



## 合成したサイト増幅特性による地盤増幅度評価式の検討

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、技術専門職員 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@se.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のパラメータから表現される最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度評価式を提案している。本論文では評価式で用いるサイト増幅特性を複数の関数を合成して表すことにより、複雑なサイト増幅特性に対しても利用できる地盤増幅度評価式を求めた。M6～7クラスの地震で得られた観測記録による地盤増幅度と提案式による地盤増幅度を比較した。提案式による地盤増幅度の計算値と観測値を比較したところ、最大地動速度の地盤増幅度の方が誤差が小さいことが明らかになった。

キーワード： 地盤増幅度、最大地動加速度、最大地動速度、震源スペクトル、サイト増幅特性

### 1. はじめに

地震動指標の地盤増幅度には地震規模依存性が指摘されて<sup>1)~7)</sup>おり、地震規模の影響を反映させた地盤増幅度評価が行われている<sup>2)~7)</sup>。これらの地盤増幅度評価の多くは観測記録に基づくものであるが、著者らは震源スペクトルやサイト増幅特性などの無限積分値による地盤増幅度評価式を提案している<sup>7)</sup>。著者らの提案式は震源スペクトルのコーナー振動数、高域遮断振動数やサイト増幅特性のパラメータを与えることにより、解析的に地盤増幅度を評価でき、地盤増幅度へのコーナー振動数や高域遮断振動数の影響を定量的に調べることができる。また、マグニチュードとコーナー振動数の関係式を利用することにより、地震規模が地盤増幅度に及ぼす影響を評価することが可能である。しかし、著者らの提案した地盤増幅度評価式で用いるサイト増幅特性に対応する関数は単一のピークを有するものであるため、ピークが複数ある複雑なサイト増幅特性に対しては、地盤増幅度評価式を十分に適用できない可能性がある。ピークを複数有するサイト増幅特性に適用可能な地盤増幅度評価式を求めることが出来れば、現実的なサイト増幅特性に対応した地盤増幅度の評価が可能になるだけでなく、どのような振動数のサイト増幅特性が地盤増幅度へ影響を及ぼすかを、詳しく調べる上で有用なものと考えられる。

本研究ではピークを複数有するサイト増幅特性にも適用できること、サイト増幅特性の地盤増幅度への影響を詳しく調べることを目的として、サイト増幅特性に対応する関数を改良した地盤増幅度評価式を求めた。改良した関数は単一のピークを有する関数などを合成して、複数のピークを有するサイト増幅特性を表現するものであり、サイト増幅特性を構成する関数、それぞれに対して得られる地盤増幅度を合成して、複雑なサイト増幅特性に対する地盤増幅度を求めることが可能である。これにより、地盤

増幅度への影響が大きいサイト増幅特性の振動数帯を地震規模に応じて調べることができる。

また、新たに提案した地盤増幅度評価式と観測記録による地盤増幅度の対応を検証するために、M6～7クラスの9地震で得られた地震観測記録から求めた地盤増幅度と評価式による地盤増幅度を比較した。この際、過去の著者らの研究<sup>7)</sup>で十分に対象としなかった、堆積層の厚い地震観測点も検討対象とした。

## 2. 地盤増幅度の評価式

### 2.1 評価式

著者らは、パーセバルの定理と極値理論に基づき、ある地点の地表面とS波速度=2～3km/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<sup>6), 7)</sup>。

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

ここに $F$ 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、 $G(f)$ は対象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<sup>8)</sup>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。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た。 $R$ 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波伝播速度であり、 $S(f)$ を震源スペクトルと呼ぶことにする。

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 $M_0$ は同一であり、 $C$ 、 $R$ が同じ値と仮定すると、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 $Q_0 f^\gamma$  ( $Q_0$ は定数)と表わされるが、ここでは $\gamma=1$ 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。

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

震源スペクトルとして次の $\omega^{-2}$ 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た。

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

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

$S_A(f)$ 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 $\omega^{-2}$ 則モデル、第2項が高域遮断フィルターに対応する。 $f_{max}$ は高域遮断振動数である。

### 2.2 サイト増幅特性関数の改良

著者らが先に提案した地盤増幅度評価式に用いたサイト増幅特性に対応する関数は単一のピークを持つものであった。しかし、現実のサイト増幅特性はピークが複数のものが多いため、このような場合、提案式では地盤増幅度を適切に評価することが難しいものと考えられる。

そこで本研究では単一のピークを有する関数などを合成して複雑なサイト増幅特性を表現し、合成したサイト増幅特性に対応する地盤増幅度評価式を求める。合成したサイト増幅特性は次式で表されるものとする。

$$G(f) = \sqrt{G_0^2(f) + \sum_{i=1}^{N_g} G_i^2(f)} \quad (6)$$

$G_0(f)$  は定数 $\beta_1$ あるいは式(7)の低振動数で一定値に収束するローパスフィルター型の関数で表されるものであり、 $G_i(f)$ は式(8)の単一のピークを有する関数である。 $N_g$ は $G_i(f)$ の総数である。

$$G_0(f) = \sqrt{\frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2}} \quad (7)$$

$\beta_2$ は低振動数での収束値に対応する定数であり、 $f_0$ は高域遮断振動数である。

$$G_i(f) = \sqrt{\frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2}} \quad (8)$$

ここに $\alpha_i$ は振幅を調整するための係数、 $f_i$ はサイト増幅特性のピーク振動数、 $h_i$ はピーク形状を規定する係数である。

本研究で地盤増幅度の評価対象とする地震観測点では既往研究の同定解析で地盤情報が求められていることから、地盤情報から計算した理論伝達関数をサイト増幅特性と定義し、この伝達関수에式(6)をフィッティングさせた。理論伝達関数は鉛直入射を仮定して求めた2E入力に対するSH波の伝達関数である。式(9)が最小となる式(6)のパラメータ $f_0$ 、 $f_i$ 、 $h_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $N_g$ を求めることによりサイト増幅特性のフィッティングを行った。

$$Error = \frac{1}{N} \sum \{G_i(f) - G(f; f_0, f_i, h_i, \alpha_i, \beta_1, \beta_2, N_g)\}^2 \quad (9)$$

$G_i(f)$ はSH波の理論伝達関数であり、 $N$ は対象とする $G_i(f)$ のデータ数である。式(6)の $G_i(f)$ の総数 $N_g$ を1から4まで変化させ、粒子群最適化法<sup>9)</sup>により $Error$ の値が最小となる式(6)のパラメータを求めた。ただし、 $N_g$ を増やしても $Error$ の値に大きな変化がない場合は $N_g$ が少ない方のパラメータを用いた。

粒子群最適化法はメタヒューリスティクスの一つであり、動物などに見られる群行動を探索手法に応用したものである。最適化問題の解を表現した探索空間内にある複数の個体(粒子)はそれぞれ位置ベクトルを有しており、これが現時点での解を表現している。各粒子は現在の位置から位置ベクトルを更新しながら、最適解に近づくように探索を進める。位置ベクトルの更新に当たり、自身がこれまで発見した最良解とともに、集団内の全粒子のこれまでの最良解の情報を用いる。ある時刻 $t$ と $t+1$ の粒子の位置ベクトルは以下の式で表される。

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (10)$$

ここに $\mathbf{x}$ は位置ベクトル、 $\mathbf{v}$ は速度ベクトルである。 $\mathbf{v}$ は粒子自身と集団全体のこれまでの最良解をもとに次のように表される。

$$\mathbf{v}(t) = w\mathbf{v}(t-1) + r_1 c_1 (\mathbf{p} - \mathbf{x}(t)) + r_2 c_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}(t)) \quad (11)$$

ここに $w$ は前回の速度ベクトルにかかる係数、 $r_1$ 、 $r_2$ は0~1の範囲の乱数、 $c_1$ 、 $c_2$ はそれぞれの項にかかる係数、 $\mathbf{p}$ は自身が発見した最良解の位置ベクトル、 $\mathbf{g}$ は集団全体の最良解の位置ベクトルである。

最適解の探索は全粒子が式(10)、(11)をもとに、指定した最大反復回数まで位置ベクトルの更新を繰り返し、全粒子がこれまでに発見した最良解を最適解として計算を終了する。本研究ではMishraによる粒子群最適化法のプログラム<sup>10)</sup>を用い、式(9)が最少となるパラメータを探索した。

図1に地盤情報が存在し地盤応答解析が可能な3観測点の伝達関数 $G_i(f)$ と $G(f)$ のフィッティング結

果、図2に3観測点それぞれの $G_0(f)$ と $G_i(f)$ を示す。フィッティングの対象とした伝達関数の計算には木下・大池<sup>11)</sup>や原子力安全基盤機構（現 原子力規制庁）による地盤情報<sup>12), 13)</sup>を用いた。表1にフィッティングで得られた式(6)のパラメータを他の対象観測点とともに示す。他の対象観測点の地盤情報の引用文献などは後ほど述べる。図1から式(6)によって伝達関数の特徴を表現できていることが分かる。

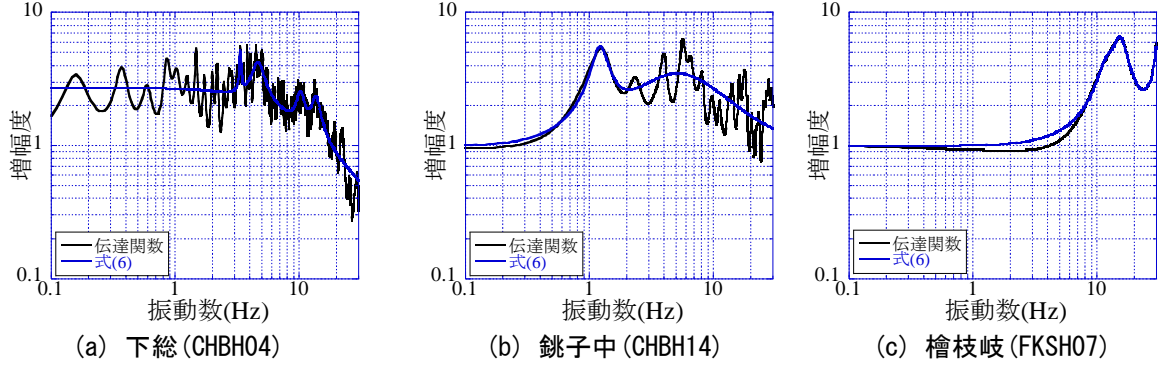


図1 SH波の理論伝達関数と式(6)

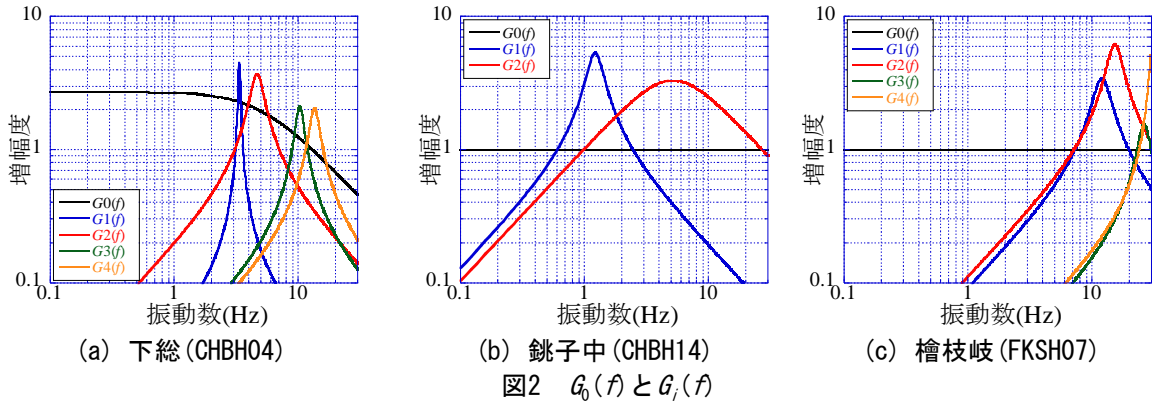


図2  $G_0(f)$ と $G_i(f)$

### 2.3 新サイト増幅特性を用いた地盤増幅度評価式

本節では式(6)で定義される新しいサイト増幅特性を用いた場合の地盤増幅度評価式を導く。まず、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<sup>7)</sup>。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c)^4 f^4}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df = \frac{(2\pi)^5 f_c^4 f_{max}^2 (f_c + 2f_{max})}{4(f_c + f_{max})^2} \quad (12)$$

また、速度の場合は以下のようなになる<sup>7)</sup>。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c^2)^2 f^2}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df = \frac{(2\pi)^3 f_c^3 f_{max}^2}{4(f_c + f_{max})^2} \quad (13)$$

$G(f)$ が式(6)~(8)で与えられる場合の式(3)右辺分子の無限積分を以下のように展開する。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) G^2(f) df &= \int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \{G_0^2(f) + G_1^2(f) + \dots + G_{N_g}^2(f)\} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ S^2(f) \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} + S^2(f) \frac{4\alpha_1 h_1^2 f_1^2 f^2}{(f_1^2 - f^2)^2 + 4h_1^2 f_1^2 f^2} + \dots + S^2(f) \frac{4\alpha_{N_g} h_{N_g}^2 f_{N_g}^2 f^2}{(f_{N_g}^2 - f^2)^2 + 4h_{N_g}^2 f_{N_g}^2 f^2} \right\} df \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} df + \int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{4\alpha_1 h_1^2 f_1^2 f^2}{(f_1^2 - f^2)^2 + 4h_1^2 f_1^2 f^2} df + \dots + \int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{4\alpha_{N_g} h_{N_g}^2 f_{N_g}^2 f^2}{(f_{N_g}^2 - f^2)^2 + 4h_{N_g}^2 f_{N_g}^2 f^2} df \end{aligned} \quad (14)$$

表1 式(6)のパラメータの最適値

観測点名	コード	$\beta_1$	$\beta_2$	$f_0$	$\alpha_1$	$h_1$	$f_1$	$\alpha_2$	$h_2$	$f_2$	$\alpha_3$	$h_3$	$f_3$	$\alpha_4$	$h_4$	$f_4$	$N_g$
下総	CHBH04	0	7.47	5.10	20.93	0.02	3.33	13.82	0.12	4.63	4.48	0.08	10.23	4.19	0.09	13.44	4
成田	CHBH13	0	8.57	2.62	10.74	0.09	1.31	7.91	0.18	4.56	5.48	0.14	7.03	8.53	0.15	12.99	4
銚子中	CHBH14	1	0	0	28.82	0.15	1.21	11.05	0.80	5.13	0	0	0	0	0	0	2
北九州	FKOH01	0	1.00	1.73	25.48	0.27	6.66	23.35	0.05	13.80	0	0	0	0	0	0	2
西会津	FKSH01	1	0	0	54.95	0.11	9.27	6.82	0.16	14.00	15.26	0.15	18.16	0	0	0	3
檜枝岐	FKSH07	1	0	0	11.90	0.16	11.93	38.98	0.14	15.16	2.39	0.11	26.19	26.72	0.05	30.00	4
都路	FKSH19	1	0	0	113.00	0.07	3.42	69.68	0.21	9.56	69.23	0.04	14.52	0	0	0	3
羽島	GIFH05	0	9.99	3.86	26.77	0.12	1.95	28.78	0.11	2.66	12.21	0.06	5.01	5.19	0.06	9.67	4
神辺	HRSH05	0	1.00	25.64	16.64	0.16	2.71	12.07	0.32	6.34	3.73	0.12	19.43	0	0	0	3
波賀	HYGH03	1	0	0	14.19	0.22	8.56	3.16	0.12	12.52	9.30	0.10	15.66	12.39	0.07	18.27	4
上郡	HYGH05	1	0	0	23.49	0.15	7.84	5.68	0.21	17.05	11.41	0.16	27.49	0	0	0	3
夢前	HYGH07	0	1.00	10.86	6.35	0.31	8.04	5.22	0.15	14.99	0	0	0	0	0	0	2
山東	HYGH11	1	0	0	29.45	0.24	2.80	14.16	0.04	10.03	5.71	0.20	19.38	0	0	0	3
新宮	HYGH12	1	0	0	5.41	0.32	6.19	8.35	0.12	9.84	3.03	0.13	28.49	0	0	0	3
岩瀬	IBRH11	1	0	0	225.15	0.05	2.53	79.68	0.04	5.34	57.02	0.03	9.77	5.86	0.57	14.50	4
霞ヶ浦	IBRH17	0	5.02	2.45	16.88	0.40	4.62	102.77	0.05	8.26	60.44	0.02	8.78	20.83	0.06	24.21	4
岩泉	IWTH03	1	0	0	2.92	0.18	7.82	8.00	0.11	9.50	24.68	0.10	10.85	15.27	0.10	11.71	4
川井北	IWTH17	1	0	0	3.82	0.34	15.61	10.77	0.12	22.37	31.38	0.06	24.63	22.04	0.04	26.04	4
清川	KNGH21	1	0	0	14.21	0.10	7.06	22.67	0.06	8.23	16.71	0.06	9.29	31.16	0.04	24.87	4
唐桑	MYGH03	1	0	0	5.49	0.33	12.13	3.09	0.19	16.04	10.88	0.13	18.79	3.62	0.06	30.00	4
東和	MYGH04	1	0	0	6.93	0.15	10.59	29.15	0.07	12.73	32.00	0.05	14.12	21.70	0.05	15.49	4
河北	MYGH11	1	0	0	1.00	0.30	5.00	28.44	0.15	9.98	2.66	0.10	12.10	3.24	0.13	20.75	4
志津川	MYGH12	1	0	0	2.08	0.29	8.50	7.90	0.15	11.83	4.92	0.10	14.56	5.45	0.07	16.88	4
糸魚川	NIGH16	1	0	0	13.41	0.20	4.07	10.14	0.16	9.01	2.96	0.12	21.32	0	0	0	3
安岐	OITH03	0	1.00	5.06	5.51	1.00	2.18	18.47	0.16	8.83	10.88	0.06	10.53	5.45	0.09	28.18	4
玉野	OKYH01	0	1.00	1.06	19.43	0.21	2.48	10.58	0.13	3.35	19.61	0.10	3.86	12.50	0.13	8.70	4
建部	OKYH05	0	1.00	7.71	8.66	0.23	9.54	3.01	0.45	16.32	0	0	0	0	0	0	2
岩槻	SITH01	0	7.82	13.59	35.03	0.02	1.60	62.76	0.02	2.16	24.90	0.11	2.64	4.17	0.05	7.35	4
伯太	SMNH01	1	0	0	37.73	0.18	5.07	13.86	0.31	9.81	11.44	0.13	15.16	11.46	0.03	28.51	4
大樹	TKCH08	1	0	0	24.56	0.16	1.94	38.34	0.18	8.20	18.22	0.05	26.11	0	0	0	3
府中	TKYH02	0	6.99	5.44	18.45	0.08	6.20	10.25	0.04	8.55	16.65	0.03	9.23	8.58	0.02	11.61	4
防府	YMGH01	0	1.00	14.06	1.01	0.32	6.31	2.14	0.13	16.56	0	0	0	0	0	0	2
美東	YMGH12	1	0	0	19.26	0.17	15.73	9.97	0.11	23.24	0	0	0	0	0	0	2
箒平		1	0	0	1.18	0.33	26.71	6.21	0.13	32.04	8.84	0.13	36.62	0	0	0	3
女川(線形)		0	1.00	17.73	2.57	0.19	7.24	4.68	0.12	9.02	1.54	0.10	12.68	3.97	0.10	10.63	4
女川(非線形)		0	1.00	10.68	1.00	0.15	4.44	2.20	0.13	5.31	3.16	0.19	6.12	1.00	0.09	16.45	4

なお、 $G_0(f)=\beta_1$ の場合の第1項は $\beta_1$ の2乗に式(12)か式(13)を乗じたものとなる。

上式の第1項の無限積分値を文献14に基づき求めると、加速度の場合、次のようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^4 f_c^4 f_{max}^2}{(f_c^2 + f^2)^2 (f_{max}^2 + f^2)} \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} df = -\frac{(2\pi)^5 \beta_2 f_c^4 f_{max}^2 f_0^2 A_3}{2(A_3^2 + A_1^2 A_4 + A_1 A_2 A_3)} \quad (15)$$

速度の場合は以下の値となる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^2 f_c^4 f_{max}^2}{(f_c^2 + f^2)^2 (f_{max}^2 + f^2)} \frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2} df = -\frac{(2\pi)^3 \beta_2 f_c^4 f_{max}^2 f_0^2 A_1}{2(A_3^2 + A_1^2 A_4 + A_1 A_2 A_3)} \quad (16)$$

$$A_1 = f_{max} + f_0 + 2f_c \quad A_2 = -\{f_{max} f_0 + 2f_c (f_{max} + f_0) + f_c^2\} \quad A_3 = 2f_c f_{max} f_0 + f_c^2 (f_{max} + f_0) \quad A_4 = f_c^2 f_{max} f_0$$

式(14)の第2項以降の積分値は以下のようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) \frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2} df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^n f_c^4 f_{max}^2}{(f_c^2 + f^2)^2 (f_{max}^2 + f^2)} \frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2} df = \frac{(2\pi)^{n+1} f_c^4 f_{max}^2 M}{2\Delta} \quad (17)$$

式(17)分子の $n$ は加速度では4、速度では2である。

式(17)分子の $M$ は加速度の場合は式(18)、速度の場合は式(19)、分母の $\Delta$ は式(20)で与えられる。

$$M = -4\alpha_i h_i^2 f_i^2 (a_3 a_5 + a_2 a_4) \quad (18)$$

$$M = -4\alpha_i h_i^2 f_i^2 (a_5 + a_1 a_4) \quad (19)$$

$$\Delta = \sum_{j=1}^7 \delta_j \quad (20)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 2f_c + 2h_i f_i + f_{max} & a_2 &= 2h_i f_i f_c^2 + 2f_c f_i^2 + f_{max} f_c^2 + 4h_i f_i f_c f_{max} + f_{max} f_i^2 \\ a_3 &= f_c^2 + 4h_i f_i f_c + f_i^2 + 2f_c f_{max} + 2h_i f_i f_{max} & a_4 &= -(f_c^2 f_i^2 + 2h_i f_{max} f_i f_c^2 + 2f_{max} f_c f_i^2) & a_5 &= f_{max} f_i^2 f_c^2 \\ \delta_1 &= -f_{max}^2 f_c^4 f_i^4 & \delta_2 &= -2a_1 a_4 f_{max} f_c^2 f_i^2 & \delta_3 &= a_2 a_3 f_{max} f_c^2 f_i^2 & \delta_4 &= a_2^2 a_4 & \delta_5 &= -a_1^2 a_4^2 \\ \delta_6 &= -a_1 a_3^2 f_{max} f_c^2 f_i^2 & \delta_7 &= -a_1 a_2 a_3 a_4 \end{aligned}$$

## 2.4 サイト増幅特性を構成する関数の地盤増幅度への影響

図3、図4に図1、図2に示した3観測点の $G_0(f)$ 、 $G_i(f)$ 、これらを合成して求めた $G(f)$ に対する最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度と $M_w$ の関係を示す。図中凡例の $F_{A0}$ と $F_{V0}$ は $G_0(f)$ 、 $F_{Ai}$ と $F_{Vi}$ は $G_i(f)$ に対する地盤増幅度に対応する。地盤増幅度の計算に必要な式(6)のパラメータは表1の値を用い、コーナー振動数 $f_c$ は式(21)、 $f_{max}$ は式(22)を用い地震モーメントから計算した。 $M_w$ は式(23)によって地震モーメントから求めた。

$$f_c = 10^{(23.38 - \log M_0)/3} \quad (21)$$

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 \times M_0^{-0.12} \quad (22)$$

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad (23)$$

まず、最大地動加速度を見ると、 $G_i(f)$ のピークが10Hz以上であるKiK-net下総(CHBH04)の $F_{A3}$ と $F_{A4}$ 、檜枝岐(FKSH07)の $F_{A1} \sim F_{A4}$ は $M_w$ が大きくなると増幅度が低下する傾向にある。一方、 $G_i(f)$ のピークが1～6Hzの下総や銚子中(CHBH14)の $F_{A1}$ 、 $F_{A2}$ 、銚子中の $G_0(f)$ に対応する $F_{A0}$ は $M_w$ が大きいかほど増幅度が大きくなる傾向が見られる。最大地動速度を見ると、下総(CHBH04)、檜枝岐(FKSH07)では $F_{V1}$ 、 $F_{V2}$ が $F_{V3}$ 、 $F_{V4}$ よりも、CHBH14は $F_{V1}$ が $F_{V2}$ よりも大きい傾向にあり、 $M_w$ が大きくなると下総(CHBH04)と檜枝岐(FKSH07)は $F_{V0}$ が $F_V$ とほぼ等しくなっている。 $F_{V0}$ は $M_w$ が大きくなるとサイト増幅特性の低振動数側の増幅度に漸近することから、規模の大きい地震では低振動数のサイト増幅特性が $F_V$ に大きく影響を及ぼすことが分かる。

以上のようにサイト増幅特性を構成する関数それぞれに対応する地盤増幅度を合成して、サイト増幅特性全体に対する地盤増幅度を求めることにより、構成する関数の地盤増幅度への寄与を調べることができ、どのような振動数のサイト増幅特性が地盤増幅度に影響を及ぼすかを地震規模に応じて評価できる。

## 3. 地震観測記録と評価式による地盤増幅度の比較

### 3.1 解析対象地震の諸元

本研究で提案する地盤増幅度評価式の精度を検証するために、強震動予測で対象となるM6～7クラスの地震を対象に評価式による地盤増幅度と地震観測記録から計算した地盤増幅度を比較する。図5に地盤増幅度の評価対象とした地震の震央分布、表2に地震諸元や地盤増幅度評価式で用いる震源スペクトルのコーナー振動数 $f_c$ 、 $f_{max}$ を示す。コーナー振動数は鳥取県西部地震、芸予地震は川瀬・松尾<sup>15)</sup>、2005年の宮城県沖の地震は鶴来ら<sup>16)</sup>の研究、その他の地震については既往研究<sup>17)～19)</sup>で求められている短周期レベルA (dyne・cm/s<sup>2</sup>) と地震モーメント $M_0$ を用い、式(24)から求めた。地震モーメントはF-NET<sup>20)</sup>による値を用いた。 $f_{max}$ は東北地方や茨城県沖で発生したプレート間、プレート内地震については鶴来ら<sup>16)</sup>の研究を参考とした。その他の地震の $f_{max}$ は地震モーメントをパラメータとする式(22)<sup>21)</sup>で求めた。

$$A = 4\pi^2 f_c^2 M_0 \quad (24)$$



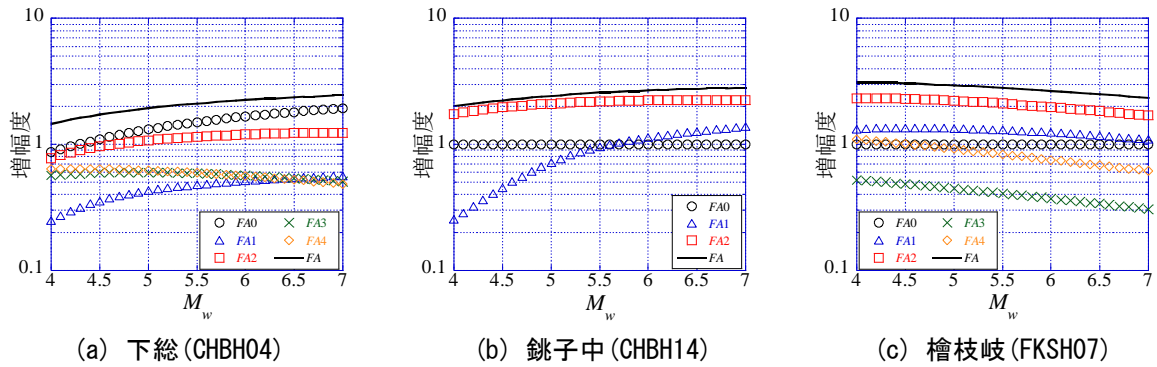


図3  $M_w$ と $G_0(f)$ 、 $G_i(f)$ 、 $G(f)$ に対する最大地動加速度の地盤増幅度の関係

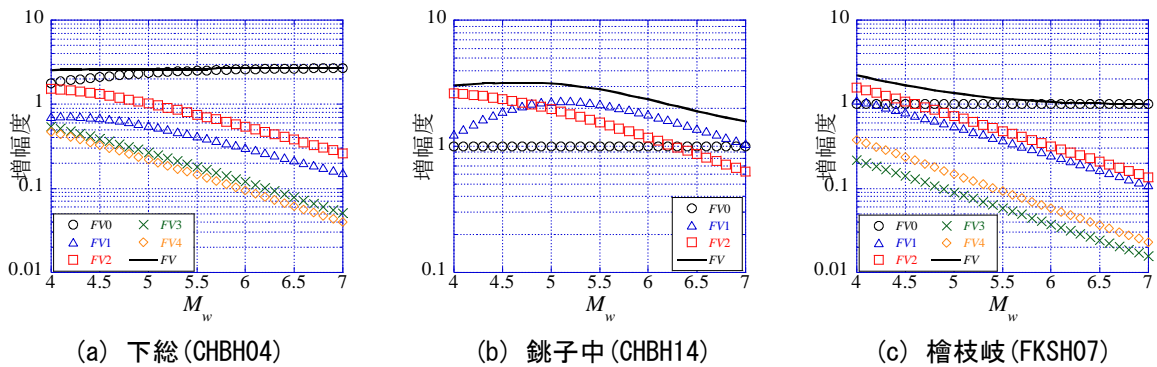


図4  $M_w$ と $G_0(f)$ 、 $G_i(f)$ 、 $G(f)$ に対する最大地動速度の地盤増幅度の関係

### 3.2 地震観測記録による地盤増幅度の評価

本研究ではS波速度が2~3 km/s程度の地震基盤相当の解放基盤面（以降、基盤）を基準として地盤増幅度を評価するので、基盤までの地盤定数が明らかな観測点を解析対象とする必要がある。そこでこれまでの研究報告で基盤の層までの地盤定数が評価されている表3のKiK-net観測点や女川原子力発電所（以降、女川とする）、電力共通研究の観測点の箒平を解析対象地点とした。KiK-net観測点には既往研究であり対象としなかった堆積層の厚い観測点（下総、成田、霞ヶ浦、羽島、岩槻、府中）も含まれている。堆積層の厚い観測点の伝達関数は図1(a)のように1Hz以下でも増幅が見られる。これらの地震観測点のデータとして以下の条件を満たす観測記録を用いた。

- ・地盤の非線形化の影響を避けるために地表波の最大加速度(3成分合成値)が200cm/s<sup>2</sup>未満の記録
- ・地表波の最大加速度(3成分合成値)が5cm/s<sup>2</sup>以上の記録

ただし、非線形時の地盤定数が求められている<sup>22)</sup>女川は200 cm/s<sup>2</sup>以上の地震観測記録も地盤増幅度を評価した。その他の観測点の地盤定数は表3に示す参考文献を参考に値を設定した。

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。ただし、加速度、速度波形の最大振幅が後続波の場合はS波到達から破壊継続時間を加えた区間での最大値を最大振幅として用いた。破壊継続時間は川上他の論文<sup>31)</sup>の式を用いて計算した。速度時刻歴波形は加速度波形をフーリエ変換を利用して積分することによって求めた。なお、積分の際には0.1~20Hz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。

### 3.3 観測記録と評価式による地盤増幅度の比較

式(12)~(20)によって評価した最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度(計算値)を観測値と比較した。式(12)~(20)のパラメータのうち、 $f_c$ 、 $f_{max}$ は表2の値を用い、サイト増幅特性に対応する式(6)のパラメータ $f_0$ 、 $f_i$ 、 $h_i$ 、 $a_i$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $N_g$ は式(9)の最小値を求めることにより得られた表1の最適値を用いた。

表2 解析対象地震の諸元とパラメータ



図5 対象地震の震央分布

地震番号	地震名または発生地域	発震時	$M_{JMA}$	$M_w$	$M_0$ ( $\text{dyne}\cdot\text{cm}$ )	$A$ ( $\text{dyne}\cdot\text{cm/s}^3$ )	$f_c$ (Hz)	$f_{max}$ (Hz)
1	2000年鳥取県西部地震	2000/10/6 13:30:18	7.3	6.6	$8.62\times 10^{25}$		0.16	5.64
2	2001年芸予地震	2001/3/24 15:27:54	6.7	6.7	$1.51\times 10^{26}$		0.28	5.28
3	2004年新潟県中越地震	2004/10/23 17:56:00	6.8	6.6	$7.53\times 10^{25}$	$1.36\times 10^{26}$	0.21	5.74
4	宮城県沖	2005/8/16 11:46:26	7.2	7.1	$5.43\times 10^{26}$		0.26	10
5	2007年新潟県中越沖地震	2007/7/16 10:13:22	6.8	6.6	$9.3\times 10^{25}$	$1.44\times 10^{26}$	0.20	5.59
6	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/6/14 8:43:45	7.2	6.9	$2.72\times 10^{26}$	$2.66\times 10^{26}$	0.16	4.92
7	茨城県沖	2011/3/11 15:15:34	7.6	7.8	$5.66\times 10^{27}$	$6.19\times 10^{26}$	0.05	10
8	宮城県沖	2011/4/7 23:32:43	7.2	7.1	$4.74\times 10^{26}$	$1.49\times 10^{27}$	0.28	10
9	福島県浜通り	2011/4/11 17:16:12	7.0	6.6	$9.58\times 10^{25}$	$9.70\times 10^{25}$	0.16	5.57

まず、既往研究<sup>7)</sup>でも対象とした地震観測点のうち、サイト増幅特性に複数のピークがある4観測点を対象に本研究と既往研究<sup>7)</sup>の地盤増幅度評価式を比較した。対象とした観測点はKiK-netの都路(FKSH19)、神辺(HRSH05)、山東(HYGH11)、玉野(OKYH01)である。図6に観測記録から求めた地盤増幅度(観測値)と評価式から求めた地盤増幅度(計算値)、図7に観測値と計算値の対数値の差の自乗平均平方根値(以降、RMS値)を示す。RMS値は最大地動加速度の場合、本研究が既往研究よりも大きく、逆に最大地動速度は本研究の方が値が小さくなっている。今回、対象とした観測記録では最大地動加速度に関しては本研究の評価式が既往研究よりも評価精度が悪くなったが、一部の観測記録のみを対象としているため、今後、さらなる比較、検討を行う予定である。

続いて、図8、9に表3に示す全対象観測点の地盤増幅度の観測値と計算値の対応、図10にRMS値を示す。図8、9を見ると最大地動加速度、最大地動速度ともに地盤増幅度の計算値の多くが観測値の半分から2倍の範囲に入っている。観測値と計算値から求めたRMS値を見ると最大地動速度の方が値が小さい地震が多く、全データに対するRMS値も最大地動速度の方が小さくなっている。

最大地動加速度のRMS値が大きかった地震1、4、7では、距離減衰の影響を受けて地盤増幅度の観測値と計算値の対応が悪くなったと考えられる観測点が見られた。観測値と計算値の対応が悪い観測点のうち、図8に示す地震1の北九州(FKOH01)、美東(YMGH12)、地震4、7の清川(KNGH21)は図11のように伝達関数(サイト増幅特性)の1次から3次のピークが6Hz以上にあるが、加速度フーリエスペクトルには伝達関数のピークに対応するピークが見られない、または高振動数の振幅が相対的に小さい。図11の加速度フーリエスペクトルの記録は震源距離が200km以上であり、距離減衰の影響により高振動数成分が減衰されたため、上記の傾向が見られたものと考えられる。加速度フーリエスペクトルの高振動数成分の振幅が小さい場合は地表と基盤でフーリエスペクトルの振幅に大きな違いがないため、地盤増幅度は1に近い値となる。しかし、式(3)において $\gamma=1$ としたことにより指数項が振動数に依存しないため、観測記録のフーリエスペクトルに見られる高振動数成分の低減はなく、地盤増幅度の計算値が観測値よりも大きくなってしまい、両者の対応が悪くなったものと考えられる。速度の場合は高振動数成分の影響が相対的に小さいので、距離減衰項を無視する影響は小さいものと考えられる。ただし、最大地動加速度の地盤増幅度の観測値と計算値の差を距離減衰項の影響だけでは説明できない観測点もあり、今後、対応が悪い要因を調べる必要がある。

距離減衰項の影響の他に、 $f_{max}$ が地盤増幅度の評価精度に関係していることが考えられる。著者らの研究<sup>7)</sup>で指摘しているように最大地動加速度の場合の方が最大地動速度に比べて $f_{max}$ の地盤増幅度への影響が大きいことから、経験式によって評価した $f_{max}$ が実際の値と対応していない場合は、最大地動加速度の地盤増幅度の評価精度が悪くなる可能性がある。また、式(4)、(5)の震源スペクトルに含まれる高域遮断フィルターの形状が地盤増幅度に影響を及ぼしていることが推測されるので、今後は他のフィルターを用いた地盤増幅度評価式も検討する予定である。

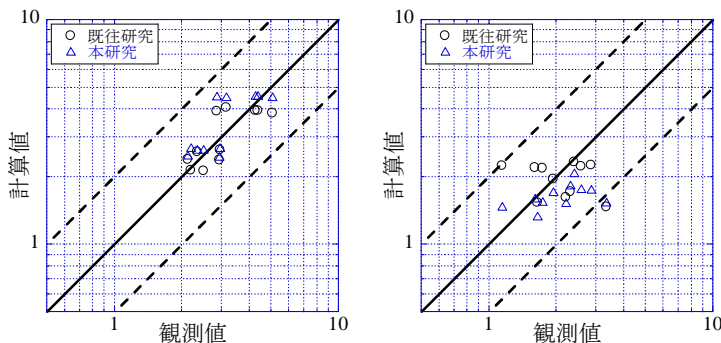
#### 4. まとめ

本研究では著者らが提案した地震動指標の地盤増幅度評価式において、サイト増幅特性を表す関数を改良し、単一ピークの関数などを合成して複数のピークを有するサイト増幅特性に対応できるようにした。サイト増幅特性の合成に用いた様々な振動数特性を持つ関数それぞれに対する地盤増幅度を合成してサイト増幅特性全体に対する地盤増幅度を求めることが出来るため、どのような振動数のサイト増幅特性が地盤増幅度に影響を及ぼすか調べる事が可能である。



表3 KiK-net観測点などの情報

観測点名	コード	緯度 (°)	経度 (°)	地震番号									引用 文献
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
下総	CHBH04	35.7966	140.0206			○		○	○	○	○	○	11
成田	CHBH13	35.8307	140.2980			○		○	○	○	○	○	26
銚子中	CHBH14	35.7342	140.8230			○		○		○	○	○	13
北九州	FKOH01	33.8849	130.9798	○	○								24
西会津	FKSH01	37.7565	139.7150			○	○	○	○		○	○	24
檜枝岐	FKSH07	37.0103	139.3755			○		○		○	○	○	13
都路	FKSH19	37.4703	140.7227			○	○	○	○			○	26
羽島	GIFH09	35.2768	136.7002	○	○					○			28
神辺	HRSH05	34.5566	133.4179	○	○								13
波賀	HYGH03	35.2193	134.5237	○									13
上郡	HYGH05	34.8995	134.3284	○	○								13
夢前	HYGH07	35.0322	134.6701	○	○								13
山東	HYGH11	35.2925	134.9071		○								13
新宮	HYGH12	34.9313	134.5423	○	○								13
岩瀬	IBRH11	36.3701	140.1401			○		○	○		○		29
霞ヶ浦	IBRH17	36.0864	140.3140			○		○	○		○	○	13
岩泉	IWTH03	39.8020	141.6520				○		○	○		○	26
川井北	IWTH17	39.6442	141.5977				○		○	○	○		26
清川	KNGH21	35.4628	139.2146				○			○	○	○	25
唐桑	MYGH03	38.9207	141.6377						○			○	26
東和	MYGH04	38.7860	141.3254									○	26
河北	MYGH11	38.5158	141.3421						○				26
志津川	MYGH12	38.6416	141.4428						○				26
糸魚川	NIGH16	36.9378	137.8480			○		○					27
安岐	OITH03	33.4736	131.6856		○								26
玉野	OKYH01	34.5070	133.8905	○	○								13
建部	OKYH05	34.8684	133.8527	○	○								30
岩槻	SITH01	35.9290	139.7349						○	○	○	○	11
伯太	SMNH01	35.2963	133.2604		○								13
大樹	TKCH08	42.4865	143.1520				○				○		24
府中	TKYH02	35.6539	139.4704							○	○		11
防府	YMGH01	34.0494	131.5618	○	○								26
美東	YMGH12	34.2176	131.3597	○	○								26
箒平		37.2363	140.9300								○	○	23
女川							○				○	○	22



(a) 最大地動加速度 (b) 最大地動速度  
図6 観測値と既往研究、本研究の計算値の対応

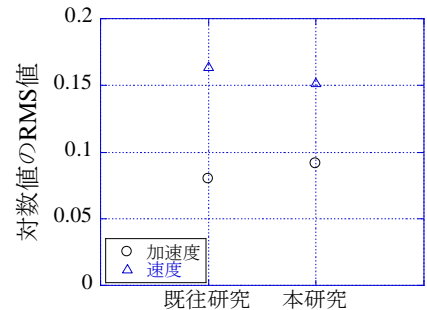


図7 観測値と既往研究、本研究の計算値の対数値の差のRMS値

本論文では、まず、特徴の異なる3つのサイト増幅特性を複数の関数によって合成するとともに、合成に用いた各関数から求めた地盤増幅度のサイト増幅特性全体に対する地盤増幅度への寄与を調べた。その結果、最大地動加速度、最大地動速度ともに地震の規模が大きくなると、地盤増幅度に対するサイト増幅特性の低振動数成分の寄与が大きくなること明らかになった。続いて、サイト増幅特性に複数のピークを有する地震観測点を対象に既往研究と本研究の評価式による地盤増幅度を比較するとともに、M6~7クラスの9地震で得られた観測記録によって計算した地盤増幅度(観測値)と評価式による地盤増幅度(計算値)を比較した。この際、先に提案した地盤増幅度評価式の研究で十分に対象としなかった、堆積層の厚い地震観測点も検討対象とした。

サイト増幅特性に複数のピークがある観測点を対象に地盤増幅度の観測値と既往研究、本研究の評価式による計算値との差を比較した結果、最大地動速度の地盤増幅度に関しては本研究の方が観測値と計算値の差が小さくなった。M6~7クラスの9地震を対象に本研究の最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度評価式による計算値と観測値を比較した結果、最大地動速度が最大地動加速度に比べて、観測値と計算値の対数値の差のRMS値が小さい傾向が見られた。最大地動加速度の方がRMS値が大きくなった要因の一つに地盤増幅度評価式で距離減衰項が振動数に依存しないことや経験式によって求

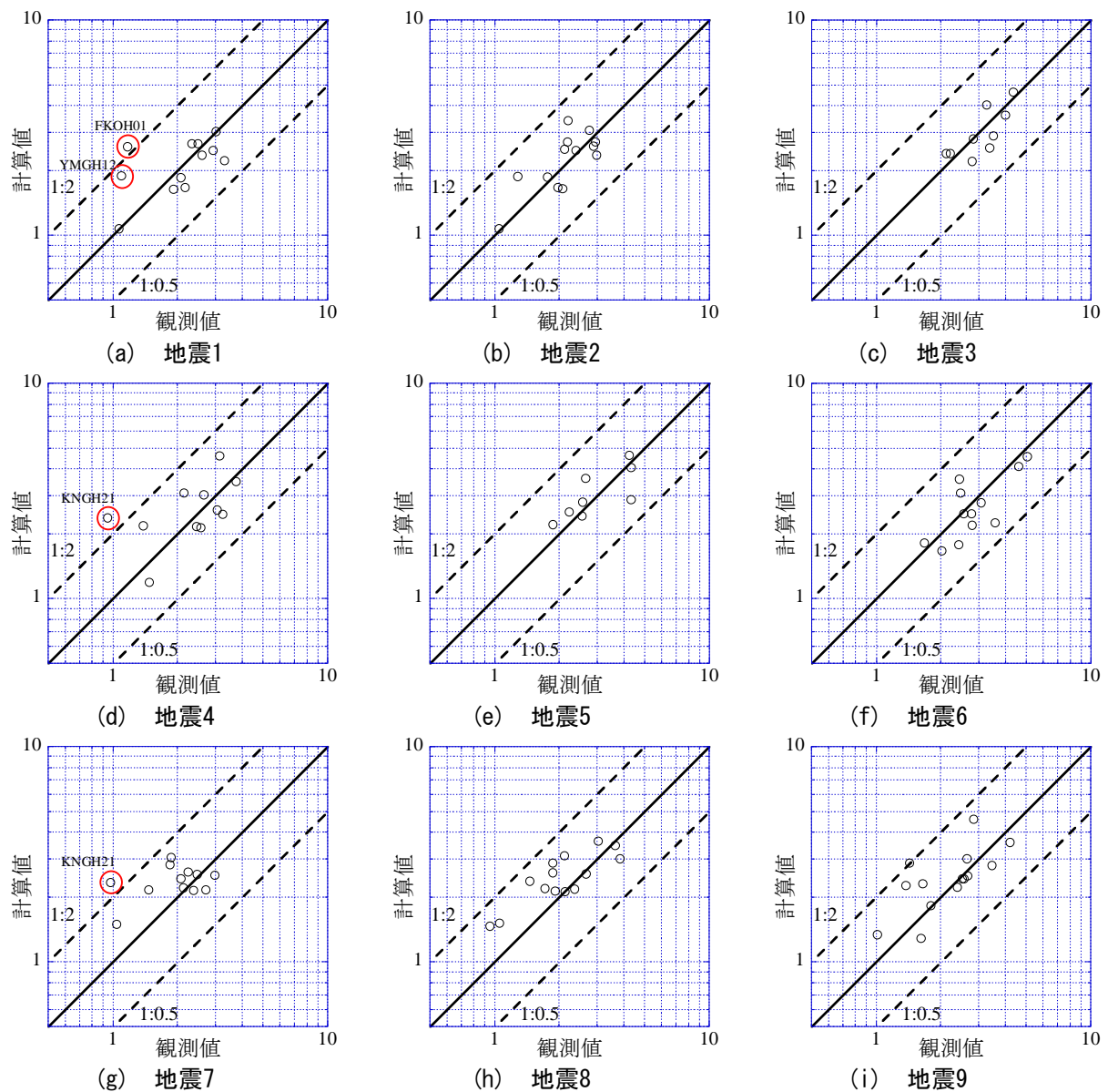


図8 最大地動加速度の地盤増幅度の観測値と計算値

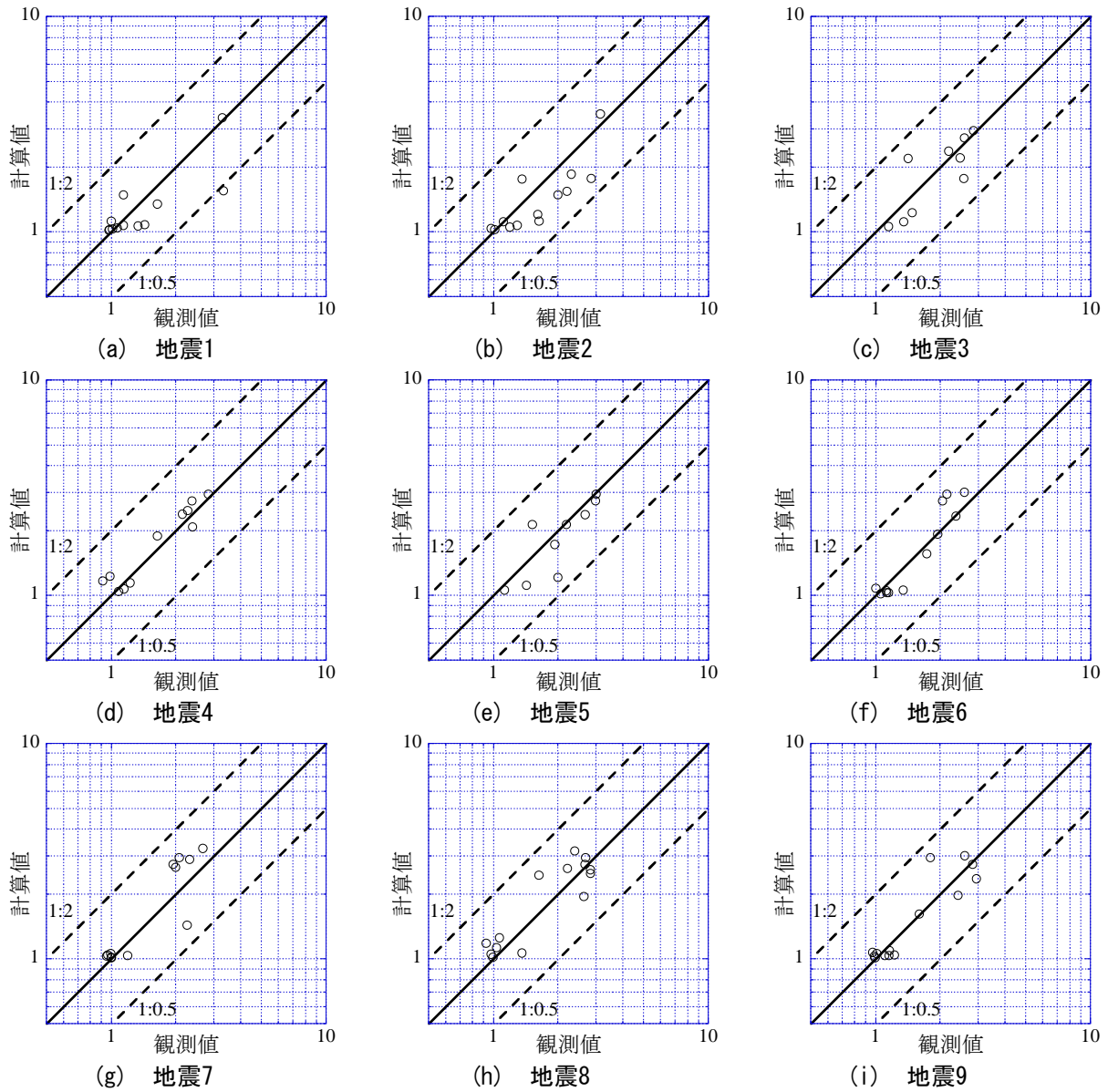


図9 最大地動速度の地盤増幅度の観測値と計算値

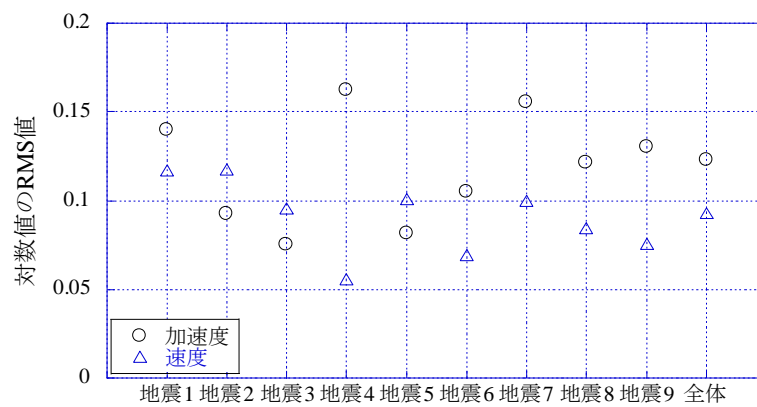


図10 地盤増幅度の観測値と計算値の対数値の差のRMS値

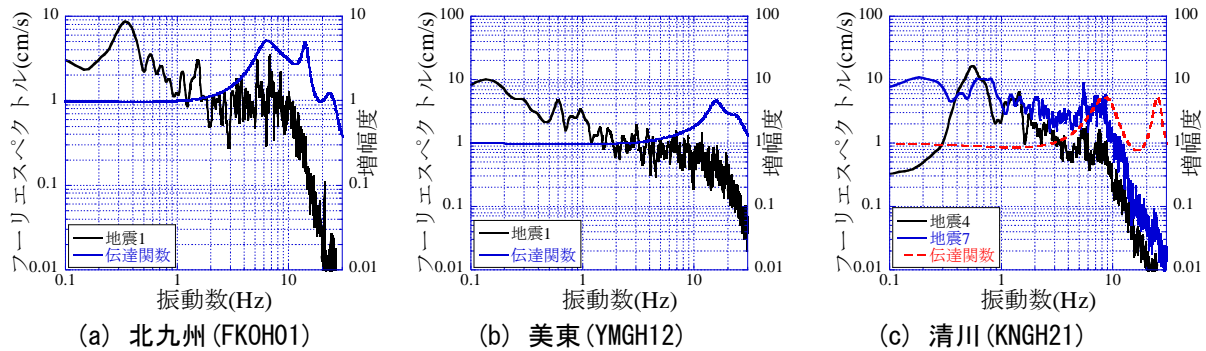


図11 加速度フーリエスペクトルと伝達関数

めた $f_{max}$ を地盤増幅度の評価に用いたことなどが考えられる。今後、距離減衰項の影響や地震ごとの適切な $f_{max}$ の設定などの課題を考慮して、地盤増幅度評価式を再検討する予定である。

#### 謝辞

本研究は公益財団法人 前田記念工学振興財団の研究助成により実施しました。また、独立行政法人 防災科学技術研究所のKiK-netの地震観測記録、12電力会社から提供して頂いた地震観測記録、東北電力㈱から提供して頂いた地震観測記録を使用させて頂きました。早稲田大学の安井譲先生に貴重なご意見を頂きました。3名の査読者から有益なご指摘を頂きました。記して御礼申し上げます。

#### 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年、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年、pp.639-654.
- 3) 翠川三郎、駒澤真人、三浦弘之：横浜市高密度強震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、2008年、pp.19-30.
- 4) 神田克久、武村雅之：震度データから推察される相模トラフ沿いの巨大地震の震源過程、日本地震工学会論文集、Vol. 7、No. 2 (特集号)、2007年、pp.68-79.
- 5) 西川隼人、宮島昌克：地震基盤までの地盤構造と地盤増幅度の地震規模依存性の関係、日本建築学会構造系論文集、Vol. 79、No.698、2014年、pp.445-451.
- 6) 西村利光、西村知浩、宮腰 研、堀家正則：KiK-netの地震記録を用いた最大加速度、最大速度の地盤増幅率回帰式、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、2014年、pp.2001-2010.
- 7) 西川隼人、宮島昌克：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、日本地震工学会論文集、Vol. 12、No. 3、2012年、pp.34-48.
- 8) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
- 9) 古川正志、渡辺美知子、木下正博、鈴木育男、山本雅人、川上 敬：メタヒューリスティクスとナチュラルコンピューティング、コロナ社、2011年.
- 10) Mishra, S.K.: Global optimization by particle swarm method : a fortran program, [http://mpr.ub.uni-muenchen.de/874/1/MPRA\\_paper\\_874.pdf](http://mpr.ub.uni-muenchen.de/874/1/MPRA_paper_874.pdf), 2006, 2013.11.22参照
- 11) 木下繁夫、大池美保：関東地域の堆積層-基盤系におけるS波の減衰特性-0.5~16Hz-、地震第2輯、Vol.55、2002年、pp.19-31.
- 12) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成17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（地震観測記録を用いた地震動特性に関する調査に係る報告書）、2006年.
- 13) 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年.
- 14) Hubert, M. J., Nathaniel, B. N. and Ralph, S. P. : Theory of servomechanisms, Dover Publications Inc.; New edition, 1947, pp.369-370.
- 15) 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年、pp.33-52.
- 16) 鶴来雅人、香川敬生、入倉孝次郎：東北地方を震源とするスラブ内地震およびプレート境界型地震の高域遮断フィルターに関する検討、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、2014年、pp.3597-3606.
  - 17) 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則、日本建築学会構造系論文集、Vol. 75、No. 651、2010年、pp.923-932.
  - 18) 佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル—プレート境界地震の短周期レベルに着目して—、日本建築学会構造系論文集、Vol. 77、No. 675、2012年、pp.695-704.
  - 19) 佐藤智美、堤 英明：2011年福島県浜通り付近の正断層の地震の短周期レベルと伝播経路・地盤増幅特性、日本地震工学会論文集、Vol.12、No.7、2012年、pp.1-18.
  - 20) 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/>、2014.7.2 参照
  - 21) 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.
  - 22) 原子力安全・保安院：東北電力(株) 女川原子力発電所における平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震及び4月7日の地震観測記録の解析について(コメント回答)、2012年.
  - 23) 高橋克也、表俊一郎、池浦友則、太田外気晴、大島 豊：鉛直アレー地震観測による地震動特性に関する研究、その16. 露頭岩盤と鉛直アレーの地震動特性の比較：日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年、pp.233-234.
  - 24) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成14年度原子力発電立地調査に関する報告書 その1 地震波伝ば特性評価法調査、2003年.
  - 25) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：平成17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(地震観測記録を用いた地震動特性に関する調査に係る報告書)、2006年.
  - 26) 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年.
  - 27) 佐藤浩章：広帯域強震動予測のための新潟平野における深部地盤のモデル化とサイト増幅特性評価、東京工業大学学位論文、2009年.
  - 28) 日本原子力発電株式会社、独立行政法人日本原子力研究開発機構、関西電力株式会社：若狭地域の地震動評価に用いる地盤モデル再評価について【補足検討】、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会、地震・津波、地質・地盤合同WG(第42回)、2010年.
  - 29) 佐藤智美、早川 崇、大島光貴、川瀬 博、松島信一、長嶋史明、飛田幸樹、青地秀雄：東北地方太平洋沖地震の岩瀬観測点(IBRH11)での大振幅の要因の分析、日本地震工学会・大会-2012梗概集、2012年、pp.92-93.
  - 30) 引田智樹：矩形クラックモデルを利用した統計的グリーン関数法による地震動評価、日本地震工学会論文集、第12巻、第1号、2012年、pp.62-79.
  - 31) 川上洋介、瀬瀬一起、久田嘉章：地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分類との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、2004年、pp.687-688.

(受理：2015年3月30日)

(掲載決定：2015年10月5日)

## A Study on Evaluation Formula of Amplification Factor Using Synthetic Site Amplification Spectrum

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

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

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

### ABSTRACT

We have proposed an evaluation formula of amplification factor for *PGA* and *PGV* expressed by parameters of

source spectra and site amplification spectra. The site amplification spectrum in evaluation is evaluated by synthesizing some functions in this paper. The formula, therefore, becomes applicable to amplification spectra with several peaks. Amplification factors evaluated by using records obtained in earthquakes with 6 to 7 of magnitude are compared with one evaluated by the proposed formula. It is clarified that error for *PGV* is smaller than that for *PGA* by comparison of error between observed and evaluated amplification factors.

*Keywords: Amplification factor, Peak ground acceleration, Peak ground velocity, Source spectrum, Site amplification spectrum*