

### 3.2 静岡県内のサイト増幅特性

静岡県はその全域が東海地震により強い地震動を受けると想定されている。地震動特性は表層地盤の影響で大きく変わることから、観測記録などを基にサイト特性を把握しておくことは重要である。ここでは、共同強震観測の観測記録、静岡県内の K-NET<sup>1)</sup> 及び気象庁の観測記録を用いたスペクトルインバージョン解析により、静岡県内の観測点について、サイトの増幅特性の評価を行った。

#### 3.2.1 対象地震及び観測点の概要

解析対象地震は共同強震観測点において記録された地震のうち、SNP を中心に半径約 60 km に入る 11 地震とした。マグニチュードは 3.8 から 5.7、震源深さは 5 km から 34 km である。観測点は共同強震観測点が、地震数が少ない KYM を除いた 8 観測点、K-NET 及び気象庁観測点が 42 観測点の計 50 観測点である。対象とした地震の諸元を表 3.2.1.1 に、対象地震と観測点の分布を図 3.2.1.1 に示す。

#### 3.2.2 解析手法

観測記録のフーリエスペクトルから、震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性を分離するために、振動数領域の線形インバージョン解析 [岩田・入倉(1986)<sup>2)</sup>] を用いて、サイト増幅特性を抽出する。記録の S 波部分のフーリエスペクトルが式 3.2.2-1 で表されると仮定する。

$$F_{ij}(f) = S_i(f) X_{ij}^{-1} \exp\left(-\frac{\pi f X_{ij}}{Q(f) V_s}\right) G_j(f) G_0(f) \quad (\text{式 3.2.2-1})$$

$F_{ij}$  は  $i$  地震による  $j$  観測点のスペクトル、 $S_i$  は  $i$  地震の震源スペクトル、 $X_{ij}$  は  $i$  地震と  $j$  観測点の震源距離、 $Q$  は伝播経路の  $Q$  値、 $V_s$  は伝播経路の平均的 S 波速度、 $G_j$  は  $j$  観測点の相対的増幅特性、 $G_0$  は基準点の増幅特性、 $f$  は周波数である。

基準点は地質年代が比較的古く、また、フーリエスペクトルの振幅に目立ったピークがないことを条件に、新第三紀の凝灰岩である K-NET の掛川(SZO019)を選択した。また、拘束条件は基準点での地盤特性が 2 となるようにした。

ここで、解析は水平成分を対象とし、Kato et al.(1992)<sup>3)</sup> と同様にマグニチュードから時間ウィンドウ ( $T_w$ ) を決め、基線ずれを補正したデータから、下記に示す Cosine テーパ付き矩形タイムウィンドウ (式 3.2.2-2) により S 波部分を切り出した。こうして抽出したデータから、周波数 0.35 Hz から 20 Hz の区間が周波数軸上で等間隔になるよう有限フーリエ変換を用いてスペクトルを求め、水平成分のベクトル和を求めた。なお、観測記録の多くは加速度記録であることから、加速度フーリエスペクトルを解析対象とし、速度記録は加速度に変換した。

$$w(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_s - 0.1T_w \\ \cos^2 \left\{ \frac{\pi(t-t_s)}{2 \times 0.1T_w} \right\} & t_s - 0.1T_w \leq t \leq t_s \\ 1 & t_s \leq t \leq t_s + T_w \\ \cos^2 \left\{ \frac{\pi(t-t_s-T_w)}{2 \times 0.1T_w} \right\} & t_s + T_w \leq t \leq t_s + 1.1T_w \\ 0 & t_s + 1.1T_w \leq t \end{cases} \quad (\text{式 3.2.2-2})$$

$$T_w = \frac{\sqrt{2 \times 10^{M-4.07}}}{3} + 2 = 0.00435 \times 10^{0.5M} + 2 \quad (\text{式 3.2.2-3})$$

ここで、 $T_w$  (式 3.2.2-3) は Sato(1979)<sup>4)</sup> の気象庁マグニチュードから断層を求める経験式[ $S = 10^{(M-4.07)}$ ] にアスペクト比 2:1 を考えて断層長さを算出し、破壊伝播速度  $V_r = 3$  km/s を仮定して求められる破壊時間に 2 秒を加えて算出している。

### 3.2.3 解析結果

インバージョン解析より求められた静岡県内の増幅特性を図 3.2.3.1 に示す。また、11 地震の震源スペクトルを図 3.2.3.2 に、Q 値を図 3.2.3.3 に示す。

JR 静岡駅周辺の観測点の全体的な特徴として、1 Hz 付近ではおおむね 1~8 倍であるが、10 Hz 付近では 1 倍を大きく下回っている観測点が見られる。また、建物内に設置された観測点 (MYK、HN5、SHW、HSZ) では、自由地盤と建物の相互作用による影響が出ているとも考えられる。

静岡駅周辺の観測点 (MYK、HN5、SHW、MBC、SNP) では、2 Hz~3 Hz 付近で山となり、増幅率は 3~4 倍となるが、2 Hz 以下の低周波数では 2 倍程度である。また、静岡地方気象台(静岡)では、2.5 Hz 付近に 8 倍に達する大きなピークが見られ、SZU、K-NET 清水 (SZO013) 及び気象庁の清水観測点(清水)では、周波数 1 Hz 付近から低周波数側の増幅が大きいことが分かる。

SGS では、0.1 Hz~10 Hz の周波数帯でおおよそ 1 倍と増幅率が小さい。これは設置された地盤が基準点の掛川よりも硬く、増幅が小さいためであると考えられる。SGS を基準とすれば、静岡市街地の狭い範囲でも 10 倍近くサイト特性が変化している。

清水観測点では、2 Hz 以上の高周波数で増幅率が急激に落ち込んでいる。これは旧清水市街地周辺の強震観測点を対象とした野津(2003)<sup>5)</sup> の結果でも同様である。軟弱地盤での高周波数における増幅率の低下は、東京湾岸を対象とした山中ほか(1998)<sup>6)</sup> などの中でも報告されている。

震源スペクトルは、防災科学技術研究所における広帯域地震観測網<sup>7)</sup> の地震モーメントを基に計算した結果 (計算には式 3.2.3-2 を使用) と比較した。全般的に対応がよく、大きくはずれるものは少ない。なお、4 番の伊豆半島東方沖の浅い地震では全周波数帯で差が大きく、11 番の静岡県中部の地震では高周波数側の差が大きい。なお、震源スペクトルは、

加速度地震モーメント密度関数 [ Kanamori(1972)<sup>8)</sup> ] (式 3.2.3-1) に変換し、地震基盤相当になるようインピーダンス比を乗じてある。

$$S'(f) = \frac{4\pi\rho V_s^3 S(f)}{R_{\theta\phi}} \quad (\text{式 3.2.3-1})$$

$$M(f) = \frac{(2\pi f_c)^2 M_0}{1 + (f_c/f)^2} \quad (\text{式 3.2.3-2})$$

$$\log M_0 = -3 \log f_c + 23.38 \quad (\text{式 3.2.3-3})$$

ここで、 $S'(f)$  は加速度地震モーメント密度関数 ( $\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2$ )、 $S(f)$  はインバージョンから求められた震源スペクトル ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $\rho$  は密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $V_s$  は震源における  $S$  波速度 ( $\text{km}/\text{s}$ )、 $R_{\theta\phi}$  はラディエーション係数、 $M(f)$  は加速度震源スペクトル ( $\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2$ )、 $M_0$  は地震モーメント ( $\text{dyne}\cdot\text{cm}$ )、 $f_c$  はコーナー周波数 ( $\text{Hz}$ )、 $f$  は周波数 ( $\text{Hz}$ ) である。なお、密度  $\rho$  は  $3.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $S$  波速度  $V_s$  は  $3.5 \text{ km}/\text{s}$ 、ラディエーション係数  $R_{\theta\phi}$  は  $0.63$  と仮定した。また、コーナー周波数  $f_c$  は (式 3.2.3-3) の Takemura *et al.*(1993)<sup>9)</sup> の  $M_0 - f_c$  関係式から推定した。

$Q$  値は、周波数が  $0.7 \text{ Hz}$  付近より高い周波数領域で  $Q = 70 \cdot f$  と対応がよい結果となっている。

また、日本建築学会の「地震荷重」<sup>10)</sup> の中で東海地震を想定した地震動を評価している静岡市内の3つの観測点、駿府公園、大谷、東静岡について、「地震荷重」に記載された地盤モデルを基に次元重複反射理論により地盤増幅率を計算し、インバージョンで求められたサイト増幅特性とを比較して図 3.2.3.4 に示す。なお、計算に用いた地盤モデルは工学的基盤相当層より上のものを使用した。

駿府公園と SNP では、ピークの位置はややずれるものの、周波数  $0.8 \text{ Hz} \sim 5 \text{ Hz}$  で対応がよい。東静岡と HSZ では、周波数  $0.7 \text{ Hz}$  付近の一次ピークが一致し、細かい山谷を別とすれば  $0.5 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$  で対応が良いことが分かる。大谷と SZU では、周波数  $2 \text{ Hz}$  付近の1次のピークの対応は良いものの、 $1 \text{ Hz}$  以下の周波数帯ではインバージョンによるサイト増幅特性が、 $3 \text{ Hz}$  以上の周波数帯では地盤モデルに基づく結果が3倍ぐらい大きい。他の地点も同様であるが、比較を行った地盤モデルが、観測点の真の地盤構造と異なっている可能性に加え、SZU は深さ  $16 \text{ m}$  の立孔の中に設置されており、高周波数での差異が大きくなったと考えられる。また、低周波数側での差異を理解するためには、基準点と SZU の深部構造の違いを評価するなどさらなる検討が必要と考えられる。

### 3.2.4 観測記録による増幅率の妥当性検討

スペクトルインバージョンで得られた増幅率を、インバージョンに用いていない地震の記録で検証を行う。評価に用いる地震は、2004年9月5日の23時57分に紀伊半島の南東沖合で発生した地震 (マグニチュード 7.4、震源深さ  $44 \text{ km}$ ) と、その約4時間50分前の19時07分に発生した前震 (マグニチュード 7.1、震源深さ  $38 \text{ km}$ ) とした。これらの地震

は沈み込むフィリピン海プレートの内部で発生し、近畿地方において震度 5 弱を観測したほか、東北地方南部から九州地方にかけて震度 1 から 4 を観測した。

サイト増幅特性との比較には、紀伊半島沖の前震及び本震の観測記録から求めた基準点に対するフーリエスペクトル比を用いた。スペクトル比の算出手順は次のとおりである。

観測記録の水平動成分を対象とし、基線ずれを補正したデータから *S* 波部分 30 秒間を *Cosine* テーパ付き矩形タイムウィンドウにより切り出した。次に、抽出したデータから周波数軸上で等間隔になるよう有限フーリエ変換を用いてスペクトルを求め、インバージョン解析において基準点とした K-NET の掛川(SZO019)を分母としたスペクトル比を求めた。また、インバージョンで求めたサイト増幅特性は、インバージョン解析の拘束条件として、基準点での地盤特性が 2 となるようにしたことから振幅値に 1/2 を乗じた上で、スペクトル比と比較した。

サイト増幅特性と紀伊半島沖の前震及び本震から求めたスペクトル比の比較結果について、前震を図 3.2.4.1 に、本震を図 3.2.4.2 に示す。これを見ると、前震、本震ともおよその観測点でピークの位置、振幅値ともサイト増幅特性とスペクトル比の対応が良いことが分かる。また、水平動 2 成分での差がないことも分かる。しかしながら、SNP では周波数 10 Hz 付近ではサイト増幅特性とスペクトル比の対応が良いものの、低周波数側ではサイト増幅特性の振幅値とスペクトル比の差が大きくなっていることが分かる。

次に、SNP でのサイト増幅特性とスペクトル比の開きが大きい周波数 2 Hz と 3 Hz の周波数帯において、スペクトル比をサイト増幅特性で除算し、これを対数とした値の空間分布を図 3.2.4.3 に示す。これを見ると、周波数が 2 Hz、3 Hz どちらの周波数帯でも、県内のほとんどの観測点では、サイト増幅特性とスペクトル比の対応が良いことが分かる。しかしながら、御前崎と静岡中心部では、サイト増幅特性とスペクトル比の差が大きいが分かる。ここで、SNP がある静岡市中心部に着目すると、周辺観測点の K-NET 清水(SZO013)や焼津(SZO016)などに比べて、特にスペクトル比の方が小さくなっていることが分かる。

増幅率が大きく異なる地域の波形の性状を見るために、SNP を南北に取り囲む K-NET 清水(SZO013)、焼津(SZO016)の観測点、御前崎を東西に取り囲む K-NET 榛原(SZO18)、浜岡(SZO017)の観測点を選択した。次に、紀伊半島沖の本震での加速度波形から、周波数 1 Hz から 3 Hz のバンドパス・フィルタ処理を行った速度波形を計算し、比較を行ったものを図 3.2.4.4(a)に示す。また、同様の処理を行った 2001 年 4 月 3 日の静岡県中部の地震について比較したものを図 3.2.4.4(b)に示す。これを見ると、紀伊半島沖の本震での SNP、御前崎では取り囲んだ観測点に比べ振幅値が小さいことが分かり、2001 年の静岡県中部の地震では同程度なことが分かる。

以上のことから、SNP、御前崎における周波数 0.35 Hz から 10 Hz 前後の帯域において、サイト増幅特性と観測記録から求められたフーリエスペクトル比の対応が悪いことは、地震波の入射方向と地盤の不整形性の相互作用の影響が考えられるが、今後さらに検討が必要と思われる。

表 3.2.1.1 解析対象地震の諸元

No.	発震年月日		北緯		東経		深さ (km)	M	$\Delta$ (km)	X (km)	静岡 震度	最大 震度		
1	1997.	10. 11	14: 44: 35.70	S OF SURUGA BAY	34°	25.42'	138°	16.35'	34.14	4.9	62	71	3	3
2	1997.	10. 21	19: 55: 25.59	CENTRAL SHIZUOKA PREF	35°	06.98'	138°	13.83'	32.01	4.4	21	38	2	2
3	1998.	04. 05	10: 53: 55.38	AKASHI MOUNTAINS REG	35°	24.39'	138°	16.54'	11.6	4.4	49	50	1	2
4	1998.	05. 03	11: 09: 05.31	E OFF IZU PENINSULA	34°	57.44'	139°	10.74'	4.72	5.7	73	73	2	4
5	1999.	05. 07	21: 48: 25.58	CENTRAL SHIZUOKA PREF	35°	12.58'	138°	20.52'	19.82	4.7	26	33	3	3
6	1999.	05. 08	10: 35: 03.26	CENTRAL SHIZUOKA PREF	35°	13.26'	138°	20.29'	18.97	3.8	27	33	1	2
7	2000.	09. 11	07: 49: 47.10	NEAR NIJIMA ISLAND	34°	30.79'	139°	13.35'	11.14	5.3	92	93	2	5弱
8	2000.	10. 31	04: 20: 37.64	NEAR NIJIMA ISLAND	34°	23.71'	139°	12.45'	12.55	4.7	99	100	1	4
9	2001.	02. 02	08: 10: 06.14	EASTERN YAMANASHI PREF	35°	29.81'	139°	04.48'	17.33	4.2	85	87	2	3
10	2001.	02. 23	07: 23: 47.90	HAMANAKO LAKE REGION	34°	47.40'	137°	33.11'	32.34	4.9	79	85	2	4
11	2001.	04. 03	23: 57: 12.43	CENTRAL SHIZUOKA PREF	35°	01.25'	138°	05.84'	30.34	5.1	27	40	5強	5強

注意)  $\Delta$  (震央距離)、X (震源距離) は駿府公園 (SNP) からの距離。

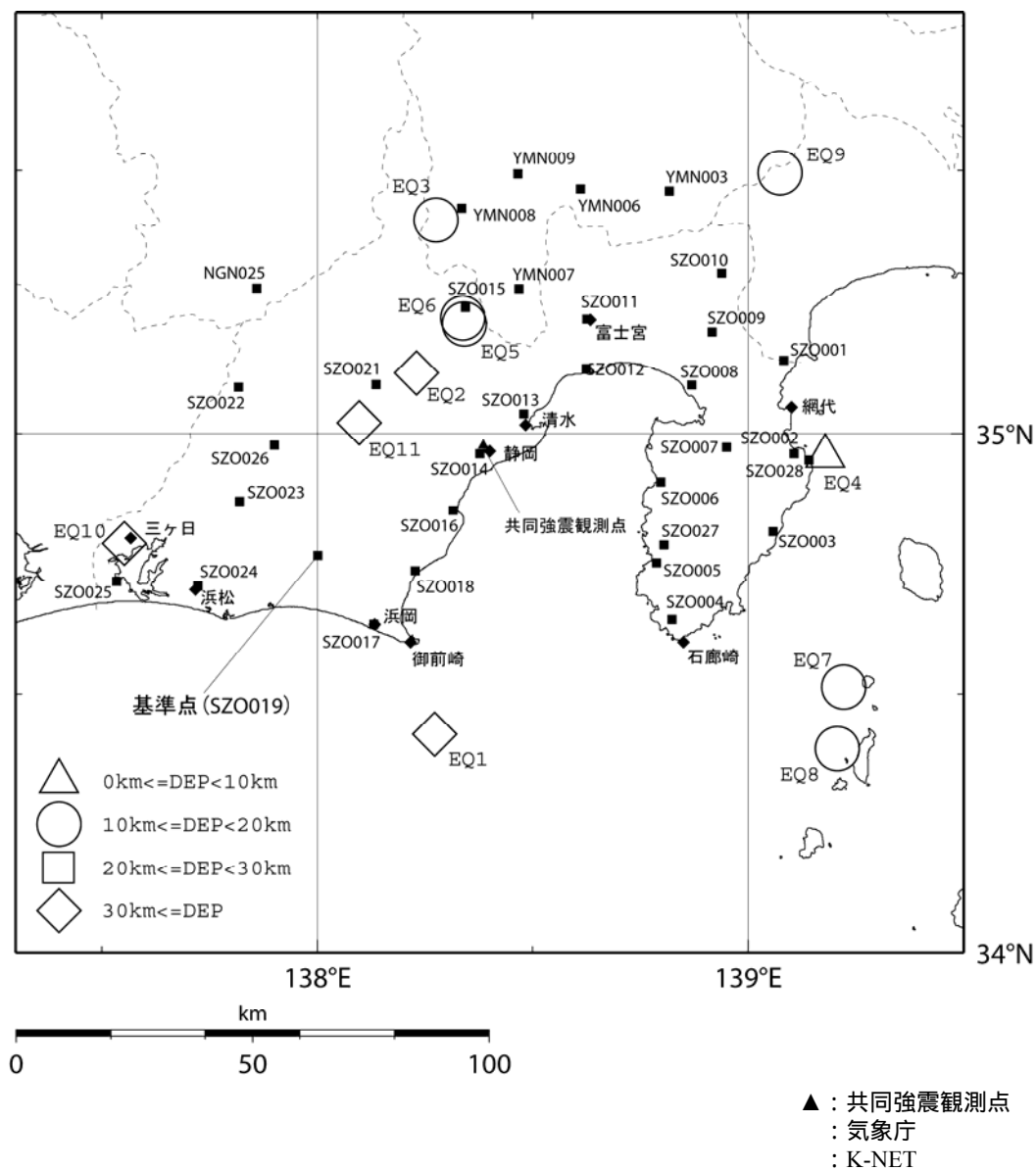


図 3.2.1.1 解析対象地震の震央分布と観測点分布

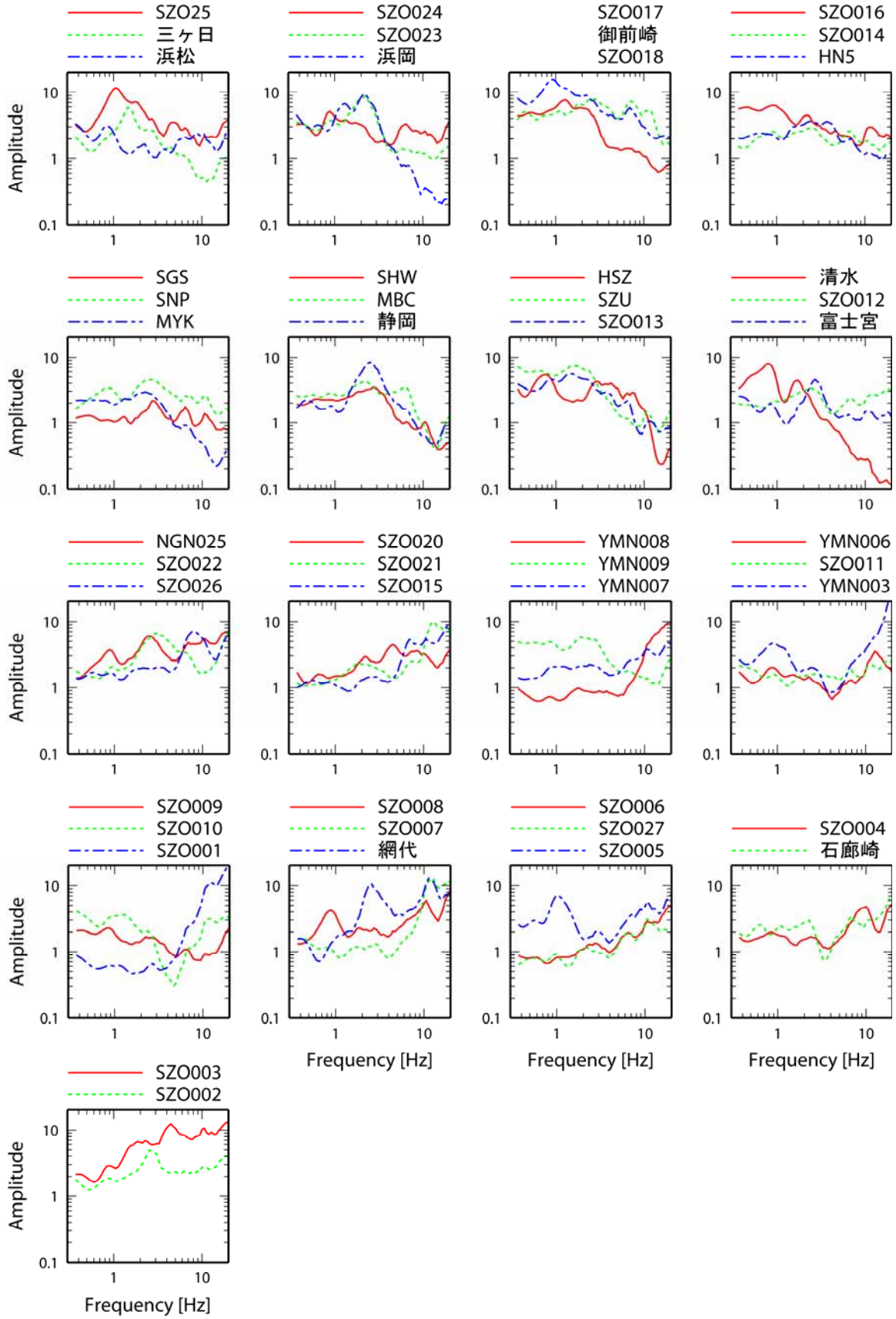


図 3.2.3.1 スペクトルインバージョン解析より求められた静岡県内のサイト増幅特性  
観測点名が日本語は気象庁、サイトコードは共同強震観測点あるいは K-NET

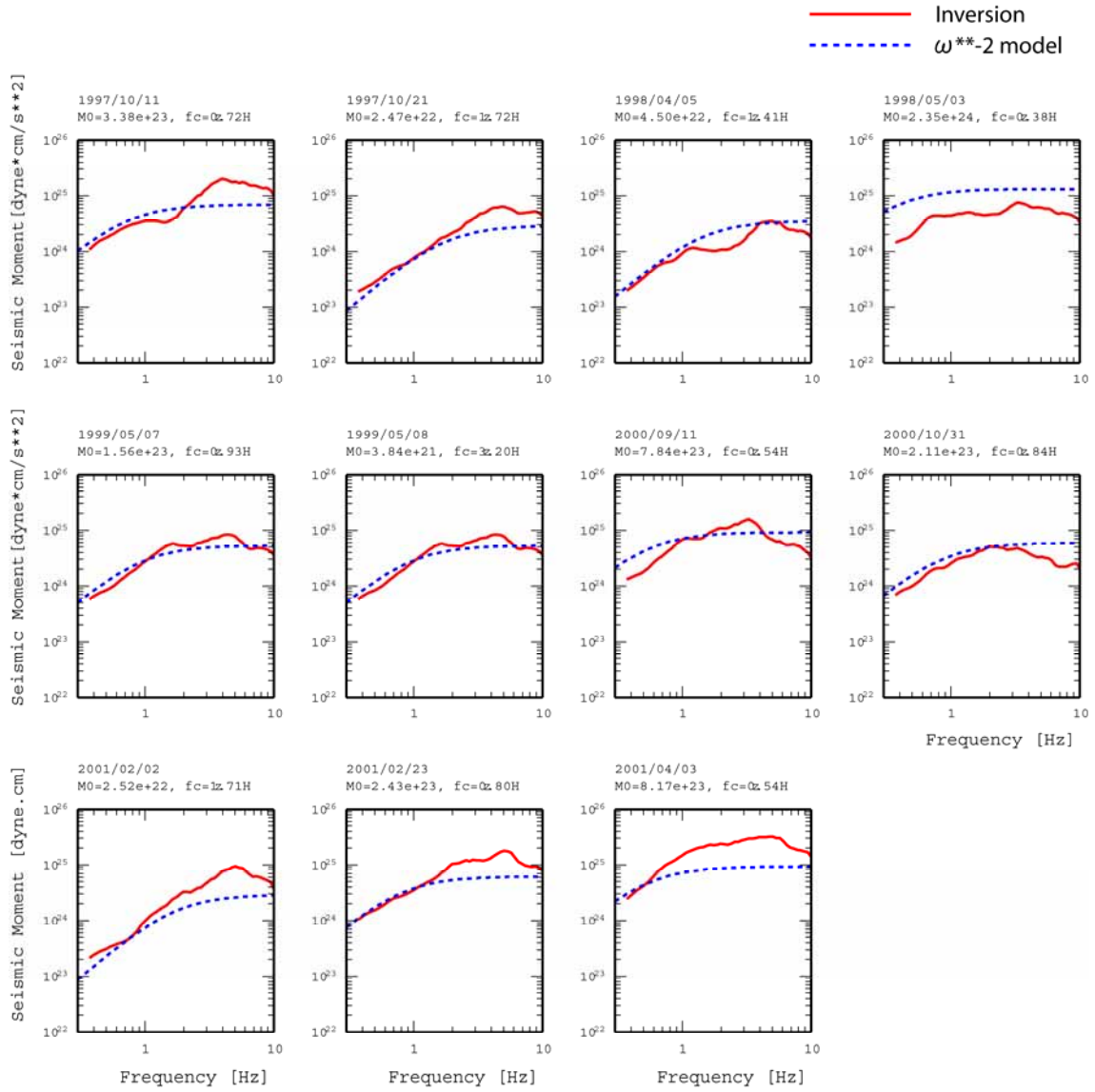


図 3.2.3.2 スペクトルインバージョン解析より求められた震源スペクトル

赤実線は震源スペクトル(加速度地震モーメント密度関数)、青点線は地震モーメントから求められた震源スペクトル。



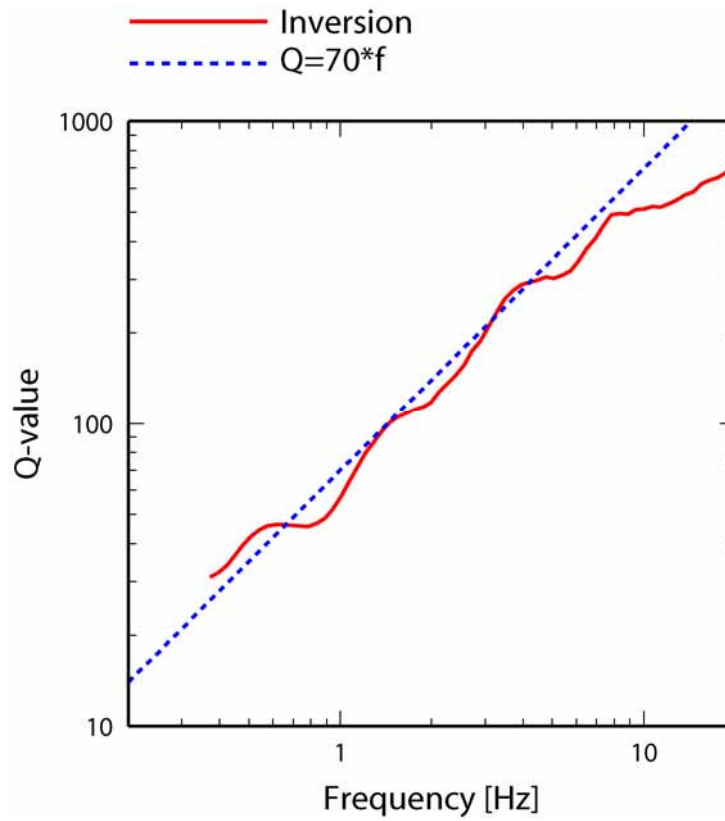


図 3.2.3.3 スペクトルインバージョン解析より求められた Q 値

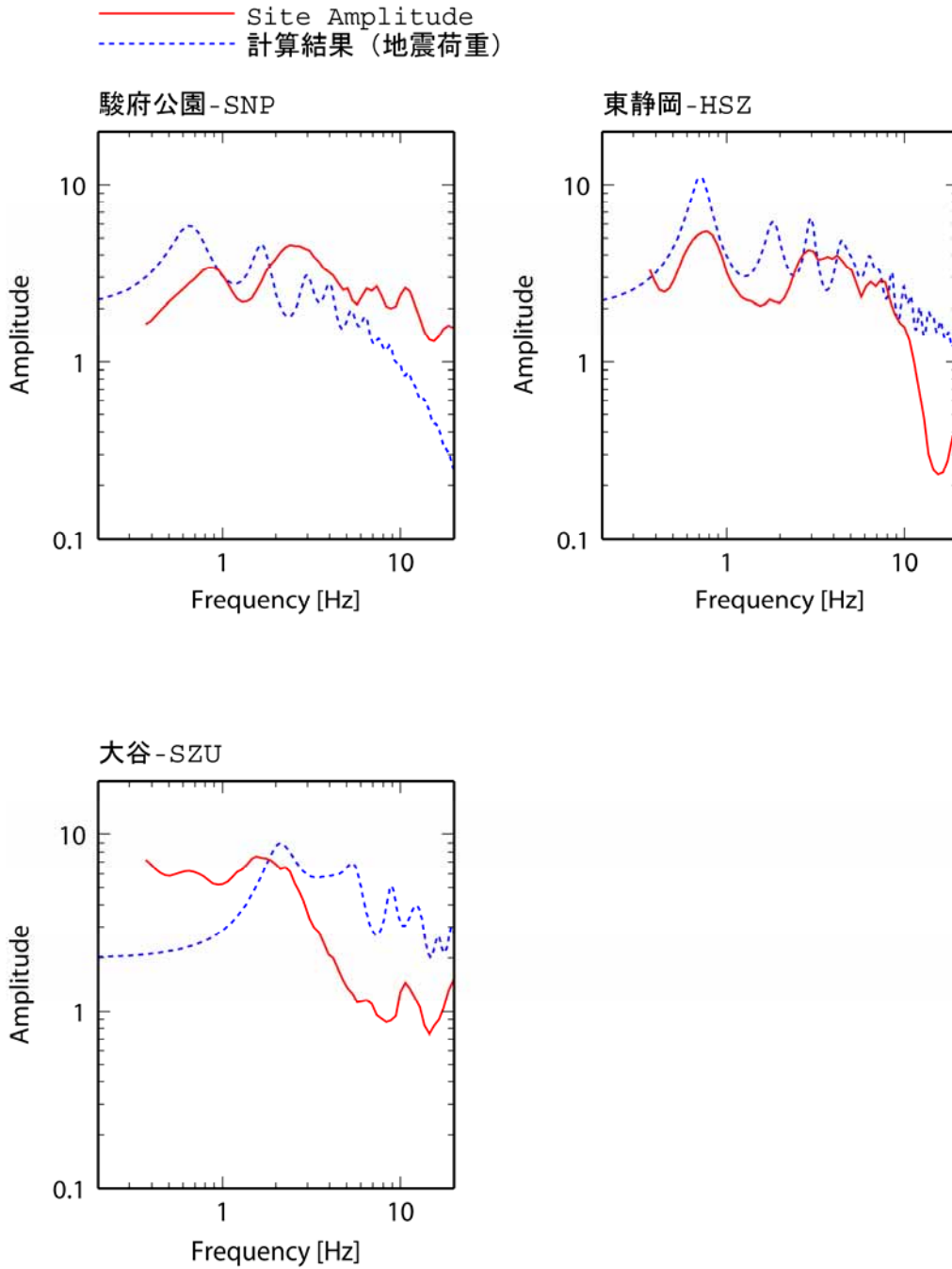


図 3.2.3.4 サイト増幅特性と駿府公園、東静岡、大谷における地盤増幅率の比較  
 地盤モデルは工学的基盤相当層より上を使用。  
 赤の実線はサイト増幅特性、青の点線は地盤モデルから計算された地盤増幅率。

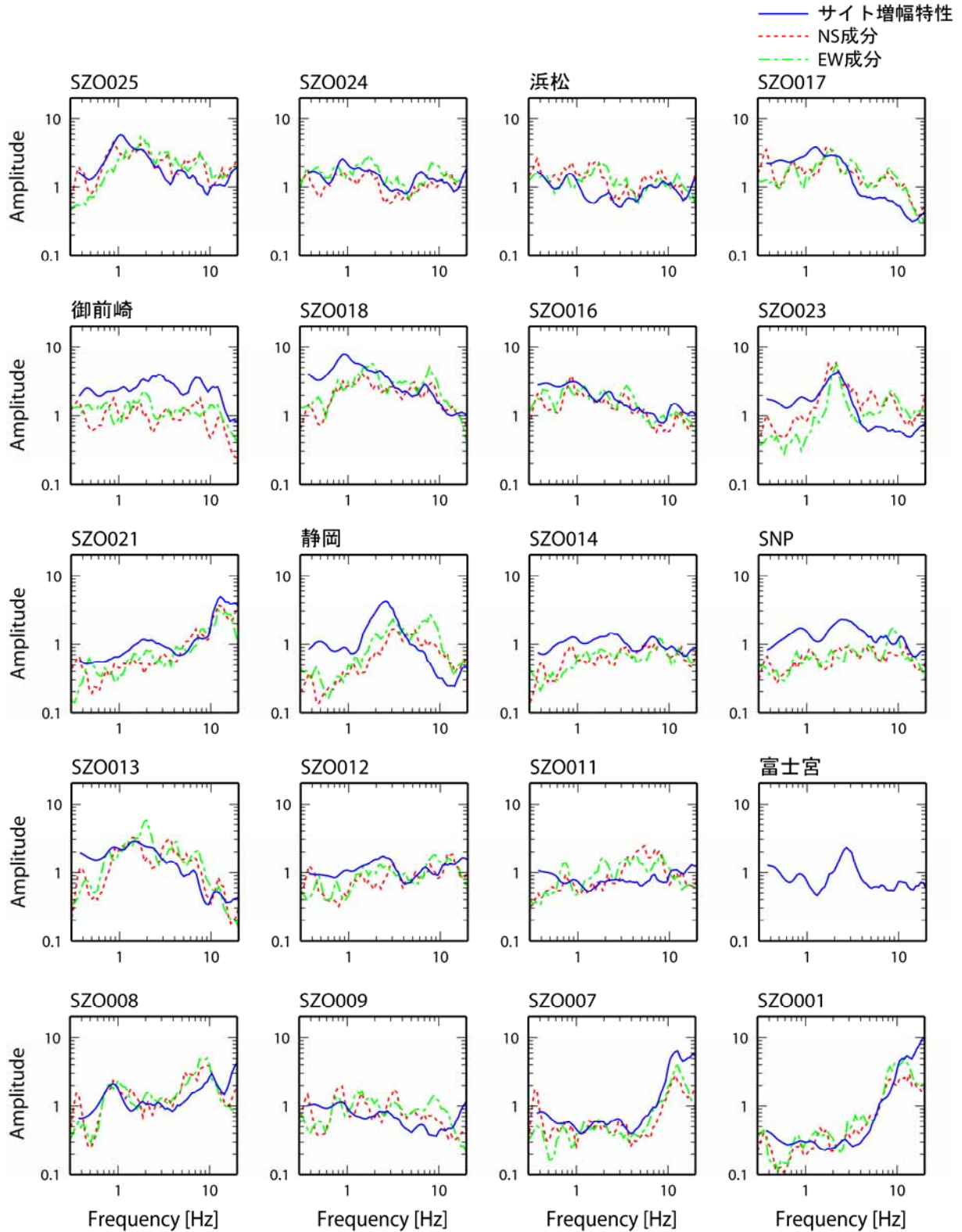


図 3.2.4.1 サイト増幅特性と紀伊半島沖の地震における前震記録との比較

青の実線はサイト増幅特性、赤の点線はSZO019に対するNS成分のフーリエスペクトル比、緑の一点鎖線はEW成分。観測点名が日本語は気象庁、サイトコードは共同強震観測点あるいはK-NET

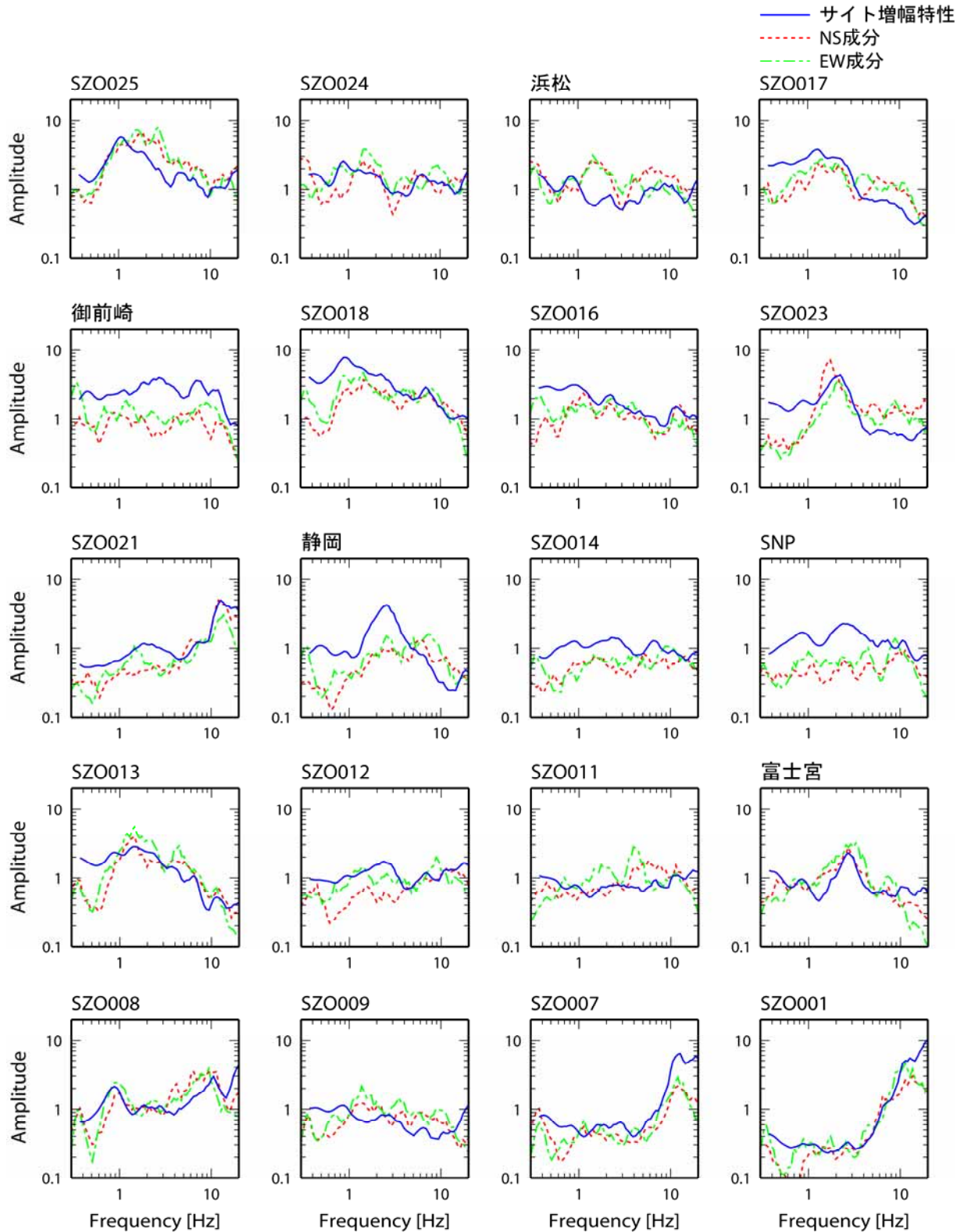


図 3.2.4.2 サイト増幅特性と紀伊半島沖の地震における本震記録との比較

青の実線はサイト増幅特性、赤の点線はSZO019に対するNS成分のフーリエスペクトル比、緑の一点鎖線はEW成分。観測点名が日本語は気象庁、サイトコードは共同強震観測点あるいはK-NET

LN(Fourier Spectrum Ratio / Site amplification factors)

Frequency=2.00Hz (Period=0.5sec)

Frequency=3.08Hz (Period=0.3sec)

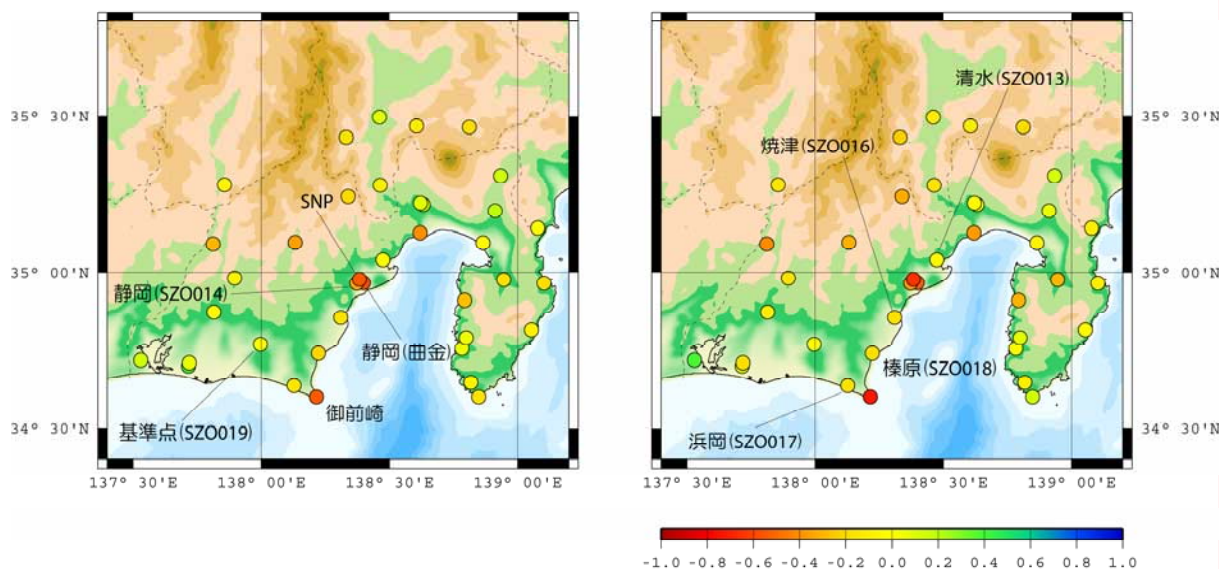


図 3.2.4.3 観測記録のフーリエスペクトル比をサイト増幅特性で除したものの対数を取った値の空間分布(本震) 左側は周波数 2 Hz、右側は周波数 3 Hz における値。

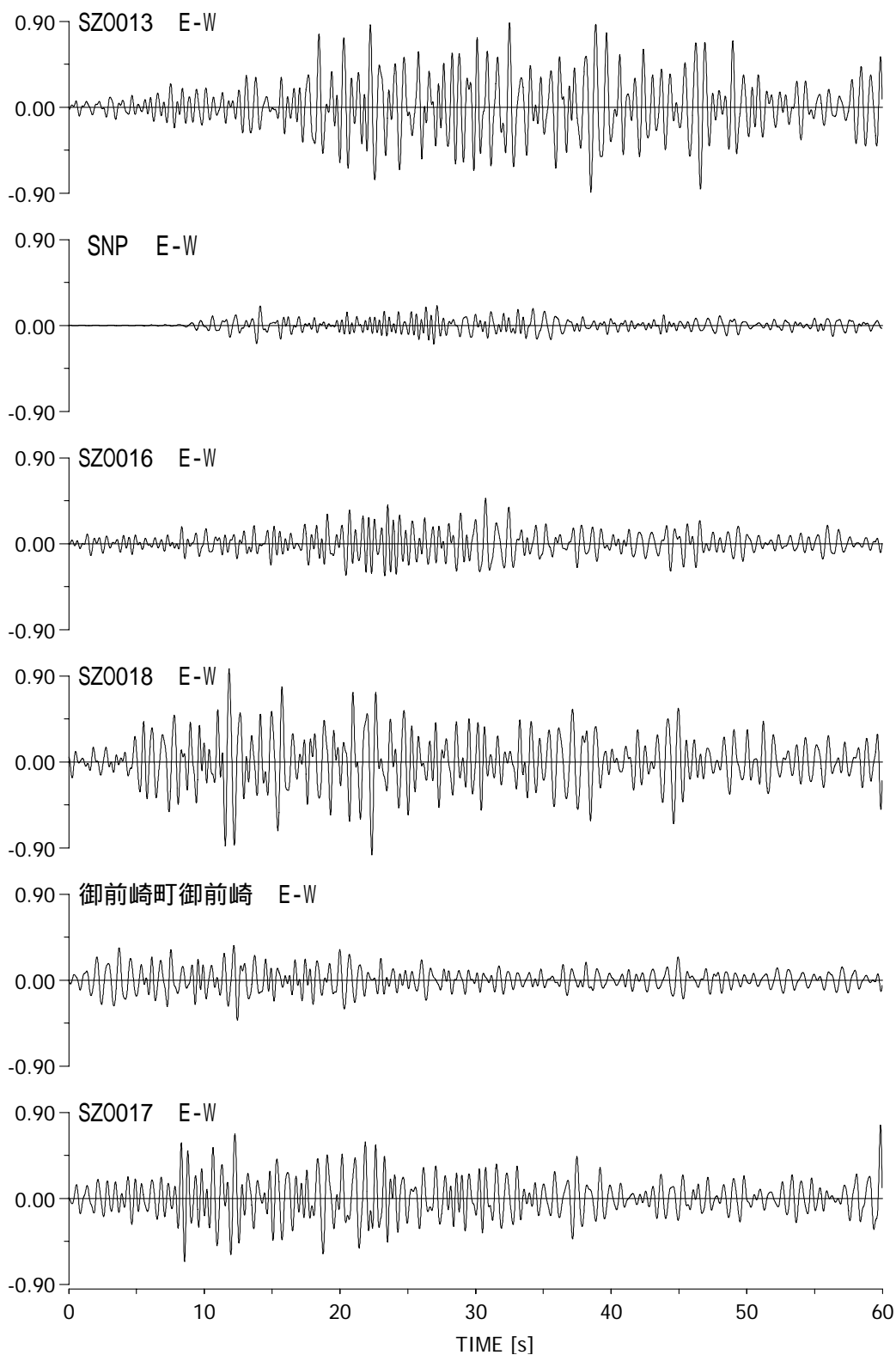


図 3.2.4.4(a) サイト増幅特性とフーリエスペクトル比の開きが大きい観測点での速度波形の比較(本震)

周波数 1 Hz - 3 Hz の区間に対し、バンドパス・フィルタ処理。

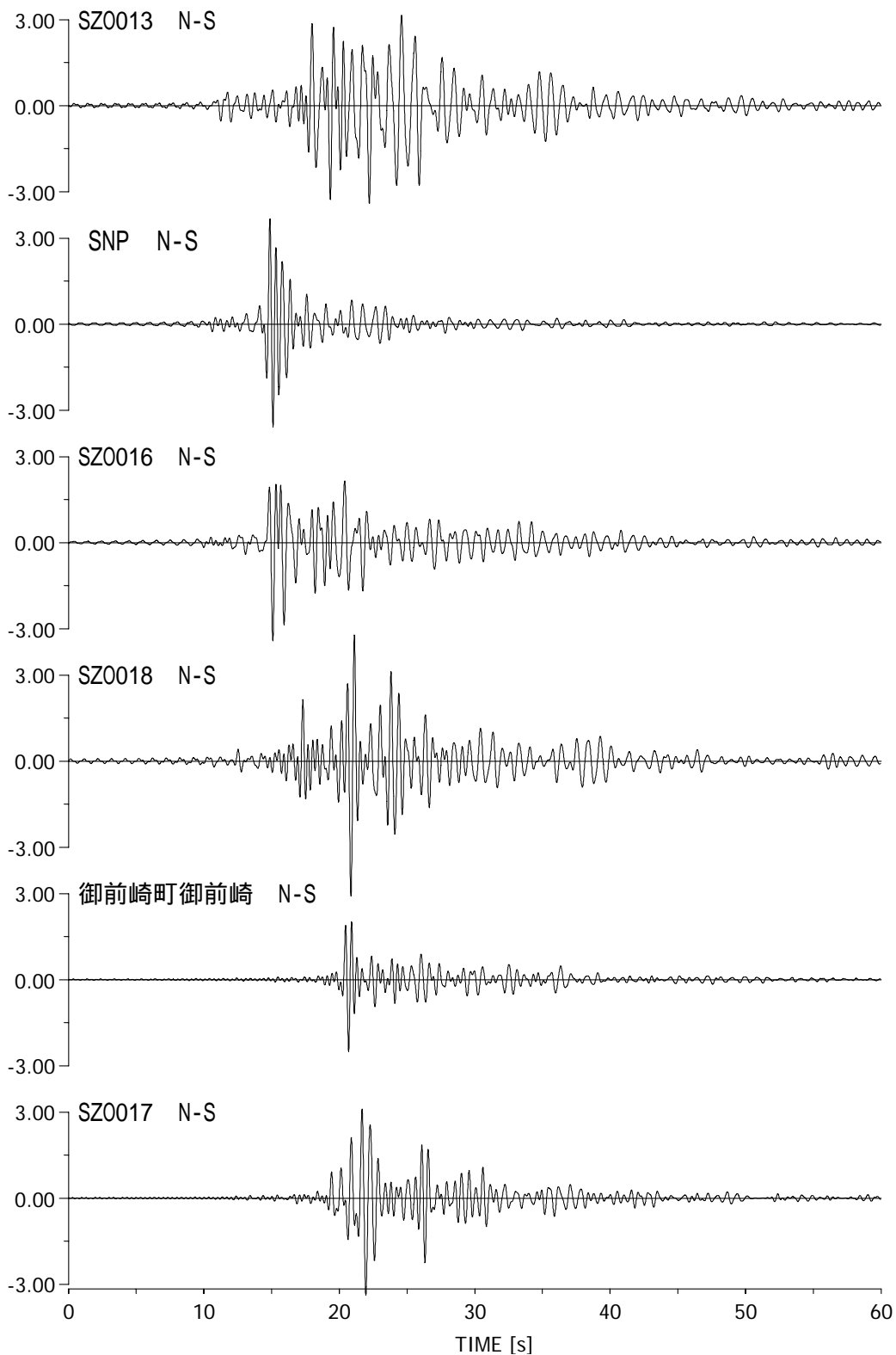


図 3.2.4.4(b) サイト増幅特性とフーリエスペクトル比の開きが大きい観測点での速度波形の比較(2001年4月3日静岡県中部の地震)

周波数 1 Hz - 3 Hz の区間に対し、バンドパス・フィルタ処理。

参考文献

- 1) 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔：K-NET95 型強震計の記録特性、地震 2、49、pp.467-481、1997.
- 2) 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、39、pp.579-593、1986.
- 3) Kato, K., M. Takemura, T. Ikeura, K. Urano and T. Uetake : Preliminary Analysis for Evaluation of Local Site Effects from Strong Motion Spectra by an Inversion Method , J. Phys. Earth , 40 , pp.175-191 , 1992.
- 4) Sato, R.. : Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude , J. Phys. Earth , 27 , pp.353-372 , 1979.
- 5) 野津厚：港湾地域強震観測の経緯と現状、日本地震工学会大会-2003 梗概集、pp.特 54-特 55、2003.
- 6) 山中浩明・中丸明子・栗田勝実・瀬尾和大：表層の地盤特性を拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価、地震 2、51、pp.193-202、1998.
- 7) 福山英一・石田瑞穂・Douglas S. Dreger・川井啓廉：オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定、地震 2、51、pp.149-156、1998.
- 8) Kanamori, H. : Mechanism of Tsunami Earthquakes , Phys. Earth Planet. Interiors , 6 , pp.346-359 , 1972.
- 9) 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 , 41 , pp.1-9 , 1993.
- 10) 日本建築学会：地震荷重 - 地震動の予測と建築物の応答、1992.

( 東電工業：湯沢 豊、東京電力：植竹富一 )