(7)によるサイト増幅特性と理論増幅特性が最もフィットする場合の値とし、以下の関数が最小となるようにして求めた。

$$Error = \frac{1}{N} \sum \left\{ \log_{10} G_i(f) - \log_{10} G(f; f_g, h_g, \alpha, \beta) \right\}^2 \quad (21)$$

表2 対象観測点の地盤定数

(a) 旭

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	4.0	1.51	150	0.3	0.4
2	4.0	10.0	2.04	500	0.3	0.4
3	14.0	22.0	2.46	1600	0.3	0.6
4	36.0	60.0	2.57	2050	0.3	0.6
5	96.0	20.0	2.61	2330	0.3	0.6
6	116.0	85.0	2.61	3010	0.2	0.3
7	201.0	∞	2.61	3550	0.2	0.6

(b) 成田

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	1.2	1.8	63.1	0.099	0.166
2	1.2	4.8	1.8	146.1	0.099	0.166
3	6.0	19.0	1.8	274.5	0.306	0.605
4	25.0	10.5	1.8	274.5	0.306	0.605
5	35.5	29.5	1.8	430.4	0.009	0.032
6	65.0	178.9	1.8	430.4	0.009	0.032
7	243.9	56.1	1.8	812.6	0.002	0.000
8	300.0	570.0	1.8	812.6	0.002	0.000
9	870.0	229.9	2.3	1301.9	0.002	0.000
10	1099.9	200.1	2.8	2910	0.002	0.000
11	1300.0	∞	2.8	2910	0.002	0.000

(c) 檜枝岐

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	1.0	1.29	100	0.2	0.6
2	1.0	3.0	1.59	240	0.2	0.6
3	4.0	16.0	2.43	1100	0.2	0.6
4	20.0	23.0	2.58	2020	0.2	0.6
5	43.0	9.0	2.62	2870	0.2	0.6
6	52.0	13.0	2.62	2920	0.3	0.6
7	65.0	7.0	2.62	3030	0.3	0.6
8	72.0	26.0	2.62	3080	0.3	0.4
9	98.0	50.0	2.62	3100	0.3	0.4
10	148.0	52.0	2.62	3110	0.3	0.4
11	200.0	∞	2.62	3110	0.2	0.4

(d) 都路

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	2.0	1.3	100	0.10	0.3
2	2.0	6.0	1.5	230	0.10	0.5
3	8.0	12.0	1.5	310	0.05	0.6
4	20.0	20.0	2.1	850	0.10	0.6
5	40.0	60.0	2.6	2460	0.10	0.2
6	100.0	∞	2.6	3500	0.10	0.2

(e) 神辺

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	2.0	1.92	180	0.3	0.6
2	2.0	5.0	1.92	190	0.3	0.6
3	7.0	5.5	2.17	340	0.3	0.6
4	12.5	3.0	2.17	400	0.3	0.6
5	15.5	17.0	2.17	460	0.1	0.6
6	32.5	10.5	2.17	810	0.1	0.3
7	43.0	13.0	2.17	850	0.2	0.2
8	56.0	24.0	2.65	1560	0.2	0.6
9	80.0	13.0	2.65	2150	0.2	0.6
10	93.0	62.0	2.65	2500	0.1	0.6
11	155.0	45.0	2.71	2890	0.1	0.4
12	200.0	∞	2.71	3120	0.4	0.3

(f) 山東

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	1.6	1.58	230	0.05	0.2
2	1.6	21.9	1.58	230	0.05	0.2
3	23.5	27.5	2.29	750	0.05	0.5
4	51.0	19	2.56	2660	0.3	0.5
5	70.0	40	2.5	1530	0.2	0.5
6	110.0	90	2.71	2660	0.05	0.3
7	200.0	∞	2.71	2660	0.3	0.6

(g) 岩泉

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	5.0	1.39	230	0.2	0.5
2	5.0	17.0	2.17	1210	0.2	0.5
3	22.0	44.0	2.58	2240	0.2	0.1
4	66.0	3.0	2.58	2820	0.2	0.5
5	69.0	4.0	2.58	2990	0.2	0.5
6	73.0	20.2	2.58	3140	0.2	0.5
7	93.2	6.8	2.58	3240	0.3	0.5
8	100.0	∞	2.58	3310	0.4	0.2

(h) 唐桑

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	2.6	1.59	280	0.2	0.7
2	2.6	1.4	1.59	430	0.2	0.7
3	4.0	6.0	1.95	670	0.2	0.7
4	10.0	22.0	2.27	1430	0.2	0.3
5	32.0	8.0	2.60	2240	0.2	0.3
6	40.0	13.0	2.60	2380	0.2	0.4
7	53.0	15.0	2.60	2500	0.2	0.4
8	68.0	24.1	2.60	2580	0.3	0.4
9	92.1	3.1	2.60	2670	0.3	0.4
10	95.2	16.8	2.60	2850	0.3	0.4
11	112.0	5.0	2.60	2960	0.3	0.6
12	117.0	∞	2.60	3020	0.2	0.6

(i) 東和

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	1.0	1.43	190	0.1	0.5
2	1.0	3.0	1.43	230	0.1	0.5
3	4.0	6.0	2.57	930	0.1	0.5
4	10.0	26.0	2.57	1490	0.1	0.5
5	36.0	64.0	2.57	2400	0.3	0.2
6	100.0	∞	2.57	3200	0.3	0.2

(j) 河北

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	3.0	1.40	130	0.3	0.4
2	3.0	7.0	2.01	590	0.3	0.7
3	10.0	8.9	2.51	1540	0.2	0.5
4	18.9	4.3	2.51	1740	0.2	0.3
5	23.2	26.6	2.51	1820	0.1	0.3
6	49.8	70.2	2.58	2240	0.1	0.3
7	120.0	87.0	2.65	2720	0.1	0.5
8	207.0	∞	2.65	2720	0.3	0.5

(k) 志津川

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	6.0	1.57	157	0.3	0.6
2	6.0	8.0	2.27	910	0.3	0.6
3	14.0	20.0	2.47	1470	0.3	0.6
4	34.0	26.0	2.67	2210	0.3	0.6
5	60.0	43.0	2.67	2320	0.3	0.2
6	103.0	∞	2.67	3090	0.3	0.2

(l) 玉野

	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	h ₀	α
1	0.0	2.6	1.50	80	0.1	0.8
2	2.6	5.2	1.50	110	0.1	0.1
3	7.8	3.7	2.04	320	0.1	0.6
4	11.5	6.8	2.04	350	0.1	0.6
5	18.3	2.2	2.04	430	0.2	0.5
6	20.5	11.5	2.04	440	0.3	0.1
7	32.0	12.0	2.04	450	0.3	0.1
8	44.0	3.5	2.36	1330	0.2	0.6
9	47.5	13.5	2.36	1510	0.1	0.6
10	61.0	15.0	2.36	1640	0.2	0.6
11	76.0	8.0	2.57	1710	0.1	0.6
12	84.0	117.0	2.57	2560	0.1	0.5
13	201.0	∞	2.57	2840	0.5	0.2

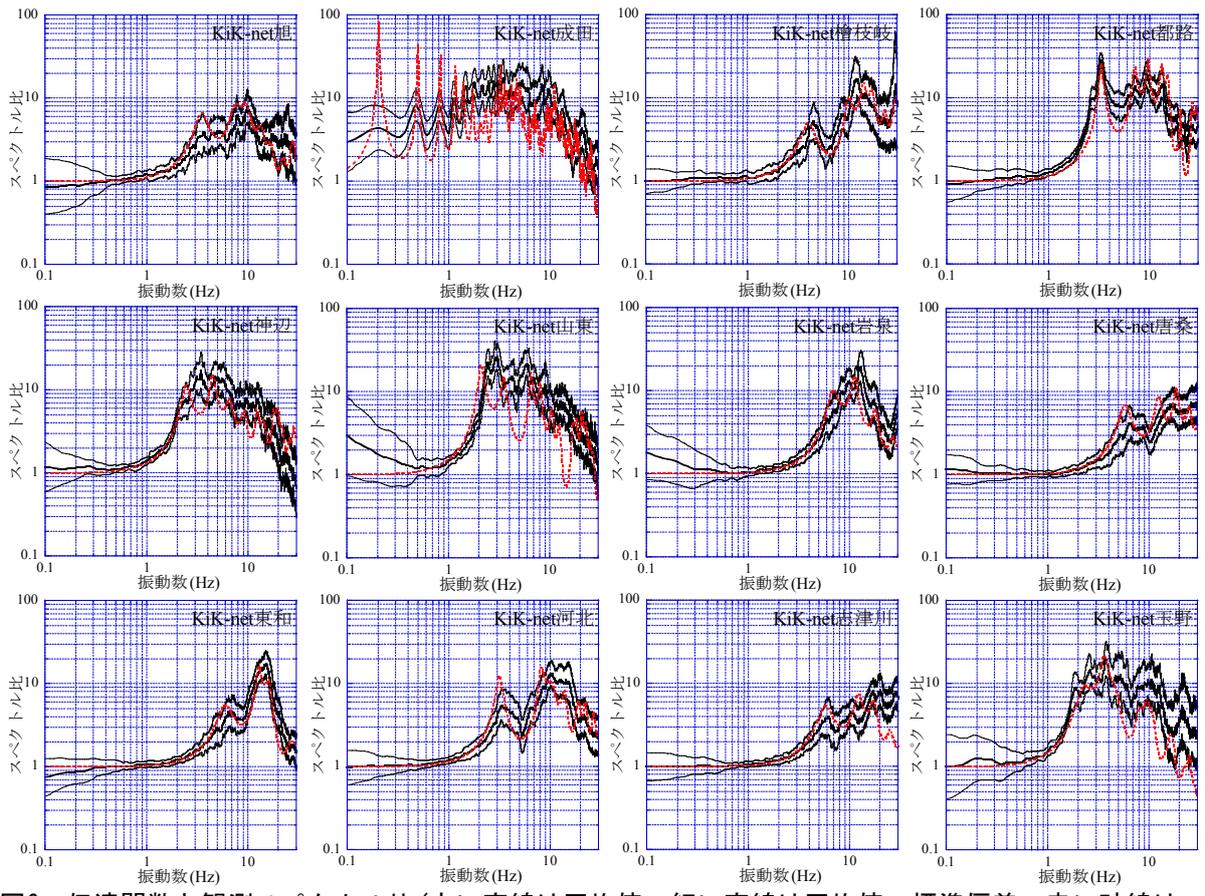
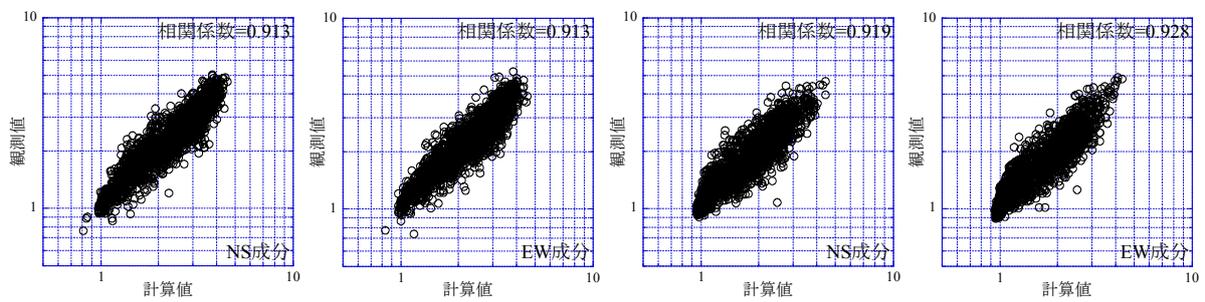


図6 伝達関数と観測スペクトル比(太い実線は平均値、細い実線は平均値±標準偏差、赤い破線は理論伝達関数)



(a) 加速度 (b) 速度

図7 解析対象データにおける式(1)の対応

$G(f)$ は理論増幅特性、 $G(f; f_g, h_g, \alpha, \beta)$ は式(7)によるサイト増幅特性、 N はデータ数(2450)である。 f の刻みは0.0122Hzである。式(21)は0.1~30Hzを計算対象とした。 $f_g=0.1\sim 20$ 、 $h_g=0.01\sim 1$ 、 $\alpha=0.01\sim 10$ 、 $\beta=1\sim 10$ の範囲で最適値を探索した。

図8に対象とした12観測点の理論増幅特性と式(7)によるサイト増幅特性、図9、10に観測記録による増幅度(観測値)と提案した評価式による増幅度(計算値)の対応を示す。また、表3に理論増幅特性を式(7)によってフィッティングさせて得られたサイト増幅特性のパラメータ、増幅度の観測値と計算値の常用対数値の相関係数を示す。図8を見るとKiK-net岩泉、東和、河北のように単一のピークからなる単純な増幅特性の場合は式(7)によるサイト増幅特性と対応が良いが、KiK-net都路、玉野などのように山が複数ある複雑な増幅特性の場合は式(7)による値と対応が悪く、表3のように式(21)のErrorが大きくなっている。

図9、10の地盤増幅度の観測値を見ると最大地動加速度の場合は M_w が5以上になると、観測点による違いは小さくなる。表3に示すように地盤増幅度の観測値と計算値の相関係数は最高で0.7であり、全体

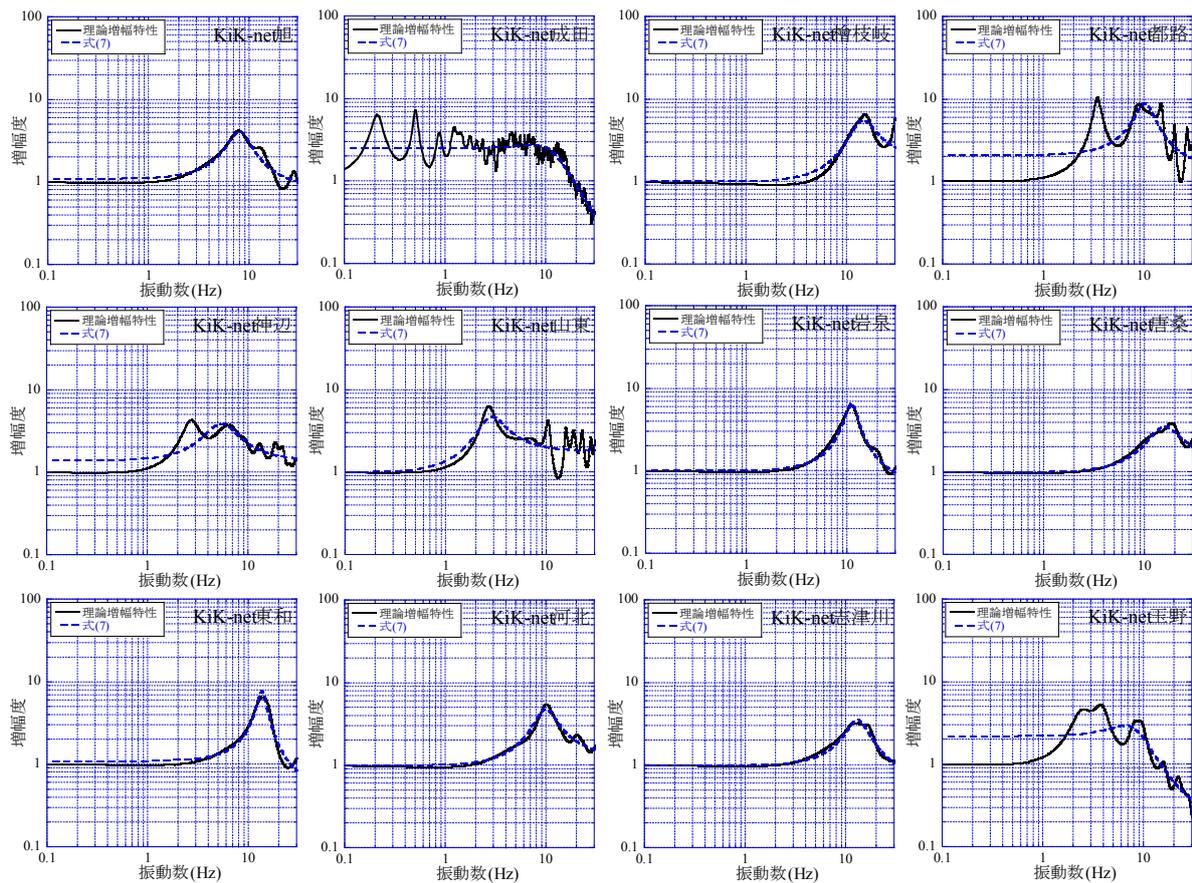


図8 理論増幅特性と式(7)によるサイト増幅特性の対応

的に相関係数が低い。この要因として最大地動加速度の地盤増幅度は M_w による変化や増幅度の変動が小さいことが考えられる。一方、最大地動速度は最大地動加速度に比べると M_w に対する地盤増幅度の変化が大きく、 M_w が大きくなるほど増幅度が1に近づいている。ただし、理論増幅特性の1次固有振動数が低くなると M_w が大きくなっても増幅度が1に漸近しなくなり、1次固有振動数が0.2Hzにある成田は増幅度が M_w によってあまり変化しない。相関係数は最大地動加速度に比べると高い傾向にあり、半数以上の観測点が0.6~0.8の範囲にある。

図9、10の地盤増幅度の観測値は M_w が同じでもかなりばらつきが見られる。そこで、観測値の平均的な傾向を調べるために、地盤増幅度の観測値の常用対数を M_w の多項式で表し、計算値との対応を調べた。以下に示す M_w の多項式を最少二乗法によって求めAIC(赤池情報量基準)¹⁹⁾を基準として、その値が最少となる場合の式を採用した。

$$\log_{10} F = \sum_{i=0}^n c_i M_w^i \quad (22)$$

ここで c_i は回帰係数、 n は M_w の次数に対応する。図11、12に M_w の多項式によって求めた増幅度(回帰値)と地盤増幅度の計算値の対応を示す。また、表3に回帰値と計算値の常用対数の相関係数を示す。図11を見ると最大地動加速度は回帰値と計算値が概ね対応しており、 M_w が大きくなるといずれの観測点も回帰値と計算値が2に使う傾向にある。最大地動速度の場合は回帰値と計算値がよく対応している観測点もあるが、*Error*が大きい観測点では両者の対応が良くない。表3の回帰値と計算値の相関係数を見ると、いずれも観測値と比較して計算値との相関係数が高くなっており、*Error*が0.01以下の場合、最大地動速度はほとんどで相関係数が1に近い値となっている。

上述のように*Error*が観測値と計算値、回帰値と計算値の相関係数に影響を及ぼしていると考えられるので、*Error*と相関係数の対応を見るとともに、 f_g と相関係数の対応を調べる。図13、14に*Error*や f_g と相関係数の対応を示す。まず、観測値と計算値の相関係数を見ると最大地動速度は*Error*が小さいと相関係数が高くなる傾向にあるが、最大地動加速度は*Error*が小さい場合でも相関係数が低い。ただし、回帰値と計算値の相関係数は*Error*が0.03以下であれば、ほとんど0.75以上になっている。 f_g と相関係数

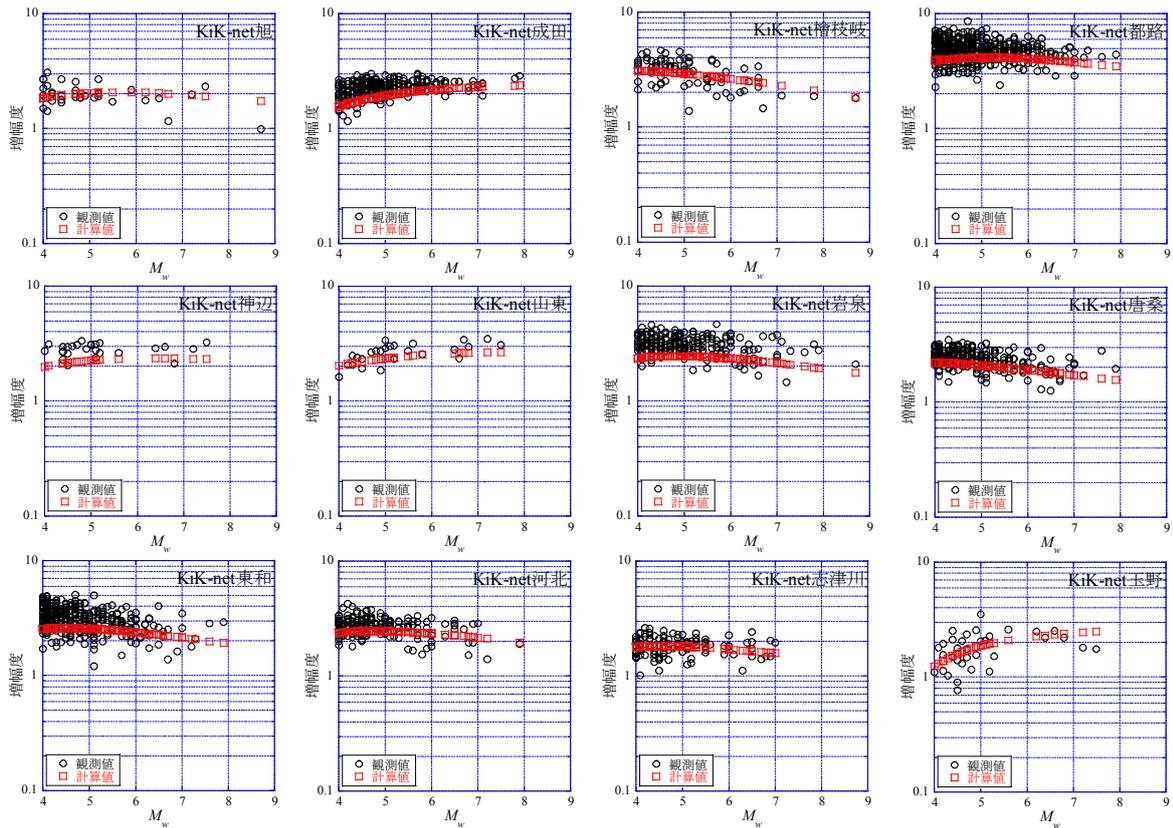


図9 最大地動加速度の地盤増幅度の観測値と計算値

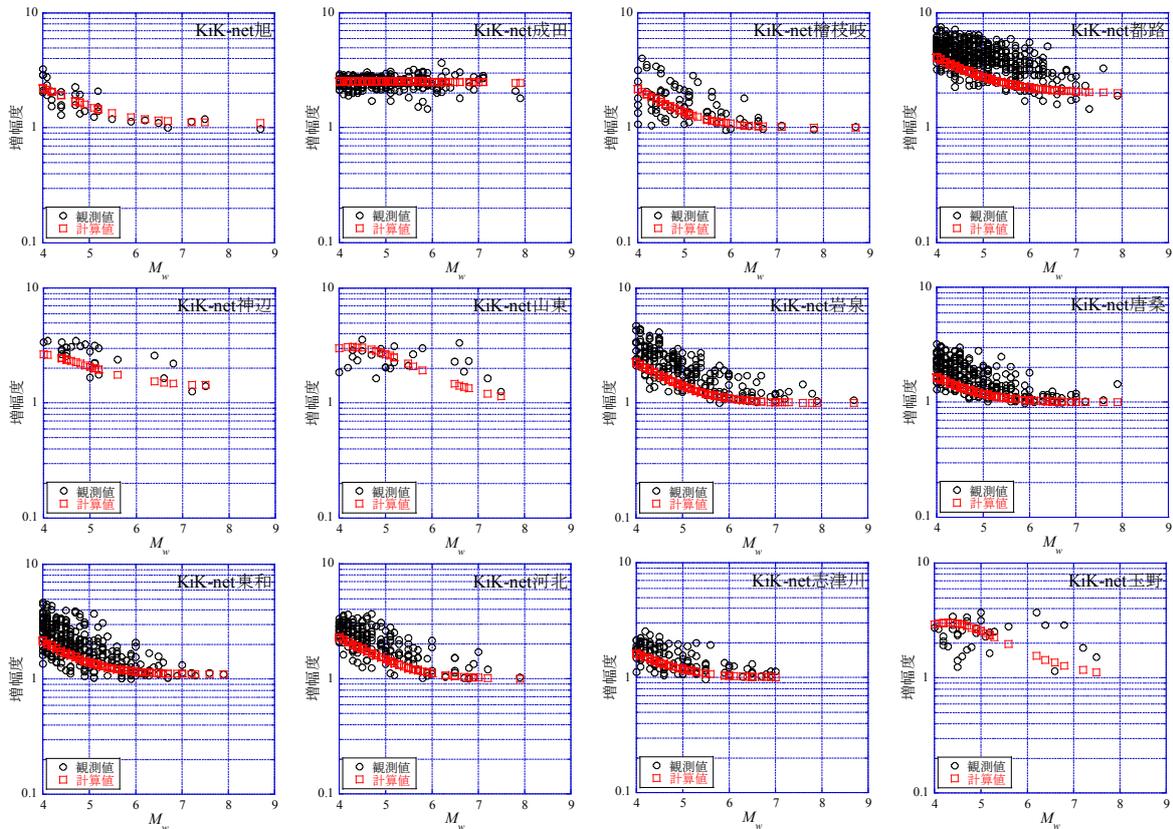


図10 最大地動速度の地盤増幅度の観測値と計算値

表3 サイト増幅特性のパラメータと地盤増幅度の観測値

観測点コード	観測点名	α	β	h_g	f_g	Error	相関係数(観測値)		相関係数(回帰値)	
							加速度	速度	加速度	速度
AICH07	旭	0.80	1.10	0.24	8.00	0.0061	0.089	0.817	0.127	0.998
CHBH13	成田	0.01	2.50	0.54	11.20	0.0081	0.366	0.088	0.970	0.751
FKSH07	檜枝岐	1.90	1.00	0.26	14.20	0.0077	0.547	0.510	0.985	0.998
FKSH19	都路	0.70	2.10	0.20	10.20	0.0407	0.003	0.545	0.024	0.933
HRSH05	神辺	1.00	1.40	0.36	5.40	0.0079	0.050	0.743	0.828	0.980
HYGH11	山東	1.80	1.00	0.30	2.80	0.0217	0.701	0.346	0.949	0.677
IWTH03	岩泉	0.70	1.00	0.14	10.80	0.0018	0.300	0.761	0.758	0.992
MYGH03	唐桑	1.40	1.00	0.34	15.40	0.0017	0.402	0.675	0.991	0.999
MYGH04	東和	0.40	1.10	0.10	13.60	0.0042	0.312	0.688	0.881	0.992
MYGH11	河北	1.30	1.00	0.24	9.80	0.0022	0.329	0.721	0.922	0.988
MYGH12	志津川	0.70	1.00	0.24	13.20	0.0013	0.102	0.636	0.845	0.995
OKYH01	玉野	0.09	2.20	0.44	8.00	0.0179	0.427	0.047	0.932	0.278

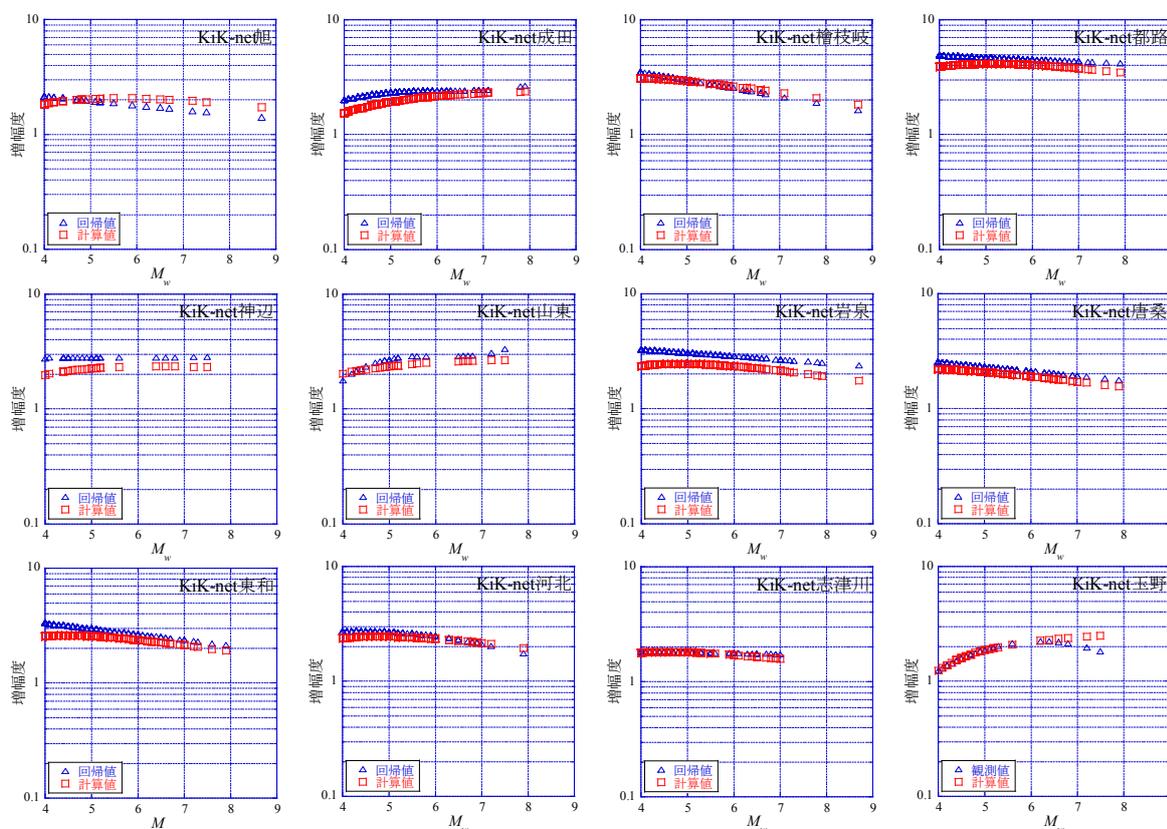


図11 最大地動加速度の地盤増幅度の回帰値と計算値

の対応を見ると、観測値と計算値の相関係数と f_g には一定の相関関係は見られないが、回帰値と計算値の相関係数は速度の場合、 f_g が10Hz以上の場合、相関係数が0.75以上という高い値になっている。これは f_g が高振動数の場合、理論増幅特性と式(7)のフィッティングが良く、その結果、相関係数が高くなっているものと考えられる。

以上の検討結果から多くの対象観測点で提案した評価式による地盤増幅度は観測記録から計算した地盤増幅度の M_w に対する傾向を概ね捉えており、最大地動速度の地盤増幅度は理論増幅特性と本研究で用いたサイト増幅特性の対応が良い場合、地盤増幅度の観測値や回帰値と計算値の対応が良いことが明らかになった。ただし、都路、玉野のように理論増幅特性と式(7)の対応が悪い観測点もあることから、更にサイト増幅特性の関数を改良し、観測値や回帰値と計算値の対応の向上を目指す。また、今回の検討では、高域遮断フィルターを固定して計算に使用したが、地震によってフィルターの形状が異なることが指摘されている²⁰⁾ことから、フィルター形状の違いを考慮した評価式を今後、検討す

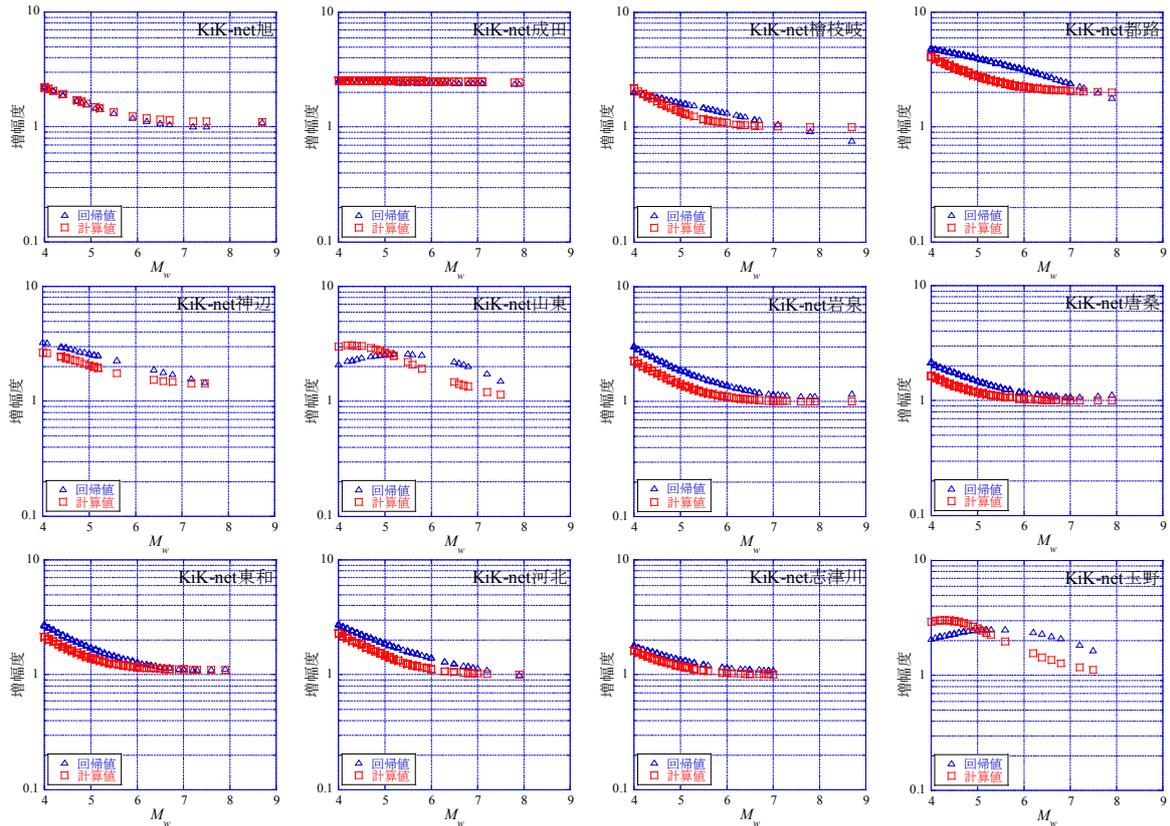


図12 最大地動速度の地盤増幅度の回帰値と計算値

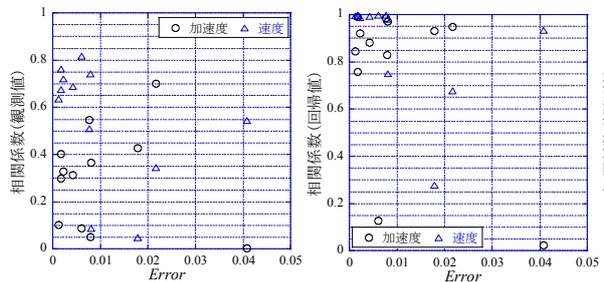


図13 Errorと相関係数の対応

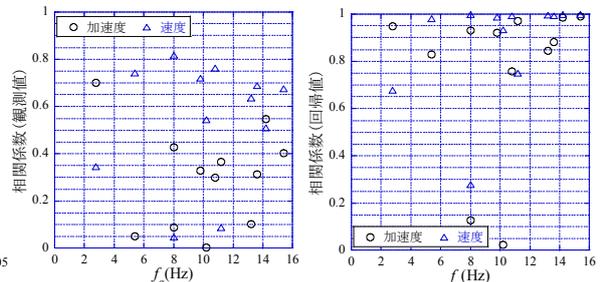


図14 f_g と相関係数の対応

る予定である。

5. まとめ

本論文では著者らが先の研究で求めた最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度の評価式を改良するとともに、評価式による増幅度と観測記録による値を比較し、提案した増幅度評価式の適用性を調べた。評価式の地盤増幅度をサイト増幅特性の改良前後で比較したところ、改良した地盤増幅度がより実際の値と近い結果となった。また、評価式によってモーメントマグニチュード M_w による地盤増幅度の傾向を調べたところ、最大地動加速度は M_w による変化が小さいが、最大地動速度は変化が大きく、サイト増幅特性のピーク振動数が小さくなるほど、地盤増幅度が最大となる M_w が大きくなることが明らかになった。

続いて、本研究で提案した地盤増幅度評価式の観測値への適用性を調べるために、地表から地震基盤までの地盤定数が明らかになっているKiK-net観測点を対象に観測記録と評価式による地盤増幅度を比較した。その結果、評価式による地盤増幅度は観測記録の傾向を捉えており、最大地動加速度の地盤増幅度は M_w による変化が小さく、最大地動速度は多くの観測点で M_w が大きくなるほど1に近づく傾

向が見られた。加速度の場合、地盤増幅度の M_w による変化が小さいために、増幅度の観測値と計算値の相関係数が全体的に低かったが、速度は地盤情報による理論増幅特性とサイト増幅特性の対応が良い場合、相関係数が良好であった。

本研究の検討では観測記録と評価式の地盤増幅度の比較において、 M_w が大きくなるほど、最大地動速度の地盤増幅度が1に近づくという興味深い解析結果が得られた。しかし、今回、解析対象とした地震観測点の半数以上は増幅特性のピーク振動数が10Hz以上にあり、対象観測点の地盤特性が偏っている。今後は成田以外にも軟弱層が厚く堆積している地震観測点を解析対象点に加えて同様の検討を進め、 M_w による地盤増幅度の傾向を調べる予定である。また、理論増幅特性とサイト増幅特性の関数の対応が悪かった観測点もあることから、更にサイト増幅特性の関数を改良するとともに、高域遮断フィルター形状の違いを考慮した増幅度評価式を検討する予定である。

謝 辞

本論文の作成に当たって、防災科学技術研究所KiK-netの地震波形を使用させて頂きました。査読者の方々には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) 片岡俊一、山本博昭：地震動記録に基づく青森県内の強震観測点のサイト増幅度、日本地震工学会論文集、Vol. 7、No. 2 (特集号)、2007、pp.110-129.
- 2) 紺野克昭、鈴木貴博、鎌田泰広、長尾 毅：横浜市高密度強震ネットワーク観測点における微動を用いた地盤の平均S波速度の推定、土木学会論文集A、Vol. 63、No. 4、2007、pp.639-654.
- 3) 翠川三郎、駒澤真人、三浦弘之：横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係、日本地震工学会論文集、Vol. 8、No. 3、2007、pp.19-30.
- 4) 西川隼人、宮島昌克：地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現と地震規模依存性の評価、土木学会地震工学論文集、Vol. 31、2010、pp.20-29.
- 5) Kanai, K. : Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bull. Earthquake Res. Int., University of Tokyo*, Vol.35, 1957, pp.309-325.
- 6) 小林喜久二、植竹富一、真下 貢、小林啓美：堆積地盤の速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョンによる震源・伝播経路・地盤減衰特性評価法、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002、pp.289-294.
- 7) 佐藤智美：Kik-net強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及びfmaxの評価、日本建築学会構造系論文集、Vol. 556、2002、pp.25-34.
- 8) 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、Vol. 4、No. 1、2004、pp.33-52.
- 9) 西川隼人、池本敏和、宮島昌克：関西地方の地震観測記録による自治体観測点を想定したサイト特性推定手法の検討、土木学会地震工学論文集、Vol. 30、2009、pp.118-127.
- 10) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1983, pp.1865-1894.
- 11) 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、pp.311-322.
- 12) Hubert, M. J., Nathaniel, B. N. and Ralph, S. P. : Theory of servomechanisms, Dover Publications Inc.; New edition, 1947, pp.369-370.
- 13) Takemura, M., T. Ikeura, and T. Uetake: 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, 1993, pp.1-19.
- 14) Hanks, T., and Kanamori, H. : A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. B5, 1979, pp.2348-2350.
- 15) Faccioli, E. : A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, *Geophysical Monograph*, 37, Maurice Ewing, AGU, Vol.6, 1986, pp.297-309.
- 16) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成16年度原子力発電立地調査に関する報告書(地震波伝ば特性評価法調査)、2005.
- 17) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成18年度原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 活断層及び地震動特性に関する調査・解析に係る報告書、2007.

- 18) 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、<http://www.fnet.bosai.go.jp/>
- 19) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, IEEE, *Trans. on Automatic Control*, AC-19, No.6, 1974, pp.716-723.
- 20) 鶴来雅人、香川敬生、入倉孝次郎 : 西日本で発生するスラブ内地震の観測記録に見られる高周波数領域におけるスペクトル低減特性に関する検討、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、2010、pp.3826-3833.

(受理 : 2012年3月6日)
(掲載決定 : 2012年7月23日)

IMPROVEMENT OF EVALUATION FORMULA FOR AMPLIFICATION FACTOR CONSIDERING DEPENDENCY OF EARTHQUAKE MAGNITUDE AND COMPARISON WITH OBSERVED VALUE

Hayato NISHIKAWA ¹⁾ and Masakatsu MIYAJIMA ²⁾

1) Member, Maizuru national college of technology, Dr. Eng.
2) Member, Professor, Kanazawa University, Dr. Eng.

ABSTRACT

We derived a relationship between source, site amplification spectrum and amplification factor, a formula to evaluate an amplification factor is proposed based on the relationship. In this study, we improve the formula by revising site amplification spectrum. A relationship between amplification factors calculated by the formula and moment magnitude M_w are examined, it found that amplification factors for PGV vary greatly according to M_w . The calculated amplification factors are compared with the observed value evaluated by multiple reflection theory. As a result, if site amplification spectrum is fit for theoretical spectrum, the calculated amplification factors for PGV are in good agreement with observed value.

Key Words: Amplification factor, PGA, PGV, Earthquake spectrum, Site amplification spectrum, Moment magnitude