

# サイト増幅特性と微動 H/V の 1 次ピークの パラメータに基づいた震度増分評価式 の検討 — 中国地方を中心として —

西川隼人<sup>1</sup>・野口竜也<sup>2</sup>・池本敏和<sup>3</sup>・宮島昌克<sup>4</sup>

## A Study on an Empirical Formula for Seismic Intensity Increment Based on the Parameters of Fundamental Peak Frequency of Site Amplification Effect and Microtremor H/V: Study Focused on the Chugoku Region

Hayato NISHIKAWA<sup>1</sup>, Tatsuya NOGUCHI<sup>2</sup>,  
Toshikazu IKEMOTO<sup>3</sup> and Masakatsu MIYAJIMA<sup>4</sup>

### Abstract

In this paper, we proposed a seismic intensity increment evaluation formula using the parameters of the fundamental peak of microtremor H/V in order to accurately evaluate seismic intensity increments even at locations where the exact average S-wave velocity structure is unknown. First, we derived an approximate expression that simplified the relationship between the earthquake ground motion spectrum and the seismic intensity increment. Calculated values and approximate values of seismic intensity increments were estimated for various earthquake magnitudes and pseudo site amplification effects, and it was shown that these values correspond well. In addition, it was shown that the seismic intensity increment can be evaluated to some extent by considering only the fundamental peak of the site amplification effects for the seismic stations targeted in this study. Next, seismic intensity increments and site amplification effects were evaluated for seismic stations in the Chugoku region and other areas. We also found an empirical formula for evaluating seismic intensity increments using the parameters of the fundamental peak of site amplification effects, and showed that seismic intensity increments can be evaluated with good accuracy. Finally, we obtained an empirical seismic intensity incremental evaluation formula using the parameters of the fundamental peak of microtremor H/V. As a

<sup>1</sup> 福井工業大学工学部  
Faculty of Engineering, Fukui University of Technology

<sup>2</sup> 鳥取大学工学部  
Faculty of Engineering, Tottori University

<sup>3</sup> 金沢大学理工研究域  
College of Science and Engineering, Kanazawa University

<sup>4</sup> ライフライン防災総研  
Lifeline Disaster Mitigation Lab.

本稿に対する討議は 2025 年 1 月末日まで受け付ける。

result, it was clarified that the seismic intensity increment can be evaluated with good accuracy, although the prediction accuracy is lower than when using the site amplification effects.

キーワード：計測震度，震度増分，サイト増幅特性，微動，H/V，1次ピーク振動数

Key words: JMA seismic intensity, seismic intensity increment, site amplification effect, microtremor, H/V, fundamental peak frequency

## 1. 序論

計測震度は、地震発生時において、国や自治体の初動体制の確立に利用される他、国などが策定する地震防災計画の基本となる地震動予測<sup>1-3)</sup>で対象となることが多い重要な地震動指標である。

地震動予測手法には、経験的手法、半経験的手法、理論的手法、ハイブリッド法<sup>4)</sup>があり、経験的手法で地震動を予測する場合は、距離減衰式で求めた硬質地盤の地震動にサイト特性を考慮することで、地表面の地震動を求める方法が一般的であり、地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図<sup>3)</sup>などでも、この手法が用いられている。しかし、地表面の計測震度は、硬質地盤の最大地動速度に地盤増幅度を乗じた地表面の最大地動速度を変換して計算することが多い<sup>5,6)</sup>ためか、計測震度に関するサイト特性である震度増分の評価式は少ない。最大地動速度から計測震度への変換の手間や、変換の際に含まれる誤差を考えると、硬質地盤の計測震度に震度増分を考慮して、直接的に地表面の計測震度を求める手法の利用が望ましいと考える。

また、サイト特性の評価には、表層30 mの平均S波速度がよく用いられている<sup>7-9)</sup>が、平均S波速度の正確な計算に必要なS波速度構造が得られる地点は限られているので、S波速度構造が不明な地点に対しても適用可能なサイト特性評価式が必要と考える。

そこで、本研究では、研究事例が少ない震度増分の評価を、PS検層などのS波速度構造が未知な地点でも行えるようにするために、著者ら<sup>10)</sup>が提案したサイト増幅特性や常時微動の水平・鉛直スペクトル比(H/V)<sup>11)</sup>を用いた地盤増幅度評価手法<sup>10)</sup>を震度増分評価に応用した。

まず、著者ら<sup>10)</sup>が提案した地盤増幅度評価式の

基礎となった地震動スペクトルの積分値と地盤増幅度の関係式<sup>12)</sup>に基づいて、スペクトル積分値と震度増分の関係式を導くとともに、震度増分評価式への利用を容易にするために、導出した関係式の近似式を求めた。また、近似式を用いて、スペクトルを構成するサイト増幅特性の1次ピーク振動数と震度増分の関係を調べるとともに、1次ピーク振動数のみを考慮して、震度増分を評価できるか検討した。

次に著者ら<sup>10)</sup>が提案した地盤増幅度評価式でも検討対象とした中国地方と兵庫県地震観測点を対象に地震観測記録から、各地震観測点のサイト増幅特性や震度増分を評価し、サイト増幅特性の1次ピーク振動数などの傾向を調べた。

最後に回帰分析により震度増分評価式を求めたが、評価式の基本となる震度増分近似式は、サイト増幅特性のピーク振動数、ピーク振幅をパラメータとしていることから、まず、サイト増幅特性を対象とした場合の震度増分評価式を求め、予測精度を検証した。続いて、サイト増幅特性の代替として用いる微動H/Vのデータを整理するとともに、微動H/Vの1次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする震度増分評価式を求めた。

## 2. 震度増分評価式の導出

### 2.1 震度増分の定義

本論文で検討対象とする震度増分  $dI$  を次のように定義する。

$$dI = I_s - I_b = 2\log_{10} A_{s0} - 2\log_{10} A_{b0} \quad (1)$$

$$I_s = 2\log_{10} A_{s0} + 0.94 \quad (2)$$

$$I_b = 2\log_{10} A_{b0} + 0.94 \quad (3)$$

$I_s$  は地表の計測震度、 $I_b$  は解放地震基盤の計測震

度、 $A_{s0}$ と $A_{b0}$ は計測震度の計算に用いるフィルター（以降、震度フィルターと呼ぶ）の処理を行った地表波と基盤波に継続時間0.3秒間を考慮した振幅である<sup>13)</sup>。

震度フィルターによる処理を行った地震波の最大振幅と継続時間を考慮した振幅の相関が高い<sup>14)</sup>ことから、近似的に次式が成り立つものとする。

$$dI = I_s - I_b = 2\log_{10} A_{fs} - 2\log_{10} A_{fb} \approx 2\log_{10} \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \quad (4)$$

ここに $A_{fs}$ は震度フィルターによる処理を行った地表波の最大振幅、 $A_{fb}$ は震度フィルターによる処理を行った基盤波の最大振幅である。

## 2.2 地震動スペクトルと震度増分の関係

著者ら<sup>12,14)</sup>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 ~ 3 km/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とフーリエスペクトルなどの関係式を導いている。本研究でも、著者ら<sup>12,14)</sup>の研究で求めた関係式をもとに、式(4)の $A_{fs}$ と $A_{fb}$ の比である地盤増幅度 $F$ が次式で表されるものとする。

$$F = \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \approx \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 df}} \quad (5)$$

$H(f)$ は震度フィルター、 $G(f)$ 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、 $f$ は振動数(Hz)である。

$F_b(f)$ はBooreの研究<sup>15)</sup>に従い、次式で表わされるものとする。

$$F_b(f) = CM_0 \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{\pi f X}{Q_s V_s}\right) S(f) \quad (6)$$

$$C = \frac{R_{\theta\theta} F_s P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \quad (7)$$

$F_b(f)$ はS波のみから成り立つものとする。 $C$ はラディエーションパターンなどからなる定数、 $M_0$ は地震モーメント、 $f_c$ は震源スペクトルのコーナー振動数である。 $R_{\theta\theta}$ はラディエーションパターン係数、 $F_s$ は自由地表面の増幅効果を表す

係数、 $P_{RTTN}$ はエネルギー分配係数である。ラディエーションパターンは地表、基盤ともに全方位の平均値を考えた。また、 $\rho$ と $V_s$ は地震波発生層の密度とS波速度である。 $X$ は震源距離であり、 $1/X$ は幾何減衰に対応する。指数項は非弾性減衰に対応し、 $Q_s$ 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、 $S(f)$ は加速度震源スペクトルである。

同一地点の地表波のスペクトル $H(f)F_b(f)$ 、 $G(f)$ と基盤波のスペクトル $H(f)F_b(f)$ の $C$ 、 $M_0$ 、 $X$ 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(6)の指数項の $Q_s$ は一般的に $Q_0 \times f^\gamma$  ( $Q_0$ は定数)と表わされる。既往研究<sup>16)</sup>で指摘されているように、 $\gamma$ が1前後の値になることが多いことから、 $\gamma=1$ と仮定して、式(6)の指数項を振動数によらない定数と考える。これにより、式(5)は以下のように表すことができる。

$$F = \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \approx \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 G(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \quad (8)$$

式(8)を式(4)に代入すると次式のようになり、地震動スペクトルの無限積分値と震度増分の関係が得られる。

$$dI = 2\log_{10} F = 2\log_{10} \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \approx \log_{10} \left( \frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 G(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df} \right) \quad (9)$$

式(8)、(9)に含まれる加速度震源スペクトルは次の $\omega^{-2}$ 則に従う式に高域遮断フィルターを考慮したものとした。

$$S(f) = \frac{4\pi^2 f_c^2 f^2}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (10)$$

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。 $f_c$ はコーナー振動数、 $f_{max}$ は高域遮断振動数である。

サイト増幅特性 $G(f)$ は、著者らの研究<sup>12)</sup>で用いた単一のピークを有する $n$ 次モードの関数 $G_n(f)$ をモード数の分、合成したものである。

$G_n(f)$  は次式で表される。

$$G_n(f) = \sqrt{\frac{G_{0n} f_n^2 f^2}{(f_n^2 - f^2)^2 + 4h_n^2 f_n^2 f^2}} \quad (11)$$

$G_{0n}$  は  $G_n(f)$  全体の振幅を調整する係数、 $f_n$  は  $n$  次モードのピーク振動数、 $h_n$  は  $n$  次モードのピーク振幅を規定する係数である。

$G_n(f)$  を合成したサイト増幅特性  $G(f)$  は次式で表される。

$$G(f) = \sqrt{1 + \sum_{n=1}^{N_g} G_n(f)^2} \quad (12)$$

$N_g$  はモード総数に対応する。

式 (8) に式 (12) を代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} F &= \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \approx \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 \{1 + \sum_{n=1}^{N_g} G_n(f)^2\} df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \\ &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 \{S(f)^2 + \dots + S(f)^2 G_{N_g}(f)^2\} df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \quad (13) \end{aligned}$$

$G_n(f)$  に対する地盤増幅度  $F_n$  を次のように定義する。

$$F_n = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 G_n(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \quad (14)$$

また、式 (14) を式 (13) に代入すると、以下のようになる。

$$F = \sqrt{1 + F_1^2 + \dots + F_{N_g}^2} \quad (15)$$

### 2.3 震度フィルターの近似

計測震度の算出に用いる震度フィルターはハイパスフィルター、ローパスフィルター、振動数の平方根に反比例する関数の積で表される<sup>13)</sup>複雑なものである。著者ら<sup>12)</sup>は、式 (14) による震度増分を解析的に求めるために、速度応答の伝達関数で震度フィルターを近似し、震度フィルターと速度応答伝達関数による計測震度の誤差二乗和が最小になるように、速度応答伝達関数のパラメータを決定した。次式が震度フィルターに近似させた

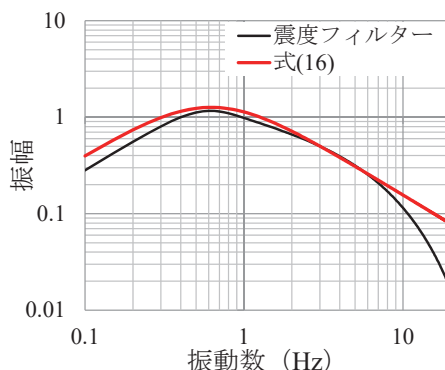


図1 震度フィルターと式 (16) の対応

関数である。

$$H(f) = \frac{\sqrt{\beta} f}{f_p^2 + f^2} \quad (16)$$

$f_p$  は震度フィルターのピーク振動数 = 0.62 Hz、振幅調整のための定数  $\beta$  は、震度フィルターと式 (16) による計測震度の誤差二乗和が最小になった 2.4 Hz<sup>2</sup> とした。式 (16) から分かるように、 $\omega^{-2}$  則に従う速度震源スペクトルと相似の形となる。図 1 に震度フィルターと式 (16) の対応を示す。

### 2.4 震度増分評価式の近似値

式 (14) から震度増分を解析的に求めやすくするために、前節で震度フィルターを式 (16) で近似したが、なおも解析解の導出が煩雑になり、震度増分の経験的評価式の基本式として適さないため、著者らの最大地動速度の地盤増幅度を対象とした研究<sup>12)</sup>と同じく、地震の規模が大きい場合を想定することで、式 (14) の解析解を容易に求められるようにした。

$\omega^{-2}$  則に従う加速度震源スペクトルは地震の規模が大きくなるとコーナー振動数が小さくなり、低振動数側の振幅がフラットになる。ここで式 (10) の  $S(f)$  の高域遮断フィルターを無視し、式 (10) は次式のように近似でき、振動数  $f$  に依存しない。

$$S(f) \approx 4\pi^2 f_c^2 \quad (17)$$

式 (16)、(17) を、式 (14) の括弧内の分母に代

入して、積分値を求めると、次のようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{16\pi^4 f_c^4 \beta f^2}{(f_p^2 + f^2)^2} df = \frac{8\pi^5 f_c^4 \beta}{f_p} \quad (18)$$

同様に、式 (14) の括弧内の分子は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 G_n(f)^2 df &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{16\pi^4 f_c^4 \beta f^2}{(f_p^2 + f^2)^2} \frac{G_{0n} f_n^2 f^2}{(f_n^2 - f^2)^2 + 4h_n^2 f_n^2 f^2} df \\ &= \frac{8\pi^5 f_c^4 G_{0n} \beta f_n^2 (h_n f_p + f_n)}{h_n (f_p^2 + 2h_n f_n f_p + f_n^2)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

式 (18) と式 (19) を式 (14) に代入すると  $F_n$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} F_n &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 G_n(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \\ &= \sqrt{\frac{G_{0n} f_n^2 f_p (h_n f_p + f_n)}{h_n (f_p^2 + 2h_n f_n f_p + f_n^2)^2}} \end{aligned} \quad (20)$$

さらに式 (20) を式 (9) に代入して、震度増分の形で表すと以下ようになる。

$$dI_n = 2\log_{10} F_n = \log_{10} \left\{ \frac{G_{0n} f_n^2 f_p (h_n f_p + f_n)}{h_n (f_p^2 + 2h_n f_n f_p + f_n^2)^2} \right\} \quad (21)$$

以降、式 (21) で求めた震度増分を近似値、式 (9) で求めた値を精算値と呼ぶ。

### 3. 震度増分の計算

#### 3.1 震度増分評価式の精算値と近似値の比較

本章では、様々な条件について、2章で導いた震度増分の精算値と近似値を計算し、サイト増幅特性の1次ピーク振動数と震度増分の関係や、地震規模や  $f_{max}$  による違いを調べた。

まず、1次ピークのみ有する擬似サイト増幅特性に対する震度増分の精算値と近似値を求め、サイト増幅特性の1次ピーク振動数と震度増分の基本的な性質を調べた。

式 (11), (12) による擬似サイト増幅特性のパラメータを  $G_{01} = 10$ ,  $h_1 = 0.1$  とした。精算値の計算に必要な式 (10) のコーナー振動数  $f_c$  は、地震の規模や地震タイプによって異なることから、後述する地震観測記録による震度増分評価において対象としたプレート内地震、地殻内地震に対する  $f_c$  を求め、震度増分の計算に用いた。 $f_c$  の計算には以下に示す地震モーメント  $M_0$  (N·m) とモーメントマグニチュード  $M_w$  の関係式<sup>17)</sup>、および短周期レベル  $A$  (N·m/s<sup>2</sup>)<sup>18)</sup> と地震モーメント  $M_0$ 、コーナー振動数  $f_c$  との関係式を用いた。

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (22)$$

$$A = 4\pi^2 f_c^2 M_0 \quad (23)$$

$$A = 2.29 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (24)$$

$$A = 4.87 \times 10^9 \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (25)$$

式 (24) がプレート内地震、式 (25) が地殻内地震の短周期レベルの関係式<sup>19)</sup>に対応する。式 (13) の計算に必要な  $f_{max}$  は 6 Hz, 10 Hz の2ケースを考えた。

続いて、20次までピークを有する擬似サイト増幅特性を対象に、様々なピーク振動数  $f_n$  と係数  $G_{0n}$  を与えて、震度増分を計算し、1次ピーク振動数  $f_1$  と震度増分の対応や震度増分の精算値と近似値の対応を考察した。

擬似サイト増幅特性のパラメータの  $G_{0n}$  は以下の式により求めた。

$$G_{0n} = r_n \exp\left(-\frac{\pi f_n}{4Q_0 f_1}\right) \quad (26)$$

$n$  はモード次数であり20次までとした。 $r_n$  は対数軸上で  $2/n \sim 20/n$  の範囲で変動する一様乱数、 $Q_0$  は減衰の程度を表すパラメータであり、20とした。

擬似サイト増幅特性の1次ピーク振動数  $f_1$  は 0.1~20 Hz を対象に対数軸で等分して、501個求め、また、擬似サイト増幅特性の2次以上のピーク振動数は次式により計算した。

$$f_n = \exp\{(n-1)^{-0.5-0.03(n-1)}\} f_{n-1} \quad (27)$$

モード次数が高くなるほど、指数項の値が1に近づくように係数を調整し、次数が1つ低いピーク振動数との間隔が小さくなるようにした。 $f_1$ が0.1~20 Hzの501個、それぞれに対して異なる $G_{0n}$ を与えた。さらに $G_{0n}$ を40ケースとしたため、合計で20,040個の震度増分を求めた。 $h_n$ は0.05~0.5の一様乱数を与えた。

図2に評価に用いた擬似サイト増幅特性 $G_p(f)$ の例(1次ピーク振動数 $f_1=0.4$  Hz, 4.0 Hz)、図3~図6に式(9)によって計算した震度増分(精

算値)と式(21)によって計算した震度増分(近似値)を示す。赤い実線は原点を通る直線により、近似値を精算値で回帰して求めた直線である。図の左上に、回帰式と相関係数Rを示す。地震タイプや $f_{max}$ による違いがあるものの、いずれのケースも相関係数Rが0.9以上、回帰直線の勾配が1前後であることから、解析データ全体では、近似値と精算値の対応が良いことが分かる。

続いて、 $M_w$ による近似値と精算値の対応の違いを考察すると、 $M_w$ が大きくなると、1.5以上の震度増分の精算値と近似値の対応がよくなる傾向が見られた。これは $M_w$ が大きくなると、震源ス

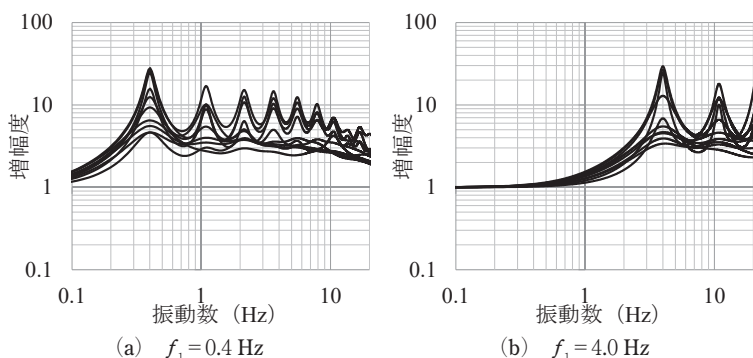


図2 擬似サイト増幅特性

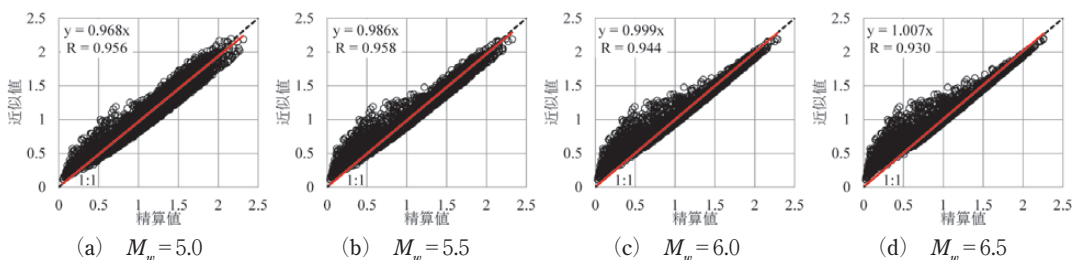


図3 プレート内地震 ( $f_{max} = 6$  Hz) の震度増分の精算値と近似値

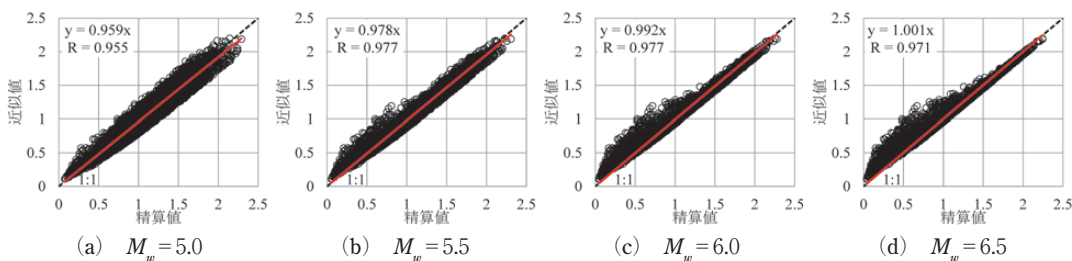


図4 プレート内地震 ( $f_{max} = 10$  Hz) の震度増分の精算値と近似値

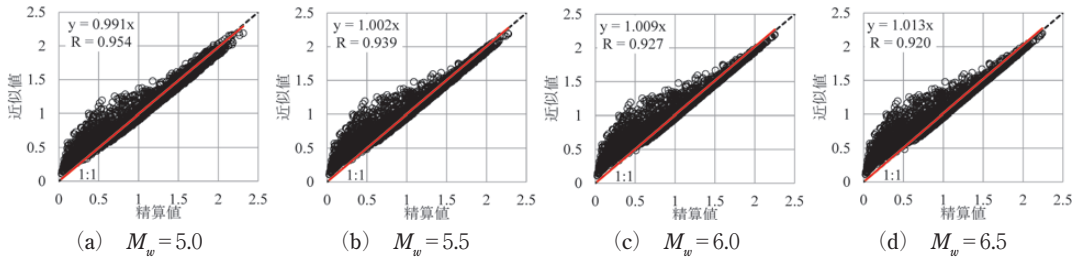


図5 地殻内地震 ( $f_{max} = 6 \text{ Hz}$ ) の震度増分の精算値と近似値

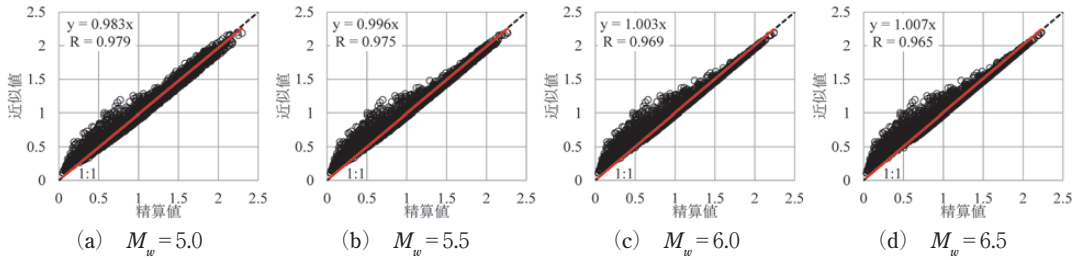


図6 地殻内地震 ( $f_{max} = 10 \text{ Hz}$ ) の震度増分の精算値と近似値

ベクトルのコーナー振動数が低振動数に移動して、低振動数でスペクトル振幅がフラットになる振動数帯が広がるためだと考えられる。

次に、同じ地震タイプ、同じ  $M_w$  の場合の  $f_{max}$  による震度増分の違いを考察すると、 $f_{max}$  が大きい方が相関係数が高い傾向が見られた。これは、 $f_{max}$  が大きい方が高振動数遮断フィルターで低減される範囲が狭くなり、フィルターの項を含んでいない近似式に近い状態となるため、精算値と近似値の違いが小さくなるためだと考えられる。

以上のように、 $M_w$  や  $f_{max}$  よって相関係数の違

いはあるものの、全体的に見て、式(9)と式(21)の相関が高いことから、近似式である式(21)をもとに震度増分の経験的評価式を検討した。

### 3.2 1次のみと20次までの震度増分の比較

本研究では、最大地動速度の評価式<sup>10)</sup>と同じく、サイト増幅特性の1次ピーク振動数のパラメータのみで震度増分予測が可能か調べるために、1次ピークのみと20次までピークを有する場合の震度増分近似値を比較した。

図7に1次ピーク振動数のみと20次までピーク

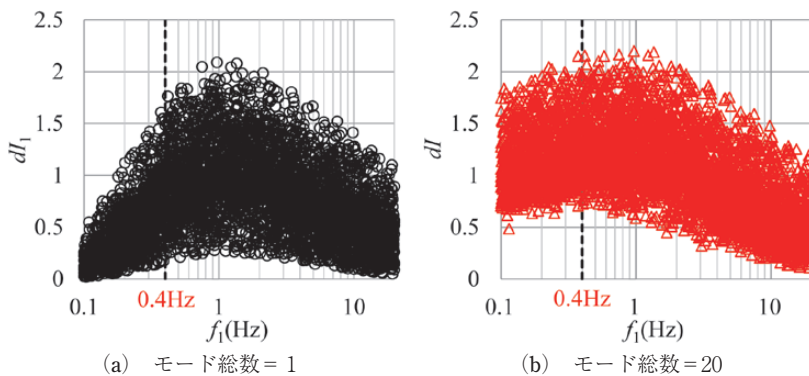


図7  $f_1$  と震度増分近似値  $dI_1$ ,  $dI$  の対応

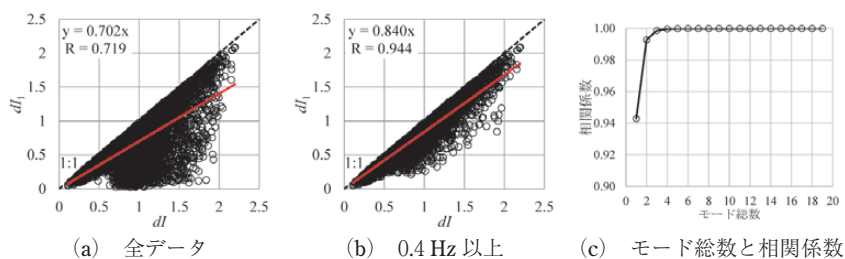


図8  $dI$  と  $dI_1$  の対応, およびモード総数と相関係数の関係

を有するサイト増幅特性を対象とした場合の,  $f_1$  と震度増分近似値の対応を示す。図中の黒い破線は, 後述の本研究で対象とした地震観測点のサイト増幅特性の  $f_1$  の下限値0.4 Hzを表している。同図を見ると, 低振動数側ほど1次ピーク振動数のみの震度増分  $dI_1$  と20次までの震度増分  $dI$  の違いが大きくなる傾向が見られ, 特に1 Hzよりも低振動数で震度増分の違いが顕著になっている。

図8 (a), (b) に全データと  $f_1=0.4$  Hz 以上の場合について, モード総数=20の震度増分  $dI$  と, 1次ピーク振動数のみ(モード総数=1)に対応する震度増分  $dI_1$  の対応を示す。同図に,  $dI$  と  $dI_1$  の関係を原点を通る回帰直線で表したものと, 回帰直線を求めた際に得られた関係式と相関係数を合わせて示す。また, 図8 (c) に図8 (b) のモード総数が1~19のときの回帰直線の相関係数を示す。

図8を見ると, (a) の全データを対象とした場合は  $dI$  と  $dI_1$  のばらつきが大きいが, (b) の0.4 Hz 以上の場合は, 関係式の相関係数が0.947という高い値であり, 全体的に見てばらつきが小さい。

(c) を見ると, モード総数が2以上になると相関係数が0.99以上となっているが, 1次ピーク振動数のみでも相関係数が十分高く, また, 式(21)をもとに, モード総数が2以上の震度増分評価式を導くと, 評価式が非常に複雑になり, 利用が困難になるため, 本研究では, 1次ピーク振動数のみを用いて震度増分評価を行った。

## 4. 解析データ

### 4.1 解析対象地震と地震観測点

図9に解析対象とした地震の震央と地震観測点の分布, 表1に解析対象地震の情報を示す。表1

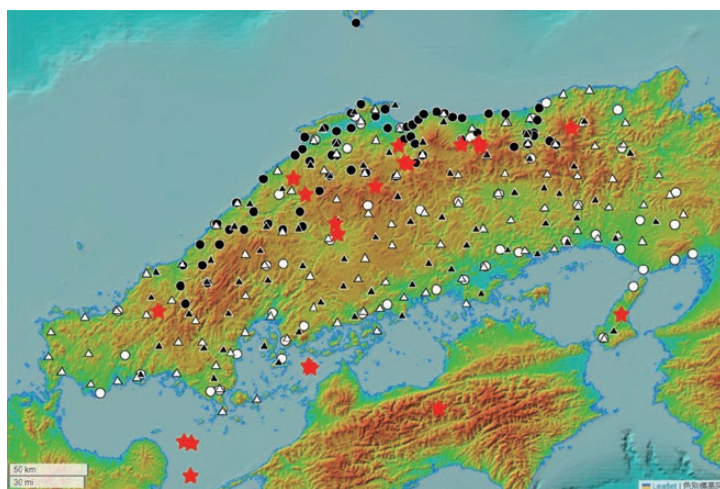


図9 地震観測点と震央分布 (★: 震央, ○: 気象庁, ●: 自治体, △: K-NET, ▲: KiK-net)



表1 地震の諸元

No.	発生日時	震央地名	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	$M_{JMA}$	$M_w$	地震タイプ
1	6/25/1997 18:50	山口県中部	34.4400	131.6650	8	6.6	5.8	地殻内
2	9/4/1997 5:15	鳥取県西部	35.2617	133.3767	9	5.5	5.2	地殻内
3	5/23/1998 4:49	伊予灘	33.7033	131.8417	86	5.4	5.5	プレート内
4	10/6/2000 13:30	鳥取県西部	35.2733	133.3483	9	7.3	6.6	地殻内
5	10/8/2000 13:17	鳥根県東部	35.1383	133.1500	7	5.6	5.1	地殻内
6	10/8/2000 20:51	鳥根県東部	35.3683	133.3100	8	5.2	5.0	地殻内
7	1/12/2001 8:00	兵庫県北部	35.4650	134.4900	11	5.6	5.2	地殻内
8	3/24/2001 15:27	安芸灘	34.1317	132.6933	46	6.7	6.8	プレート内
9	3/26/2001 5:40	安芸灘	34.1167	132.7083	46	5.2	5.1	プレート内
10	9/16/2002 10:10	鳥取県中部	35.3700	133.7383	10	5.5	5.1	地殻内
11	9/26/2006 7:03	伊予灘	33.5050	131.8833	70	5.3	5.3	プレート内
12	4/26/2007 9:02	愛媛県東予	33.8883	133.5833	39	5.3	5.0	プレート内
13	6/4/2011 1:57	鳥根県東部	35.0950	132.6700	11	5.2	4.9	地殻内
14	11/12/2011 19:16	広島県北部	34.8717	132.8933	12	5.4	5.2	地殻内
15	4/13/2013 5:33	淡路島付近	34.4183	134.8283	15	6.3	5.8	地殻内
16	3/14/2014 2:06	伊予灘	33.6917	131.8900	78	6.2	6.3	プレート内
17	10/21/2016 14:07	鳥取県中部	35.3800	133.8550	11	6.6	6.2	地殻内
18	10/21/2016 14:53	鳥取県中部	35.3600	133.8667	9	5.0	4.7	地殻内
19	4/9/2018 1:32	鳥根県西部	35.1833	132.5867	12	6.1	5.6	地殻内
20	6/26/2018 17:00	広島県北部	34.9300	132.8717	12	5.0	4.6	地殻内

の  $M_{JMA}$  は気象庁<sup>20)</sup>,  $M_w$  は F-net<sup>21)</sup> の値である。地震は1997年～2018年に中国地方とその周辺地域で発生した20地震(地殻内地震は13, プレート内地震は7)であり,  $M_{JMA}$  は5.0~7.3, 震源深さは7~86 km である。地震観測点の内訳は K-NET105地点, KiK-net71地点, 気象庁51地点, 鳥取県自治体32地点, 鳥根県自治体44地点の計303地点であり, 各地震観測点で得られた地表の地震波形から計測震度や加速度フーリエスペクトルを求めた。

#### 4.2 地震観測記録の選定条件

地震観測記録の選定にあたり, 解析対象とした地震観測点の震源距離の上限を福島・田中の距離減衰式<sup>22)</sup> から計算される最大地動加速度が  $10 \text{ cm/s}^2$  以上となる震源距離とした。また, 地盤の顕著な非線形化を避けるために, 最大地動加速度が  $200 \text{ cm/s}^2$  未満の地震観測記録を解析対象とし, なおかつ最大地動加速度の下限値を  $1 \text{ cm/s}^2$  とした。選定の結果, 解析に用いた地震観測記録数は1,777となった。

### 5. 地震観測記録による震度増分の評価

#### 5.1 計測震度の距離減衰式と震度増分

震度増分は以下の距離減衰式を回帰分析によって求めることにより, 評価した。

$$I_{ij} = c_{1i} - \log_{10} X_{ij} + \sum_{k=1}^2 c_{2k} X_{ij} + dI_j \quad (28)$$

$I_{ij}$  は  $i$  番目の地震における  $j$  番目の観測点の計測震度である。式 (28) の  $c_{1i}$  は  $i$  番目の地震の震源に依存する係数,  $X_{ij}$  は  $i$  番目の地震における  $j$  番目の地震観測点の震源距離 (km) である。 $c_{2k}$  は距離減衰に関する係数であり,  $k$  が1の場合は地殻内地震, 2の場合はプレート内地震に対応する。 $dI_j$  は  $j$  番目の地震観測点の震度増分である。右辺第2項の幾何減衰項は地殻内地震に対しては, 片岡他<sup>23)</sup>を参考に震源距離80 km を境に変化させて解析を行った。また, 回帰分析では既往研究<sup>24)</sup>でも基準観測点とした KiK-net 神石 (HRSH11) と KiK-net 建部 (OKYH05) を基準観測点とし, これら2地点の  $dI_j$  を0として, 拘束条件とし, 基準観測点に対する相対的な震度増分を求めた。2地

点の  $I_{ij}$  は、既往研究<sup>24)</sup>の地盤情報を用い、重複反射理論によって求めた最下層の解放基盤面の地震波形から計算した。ただし、計算した解放基盤面の地震波形は水平 2 成分であるため、地表面の波形から求めた水平 2 成分と 3 成分の計測震度の関係式に、解放基盤面の水平 2 成分から計算した計測震度を代入することで、解放基盤面の 3 成分に対応する計測震度を求めた。KiK-net 神石 (HRSH11) と KiK-net 建部 (OKYH05) の水平 2 成分から計算した計測震度  $I_2$  と 3 成分から計算した計測震度  $I_{JMA}$  の関係式はそれぞれ以下のとおりである。

$$I_{JMA} = 1.007I_2 \quad (29)$$

$$I_{JMA} = 1.011I_2 \quad (30)$$

## 5.2 解析結果

図10に震度増分  $dI_j$  の分布を示す。 $dI_j$  の分布図を見ると、 $dI_j$  が 0.5 未満が 21 地点、0.5~1.0 は 61 地点、1.0~1.5 は 119 地点、1.5 以上が 101 地点であり、1.5 以上の地点が全体の約 1/3 を占めている。解析対象地点のうち、KiK-net 神辺 (HRSH05)、KiK-net 山東 (HYGH11)、KiK-net 玉野 (OKYH01) の 3 地点は、同定地盤構造を用いて重複反射理論に基づく剥ぎ取り解析によって、地震基盤相当の

層に対する地表の実効加速度の地盤増幅度 ( $A_{s0}/A_{b0}$ ) を求めている<sup>25)</sup>。この地盤増幅度を式 (1) によって、震度増分に換算すると、0.95~1.05 となり、本研究で求めた震度増分  $dI_j$  よりも 0.42~0.88 小さくなった。既往研究<sup>25)</sup>の結果から換算した震度増分は、一次元水平成層地盤に関する値であるが、本研究の震度増分  $dI_j$  には、2次元・3次元的地盤増幅効果が含まれている可能性があり、そのため、震度増分の違いが生じたことが考えられる。

理論式による解析結果では、震度増分は地震規模による大きな違いが見られなかったが、実観測記録から求めた震度増分に対しても同様の傾向が見られるか確認することが必要と考える。そこで、式 (28) で求めた各地震観測点の解析対象地震に対する平均的な震度増分と、ある地震規模の範囲の記録から評価した震度増分を比較することで、地震規模と観測震度増分の関係を考察した。

比較のために、データをプレート内地震、地殻内地震それぞれに対し、 $M_w=5.5$  未満、 $M_w=5.5\sim 5.9$ 、 $M_w=6.0\sim 6.4$ 、 $M_w=6.5$  以上の 4 つに地震規模のグループに分け、各地震観測点のある地震規模の震度増分と、地震規模によって区別しない全地震に対する平均的な震度増分の関係を調べた。ある地震規模の平均的な震度増分  $\bar{dI}_j$  は  $j$  観測点ごとに、以下の 2 つの式から評価した。

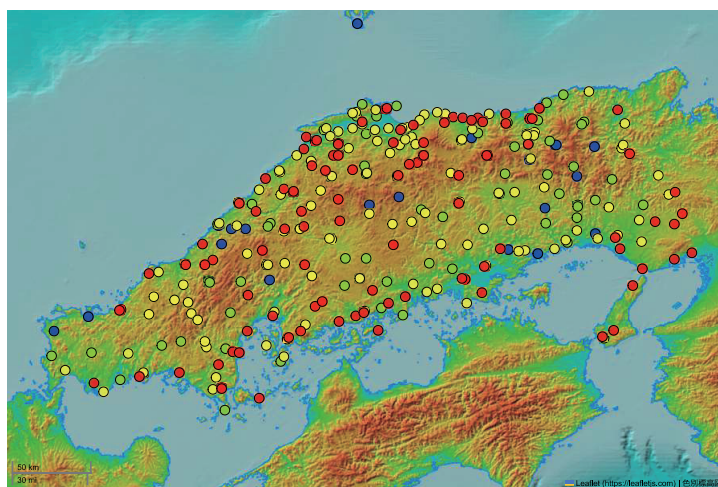
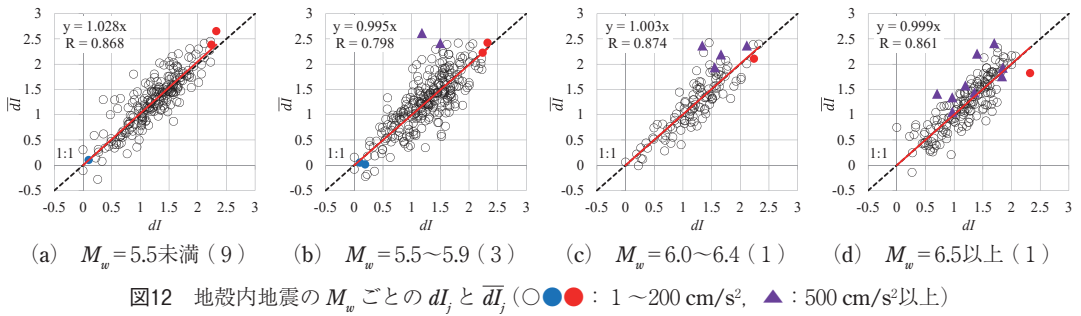
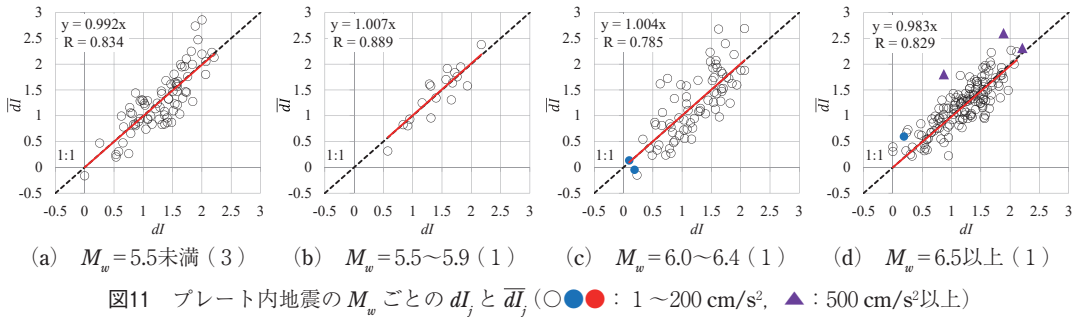


図10  $dI$  の分布 (●0.5~1.0, ●0.5~1.0, ●1.0~1.5, ●1.5~)



$$\overline{dI}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dI_{ij} \quad (31)$$

$$dI_{ij} = I_{ij} - (c_{1i} - \log_{10} X_{ij} + \sum_{k=1}^2 c_{2k} X_{ij}) \quad (32)$$

式 (31) の  $N$  は各地震観測点で対象とした、ある地震規模の数、 $dI_{ij}$  は  $i$  地震における  $j$  観測点の震度増分であり、右辺の回帰係数は先の回帰分析で得られた値を用いた。

図11にプレート内地震の  $M_w$  ごとの  $dI_j$  と  $\overline{dI}_j$ 、図12に地殻内地震の  $M_w$  ごとの  $dI_j$  と  $\overline{dI}_j$  の関係を示す。キャプションの  $M_w$  の数値後ろの括弧内の数字は地震数である。

図11、図12の○は  $dI_j$  の評価に用いたデータの値であり、青い○は、図16に示す震度増分の下位2地点、赤い○は上位2地点、黒い○の地点は上位下位4地点以外のデータ、紫色の△は、最大地動加速度が500 cm/s<sup>2</sup>以上を観測したデータであり、参考を示している。また、図中の赤い実線は、原点を通るように回帰分析で求めた  $dI_j$  と  $\overline{dI}_j$  の関係式から求めたものであり、図の左上に關係式と対応する相関係数  $R$  を示す。なお、回帰分析においては、紫色の△のデータは含まれていない。

これらの図を見ると、 $dI_j$  の評価に用いた○のデータについては、ややばらつきが見られるものの、關係式の係数は1前後であった。各図の全体で見ると、 $dI_j$  と  $\overline{dI}_j$  が1:1前後で対応しており、理論式による解析結果で地震規模による震度増分の違いが小さいことと、調和的な結果となった。一方、最大地動加速度が500 cm/s<sup>2</sup>以上を観測した紫色の△の多くは、1:1の線よりも左側に見られた。

## 6. 地震観測記録によるサイト増幅特性の評価

### 6.1 スペクトルインバージョン

加速度フーリエスペクトルが式 (33) のように、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性の積で表されると仮定し、スペクトルインバージョン<sup>26)</sup>によって各特性を評価した。

$$A_{ij}(f) = S_i(f) \cdot P_{ijk}(f) \cdot G_j(f) \quad (33)$$

$$P_{ijk}(f) = \frac{1}{X_{ij}} \prod_{k=1}^2 \exp\left(-\frac{\pi f X_{ij}}{Q_{sk}(f) V_{sk}}\right) \quad (34)$$

$A_{ij}(f)$  は  $i$  番目の地震における  $j$  番目の地震観測点の加速度フーリエスペクトル、 $S_i(f)$  は  $i$  番目の地震の震源特性、 $P_{ijk}(f)$  は  $i$  番目の地震における  $j$  番目の地震観測点の伝播経路特性であり、 $k$  が 1 の場合は地殻内地震、2 の場合はプレート内地震に対応する。 $G_j(f)$  は  $j$  番目の地震観測点のサイト増幅特性である。式 (34) の  $Q_{sk}(f)$  は S 波に関する  $Q$  値、 $V_{sk}$  は伝播経路における S 波速度である。

スペクトルインバージョンに用いた加速度フーリエスペクトル  $A_{ij}(f)$  の解析対象区間は、川瀬・松尾<sup>27)</sup>をもとに地震の規模に応じて、S 波到達後 5～15秒間の時間区間とした。S 波到達時間は目視で読み取り、波形を切り出す際には切り出す区間の両端に 5% のコサインテーパーを施した。振動数領域は 0.2 Hz～20 Hz を対象とし、バンド幅 0.1 Hz の Parzen window をかけた。スペクトルは水平 2 成分の自乗和平方根値とした。幾何減衰項は式 (28) と同じように扱った。

式 (33) の各特性は両辺の常用対数を取り、連立方程式を解くことによって求めた。ただし、 $S_i(f)$  と  $G_j(f)$  にトレードオフの関係があるので、式 (22) を求めた際と同じく、KiK-net 神石 (HRSH11) と KiK-net 建部 (OKYH05) を基準観測点に定め、後述の SH 波理論伝達関数をこれらの地震観測点の拘束条件として用いた。スペクトルインバージョンで得られた他の地震観測点のサ

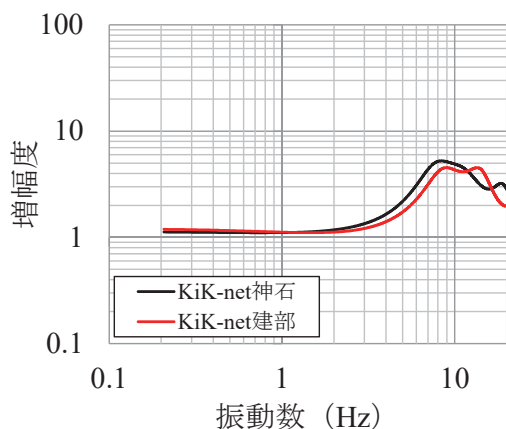


図13 基準観測点の SH 波理論伝達関数 (2E)

イト増幅特性はこれら 2 地点に対する相対的な値である。なお、これら 2 つの地震観測点の最下層と地震基盤の S 波速度と密度が異なるので、 $G_j(f)$  に対してインピーダンス比による補正を行った。地震基盤の S 波速度と密度は J-SHIS<sup>28)</sup> の値、それぞれ、3400 m/s、2.75 t/m<sup>3</sup> を用いた。図13 に拘束条件とした KiK-net 神石 (HRSH11) と KiK-net 建部 (OKYH05) の SH 波理論伝達関数 (2E) を示す。

## 6.2 解析結果

図14にサイト増幅特性の 1 次ピーク振動数  $f_1$ 、図15に 1 次ピーク振幅  $\alpha_1$  の分布を示す。図14のサイト増幅特性の 1 次ピーク振動数  $f_1$  の分布を見ると、 $f_1$  が 1 Hz 未満の地点は、鳥取県と島根県の沿岸部や兵庫県南部で多く見られる。10 Hz 以上の地点はいずれも山間部に位置している。1～10 Hz の地点が最も多く全体の 81% を占めており、次に多いのが 1 Hz 未満で 17%、10 Hz 以上の地点は 3% であった。

図15に示すサイト増幅特性の 1 次ピーク振幅  $\alpha_1$  の分布を見ると、増幅度が 5 未満が 42 地点、5～10 が 94 地点、10～15 が 80 地点、15 以上が 87 地点であり、半数以上の地点で増幅度が 10 以上であった。

図16に震度増分  $dI$  上位 2 地点と下位 2 地点のサイト増幅特性を示す。 $dI$  上位 2 地点は JMA 豊岡 (EA3) と K-NET 鹿野 (TTR004 (移設後)) であり、それぞれ 2.32、2.24 であった。両地点ともサイト増幅特性の 1 Hz 前後の増幅度が大きく、最大値は 30 以上となっている。K-NET 鹿野 (TTR004 (移設後)) は基盤が窪地状になっている場所に位置しており<sup>29)</sup>、基盤形状がサイト増幅特性の 1 Hz 前後での大きな増幅に影響している可能性がある。下位 2 地点の浜田市弥栄町 (82045) と K-NET 長門 (YMG004) の震度増分  $dI$  の値は、0.10 と 0.19 であり、この 2 地点のサイト増幅特性は対象振動数全体で増幅度が小さい。

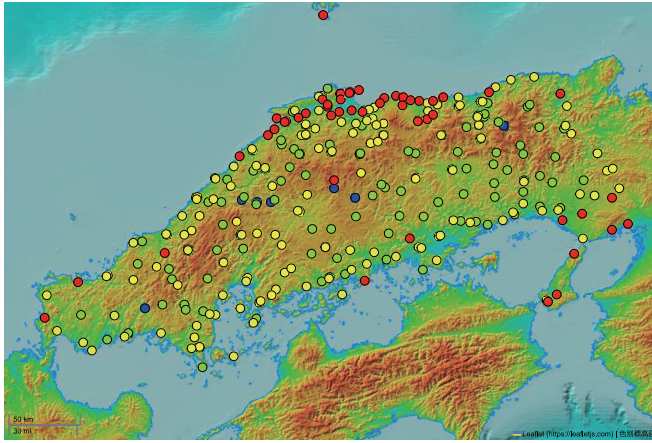


図14  $f_1$ の分布 (●10~, ●5~10, ●1~5, ●~1)

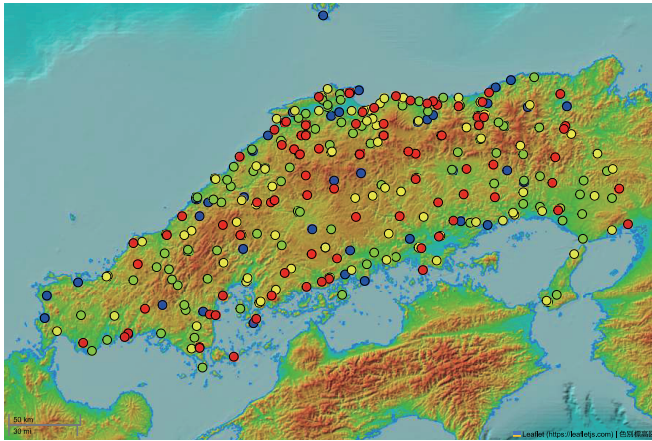


図15  $\alpha_1$ の分布 (●~5, ●5~10, ●10~15, ●15~)

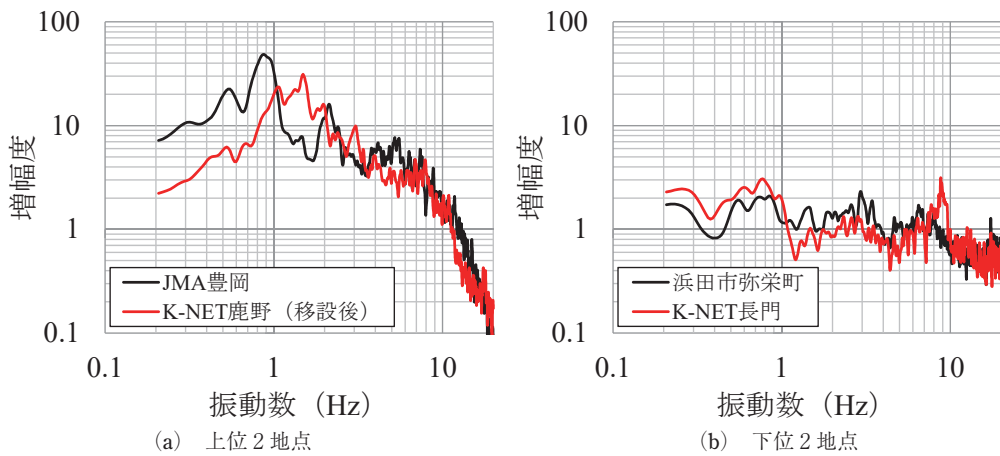


図16  $dI$  上位2地点と下位2地点のサイト増幅特性

## 7. 地震観測記録から求めたサイト増幅特性による震度増分評価式の検討

本章では地震観測記録から求めたサイト増幅特性の1次ピークのパラメータを用いて、回帰分析によって震度増分評価式を求めた。まず、1次モードのみ考慮し、式(21)において、 $G_{01} = 1$ として、右辺を展開すると次のようになる。

$$dI = -\log_{10}(h_1) + 2\log_{10}(f_1) + \log_{10}(f_p) + \log_{10}(h_1 f_p + f_1) - 2\log_{10}(f_p^2 + 2h_1 f_1 f_p + f_1^2) \quad (35)$$

式(35)の右辺第2項と第4項に $f_1$ が含まれており、両者の相関関係により、多重共線性が生じ、回帰分析に悪影響を及ぼす恐れがある。図17に、サイト増幅特性の1次ピーク振動数の範囲0.4～20 Hzについて、 $\log_{10}(f_1)$ と $\log_{10}(h_1 f_p + f_1)$ の対応を示す。両者の関係式を回帰分析で求めた際に得られた相関係数が0.99以上の値となり、強い相関が見られた。このように式(35)の右辺第2項と第4項に多重共線性が生じたため、震度増分評価式を求める際に第2項を無視した。

また、式(12)において、1次モードのみ考え、 $G_{01} = 1$ 、 $f = f_1$ とすると、次式のように $f = f_1$ に対応する増幅度が $h_1$ に反比例することから、サイト増幅特性の1次ピーク振幅 $\alpha_1$ が $h_1$ に反比例

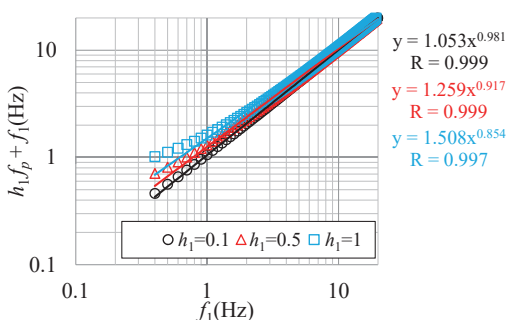


図17 式(35)の右辺第2項(横軸)と第4項(縦軸)の対応

すると仮定した。

$$G_1(f_1) = \sqrt{\frac{f_1^4}{(f_1^2 - f_p^2)^2 + 4h_1^2 f_1^4}} = \frac{1}{2h_1} \quad (36)$$

式(35)において、 $\alpha_1 = s/h_1$ として、回帰式の形で表すと次式となる。

$$dI = c_1 + c_2 \log_{10}(\alpha_1) + c_3 \log_{10}(f_p s / \alpha_1 + f_1) + c_4 \log_{10}(f_p^2 + 2f_1 f_p s / \alpha_1 + f_1^2) \quad (37)$$

$c_1 \sim c_4$ は回帰係数、 $s$ は定数である。基準点を除いた302地点のサイト増幅特性の1次ピーク振動数を式(37)の $f_1$ 、ピーク振幅を $\alpha_1$ 、震度増分を $dI$ として用い、定数 $s$ を変化させ、震度増分の観測値と式(37)による予測値の誤差二乗和が最小になるようにして回帰係数や $s$ を決定した。 $f_p$ は0.62 Hzに固定した。

図18に地震観測記録から評価した震度増分(観測値)と式(37)によって求めた予測値の対応、表2に式(37)の係数や相関係数、RMSE(二乗平均平方根誤差)を示す。図18の赤い直線は、図中に示す観測値と予測値の回帰式から求めたもの

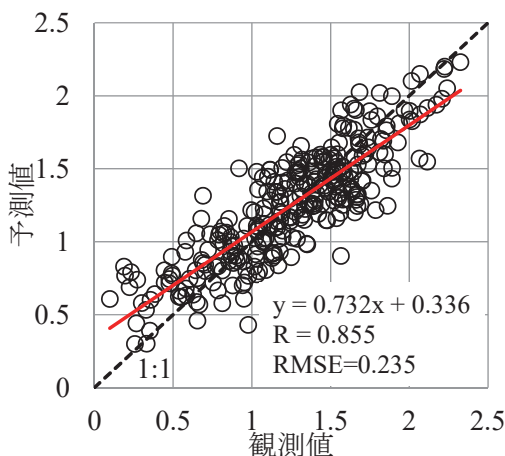


図18 震度増分の観測値と式による予測値の対応

表2 式(37)の回帰係数と定数、および、相関係数とRMSE

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$s$	相関係数	RMSE
0.663	1.141	3.707	-2.309	0.08	0.855	0.235

である。図18を見ると観測値と予測値のばらつきが見られるものの、9割以上のデータが観測値と予測値の誤差が0.5未満である。

以上の検討結果から、サイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅のみをパラメータとした式(37)の震度増分評価式によって、地震観測記録による震度増分を精度良く評価できることが明らかになった。

### 8. 微動 H/V による震度増分評価式の検討

#### 8.1 微動 H/V の1次ピークのパラメータ

7章の検討でサイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅のみで精度良く震度増分を評価できることが明らかになったが、ここでは、サイト増幅特性が不明な地点の震度増分を評価するために、微動 H/V の1次ピークのパラメータを用いた震度増分評価式を検討した。

これまで、微動 H/V とサイト増幅特性やS波の理論伝達関数などのピーク振動数の対応を調べた研究が複数行われており、コントラストの小さな地盤を除いて、1次ピーク振動数同士が対応することが報告されている<sup>30-34</sup>。ピーク振幅については、研究によって相違があるが、微動 H/V とサイト増幅特性やS波の理論伝達関数などのピーク振幅に相関が見られることが指摘されている<sup>30-32,35</sup>。本論文の基礎となった、著者らの研究でも、微動 H/V とサイト増幅特性の1次ピーク振動数の相関が高く、ピーク振幅は、ばらつきがあるものの相関が見られたが<sup>10</sup>、本研究と著者らの研究<sup>10</sup>では、解析対象とした地震観測点や地震が異なることから、改めて、微動 H/V とサイト増幅特性の1次ピーク振動数やピーク振幅の関係を調べた。

表3に本研究で対象とした微動観測データの情報を示す。微動観測データは、震度増分やサイト増幅特性の解析対象とした地震観測点のうち、69地点で得られたものであり、鳥取県などの地震観測点で測定したデータ<sup>36</sup>や鳥根県大田市のデータ<sup>37</sup>、先名他<sup>38</sup>による23地点のデータから構成されている。微動 H/V は常時微動波形から20秒間または40秒間を10区間前後取り出し、スペクトルは対数

表3 微動データの内訳

県	観測網	データ数
鳥取県	気象庁	1
	自治体	32
	K-NET	9
	KiK-net	6
鳥根県	自治体	1
	K-NET	17
岡山県	KiK-net	1
広島県	K-NET	1
	KiK-net	1

型ウィンドウ(係数30)<sup>30</sup>により平滑化して求めた。

図19に解析対象とした69地点のサイト増幅特性の1次ピーク振動数  $f_1$  と微動 H/V の1次ピーク振動数  $f_m$  の対応を示す。この図では、著者らの研究をもとに、 $\alpha_1$ が15未満、15以上に分けて  $f_1$  と  $f_m$  の対応を示した。また、 $f_1$  と  $f_m$  の常用対数値の関係式を線形回帰で求め、得られた回帰式と相関係数 R を示す。回帰式と相関係数 R は69地点に対する値である。図を見ると、 $\alpha_1$ が15以上の場合は  $f_1$  と  $f_m$  が概ね1対1で対応しているものの、15未満では両者にばらつきが見られる。 $\alpha_1$ が小さい地点では1次ピーク振動数に対応する層のコントラストが小さいため、微動 H/V の1次ピークに明瞭なピークが見られず、より高い振動数のピークを、1次ピークと判別したために、ばらつきが生じた可能性がある。

続いて、サイト増幅特性の1次ピーク振幅  $\alpha_1$

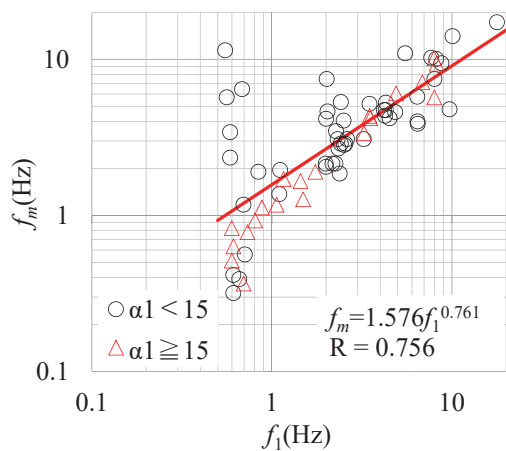


図19  $f_1$  と  $f_m$  の対応

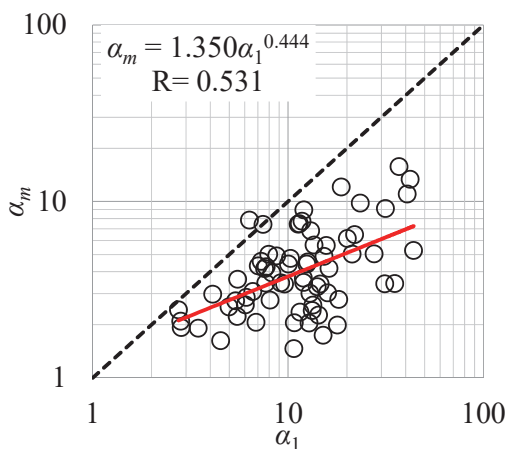
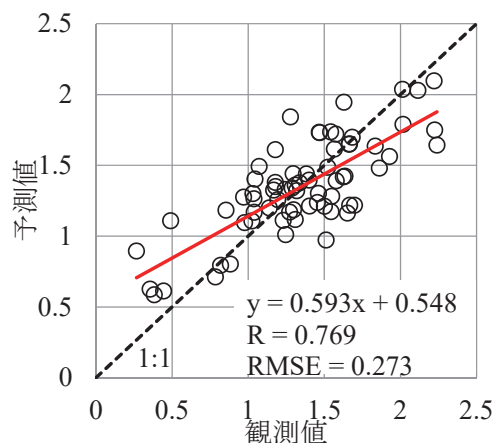
図20  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の対応

図21 震度増分の観測値と式 (38) による予測値の対応

表4 式 (38) の回帰係数と定数, および, 相関係数と RMSE

$c_{1m}$	$c_{2m}$	$c_{3m}$	$c_{4m}$	$s_m$	相関係数	RMSE
1.586	0.945	6.2	-3.719	1.048	0.769	0.273

と微動 H/V の 1 次ピーク振幅  $\alpha_m$  の対応を調べるために, 図19と同様に  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の常用対数値を線形回帰し, 関係式と相関係数を求めた。図20に  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の対応を示す。同図を見ると, ばらつきがあるものの,  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  に正の相関が見られる。

## 8.2 震度増分評価式

震度増分評価式は, 式 (37) の  $f_1$  を  $f_m$ ,  $\alpha_1$  を  $\alpha_m$  に置き換えた次式とした。

$$dI = c_{1m} + c_{2m} \log_{10}(\alpha_m) + c_{3m} \log_{10}(f_\beta s_m / \alpha_m + f_m) + c_{4m} \log_{10}(f_m^2 + 2f_m f_\beta s_m / \alpha_m + f_\beta^2) \quad (38)$$

$c_{1m} \sim c_{4m}$  は回帰係数,  $s_m$  は定数である。サイト増幅特性を対象とした場合と同様に  $f_\beta$  を 0.62 Hz に固定し, 式 (38) による予測値と観測値の誤差二乗和が最小になるように, 回帰分析によって,  $c_{1m} \sim c_{4m}$  と  $s_m$  を求めた。

図21に式 (38) によって求めた震度増分の予測値と観測値の対応, 表4に式 (38) の回帰係数,  $s_m$  と相関係数, RMSE を示す。図中の赤い直線は, 観測値と予測値の回帰式から求めたものである。式 (37) に比べると RMSE の値が大きくなったも

の, 9割以上のデータが観測値と予測値の誤差が0.5未満であった。サイト増幅特性が評価できない地震計未設置点や正確な S 波速度構造が不明な地点でも, 微動 H/V の 1 次ピークのパラメータのみから, 簡易に震度増分を精度良く評価できる式 (38) の工学的価値は高いと考える。今後は, 震度増分を評価した他の地震観測点についても, 微動データを取得して, 式 (38) に必要なデータを蓄積する予定である。

## 9. 結論

本論文では, 正確な平均 S 波速度構造が不明な地点でも震度増分を精度良くかつ簡便に評価するために, サイト増幅特性と微動 H/V の 1 次ピークのパラメータを用いた震度増分評価式を提案した。

まず, 著者らが提案した地震動スペクトルと震度増分の関係式を簡略化した近似式を導出するとともに, 様々な地震規模や擬似サイト増幅特性に対して震度増分の精算値と近似値を計算し, 両者の対応が良いことを示した。また, 本研究で対象とする地震観測点については, サイト増幅特性の



1次ピークのみ考慮すれば、震度増分をある程度評価できることを示した。

次に中国地方などの地震観測点を対象に震度増分やサイト増幅特性を評価するとともに、先に求めた近似式をもとに、サイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする経験的な震度増分評価式を求め、精度良く震度増分を評価できることを示した。

最後に微動 H/V の1次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする経験的な震度増分評価式を求めた結果、サイト増幅特性を用いた場合に比べて、予測精度が低くなったものの、良好な精度で震度増分を評価できることを明らかにした。

今後は、震度増分を評価した他の地震観測点についても、常時微動観測を行い、震度増分評価式の構築に必要なパラメータを蓄積するとともに、強震時の地盤の非線形化の影響を考慮した震度増分評価式を検討する予定である。また、サイト増幅特性を表す関数を変更するなどして、2次以上のピークのパラメータを反映できる評価式を検討する。

## 謝辞

本研究では気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net, 鳥取県、島根県の地震観測記録を使用させて頂きました。地盤構造の同定の際には、安井譲先生ご提供のプログラムを使用させて頂きました。一部の図の作成において、国土地理院の地理院タイル<sup>39)</sup>を利用して頂きました。標高図の海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成しました。3名の査読者の方々から貴重なご意見を頂きました。記して御礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) 中央防災会議, 防災対策推進検討会議, 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震の被害想定について (第一次報告), 2012.
- 2) 内閣府, 首都直下地震モデル検討会: 首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 2013.
- 3) 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図, [https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/shm\\_report/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/), 2023年3月2日.
- 4) 内閣府: 地震動予測地図の作成への取り組みについて, <https://www.bousai.go.jp/jishin/epcf/epcf2/14-03.html>, 2023年8月28日.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.71-78, 1992.
- 8) 藤本一雄・翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 9) 山口亮・翠川三郎: 地盤の平均 S 波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良, 日本地震工学会論文集, Vol.11, No.3, pp.85-101, 2011.
- 10) 西川隼人・野口竜也・宮島昌克・香川敬生: 微動 H/V の1次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討, 日本地震工学会論文集, 第19巻, 第7号, pp.7\_41-7\_55, 2019.
- 11) 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, Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.
- 12) 西川隼人・池本敏和・宮島昌克: 震度増分に及ぼすサイト増幅特性と震源スペクトルの影響に関する基本的考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第75巻, 第4号, pp.I\_373-I\_382, 2019.
- 13) 気象庁: 震度を知る, pp.49-55, ぎょうせい, 1996.
- 14) 西川隼人・宮島昌克: 2011年東北地方太平洋沖地震における最大加速度, 計測震度と地震動スペクトルの関係, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号, pp.4\_94-4\_103, 2012.
- 15) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.73, pp.1865-1894, 1983.

- 16) 中村亮一：伝播経路の 3 次元減衰構造と強震動、第38回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.23-32，2010。
- 17) Hanks, T., and Kanamori, H.: A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. B5, pp.2348-2350, 1979.
- 18) 壇一男・佐藤俊明：断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測，日本建築学会構造系論文集，第63巻，第509号，pp.49-60，1998。
- 19) 仲野健一・川瀬博・松島信一：スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その 2 分離した特性に対する詳細分析，日本地震工学会論文集，第15巻，第1号，pp.38-59，2015。
- 20) 気象庁：地震月報（カタログ編），<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>，2022年9月26日。
- 21) 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net：<https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>，2022年10月17日。
- 22) 福島美光・田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂，地震学会1992年秋季大会講演予稿集，p.116，1992。
- 23) 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，第62巻，第4号，pp.740-757，2006。
- 24) 西川隼人・野口竜也・宮島昌克・香川敬生：自治体観測点を含む中国地方の地震観測点のサイト増幅特性評価，土木学会第74回年次学術講演会講演概要集，CS12-12，2019。
- 25) 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。
- 26) 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 第2輯，Vol.39, No.4, pp.579-593, 1986。
- 27) 川瀬博・松尾秀典：K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応，日本地震工学会論文集，第4巻，第4号，pp.126-145, 2004。
- 28) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS，<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>，2022年10月15日。
- 29) 野口竜也・上野太士・西川隼人・吉田昌平・香川敬生：鳥取県鹿野地域の地盤構造および地盤震動特性，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），第73巻，第4号，pp.I.894-I.906, 2017。
- 30) 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骨化とその適用例，土木学会論文集，No.525, pp.247-259, 1995。
- 31) 若松邦夫・安井譲：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，Vol.60, No.471, pp.61-70, 1995。
- 32) 年縄巧・西田秀明・翠川三郎・阿部進：横浜市高密度強震計ネットワーク観測点における強震動と常時微動のスペクトル特性の比較，土木学会論文集，No.640/I-50, pp.193-202, 2000。
- 33) 長尾毅・山田雅行・野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集，Vol.56A, pp.324-333, 2010。
- 34) 長尾毅・山田雅行・野津厚：常時微動 H/V スペクトルを構成する波動成分に関する一解釈，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No.1, pp.48-62, 2012。
- 35) 野津厚・若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性，港湾空港技術研究所資料，No.1244, 2005。
- 36) 野口竜也・香川敬生：微動探査による鳥取県内の強震観測地点における地盤震動特性の把握および地盤構造の推定，第14回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.3631-3638, 2014。
- 37) 野口竜也・香川敬生・吉田昌平・山口仁：2018年鳥根県西部の地震による被害地域での臨時余震観測および微動観測，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），第75巻，第4号，pp. I.701-I.713, 2019。
- 38) 先名重樹・大井昌広・藤原広行：微動探査データの収集管理とデータベースシステムの構築（K-NET, KiK-net 地点およびつくば市における微動探査結果を例として），第116回物理探査学会学術講演会，p.5, 2007。
- 39) 国土地理院ホームページ：地理院タイル一覧，<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>，2022年10月18日。

（投稿受理：2023年9月1日  
訂正稿受理：2024年2月26日）

## 要 旨

本論文では、正確な平均 S 波速度構造が不明な地点でも震度増分を精度良く評価するために、微動 H/V の 1 次ピークのパラメータを用いた震度増分評価式を提案した。まず、著者らが提案した地震動スペクトルと震度増分の関係式を簡略化した近似式を導出するとともに、様々な地震規模や擬似サイト増幅特性に対して震度増分の精算値と近似値を計算し、両者の対応が良いことを明らかにした。また、本研究で対象とする地震観測点については、サイト増幅特性の 1 次ピークのみ考慮すれば、震度増分をある程度評価できることを示した。次に中国地方などの地震観測点を対象に、サイト増幅特性の 1 次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする経験的な震度増分評価式を求め、精度良く震度増分を評価できることを示した。最後に微動 H/V の 1 次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする経験的な震度増分評価式を求めたところ、サイト増幅特性を用いた場合に比べて、予測精度が低くなったものの、良好な精度で震度増分を評価することができた。