

3. 4 長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴計算の検討等

(1) 研究の内容

(a) 研究の題目

長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴計算の検討等

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人 防災科学技術研究所	研究領域長	藤原 広行
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	青井 真
独立行政法人 防災科学技術研究所	契約研究員	前田 宜浩

(c) 研究の目的

長周期・広帯域地震動予測の高度化に必要なハイブリッド合成法の高度化に資するためマグニチュード8級程度の海溝型地震を想定した時刻歴計算を実施し、計算結果の分析をもとに、震源モデル、地下構造モデル、計算手法の改良に向けた方策を提示するとともに、予測結果の不確実性について検討する。計算の対象となる範囲が非常に広域となる海溝型巨大地震における計算を高速化するための方策について、今後の実現可能性も含めて検討する。

(2) 平成23年度の成果

(a) 研究の要約

南海トラフのマグニチュード8級以上の巨大地震に関して、現在の知見において一つのモデルに特定することが困難である破壊開始点やアスペリティの位置について、その不確実性を考慮した様々な震源モデルによる地震動シミュレーションを実施し、それらの結果を比較することにより長周期地震動の予測結果がどの程度のばらつきとなるかを示し、破壊開始点位置の違いが予測結果に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。

また、南海トラフの巨大地震を対象として、特性化震源モデルを用いて現在のハイブリッド合成法で用いられている、差分法及び統計的グリーン関数法それぞれによる地震動の時刻歴計算を実施し、ハイブリッド合成法における接続周期付近でスペクトルの落ち込みが見られることを示し、現在の計算で用いられている要素断層の大きさを変更することを提案するとともに地下構造モデルをさらに改良する必要があることを示した。

さらに、海溝型巨大地震における地震動計算において、GPU (Graphics Processing Unit) を用いることにより、従来のスーパーコンピュータよりも高速化できる可能性を示した。

(b) 研究の成果

1) 予測結果の不確実性に関する検討

南海トラフで発生するマグニチュード 8 クラスの巨大地震については、南海地震、東南海地震及び想定東海地震のそれぞれの領域それぞれが発生するだけでなく、複数の領域が連動して発生する可能性も示されている。また、特に連動タイプのような地震においては、破壊開始点やアスペリティの位置が特定されているとは言えない状況にある。そこで、これらの不確実性を考慮した複数の震源モデルを作成し、それぞれの地震動シミュレーション結果に基づき長周期地震動の予測結果の不確実性について検討する。

震源モデルについては、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）のフィリピン海プレート上面形状を、地震調査委員会（2001）による南海地震、東南海地震、想定東海地震の断層面形状で切り出して断層面積をそれぞれ求めた。平均応力降下量（ $\Delta\sigma_c$ ）は 3MPa と仮定し、次式より地震モーメント（ M_0 ）、平均すべり量（ D ）を算出した。

$$M_0 = (16/7) \cdot \Delta\sigma / (S/\pi)^{1.5} \quad (3.4-1)$$

$$D = M_0 / (\mu S) \quad (3.4-2)$$

ここで、 μ は剛性率で、S 波速度（ $\beta = 3.8\text{km/s}$ ）と密度（ $\rho = 2.8\text{g/cm}^3$ ）から、 $\mu = \rho\beta^2$ として求めた。また、アスペリティ領域の総面積（ S_a ）と平均すべり量（ D_a ）は、Murotani et al. (2008) のプレート境界地震のスケーリング則に基づき、 $S_a = 0.25$ 、 $D_a = 2.2D$ として算出した。アスペリティの個数は、南海地震、東南海地震、想定東海地震の断層面にそれぞれ 3 個とし、その面積比は 2:1:1 とした。個々のアスペリティの平均すべり量（ D_{ai} ）は次式により算出した。

$$D_{ai} = (\chi_i / \sum \chi_i^3) D_a \quad (3.4-3)$$

$$\chi_i = r_i / r = \sqrt{S_{ai} / S_a} \quad (3.4-4)$$

ここで、 r_i は個々のアスペリティの等価半径、 r はアスペリティ全体の等価半径である。背景領域の面積（ S_b ）、地震モーメント（ M_{0b} ）、平均すべり量（ D_b ）は、アスペリティの地震モーメントを $M_{0a} = \mu D_a S_a$ として、次式により算出した。

$$S_b = S - S_a \quad (3.4-5)$$

$$M_{0b} = M_0 - M_{0a} \quad (3.4-6)$$

$$D_b = M_{0b} / (\mu S_b) \quad (3.4-7)$$

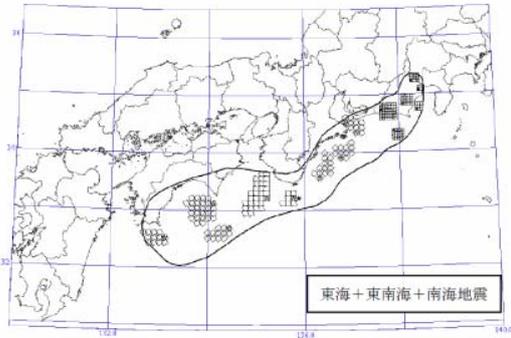
アスペリティの応力降下量（ $\Delta\sigma_a$ ）は、 $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma_c (S/S_a)$ の関係式から求め、各アスペリティで等しいとした。背景領域の実効応力（ σ_b ）は、レシピによる複数アスペリティの

場合の式 ($\sigma_b = (D_b/W_b) \cdot (\sqrt{\pi}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \sigma_a$) を用いて算出した。ここで、 W_b は断層幅であり、 $W_b = \sqrt{S}/2$ と仮定した。その結果、 $\sigma_b \approx 0.12\sigma_a$ となった。

連動型の震源モデルについては、カスケード型とスケーリング型の二通りでモデル化を行った。スケーリング型では、アスペリティ面積は単独型の場合と等しいとし、すべり量、地震モーメント、応力降下量を変化させた。また、2011年東北地方太平洋沖地震を参考として、海溝沿い（トラフ沿い）に大すべり領域を設定した。ここでは、3地震の想定断層面とトラフとの間に、幅 25km、長さ 100km の大すべり領域をアスペリティとして設定した。算出した震源パラメータを表 3.4-1 に示す。アスペリティの配置や破壊開始点の位置は、既往の研究等を参考に設定する。不確実性を考慮して設定した震源パラメータは、以下の通りである。

- 破壊開始点
 - ◇ 西：南海地震の震源域の西端
 - ◇ 中央：南海地震、東南海地震の震源域の境界付近
 - ◇ 東：東南海地震、想定東海地震の震源域の境界付近
- 破壊様式
 - ◇ 同心円状（破壊伝播速度 2.7km/s）
 - ◇ ただし、アスペリティでは、アスペリティ内の 1 点から同心円状に広がる。
- 震源時間関数
 - ◇ 中村・宮武（2000）
 - ◇ 箱型関数（トラフ沿いのすべりの大きな領域に対して）
- アスペリティ（浅い・深い）
- 連動型の震源のモデル化（スケーリング・カスケード）

このうち、トラフ沿いのすべりの大きい領域の震源時間関数を適用するのは、2011年東北地方太平洋沖地震において海溝寄りの領域においてきわめて大きなすべりの領域が認められている一方で、必ずしも強震動には寄与していない可能性があるということも考慮したものである。また、本検討においては、 Q 値の参照周期を 5 秒としているが、計算手法における Q 値の組み込み方に関する課題が残されていることを考慮して、 Q 値による減衰が無い（すなわち Q 値を無限大とした）モデルも計算することにより、予測結果の取り得る最大値を見るために実施した。また、「3.2 巨大地震の長周期・広帯域地震動予測のための震源モデル化手法の検討等」で提案した $k\cdot 2$ モデルによる不均質性を導入したモデルについても試算した。本検討で地震動シミュレーションを実施したケースを表 2 に示す。計算のための地下構造モデルについては、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）（地震調査委員会、2012）を用いた。



中央防災会議 (2003)

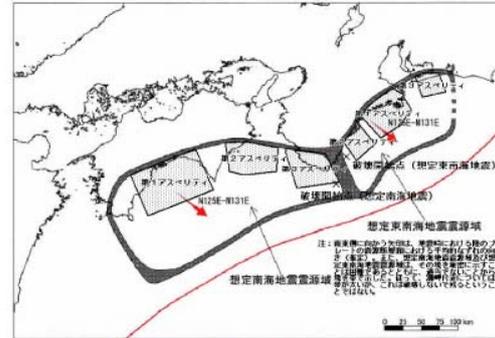
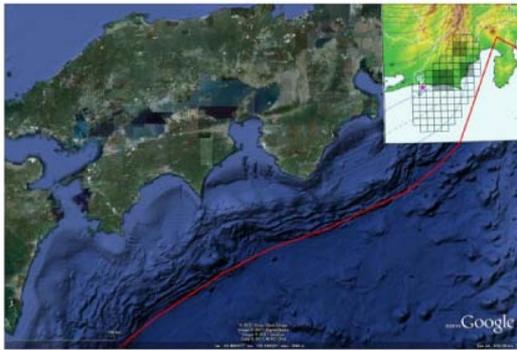
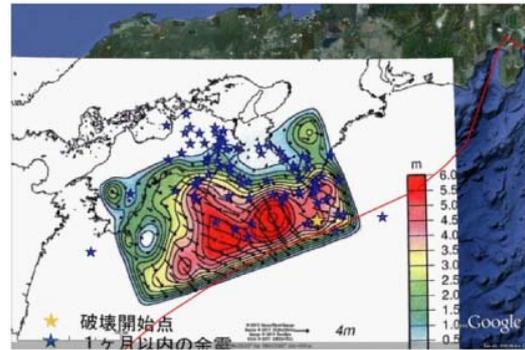


図2 想定東南海地震及び想定南海地震の震源域並びにアスベリティ・破壊開始点の位置
注：アスベリティは断層の一部分(場所や大きさ等は異なる)、破壊開始点は、地震調査委員会(2003)の図2に33番。

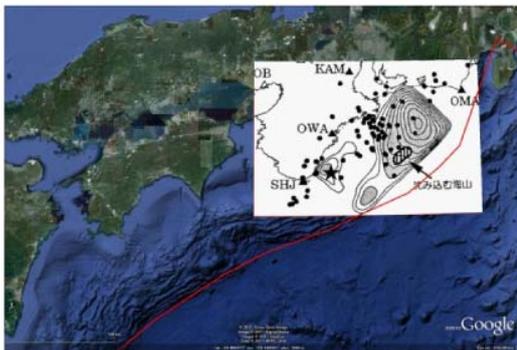
地震調査委員会 (2003)



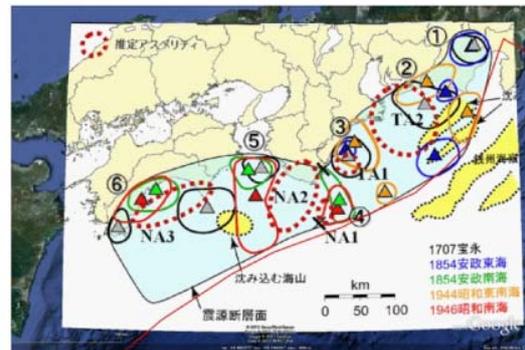
地震調査委員会 (2009)



地震調査委員会 (2011)



山中 (2004)



武村・神田 (2006)

図 3.4-1 参照した既往研究等による震源モデル。

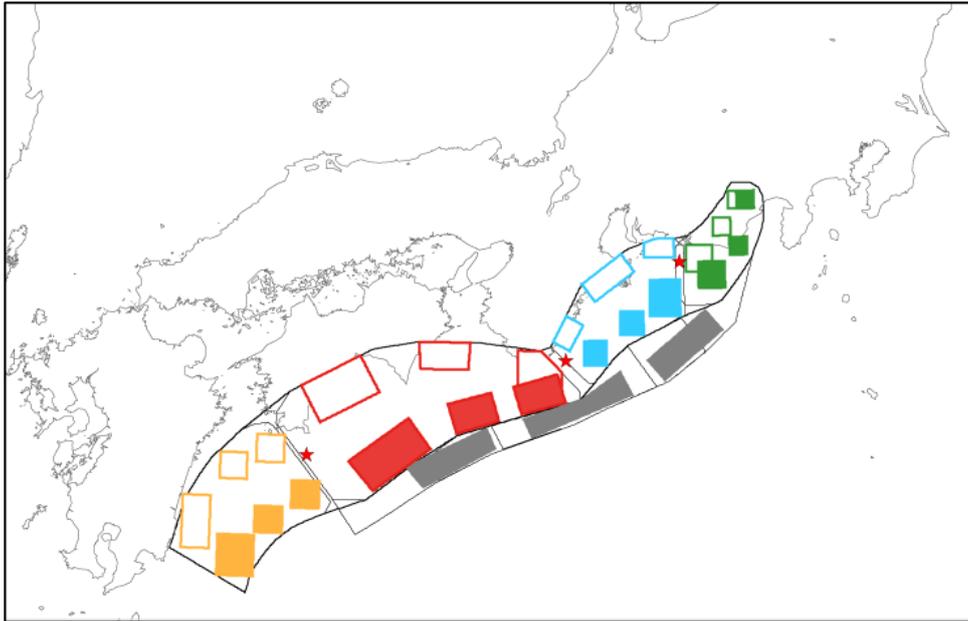


図 3.4-2 本検討で設定した震源モデル。南海（赤：ANNKI）、東南海（青：ATNKI）、想定東海（緑：ATOKI）、日向灘（橙：AHGND）、トラフ沿い（灰：ATRGH）のアスペリティ分布。想定東海、東南海、南海、日向灘については、深いアスペリティ（白抜き）と浅いアスペリティを設定している。トラフ沿いは、(a) 四国沖、(b) 紀伊半島沖、(c) 遠州灘沖の 3 か所にすべりの大きな領域を設定している。想定東海、東南海、南海が同時に破壊したケースが 3 連動（ANNI3）、3 連動にトラフ沿いの領域を組み合わせたケース（ANNI4）と、3 連動に日向灘を組み合わせたケース（ANNI5）が 4 連動となる。図内の赤星印は、仮定した破壊開始点（西、中央、東）である。

まず、破壊開始点及びアスペリティ配置が同じで、すべり量（スケーリングかカスケードか）、トラフ沿いのすべりの翁領域の震源時間関数、 Q 値、 $k-2$ モデルによる不均質性の導入、による違いを見る。図 3.4-3 には、3 連動+トラフ沿い（遠州灘沖：ANNI4c-s-c）について、すべり量、震源時間関数、 Q 値、不均質性を変化させた場合の、愛知県庁と東京都庁についての地震動計算結果を示している。 $k-2$ モデルにより不均質性を付与したケースでは、不均質性を付与しないケース（スケーリング）の波形や応答スペクトルからの差異が認められる。特に、最小波数を 1、 Δt を 5 秒とした場合には、その差は顕著である。図 3.4-4 に示した 5 地点の応答スペクトル比（基準スペクトル：ANNI4c-s-c）によると、 $k-2$ モデルを適用することで応答スペクトルに変化が生じているが、そのばらつきの程度は Q 値無限大モデルとカスケードモデルの間に収まっている。また、スペクトル比の周期依存性は顕著には見られない。一方で、トラフ沿いの震源時間関数を箱型関数とした場合には、短周期成分が大きく減少していることがわかる。

表 3.4-1 震源パラメータの一覧 (1)。

		南海	東南海	想定東海	日向灘	トラフ沿い	南海-東南海	
							カスケード	スケーリング
全体	面積(km ²)	35800	14500	9400	19000	12500	50300	51200
	地震モーメント(Nm)	8.33×10^{21}	2.14×10^{21}	1.13×10^{21}	3.23×10^{21}	1.72×10^{21}	1.05×10^{22}	1.43×10^{22}
	平均すべり量(m)	5.8	3.7	3.0	4.2	3.4	—	6.9
	応力降下量(MPa)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Mw	8.5	8.2	8.0	8.3	8.1	8.6	8.7
南海1	面積(km ²)	3580	—	—	—	—	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	2.15×10^{21}	—	—	—	—	2.15×10^{21}	2.87×10^{21}
	平均すべり量(m)	14.9	—	—	—	—	14.9	19.8
	応力降下量(MPa)	15.0	—	—	—	—	15.0	15.3
南海2, 3	面積(km ²)	1790	—	—	—	—	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	7.60×10^{20}	—	—	—	—	7.60×10^{20}	1.02×10^{21}
	平均すべり量(m)	10.5	—	—	—	—	10.5	14.0
東南海1	面積(km ²)	—	1450	—	—	—	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	—	5.54×10^{20}	—	—	—	5.54×10^{20}	7.40×10^{20}
	平均すべり量(m)	—	9.5	—	—	—	9.5	12.6
	応力降下量(MPa)	—	15.0	—	—	—	15.0	15.3
東南海2, 3	面積(km ²)	—	725	—	—	—	725	725
	地震モーメント(Nm)	—	1.96×10^{20}	—	—	—	1.96×10^{20}	2.62×10^{20}
	平均すべり量(m)	—	6.7	—	—	—	6.7	8.9
想定東海	面積(km ²)	—	—	940	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	2.89×10^{20}	—	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	7.6	—	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	—	—	—	—
想定東海2, 3	面積(km ²)	—	—	470	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	1.02×10^{20}	—	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	5.4	—	—	—	—
日向灘1	面積(km ²)	—	—	—	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	8.31×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	10.8	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	15.0	—	—	—
日向灘2, 3	面積(km ²)	—	—	—	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	2.94×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	—	—	—
トラフ沿い	面積(km ²)	—	—	—	—	2500	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	7.57×10^{20}	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	7.50	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	—	15.00	—	—
背景領域	面積(km ²)	28640	11600	7520	15200	10000	40240	41140
	地震モーメント(Nm)	4.66×10^{21}	1.19×10^{21}	6.33×10^{20}	1.81×10^{21}	9.64×10^{20}	5.85×10^{21}	8.10×10^{21}
	平均すべり量(m)	4.0	2.6	2.1	2.9	2.4	—	4.9
	応力降下量(MPa)	1.8	1.8	1.8	1.8	3.0	—	1.4
参考								
中央防災会議	Mw	8.6	8.2	8.0			8.6	
地震本部	Mw	8.4	8.1	8.0			8.5	

表 3.4-1 震源パラメータの一覧 (2)。

		東南海-想定東海		南海-東南海-想定東海		3連動+日向灘		3連動+トラフ沿い	
		カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング	カスケード	スケーリング
全体	面積(km ²)	23900	23600	59700	60300	78700	80482	72200	72800
	地震モーメント(Nm)	3.27×10^{21}	4.46×10^{21}	1.16×10^{22}	1.82×10^{22}	1.48×10^{22}	2.81×10^{22}	1.33×10^{22}	2.42×10^{22}
	平均すべり量(m)	—	4.7	—	7.5	—	8.6	—	8.2
	応力降下量(MPa)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	Mw	8.3	8.4	8.6	8.8	8.7	8.9	8.7	8.9
南海1	面積(km ²)	—	—	3580	3580	3580	3580	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	—	—	2.15×10^{21}	3.34×10^{21}	2.15×10^{21}	3.98×10^{21}	2.15×10^{21}	3.57×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	14.9	23.1	14.9	27.5	14.9	24.6
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
南海2,3	面積(km ²)	—	—	1790	1790	1790	1790	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	—	—	7.60×10^{20}	1.18×10^{21}	7.60×10^{20}	1.41×10^{21}	7.60×10^{20}	1.26×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	10.5	16.3	10.5	19.5	10.5	17.4
	応力降下量(MPa)	—	—	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
東南海1	面積(km ²)	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	5.54×10^{20}	7.66×10^{20}	5.54×10^{20}	8.61×10^{20}	5.54×10^{20}	1.03×10^{21}	5.54×10^{20}	9.19×10^{20}
	平均すべり量(m)	9.5	13.1	9.5	14.7	9.5	17.5	9.5	15.7
	応力降下量(MPa)	15.0	14.8	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
東南海2,3	面積(km ²)	725	725	725	725	725	725	725	725
	地震モーメント(Nm)	1.96×10^{20}	2.71×10^{20}	1.96×10^{20}	3.05×10^{20}	1.96×10^{20}	3.63×10^{20}	1.96×10^{20}	3.25×10^{20}
	平均すべり量(m)	6.7	9.2	6.7	10.4	6.7	12.4	6.7	11.1
	応力降下量(MPa)	15.0	14.8	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
想定東海	面積(km ²)	940	940	940	940	940	940	940	940
	地震モーメント(Nm)	2.89×10^{20}	4.00×10^{20}	2.89×10^{20}	4.50×10^{20}	2.89×10^{20}	5.36×10^{20}	2.89×10^{20}	4.80×10^{20}
	平均すべり量(m)	7.6	10.5	7.6	11.8	7.6	14.1	7.6	12.6
	応力降下量(MPa)	15.0	14.8	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
想定東海2,3	面積(km ²)	470	470	470	470	470	470	470	470
	地震モーメント(Nm)	1.02×10^{20}	1.41×10^{20}	1.02×10^{20}	1.59×10^{20}	1.02×10^{20}	1.89×10^{20}	1.02×10^{20}	1.70×10^{20}
	平均すべり量(m)	5.4	7.4	5.4	8.4	5.4	10.0	5.4	8.9
	応力降下量(MPa)	15.0	14.8	15.0	15.2	15.0	15.3	15.0	15.1
日向灘1	面積(km ²)	—	—	—	1900	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	8.31×10^{20}	1.54×10^{21}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	10.8	20.0	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	15.0	15.3	—	—	—
日向灘2,3	面積(km ²)	—	—	—	950	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	2.94×10^{20}	5.45×10^{20}	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	14.2	—	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	15.0	15.3	—	—	—
トラフ沿い	面積(km ²)	—	—	—	—	—	—	2500	2500
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	—	—	7.57×10^{20}	2.08×10^{21}
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	—	—	7.50	20.60
	応力降下量(MPa)	—	—	—	—	—	—	15.00	15.10
背景領域	面積(km ²)	19120	18820	47760	48360	62960	64742	57760	58360
	地震モーメント(Nm)	1.83×10^{21}	2.48×10^{21}	6.48×10^{21}	1.03×10^{22}	8.29×10^{21}	1.60×10^{22}	7.45×10^{21}	1.36×10^{22}
	平均すべり量(m)	—	3.3	—	5.3	—	6.1	—	5.8
	応力降下量(MPa)	—	1.3	—	1.2	—	1.0	—	1.1
参考									
中央防災会議	Mw	8.3		8.7					
地震本部	Mw	8.4		8.5					

表 3.4-2 地震動計算を行ったケースの一覧 (1)。

ケース名					領域						
領域	トラフ沿い	深さ	破壊	※	南海	東南海	想定東海	日向灘	トラフ沿い		
									a. 四国沖	b. 紀伊半島沖	c. 遠州灘沖
ANNKI		d	c		○						
		s	c		○						
ATNKI		s	c			○					
ATOKI		s	e				○				
AHGND		d	w					○			
		s	w					○			
ATRGH	a		c						○		
	b		w							○	
	c		c								○
ANNI1		s	c	cas	○	○					
		s	e	cas	○	○					
ANNI2		s	c	cas		○	○				
ANNI3		d	w		○	○	○				
		d	c		○	○	○				
		d	e		○	○	○				
		s	w		○	○	○				
		s	w	cas	○	○	○				
		s	c		○	○	○				
		s	c	cas	○	○	○				
		s	e		○	○	○				
ANNI4		s	e	cas	○	○	○				
	a	d	w		○	○	○		○		
	a	d	c		○	○	○		○		
	a	d	e		○	○	○		○		
	a	s	w		○	○	○		○		
	a	s	c		○	○	○		○		
	a	s	c	cas	○	○	○		○		
	a	s	c	box	○	○	○		○		
	a	s	e		○	○	○		○		
	b	d	w		○	○	○			○	
	b	d	c		○	○	○			○	
	b	d	e		○	○	○			○	
	b	s	w		○	○	○			○	
	b	s	c		○	○	○			○	
	b	s	e		○	○	○			○	
	c	d	w		○	○	○				○
	c	d	c		○	○	○				○
	c	d	e		○	○	○				○
	c	s	w		○	○	○				○
	c	s	c		○	○	○				○
c	s	c	cas	○	○	○				○	
c	s	c	box	○	○	○				○	
c	s	c	qi	○	○	○				○	
c	s	e		○	○	○				○	
ANNI5		d	c		○	○	○	○			
		s	c		○	○	○	○			

※ cas: カスケードモデル、box: 箱形関数、qi: Q 値無限大モデル

表 3.4-2 地震動計算を行ったケースの一覧 (2)。

ケース名					アスぺリティ深さ		破壊開始点 (南海トラフ全体に対して)			震源のモデル化	
領域	トラフ沿い	深さ	破壊	※	深い	浅い	西	中央	東	カスケード	スケーリング
ANNKI		d	c		○			○			○
		s	c			○		○			○
ATNKI		s	c			○		○			○
ATOKI		s	e			○			○		○
AHGND		d	w		○		○				○
		s	w			○	○				○
ATRGH	a		c			-		○			○
	b		w			-	○				○
	c		c			-		○			○
ANNI1		s	c	cas		○		○		○	
		s	e	cas		○			○	○	
ANNI2		s	c	cas		○		○		○	
ANNI3		d	w		○		○				○
		d	c		○			○			○
		d	e		○				○		○
		s	w			○	○				○
		s	w	cas		○	○			○	○
		s	c			○		○			○
		s	c	cas		○		○		○	○
		s	e			○			○		○
ANNI4		s	e	cas		○		○		○	○
	a	d	w		○		○				○
	a	d	c		○			○			○
	a	d	e		○				○		○
	a	s	w			○	○				○
	a	s	c			○		○			○
	a	s	c	cas		○		○		○	○
	a	s	c	box		○		○			○
	a	s	e			○			○		○
	b	d	w		○		○				○
	b	d	c		○			○			○
	b	d	e		○				○		○
	b	s	w			○	○				○
	b	s	c			○		○			○
	b	s	e			○			○		○
	c	d	w		○		○				○
	c	d	c		○			○			○
	c	d	e		○				○		○
	c	s	w			○	○				○
	c	s	c			○		○			○
c	s	c	cas		○		○		○	○	
c	s	c	box		○		○			○	
c	s	c	qi		○		○			○	
c	s	e			○			○		○	
ANNI5		d	c		○			○			○
		s	c			○		○			○

※ cas: カスケードモデル、box: 箱形関数、qi: Q 値無限大モデル

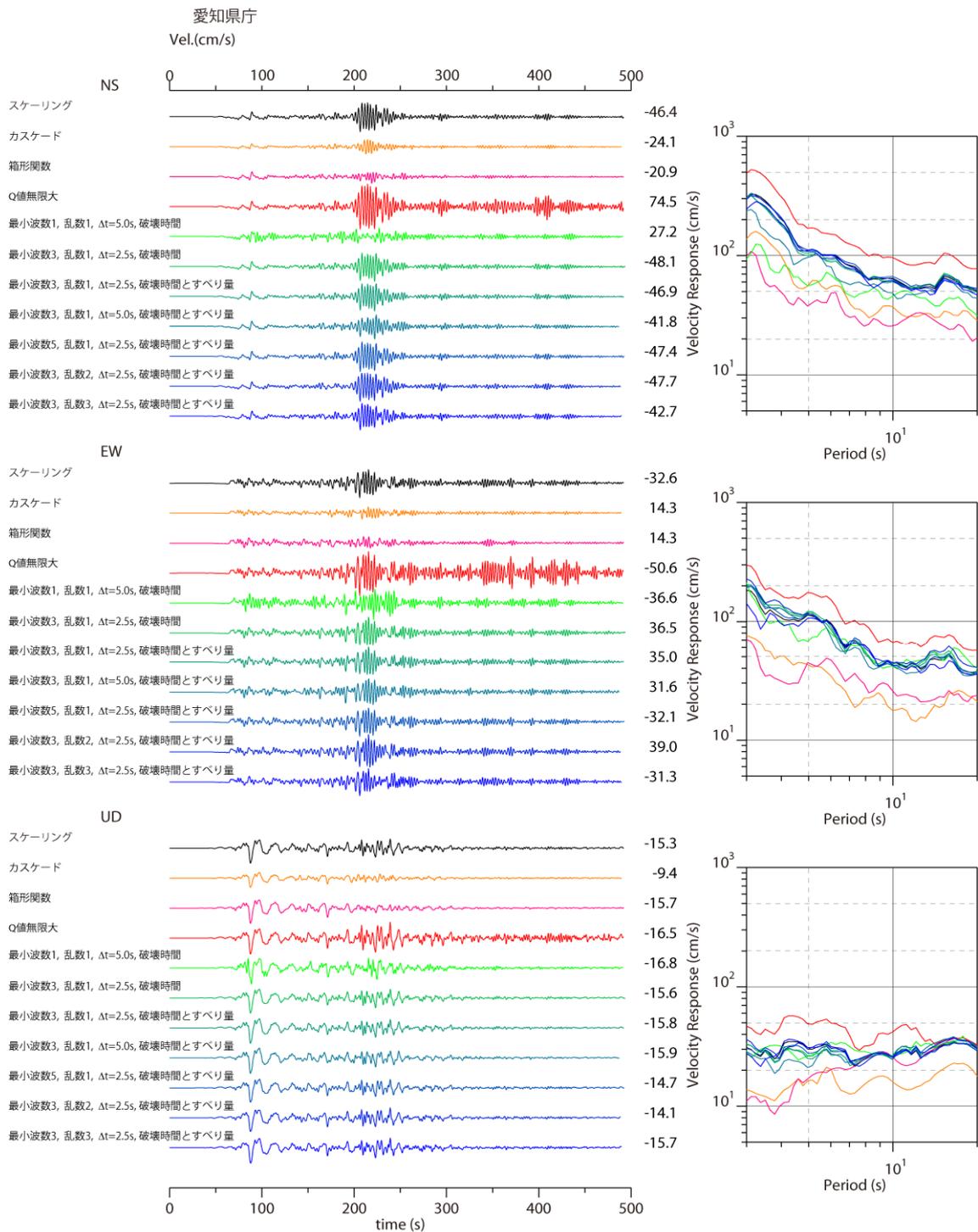


図 3.4-3a 同じアスペリティ配置、破壊開始点を持つモデル (ANN14c-s-c) について、すべり量 (スケーリング、カスケード)、トラフ沿いのすべりの大きな領域の震源時間関数、 Q 値、不均質性を変化させた場合の速度波形と相対速度応答スペクトルの比較。愛知県庁の例。

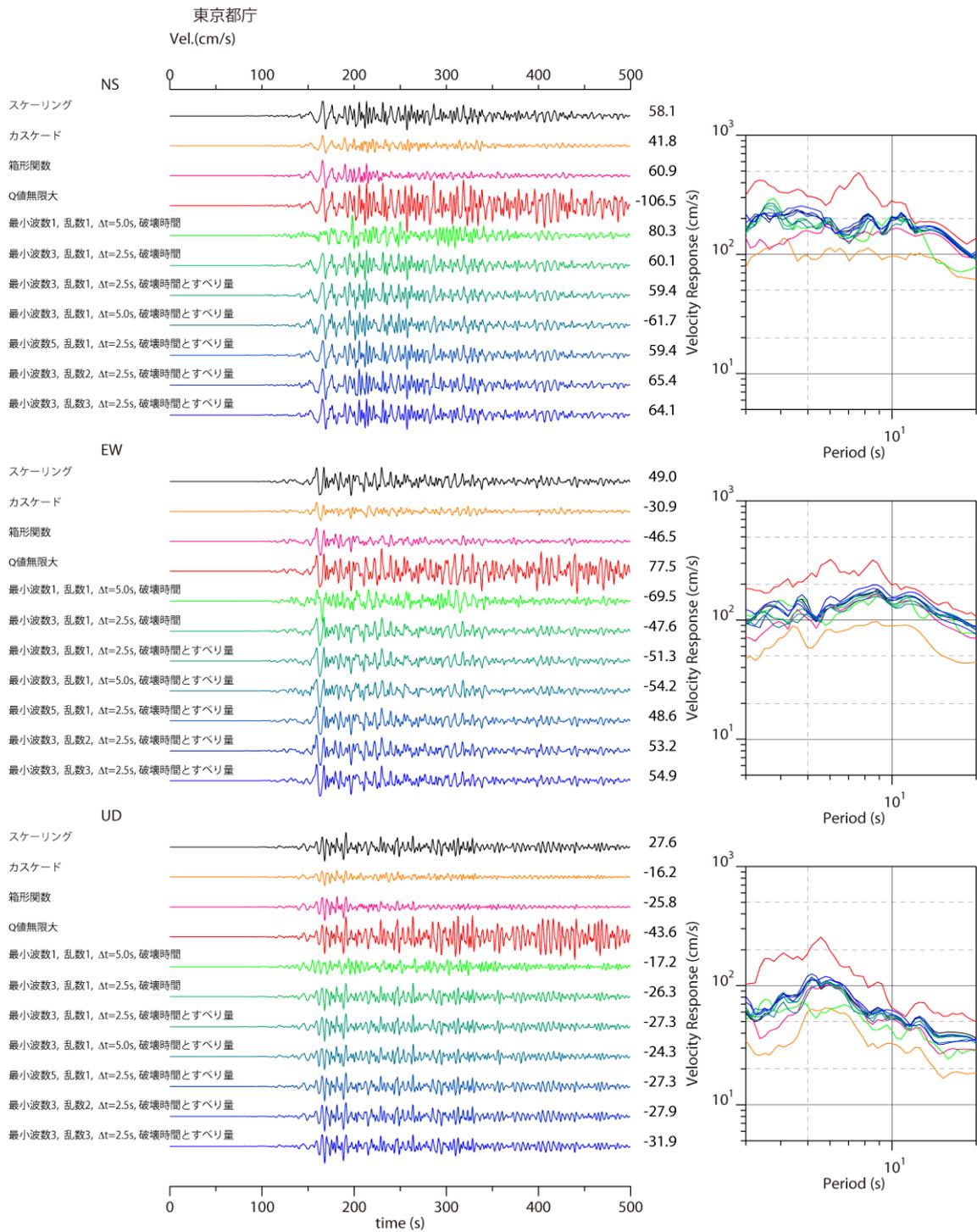


図 3.4-3b 図 3.4-3a と同じ。ただし、東京都庁についての図。

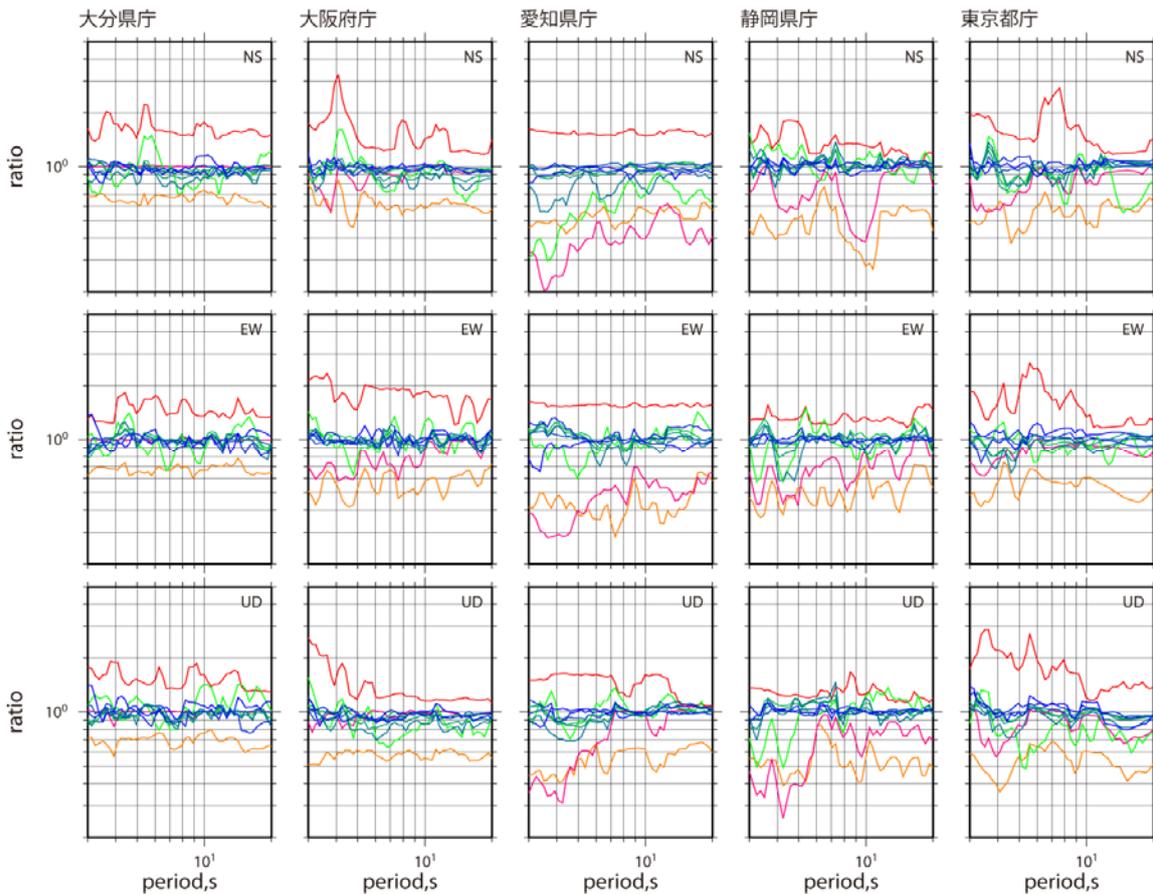


図 3.4-4 図 3.4-3 に示したケースについての応答スペクトル比。ANNI4c-s-c（スケールリングモデル）を基準とした比となっている。色は、図 3.3-3a, b と対応している。

次に、本検討で計算を実施した全ケースによる速度波形の例を図 3.4-5 に示す。ここでは、その中でもさらにスケールリング型のうち、箱型関数、 Q 値無限大モデルを除く 35 ケースの結果を基に、震源モデルの違いが地震動予測結果に与える影響について検討する。

- 最大地動速度（PGV）値の空間分布（図 3.4-6）
 - 空間分布の大局的な特徴は、破壊開始点の違いに依存している。
 - アスペリティが深い場合の方が、浅い場合に比べて最大振幅値が大きい。
 - カスケードモデルの分布は、個々の単独型の分布を重ねたものとなっている。

- 各地点に対する寄与の大きな単独領域（浅いアスペリティのケース）を基準とした応答スペクトル比（図 3.4-7）
 - 破壊開始点の影響

大分県庁では中央と東側、大阪府庁では西側、愛知県庁では西側に破壊開始点がある場合に振幅が大きい。静岡県庁、東京都庁では、他の地点に比べ破壊開始点によるばらつきは小さい。これは、両地点の地震動に対する寄与の大きい想定東海では、東方向への破壊伝播のみを仮定しているためと考えられる。
 - アスペリティ深さの影響

大分県庁、大阪府庁では、アスペリティが深い方が、浅い場合よりも長周期帯で振幅が大きい。これらは南海地震の寄与を強く受ける地点である。南海地震の深いアスペリティは陸に近く、大分県庁、大阪府庁に対しては、長周期 S 波の寄与が強いと考えられる。
 - トラフ沿いの大すべり領域の影響（震源域が広がる影響）

震源域が広がることでスペクトル形状が変化している。大阪府庁では 3～4 秒付近、愛知県庁では 3～4 秒付近、東京都庁では 7～8 秒付近（NS 成分）にピークがみられる。また、トラフ沿いの領域の影響として、大分県庁では四国沖（a）の領域を含む場合に 5～6 秒付近、愛知県庁では遠州灘沖（c）の領域を含む場合に 3～4 秒付近、東京都庁では遠州灘沖（c）の領域を含む場合に 8 秒付近（NS）にピークが現れている。

- 最大地動速度値、応答値（周期 5 秒、7 秒、10 秒）の度数分布（図 3.4-8）
 - ヒストグラムは震源域の広がり と 最大値 の 関係 を 示 して いる。灰色の単独領域に比べ、黒の 3 連動、赤、青、緑、黄の 4 連動は大きな最大値を有している。また、大阪府庁の ANNI4a や愛知県庁の ANNI4c など、トラフ沿いの特定の領域の影響を強く受けて大きな振幅をもつケースがみられる。一方で、静岡県庁や東京都庁では、連動型でのばらつきは小さく、トラフ沿いの影響は相対的に小さいと考えられる。
 - 累積頻度分布は破壊開始点、アスペリティ深さと最大値との関係を示している。赤印で示した西から破壊するケースは、大分県庁では最大値の小さいグループに含まれるが、他の地点では最大値の大きなグループに多く含まれている。また、三角印で示したアスペリティの深いケースは、大分では最大値の大きなグループのほとんどを占めている。

大分県庁 (N-S)

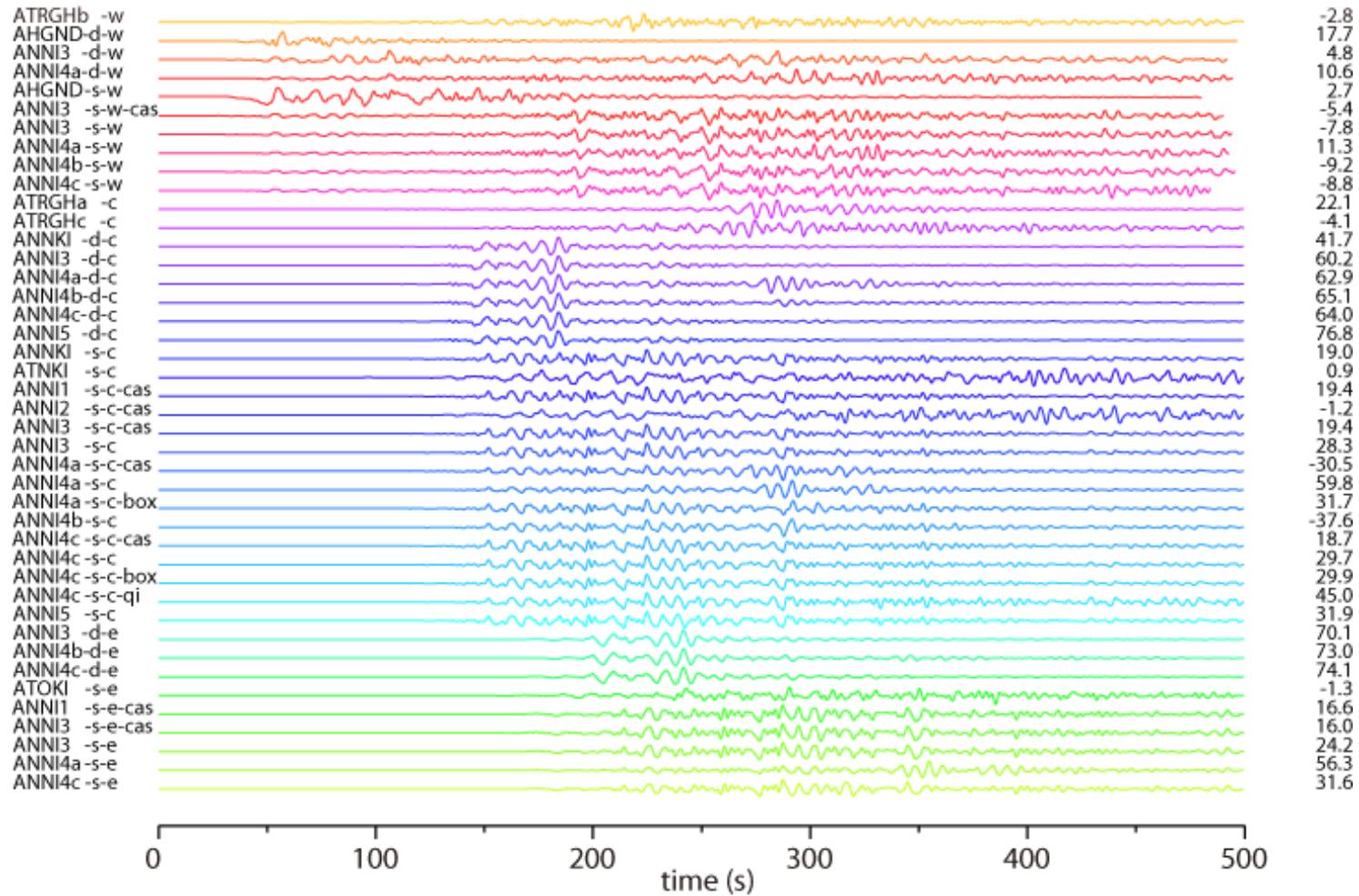


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大分県庁 (E-W)

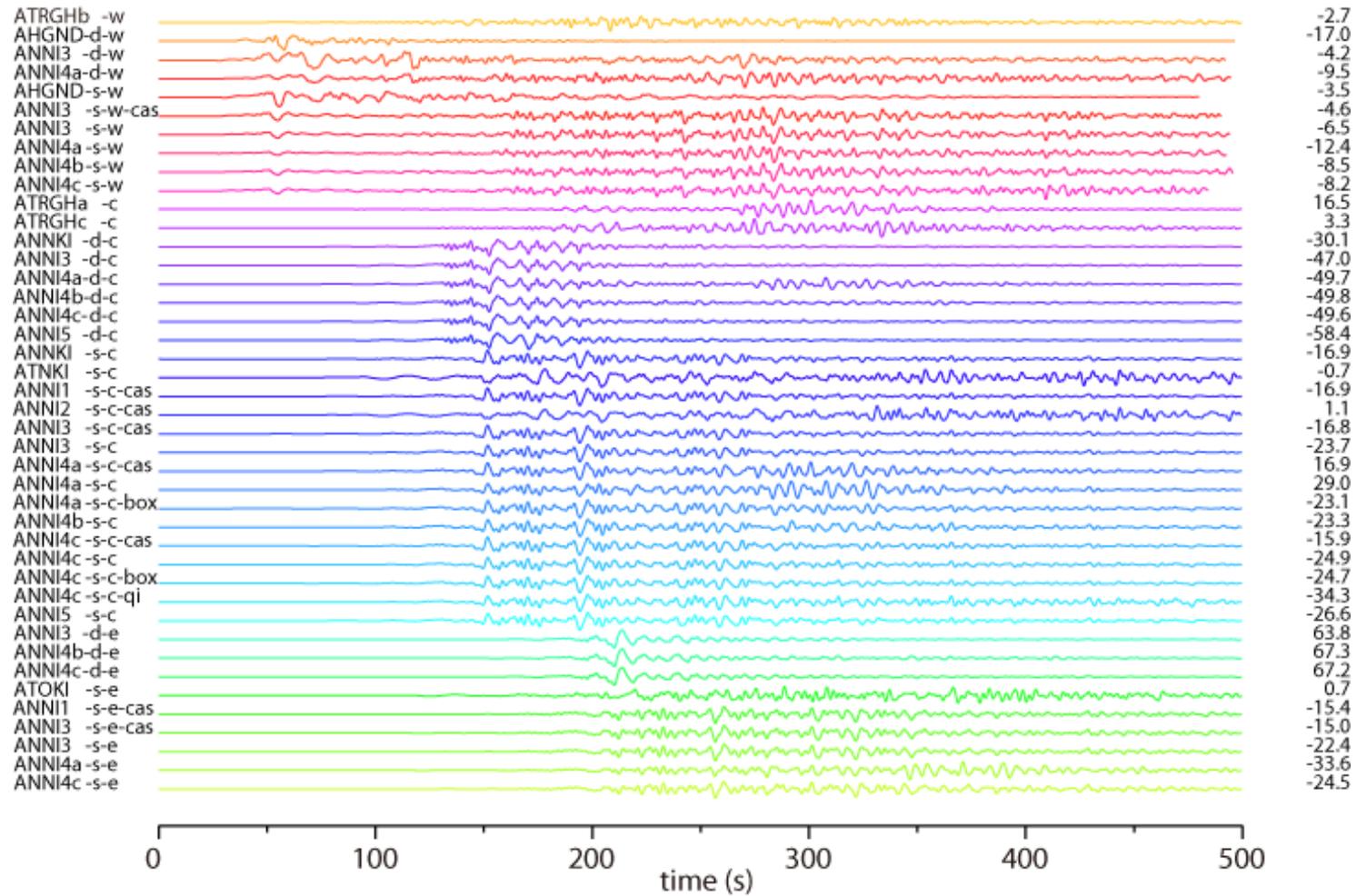


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大分県庁 (U-D)

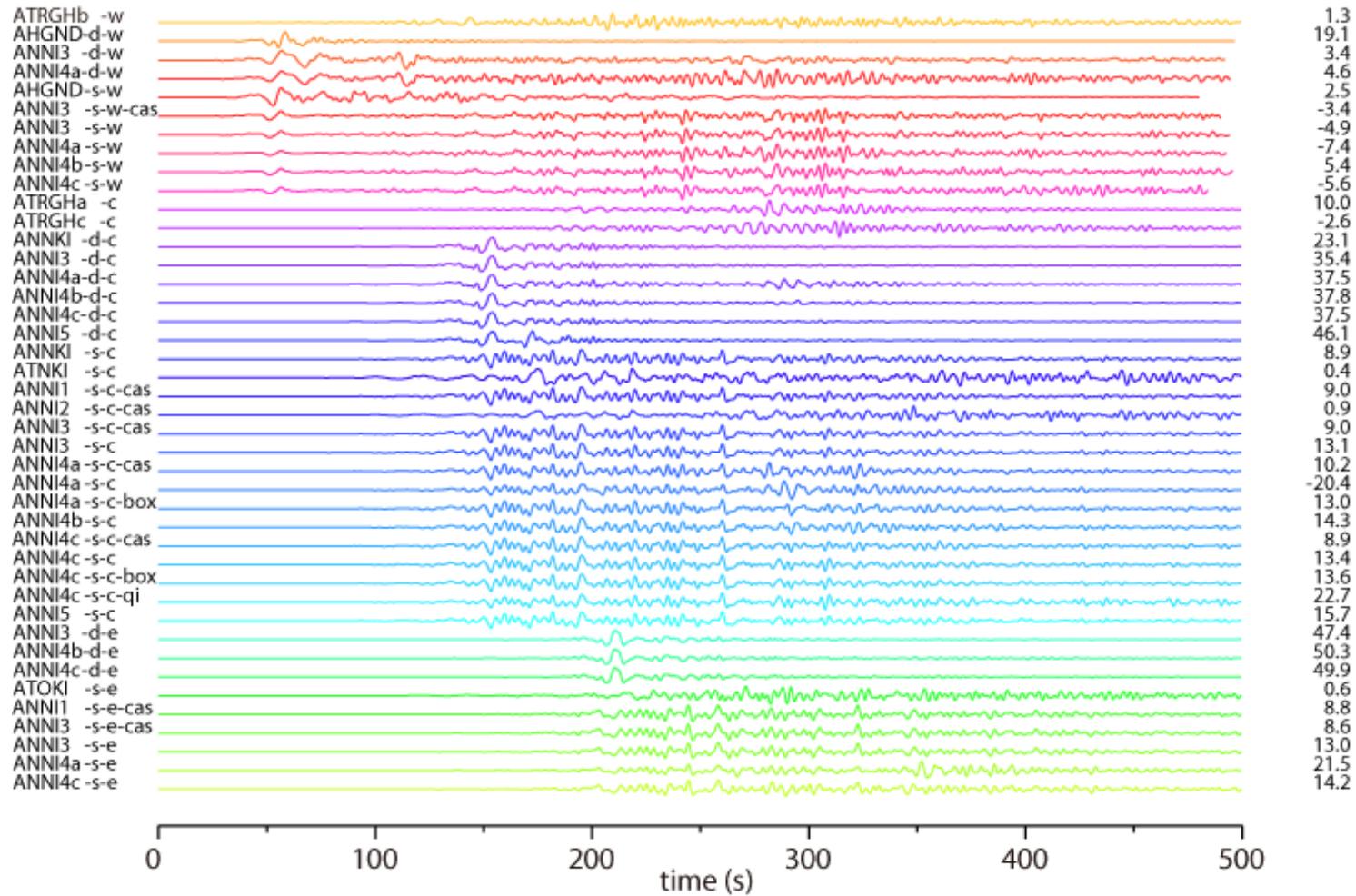


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (N-S)

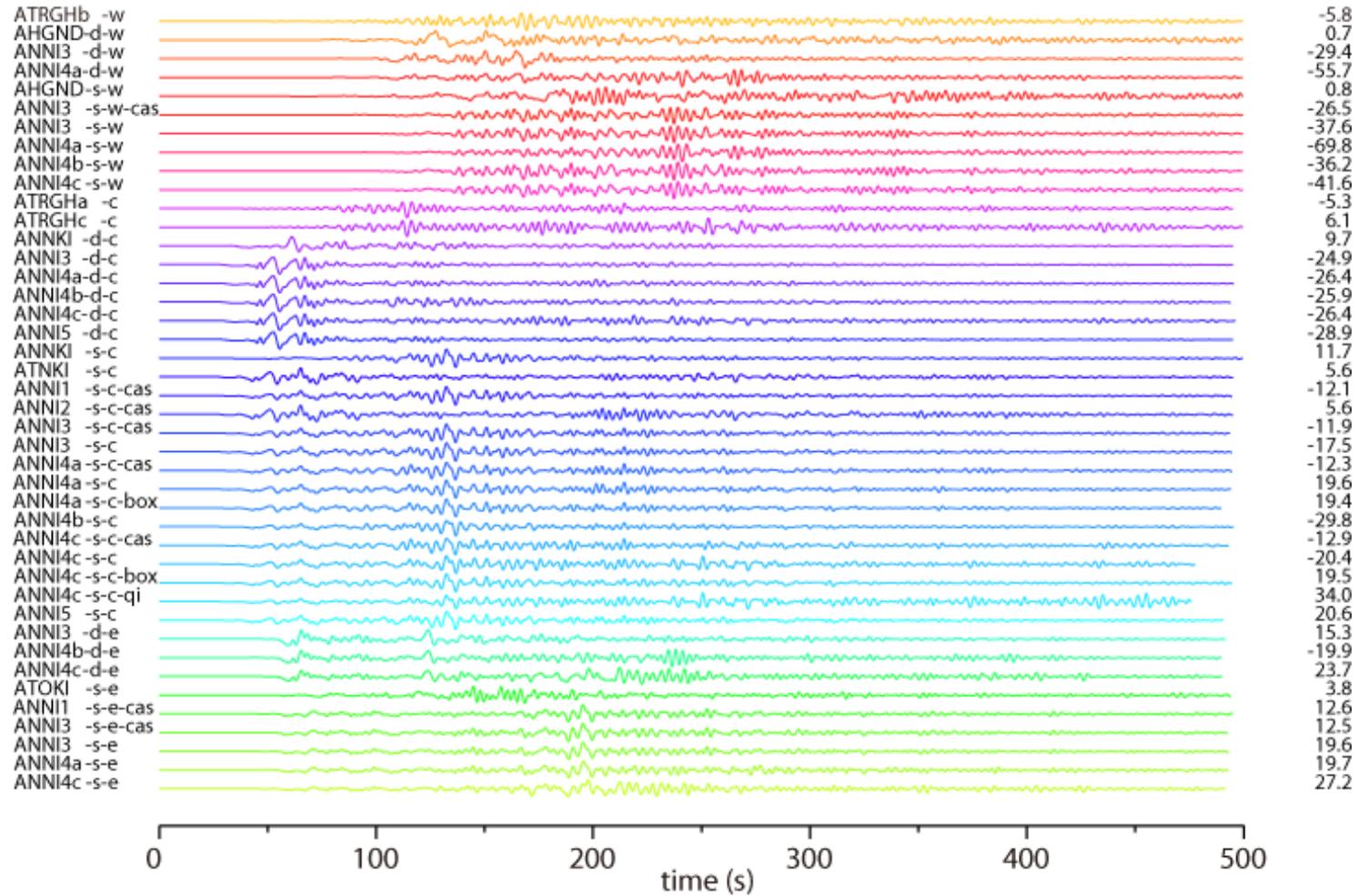


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (E-W)

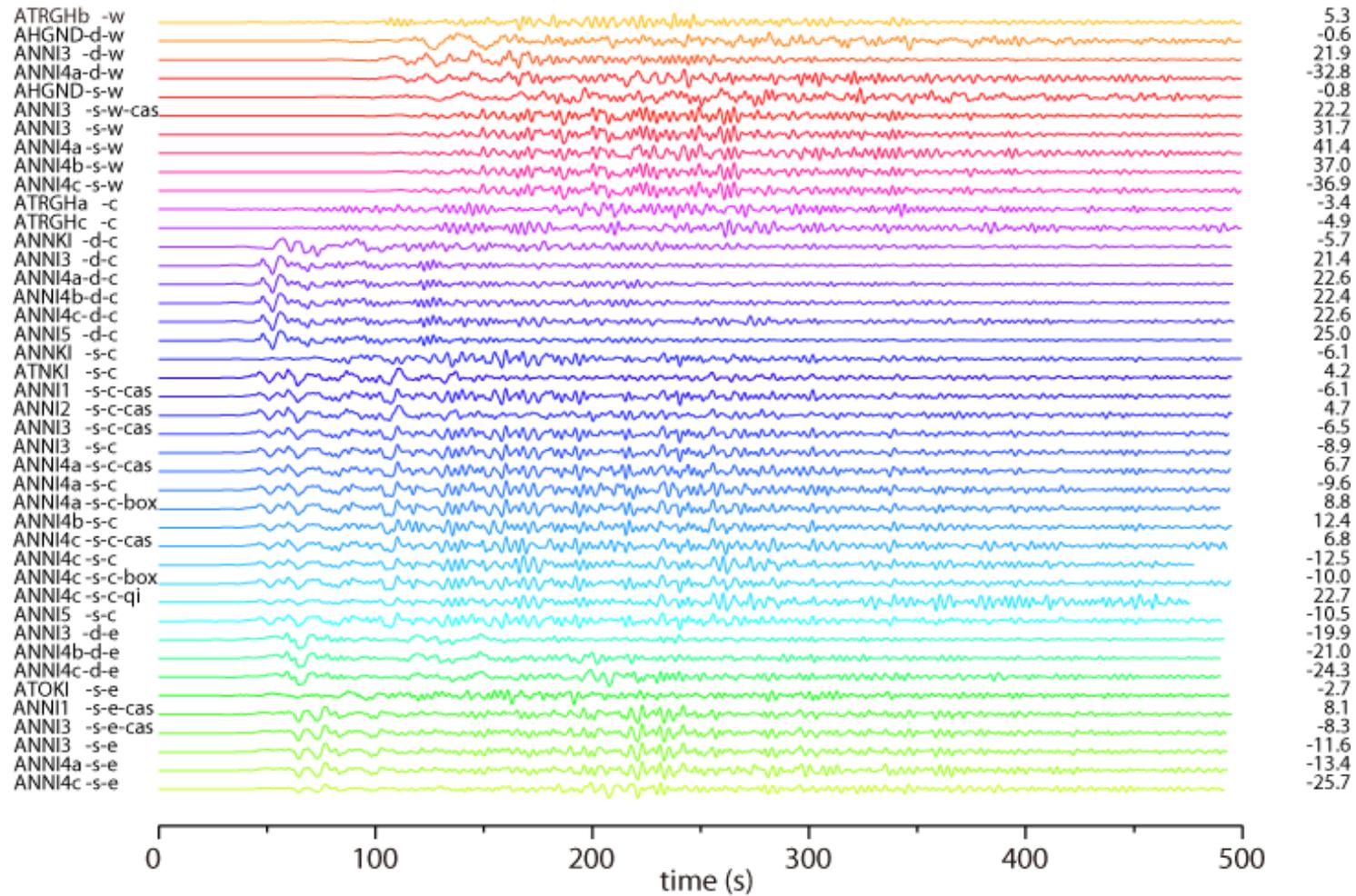


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (U-D)

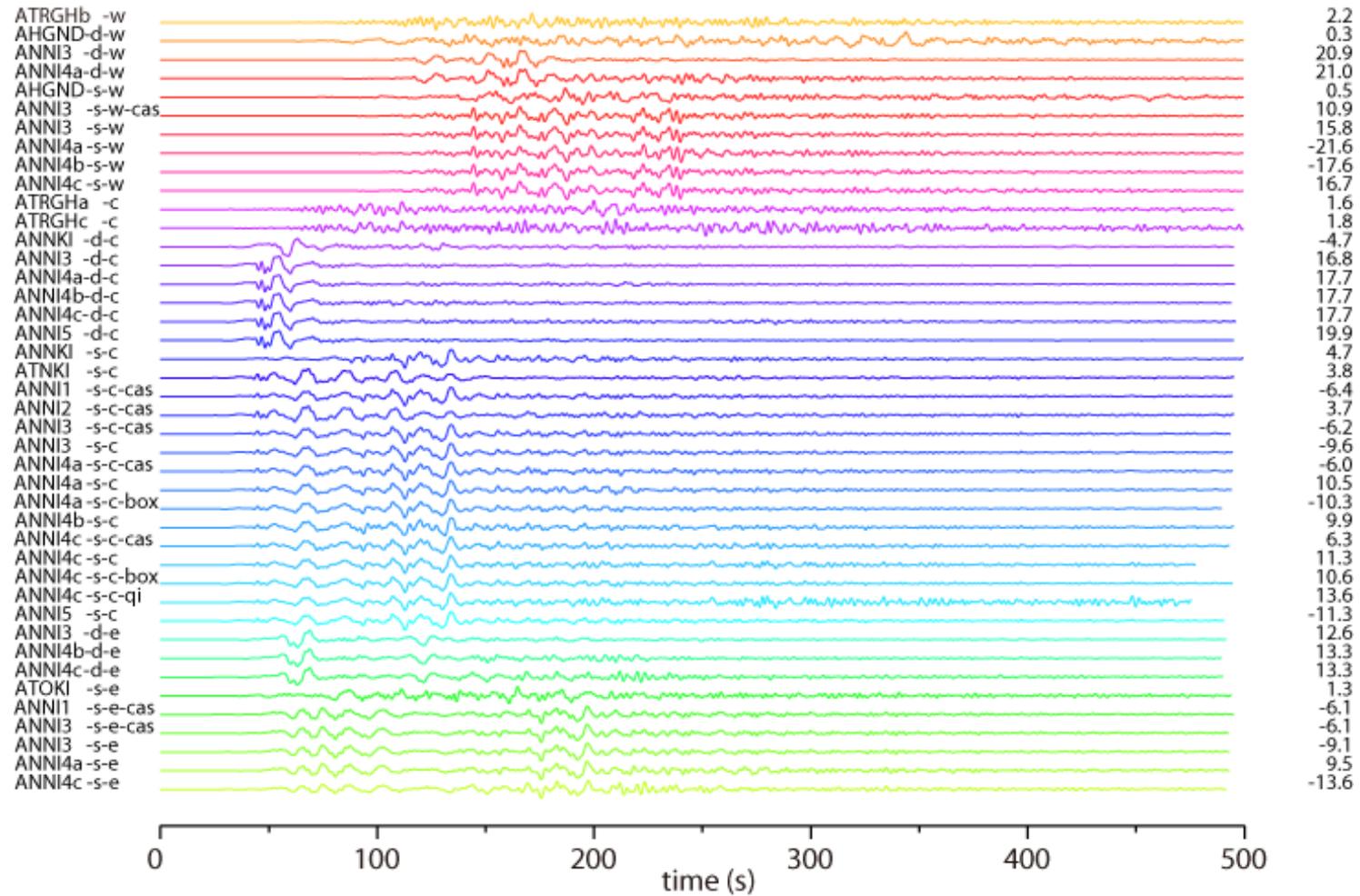


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (N-S)

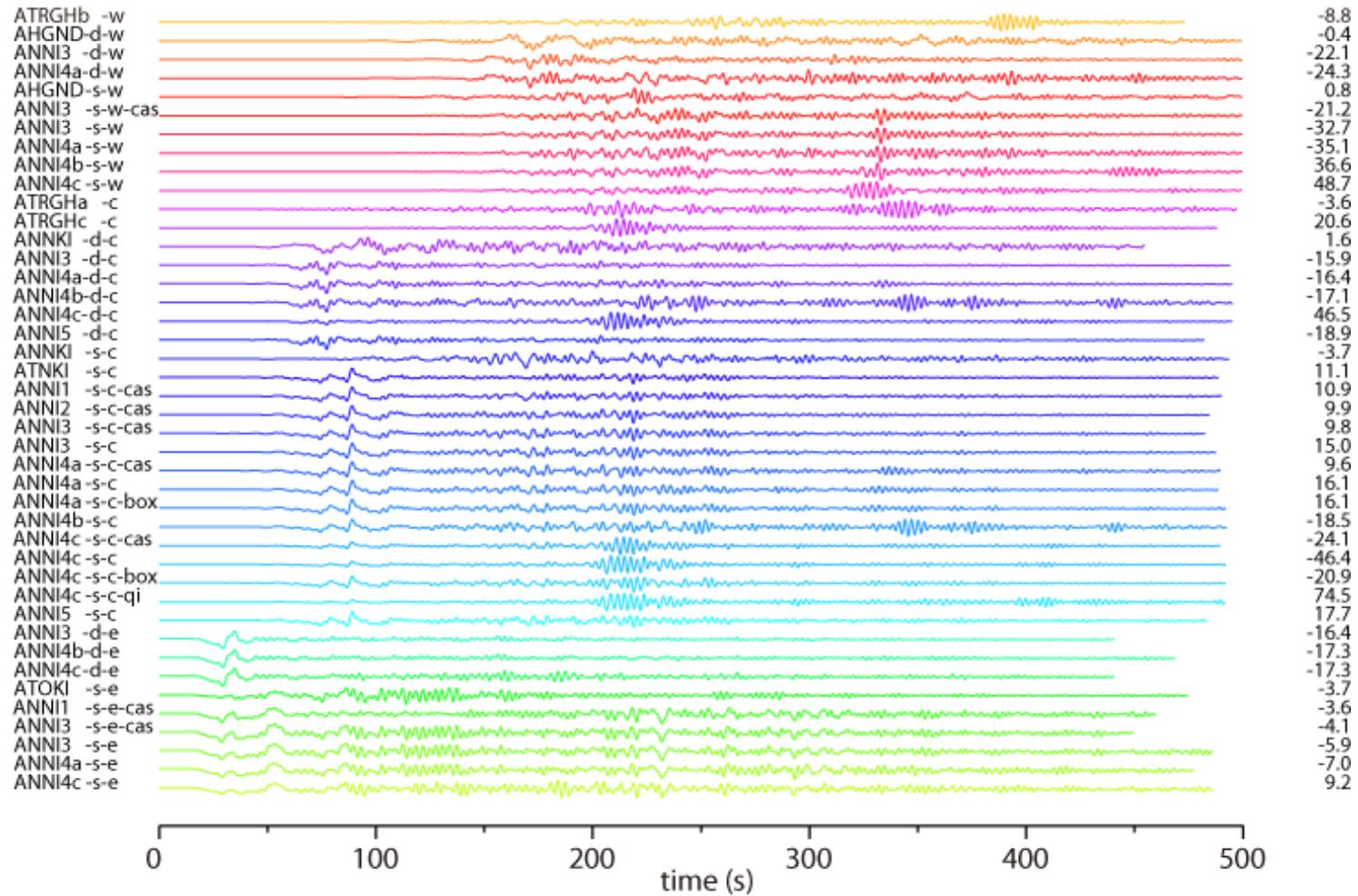


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (E-W)

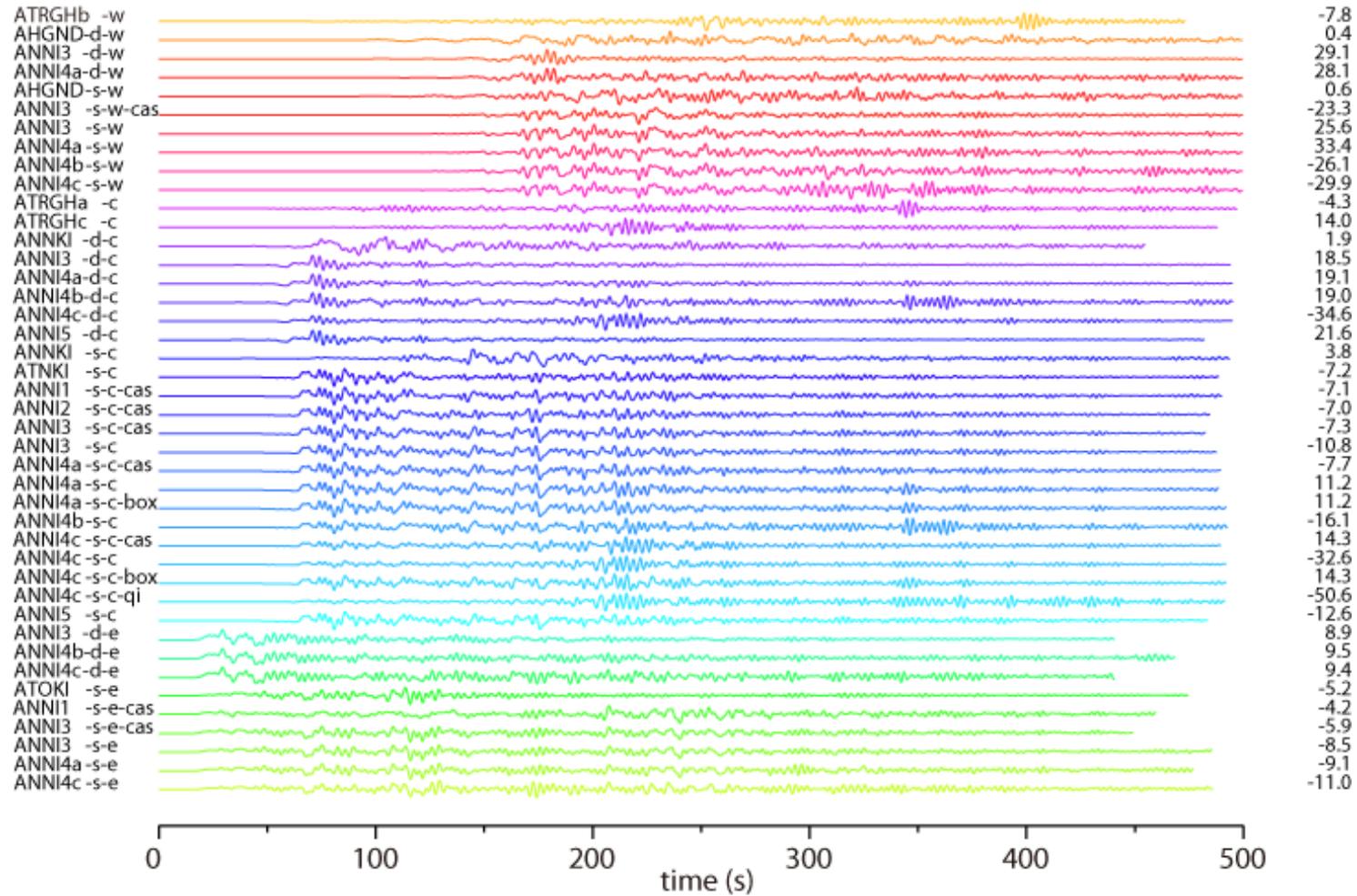


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (U-D)

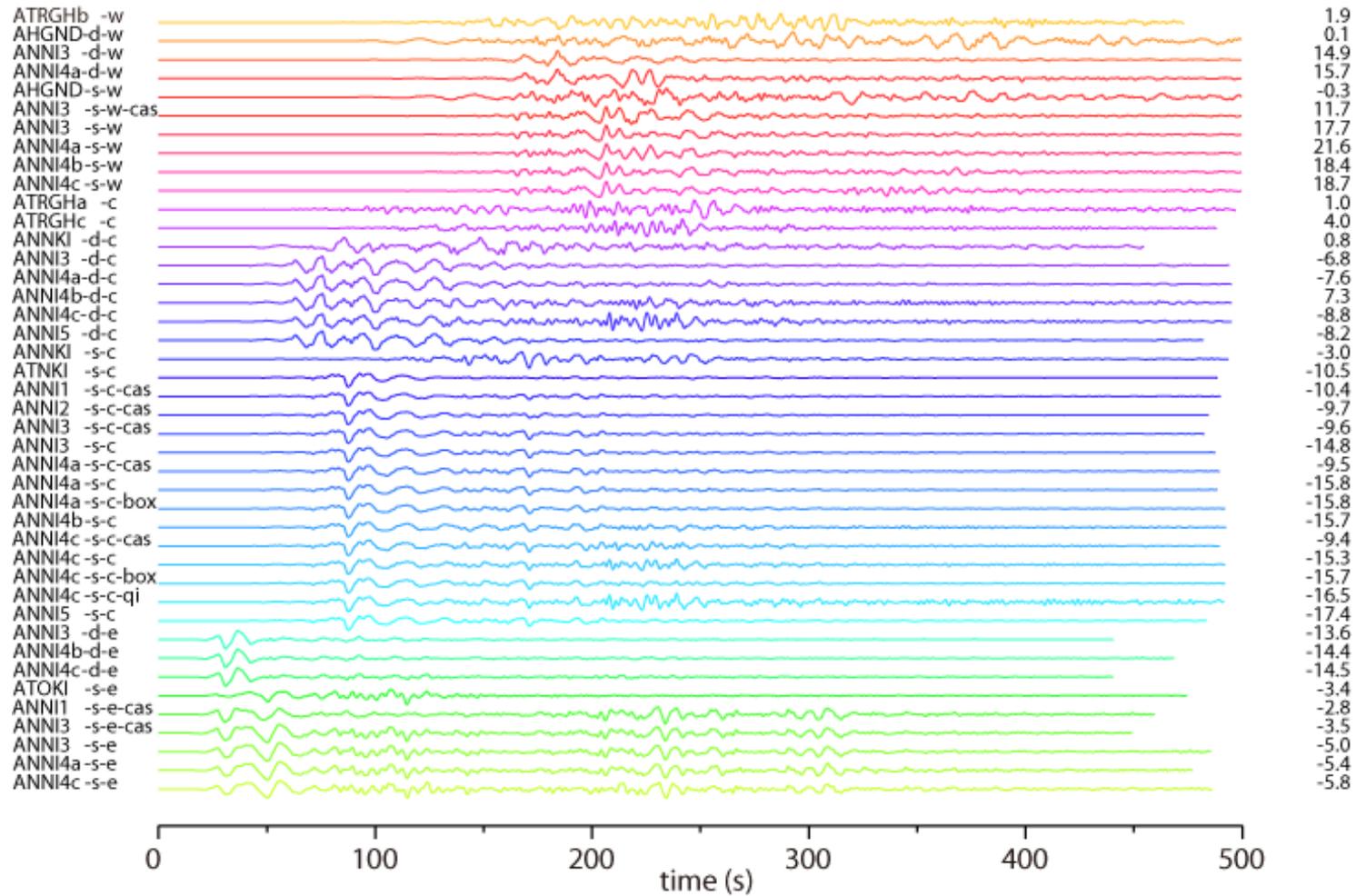


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (N-S)

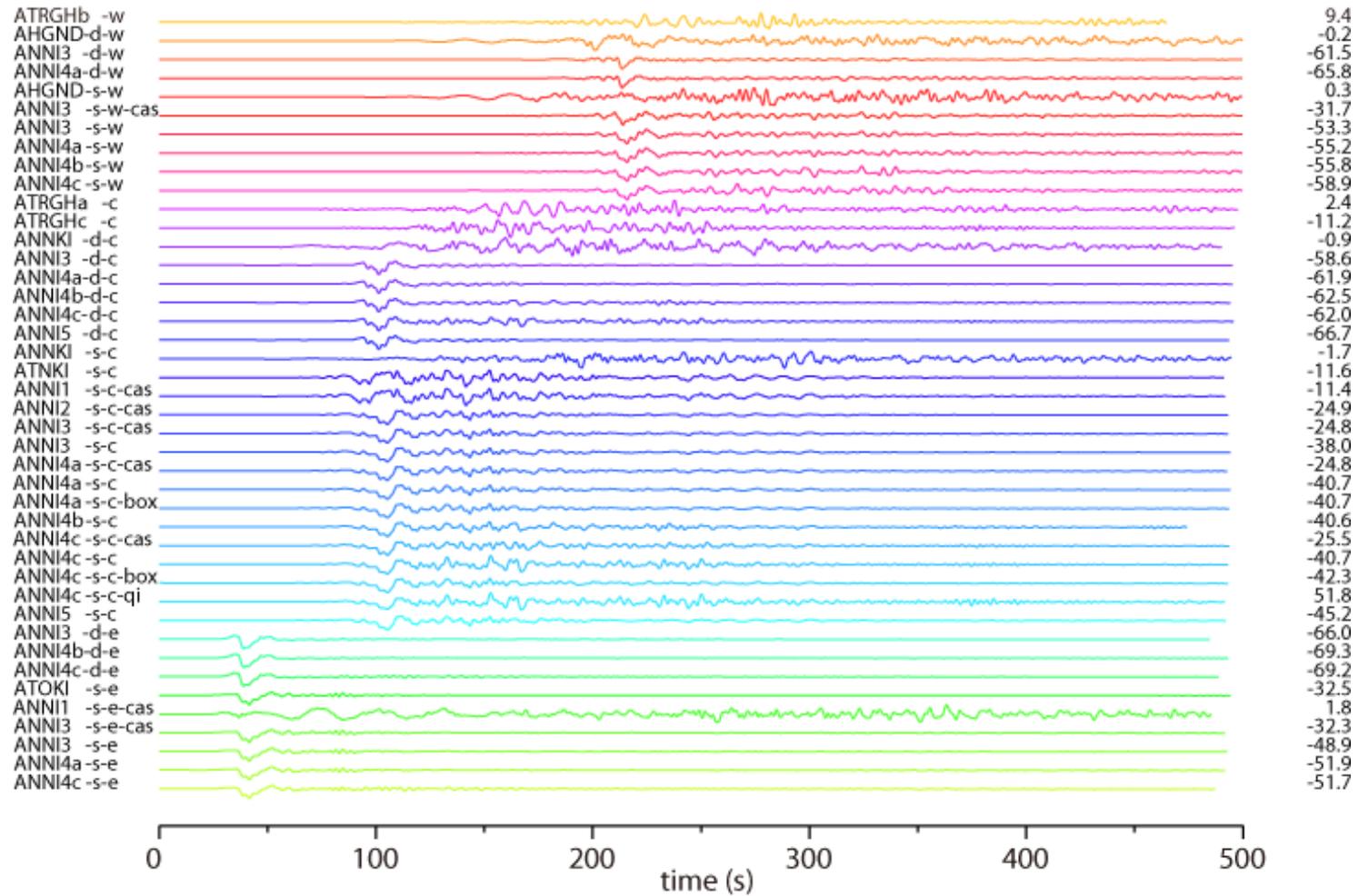


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (E-W)

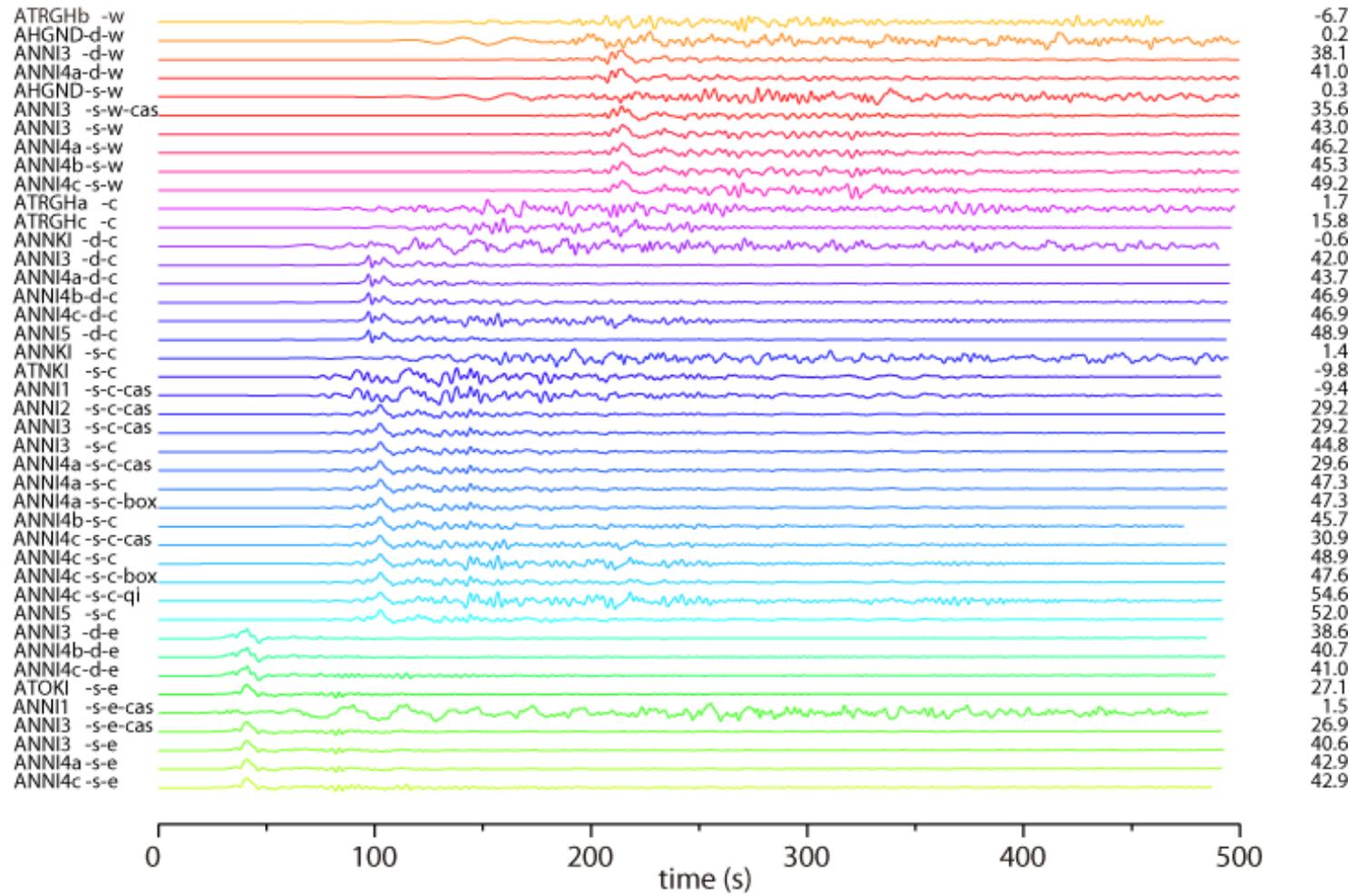


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (U-D)

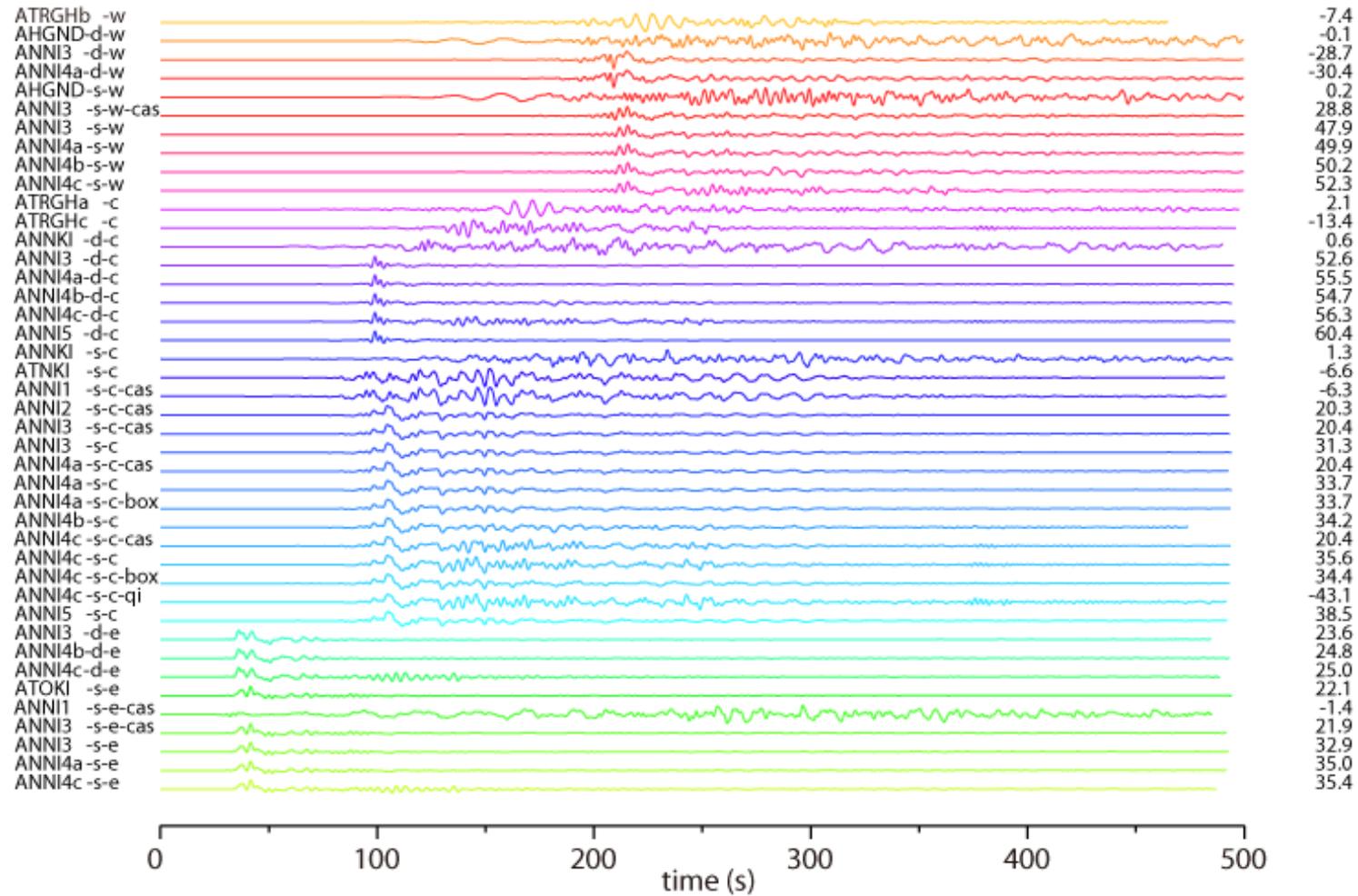


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (N-S)

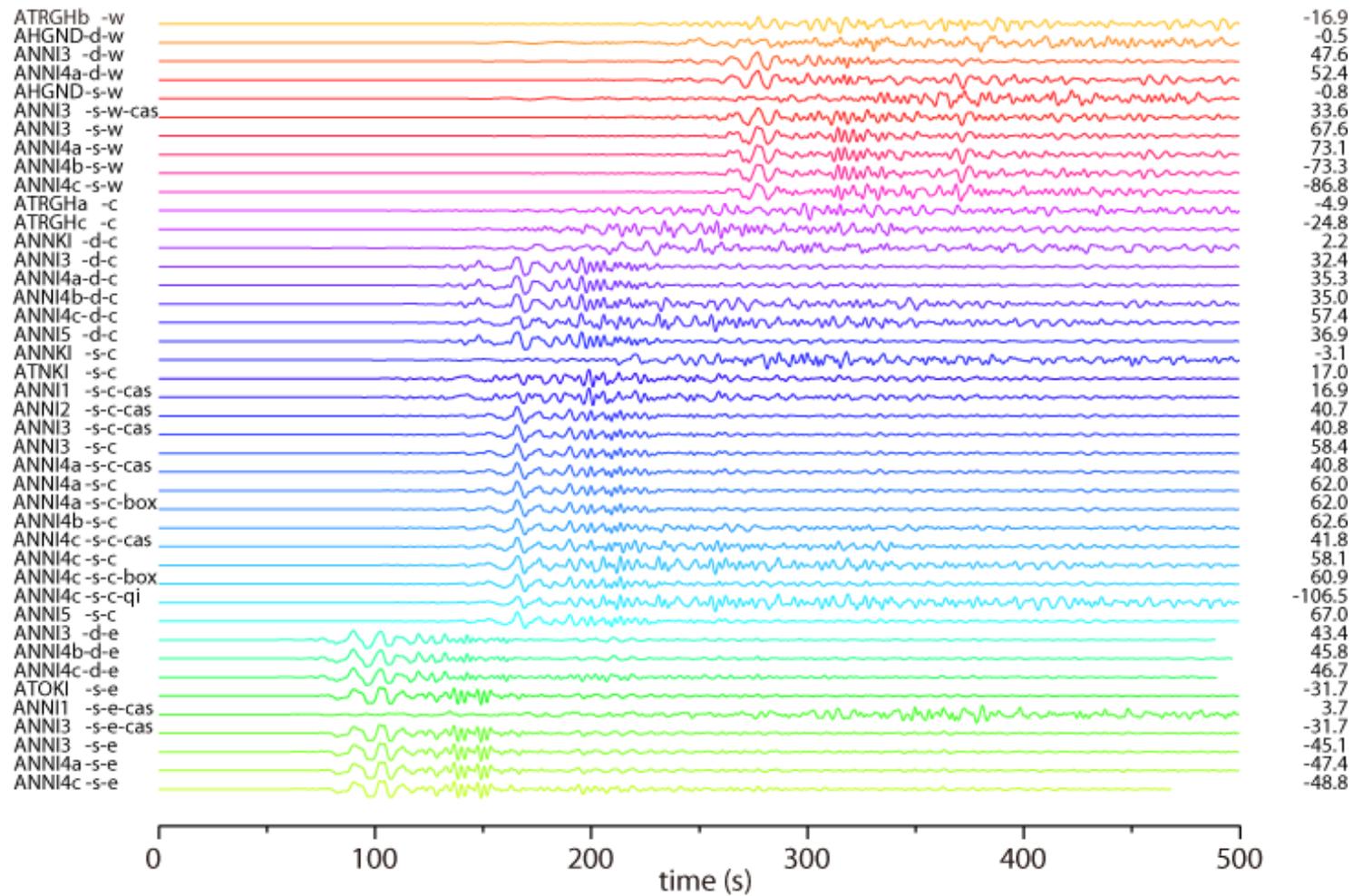


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (E-W)

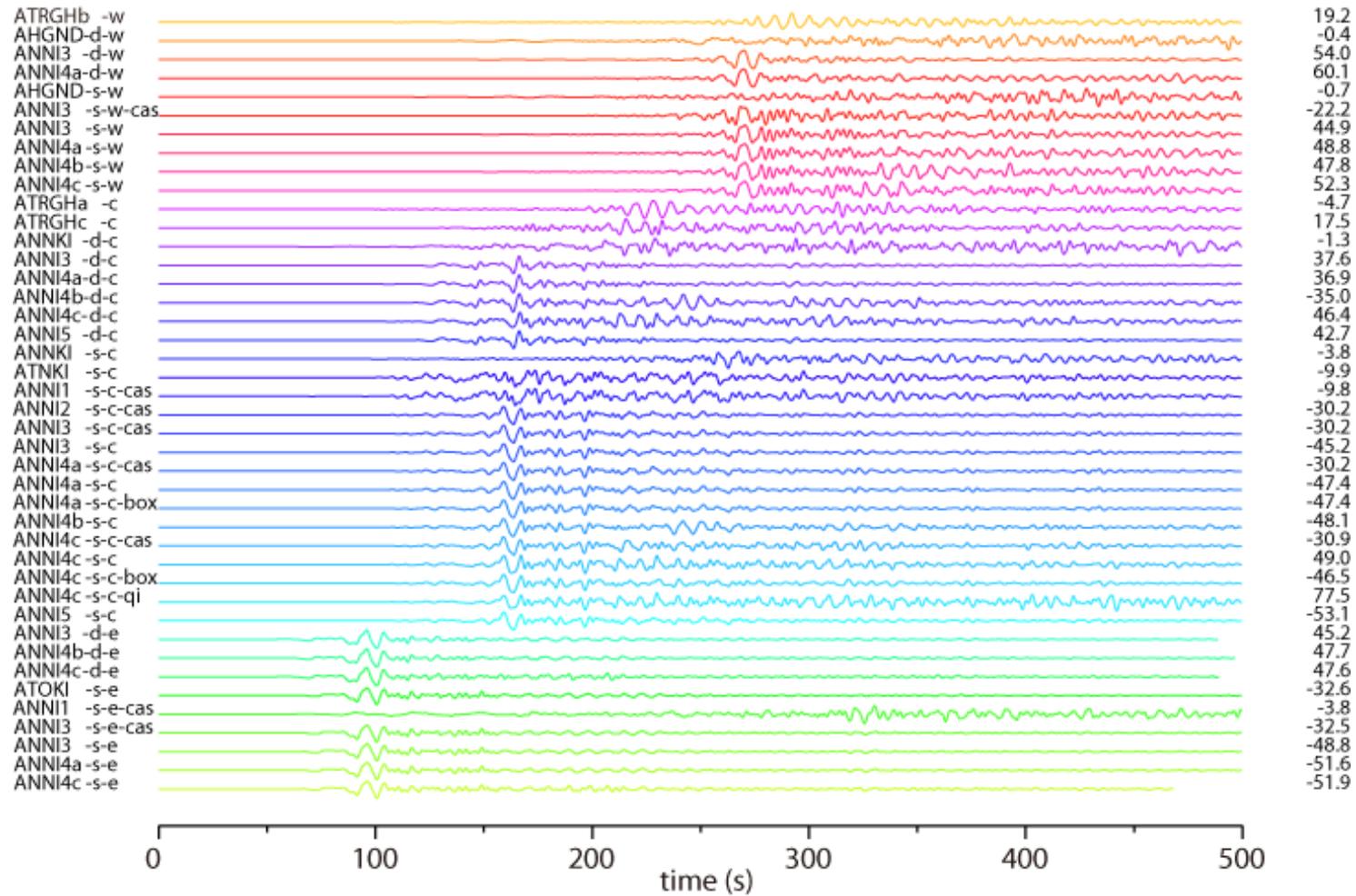


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (U-D)

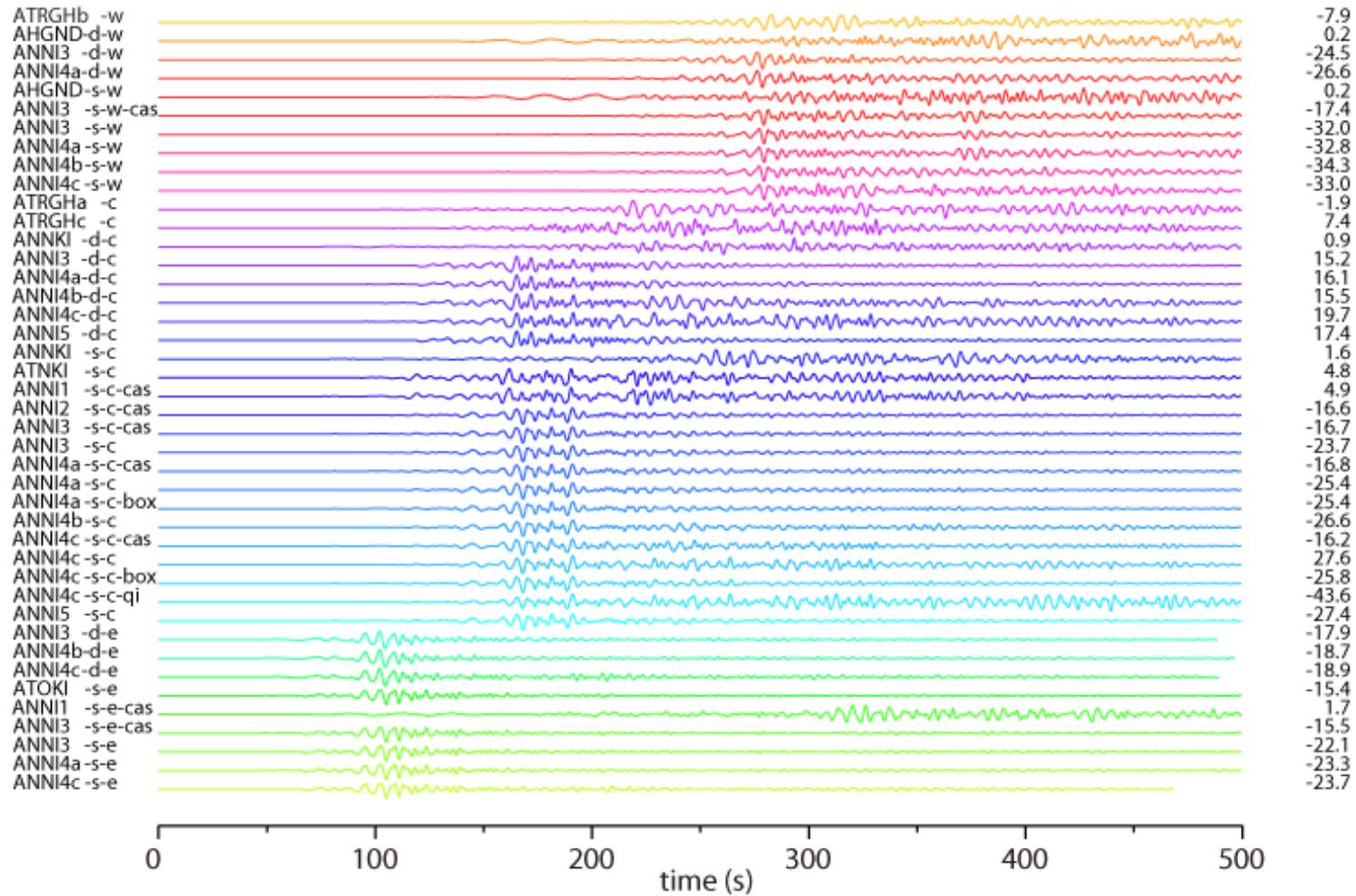


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

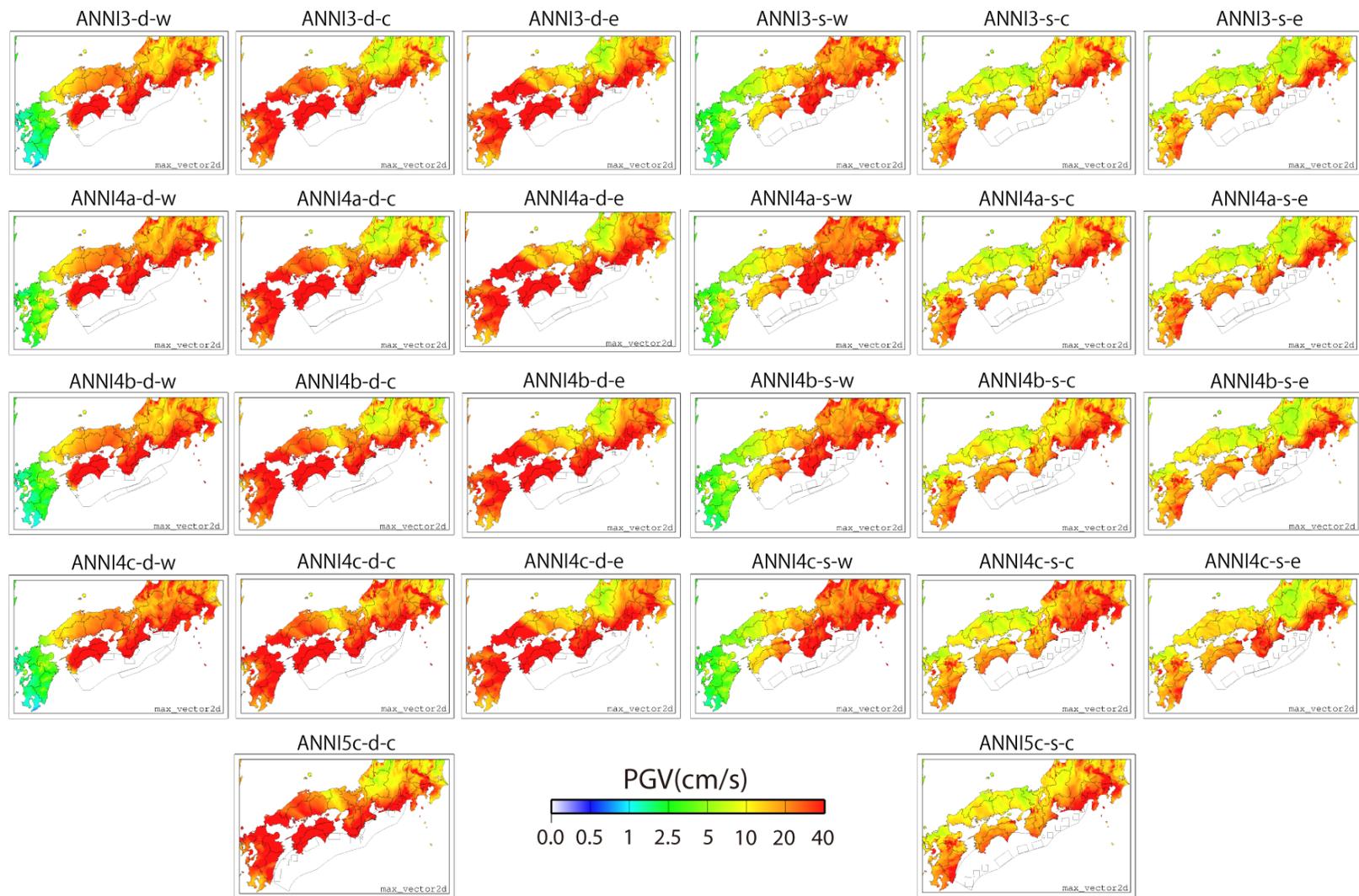


図 3.4-6a 最大地動速度値の分布 (3 連動、4 連動の場合)。ケース名は各パネル上に示している。

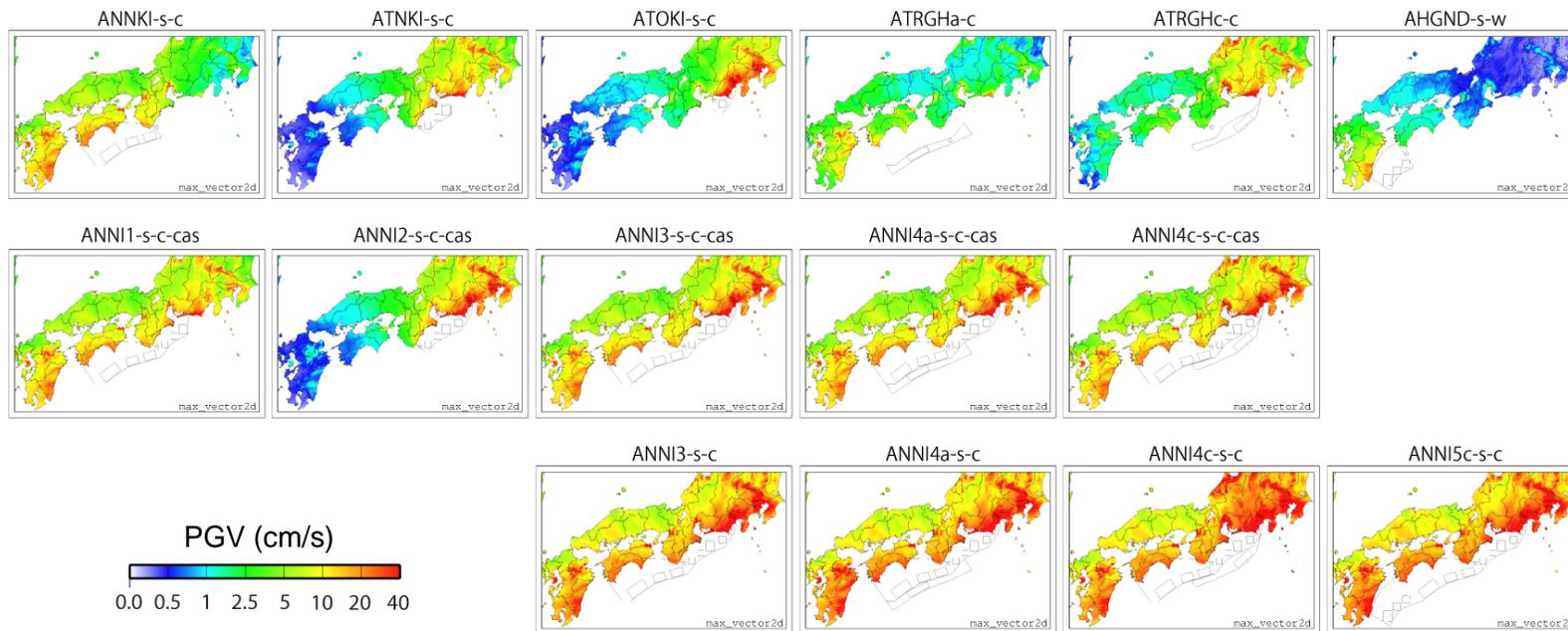


図 3.4-6b 最大地動速度値の分布（単独領域、複数領域（カスケード、スケーリングの場合）ケース名は各パネル上に示している。

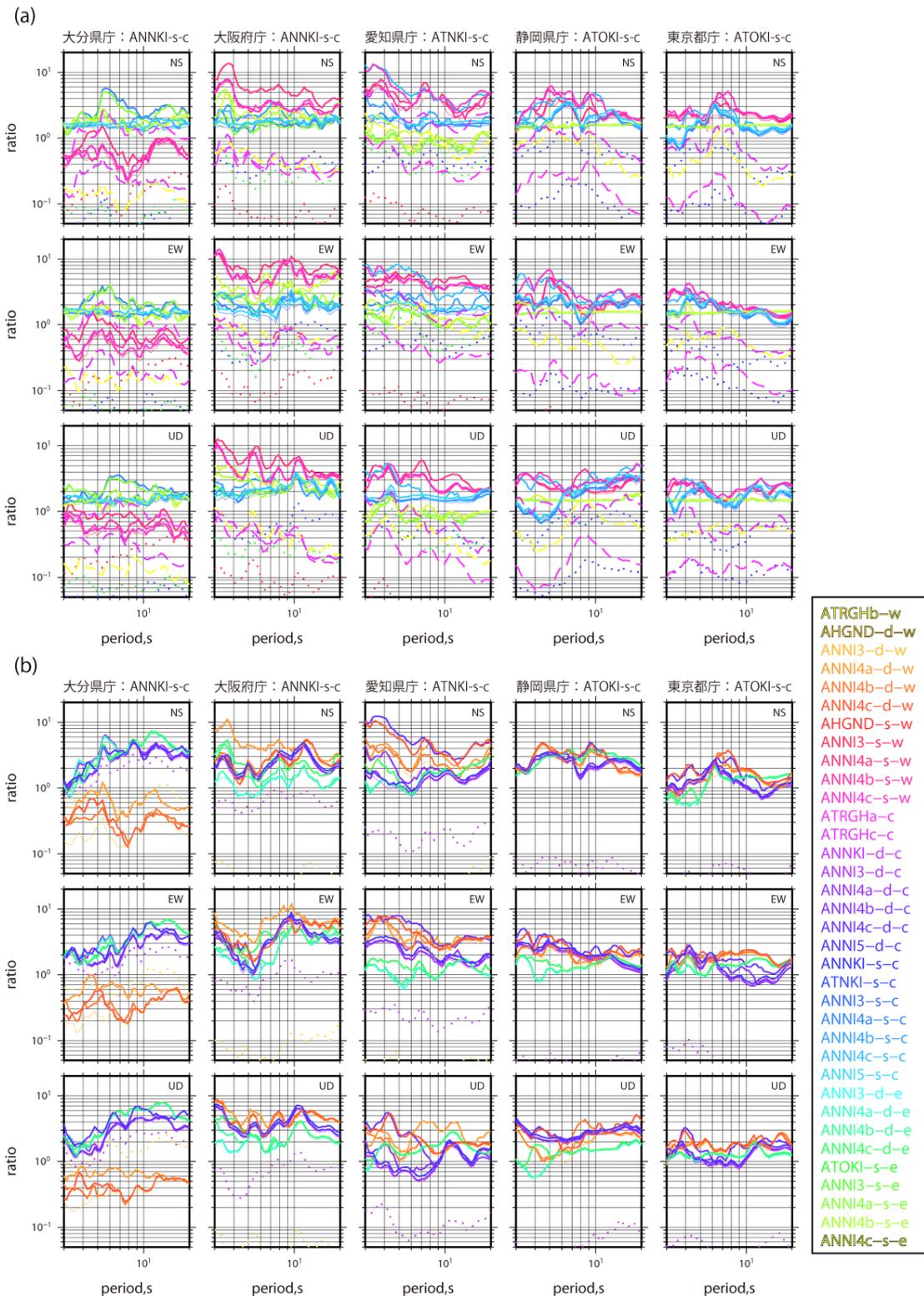


図 3.4-7 応答スペクトル比。(a) アスペリティが浅いケース、(b) アスペリティが深いケース。スペクトル比の基準としたケース名は地点名の右に示している。太実線は 4 連動、細実線は 3 連動、点線は単独領域。破線はトラフ沿いの単独領域。

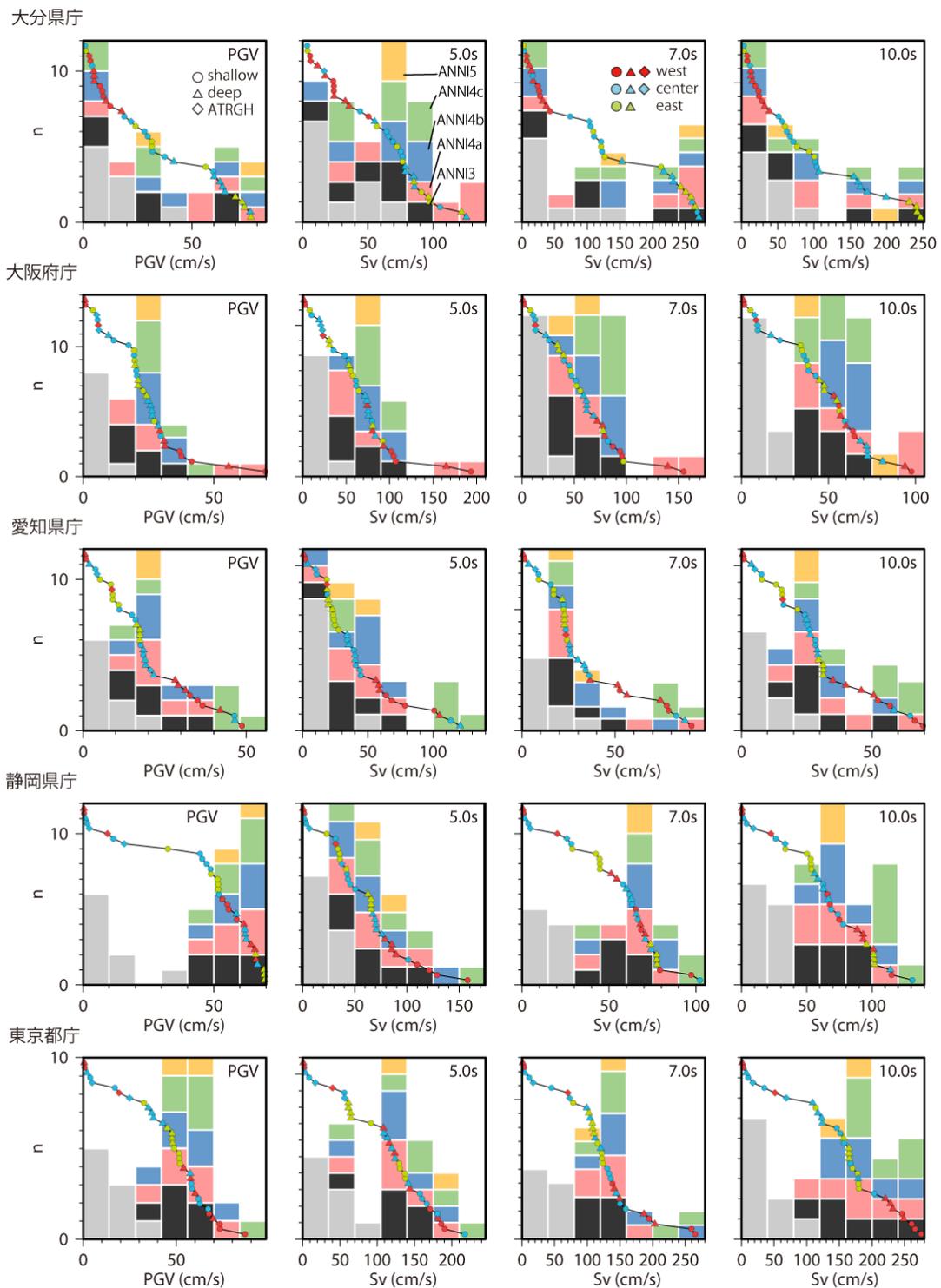


図 3.4-8 スケーリング型の 35 ケース (箱型関数、 Q 値無限大、 k -2 モデルは除く) についての、最大地動速度値、応答スペクトル (周期 5 秒、7 秒、10 秒) の度数分布。ヒストグラムは震源域と最大値の関係、累積頻度分布は破壊開始点、アスペリティ深さと最大値との関係を示している。ヒストグラムの色、累積頻度の印、色については、上段の図中を参照。

2) ハイブリッド合成法の高度化に関する検討

海溝型巨大地震による広帯域地震動予測には、短周期領域における計算結果とのハイブリッド合成法の高度化が今後必要となる。ここでは、南海トラフの巨大地震を対象として統計的グリーン関数法により波形合成を行い、同じ特性化震源モデルを用いた差分法による結果と比較した。

対象とした震源モデルは、1) で示したもののうち、南海・東南海・想定東海にトラフ沿いの領域を加えた 4 連動型で、破壊開始点を震源域の中央部に置いたモデルとした。統計的グリーン関数法に用いる要素地震による統計的グリーン関数は、「全国地震動予測地図」の「震源断層を特定した地震動予測地図」の計算で用いられているものと同じパラメータを用いて設定した。震源域が広大であることから、要素地震は各アスペリティの中心点に設定したが、背景領域については、破壊開始点に置いた要素地震を全体に適用した。地震基盤 ($V_s3400\text{m/s}$) から工学的基盤上面 ($V_s500\text{m/s}$) までの地下構造は、差分法の計算と同様に全国 1 次地下構造モデル (暫定版) を用いた。震源パラメータは差分法の計算に用いたものと同じものを用いた。ただし、差分法では震源モデルのグリッド間隔を 0.5km としていたが、統計的グリーン関数法では要素断層の大きさを約 10km 四方とした。

図 3.4-8 に、大分県庁、大阪府庁、愛知県庁、静岡県庁、東京都庁における、統計的グリーン関数法による合成波形、各アスペリティと背景領域からの寄与、それらのフーリエスペクトルを示す。大阪府庁、愛知県庁では複数のアスペリティからの寄与により他に比べて継続時間の長い波形となっている。静岡県庁は想定東海地震の震源域直上にあるため、短周期成分に富んだ大振幅の波形となっている。震源域から離れている大分県庁と東京都庁では、それぞれの地点に近いアスペリティからの寄与を強く受けた波形となっている。

図 3.4-9 に、統計的グリーン関数法による合成波形、差分法による計算波形、それらのフーリエスペクトルを示す。大阪府庁、愛知県庁、静岡県庁では、両手法による時刻歴波形の振幅は同程度となっているが、大分県庁、東京都庁では統計的グリーン関数法による合成波形の短周期成分が減衰し、差分法の結果に比べて 2 割程度の振幅となっている。

両手法では、地震基盤以深について異なる速度構造を仮定しているため、各アスペリティからの寄与も時間的にずれて現れていると考えられるが、今回の震源モデルでは各アスペリティからの寄与が時間的に重なっていることから、その影響は顕著ではない。図 2 では、差分法の結果のみに 0.5Hz のローパスフィルターをかけているため、スペクトルは高周波数帯で減少しているが、いずれの地点においても差分法と統計的グリーン関数法のフーリエスペクトルは 0.5Hz 付近で交差している。静岡県庁では両手法によるフーリエスペクトルは滑らかに接続するよう見えるが、他の 4 地点では統計的グリーン関数法の振幅レベルが低く、特に、大分県庁、東京都庁では一桁程度小さい。接続周波数帯域の振幅レベルの差は、統計的グリーン関数法の要素断層サイズをさらに大きくすることで縮小されると考えられるが、この帯域の時刻歴の評価のためには差分法に用いる震源モデルの短周期化と地下構造モデルの高精度化も必要である。

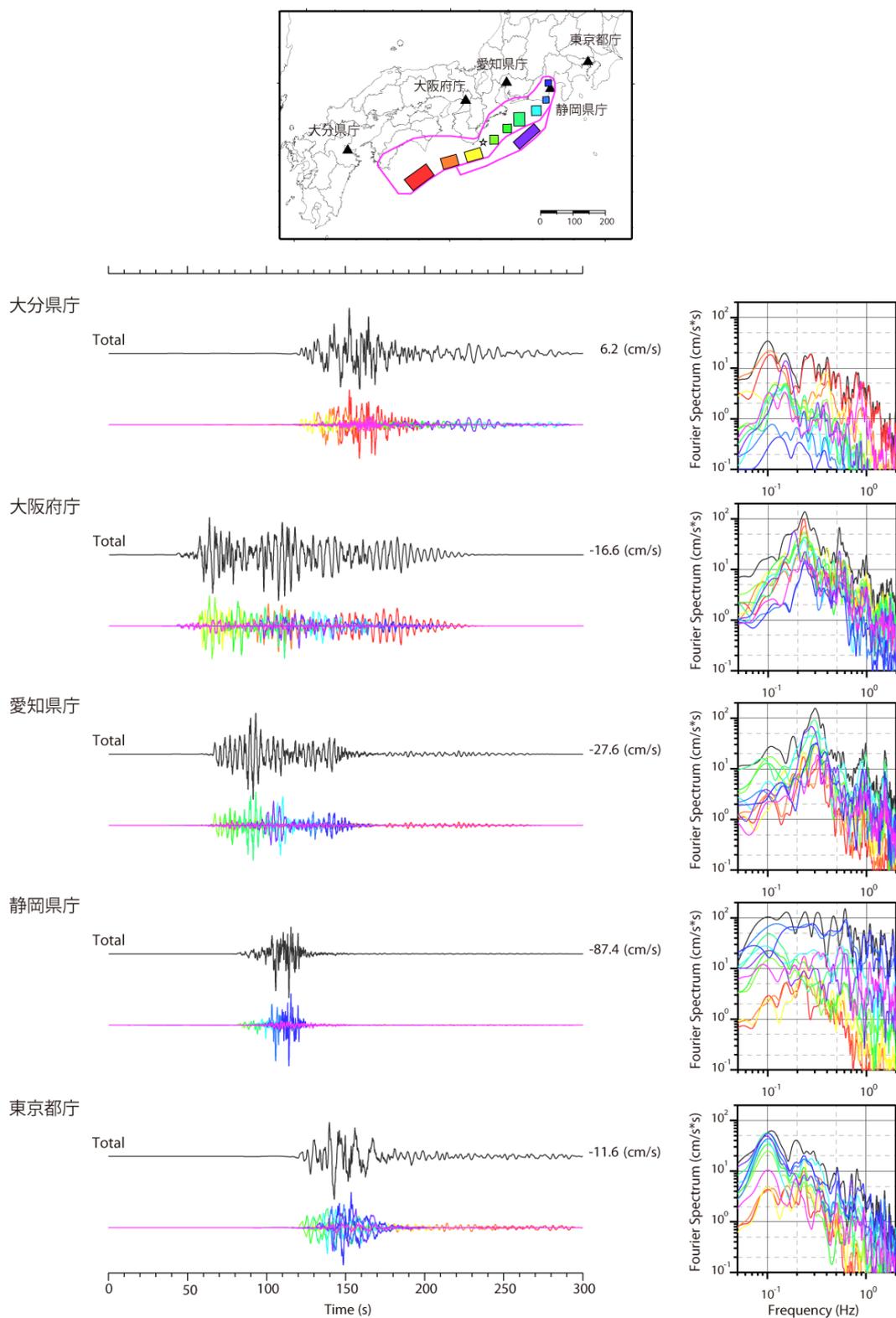


図 3.4-8 統計的グリーン関数法による、5 地点の速度波形と速度フーリエスペクトル。各アスペリティと背景領域からの波形の色は、上図内の震源モデルと対応している。黒線で示した波形・スペクトルはそれらを合成したものの。

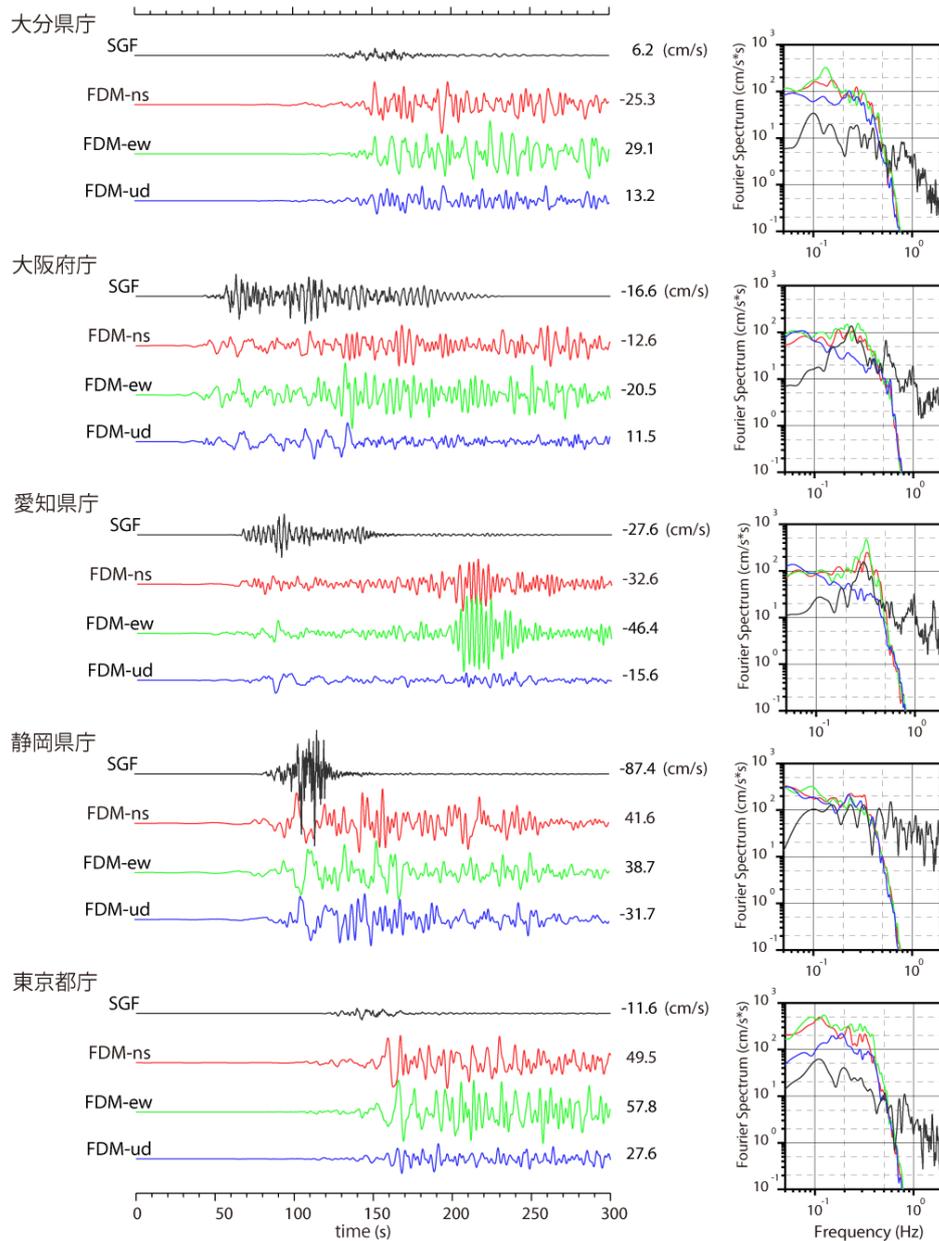
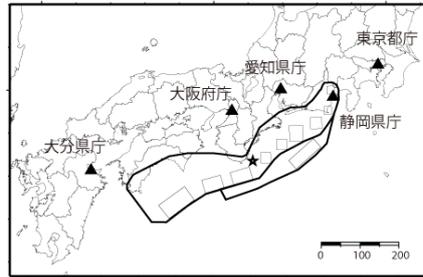


図 3.4-9 統計的グリーン関数法と差分法による、5 地点の速度波形と速度フーリエスペクトル。黒は統計的グリーン関数法、赤、緑、青は差分法による結果。差分法の結果には 0.5Hz のローパスフィルターをかけている。

3) 計算の高速化に関する検討

大規模な多数の地震動シミュレーションを実施するためには、多大な計算機資源が必要とされるが、GPU (Graphics Processing Unit) を演算機として活用して汎用的な計算を行う GPGPU (General Purpose Computation on GPU) の技術開発が進められている。詳細については、青井・他 (2010)などを参照いただくこととするが、ここでは、「3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等」で示した条件による計算について、100GPU および 256GPU を用いて並列計算を実施する場合について計算時間の見積もりを行った。その結果、100GPU では約 60 分 256GPU では約 30 分まで短縮される可能性があることがわかった。ただし、これには大量な計算結果を出力する時間が含まれておらず、実用化に向けては効率的な出力を行う手法の開発が必要とされている (青井・他、2011)。

(c) 結論ならびに今後の課題

連動型の震源モデルにカスケードモデルを適用したケースでは、対象地点に最も近い単独領域の影響を強く受けるが、スケーリングモデルを適用したケースでは、単独領域のみが破壊した場合に比べて地震動の振幅レベルは当然大きくなる。また、破壊開始点の影響は大きく、特に広域の地震動分布は破壊開始点の影響を強く受けている。トラフ沿いのすべりの大きな領域との位置関係によって、特に強い影響を受ける地域があることがわかった。今回の検討で対象としている周期帯 (やや長周期帯) の地震動に対しては、震源時間関数の違いによる影響が大きく、特に海溝沿いの領域に対してどのような震源時間関数を設定するかは、今後の重要な課題であり、2011 年東北地方太平洋沖地震を対象とした検討が必要である。

ハイブリッド合成法に関する検討結果より、接続周期帯域における振幅レベルの差異を改良するために統計的グリーン関数法の要素断層サイズをさらに大きくすることを提案するとともに、差分法に用いる震源モデルの短周期化と地下構造モデルの高精度化も必要であることを指摘した。

また、GPU を用いることで、より高速に大規模地震動シミュレーションを実施できる可能性を示した。

これらは、主にマグニチュード 8 クラスの地震に関して得られた知見であるが、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生により、さらに規模の大きなマグニチュード 9 クラスの地震のに対する計算手法等の検証も必要である。

(d) 引用文献

- 1) Aoi, S. and H. Fujiwara, 3-D finite difference method using discontinuous grids, Bull. Seismol. Soc. Am., 89, 918-930, 1999.
- 2) 青井真・藤井公輔・青木尊之, マルチ GPU による三次元波動伝播シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS016-07, 2010.

- 3) 青井真・西沢直樹・青木尊之, TSUBAME2.0によるGPUを用いた大規模波動伝播シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集, HSD028-16, 2011.
- 4) 中央防災会議, 第16回東南海、南海地震等に関する専門調査委員会, 参考資料, 2003.
- 5) Hisada, Y., A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity. Part 2: Case for a two-dimensional source model, Bull. Seismol. Soc. Am., 91, 651-666, 2001.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について(中間報告), 2001.
- 7) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「日向灘の地震を想定した強震動評価について」, 2005.
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2009年試作版, 2009.
- 9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2012年試作版, 2012.
- 10) 中村洋光・宮武隆, 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震2, 53, 1-9, 2000.
- 11) 武村雅之・神田克久, 震度データのインバージョン解析による過去の東海・南海地震の短周期地震波発生域, 地震予知連絡会会報, 76, 598-604, 2006.
- 12) 山中佳子, 1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程, 月刊地球, 26, 739-745, 2004.