

平成 23 年度

長周期地震動予測地図作成等支援事業

成果報告書

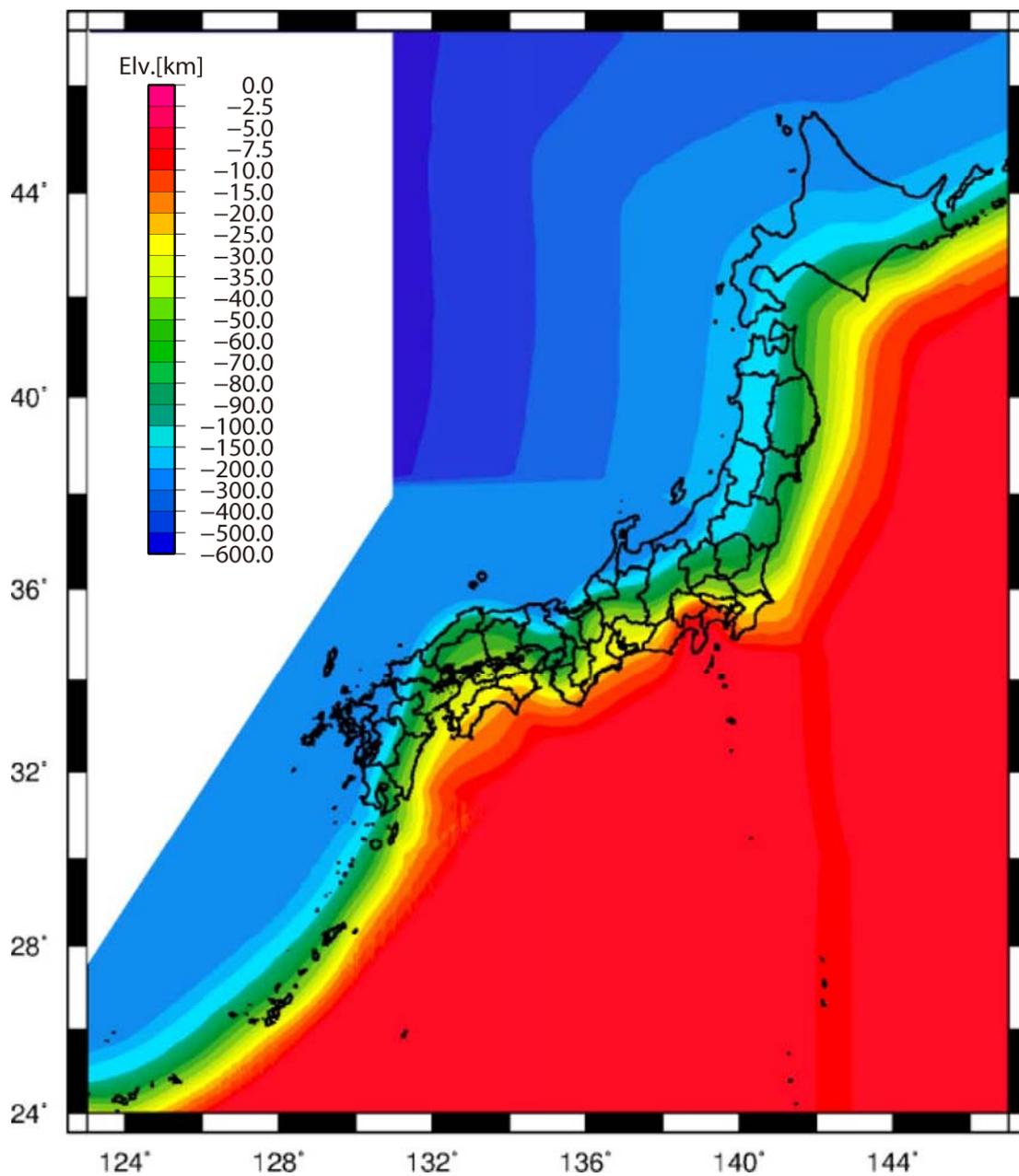
平成 24 年 3 月

文部科学省研究開発局

独立行政法人防災科学技術研究所

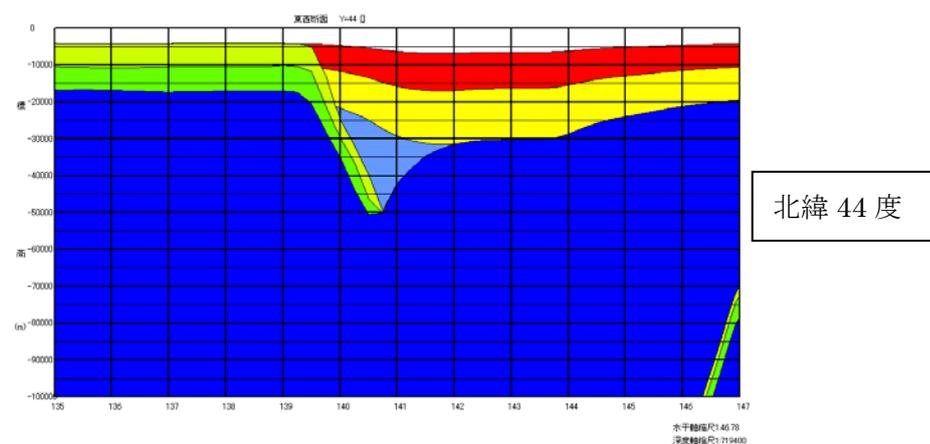
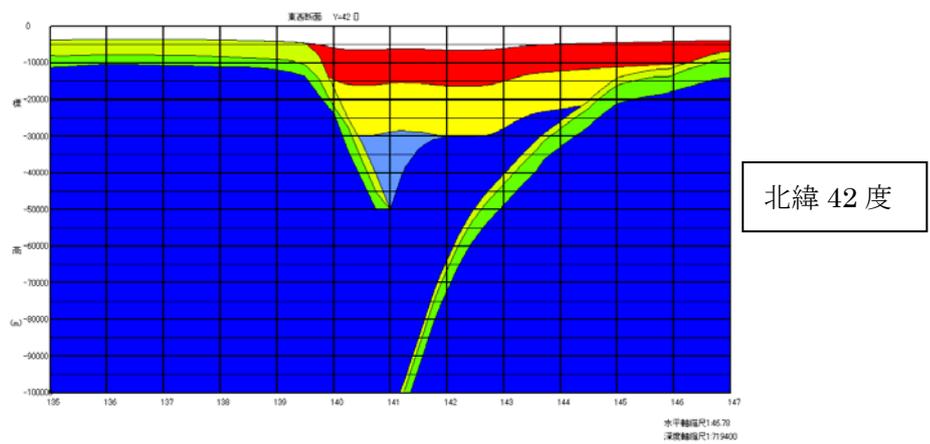
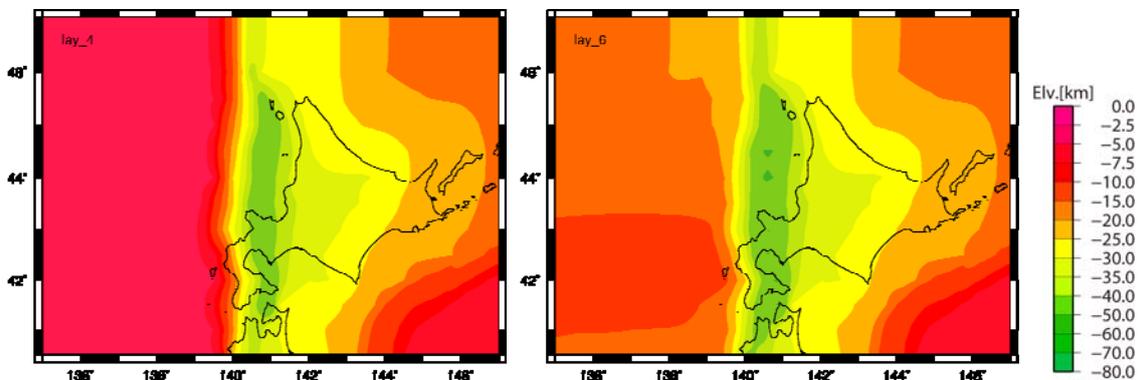
サブテーマ① 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

フィリピン海プレート上面深度



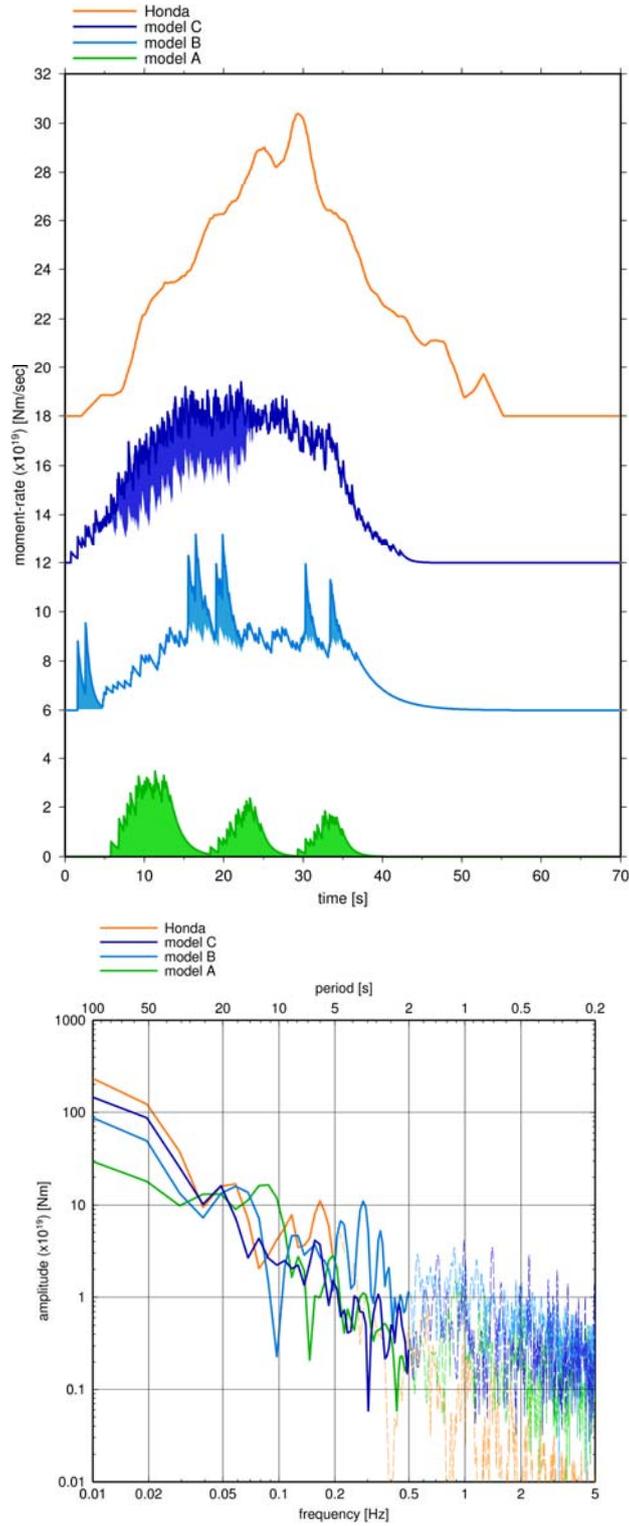
南西諸島まで拡張した沈み込むフィリピン海プレート境界構造モデル  
注) 太平洋プレート上面に接合させている

サブテーマ① 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等



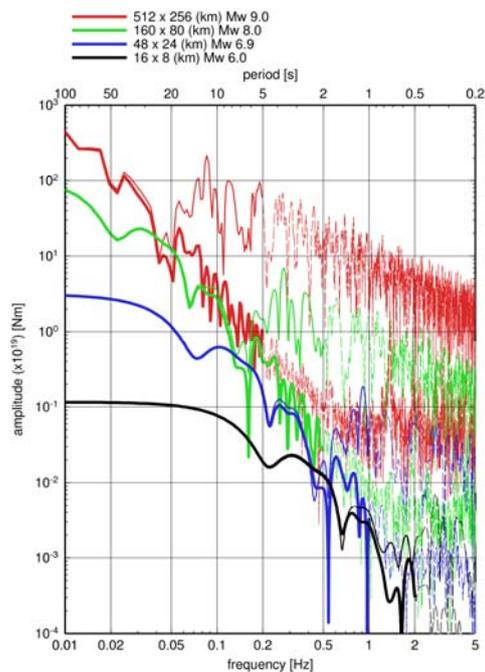
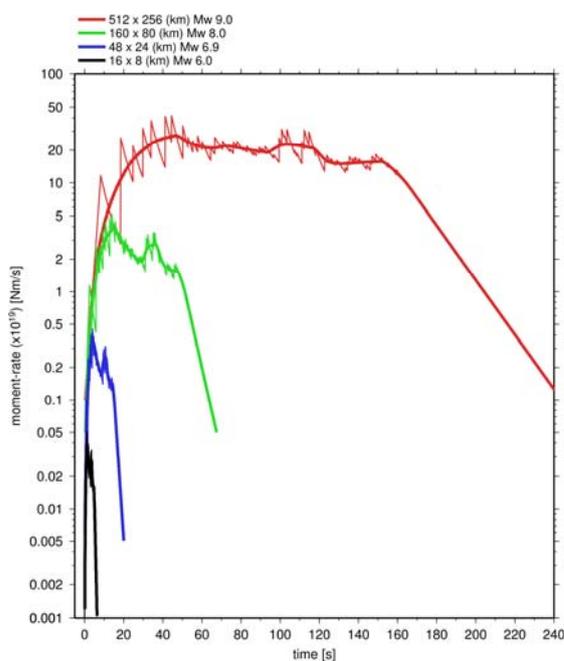
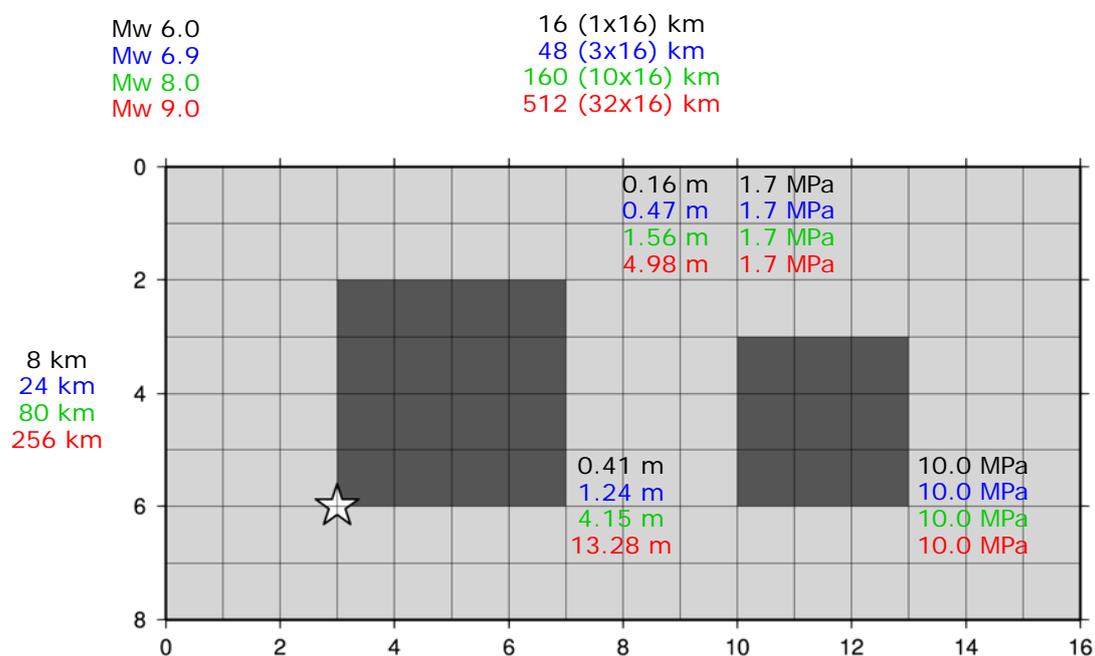
日本海東縁部のプレート境界構造の初期モデル  
 上段：海洋性地殻第2層（左）および海洋性マントル（右）の上面深さ分布  
 中・下段：北緯42度および北緯44度における東西断面

サブテーマ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



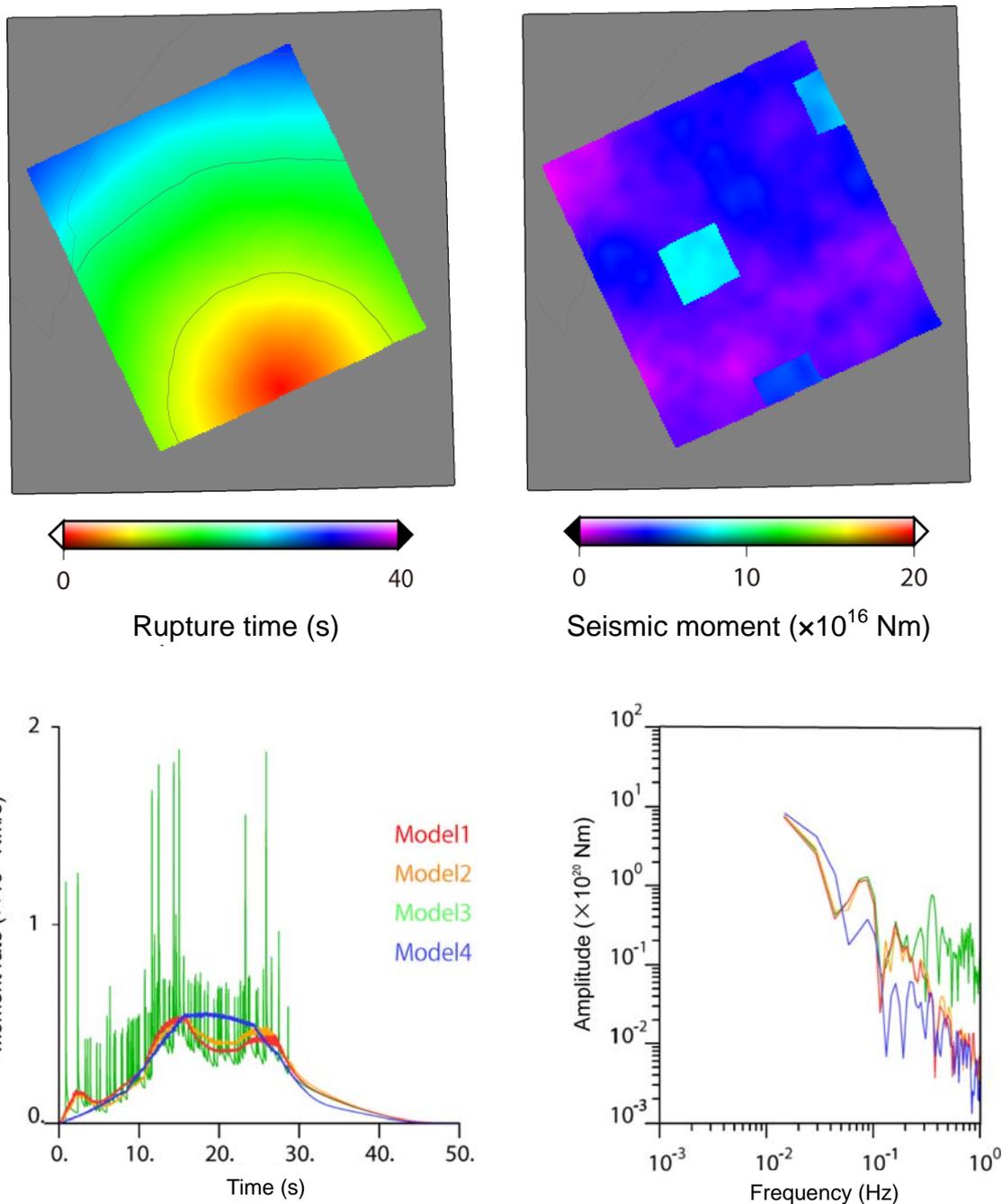
特性化震源モデルの改良に向けた既往の震源モデルにおける震源時間関数の比較

サブテーマ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



現状の特性化震源モデルの計算方法における長周期地震動の計算に用いられる理論的手法（太線）と短周期地震動の計算に用いられる波形合成法（細線）の震源時間関数及びスペクトルの比較 — M9は周期 20 秒以下、M8は周期 8 秒以下で差異が生じる

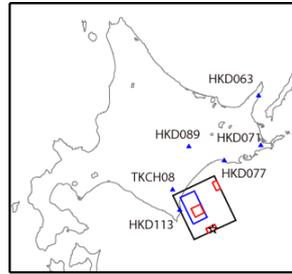
サブテーマ③ 巨大地震の観測記録による検証等



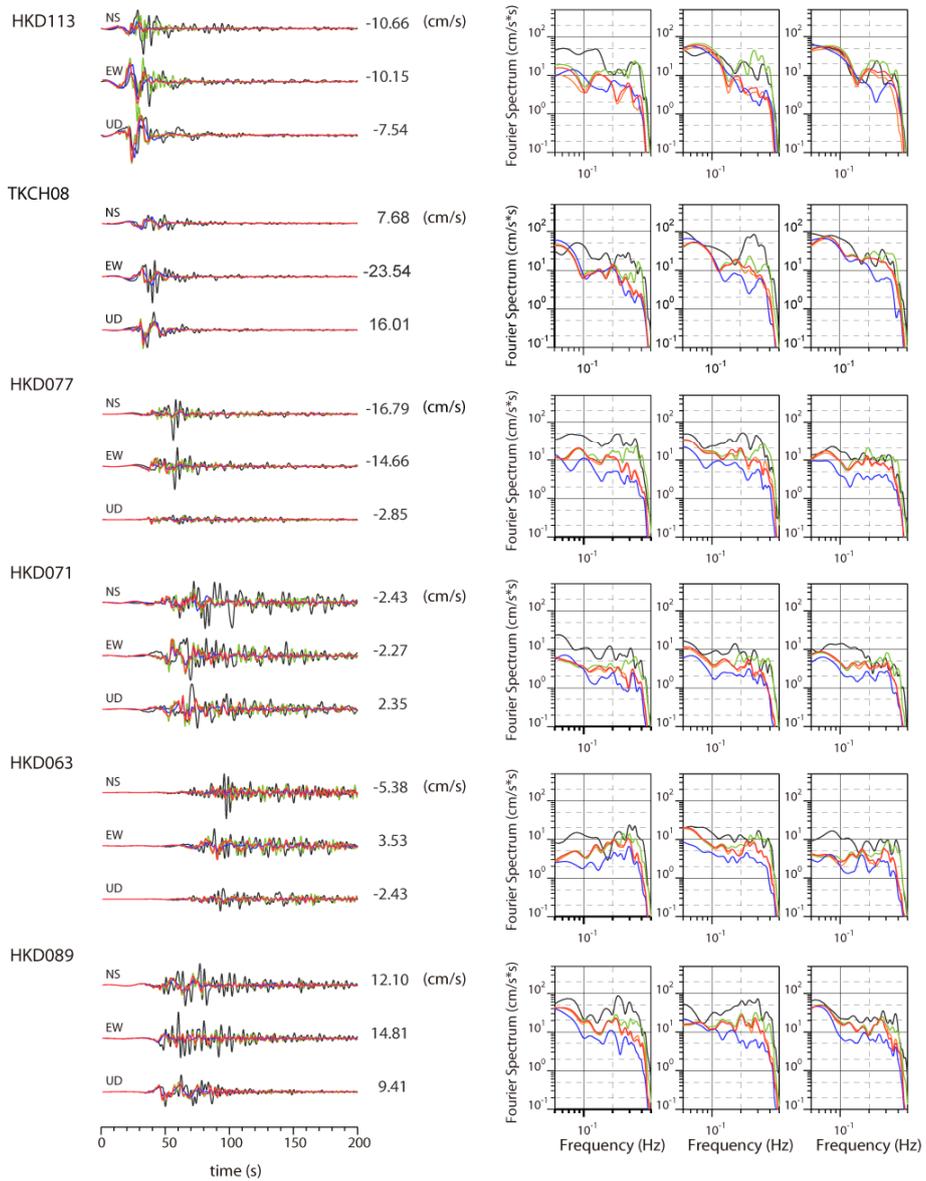
2003年十勝沖地震に対する k-2 モデルの導入（上）と震源時間関数の比較（下）

- モデル 1：震源モデルのグリッド間隔を 0.5km としたもの
- モデル 2：モデル 1 に、k-2 モデルによる不均質を付与したもの
- モデル 3：震源モデルのグリッド間隔を 10km としたもの（不均質なし）
- モデル 4：単一のアスペリティを持つモデル（グリッド間隔は 0.5km、不均質なし）。

サブテーマ③ 巨大地震の観測記録による検証等



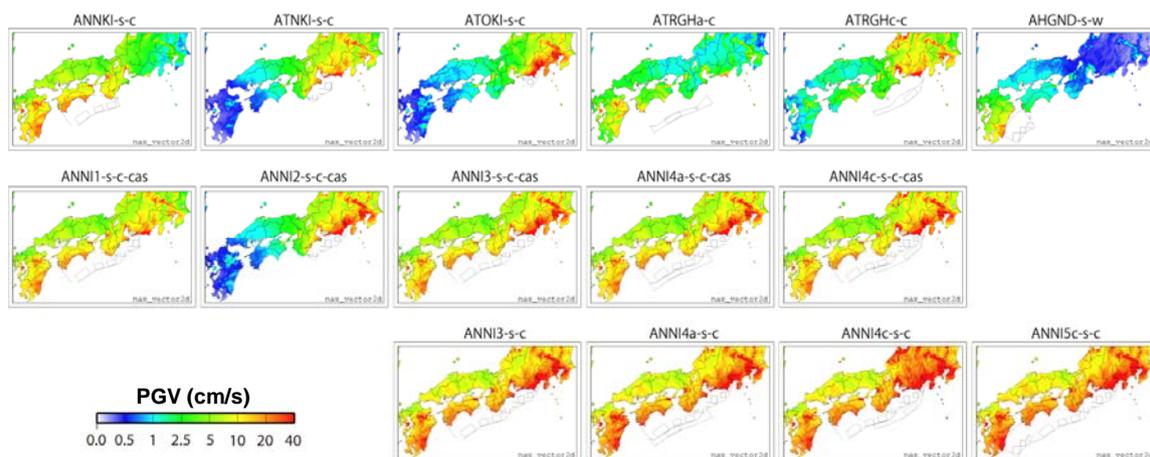
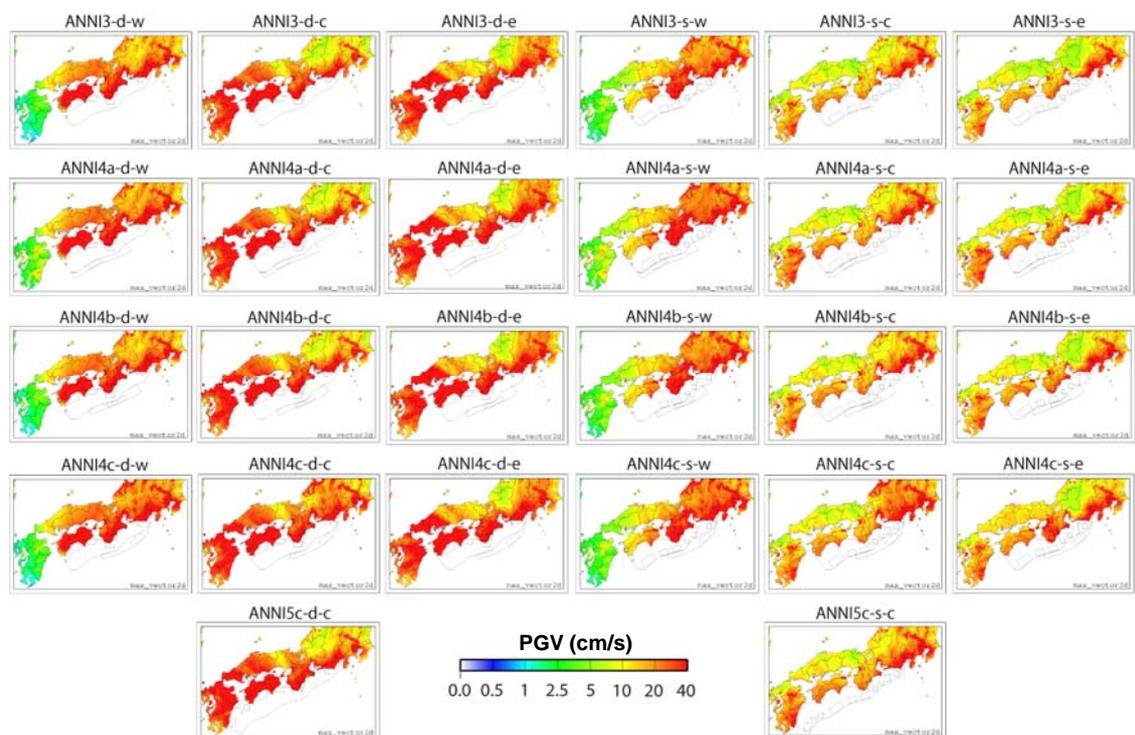
Model1  
Model2  
Model3  
Model4



2003年十勝沖地震に対して提案手法を適用した計算結果（色付き）と観測記録（黒）の速度波形及び速度フーリエスペクトルの比較

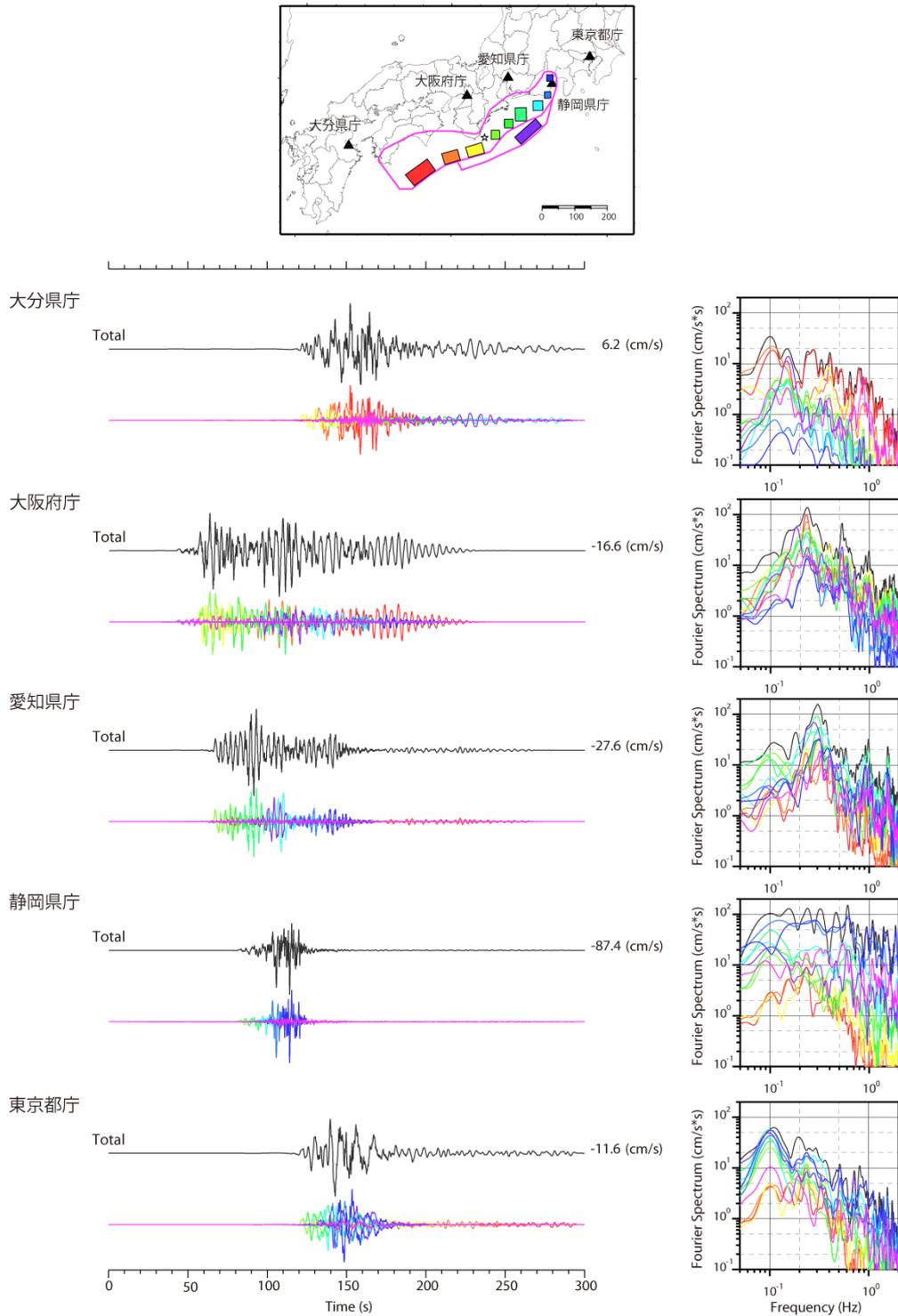
モデル2及び3のアスペリティ位置はモデル1と同じである

サブテーマ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



破壊開始点、アスペリティ位置の不確実性を考慮した各地震動シミュレーション結果における最大速度分布図

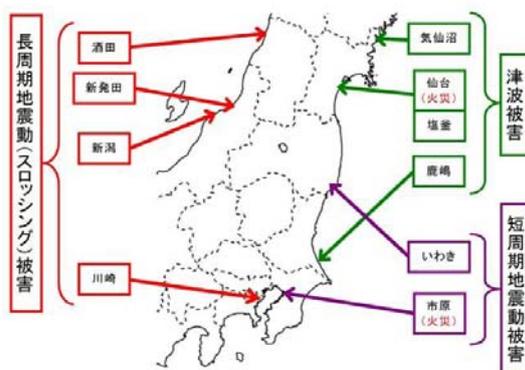
サブテーマ④ 長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴計算の検討等



海溝型巨大地震におけるハイブリッド合成法に関する検討結果

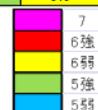
Total (上段; 黒) は各アスペリティからの寄与 (下段; 色付き) を全て重ね合わせたもの

サブテーマ⑤ 長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等



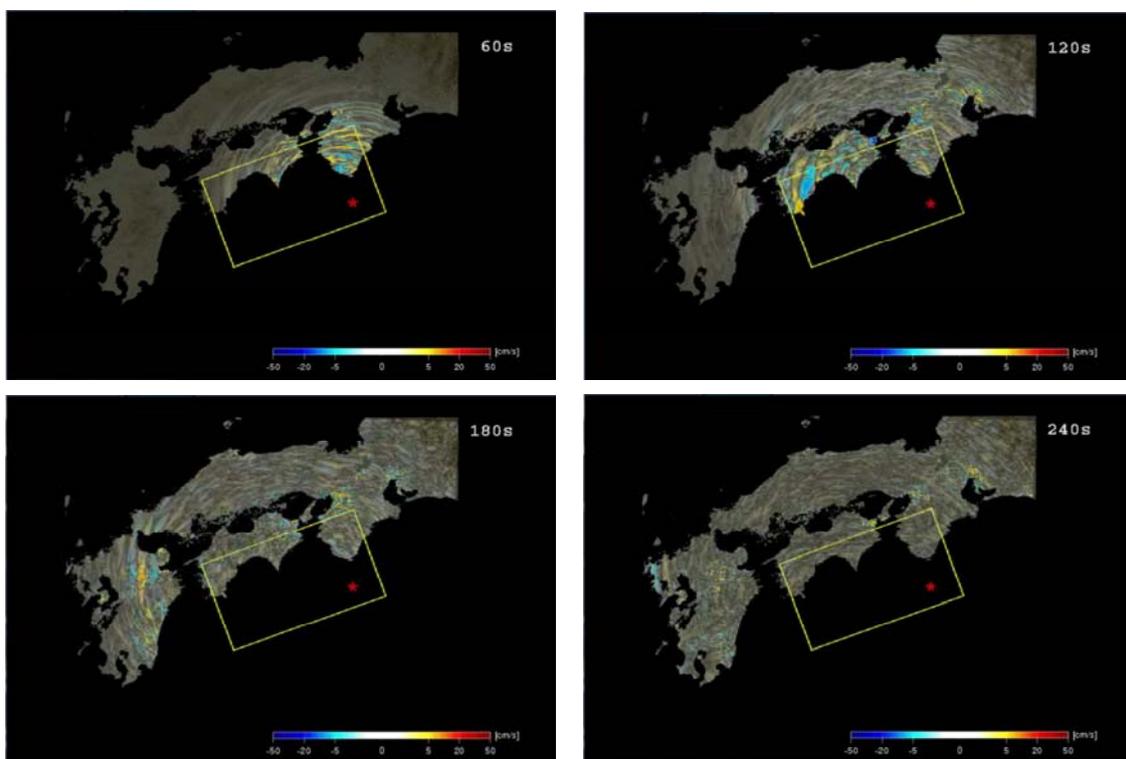
長周期地震動による石油タンクの被害 (左) 2003年十勝沖地震の苫小牧における火災 (右) 2011年東北地方太平洋沖地震時の被害 (いずれも消防研究センターのホームページより)

領域	トラフ 沿い	深さ	破壊	大分県庁	大阪舞洲	大阪府庁	四日市市 役所	愛知県庁	静岡県庁	東京都庁	
ANNI1		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.8	4.3	4.4	4.7
		s	e	cas	4.8	5.4	4.5	4.9	3.5	2.5	3.4
ANNI2		s	c	cas	2.5	4.3	3.7	4.5	4.3	4.9	5.4
ANNI3		d	w		3.6	6.1	5.3	5.8	5.3	5.6	5.8
		s	w		4.1	6.4	5.7	6.3	5.3	5.5	6.0
		s	w	cas	3.8	6.1	5.4	6.0	5.1	5.2	5.4
		d	c		5.8	6.0	5.2	5.1	4.8	5.5	5.5
		s	c		5.2	5.5	4.8	5.2	4.6	5.2	5.7
		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
		d	e		6.0	5.4	4.7	5.4	4.6	5.5	5.7
		s	e		5.2	5.7	4.8	5.3	4.2	5.1	5.8
ANNI4		s	e	cas	4.8	5.3	4.5	4.9	3.8	4.7	5.5
	a	s	w		4.6	6.9	6.2	6.6	5.6	5.5	6.1
	b	s	w		4.4	6.4	5.8	6.4	5.4	5.5	6.1
	c	s	w		4.2	6.4	5.8	6.4	5.9	5.9	6.3
	a	d	c		5.9	6.0	5.2	5.2	4.9	5.6	5.6
	b	d	c		5.8	6.0	5.2	5.3	5.1	5.6	5.5
	c	d	c		5.8	6.0	5.3	5.9	6.0	5.7	6.0
	a	s	c		5.9	5.6	4.9	5.3	4.7	5.3	5.8
	a	s	c	cas	5.1	5.3	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
	a	s	c	box	5.3	5.5	4.8	5.3	4.7	5.3	5.8
	b	s	c		5.4	5.8	5.0	5.5	5.2	5.3	5.8
	c	s	c		5.2	5.7	5.0	6.0	6.0	5.7	6.1
	c	s	c	cas	4.9	5.3	4.5	5.3	5.4	5.1	5.5
	c	s	c	box	5.2	5.5	4.9	5.3	5.1	5.3	5.8
	c	s	c	qi	5.6	6.2	5.5	6.6	6.4	5.9	6.5
	b	d	e		6.0	5.8	5.1	5.4	4.6	5.6	5.7
a	s	e		5.7	5.8	4.9	5.3	4.3	5.1	5.9	

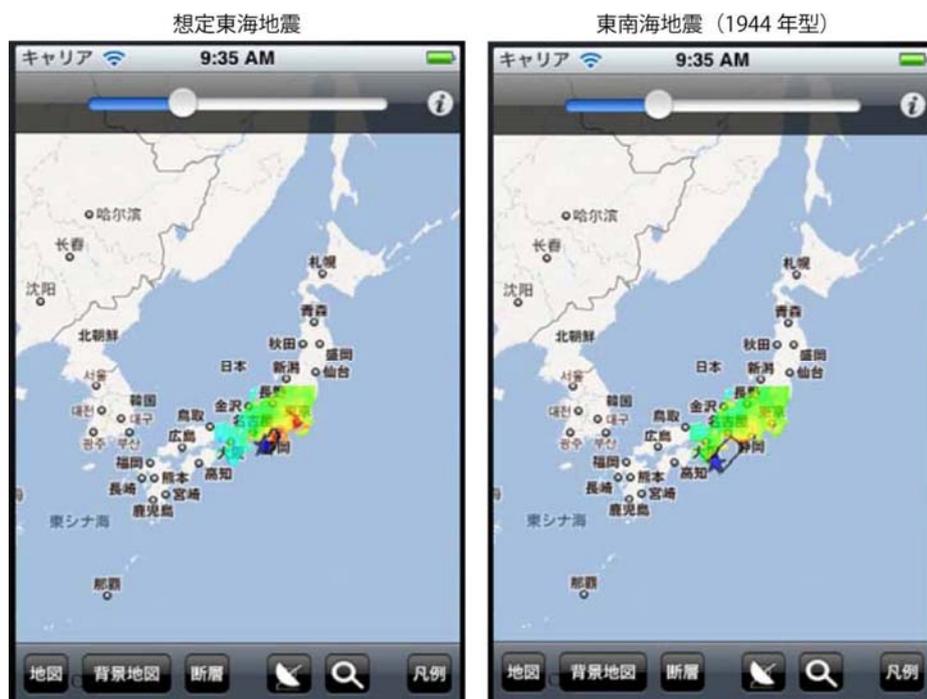


南海トラフの巨大地震による長周期地震動の尺度による「長周期震度」の試算

サブテーマ⑤ 長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等



「長周期地震動予測地図」2012年試作版のデータによる長周期地震動伝播の動画



スマートフォンアプリケーションによる長周期地震動予測地図の表示

## 目次

1. 長周期地震動予測地図作成等支援事業の概要 .....	1
1. 1 長周期地震動予測地図について .....	1
1. 2 研究の目的 .....	2
1. 3 研究の内容 .....	4
2. 事業の実施体制 .....	5
3. 研究の成果 .....	6
3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等 .....	6
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 .....	27
3. 3 巨大地震の観測記録による検証等 .....	45
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 .....	59
3. 5 長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等 .....	96
4. 全体成果概要 .....	124
5. 成果の対外発表 .....	125
6. むすび .....	126

## 1. 長周期地震動予測地図作成等支援事業の概要

### 1. 1 長周期地震動予測地図について

長周期地震動については、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震の際に震央から遠く離れた苫小牧で発生した石油タンク火災の原因の一つとして注目されるなど、近年その危険性が認知され始めた。長周期地震動は、首都圏、中京圏、近畿圏など超高層ビルや長大構造物が集中する平野部で特に顕著に現れる。地震調査研究推進本部では、想定東海地震、昭和型東南海地震、及び 1978 年タイプの宮城県沖地震を対象とした「長周期地震動予測地図」2009 年試作版を 2009 年 9 月に、昭和型南海地震を対象とした「長周期地震動予測地図」2012 年試作版を 2012 年 1 月にそれぞれ作成し、公表している。これらの地域はいずれも近い将来に発生が懸念される南海トラフ沿いの海溝型巨大地震によって長周期地震動に見舞われる可能性が示されている。

今後、これまでの試作版作成等で得られた知見等を踏まえたさらなる予測手法の高度化とともに、広く社会の防災・減災に資する本格的な長周期地震動予測地図作成が必要不可欠である。

## 1. 2 研究の目的

地震動の予測精度を向上させるために、地下構造探査データや地震観測データ等を有効活用して、海域や海洋プレートを含む3次元地下構造を全国を対象としてモデル化する。過去の海溝型巨大地震に関する研究成果や最近の海溝型巨大地震による強震動記録により震源の破壊過程の複雑さと地震動予測結果との関係を明らかにする。また、広帯域地震動予測手法の高度化のために、長周期地震動予測手法の短周期側への拡張に加えて、ハイブリッド合成法の高度化を含めた震源モデル、地下構造モデル、計算手法の課題と改良の方策を提示するとともに、予測成果等が広く社会で活用され防災に役立てるための公開の手段・手法、内容について検討し、分かりやすく使いやすい情報を提供するアプリケーションを開発する。上記を実現するため下記5つのサブテーマを連携させて実施する。

### ①長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

地下構造探査等のデータや資料及び既往の地下構造モデルについて、海域を含むものを重点的に収集・整理する。それらと「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」に海域の構造を追加、統合することにより、海溝型巨大地震の長周期地震動予測に必要な全国の地下構造モデルを作成する。海溝型巨大地震に関する研究の文献や事例、長周期地震動予測地図の成果を収集し、震源モデル、地震動計算手法及び計算量に関する問題点を整理する。

### 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

震源パラメータの複雑さが地震動予測結果に及ぼす影響について検討し、長周期・広帯域地震動予測の高精度化に効果的な震源パラメータが何であるか明らかにする。検討結果を踏まえ、海溝型巨大地震の長周期・広帯域地震動予測を高精度化するための特性化震源モデルの設定手法の改良案を提示する。

### ③巨大地震の観測記録による検証等

近年発生して観測記録が豊富にある2003年十勝沖地震及び2004年の紀伊半島南東沖の地震を対象として、サブテーマ②で提示した特性化震源モデルの設定手法による震源モデルに基づいて広帯域地震動を計算し、計算結果と観測記録との比較により、手法を検証する。

### 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

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。

⑤長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等

長周期地震動の性質や、それらがもたらす被害、その対策について分かりやすく説明した解説書を作成し、長周期地震動予測地図の利活用を促進する上で必要な方策を提示する。また、ユーザーが今いる場所あるいは必要とする任意の場所での長周期地震動に関する情報をインターネットやモバイルネットワークを通して入手でき、かつ分かりやすく可視化するためのアプリケーションを開発する。

### 1. 3 研究の内容

これまでの「長周期地震動予測地図」試作版の作成等で蓄積されてきた知見等を踏まえつつ、長周期地震動予測地図作成の本格化に向けた検討を実施する。

長周期地震動予測に必要な震源モデル、地下構造モデル、計算手法及びそれらに関するデータ等について、地震調査委員会により公表されている「長周期地震動予測地図」2012年版の成果も含めて収集、整理する。地下構造モデルに関するデータを基に、海溝型地震の地震動予測において必要な沈み込むプレートを含む構造について、「全国1次地下構造モデル」(暫定版)(地震調査委員会、2012)の範囲外である南西諸島の初期モデルを作成するとともに、日本海東縁部の初期モデルを作成する。既往の研究による海溝型巨大地震の震源モデルについて分析し、震源過程の複雑さを特性化震源モデルに取り込む手法について検討し、具体的な提示手法について2003年十勝沖地震を対象としてその有効性を検証する。南海トラフの地震を対象として、ハイブリッド合成法による計算により、海溝型巨大地震の広帯域地震動予測における課題と改良手法を提示するとともに、破壊開始点やアスペリティ位置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、地震動予測結果の不確実性を示す。長周期地震動予測地図やそれに関連したデータ等を広く社会に普及し、防災・減災に役立てるため、長周期地震動に関する様々な知見や対策をまとめた解説書を作成し、長周期地震動予測地図やそのもととなる情報・知見を広く提供するためのアプリケーションを開発する。

## 2. 事業の実施体制

所属機関		役職	氏名	担当課題
独立行政法人	防災科学技術研究所	研究領域長	藤原 広行	3.1～3.5
独立行政法人	防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之	3.1～3.5
独立行政法人	防災科学技術研究所	主任研究員	青井 真	3.4
独立行政法人	防災科学技術研究所	主任研究員	河合 伸一	3.1, 3.5
独立行政法人	防災科学技術研究所	契約研究員	前田 宜浩	3.2～3.4

### 3. 研究の成果

#### 3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

##### (1) 研究の内容

###### (a) 研究の題目

長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

###### (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	河合 伸一

###### (c) 研究の目的

地下構造探査等のデータや資料及び既往の地下構造モデルについて、海域を含むものを重点的に収集・整理する。それらと「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」に海域の構造を追加、統合することにより、海溝型巨大地震の長周期地震動予測に必要な全国の地下構造モデルを作成する。海溝型巨大地震に関する研究の文献や事例、長周期地震動予測地図の成果を収集し、震源モデル、地震動計算手法及び計算量に関する問題点を整理する。

##### (2) 平成 23 年度の成果

###### (a) 研究の要約

プレート境界構造に関する既往のモデルや地下構造探査のデータ及び資料を収集・整理した。南西諸島及び日本海東縁部の海域のプレート境界構造の初期モデルを作成し、「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」と統合した。

2003 年十勝沖地震及び南海トラフの地震について、既往の研究等による震源モデルを収集し、強震動の予測に大きく影響を及ぼすアスペリティ配置について整理した。

長周期地震動予測の計算手法に関して、 $Q$  値の組み込み方法に関する現状の課題を整理するとともに、南海トラフの地震を対象とした差分法による地震動シミュレーションに必要な計算時間を見積もった。

以上の震源モデルおよび計算手法をサブテーマ②で実施する震源モデル化手法の検討やサブテーマ③、④で実施する時刻歴計算等で利用できるよう整備した。

###### (b) 研究の成果

###### 1) 地下構造モデル等の収集・整備

太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みに関して、地震調査研究推進本部

地震調査委員会（以下、地震本部）による海溝型地震の長期評価でまとめられている資料を収集した。これらのデータをコンパイルし、深度コンター図作成した(図 3.1-1、図 3.1-2)。一方、「長周期地震動予測地図」2012 年試作版（地震本部、2012）では、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）が作成されているが、その中で、フィリピン海プレートの構造については、長期評価後の新しい研究成果である Sato et al. (2005)及び馬場・他（2006）などが参照されている。

また、日本海東縁部のプレート境界構造に関して、地質構造・地史に基づく資料（大竹・他、2002；図 3.1-3）、微小地震の震源分布及び弾性波速度構造データ（Matsubara and Obara, 2011；図 3.1-4）及び島弧を横断する大深度の地質断面（柳井・他、2010、伊藤・佐藤 2010；図 3.1-5）の資料を収集した。

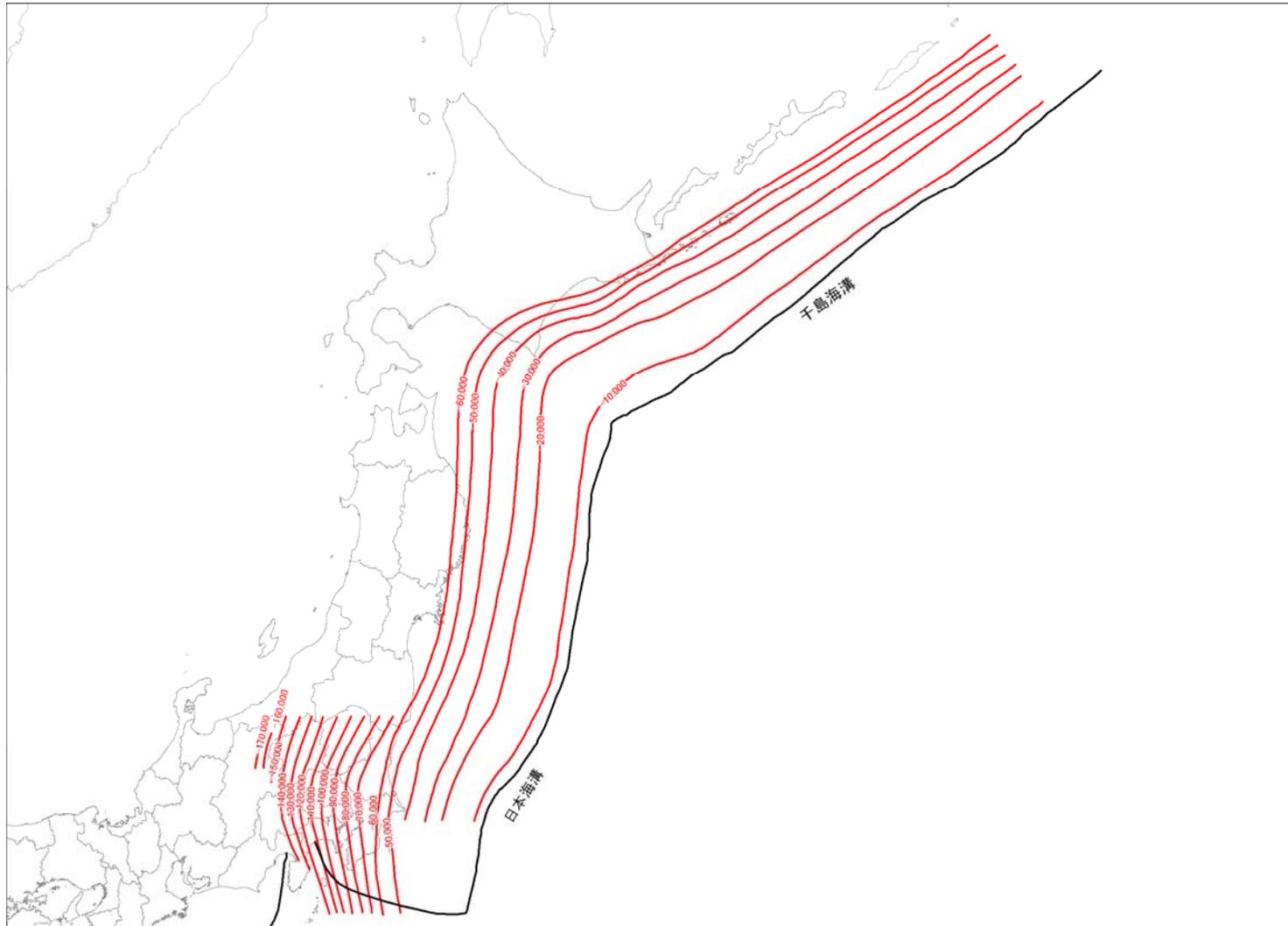


図 3.1-1 収集した資料に基づく太平洋プレート上面の深度コンター。

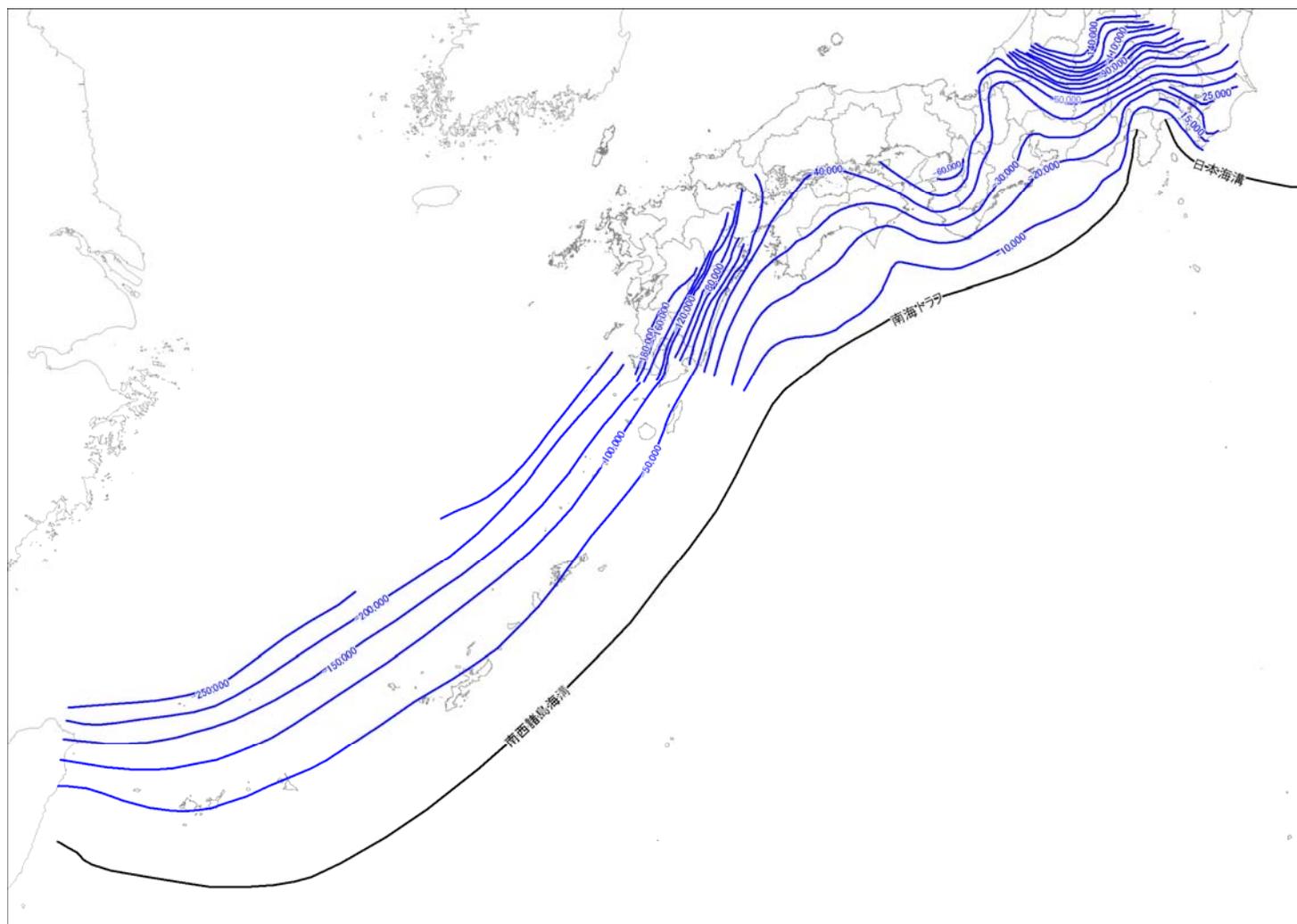


図 3.1-2 収集した資料に基づくフィリピン海プレート上面の深度コンター。

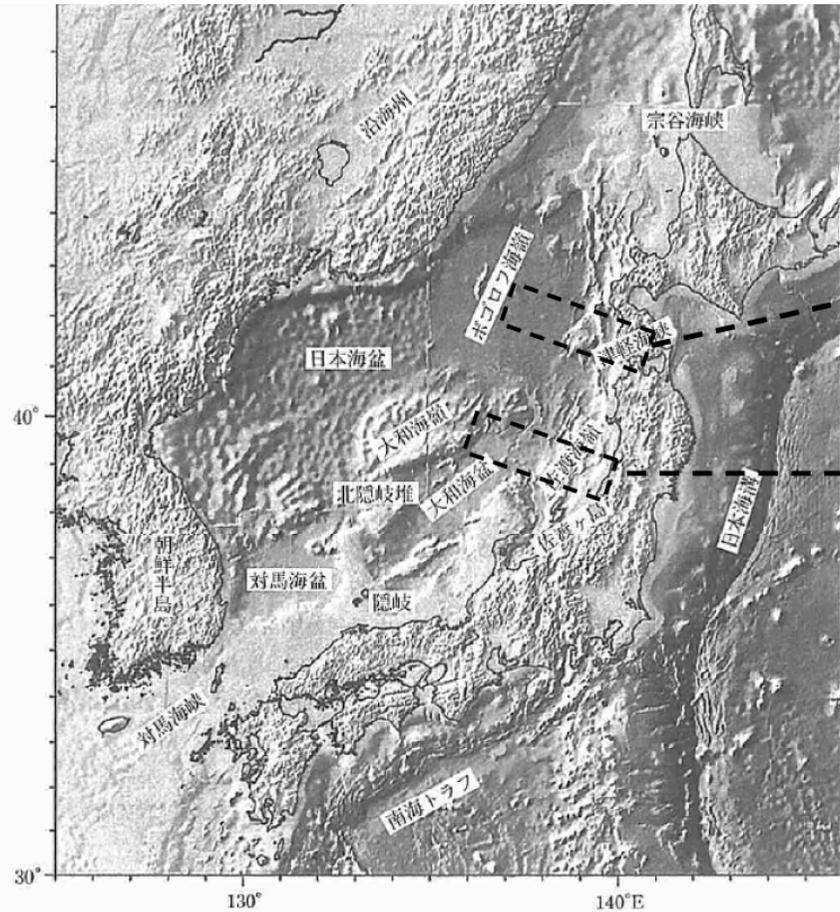


図 4.1 日本海およびその周辺の地形

日本海は日本列島とユーラシア大陸に囲まれた海盆であり、北部には水深が3500-3700 mの日本海盆が、南部には大和海盆、対馬海盆が広がる。日本海盆と大和海盆が日本列島と接する日本海の東縁部には、小規模な海嶺とトラフないし海盆が多数分布する（日本周辺は浅田(2000)ほか水路部測量データ、その他の区域はSmith and Sandwell (1997)のデータを用いた）。

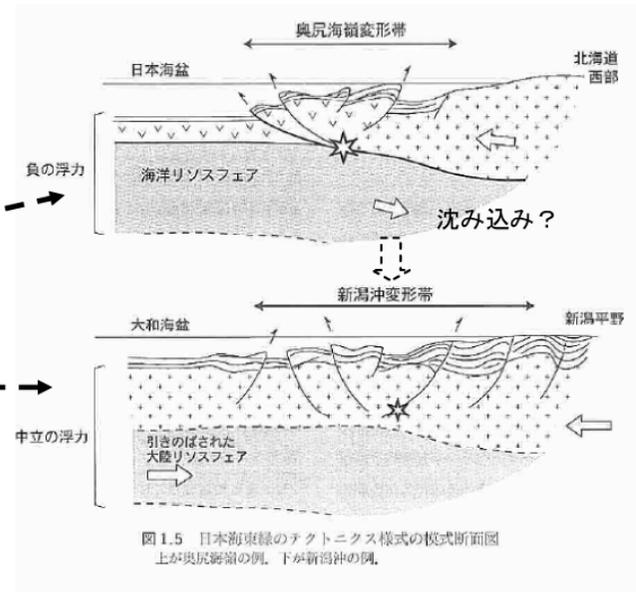


図 1.5 日本海東縁のテクトニクス様式の模式断面図  
上が奥尻海嶺の例、下が新潟沖の例。

図 3.1-3a 日本海東縁の地殻構造（大竹・他、2003 に加筆）。

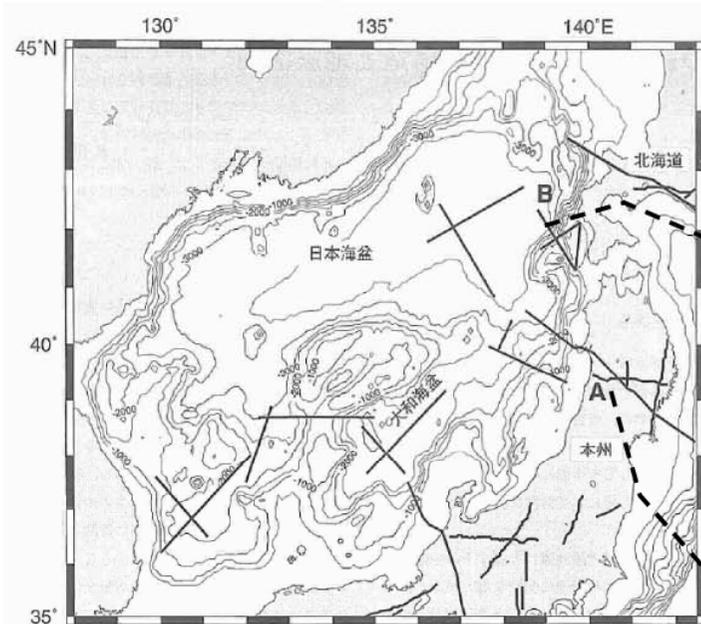


図 3.1 これまでに実施された地殻構造調査の測線位置  
水深を 500 m ごとのコンターで示す (Nishizawa and Asada, 1999 に加筆, 陸上の探査測線は吉井, 1994 による)。

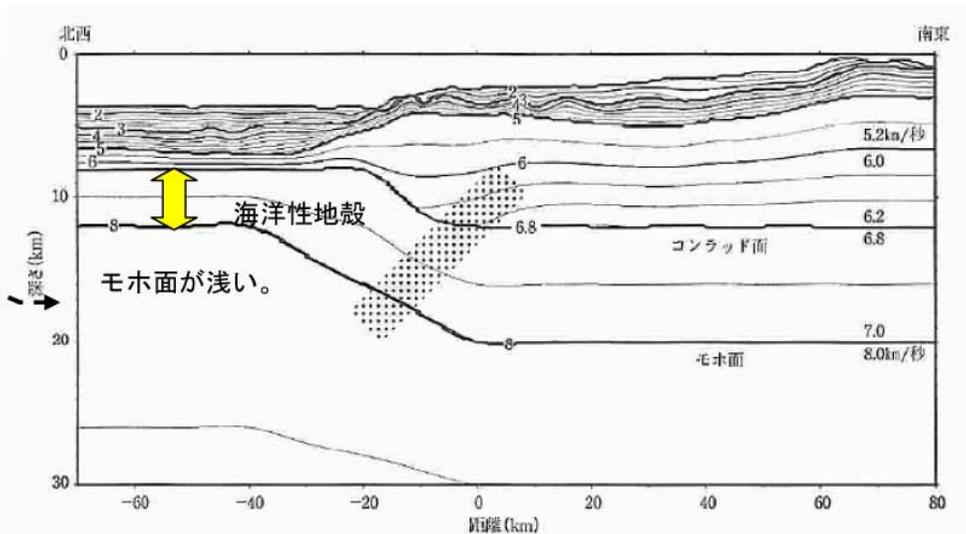


図 3.3 日本海盆から沿岸付近に至る測線 (図 3.1 の B) に沿った地殻構造 (日野ほか, 1995)  
P 波速度を 0.1 km/秒ごとのコンターで示す。ハッチは 1993 年北海道南西沖地震 (M 7.8) の断層面。

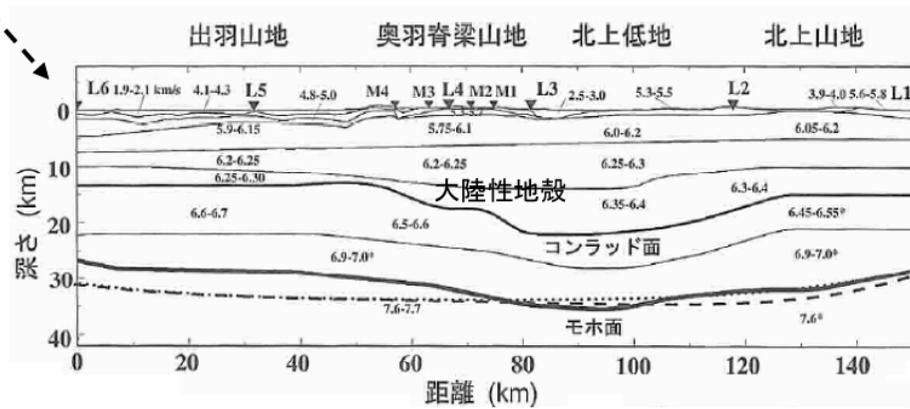


図 3.1-3b 日本海東縁の地殻構造 (大竹・他、2003 に加筆)。

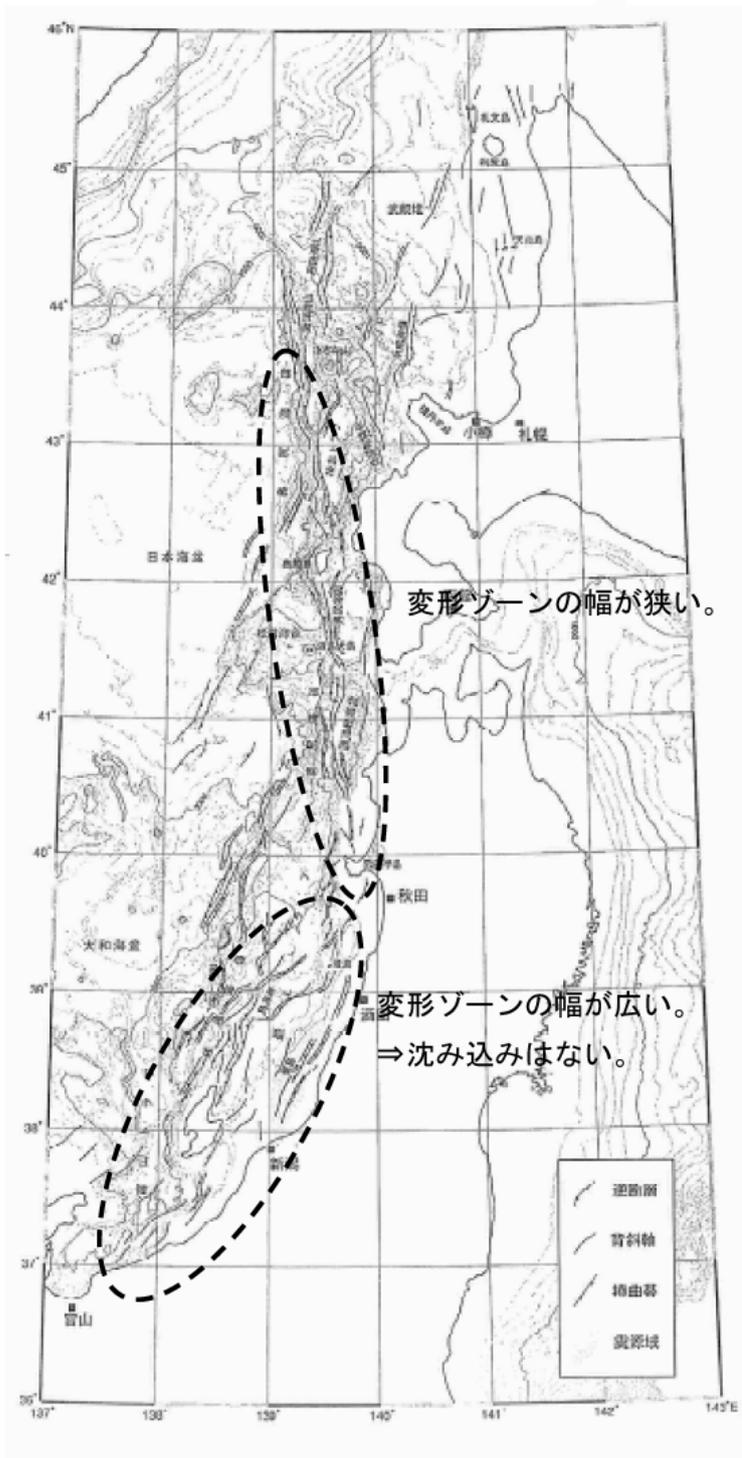


図 4.4 日本海東縁海域で過去約 300 万年間に形成された主要な逆断層と背斜構造

一般に逆断層は背斜構造を伴うが、背斜軸と断層が非常に近い場合には断層だけを、断層が明確でない場合には背斜軸だけを示した。背斜構造だけしか示されていない場合も、逆断層が伏在していると考えられる。

灰色の領域は、北から、1993 年北海道南西沖地震（日野ほか，1994）、1983 年日本海中部地震（Sato *et al.*, 1986）、1964 年新潟地震の余震域（草野・浜田，1991）を示す。

図 3.1-3c 日本海東縁の地殻構造（大竹・他、2003 に加筆）。

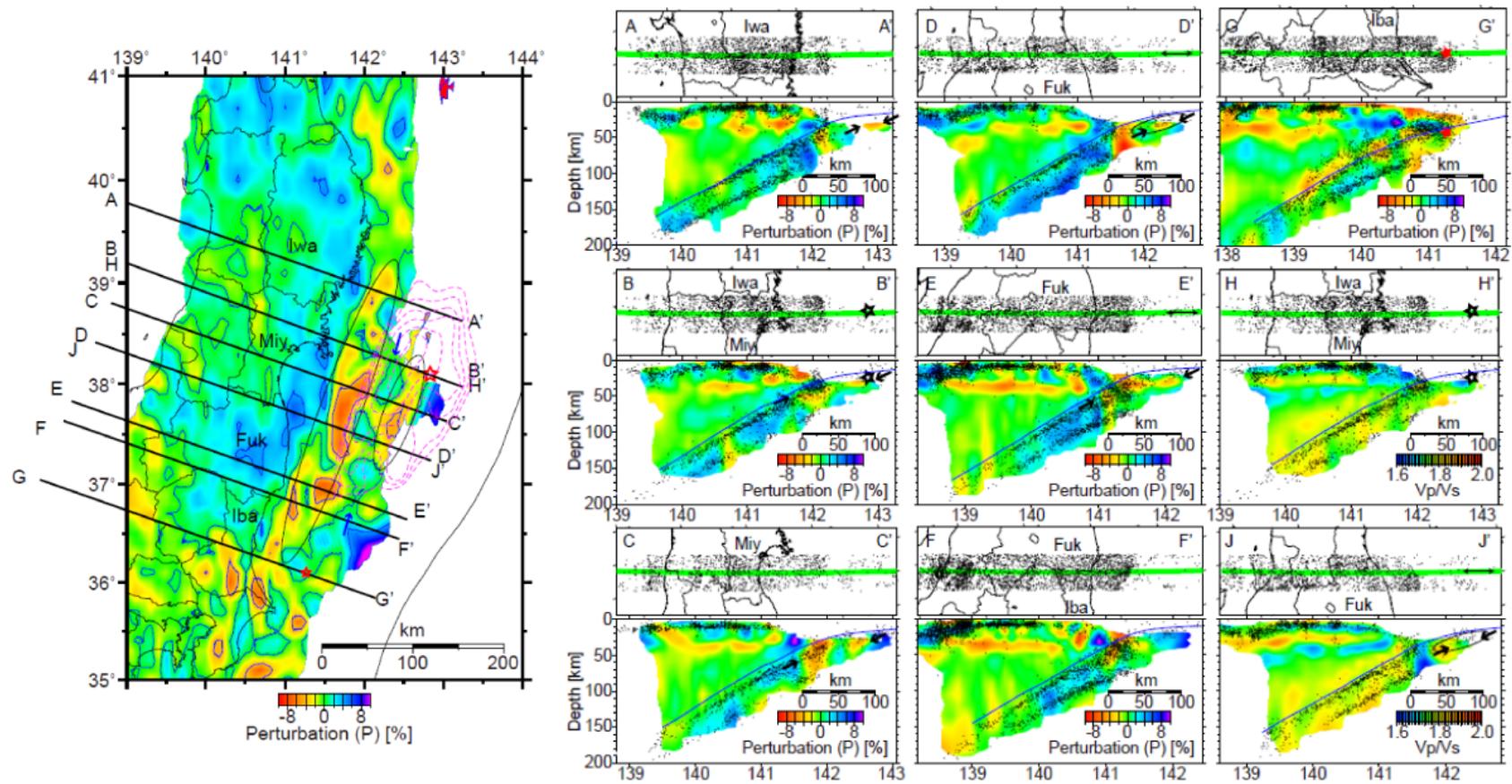


図 3.1-4 Matsubara and Obara (2011) による P 波速度構造と震源分布。

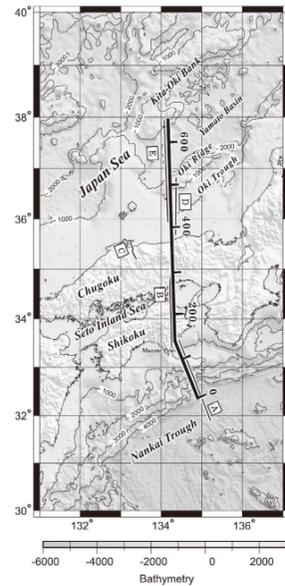


図1 統合断面線(太線)と地震探査測線A-E(細線)。断面線上の数字は南海トラフからの距離(km)を示す。測線A、B、C、D、およびEは、それぞれ Kodaira *et al.* (2002)、Ito *et al.* (2009)、鳥取県 (2003)、田中・小草 (1981)、そして Sato *et al.* (2006) による。

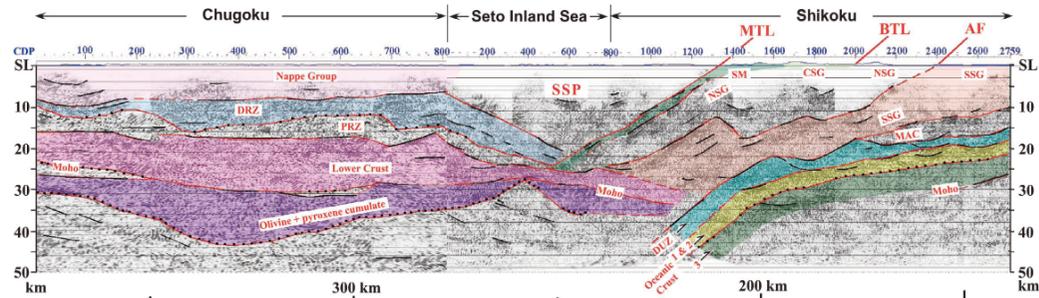


図2 2002年西南日本海陸統合地震探査による測線Bの時間断面。顕著な反射の領域の上限は実線で、さらにその領域が明瞭で連続的な下限をもつ場合は点線で示してある。Ito *et al.* (2009) の Fig. 8 を一部簡略化。DRZ: 強反射帯。PRZ: 貧反射帯。SSP: Seto Subsurface Prism。SM: 三波川変成岩類。CSG: 秩父累層。NSG: 北部四万十層群。SSG: 南部四万十層群。MAC: 中期中新世以降の付加体。DUZ: デュープレックス・底付帯。

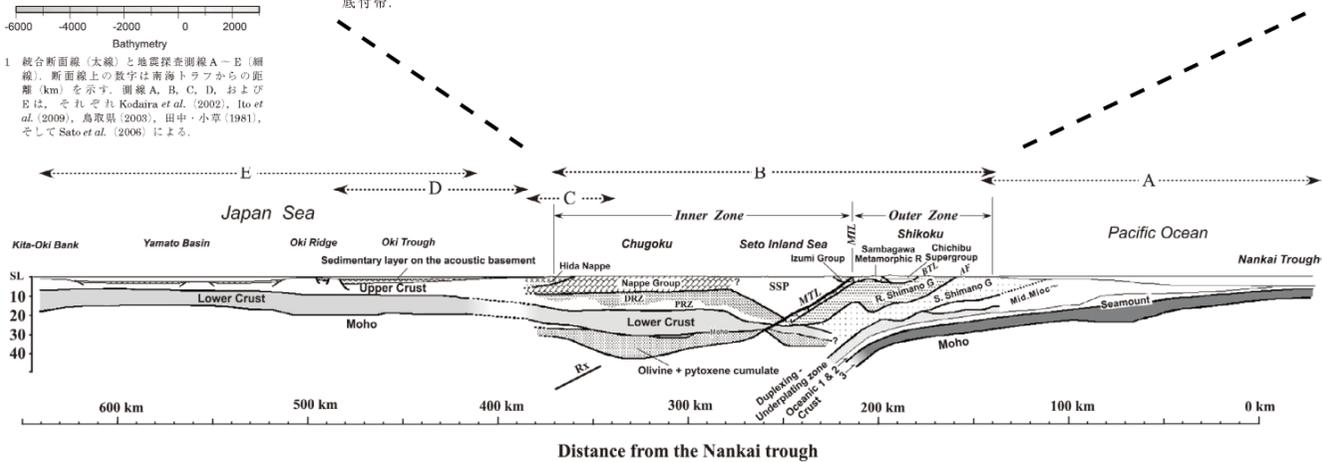


図3 南海トラフ-大和盆北縁地殻構造断面。SSP: Seto Subsurface Prism。DRZ: 強反射帯。PRZ: 貧反射帯。MTL: 中央構造線。BTL: 仏像構造線。AF: 安芸断層。Rx: 強反射層。A、B、C、D、E: 測線A、B、C、D、およびEによる断面図位置。A-B断面図はIto *et al.* (2009) の Fig. 9 による。

図3.1-5 日本列島の大深度地質構造 (伊藤・佐藤、2010より)。

## 2) 地下構造モデルへの海域の構造の追加

1)で収集・整理した資料等に基づき、海域の地下構造モデルとして、南西諸島及び日本海東縁部のプレート境界面構造を追加する。太平洋プレート及び南西諸島を除くフィリピン海プレートの境界面構造については、全国1次地下構造モデル(暫定版)を用いた。

南西諸島のプレート境界面構造の追加に関しては、中村・兼城(2000)に基づいて設定し、全国1次地下構造モデル(暫定版)と不整合が生じないように接続した。このとき、深さ方向については、沈み込みの開始が約1500万年前というフィリピン海プレートの運動史、及びフィリピン海プレートが北西方向に3~4cm/年の速度で移動しているという測地学的な観測結果より、プレートの長さ約400kmまでをモデル化することとした。結果的に、沈み込むプレートの傾斜から深さ200km程度までがモデル化されている。以上により設定されたプレート境界面構造を図3.1-6に示す。

日本海東縁部のプレート境界面構造の追加に関しては、中村(1983)による「沈み込み帯が形成されつつある」との考えを踏まえて、以下の手順によりモデルを作成した。

### ①地表における境界の設定

- ・南北方向に分布するひずみ集中帯をプレート境界とする。
- ・新潟県沖において沈み込みが認められないことから(図3.1-3a)、大陸性地殻と海洋性地殻の境界(沈み込みの南端)を、男鹿半島付近に設定。
- ・沈み込む範囲における海底での海洋性地殻の深さは8~12km程度に設定(図3.3-1b)。
- ・北端については不明であるが、ここではひずみ集中帯の変形部が確認できる宗谷岬沖まで設定(図3.1-3c)。

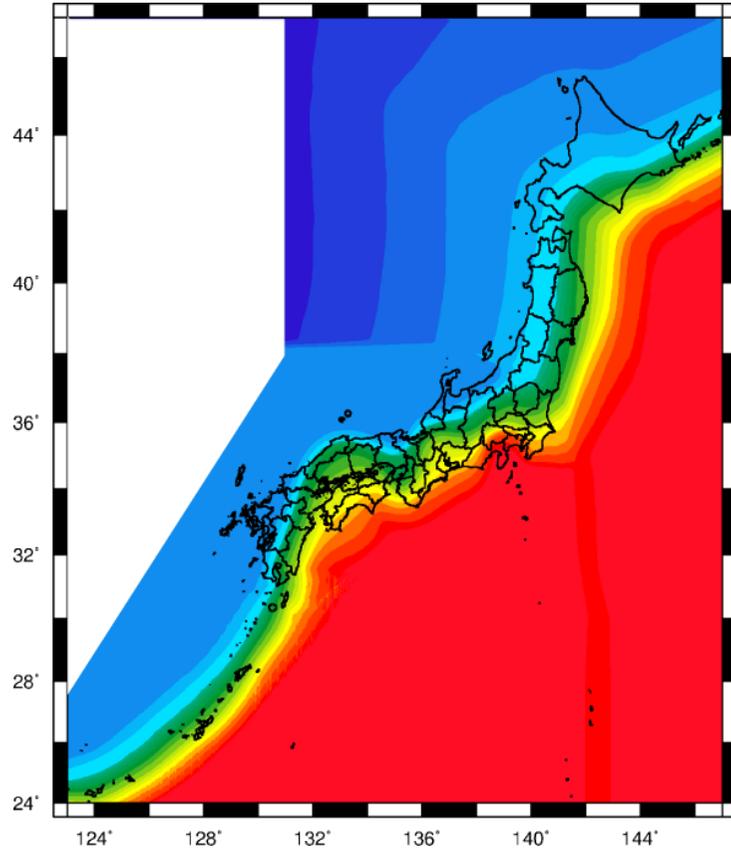
### ②沈み込みの形状

- ・海洋性地殻の沈み込みの速度は1.0~2.2cm/年(地震調査委員会、2003)。
- ・沈み込みの開始時期は100万年前(原子力発電環境整備機構、2004)。
- ・以上より、沈み込みの深さは10~66kmとなるが、ここでは、深さ50km付近まで設定。
- ・沈み込みの角度は、太平洋プレートより小さく設定。

このようにして作成したモデルの断面を図3.1-7に、また平面図を図3.1-8示す。なお、本モデルは、震源分布や大深度断面図で沈み込みが確認されていない中で設定した、あくまで暫定的な初期モデルという位置付けとする。

以上作成したプレート境界面構造モデルを「全国深部地盤構造モデル」(藤原・他、2009)に組み込むことにより統合した。

フィリピン海プレート上面



太平洋プレート上面

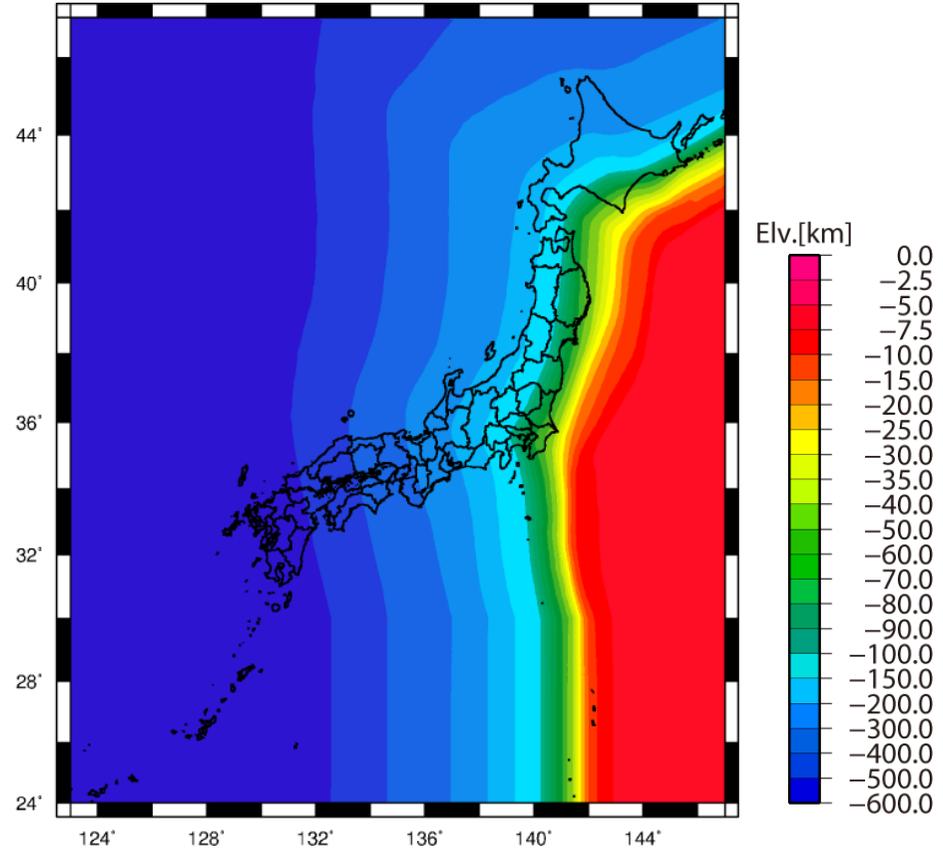


図 3.1-6 本検討で設定した太平洋側から沈み込むプレート上面の深度コンター。フィリピン海プレート上面の東日本地域については、太平洋プレート上面に接合させている。

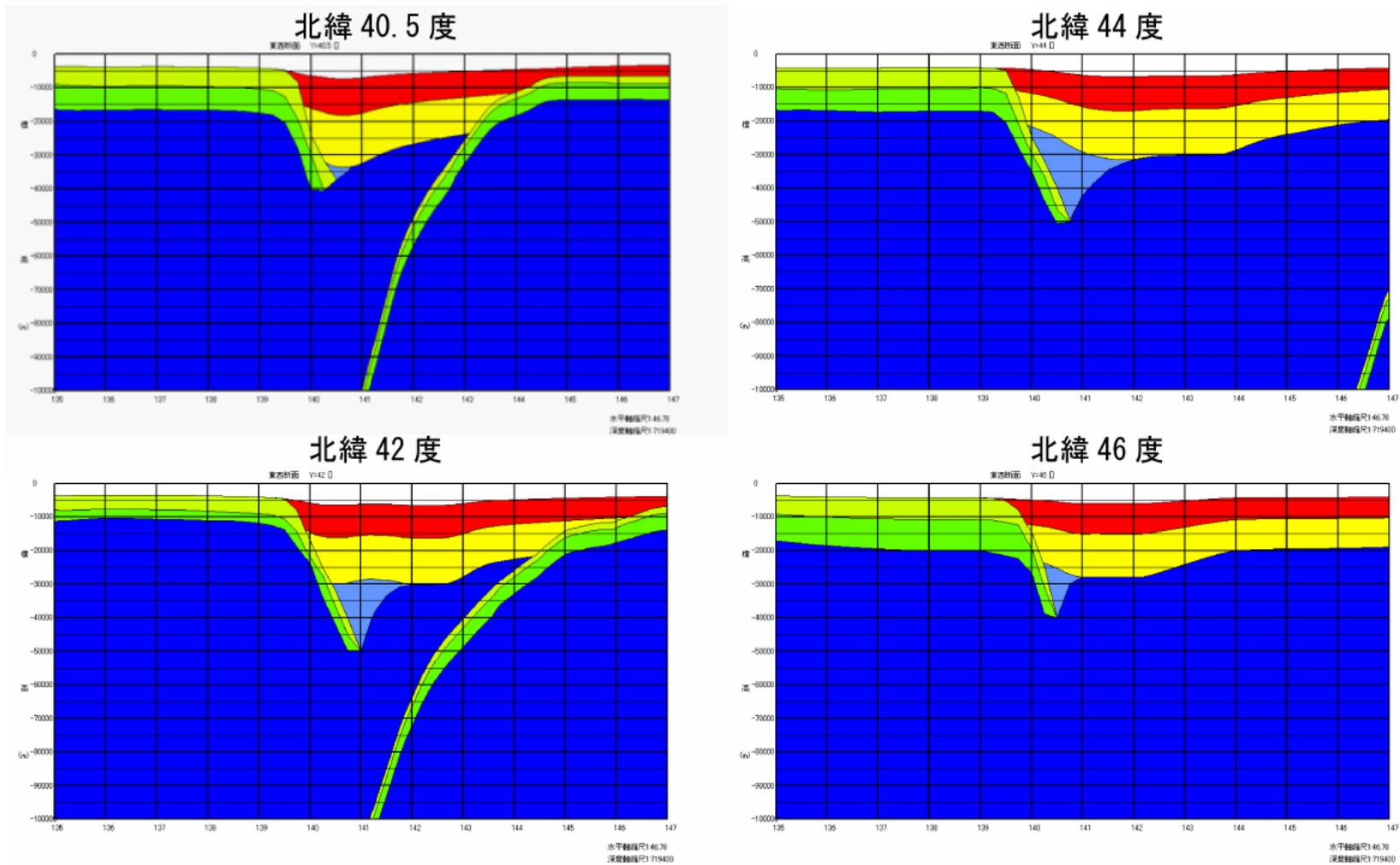


図 3.1-7 本検討で設定した日本海東縁部のプレート境界モデルの東西断面図。それぞれ西端(左)は東経 135 度、東端 (右) は東経 147 度。

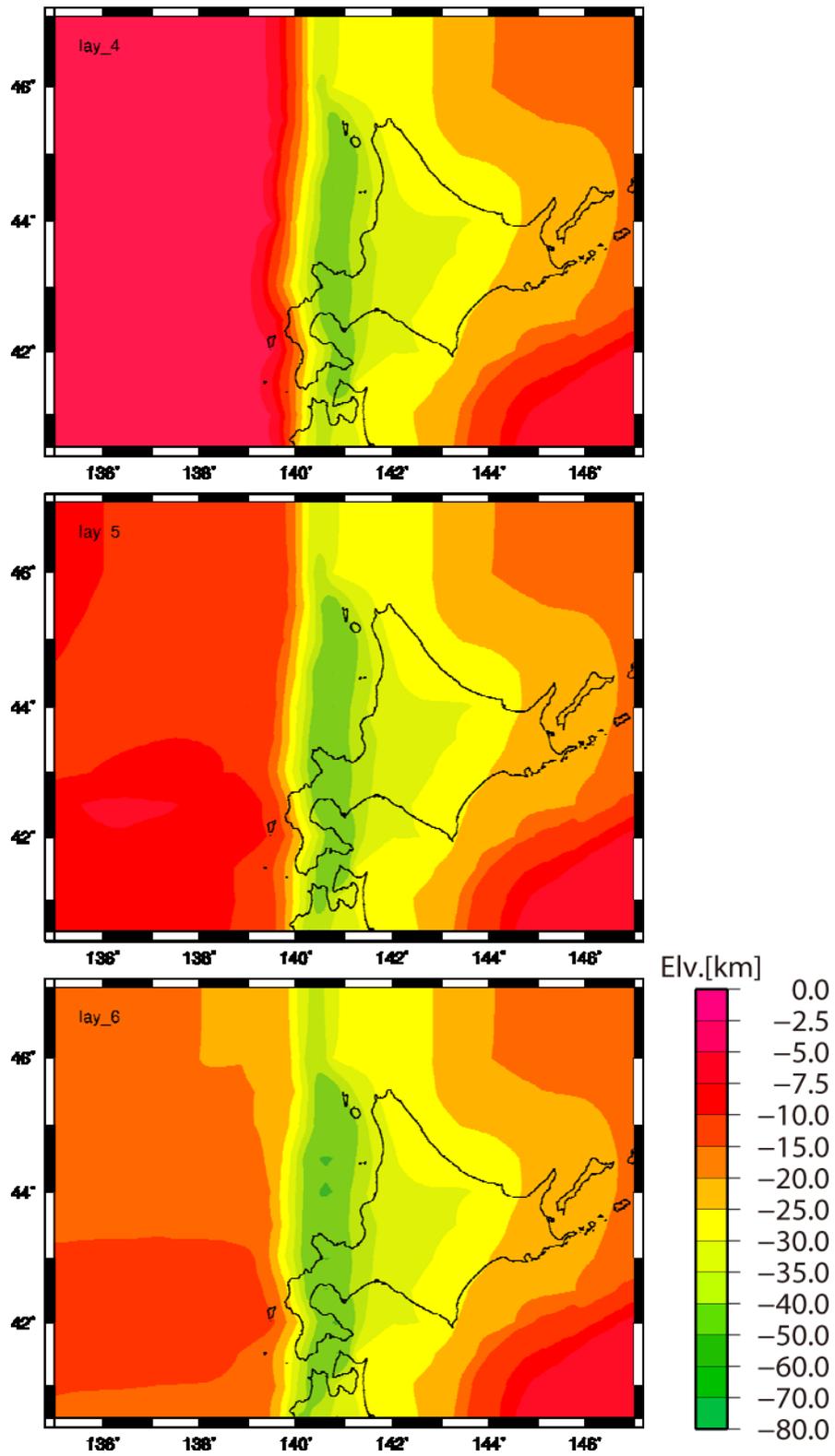


図 3.1-8 本検討で設定した日本海東縁部のプレート境界モデルの平面図。  
 上：海洋性地殻第 2 層、中：海洋性地殻第 3 層、下：海洋性マントルの上面 の各標高

### 3) 震源モデル等の収集・整備

海溝型巨大地震の震源モデルに関して、2003年十勝沖地震（表 3.1-1）、及び南海トラフの地震（表 3.1-2）を対象とした既往研究等によるモデルを収集した。

ここで、多くの観測記録に基づく解析事例が豊富な2003年十勝沖地震の震源モデルについて、アスペリティの位置を比較する。2003年十勝沖地震については、地震動の長周期成分の解析やGPS測地データ及び津波波形の解析から得られているアスペリティ（すべりの大きな領域に相当）が、破壊開始点付近及び断層面の北西部分に存在するのに対して、地震動の短周期成分（強震動記録）の解析から得られているアスペリティは、断層面の北東部分にも存在し、アスペリティ全体の面積が小さい傾向が見られるものが多い（図 3.1-8）。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルについては、「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）」（地震調査委員会、2011）でまとめられている（図 3.1-9）。地震動の長周期成分の解析から得られているアスペリティ（すべりの大きな領域に相当）が海溝軸付近にあるのに対して、地震動の短周期成分（強震動記録）から得られているアスペリティは陸側に点在しており、面積も小さく、2003年十勝沖地震よりも両者の差異が顕著である。

表 3.1-1 本検討で収集した2003年十勝沖地震の震源モデル。

著者	使用データ	対象周波数帯
Hirata et al. (2004)	津波	—
Tanioka et al. (2004)	津波	—
Yamanaka and Kikuchi (2003)	遠地変位波形	0.004~1Hz
Koketsu et al. (2004)	強震動速度波形及びGPS測地データ	0.05~0.2Hz
Yagi (2004)	遠地及び強震動の変位波形	0.002~1Hz
Honda et al. (2004)	強震動速度波形	0.02~0.2Hz
釜江・川辺 (2004)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.1~10Hz
額瀨・他 (2006)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.1~10Hz
Morikawa et al. (2006)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.05~10Hz
Nozu and Irikura (2008)	強震動速度波形	0.1~10Hz
久世・他 (2008)	強震動記録の加速度包絡線	0.13~10Hz

表 3.1-2 本検討で収集した南海トラフの地震に関する震源モデル。

著者	使用データ（カッコは予測）
中央防災会議 (2003)	(震度)
地震調査委員会 (2003)	(震度)
武村・神田 (2006)	震度
山中 (2004)	強震動の変位波形
地震調査委員会 (2009)	(長周期地震動)
地震調査委員会 (2012)	(長周期地震動)

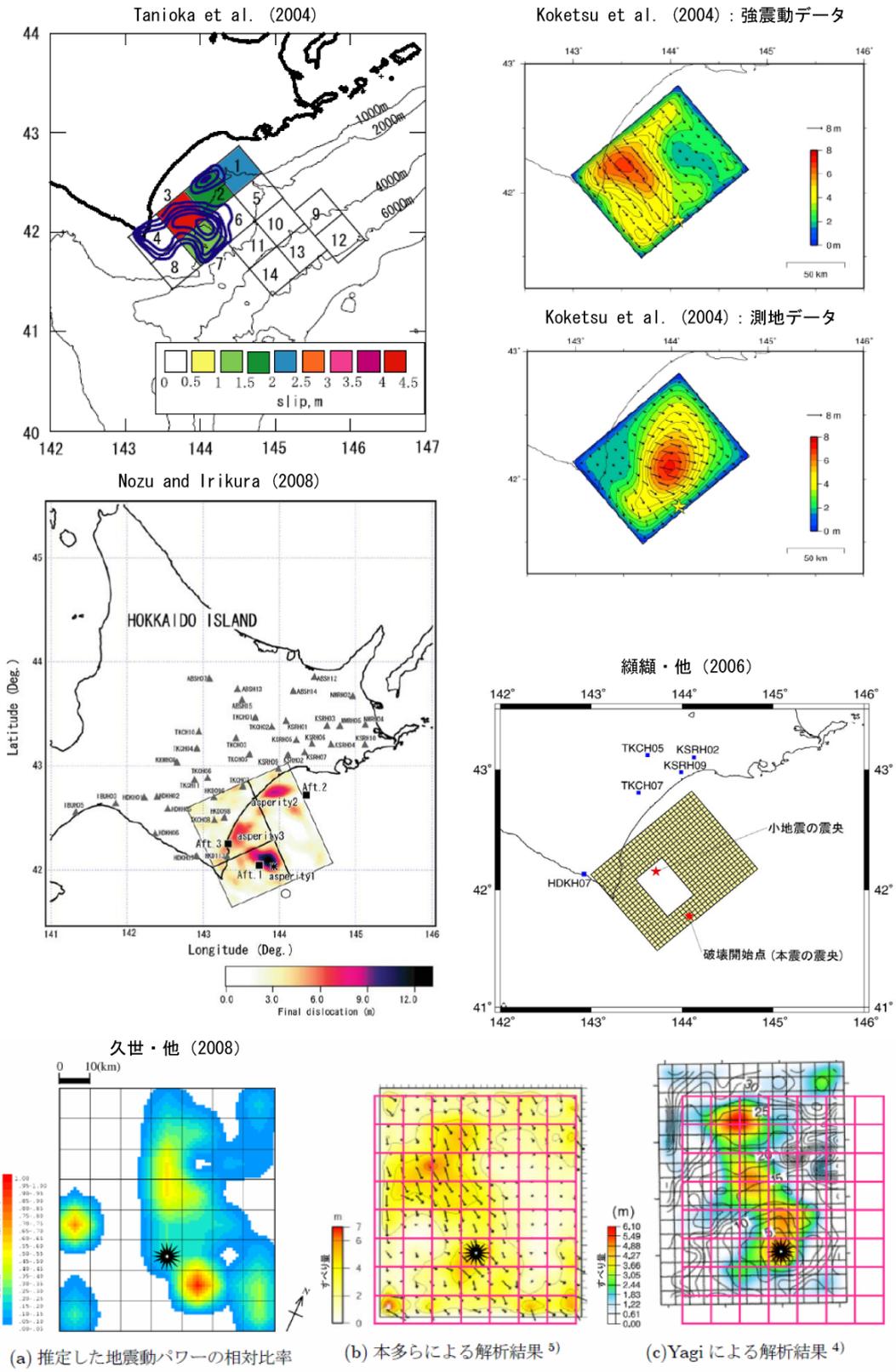
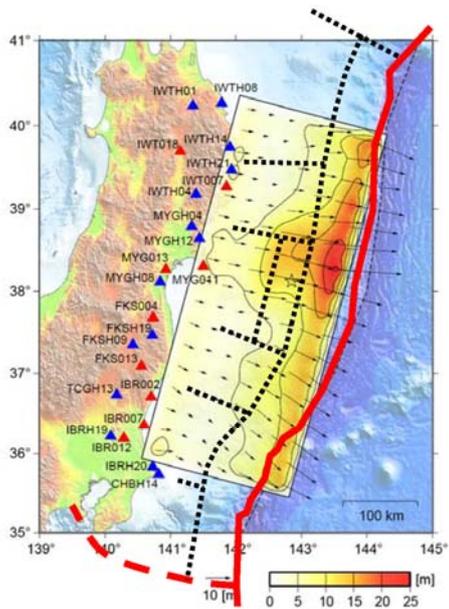
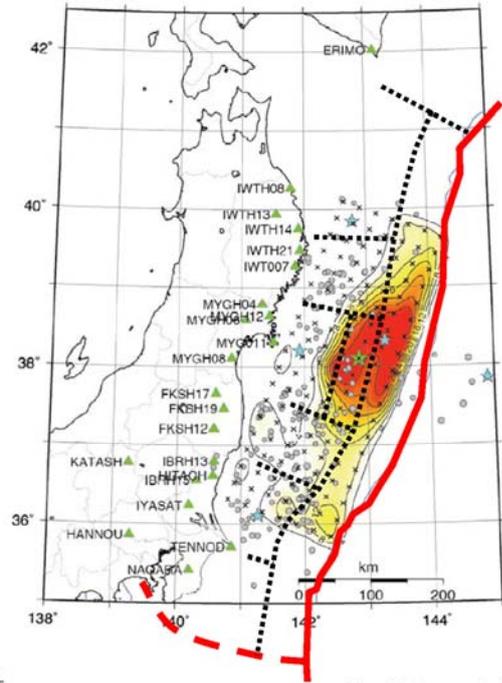


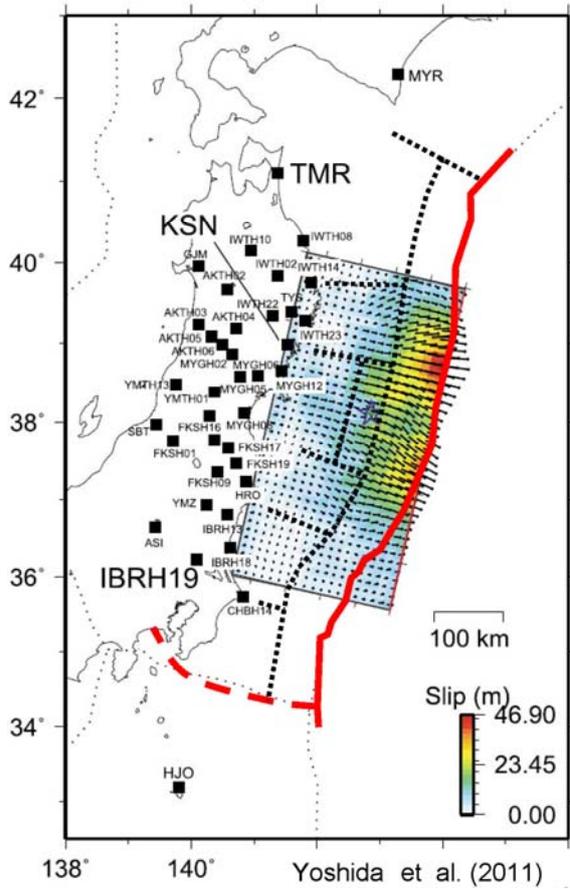
図 3.1-8 2003 年十勝沖地震の震源モデルの例。Tanioka et al. (2004) 中のコンターは Yamanaka and Kikuchi (2003) による滑り分布。



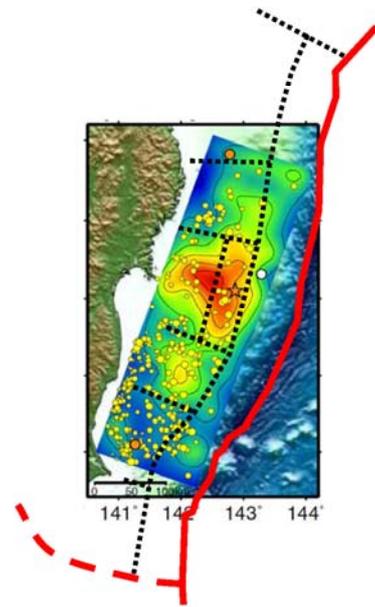
防災科研作成



Yoshida et al. (2011)

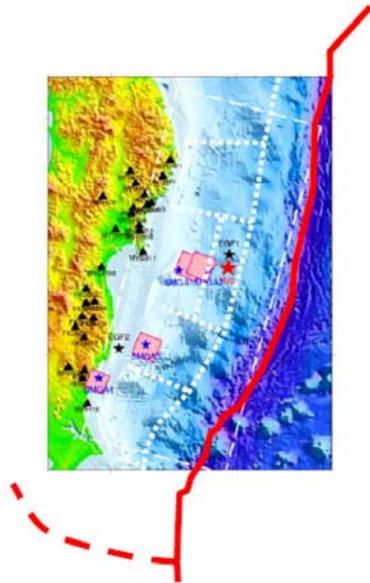


Yoshida et al. (2011)

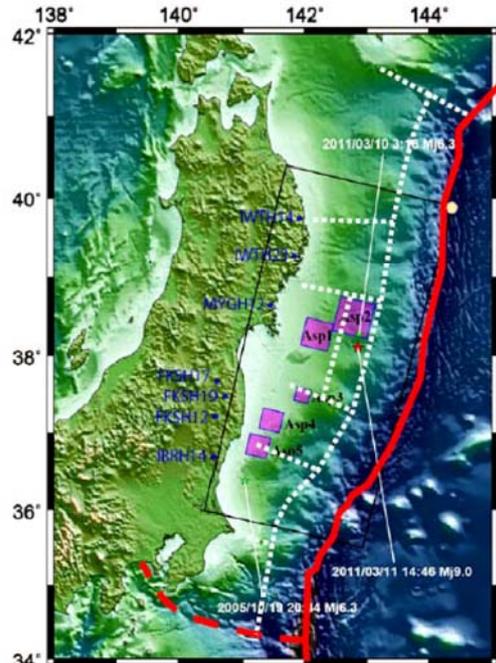


Koketsu et al. (2011)

図 3.1-9a 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル間のアスペリティ位置の比較（地震調査委員会、2011 より）。



浅野・岩田(2011)



釜江・川辺(2011)

表 各モデルの強震動生成域のパラメータ

浅野・岩田(2011)

	SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4
Length (km)	33.0	33.0	33.0	27.5
Width (km)	33.0	33.0	33.0	27.5
Area (km <sup>2</sup> )	1089.0	1089.0	1089.0	756.3
Rise Time (s)	6.60	6.60	1.38	1.15
M <sub>0</sub> (Nm)	3.81E+20	5.33E+20	2.90E+20	1.04E+20
Δσ (MPa)	25.8	36.1	19.7	12.2
Slip (m)	5.2	7.2	3.9	2.0
Delay Time (s)	24.0	65.6	108.5	128.3

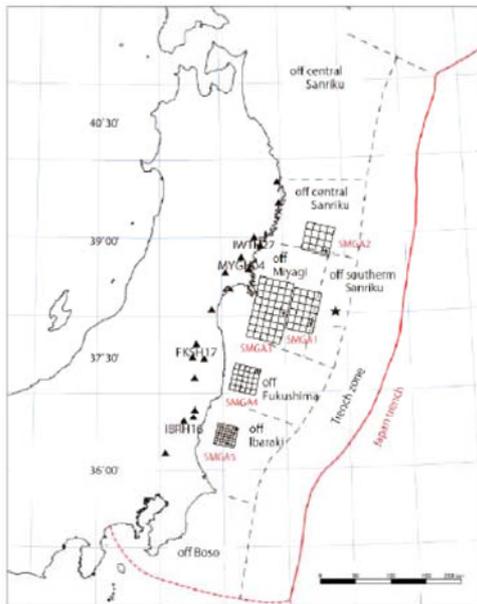
釜江・川辺(2011)

	Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走行 (°)	195	195	195	195	195
傾斜角 (°)	13	13	13	13	13
面積 (km <sup>2</sup> )	40×40	50×50	20×20	30×30	30×30
地震モーメント(N・m)	9.9×10 <sup>20</sup>	2.21×10 <sup>21</sup>	1.77×10 <sup>20</sup>	2.39×10 <sup>20</sup>	2.58×10 <sup>20</sup>
応力降下量 (MPa)	37.8	43.2	54	21.6	23.1
ライズタイム (s)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破壊開始時刻 (s)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリーン関数として用いた地震	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2005/10/19 20:44 Mw6.3

Kurahashi and Irikura and (2011)

	L (km)	W (km)	Mo(Nm)	Stress Drop (MPa)	Delay time from Origin time (sec)
SMGA 1	62.40	41.60	2.31E+21	41.3	15.64
SMGA 2	41.60	41.60	7.05E+20	23.6	66.42
SMGA 3	93.60	52.00	4.34E+21	29.5	68.41
SMGA 4	38.50	38.50	3.83E+20	36.4	109.71
SMGA 5	33.60	33.60	3.99E+20	26.0	118.17

※本震の総地震モーメント量Moは(Mw9.0:4.5×10<sup>22</sup>N・m)



Irikura and Kurahashi (2011)

図 3.1-9b 2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル間のアスペリティ位置の比較(地震調査委員会、2011より)。

#### 4) 計算手法等の収集・整備

三次元地下構造モデルを用いた海溝型巨大地震の長周期地震動計算においては、効率性からも数値解析的手法である差分法が採用されることが多い。「長周期地震動予測地図」2009年試作版のうち、宮城県沖地震については林・引間(2001)、想定東海地震、東南海地震及び「長周期地震動予測地図」2012年試作版の南海地震(昭和型)については、Pitarka(1999)の差分法が用いられている。後者では、減衰(Q値)について、Graves(1996)の方法により与えられているが、地下構造モデルでは減衰が周期に依らず一定と仮定されているのに対して、周期が長いほど小さいQ値となっていることが「長周期地震動予測地図」2012年試作版において課題として挙げられている。一方、林・引間(2001)においても、Graves(1996)とは異なるものの周波数に依存するQ値が設定されている。

「全国地震動予測地図」における主要活断層帯を対象とした詳細法による地震動計算のうち、長周期成分については、Aoi and Fujiwara(1999)の差分法が用いられている。本研究では、Aoi and Fujiwara(1999)による差分法を適用することとし、サブテーマ④で実施する南海トラフの巨大地震を対象として、防災科学技術研究所のスーパーコンピューターを使用して以下の条件

- 格子間隔：不連続格子 (Aoi and Fujiwara, 1999)
  - ◇ 水平方向 200m、深さ方向 100m (第1領域：深さ 0~8 km)
  - ◇ 水平方向 600m、深さ方向 300m (第2領域：深さ 8~70 km)
  - ◇ 格子数： $3498 \times 5448 \times 81 + 1166 \times 1816 \times 207 \approx 20$  億格子
- Q値の参照周期：5秒
- 時間間隔：0.008333秒 (約120 Hz)
- タイムステップ数：60000ステップ (=500秒間)
- 計算波形の有効周期帯：2秒以上

にて地震動シミュレーションを実施する上での計算時間は、南海地震、東南海地震、想定東海地震の全てが連動する場合において、防災科学技術研究所のスーパーコンピューター(Altix4700 ; 256CPU)で24~36時間である。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

従来の地下構造モデルが南西諸島まで拡張されたことにより、全国を対象とした長周期地震動予測地図作成のための地下構造モデルが整備された。また、日本海東縁部のプレート境界構造を作成したことにより、当該地域で発生する巨大地震の震源モデルの設定への貢献が期待できる。

2003年十勝沖地震について震源モデルの収集を実施し、モデル間の比較から海溝型巨大地震においては、長周期地震動の解析によるアスペリティと短周期地震動の解析によるア

スペリティの位置や大きさに差異が見られることを示した。さらに、観測史上最大規模の地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデルについても比較を行い、その差異がより顕著であることを示した。

一方で、今回作成したプレート境界構造モデルはわずかな情報から作成されており、その精度等は既往部分と比べても劣るものである。また、文部科学省による「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」や「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」などによる知見に基づく新たなフィリピン海プレートの境界面モデルも示されつつあり、これらの成果を地下構造モデルに取り込むことも今後の課題である。

震源のモデル化に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震マグニチュード 9 クラスの地震について、提示されている震源モデルからは地震動の長周期成分と短周期成分の放出源が異なる可能性も示唆されており、今後より詳細な検討を必要とする。また、計算手法に関しては、差分法における減衰 ( $Q$  値) の組み込み方についてさらなる検討が必要である。

#### (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) 馬場俊孝・伊藤亜紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志, 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, S111-006, 2006.
- 3) 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.
- 4) 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川讓・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛, 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 337, 2009.
- 5) 原子力発電環境整備機構, 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, 原子力発電環境整備機構技術報告書, NUMO-TR-04-02, 2004.
- 6) Graves, R. W., Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1091-1106, 1996.
- 7) 林宏一・引間和人, 差分法による三次元弾性波動場計算 (その 3) - 不等間隔格子と PC クラスタによる大規模モデルの計算 -, 日本地震学会講演予稿集, B59, 2001.
- 8) Hirata, K., Y. Tanioka, K. Satake, S. Yamaki and E. L. Geist, The tsunami source area of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami travel times and its relationship to the 1952 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 367-372, 2004.
- 9) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi and H. Fujiwara, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of the K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, 56, 317-322,

2004.

- 10) 伊藤谷生・佐藤比呂志, 西南日本における海溝・島弧・縁海系の地殻構造—南海トラフから大和海盆北縁まで—, 地学雑誌, 119, 235-244, 2010.
- 11) 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.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 日本海東縁部の地震活動の長期評価, 2003.
- 13) 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.
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版)」, 2011.
- 15) 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—南海地震 (昭和型) の検討—, 2012.
- 16) 釜江克宏・川辺秀典, 2003年十勝沖地震 (M8.0) の震源のモデル化と強震動予測レシピの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 519-520, 2004.
- 17) Koketsu, K., K. Hikima, S. Miyazaki and S. Ide, Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source rupture process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 329-334, 2004.
- 18) 瀨瀬一起・三宅弘恵・小林励司・田中康久・池上靖史, 1923年関東地震の広帯域強震動評価: 震度分布再現に向けたモデル化の現状, 首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開 平成17年度成果報告シンポジウム予稿集, <http://www.cuee.titech.ac.jp/syutoken/activities/h17pdf/4.pdf>, 2006.
- 19) 久世益充・杉戸真太・能島暢呂, 2003年十勝沖地震におけるアスペリティ分布の推定, 土木学会地震工学論文集, 28, 論文番号104, 2005.
- 20) Matsubara, M. and K. Obara, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, 63, 663-667, 2011.
- 21) Morikawa, N., S. Aoi, R. Honda, S. Senna, Y. Hayakawa and H. Fujiwara, Application of the "Recipe for strong motion evaluation" to the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, ESG2006, Paper No. 48, 2006.
- 22) 中村一明, 日本海東縁新生海溝の可能性, 東京大学地震研究所彙報, 58, 711-722, 1983.
- 23) 中村衛・兼城昇司, 地震分布から求めた南西諸島における沈み込んだフィリピン海プレート形状, 琉球大学理学部紀要, 70, 73-82, 2000.
- 24) Nozu, A. and K. Irikura, Strong-motion generation areas of great subduction-zone earthquake: waveform inversion with empirical Green's functions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 180-197, 2008.
- 25) 大竹政和・平朝彦・太田陽子 (編), 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会, 2002.

- 26) Pitarka, A., 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 27) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, 462-464, 2005.
- 28) 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.
- 29) Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino and T. Kanazawa, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth Planets Space*, 56, 373-376, 2004.
- 30) Yagi, Y., Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, *Earth Planets Space*, 56, 311-316, 2004.
- 31) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, 55, e21-e24, 2003.
- 32) 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.
- 33) 柳井修一・青木一勝・赤堀良光, 日本海の拡大と構造線—MTL, TTL—そしてフォッサマグナー, *地学雑誌*, 119, 1079-1124, 2010.

### 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

#### (1) 研究の内容

##### (a) 研究の題目

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

##### (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	契約研究員	前田 宜浩

##### (c) 研究の目的

震源パラメータの複雑さが地震動予測結果に及ぼす影響について検討し、長周期・広帯域地震動予測の高精度化に効果的な震源パラメータが何であるか明らかにする。検討結果を踏まえ、海溝型巨大地震の長周期・広帯域地震動予測を高精度化するための特性化震源モデルの設定手法の改良案を提示する。

#### (2) 平成 23 年度の成果

##### (a) 研究の要約

2003 年十勝沖地震を対象として、広帯域地震動の観測記録に基づいた複数の震源モデルにおける震源時間関数について比較検討を実施した。結果として、マグニチュード 8 クラス以上の巨大地震における理論的な手法による計算を高度化するために、現状の特性化震源モデルにおいて設定されるアスペリティよりも小さいスケールの不均質性を与える必要があることを明らかにし、k-2 モデルを適用することを提示した。

##### (b) 研究の成果

###### 1) 2003 年十勝沖地震を対象とした震源モデル設定手法の考察

「3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等」で収集した 2003 年十勝沖地震の震源モデルのうち、震源の破壊過程を時間軸でモデル化することが可能な情報が得られている 3 つのモデル

- ・ Morikawa et al. (2006)
- ・ 釜江・川辺 (2004)
- ・ 瀨瀬・他 (2006)、畑・他 (2006)

を参照して、指数関数型モーメント時間関数を用いて簡便な仮定を行った検討用モデル A, B, C を設定して、ほぼ同一なモデル化条件のもとで断層モデルの比較を実施した。さらに、Honda et. al. (2004) の断層モデルも加えて、すべり量分布と各種断層パラメータをまとめ

たものを表 3.2-1 及び図 3.2-1 から図 3.2-4 に示す。これにより、それぞれの断層モデルが表現しようとした震源像を震源時間関数（モーメント時間関数）によって表現することで相互比較を試みた。モデル A, B, C については指数関数型モーメント時間関数を用いて簡便に震源時間関数を算定した。指数関数型モーメント時間関数  $f(t)$

$$f(t) = \exp(-t/\tau) / \tau \quad (3.2-1)$$

を定義する際の立ち上がり時間  $\tau$ は

$$\tau = \mu D / 2\beta\sigma \quad (3.2-2)$$

の関係式を用いて求めた。ここで、 $\mu$ は剛性率、 $D$ はすべり量、 $\beta$ はS波速度、 $\sigma$ は応力降下量である。Honda et al. (2004) の断層モデルに対しては、各要素断層に対してモーメント時間関数のデータをそのまま用いて震源時間関数を求めた。

以上の手順によって算定された各断層モデルの震源時間関数を比較した結果を図 3.2-5 に示す。モデル A, B, C におけるアスペリティ関与分は網掛け処理を施してある。3つのモデルに共通する特徴を抽出するのが難しいことから、良好なシミュレーション結果を与える震源像に対するモデル化の自由度が大きいと言える。

各断層モデルの震源時間関数をフーリエ変換して周波数領域で比較した結果を図 3.2-6 に示す。どの震源モデルも 0.1~0.2 Hz（周期 5~10 秒）の範囲で似たような振幅値を与えており、最大速度や速度波形の特徴的な部分を表すような周波数帯域で同じような震源像を表現するようにモデル化されていると言える。また、0.2~0.5 Hz（周期 2~5 秒）の範囲では、モデル A と C が似たような振幅値となっている一方で、モデル B はやや大きめの振幅値となっている。これは図 3.2-5 に見られる要素断層の大きさに特徴付けられる震源時間関数のパルス形状の差異による影響であると考えられる。

以上のように、本検討では 2003 年十勝沖地震に対して複数の断層モデルのそれぞれが表現しようとした震源像を、震源時間関数（モーメント時間関数）およびそのフーリエ変換によって表現することで相互比較を試みた。結果として、レシピによって単純に「特性化震源」化しただけでは表されないような特徴の表現方法や海溝型巨大地震に対する震源モデル化手法の改良方法について、

- ・ 長周期域を対象に、10~数十 km スケールのすべり量分布に関する特徴を実地震の震源インバージョン結果等に基づいて適切にモデル化する。
- ・ 上記周期域よりも短い周期域を対象に、数 km スケールの応力降下量に関する特徴（震源時間関数のパルス形状の特徴）を適切にモデル化する。上記のすべり量分布とはスケールが異なるので一対一に対応はしない。

といった観点に立って、従来の特性化手法にとらわれずに手法を改良・拡張していく必要があると考えられる。

表 3.2-1 検討用モデルの震源パラメータ。

		モデル A	モデル B	モデル C
アスペリティ 1	面積 (km <sup>2</sup> )	672	200	1536
	すべり量 (m)	6.33	4.14	5.50
	応力降下量 (MPa)	25	37.4	32
アスペリティ 2	面積 (km <sup>2</sup> )	400	400	—
	すべり量 (m)	4.67	5.85	—
	応力降下量 (MPa)	25	37.4	—
アスペリティ 3	面積 (km <sup>2</sup> )	320	200	—
	すべり量 (m)	4.29	4.14	—
	応力降下量 (MPa)	25	37.4	—
背景領域	面積 (km <sup>2</sup> )	—	8200	10464
	すべり量 (m)	—	2.28	2.74
	応力降下量 (MPa)	—	4.10	18.8
破壊伝播速度 (km/s)		3.6※	2.8	

※アスペリティ 2 で 3 秒、アスペリティ 3 で 7 秒の遅れを別途考慮

剛性率 $\mu=4.68 \times 10^{10}$  (N/m<sup>2</sup>)、密度 $\rho=3.08$  (g/cm<sup>3</sup>) を仮定

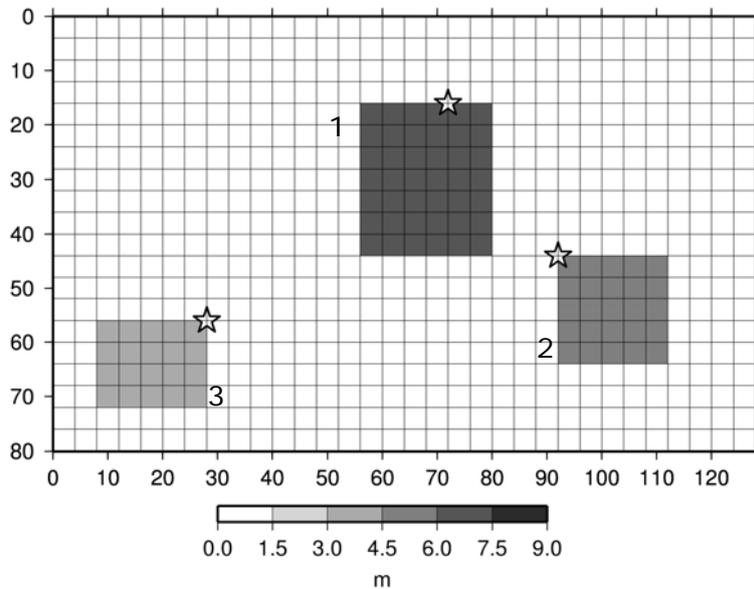


図 3.2-1 釜江・川辺 (2004) による特性化震源 (アスペリティ) モデルを参考に設定した断層モデル A のすべり量分布。

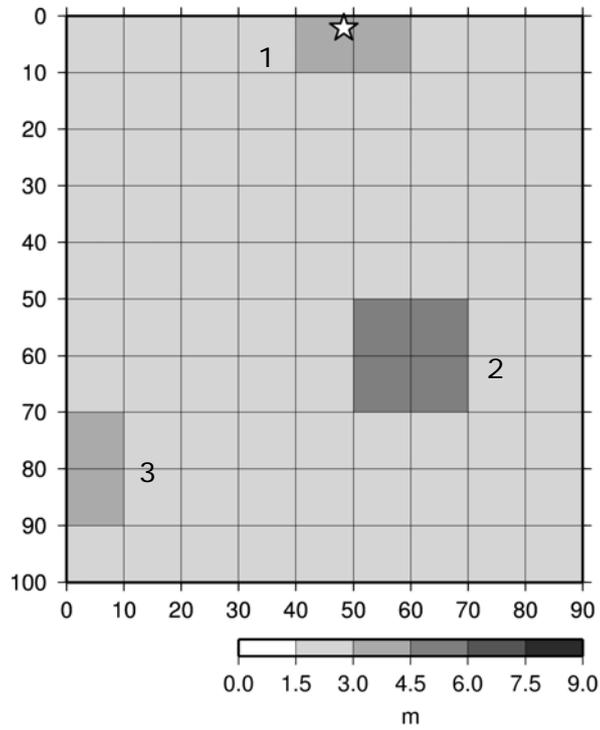


図 3.2-2 Morikawa et. al. (2006) による特性化震源（アスペリティ）モデルを参考に設定した断層モデル B のすべり量分布。

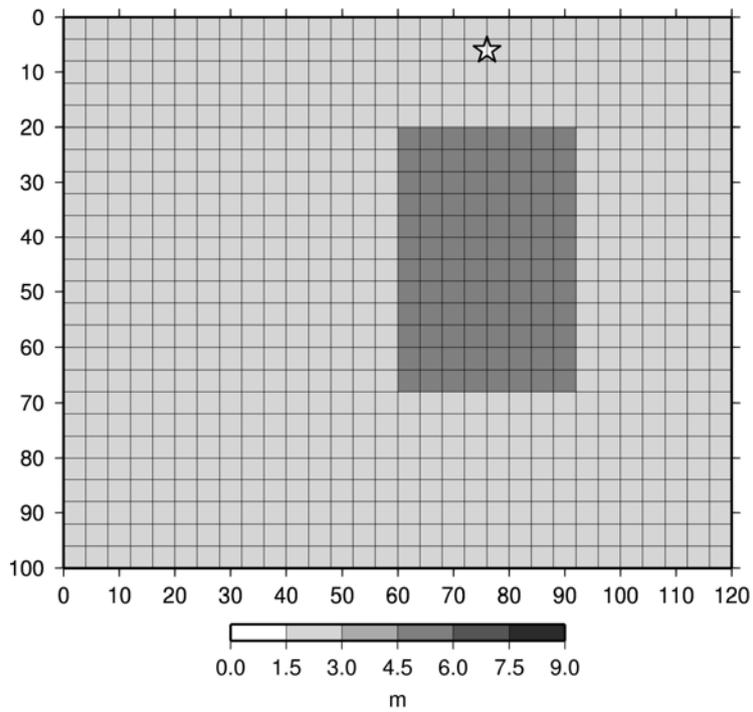


図 3.2-3 瀬戸・他 (2006) による特性化震源（アスペリティ）モデルを参考に断層モデル C のすべり量分布。

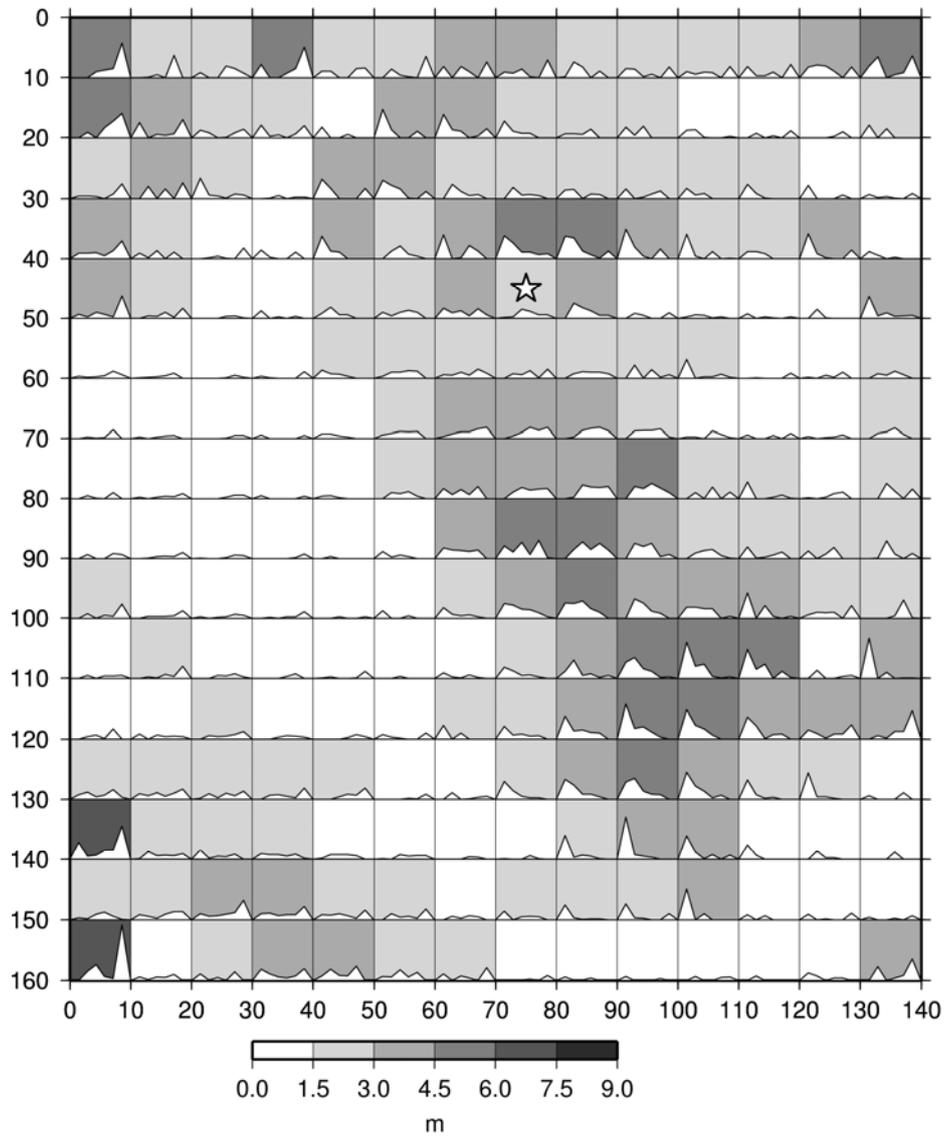


図 3.2-4 Honda et. al. (2004) による断層モデルのすべり量分布。

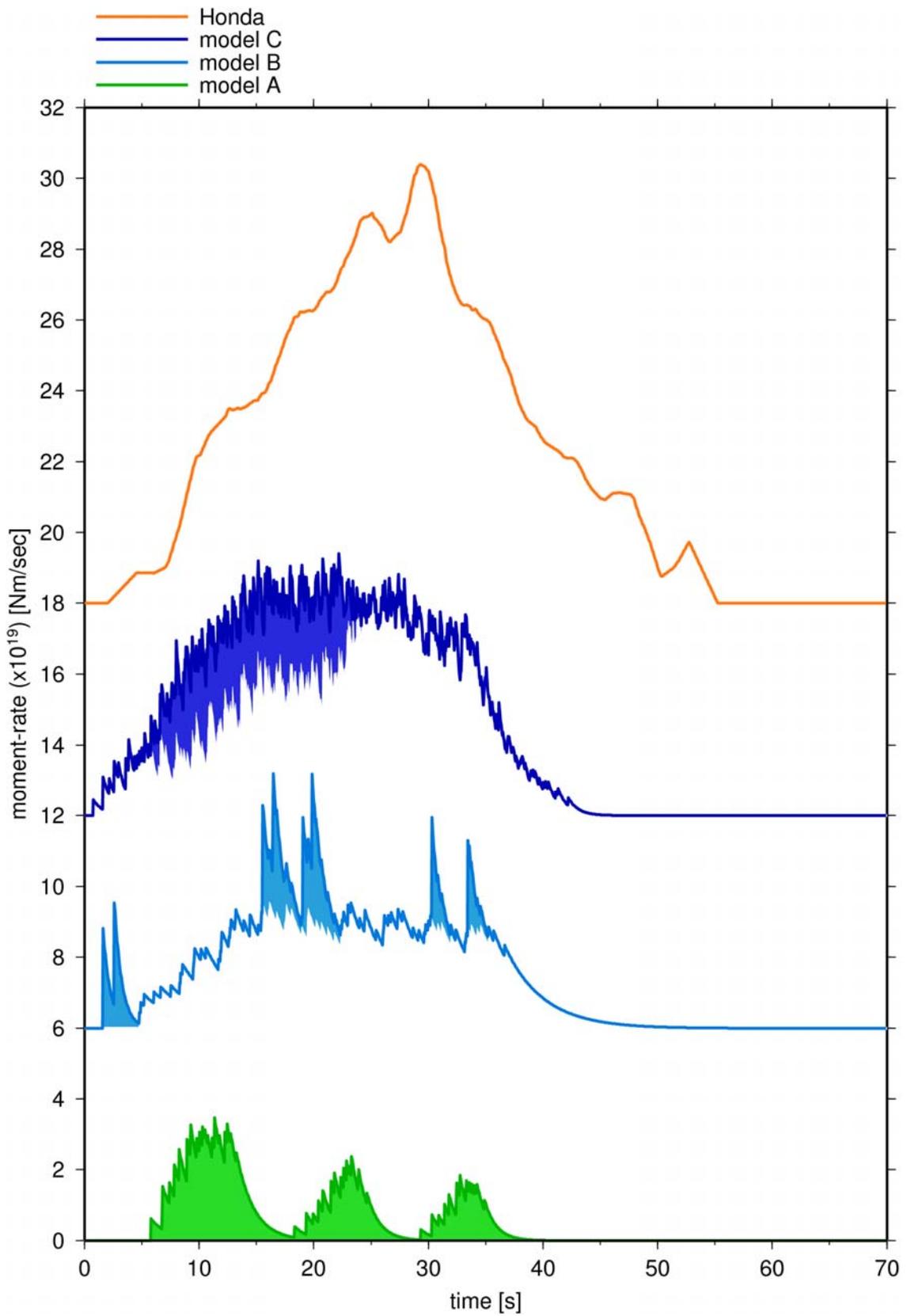


図 3.2-5 各断層モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）の比較。

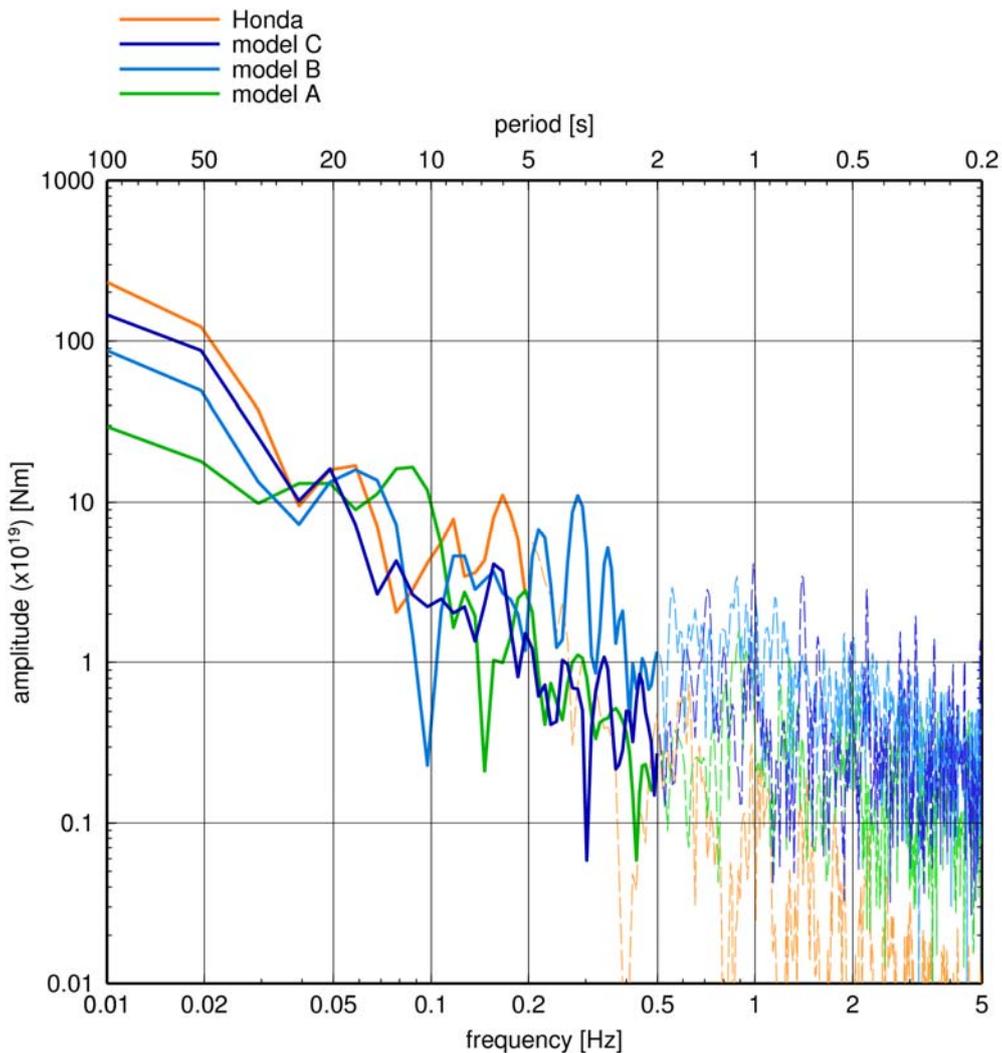


図 3.2-6 各断層モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）のフーリエ・スペクトルによる比較。

## 2) 特性化震源モデルを用いた地震動評価に関する検討

次に、2003年十勝沖地震の断層モデルのうち、Morikawa et al. (2006) の断層モデルを参考に設定したモデル B を対象に、特性化震源モデルを用いたハイブリッド合成法における接続周期（周期 2～5 秒）付近に生じる理論的方法による地震動評価結果の振幅低下問題について検討した。

検討に用いたモデル B に対して指数関数型モーメント時間関数を用いて簡便に震源時間関数を算定した結果が図 3.2-7 の黒線、震源時間関数をフーリエ変換して周波数領域でプロットした結果が図 3.2-8 の黒線となる。これは要素断層の大きさを 10km に設定し、要素分割を  $9 \times 10$ （断層面全体で 90 要素）にした場合の波形合成法による地震動評価（統計的グ

グリーン関数法もしくは経験的グリーン関数法)によって表現しようとした特性化震源モデルの震源像であるともいえる。図 3.2-8 の震源時間関数のフーリエ振幅表示においては、0.5Hz までの低周波数領域(周期 2 秒までの長周期域)では要素断層から放出されるモーメントがコヒーレントに重ね合わされることが想定されるため、波形合成法による地震動評価によって表現しようとした特性化震源モデルの震源像として適切であると判断して実線で表示している。0.5Hz よりも高周波数の領域(周期 2 秒よりも短周期域)では破線で表示しているが、これは、実際の波形合成法においては 0.5Hz よりも高周波数の領域は要素断層から放出されるモーメントがランダムに重ね合わされるので、波形合成法によって表現しようとしたフーリエ振幅レベルよりも指数関数型モーメント時間関数を用いた震源時間関数の方が大きくなっていると予想されるからである。

ここで、図 3.2-2 に示されたような特性化震源モデルに対して理論的方法による地震動評価を実施することを想定する。広帯域な強震動評価を行うため(理論的方法を短周期域まで拡張するため)には、破壊フロントの連続性を保持できるように十分な加震点を与えるという手順を経るのが自然な流れとなると考えられる。つまり、波形合成法による地震動評価で設定した要素断層をさらに細分することになるはずである。要素断層ごとの加震点数(N)を 256 点とした場合の震源時間関数を図 3.2-7 の赤線に、震源時間関数をフーリエ変換して周波数領域でプロットした結果を図 3.2-8 の赤線に示す。もし、加震点数(N)が 1 とした場合の特性化震源モデルの震源像(黒線)が、波形合成法による地震動評価から実観測記録との比較の結果として適切であると判断された震源像であったとするならば、図 3.2-8 に示した黒線と赤線とあいだの差異がハイブリッド合成法における接続周期(周期 2~5 秒)付近に生じる理論的方法による地震動評価結果の振幅低下問題を示しているものと考えられる。

さらに比較対象として Honda et al. (2004) のインバージョン結果に対する震源時間関数をフーリエ変換して周波数領域でプロットした結果を図 3.2-8 の橙線として示す。黒線・赤線との比較から、2003 年十勝沖地震のようなマグニチュード 8 クラス大地震に対するハイブリッド合成法による地震動評価における接続周期(周期 2~5 秒)付近では、以下のような評価が行われていることが予想される。

1. 複雑なすべり分布やすべり速度時間関数を有する実際にモデル化すべき詳細な震源モデル(橙線)を「レシピ」に従って特性化することで高周波数域(短周期域)における理論的方法による地震動評価結果の振幅は低下する(赤線)。
2. しかし、波形合成法による地震動評価においては破壊フロントの連続性が崩れているため、高周波数(短周期)成分が励起されて(黒線)、実際にモデル化すべき詳細な震源モデル(橙線)の振幅レベルへと近づく。
3. 結果として、波形合成法による地震動評価では特性化震源モデルが実観測記録をよく説明できる適切な震源モデルと見なされ、その特性化震源モデルを用いた理論的方法による地震動評価においては「振幅低下問題」と称される過小評価問題が顕在化する。

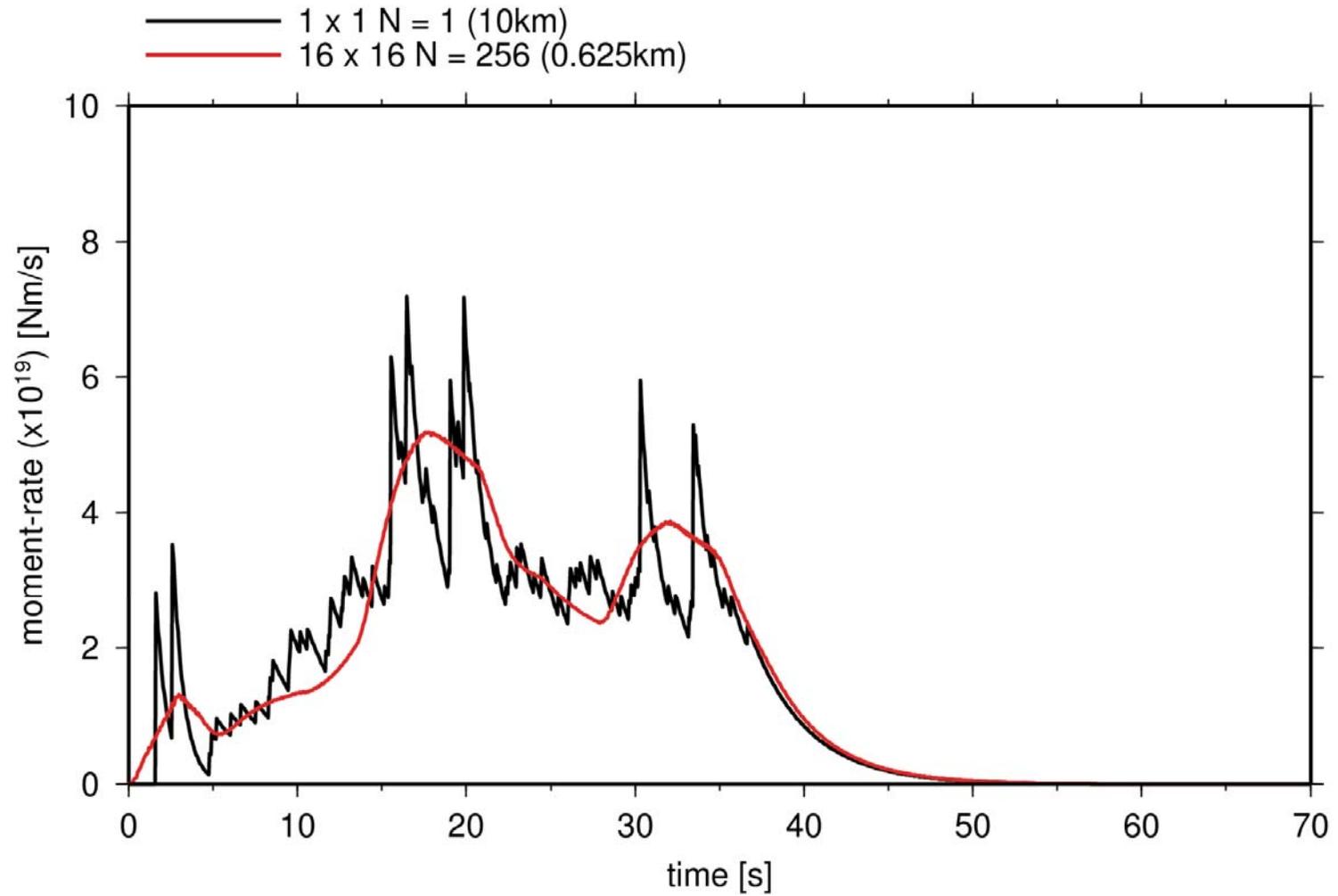


図 3.2-7 断層モデル B に対する震源時間関数 (モーメント時間関数)。  
 < 黒：経験的な地震動評価を想定した場合、赤：理論的な地震動評価を想定した場合 >

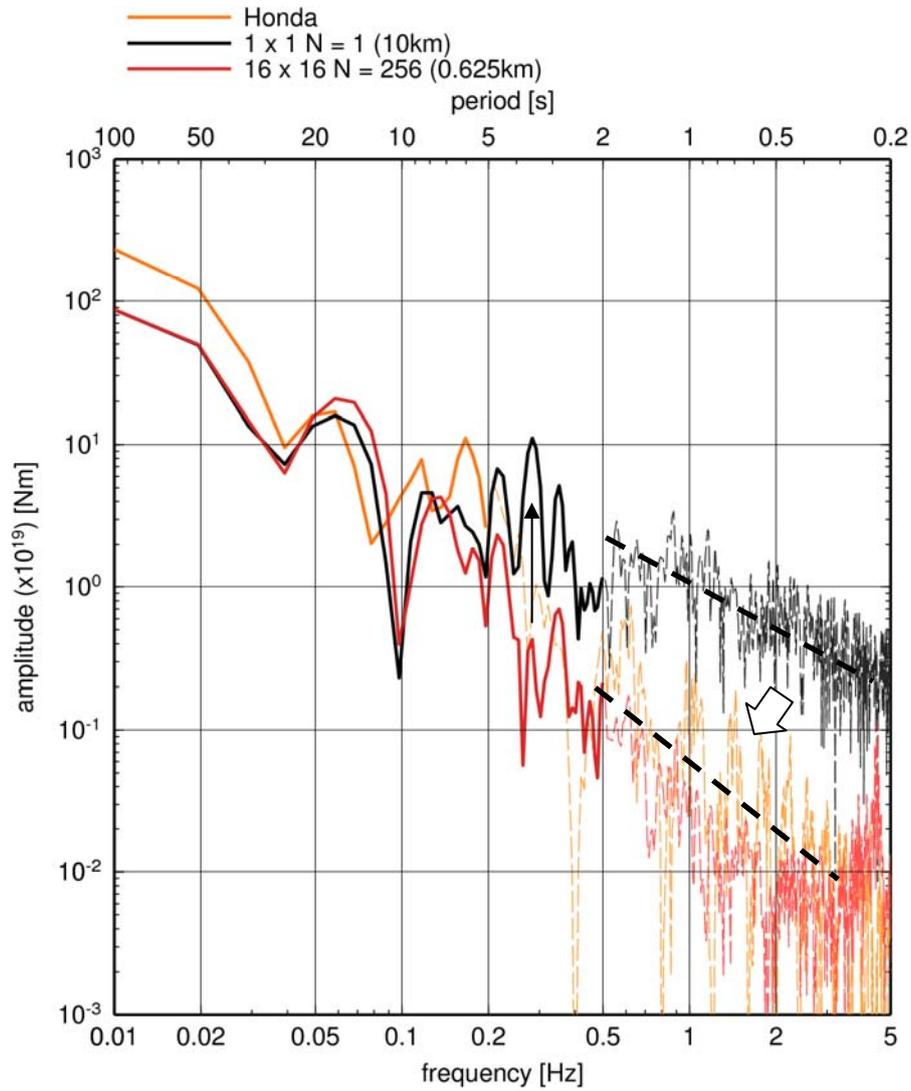


図 3.2-8 断層モデル B に対する震源時間関数（モーメント時間関数）のフーリエスペクトルによる比較。

＜黒：経験的な地震動評価を想定した場合、赤：理論的な地震動評価を想定した場合、  
 橙：Honda et al. (2004) によるインバージョン結果＞

### 3) 特性化震源モデルを用いた震源時間関数のスケーリングに関する検討

最後に、ここまでの検討内容を発展させて「レシピ」によって定義される特性化震源モデルを用いた震源時間関数のスケーリングに関する検討を実施した。

震源時間関数のスケーリングに関する検討で用いた特性化震源（アスペリティ）モデルの断層モデルを図 3.2-9 に示す。巨視的・微視的断層パラメータを算定する際の基本条件としては、以下の 2 条件

- ・平均応力降下量が地震の規模によらず一定
- ・断層面積に対するアスペリティの面積比、およびその逆数である平均応力降下量に対するアスペリティの応力降下量の比が地震の規模によらず一定

を保持するようにパラメータ設定している。平均応力降下量は 2.0MPa、アスペリティ面積比は 0.2 を仮定して、マグニチュード 6、7、8、9 をターゲットに 4 つの断層モデルを設定した。

これら 4 つの断層モデルに対して指数関数型モーメント時間関数を用いて震源時間関数を算定した。算定された震源時間関数を図 3.2-10 に示す。図中の太線は理論的方法による地震動評価を想定して破壊フロントの連続性を保持できるように十分な加震点を与えた場合の震源時間関数、図中の細線は波形合成法による地震動評価を想定して断層面分割数が 16×8（断層面全体で 100 要素程度）となるように要素断層を設定した場合の震源時間関数となっている。

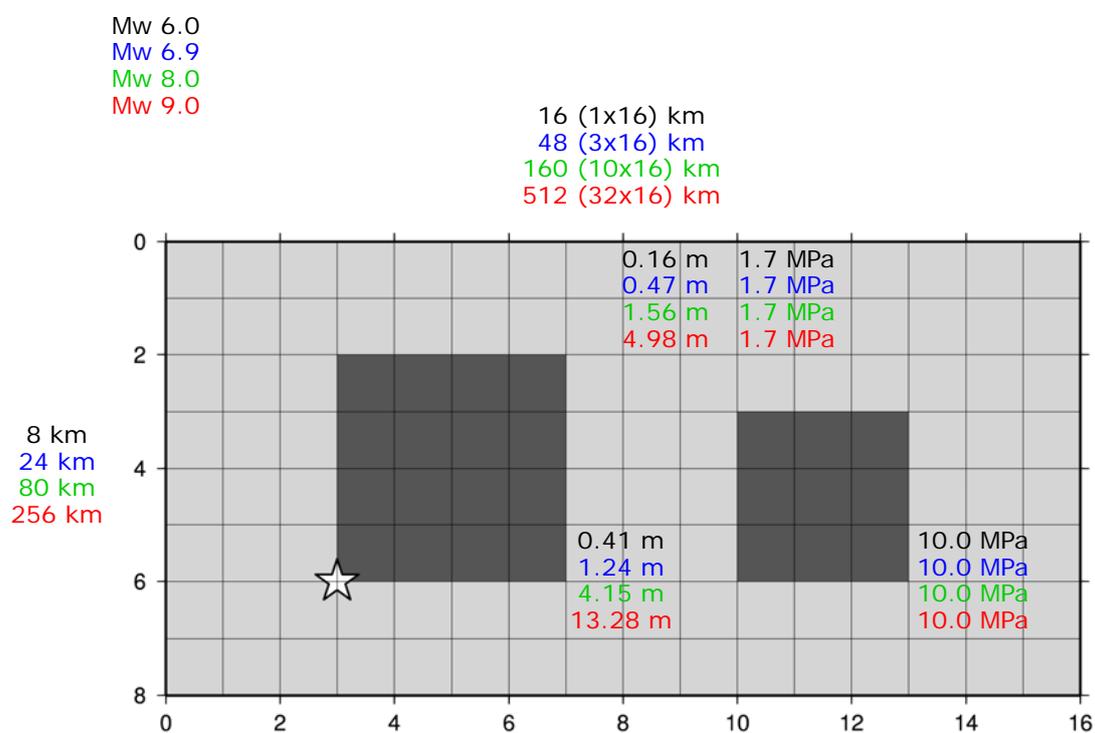
震源時間関数をフーリエ変換して周波数領域でプロットした結果を図 3.2-11 に示す。破壊フロントの連続性を保つことで理論的方法による地震動評価を想定した場合のスペクトルを太線で、波形合成法（統計的グリーン関数法もしくは経験的グリーン関数法）による地震動評価を想定した場合のスペクトルを細線で示している。

図 3.2-11 を参考に考察すると、特性化震源モデルを用いた地震動評価において波形合成法と理論的方法とのあいだで差異が現れてくるのは

- ・マグニチュード 9 クラスで 0.05Hz 以上（周期 20 秒以下）
- ・マグニチュード 8 クラスで 0.125Hz 以上（周期 8 秒以下）
- ・マグニチュード 7 クラスで 0.5Hz 以上（周期 2 秒以下）
- ・マグニチュード 6 クラスで 1.25Hz 以上（周期 0.8 秒以下）

付近であることを読み取ることができる。計算機的能力等を考慮して見積もられるハイブリッド合成法における接続周期（周期 1～2 秒）と図 3.2-11 のスペクトルを比較すると、マグニチュード 7 クラスを対象にした地震動評価においては波形合成法と理論的方法とのあいだでは差異が生じない。このことは、従来のマグニチュード 7 クラスの活断層で発生す

る地震を対象とした地震動評価においては問題がないことも示している。一方、2003年十勝沖地震のようなマグニチュード8クラスの海溝型巨大地震を対象とした地震動評価において差異を認識することになったと言える。また、マグニチュード9クラスを対象に地震動評価を実施すれば、波形合成法と理論的方法とのあいだの差異はさらに大きくなることが予想される。



アスペリティ面積比 $S_{asp}/S$	:	0.2
平均応力降下量 $\sigma$	:	2.0 MPa
剛性率 $\mu$	:	$4.48 \times 10^{10}$ (N/m <sup>2</sup> )
S波速度 $V_s$	:	3.8 (km/s)
密度 $\rho$	:	3.1 (g/cm <sup>3</sup> )
破壊伝播速度 $V_r$	:	2.74 (km/s)

図 3.2-9 震源時間関数のスケーリングに関する検討に用いた特性化震源（アスペリティ）モデル。

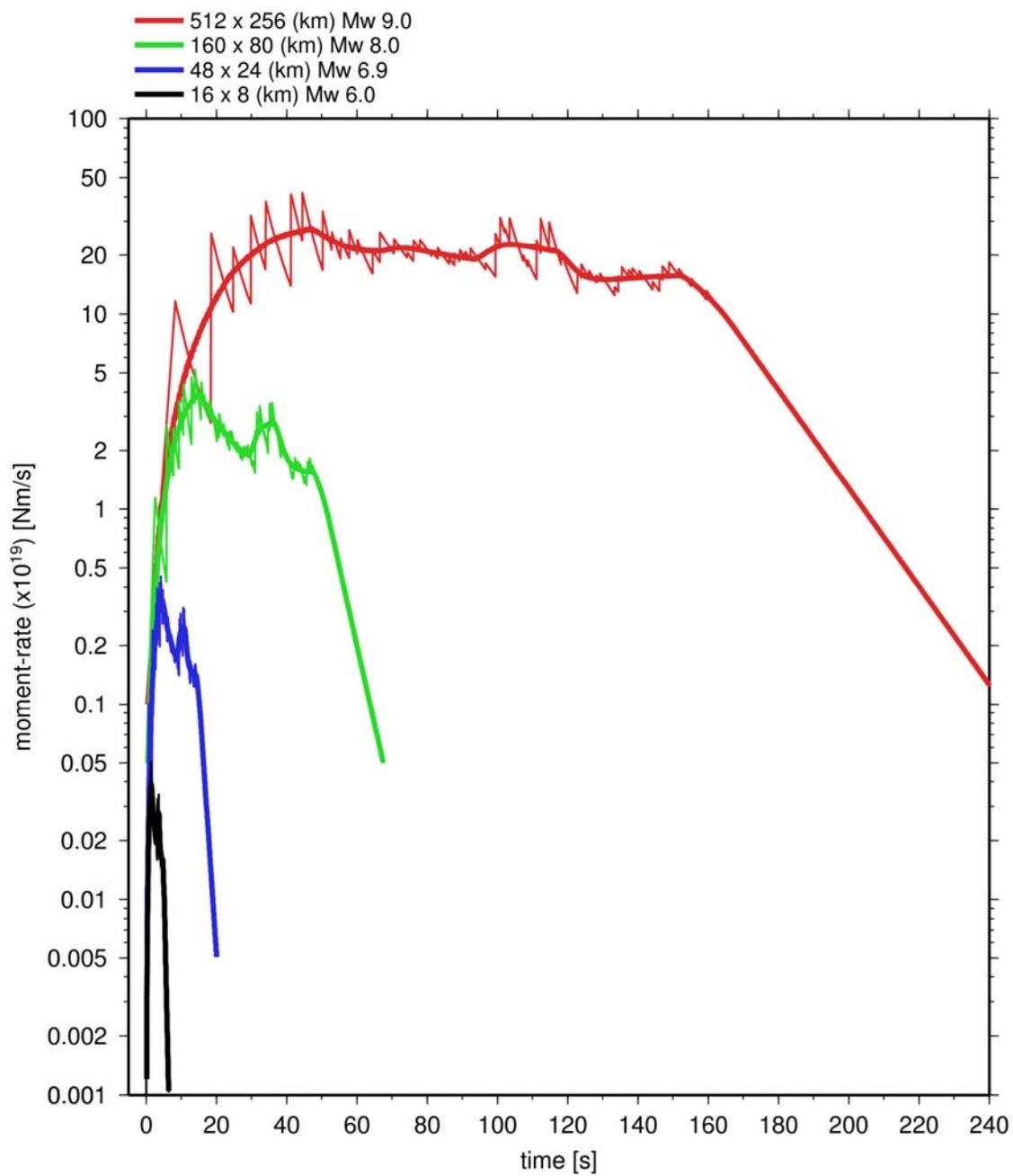


図 3.2-10a 特性化震源モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）。

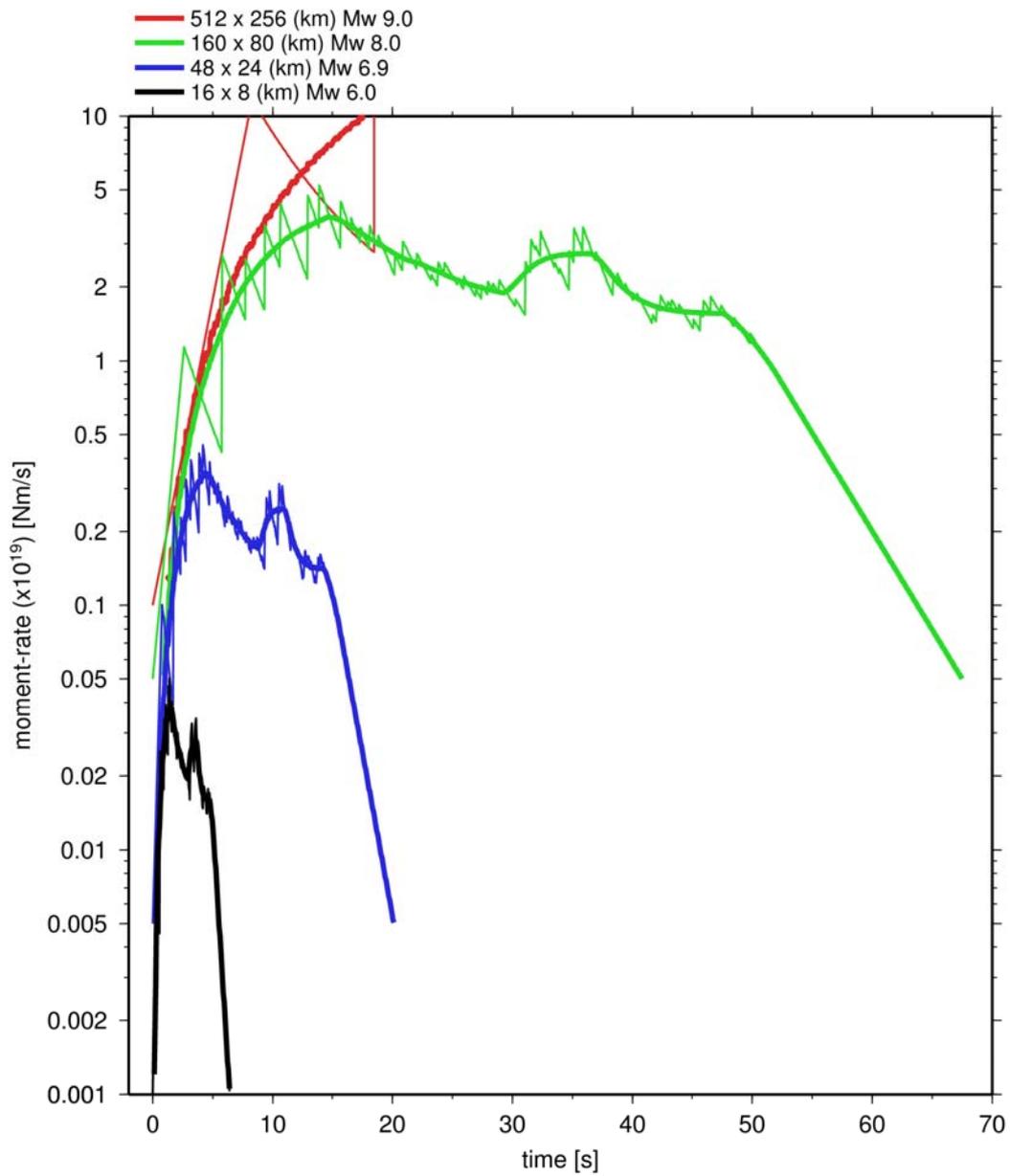


図 3.2-10b 特性化震源モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）。図 3.2-10a を拡大したもの。

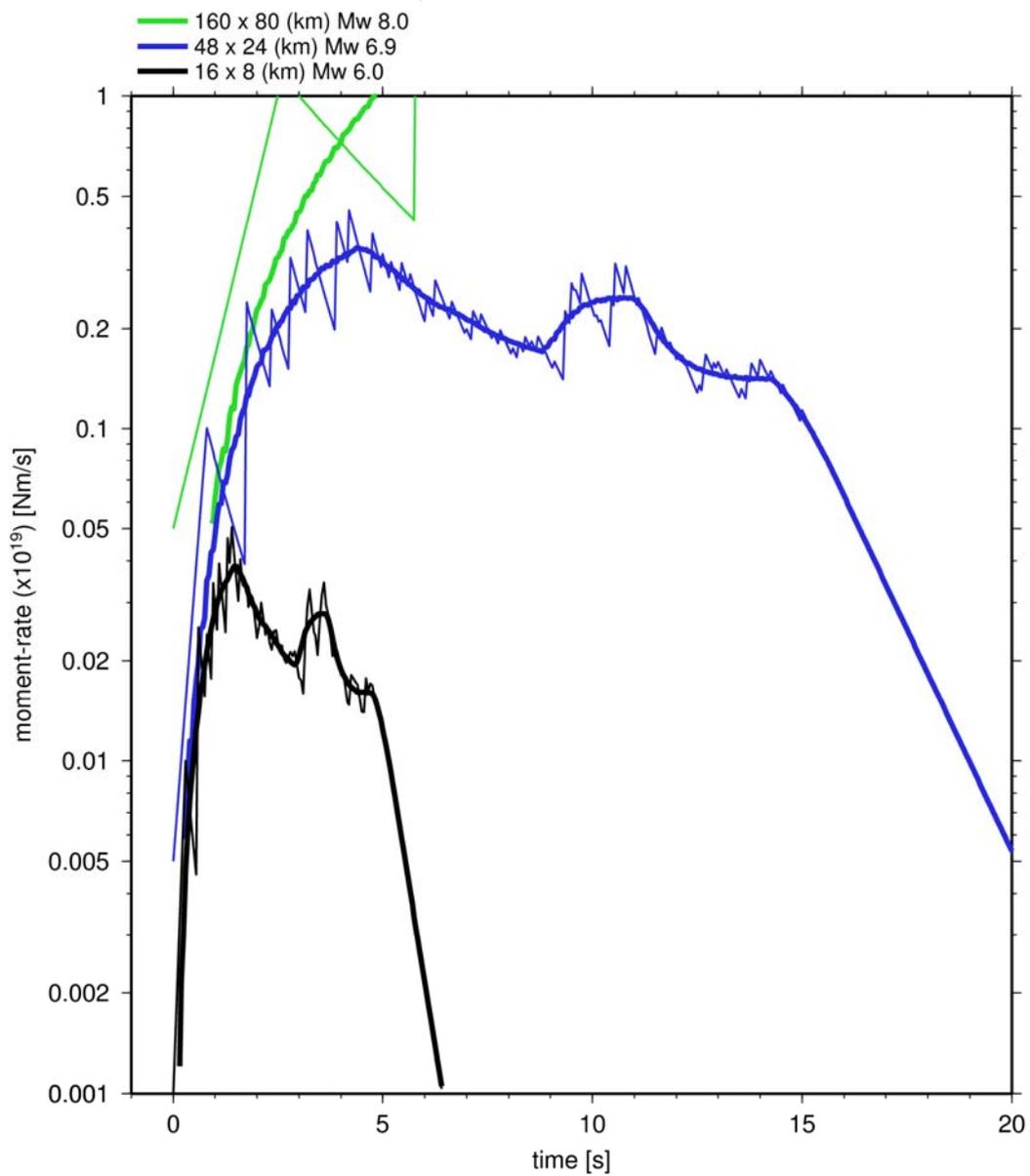


図 3.2-10c 特性化震源モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）。図 3.2-10b を拡大したもの。

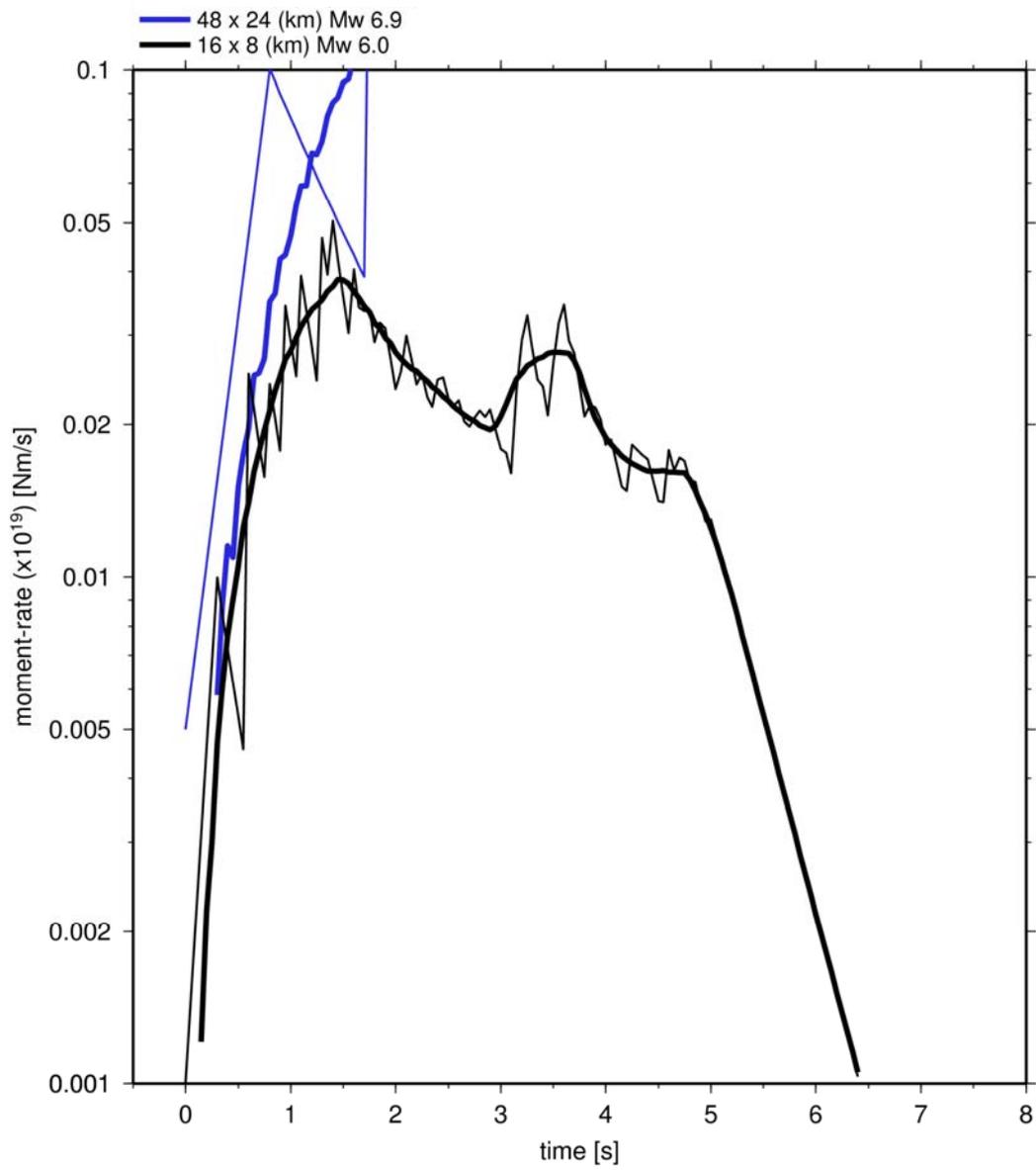


図 3.2-10d 特性化震源モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）。図 3.2-10c を拡大したもの。

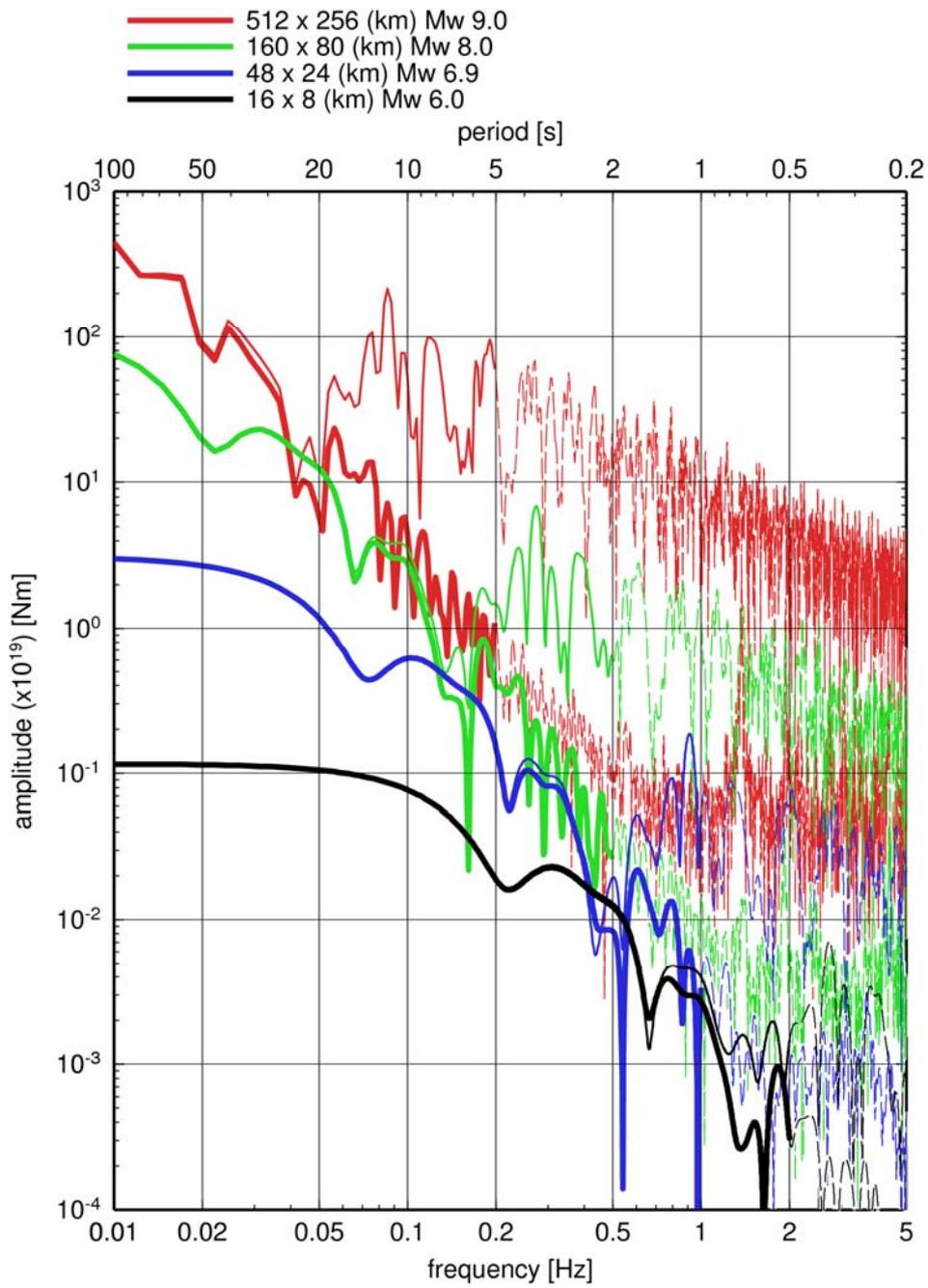


図 3.2-11 特性化震源モデルに対する震源時間関数（モーメント時間関数）のフーリエスペクトル。

(c) 結論ならびに今後の課題

マグニチュード 8 クラス大地震に対するハイブリッド合成法による地震動評価の接続周期（周期 2～5 秒）付近において、現状の「レシピ」によって定義される特性化震源モデルを用いた場合に留意すべき問題点を以下に示す。

短周期側に適用されている波形合成法による地震動評価においては、現状の特性化震源モデルを用いることで適切な地震動評価が実施されていると言え、震源モデルの高度化として必要以上に細かく要素断層を分割する手法や震源モデルに複雑な不均質性を導入する手法は適切であるとはいえないと考えられる。一方、理論的方法による地震動評価結果においては、波形合成法と全く同じ特性化震源モデルを用いると振幅低下問題が発生するので、要素断層ごとの加震点数（N）を十分な数に増やす場合には、波形合成法によって表現しようとした（加震点数  $N = 1$  のときの）震源時間関数に似たような震源像となるような何らかの不均質性導入が必須となる。例えば、断層面全体を対象にしたすべり量や破壊開始時間の自己相似分布（Hisada (2001) による  $k=2$  モデル）を導入することが挙げられる。

一方で、マグニチュード 9 クラスの超巨大地震に対しては、波形合成法における妥当性の検証もなされていない状況であることから、今後、2011 年東北地方太平洋沖地震を対象とした検討・分析が必要である。

(d) 引用文献

- 1) 畑奈緒未・三宅弘恵・瀨藤一起, 海溝型地震の強震動生成域とアスペリティ, 地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集, S204-008, 2006.
- 2) Hisada, Y., A theoretical omega-square model considering spatial variation in slip and rupture velocity. Part 2: Case for a two-dimensional source model, Bull. Seismol. Soc. Am., 91, 651-666, 2001.
- 3) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi and H. Fujiwara, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 56, 317-322, 2004.
- 4) 釜江克宏・川辺秀憲, 2003 年十勝沖地震 (M8.0) の震源のモデル化と強震動予測レシピの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 519-520, 2004.
- 5) 瀨藤一起・三宅弘恵・小林励司・田中康久・池上靖史, 1923 年関東地震の広帯域強震動評価: 震度分布再現に向けたモデル化の現状、首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開平成 17 年度成果報告シンポジウム予稿集, <http://www.cuee.titech.ac.jp/syutoken/activities/h17pdf/4.pdf>, 2006.
- 6) Morikawa, N., S. Aoi, R. Honda, S. Senna, Y. Hayakawa and H. Fujiwara, Application of the "Recipe for strong ground motion evaluation" to the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, ESG2006, Paper No. 48., 2006.

### 3. 3 巨大地震の観測記録による検証等

#### (1) 研究の内容

##### (a) 研究の題目

巨大地震の観測記録による検証等

##### (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	契約研究員	前田 宜浩

##### (c) 研究の目的

近年発生して観測記録が豊富にある 2003 年十勝沖地震及び 2004 年の紀伊半島南東沖の地震を対象として、「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」で提示した特性化震源モデルの設定手法による震源モデルに基づいて広帯域地震動を計算し、計算結果と観測記録との比較により、手法を検証する。

#### (2) 平成 23 年度の成果

##### (a) 研究の要約

「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」で提示した、 $k-2$  モデルによる震源過程の不均質性の導入を 2003 年十勝沖地震に適用し、地震動シミュレーションを実施した。観測記録との比較により、従来の短周期成分の振幅の落ち込みが改善されるという手法の有効性を示した一方で、パラメータの詳細な設定方法についてはさらなる検討が必要であることを示した。

また、2004 年紀伊半島南東沖の地震を対象とした地震動シミュレーションを実施し、震源の深さの設定がシミュレーションにおける表面波の励起に大きく影響を及ぼすことを示した。

##### (b) 研究の成果

###### 1) 2003 年十勝沖地震の地震動シミュレーションによる検証

「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」において、マグニチュード 8 級以上の巨大地震に対する広帯域地震動予測の高度化のため、「断層面全体を対象にしたすべり量や破壊開始時間の自己相似分布 ( $k-2$  モデル)」の導入及び要素断層の大きさを変えることを提示した。そこで、本検討では 2003 年十勝沖地震を対象として、特性化震源モデルを用いて差分法による地震動計算を行い、観測記録と比較し、不均質性導入の効果について検討した。

2003 年十勝沖地震については複数の震源モデルが提案されているが、本検討では Morikawa et al. (2006) による特性化震源モデルを参考に 3 つのモデルを設定した。

- ① 震源モデルのグリッド間隔を 0.5km としたもの
- ② ①のすべり量と破壊開始時間に、k-2 モデル (Hisada, 2001) による不均質を付与したもの
- ③ 震源モデルのグリッド間隔を 10km としたもの (不均質なし)

Morikawa et al. (2006) の特性化震源モデルは、3 つのアスペリティからなるモデルであるが、アスペリティ総面積は断層面積の約 8% となっており、長周期地震動予測地図 2009 年試作版で「レシピ」が適用されている、Murotani et al. (2008) のプレート境界地震のスケーリング則による面積比 (20%) に比べると小さい。そこで、4 つ目のモデルとして、

- ④ 単一のアスペリティ (面積比 20%) を持つモデル (グリッド間隔は 0.5km、不均質なし)。

を設定した。各モデルの震源パラメータを表 3.3-1 に示す。

図 3.3-1 に、4 つのモデルの震源時間関数、震源スペクトルを示す。k-2 モデルを仮定したモデル 2 は、モデル 1 や 4 に比べると 0.4Hz 付近で振幅がわずかに大きくなっているものの顕著な差は見られない。モデル 2 (k-2 モデル) のすべり分布 (図 3.3-2) を見ると、k-2 モデルにより付与した不均質性に比べて、モデル 1 で設定したアスペリティと背景領域との差の方が顕著であるため、モデル 1 と 2 では震源スペクトル形状の差が小さいと考えられる。一方で、震源のグリッド間隔を 10km としたモデル 3 では、モデル 1、2 に比べて震源時間関数形状の起伏は大きく、0.2Hz 以上で震源スペクトルの振幅レベルが高くなっている。ただし、 $\omega^{-2}$  モデルからは、ずれていることがわかる。

図 3.3-3 に 4 つのモデルによる最大速度分布を、図 3.3-4 に、観測記録と 4 つのモデルによる速度波形とフーリエスペクトルを示す。図 3.3-4a と図 3.3-4b は比較的硬質な地盤上の観測点、図 3.3-4c は平野内の観測点となっている。周期 10 秒程度以上の長周期成分については、いずれの地点においても観測記録をほぼ再現できているが、観測記録の最大振幅値に寄与している、それよりも短周期 (周期 5 秒前後) のパルス状の波形は、いずれのモデルでも再現できていない。モデル 2 (k-2 モデル) については、モデル 1 で設定しているアスペリティ配置の影響が強く、アスペリティサイズよりも短波長の不均質性を付与しても、モデル 1 との差が目立たない結果となっている。モデル 3 では、短周期成分が増加してフーリエスペクトルの振幅レベルは観測記録に近づいているものの、観測波形にみられるパルス状の波形は再現できていない。モデル 3 では、震源のグリッド間隔を粗くすることで破壊伝播の不均質性を表しているが、パルス状の波形を再現するモデルにはなっていない

と考えられる。モデル 4 では、モデル 1 に比べアスペリティサイズが大きく、他のモデルよりも振幅レベルの小さい結果となっている。このことは、現状の「レシピ」で設定されるアスペリティよりも小さなスケールの不均質性を含んだ震源のモデル化が有効であることを示している。

表 3.3-1 2003 年十勝沖地震の地震動計算に用いた震源パラメータ。

		Model 1,2,3	Model 4
全体	面積 (km <sup>2</sup> )	9000	
	地震モーメント (Nm)	1.05×10 <sup>21</sup>	
	平均すべり量 (m)	1.8	
	応力降下量 (MPa)	3.0	
	Mw	8.0	
アスペリティ 1	面積 (km <sup>2</sup> )	180	1800
	地震モーメント (Nm)	3.83×10 <sup>19</sup>	4.63×10 <sup>20</sup>
	平均すべり量 (m)	3.3	4.0
	応力降下量 (MPa)	37.5	15.0
アスペリティ 2	面積 (km <sup>2</sup> )	360	—
	地震モーメント (Nm)	1.08×10 <sup>20</sup>	—
	平均すべり量 (m)	4.7	—
	応力降下量 (MPa)	37.5	—
アスペリティ 3	面積 (km <sup>2</sup> )	180	—
	地震モーメント (Nm)	3.83×10 <sup>19</sup>	—
	平均すべり量 (m)	3.3	—
	応力降下量 (MPa)	37.5	—
背景領域	面積 (km <sup>2</sup> )	8280	7200
	地震モーメント (Nm)	8.66×10 <sup>20</sup>	5.89×10 <sup>20</sup>
	平均すべり量 (m)	1.6	1.3
	応力降下量 (MPa)	3.7	3.0

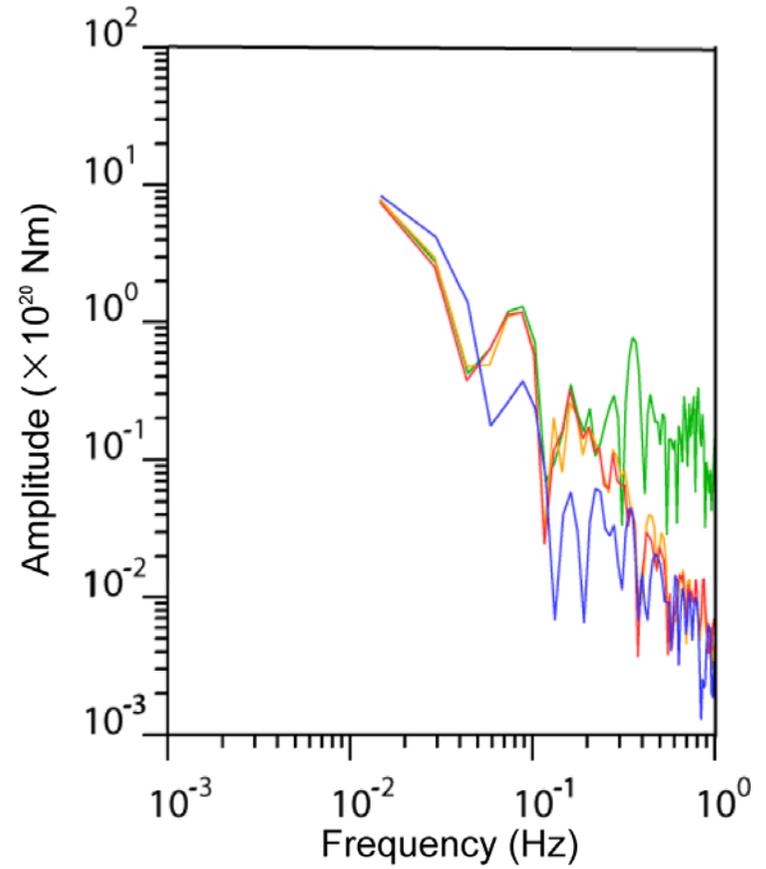
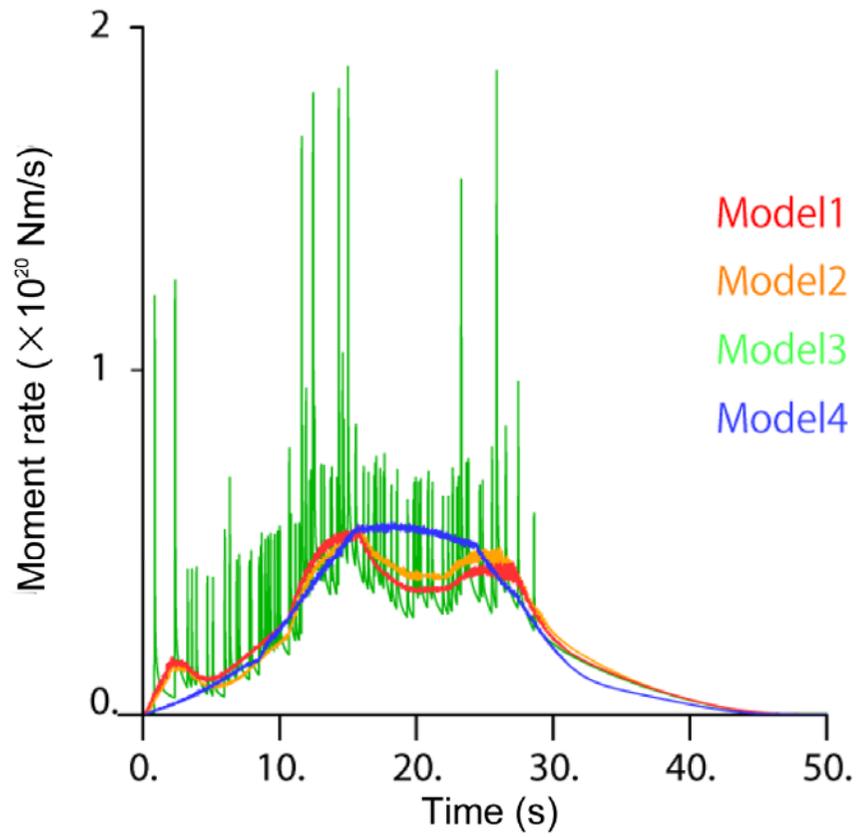
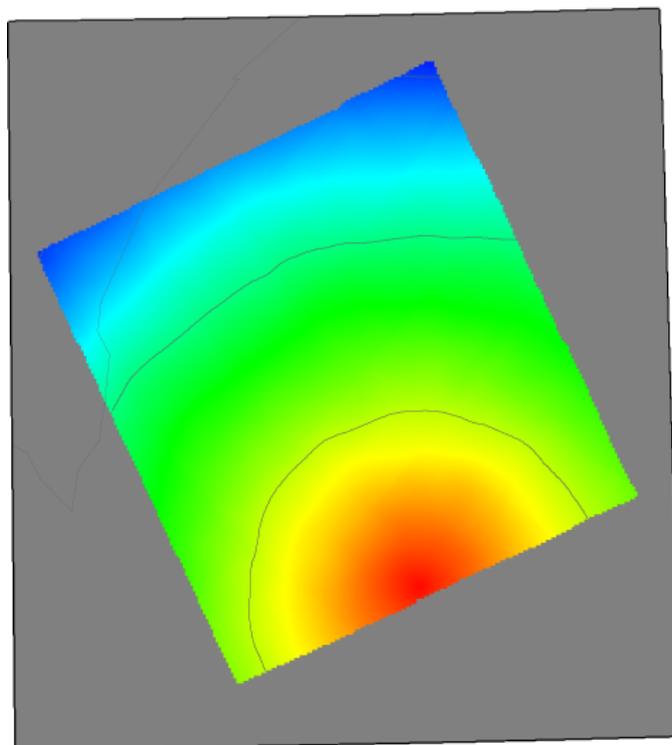
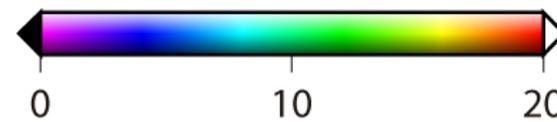
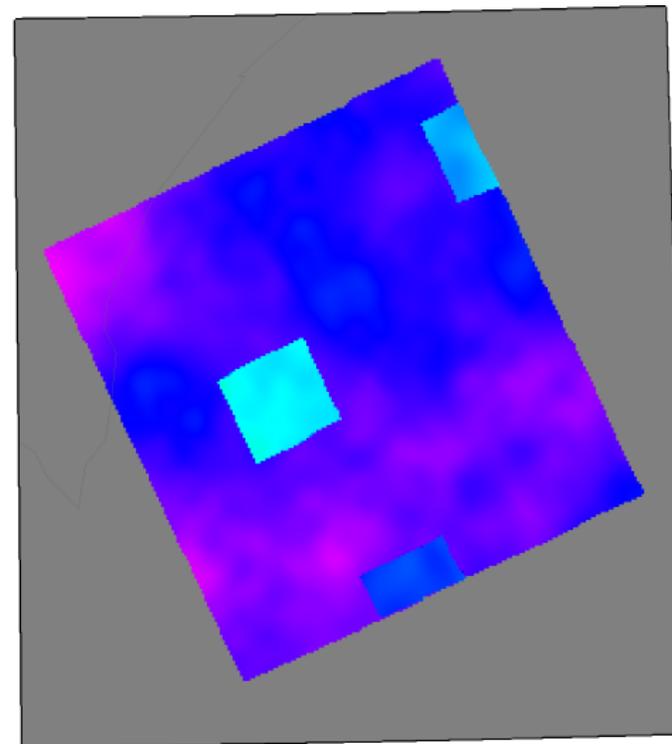


図 3.3-1 差分法の計算に用いた震源モデルの震源時間関数 (左) と震源スペクトル (右)。



Rupture time (s)



Seismic moment ( $\times 10^{16}$  Nm)

図 3.3-2 モデル 2 (k-2 モデル) の破壊開始時間 (左) と地震モーメント (右) の分布。

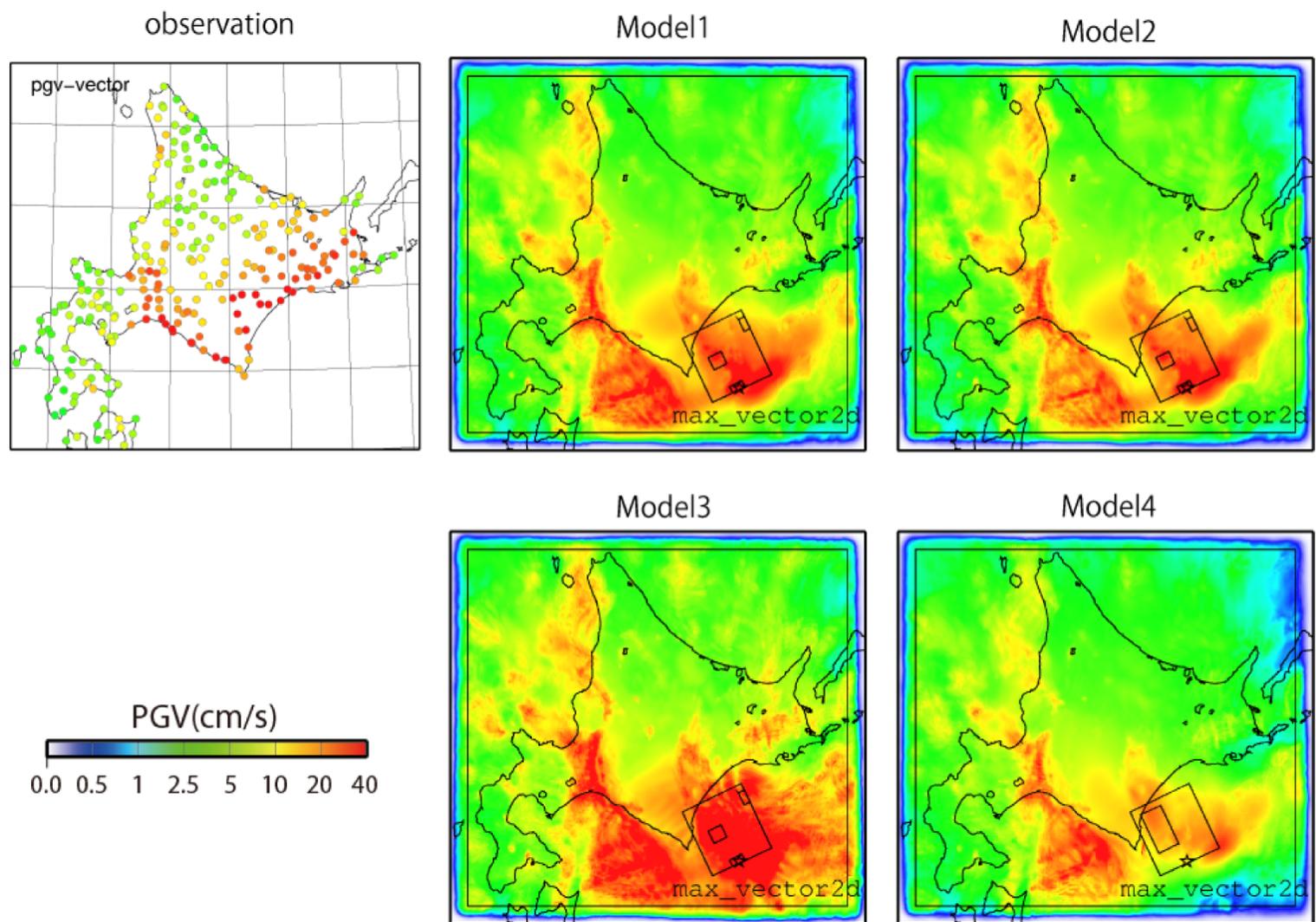


図 3.3-3 観測と 4 つのモデルによる最大速度値の空間分布。

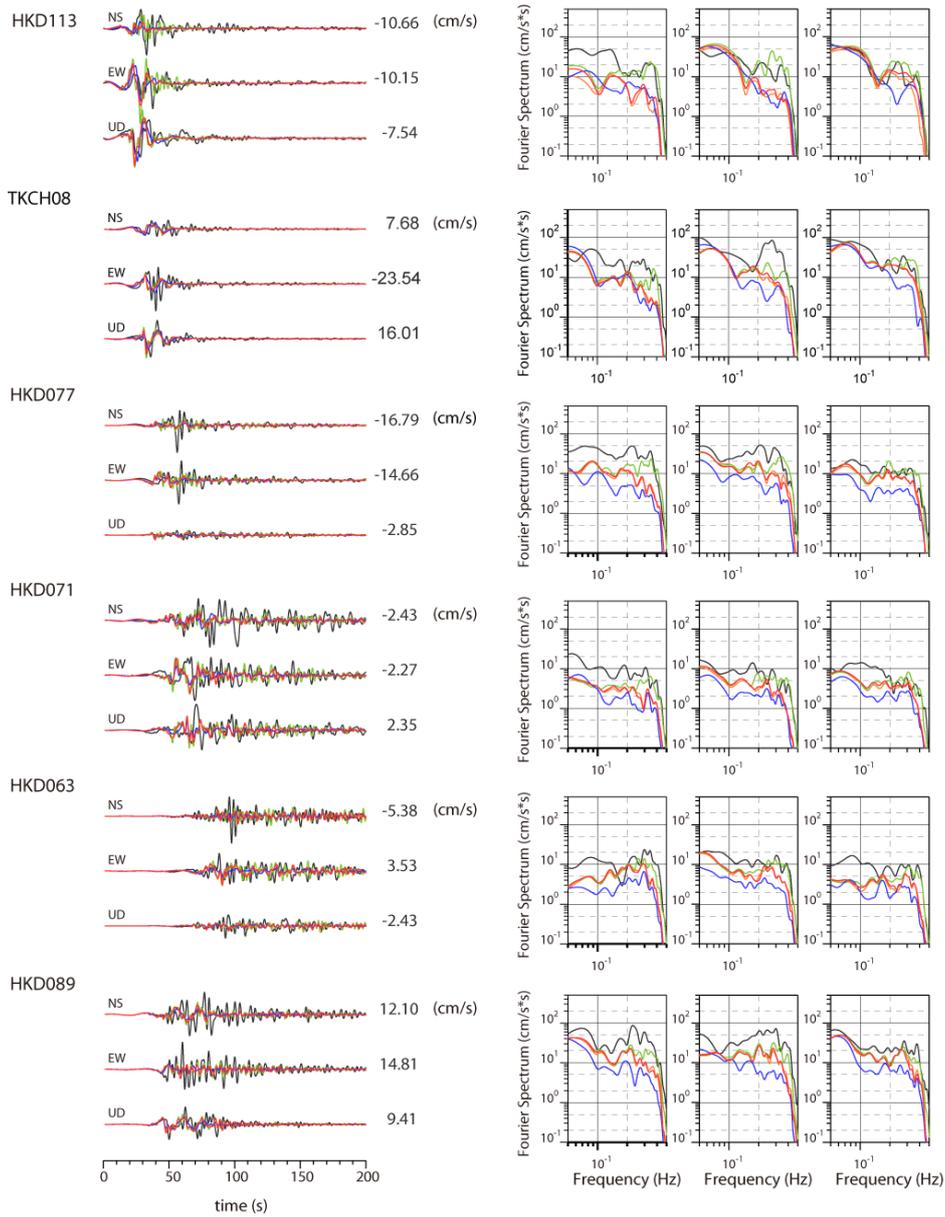
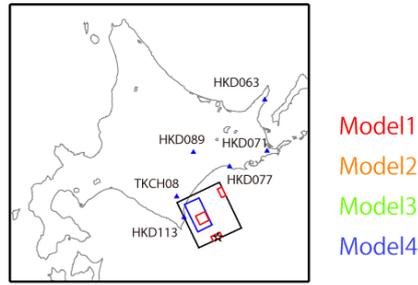


図 3.3-4a 北海道東部の観測点における観測と差分法による速度波形と速度フーリエスペクトル。0.05~0.3Hz のバンドパスフィルターをかけている。地図内には、波形を計算した観測点の位置と、計算に用いた震源モデルを示している。モデル 2、3 の震源モデルは、赤線で示したモデル 1 と同じである。

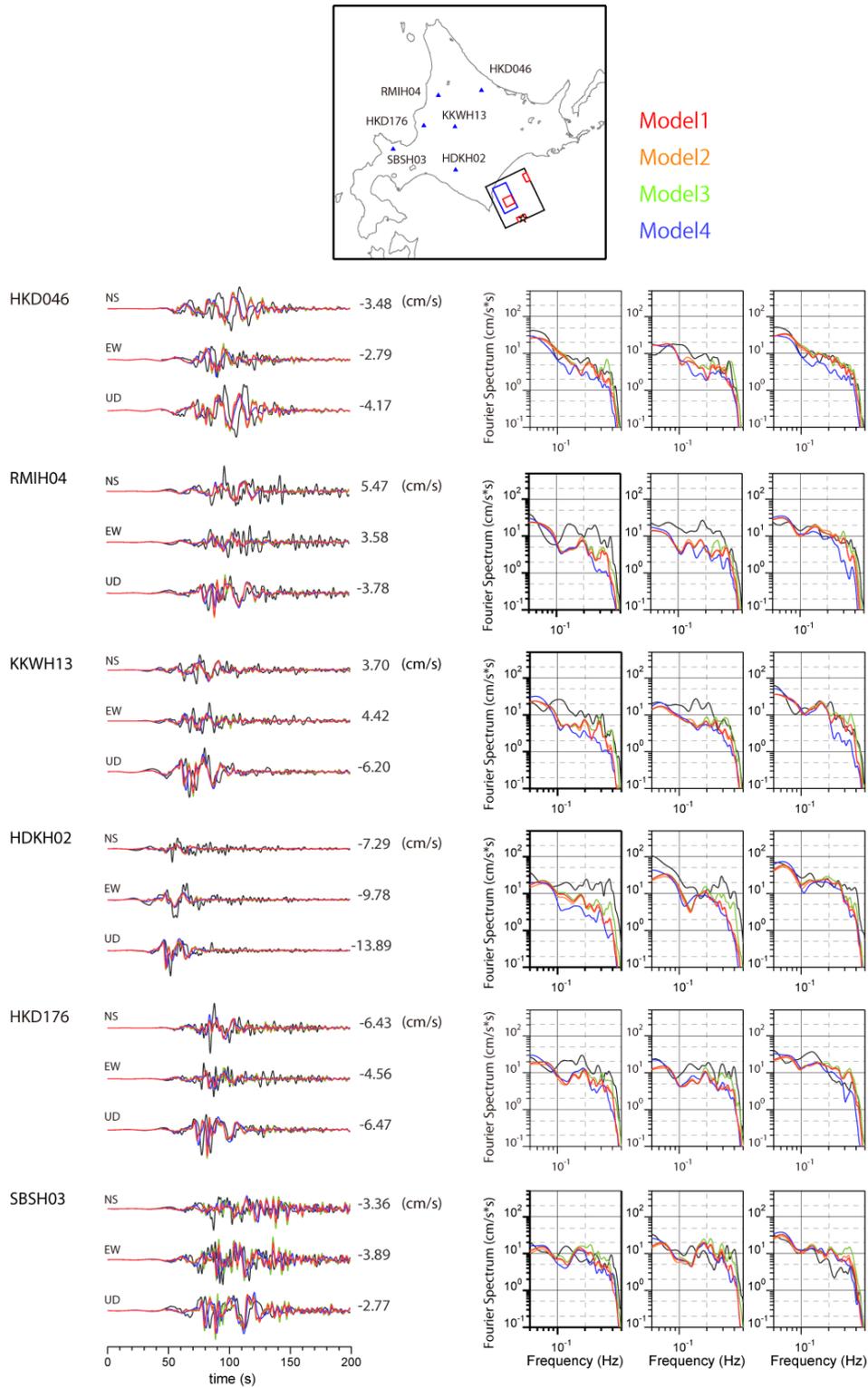


図 3.3-4b 図 3.3-4a と同じ。ただし、北海道中央部～北部の観測点についてのもの。

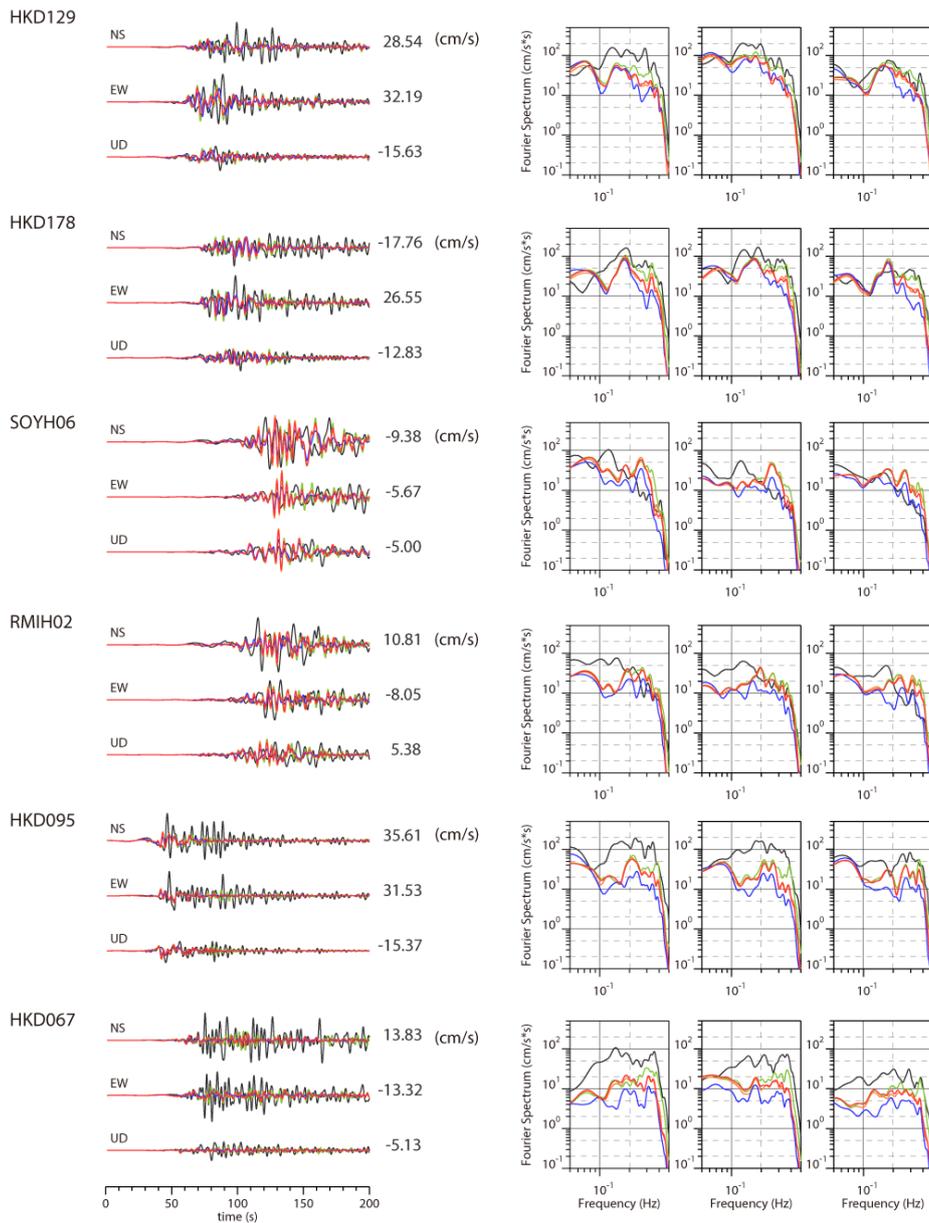
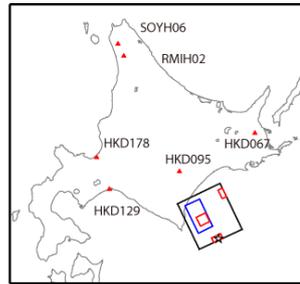


図 3.3-4c 図 3.3-4a と同じ。ただし、北海道内の平野部の観測点についてのもの。

## 2) 2004年の紀伊半島南東沖の地震の地震動シミュレーションによる検証

2004年の紀伊半島南東沖の地震は、マグニチュード7クラスの地震であることから、「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」において提示した改良案を適用する必要がない。一方で、当地震は沈み込むプレート内で発生した地震であったことから、プレート間地震である南海トラフの巨大地震ではそれよりも震源（あるいはアスペリティ位置）が浅くなることが考えられる。そこで、本検討では、既往の震源モデルから震源の深さを変えた地震動シミュレーションを実施し、震源の深さの影響に関して検証することとした。

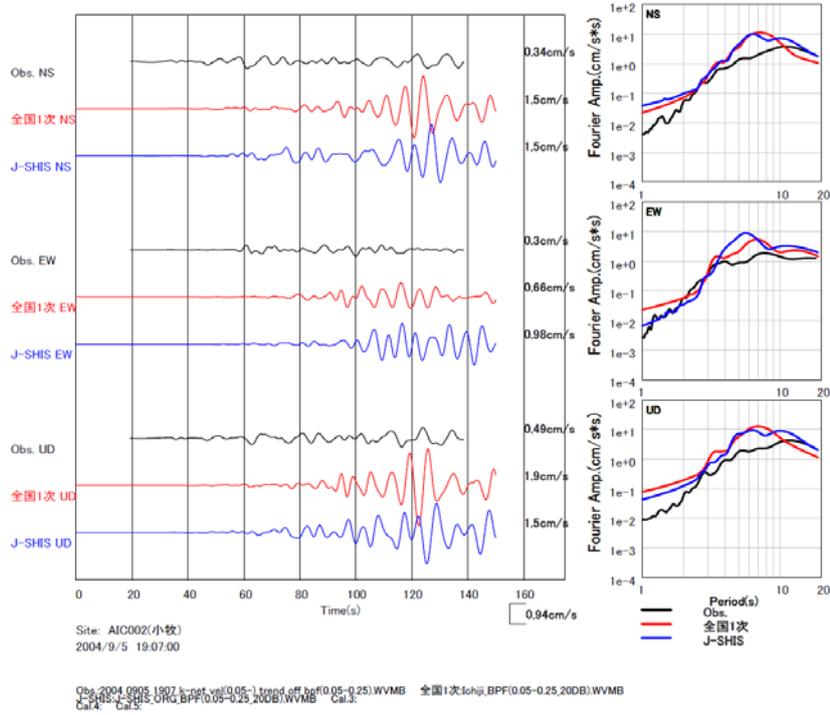
2004年の紀伊半島南東沖の地震は、9月5日23時57分に発生した本震（M7.4）と19時07分に発生した前震（M7.1）があるが、ここでは、比較的震源過程が単純で Yamada and Iwata (2005) などのシミュレーションにより前震を対象とした。地下構造モデルについては、「3.1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等」で作成したモデルに加えて、全国1次地下構造モデル（暫定版）（地震調査委員会、2012）の二つを用いた。計算は差分法により表3.3-2に示す Yamada and Iwata (2005) による震源パラメータと同じとした。ただし、震源の深さについて Yamada and Iwata (2005) では、二つのサブイベントいずれも18kmとしているところを、本検討では一つ目を15km、二つ目を10kmと浅くした。

計算結果を図3.3-5に示す。本検討の計算結果では、観測記録よりも振幅の大きな後続波が認められる。観測記録と比較を行っている地点が異なるものの、Yamada and Iwata (2005) のシミュレーション結果ではそのような傾向が見られないことから（図3.3-6）、この結果は震源の深さを変えた影響が表れている可能性が高い。ただし、Yamada and Iwata (2005) で用いられている地下構造モデルは、全国1次地下構造モデルと近いものの一一致はしていないため、地下構造モデルの違いによる影響も含まれている可能性がある。なお、3.1節作成したモデルによる結果の方が全国1次地下構造モデルによる結果よりも大きな振幅となっている傾向がある。これは、付加体部分が違うことによって生じていると考えられる。

表 3.3-2 紀伊半島南東沖の地震の計算に用いた震源パラメータ。

経度	136.63
緯度	33.09
深さ	1 番目 15 km、2 番目 10 km
走向	280°
傾斜	42°
すべり角	105°
ライズタイム	15 秒 (7.5 秒×2)
モーメント	$5.3 \times 10^{19} \text{Nm}$

### AIC002



### MIE013

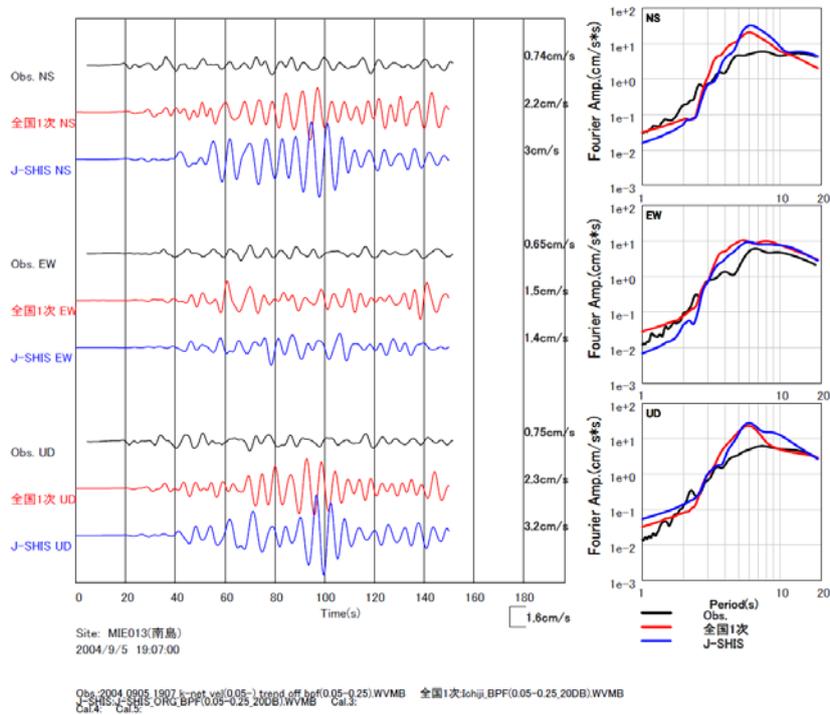
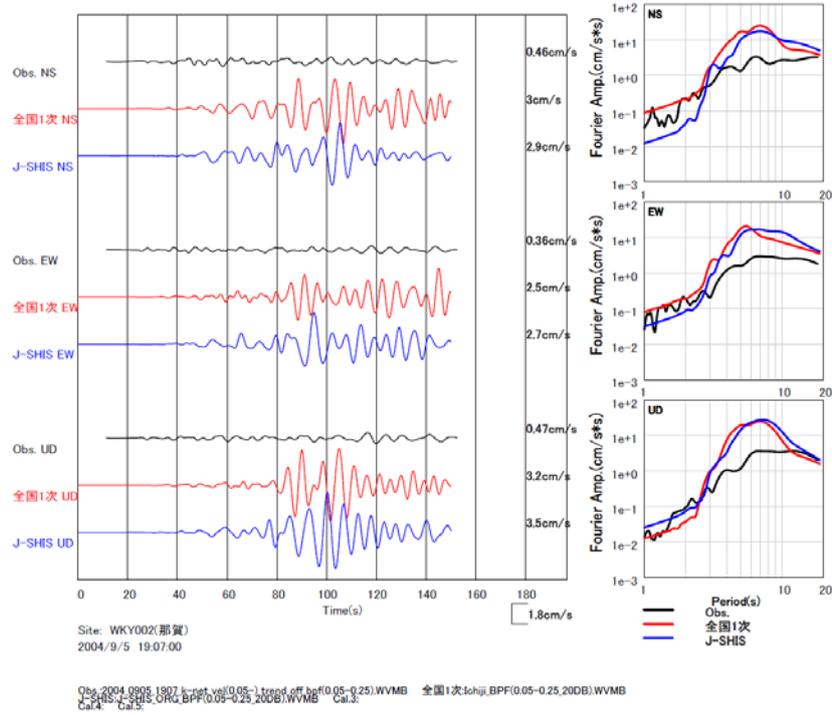


図 3.3-5 二つの地下構造モデルによる紀伊半島南東沖の地震のシミュレーション結果 (赤：全国1次モデル、青：3.1で作成したモデル) と観測記録 (黒) との比較の例。

### WKY002



### WKY012

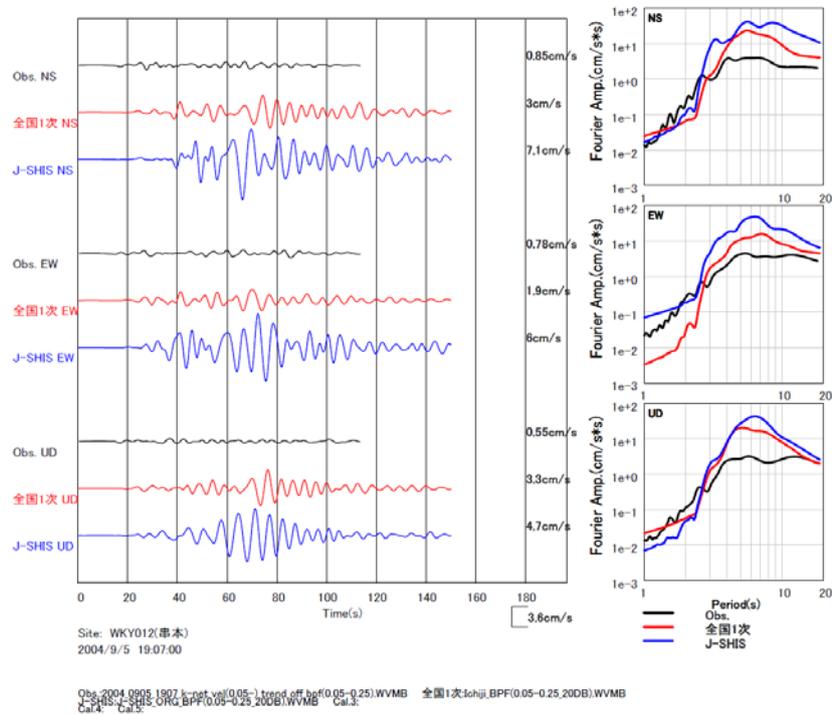


図 3.3-5 二つの地下構造モデルによる紀伊半島南東沖の地震のシミュレーション結果 (赤: 全国1次モデル、青: 3.1で作成したモデル) と観測記録 (黒) との比較の例。

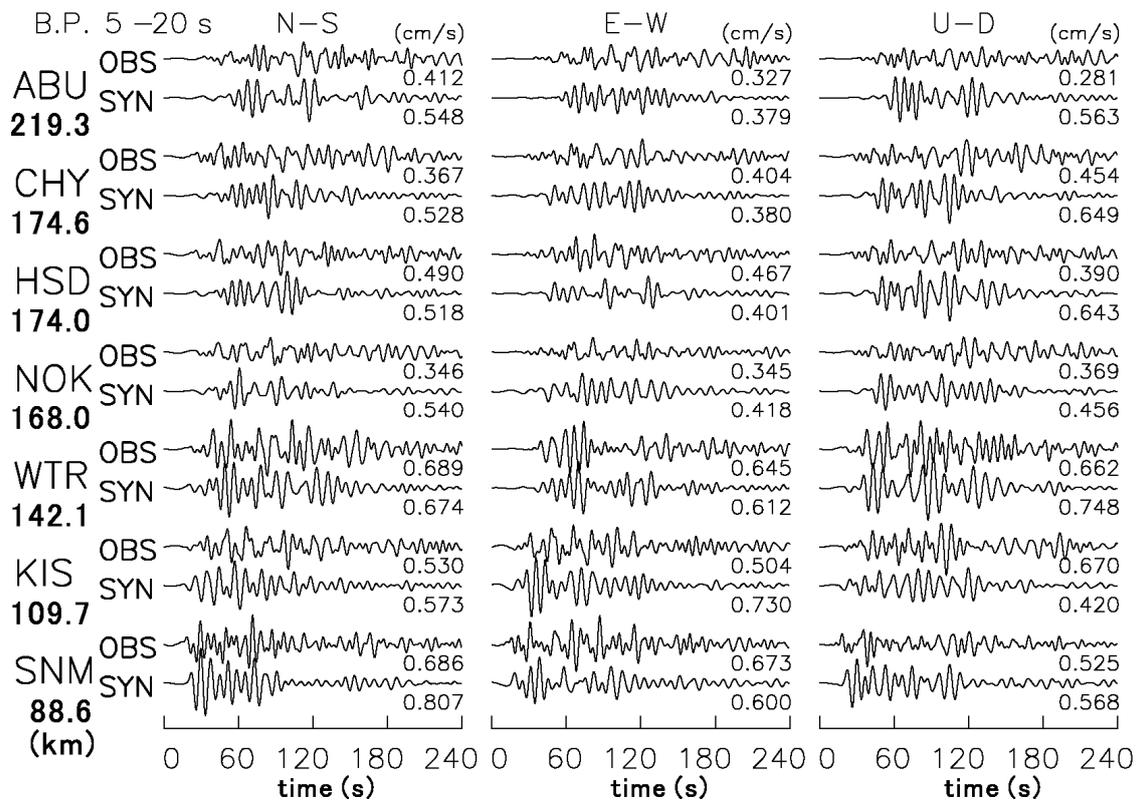


図 3.3-6 Yamad and Iwata (2005) による地震動シミュレーション結果と観測記録との比較。周期 5~20 秒が対象となっている。

(c) 結論ならびに今後の課題

海溝型巨大地震の広帯域地震動予測に対しては、観測記録の最大振幅に寄与する周期数秒の波形に対応したアスペリティを設定し、それよりも短波長の不均質性を導入することが有効であり、k-2 モデルを適用する、あるいは震源のグリッド間隔を粗くすることなどの対応が考えられる。ただし、2003 年十勝沖地震に対しては、震源インバージョン結果を用いた差分法による地震動計算により観測記録をよく再現する結果が得られており（例えば、Aoi et al., 2008）、特性化震源モデルに付与する不均質性を k-2 モデルで表すとした場合、どのようなパラメータ設定を行うことで、震源インバージョン結果を用いた計算と同等の結果が得られるのかについて検討する必要がある。このとき、「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」で述べたように

- ・ 長周期域を対象に、10～数十 km スケールのすべり量分布に関する特徴を実地震の震源インバージョン結果等に基づいて適切にモデル化する。
- ・ 上記周期域よりも短い周期域を対象に、数 km スケールの応力降下量に関する特徴（震源時間関数のパルス形状の特徴）を適切にモデル化する。上記のすべり量分布とはスケールが異なるので一対一に対応はしない。

ことにも留意すべきである。

一方、南海トラフの地震に関しては、マグニチュード 7 クラスの地震であっても、震源（アスペリティ）が浅い場合には振幅の大きな表面波が励起されることが示された。従って、長周期地震動予測のための特性化震源モデルの設定においてアスペリティの深さ方向の配置に関して十分注意を払う必要がある。

#### (d) 引用文献

- 1) Aoi, S., R. Honda, N. Morikawa, H. Sekiguchi, H. Suzuki, Y. Hayakawa, T. Kunugi, and H. Fujiwara, Three-dimensional finite difference simulation of long-period ground motions for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 113, B07302, doi:10.1029/2007JB005452, 2008.
- 2) 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.
- 3) 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－南海地震（昭和型）－, 2012.
- 4) Morikawa, N., S. Aoi, R. Honda, S. Senna, Y. Hayakawa and H. Fujiwara, Application of the “Recipe for strong ground motion evaluation” to the 2003 Tokachi-Oki, Japan, earthquake, ESG2006, Paper No. 48, 2006.
- 5) Murotani, S., H. Miyake and K. Koketsu, Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 987-991, 2008.
- 6) Yamada, N. and T. Iwata, Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the M<sub>J</sub>7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquake, *Earth Planets Space*, 57, 197-202, 2005.

### 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、 $\mu$  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。

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

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

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

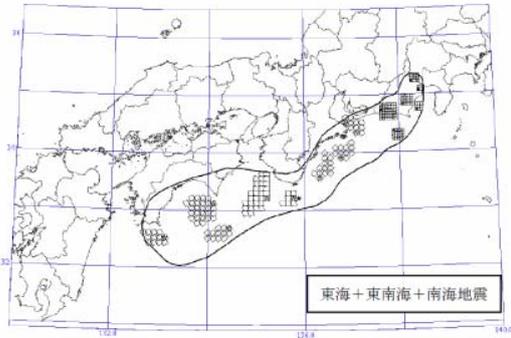
アスペリティの応力降下量（ $\Delta\sigma_a$ ）は、 $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma_c (S/S_a)$  の関係式から求め、各アスペリティで等しいとした。背景領域の実効応力（ $\sigma_b$ ）は、レシピによる複数アスペリティの

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。

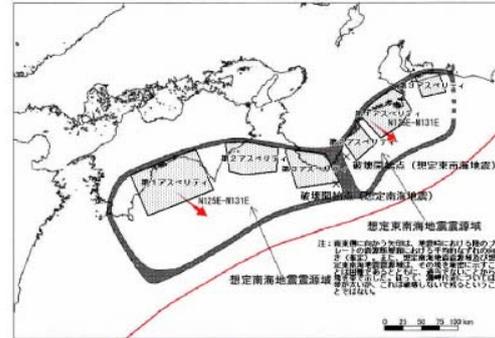
連動型の震源モデルについては、カスケード型とスケーリング型の二通りでモデル化を行った。スケーリング型では、アスペリティ面積は単独型の場合と等しいとし、すべり量、地震モーメント、応力降下量を変化させた。また、2011年東北地方太平洋沖地震を参考として、海溝沿い（トラフ沿い）に大すべり領域を設定した。ここでは、3地震の想定断層面とトラフとの間に、幅 25km、長さ 100km の大すべり領域をアスペリティとして設定した。算出した震源パラメータを表 3.4-1 に示す。アスペリティの配置や破壊開始点の位置は、既往の研究等を参考に設定する。不確実性を考慮して設定した震源パラメータは、以下の通りである。

- 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）

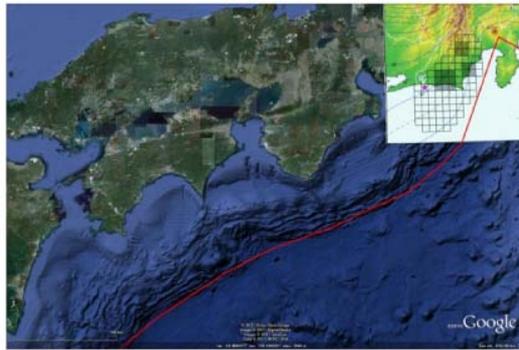
このうち、トラフ沿いのすべりの大きい領域の震源時間関数を適用するのは、2011年東北地方太平洋沖地震において海溝寄りの領域においてきわめて大きなすべりの領域が認められている一方で、必ずしも強震動には寄与していない可能性があるということも考慮したものである。また、本検討においては、 $Q$  値の参照周期を 5 秒としているが、計算手法における  $Q$  値の組み込み方に関する課題が残されていることを考慮して、 $Q$  値による減衰が無い（すなわち  $Q$  値を無限大とした）モデルも計算することにより、予測結果の取り得る最大値を見るために実施した。また、「3.2 巨大地震の長周期・広帯域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。



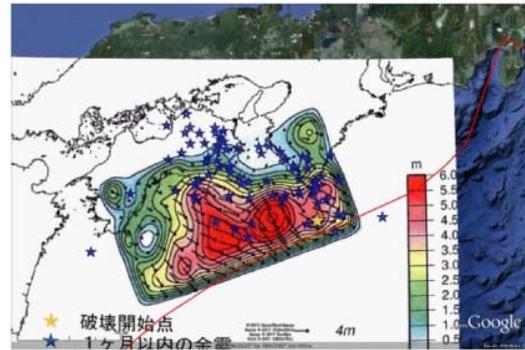
中央防災会議 (2003)



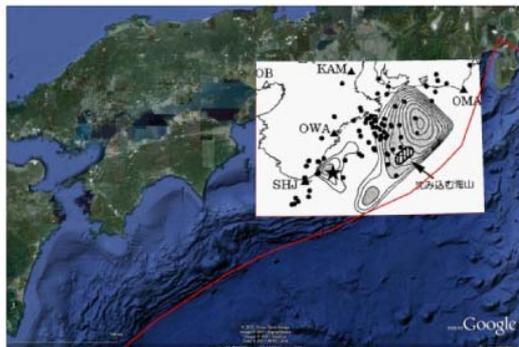
地震調査委員会 (2003)



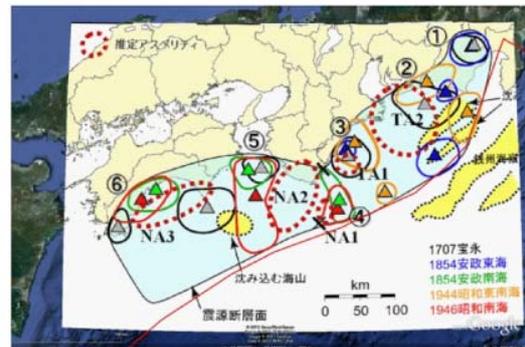
地震調査委員会 (2009)



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。

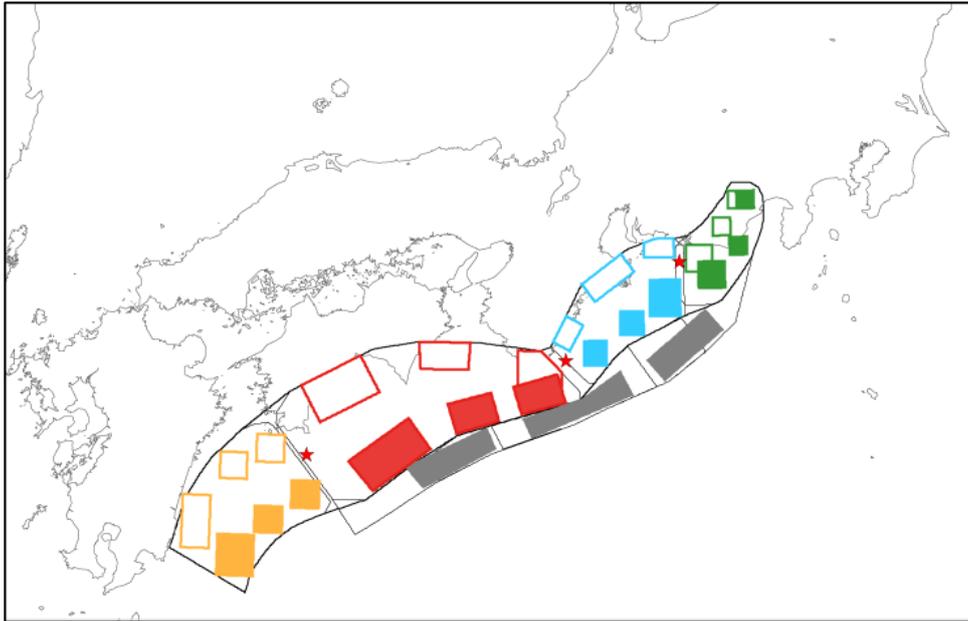


図 3.4-2 本検討で設定した震源モデル。南海（赤：ANNKI）、東南海（青：ATNKI）、想定東海（緑：ATOKI）、日向灘（橙：AHGND）、トラフ沿い（灰：ATRGH）のアスペリティ分布。想定東海、東南海、南海、日向灘については、深いアスペリティ（白抜き）と浅いアスペリティを設定している。トラフ沿いは、(a) 四国沖、(b) 紀伊半島沖、(c) 遠州灘沖の 3 か所にすべりの大きな領域を設定している。想定東海、東南海、南海が同時に破壊したケースが 3 連動（ANNI3）、3 連動にトラフ沿いの領域を組み合わせたケース（ANNI4）と、3 連動に日向灘を組み合わせたケース（ANNI5）が 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、 $\Delta t$  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 <sup>2</sup> )	35800	14500	9400	19000	12500	50300	51200
	地震モーメント(Nm)	$8.33 \times 10^{21}$	$2.14 \times 10^{21}$	$1.13 \times 10^{21}$	$3.23 \times 10^{21}$	$1.72 \times 10^{21}$	$1.05 \times 10^{22}$	$1.43 \times 10^{22}$
	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 <sup>2</sup> )	3580	—	—	—	—	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	$2.15 \times 10^{21}$	—	—	—	—	$2.15 \times 10^{21}$	$2.87 \times 10^{21}$
	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 <sup>2</sup> )	1790	—	—	—	—	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	$7.60 \times 10^{20}$	—	—	—	—	$7.60 \times 10^{20}$	$1.02 \times 10^{21}$
	平均すべり量(m)	10.5	—	—	—	—	10.5	14.0
東南海1	面積(km <sup>2</sup> )	—	1450	—	—	—	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	—	$5.54 \times 10^{20}$	—	—	—	$5.54 \times 10^{20}$	$7.40 \times 10^{20}$
	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 <sup>2</sup> )	—	725	—	—	—	725	725
	地震モーメント(Nm)	—	$1.96 \times 10^{20}$	—	—	—	$1.96 \times 10^{20}$	$2.62 \times 10^{20}$
	平均すべり量(m)	—	6.7	—	—	—	6.7	8.9
想定東海	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	940	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	$2.89 \times 10^{20}$	—	—	—	—
	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 <sup>2</sup> )	—	—	470	—	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	$1.02 \times 10^{20}$	—	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	5.4	—	—	—	—
日向灘1	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	—	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	$8.31 \times 10^{20}$	—	—	—
	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 <sup>2</sup> )	—	—	—	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	$2.94 \times 10^{20}$	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	—	—	—
トラフ沿い	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	—	—	2500	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	$7.57 \times 10^{20}$	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	7.50	—	—
	応力降下量(MPa)	—	—	—	—	15.00	—	—
背景領域	面積(km <sup>2</sup> )	28640	11600	7520	15200	10000	40240	41140
	地震モーメント(Nm)	$4.66 \times 10^{21}$	$1.19 \times 10^{21}$	$6.33 \times 10^{20}$	$1.81 \times 10^{21}$	$9.64 \times 10^{20}$	$5.85 \times 10^{21}$	$8.10 \times 10^{21}$
	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 <sup>2</sup> )	23900	23600	59700	60300	78700	80482	72200	72800
	地震モーメント(Nm)	$3.27 \times 10^{21}$	$4.46 \times 10^{21}$	$1.16 \times 10^{22}$	$1.82 \times 10^{22}$	$1.48 \times 10^{22}$	$2.81 \times 10^{22}$	$1.33 \times 10^{22}$	$2.42 \times 10^{22}$
	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 <sup>2</sup> )	—	—	3580	3580	3580	3580	3580	3580
	地震モーメント(Nm)	—	—	$2.15 \times 10^{21}$	$3.34 \times 10^{21}$	$2.15 \times 10^{21}$	$3.98 \times 10^{21}$	$2.15 \times 10^{21}$	$3.57 \times 10^{21}$
	平均すべり量(m)	—	—	14.9	23.1	14.9	27.5	14.9	24.6
南海2,3	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	1790	1790	1790	1790	1790	1790
	地震モーメント(Nm)	—	—	$7.60 \times 10^{20}$	$1.18 \times 10^{21}$	$7.60 \times 10^{20}$	$1.41 \times 10^{21}$	$7.60 \times 10^{20}$	$1.26 \times 10^{21}$
	平均すべり量(m)	—	—	10.5	16.3	10.5	19.5	10.5	17.4
東南海1	面積(km <sup>2</sup> )	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
	地震モーメント(Nm)	$5.54 \times 10^{20}$	$7.66 \times 10^{20}$	$5.54 \times 10^{20}$	$8.61 \times 10^{20}$	$5.54 \times 10^{20}$	$1.03 \times 10^{21}$	$5.54 \times 10^{20}$	$9.19 \times 10^{20}$
	平均すべり量(m)	9.5	13.1	9.5	14.7	9.5	17.5	9.5	15.7
東南海2,3	面積(km <sup>2</sup> )	725	725	725	725	725	725	725	725
	地震モーメント(Nm)	$1.96 \times 10^{20}$	$2.71 \times 10^{20}$	$1.96 \times 10^{20}$	$3.05 \times 10^{20}$	$1.96 \times 10^{20}$	$3.63 \times 10^{20}$	$1.96 \times 10^{20}$	$3.25 \times 10^{20}$
	平均すべり量(m)	6.7	9.2	6.7	10.4	6.7	12.4	6.7	11.1
想定東海	面積(km <sup>2</sup> )	940	940	940	940	940	940	940	940
	地震モーメント(Nm)	$2.89 \times 10^{20}$	$4.00 \times 10^{20}$	$2.89 \times 10^{20}$	$4.50 \times 10^{20}$	$2.89 \times 10^{20}$	$5.36 \times 10^{20}$	$2.89 \times 10^{20}$	$4.80 \times 10^{20}$
	平均すべり量(m)	7.6	10.5	7.6	11.8	7.6	14.1	7.6	12.6
想定東海2,3	面積(km <sup>2</sup> )	470	470	470	470	470	470	470	470
	地震モーメント(Nm)	$1.02 \times 10^{20}$	$1.41 \times 10^{20}$	$1.02 \times 10^{20}$	$1.59 \times 10^{20}$	$1.02 \times 10^{20}$	$1.89 \times 10^{20}$	$1.02 \times 10^{20}$	$1.70 \times 10^{20}$
	平均すべり量(m)	5.4	7.4	5.4	8.4	5.4	10.0	5.4	8.9
日向灘1	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	—	1900	1900	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	$8.31 \times 10^{20}$	$1.54 \times 10^{21}$	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	10.8	20.0	—	—	—
日向灘2,3	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	—	950	950	—	—	—
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	$2.94 \times 10^{20}$	$5.45 \times 10^{20}$	—	—	—
	平均すべり量(m)	—	—	—	7.7	14.2	—	—	—
トラフ沿い	面積(km <sup>2</sup> )	—	—	—	—	—	—	2500	2500
	地震モーメント(Nm)	—	—	—	—	—	—	$7.57 \times 10^{20}$	$2.08 \times 10^{21}$
	平均すべり量(m)	—	—	—	—	—	—	7.50	20.60
背景領域	面積(km <sup>2</sup> )	19120	18820	47760	48360	62960	64742	57760	58360
	地震モーメント(Nm)	$1.83 \times 10^{21}$	$2.48 \times 10^{21}$	$6.48 \times 10^{21}$	$1.03 \times 10^{22}$	$8.29 \times 10^{21}$	$1.60 \times 10^{22}$	$7.45 \times 10^{21}$	$1.36 \times 10^{22}$
	平均すべり量(m)	—	3.3	—	5.3	—	6.1	—	5.8
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

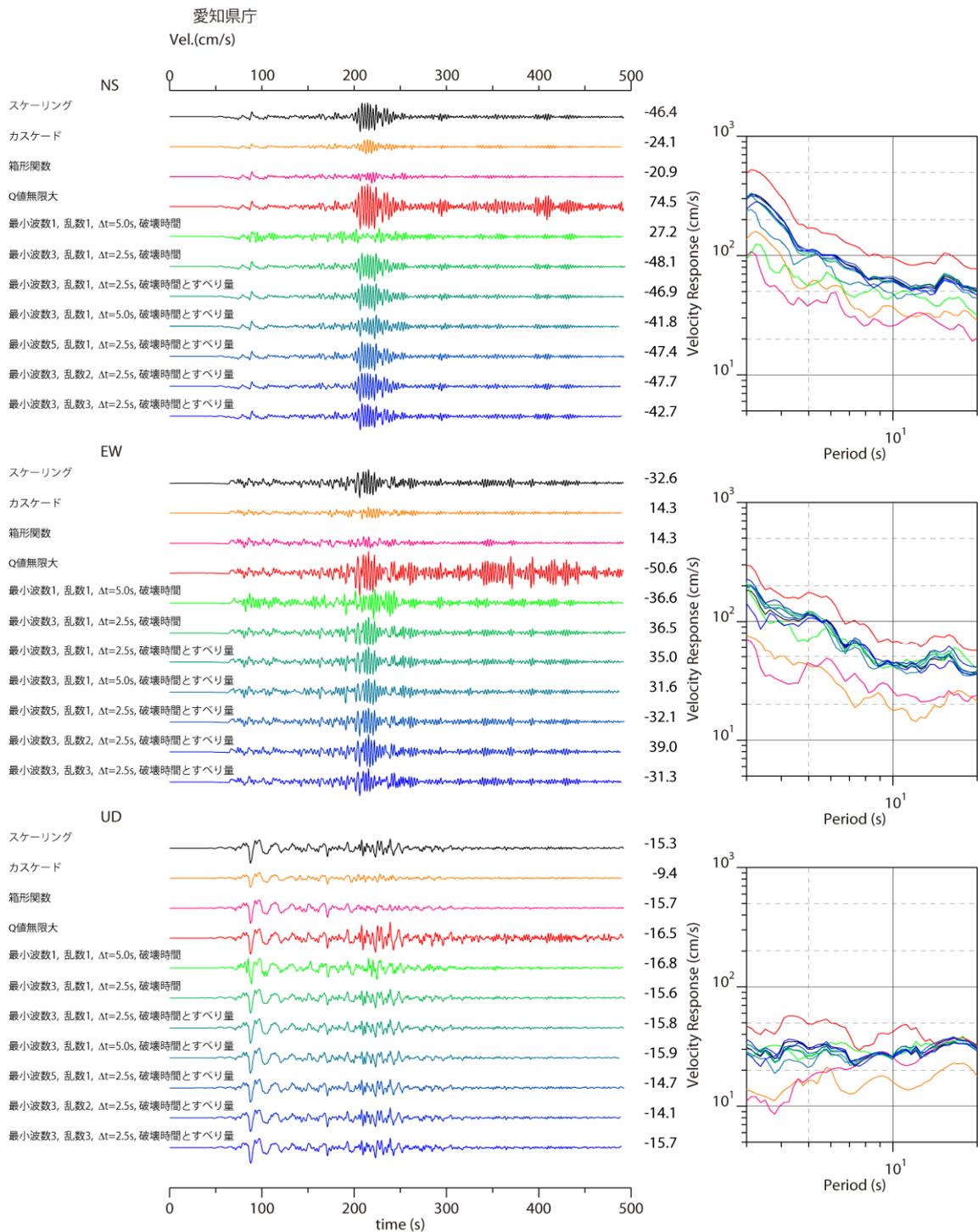


図 3.4-3a 同じアスペリティ配置、破壊開始点を持つモデル (ANNI4c-s-c) について、すべり量 (スケーリング、カスケード)、トラフ沿いのすべりの大きな領域の震源時間関数、Q 値、不均質性を変化させた場合の速度波形と相対速度応答スペクトルの比較。愛知県庁の例。

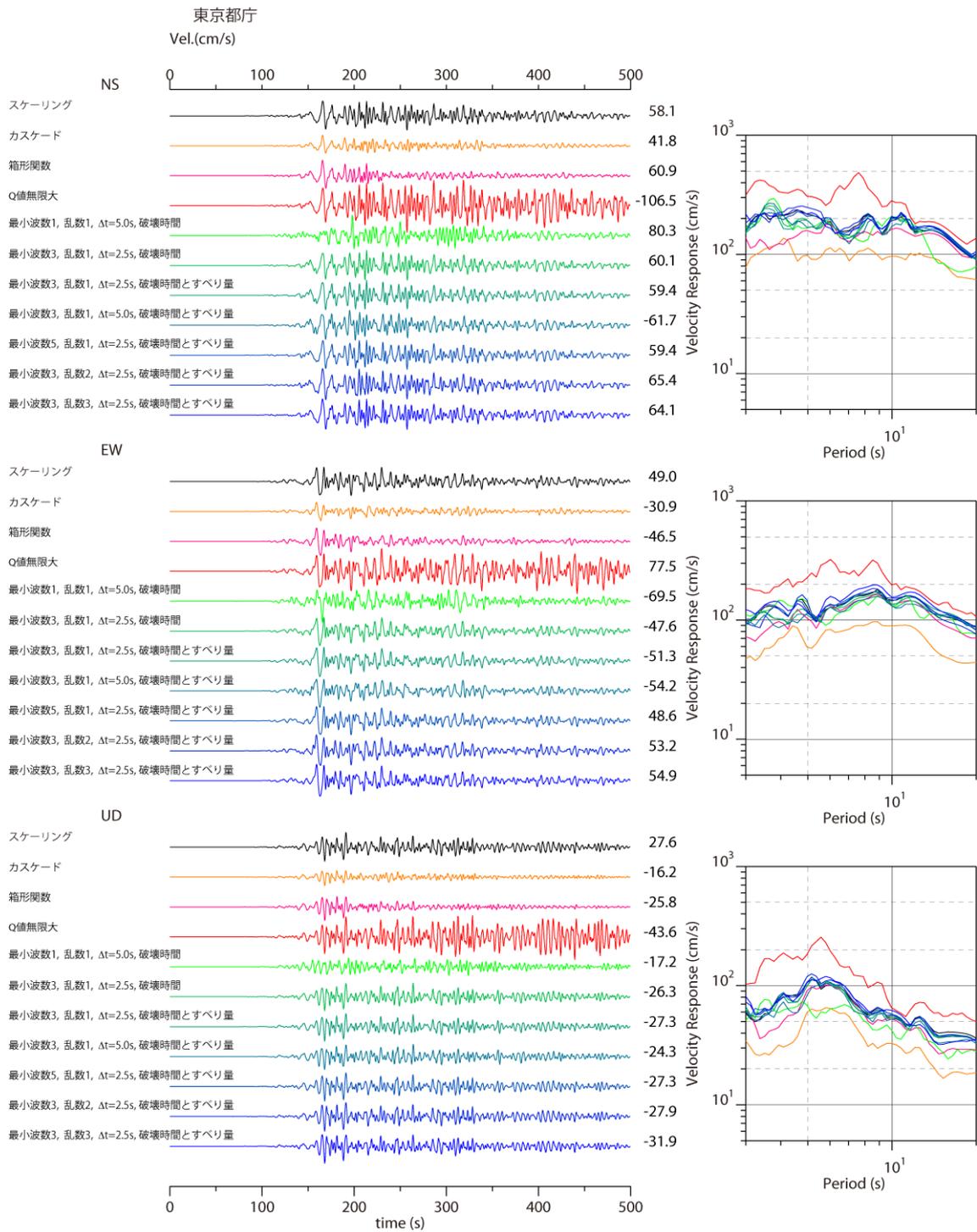


図 3.4-3b 図 3.4-3a と同じ。ただし、東京都庁についての図。

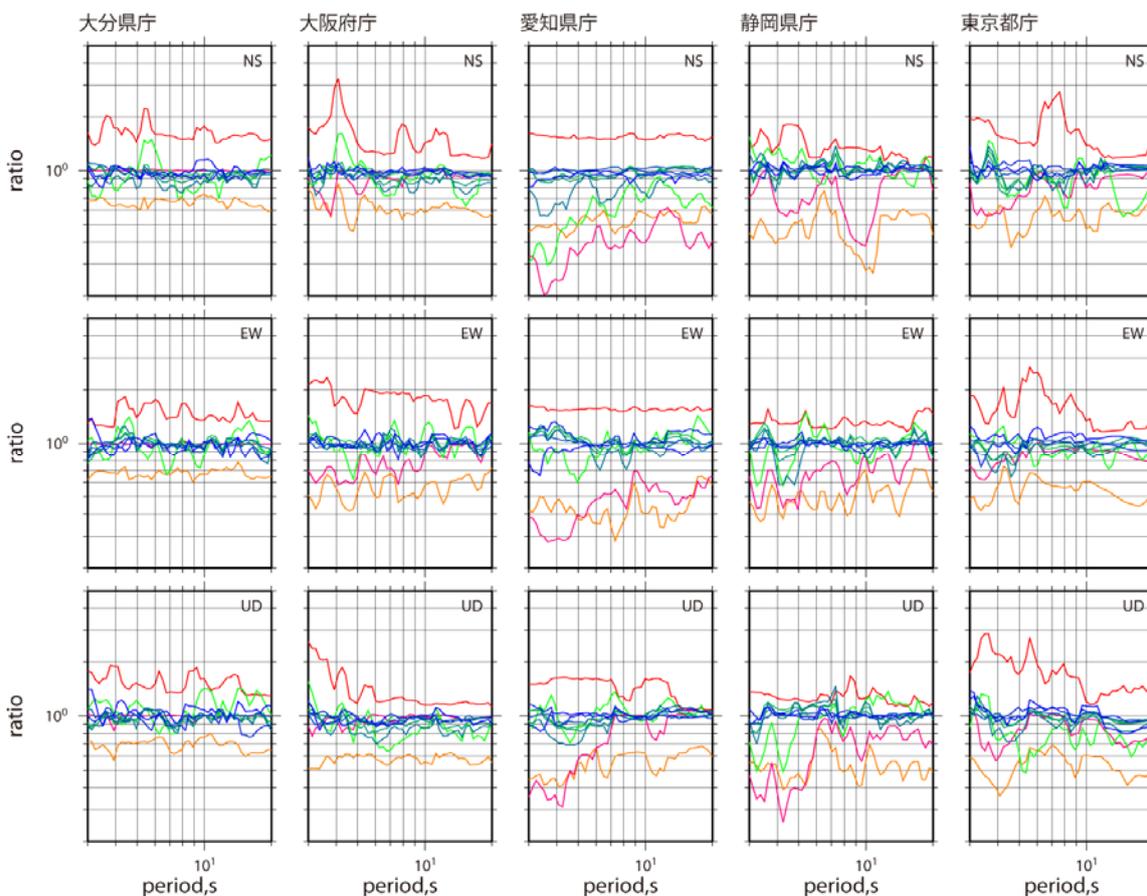


図 3.4-4 図 3.4-3 に示したケースについての応答スペクトル比。ANNI4c-s-c（スケールリングモデル）を基準とした比となっている。色は、図 3.3-3a, b と対応している。

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)

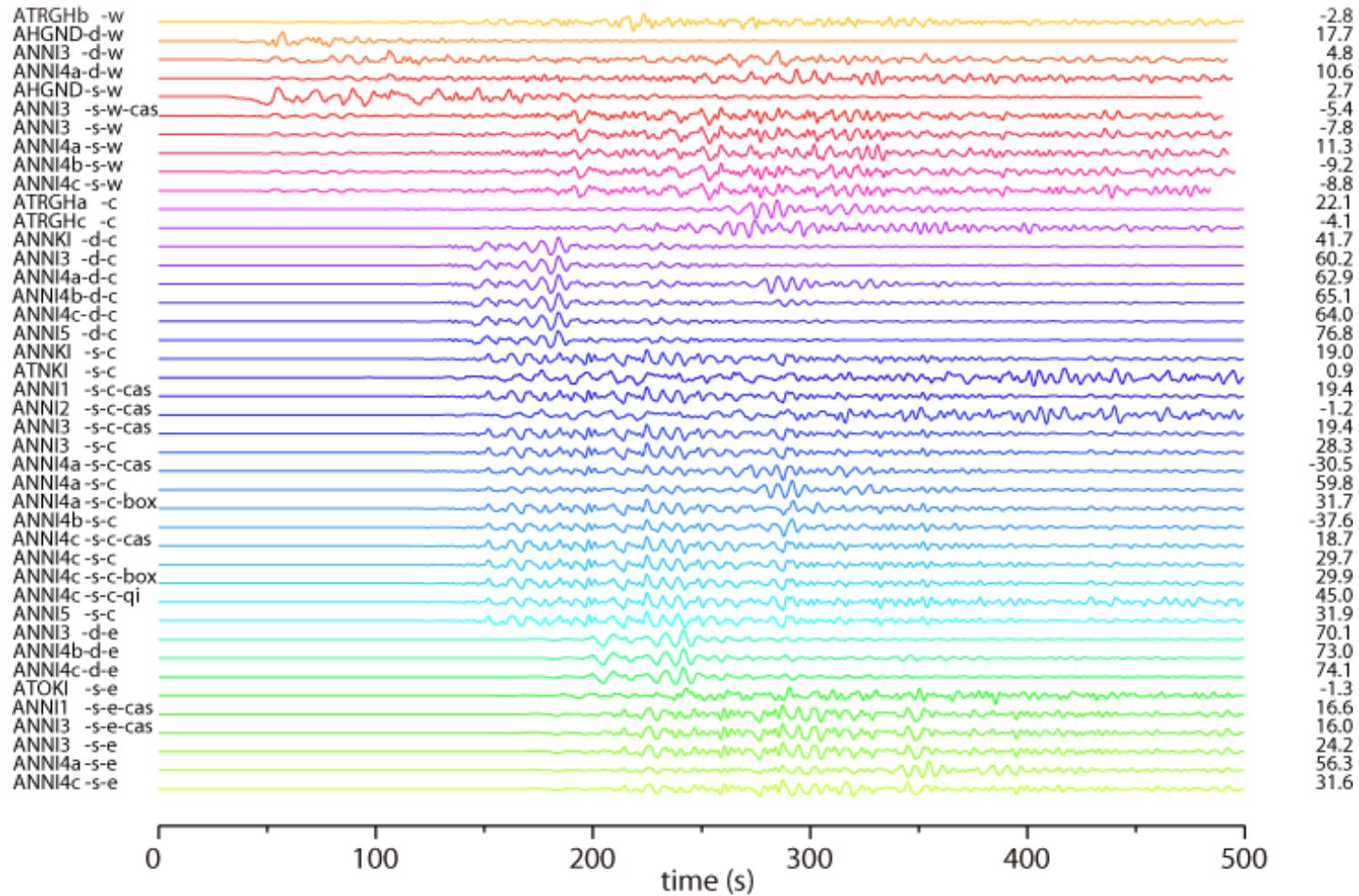


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大分県庁 (E-W)

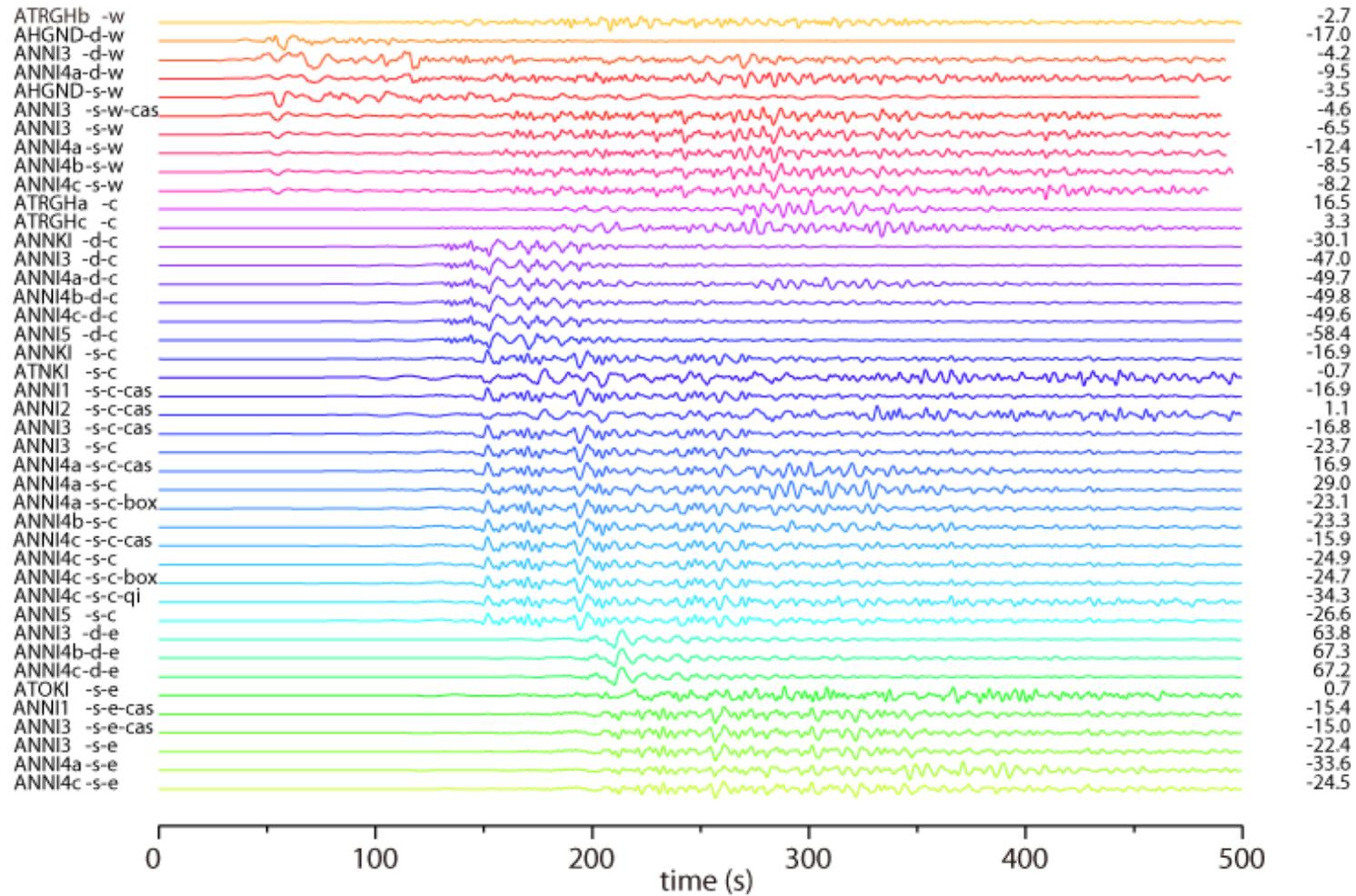


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大分県庁 (U-D)

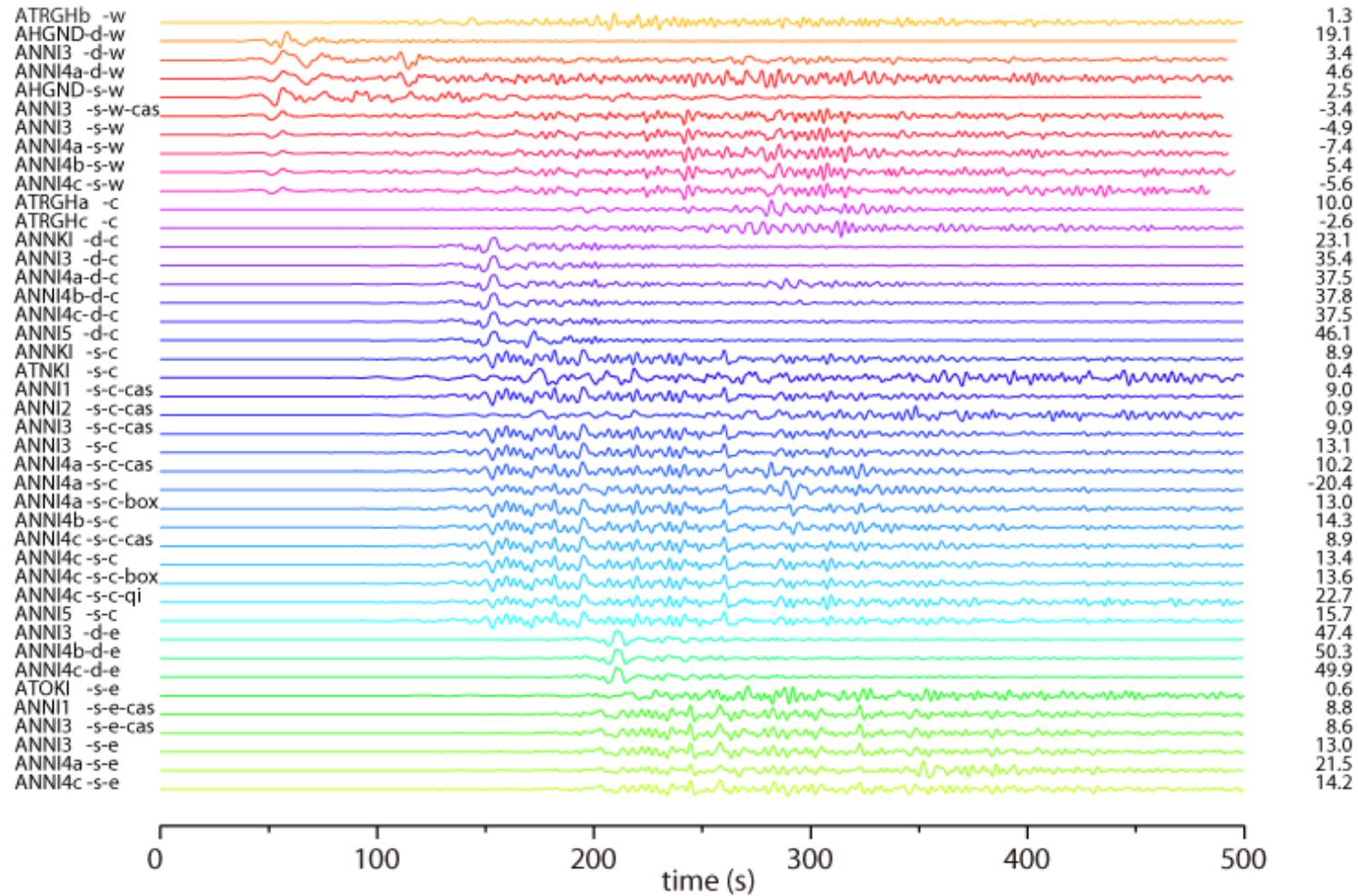


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (N-S)

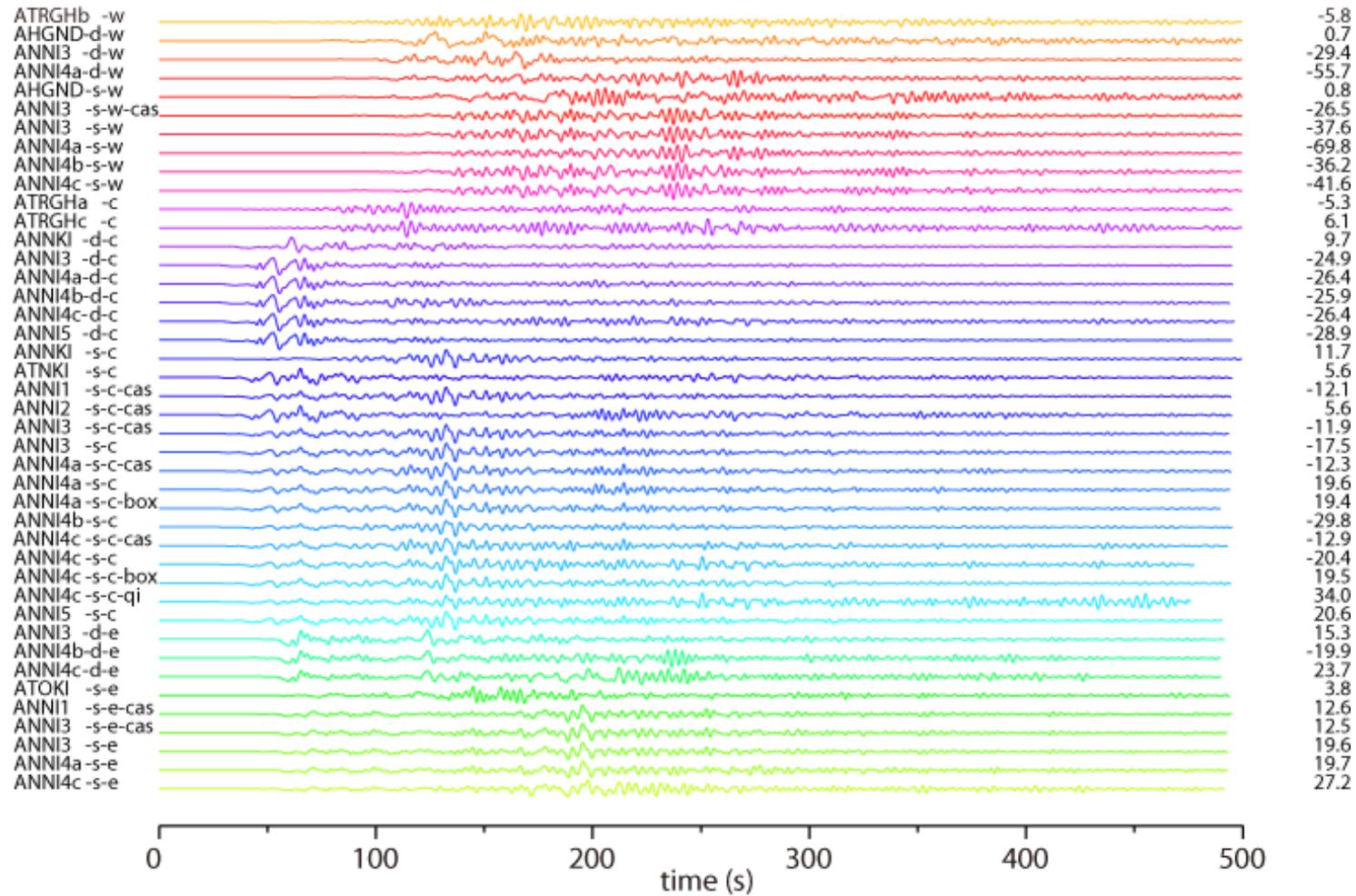


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (E-W)

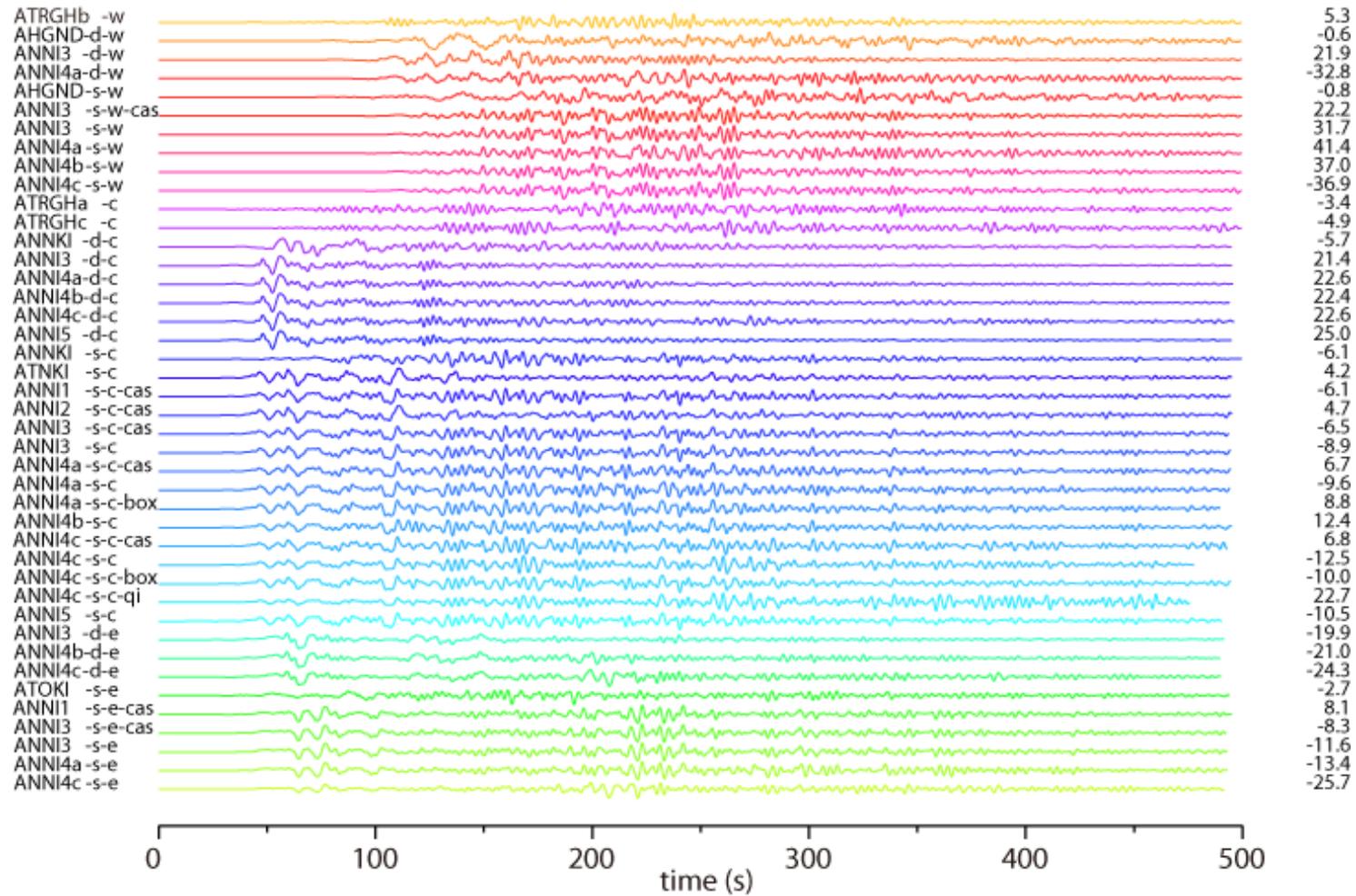


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

大阪府庁 (U-D)

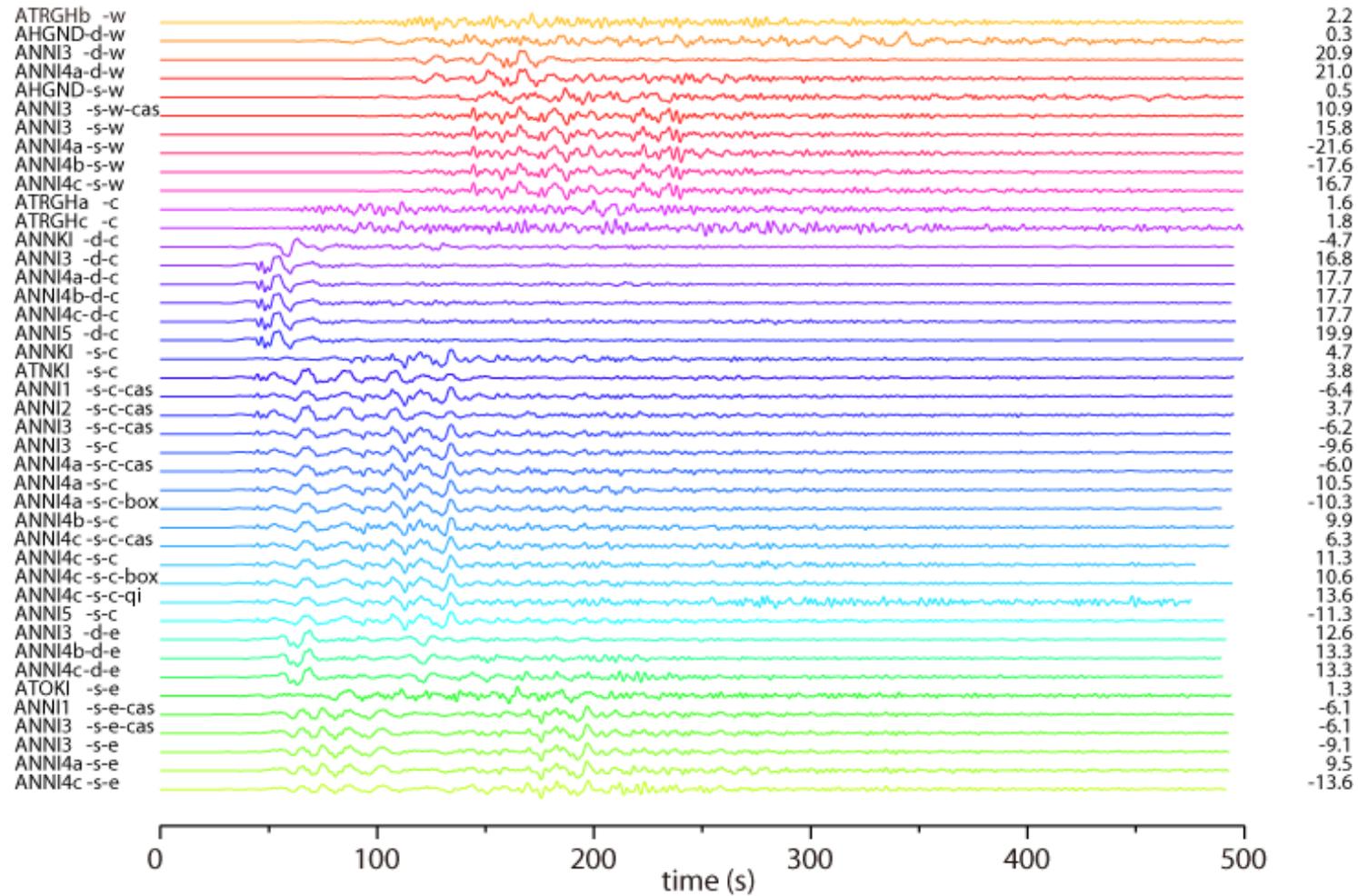


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (N-S)

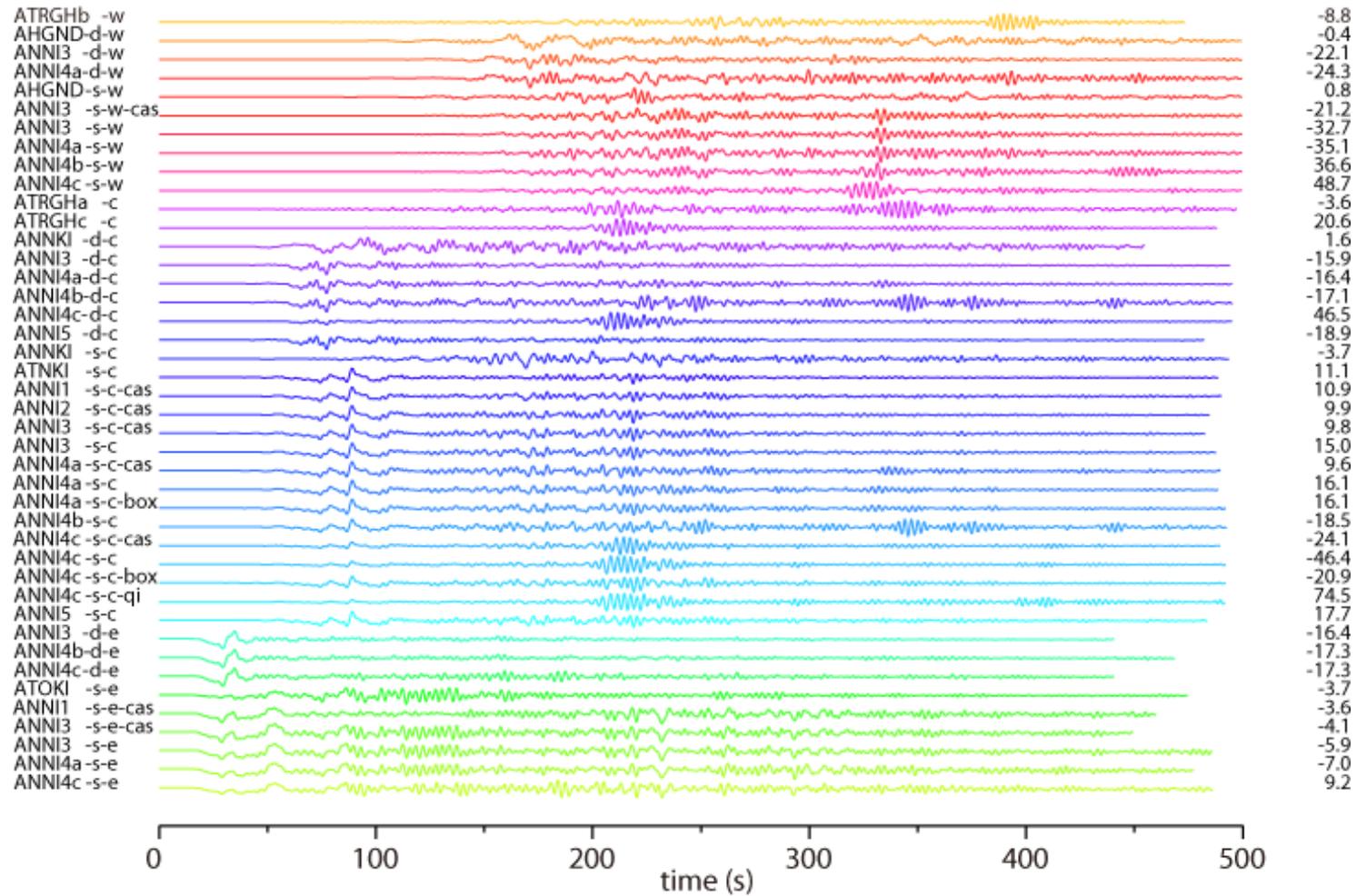


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (E-W)

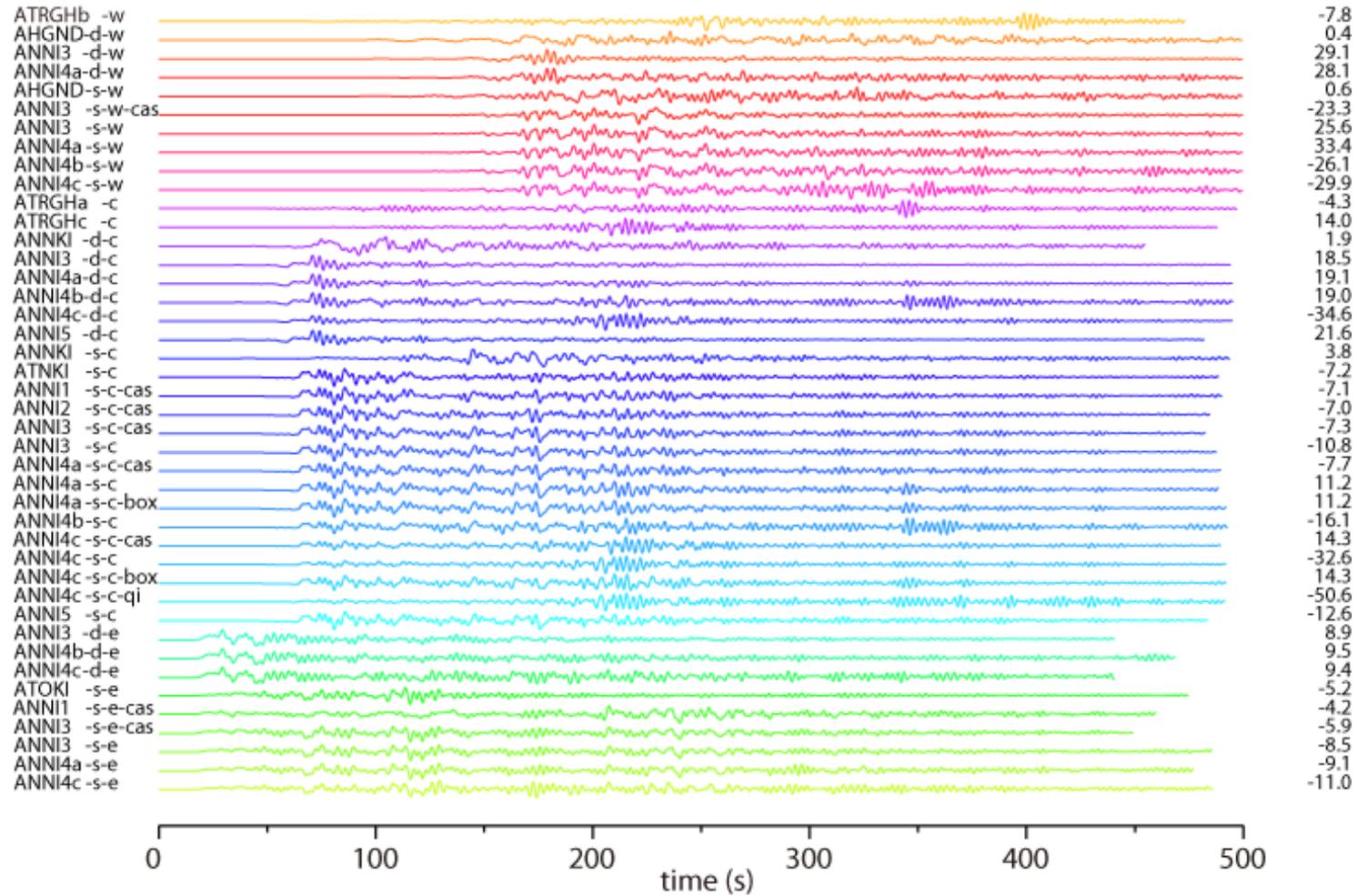


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

愛知県庁 (U-D)

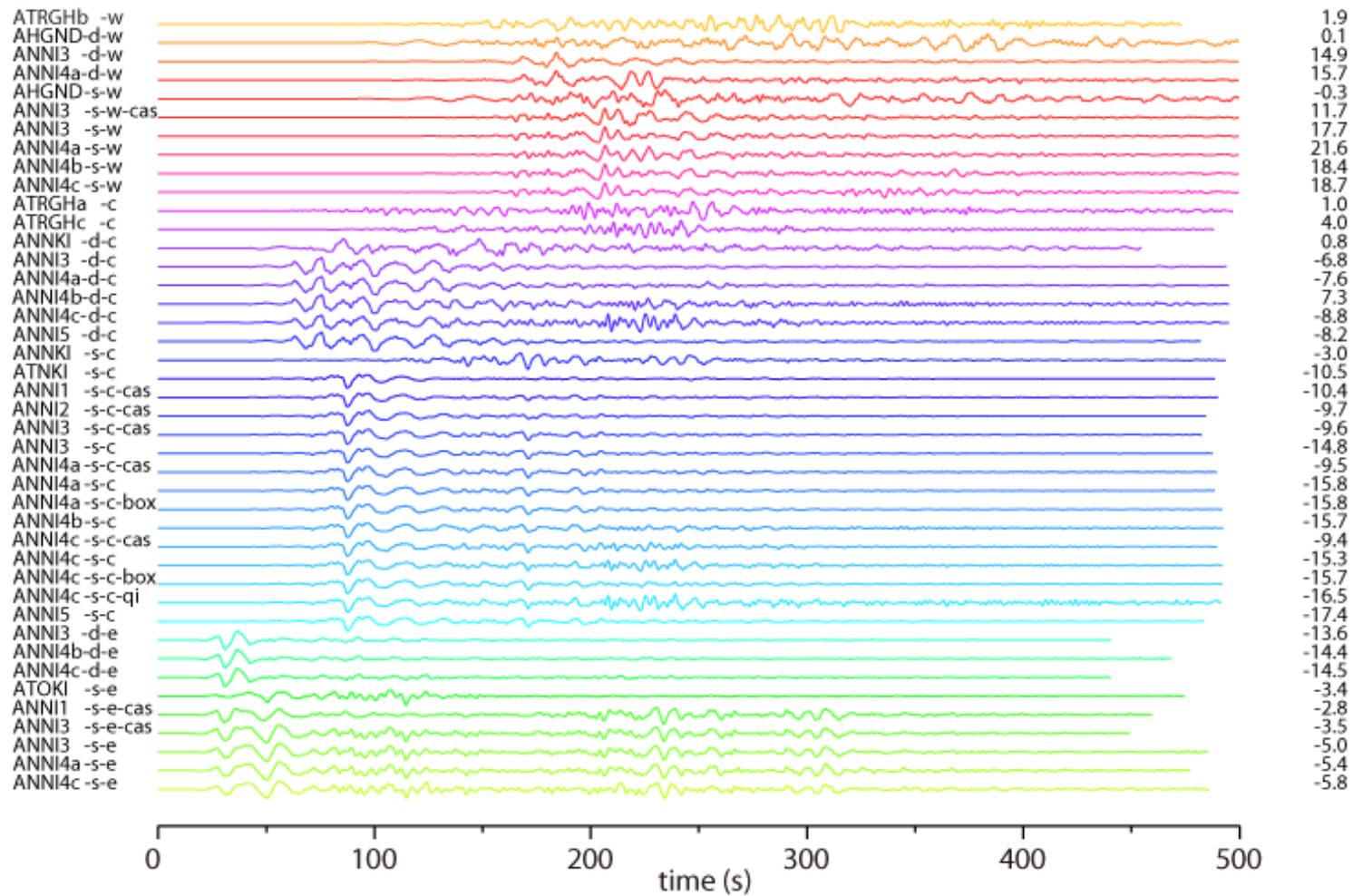


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (N-S)

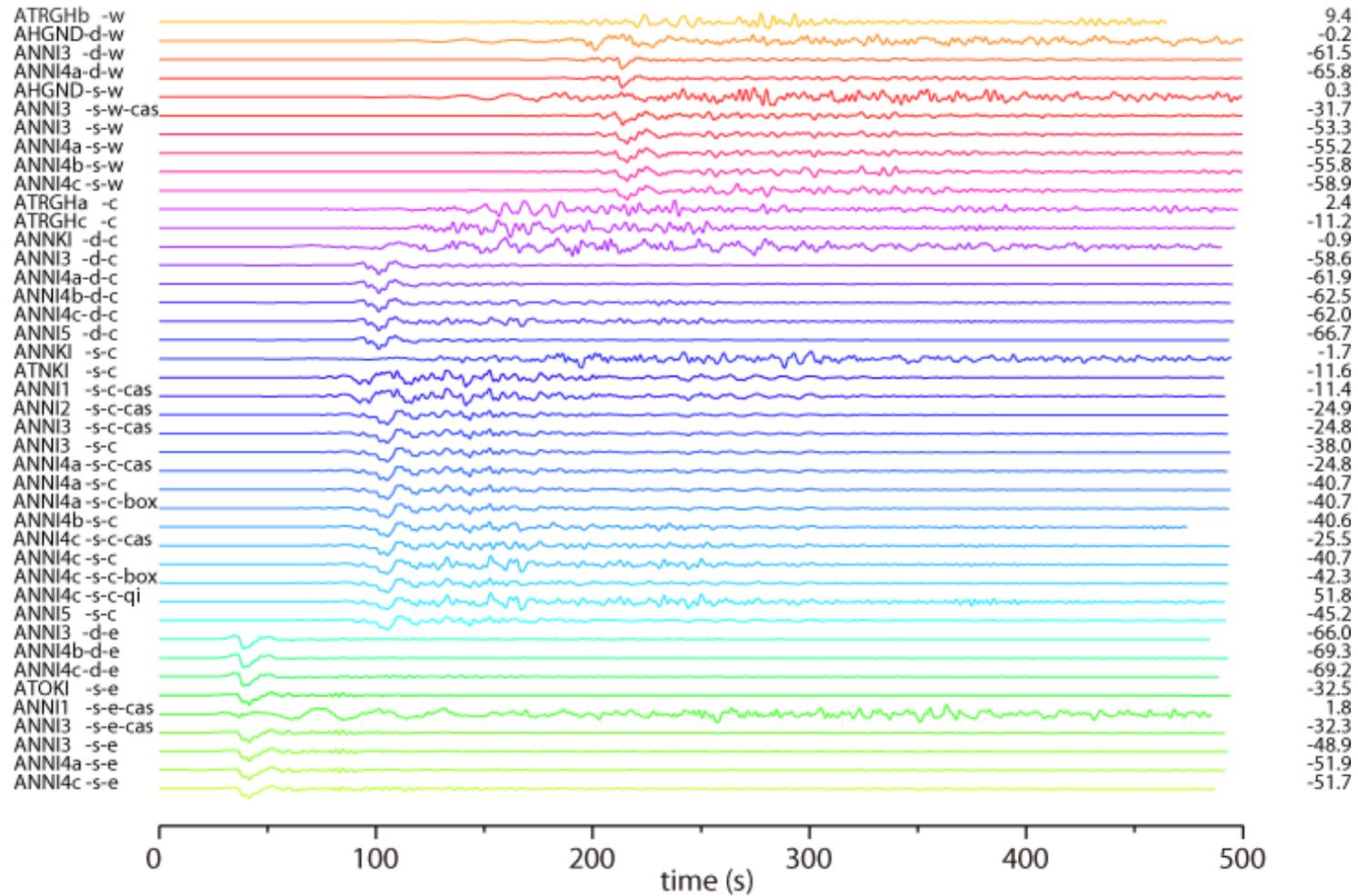


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (E-W)

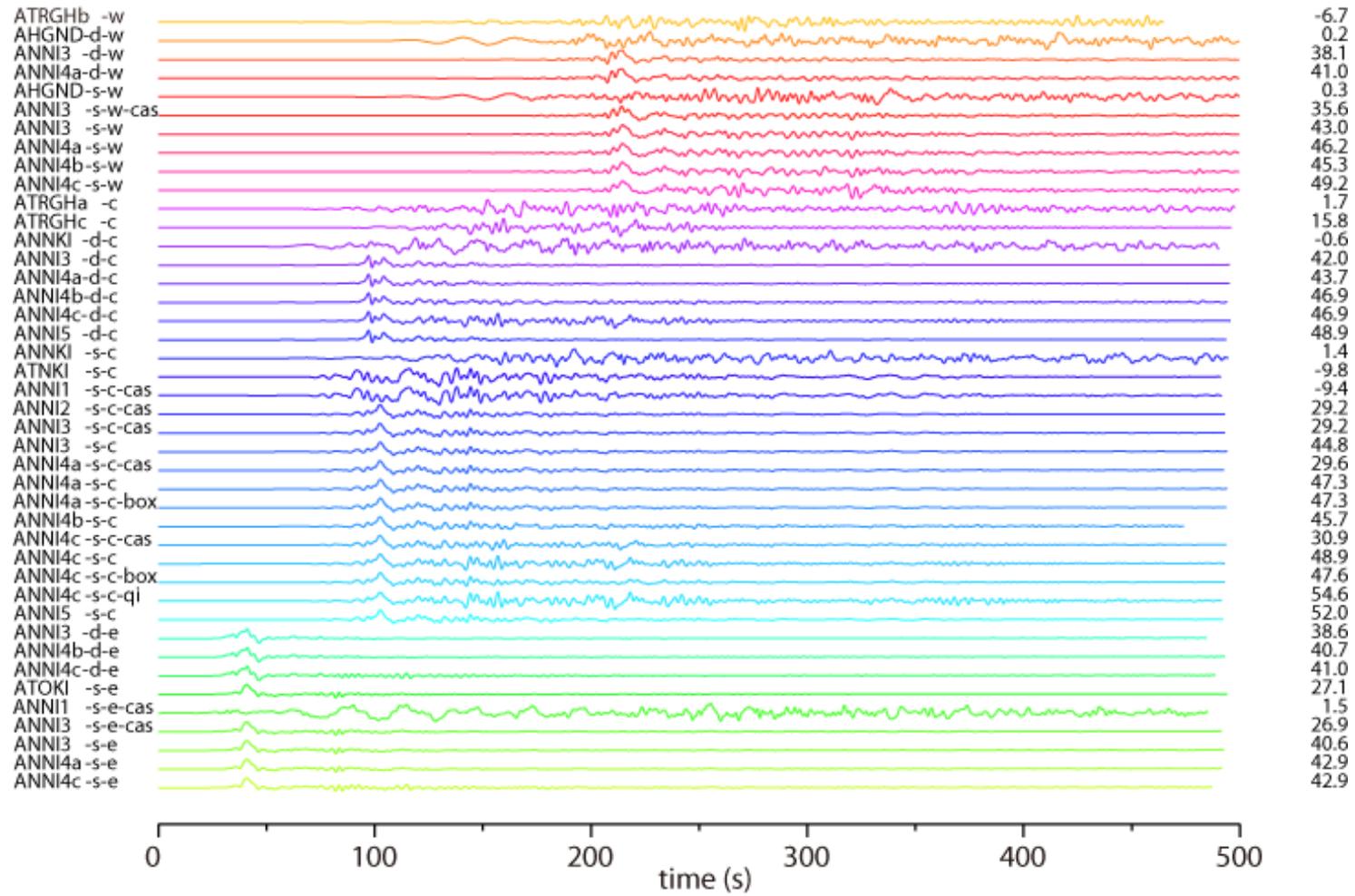


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

静岡県庁 (U-D)

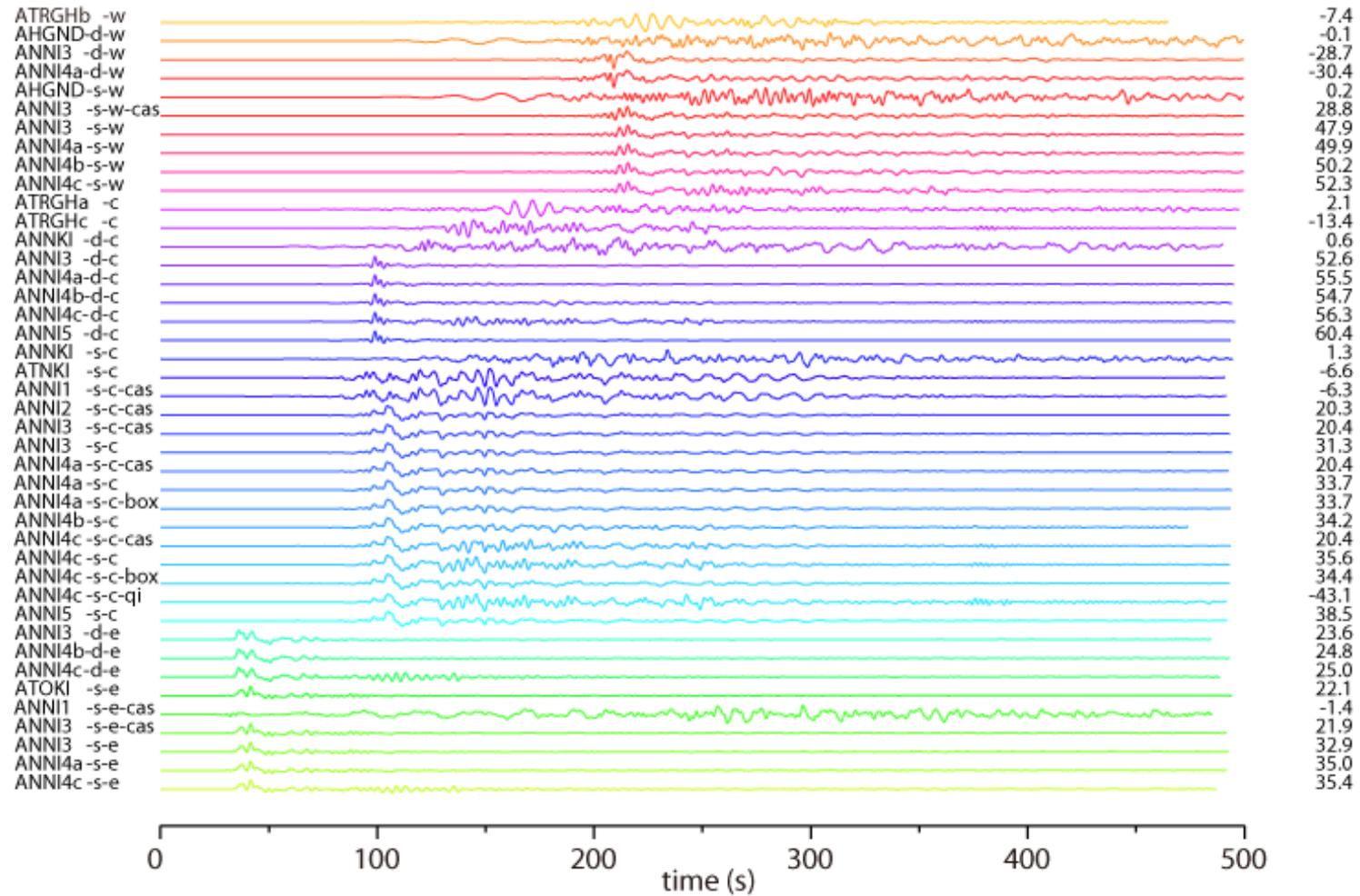


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (N-S)

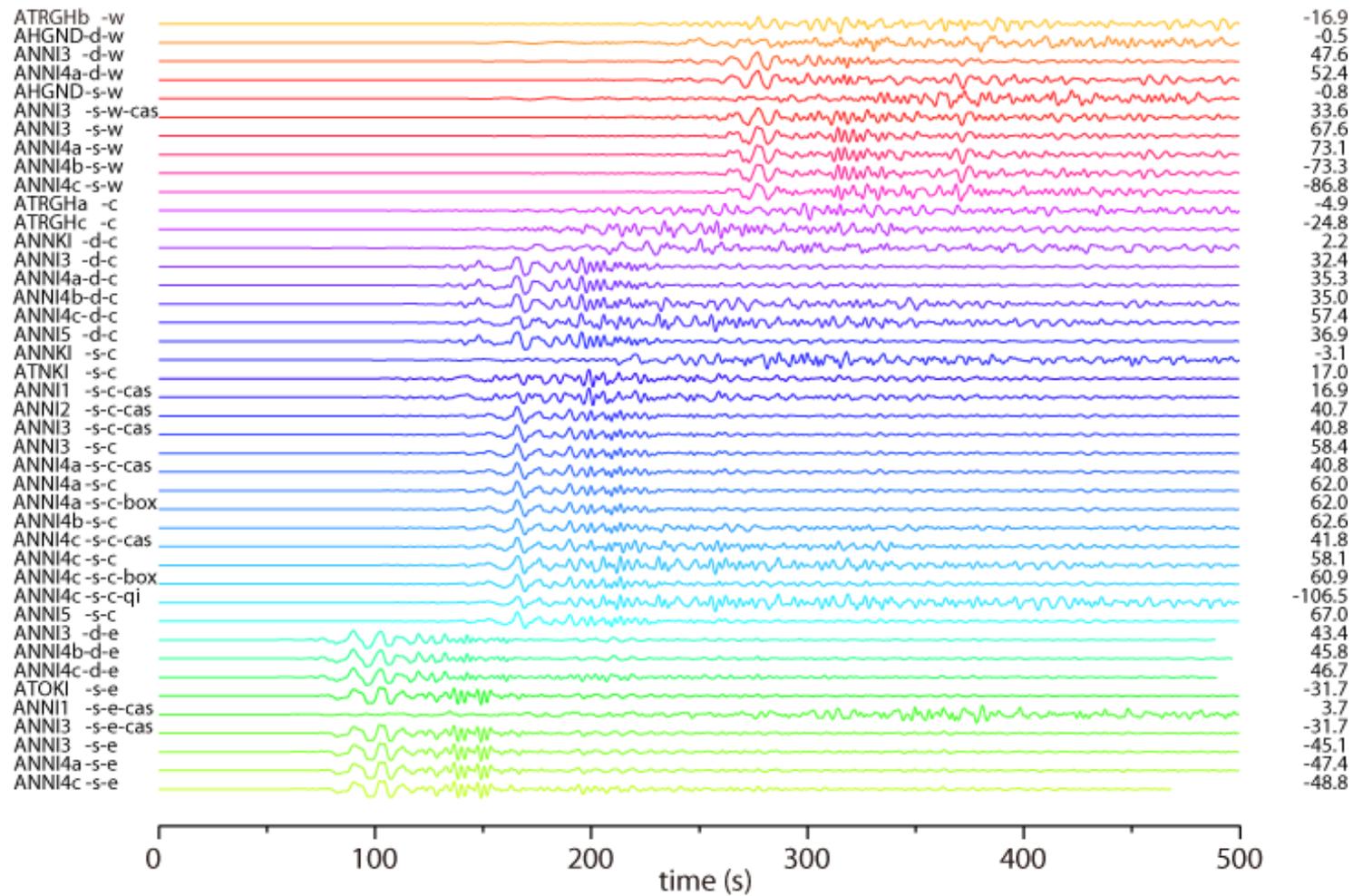


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (E-W)

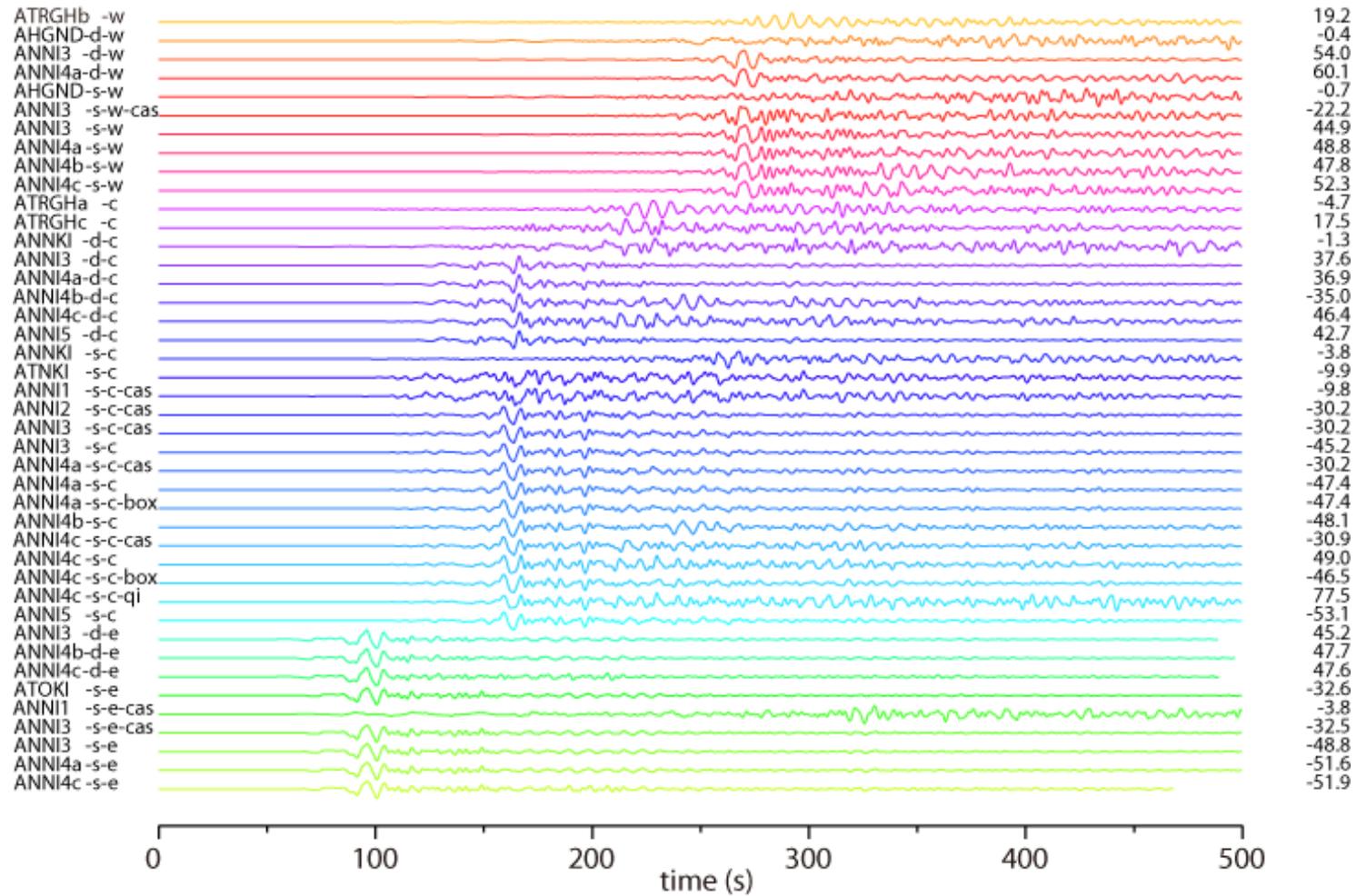


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

東京都庁 (U-D)

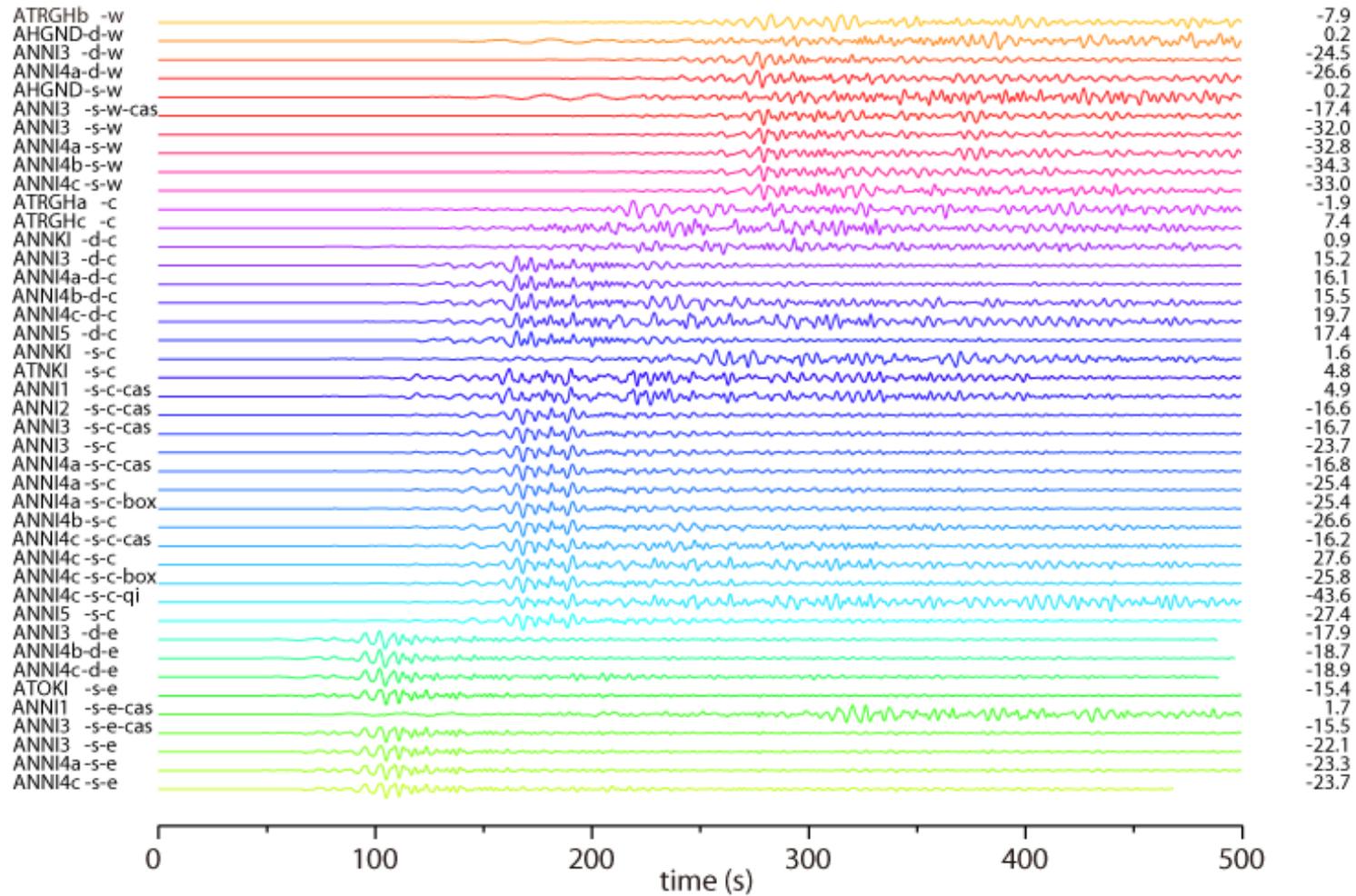


図 3.4-5 全ケースの速度波形。右の数値は最大振幅（単位は cm/s）。

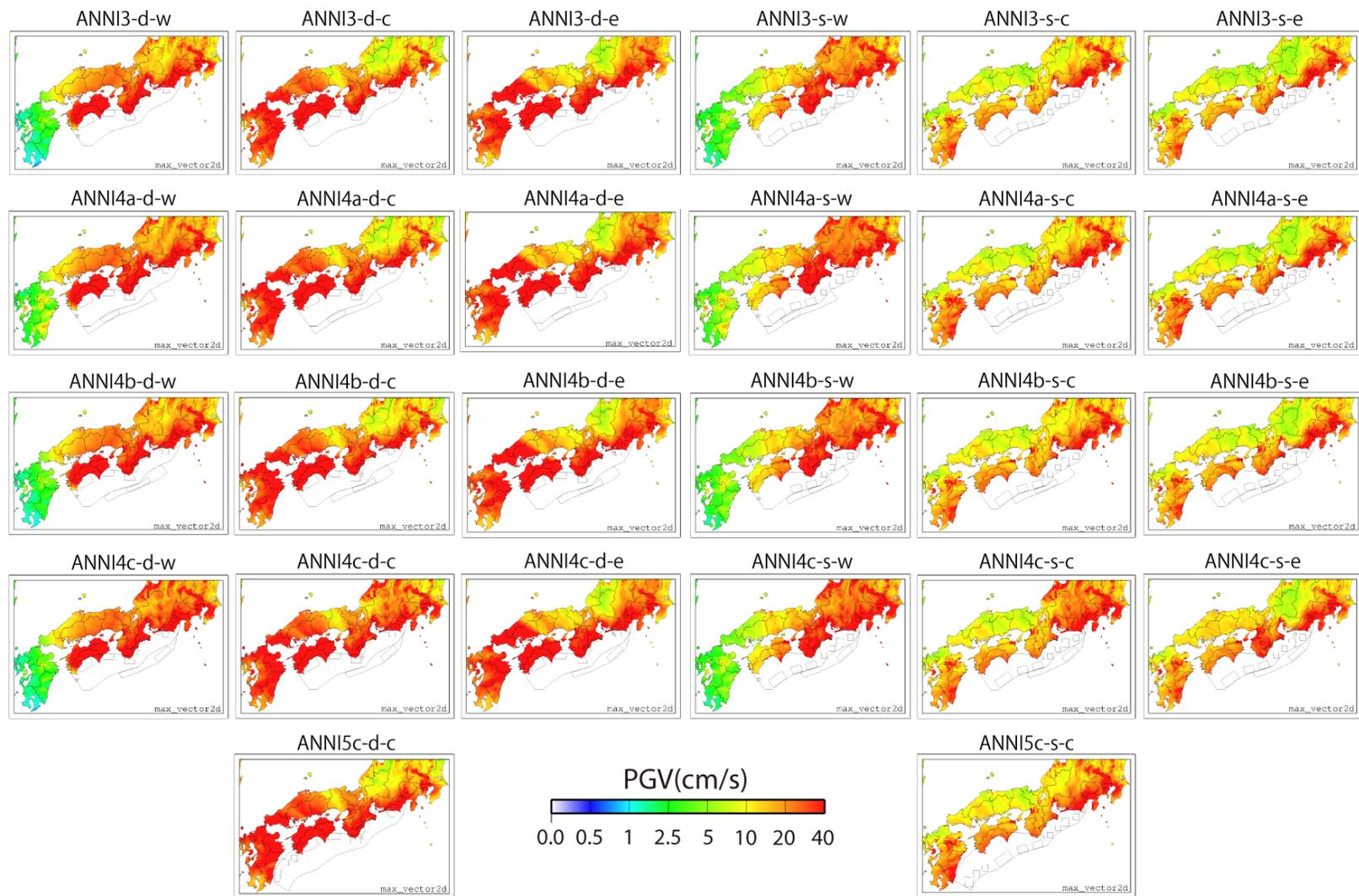


図 3.4-6a 最大地動速度値の分布 (3 連動、4 連動の場合)。ケース名は各パネル上に示している。

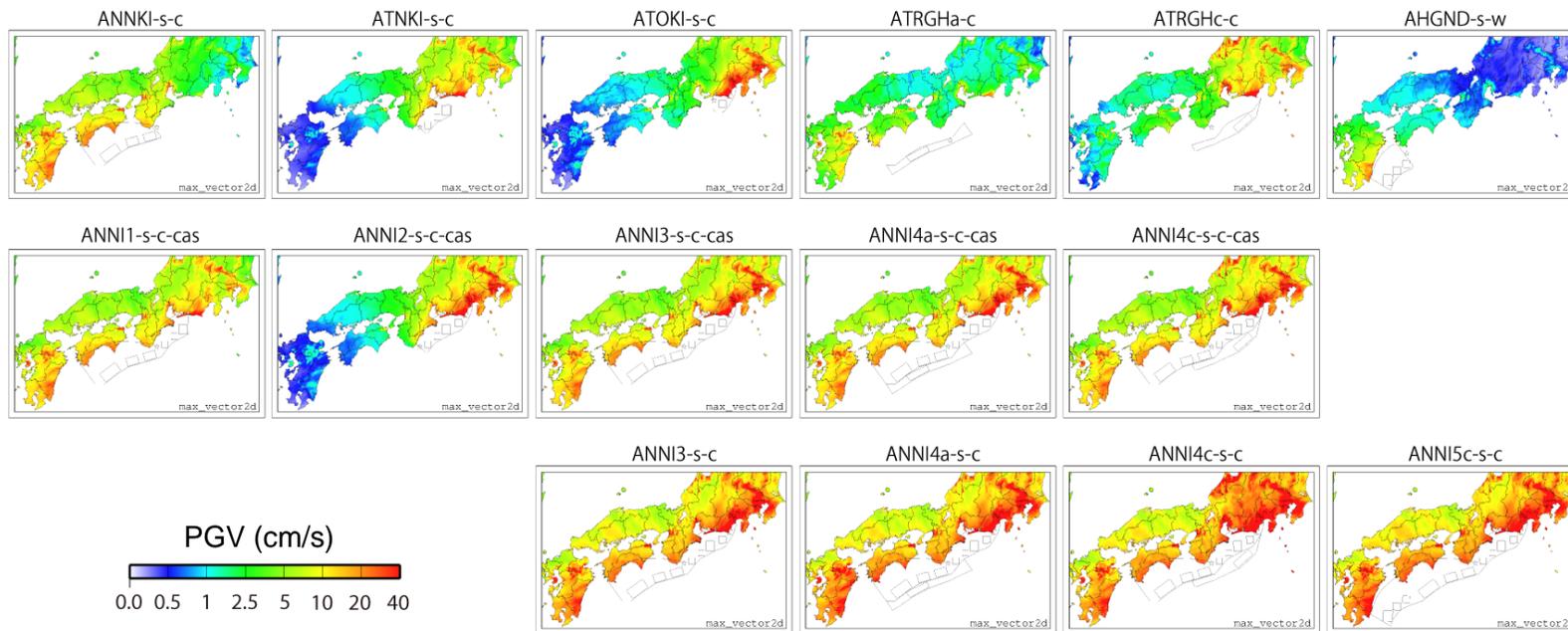


図 3.4-6b 最大地動速度値の分布（単独領域、複数領域（カスケード、スケーリングの場合）ケース名は各パネル上に示している。

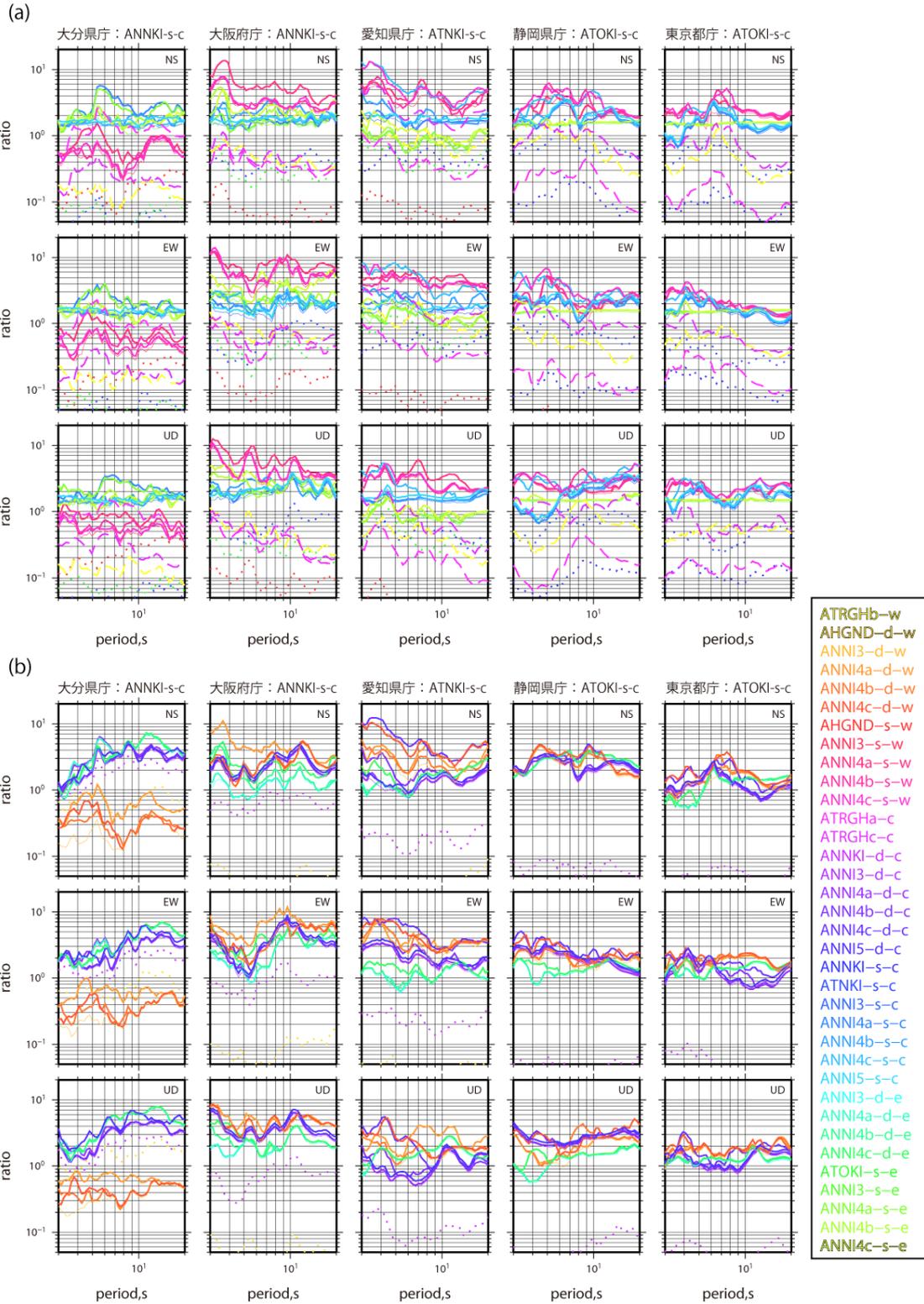


図 3.4-7 応答スペクトル比。(a) アスペリティが浅いケース、(b) アスペリティが深いケース。スペクトル比の基準としたケース名は地点名の右に示している。太実線は 4 連動、細実線は 3 連動、点線は単独領域。破線はトラフ沿いの単独領域。

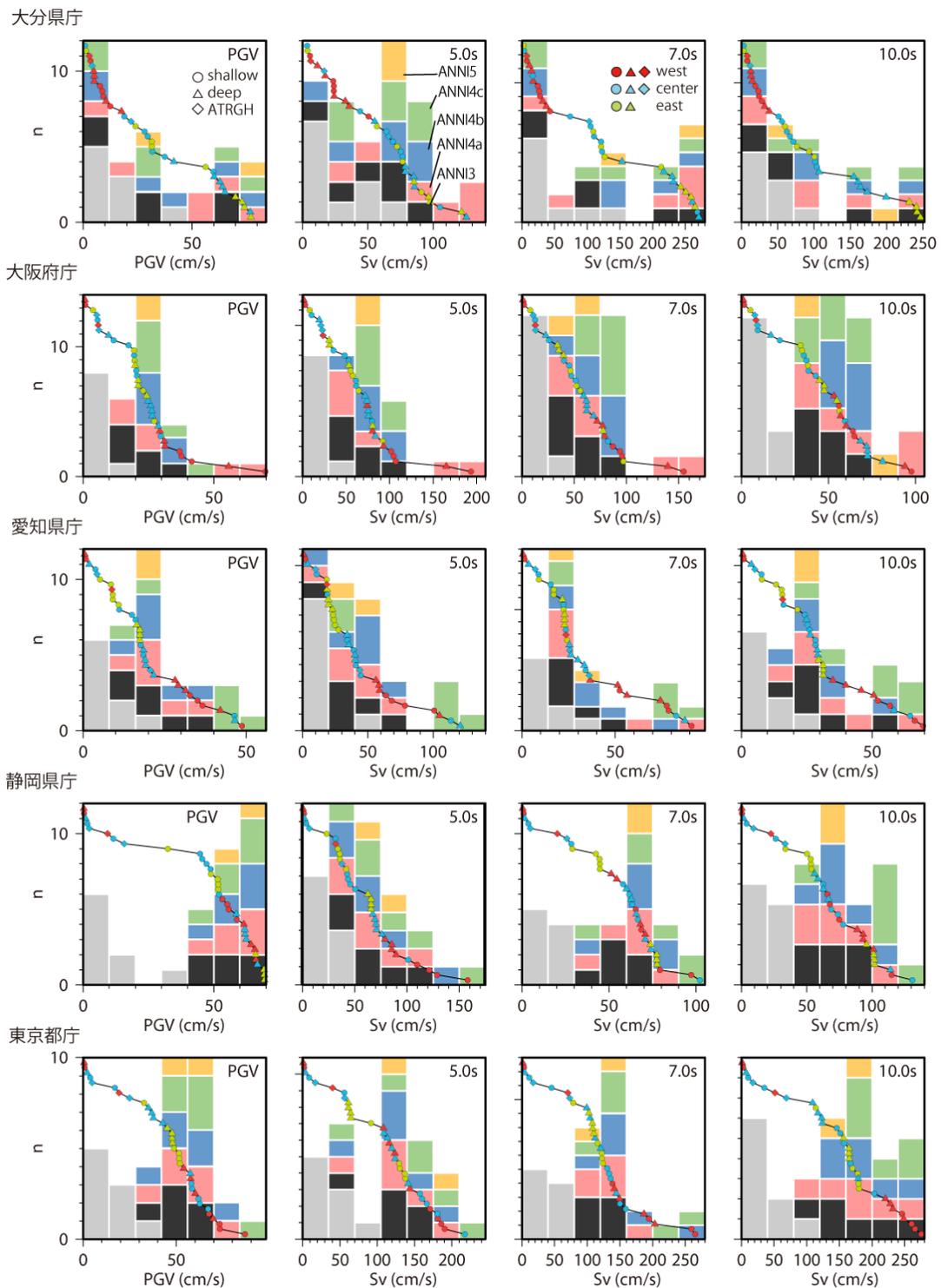


図 3.4-8 スケーリング型の 35 ケース（箱型関数、 $Q$  値無限大、 $k-2$  モデルは除く）についての、最大地動速度値、応答スペクトル（周期 5 秒、7 秒、10 秒）の度数分布。ヒストグラムは震源域と最大値の関係、累積頻度分布は破壊開始点、アスペリティ深さと最大値との関係を示している。ヒストグラムの色、累積頻度の印、色については、上段の図中を参照。

## 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。

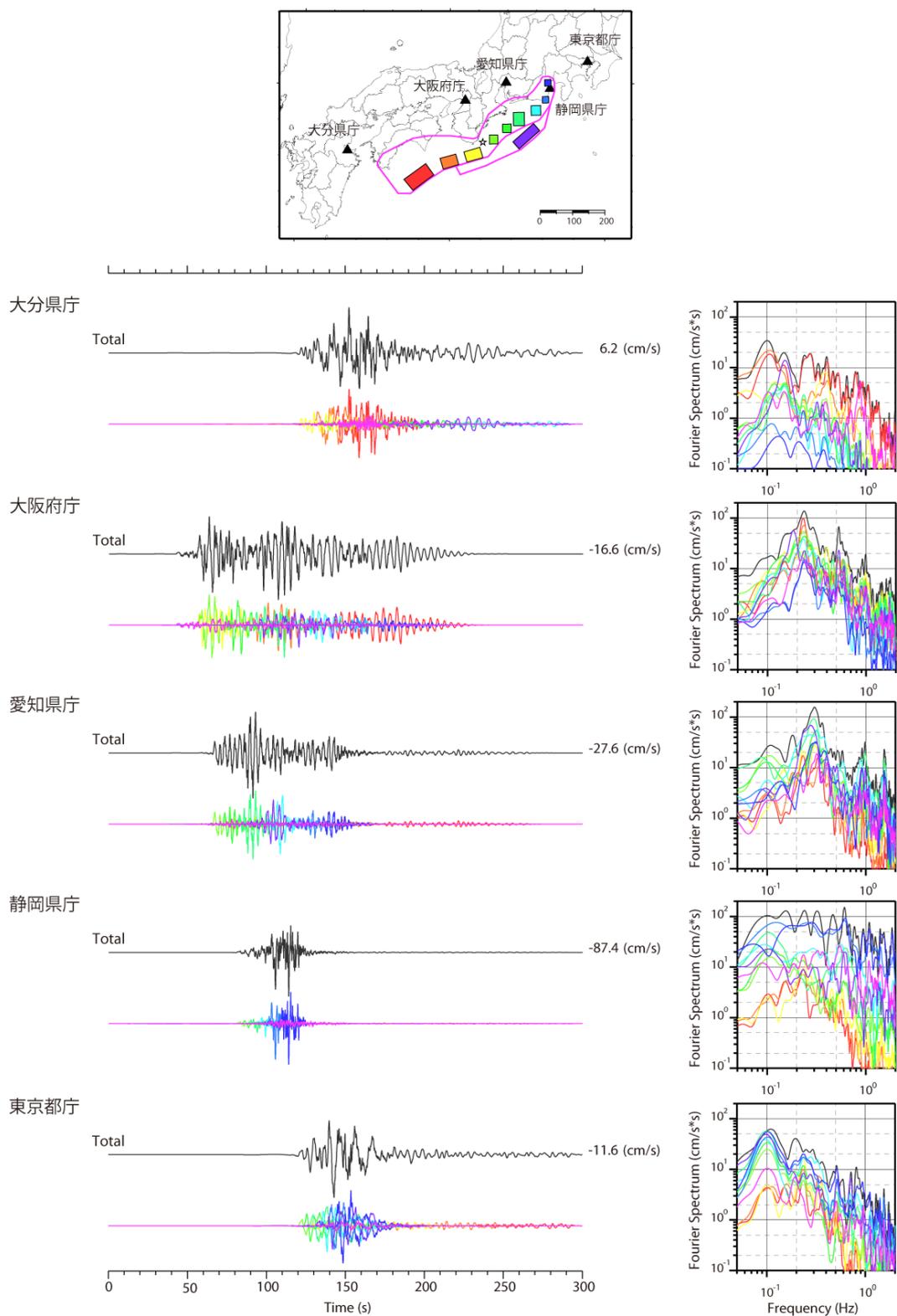


図 3.4-8 統計的グリーン関数法による、5 地点の速度波形と速度フーリエスペクトル。各アスペリティと背景領域からの波形の色は、上図内の震源モデルと対応している。黒線で示した波形・スペクトルはそれらを合成したものの。

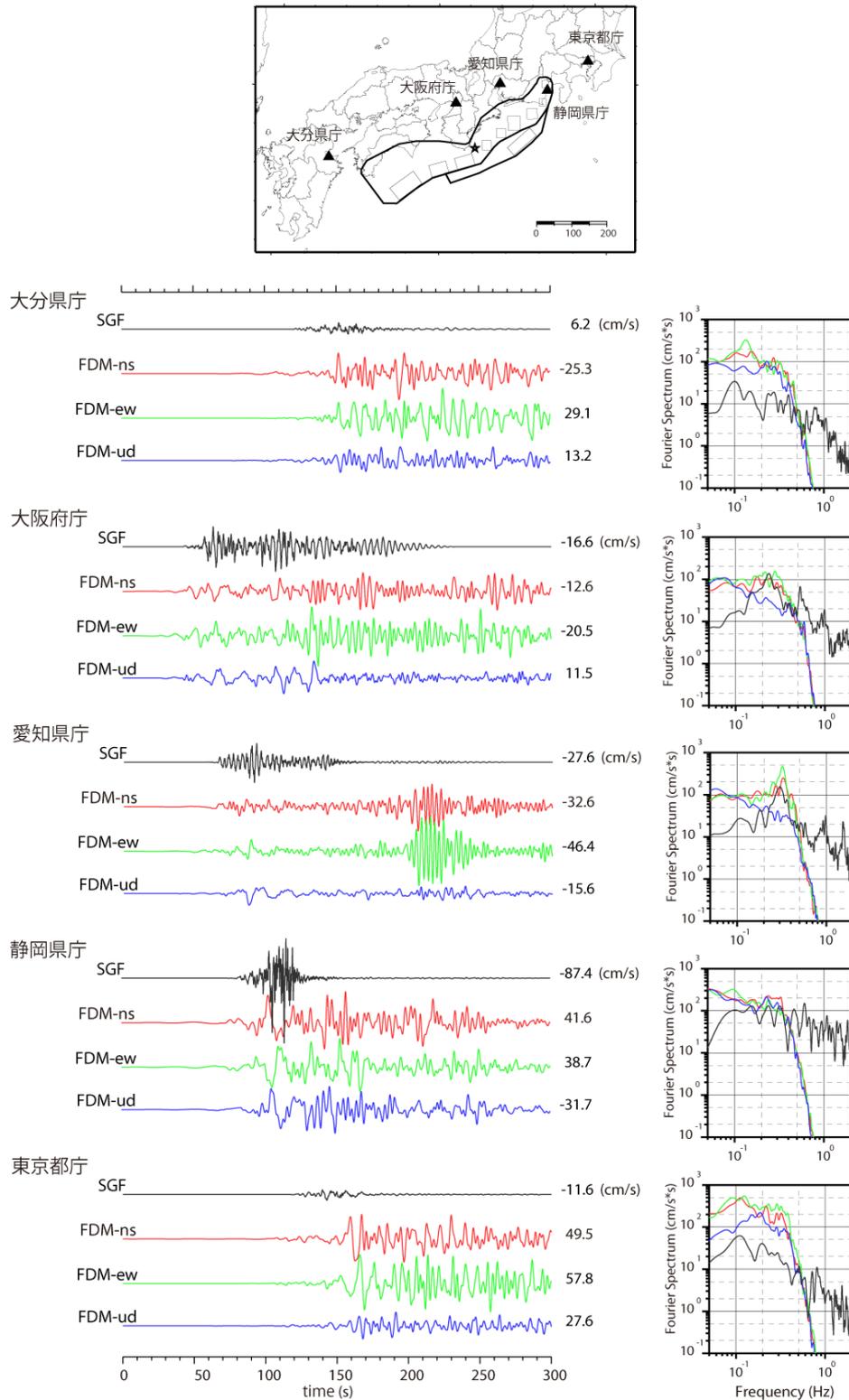


図 3.4-9 統計的グリーン関数法と差分法による、5 地点の速度波形と速度フーリエスペクトル。黒は統計的グリーン関数法、赤、緑、青は差分法による結果。差分法の結果には 0.5Hz のローパスフィルターをかけている。

### 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.

### 3. 5 長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等

#### (1) 研究の内容

##### (a) 研究の題目

長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等

##### (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	河合 伸一

##### (c) 研究の目的

長周期地震動の性質や、それらがもたらす被害、その対策について分かりやすく説明した解説書を作成し、長周期地震動予測地図の利活用を促進する上で必要な方策を提示する。また、ユーザーが今いる場所あるいは必要とする任意の場所での長周期地震動に関する情報をインターネットやモバイルネットワークを通して入手でき、かつ分かりやすく可視化するためのアプリケーションを開発する。

#### (2) 平成 23 年度の成果

##### (a) 研究の要約

過去の地震により観測された長周期地震動及びそれより被害が生じたと考えられる事例について収集・整理した。「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」で実施した長周期地震動シミュレーション結果を基に超高層ビルの応答解析を実施し、予想される被害などに基づいて、構造物の長周期地震動による影響を表すための揺れの尺度を提案した。以上の長周期地震動そのものの性質やそれにより生じ得る被害に加えて、具体的な対策例を挙げることにより、長周期地震動予測地図の利活用を促進するための解説書を作成した。

「長周期地震動予測地図」2012年試作版のデータに基づき、地震波伝播の動画を作成し、提供するシステムを開発した。多様な機種 of 携帯端末（スマートフォン）で利用できる、ユーザーが今いる場所での地震動に関する情報を入手でき、かつ、分かりやすく可視化するアプリケーションを開発した。また、スマートフォン用のアプリケーション J-SHIS において長周期地震動伝播の動画を再生する機能を開発した。

##### (b) 研究の成果

###### 1) 解説書の作成

長周期地震動の性質やそれによる被害に関して、

- ・地表面や超高層ビル内の長周期地震動
- ・長周期地震動による地震被害
- ・長周期地震動に関連した振動実験
- ・長周期地震動シミュレーション結果に基づく超高層ビルへの影響の検討
- ・長周期地震動を表す尺度の検討
- ・耐震診断システムの検討
- ・長周期地震動対策

の項目について、事例の収集・整理や記録の分析などの検討を実施し、それらをまとめた解説書を作成した。以下では上記各項目に関する検討等の概要について述べる。

#### (A) 地表面や超高層ビル内の長周期地震動

長周期地震動の性質について、2011年東北地方太平洋沖地震の本震により得られた観測記録に基づく分析結果により示す。

はじめに、K-NET及びKiK-netにより得られた観測記録について、短周期～長周期に到る広帯域の地表面での地震動特性を見るために、擬似速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）を計算し、5つの周期帯域（0.2-0.5秒、0.5-1.0秒、1.0-2.0秒、2.0-5.0秒、5.0-10.0秒、10.0-20.0秒）の振幅レベルの空間分布を検討した（図3.5-1）。代表的な周期帯域の空間分布を図3.5-1に示す。周期約1.0秒以下の応答スペクトル振幅の空間分布は、震源に近い太平洋側の海岸沿い一帯で大きな振幅を示しているのに対して、周期1秒以上は短周期帯域と異なる傾向を示しており、宮城県や関東平野でスペクトル振幅が大きくなっている。さらに5秒以上の帯域では、日本海側の新潟や庄内平野付近でも振幅が大きくなっている。これらの長周期帯域で振幅の大きい地域は東日本の平野部と概ね対応している。すなわち、長周期地震動は、震源から遠く離れていても平野部において振幅が大きくなる性質がある。

次に、建築研究所（2011）の情報による高層・免震建物の最大応答加速度の分布について、建物の振動特性としての増幅倍率を抽出するために、建物頂部の応答の卓越周期における建物頂部と基礎の擬似速度応答を図から読み取って、応答倍率を評価した。図3.5-2に図から読み取った応答倍率を示す。応答倍率は、10倍前後の値を示す建物が多く、最大加速度の応答倍率に比べると、良く揃っている。

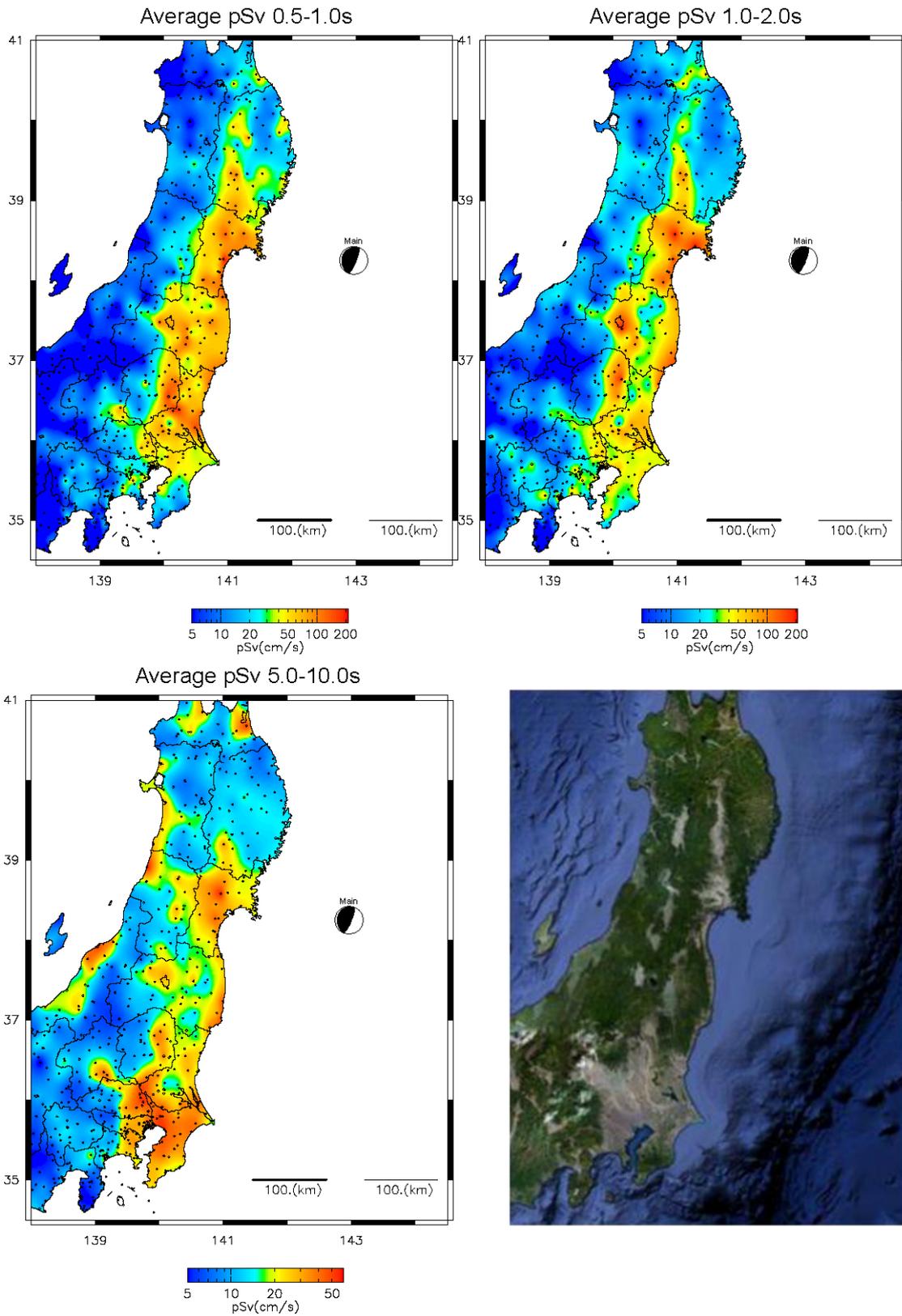


図 3.5-1 各周期帯域の擬似速度応答( $h=0.05$ )の空間分布。左上： $T=0.5\sim 1.0s$ 、右上： $T=1.0\sim 2.0s$ 、左下： $T=5.0\sim 10.0s$ 、右下：東日本の地形 (Google Earth より引用)。

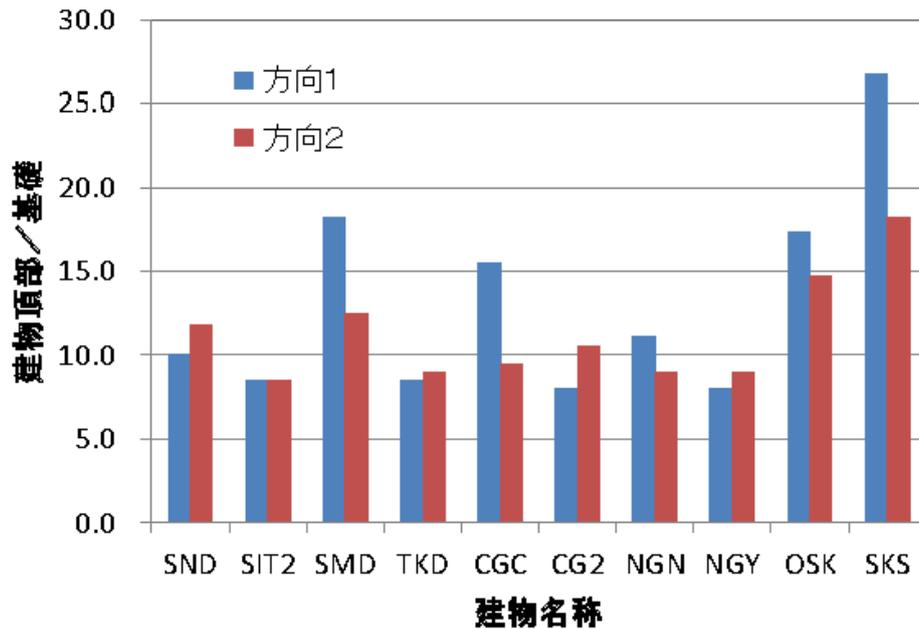


図 3.5-2 高層建物の応答の卓越周期における擬似速度応答の増幅倍率。

(B) 長周期地震動による地震被害

長周期地震動による過去の被害について、

- ・タンクのスロッシング（液面揺動）
- ・超高層ビルのエレベータ被害
- ・免震・制震建物の被害
- ・長大橋の被害
- ・その他の被害

について調査した。以下、2011年東北地方太平洋沖地震までの長周期地震動による被害について事例を示す。

1) タンクのスロッシング

タンクのスロッシングは長周期地震動による被害の中で最も顕著なものである。石油タンクの屋根の形式によって被害が異なり、①浮屋根および付属品の破損と内容液の溢流、②円錐屋根と側板との接合部の破損、③固定屋根式貯蔵の側板上部の座屈などである（堀・

川端、2004)。さらに、壊れた屋根から油が溢流すると、揮発したものに引火して火災が発生する。タンクのスロッシングの固有周期  $T_s$  は (3.5-1) 式で算定され、数秒以上の長周期域で被害が発生することが多い。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68g} \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)} \quad (3.5-1)$$

ここで、 $D$  はタンクの内径 (m)、 $H$  は液面高さ (m)、 $g$  は重力加速度 ( $m/s^2$ ) である。

過去の地震被害事例については、太田・座間 (2005) および座間・他 (2005) で多くまとめられているが、1964 年新潟地震 (M7.5) における新潟をはじめとして、1978 年宮城県沖地震 (M7.4)、1983 年日本海中部地震 (M7.7)、1993 年北海道南西沖地震 (M7.8)、2003 年十勝沖地震 (M8.0)、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) で発生しているほか、海外の地震においても 1933 年のロングビーチ地震 (M6.3) をはじめとして多く被害が生じている。

## 2) 超高層ビルのエレベータ被害

M7 クラス以上の地震では遠く離れた場所でも沖積平野などでは表面波などにより長周期地震動が卓越し、固有周期の長い超高層ビルの上部で揺れが大きくなる。例えば、2004 年新潟県中越地震 (M6.8) では、東京地区での震度は 3 程度であったため機器の転倒等の被害は報告されていないが、長周期地震動によるエレベータ・ロープの振れによると考えられる引掛り事故の被害が多数報告されている (エレベーター協会, 2007)。過去に起きた地震によるエレベータの被害事例について、太田・座間 (2005)、鈴木・他 (2010) などをまとめて表 3.5-1 に示す。

エレベータ被害の特徴は以下のようにまとめられる。

- ・マグニチュード 7 クラス以上の規模の大きな地震であれば、震央から遠く離れても沖積平野の超高層ビルでは被害が発生する可能性がある。
- ・1983 年日本海中部地震や 2000 年鳥取県西部地震のように地上の震度は無感でも被害が発生する可能性がある。
- ・超高層ビルのエレベータのロープは、長周期地震動で共振して大きく揺れ、昇降路内の機器ブラケットなどで引っかかることによって被害を起こすことが多い。

表 3.5-1 長周期地震動によるエレベータの事故例。

発生日	地震名	M	深さ (km)	事故の 場所	震央距離	震度	事故内容
1983/05/26	1983年日本 海中部地震	7.7	14	東京 (新宿)	約 520km	0	ロープの引掛り
2000/10/06	2000年鳥取 県西部地震	7.3	9	東京 (恵比寿)	約 580km	0	ロープの引掛り
2003/09/26	2003年十勝 沖地震	8.0	42	札幌	約 240km	4	ロープの引掛り 破断
2004/10/23	2004年新潟 県中越地震	6.8	13	東京 (六本木)	約 190km	3	ロープの引掛り 破断
2011/03/11	2011年東北 地方太平洋 沖地震	9.0	24	東京 (新宿)	約 390km	5弱	ロープの引掛り アングル等損傷 エレベータシャフト の内壁の落下など
				大阪 (咲洲)	約 760km	3	エレベータ内での 閉じ込め

### 3) 免震・制震建物の被害

日本免震構造協会では、2011年東北地方太平洋沖地震の後、免震建物の被害調査をアンケート形式で行っており、

- ① 免震エキスパンションジョイントの不作動とそれに伴う損傷
- ② 鋼材ダンパの取付けボルトの緩みと塑性化に伴う形状の変状
- ③ 鉛ダンパの亀裂の発生やエネルギー吸収に伴う形状の変状

といった被害があったことが報告されている。また、制震建物については、制震部材の変状は、鋼材ダンパの残留変形 1 件、塗装の剥離が 3 件あったと報告されている。ただし、ダンパは容易に目視確認できない場所に設置されているものが多く、「目視確認できていない」という回答が多いことから、実数はもっと多かった可能性がある。

### 4) 長大橋の被害

多くの橋梁の被害は、①短周期地震動レベルの大きさ、②液状化、③津波、④地盤の強制変形、が主な原因として考えられる。ただし、横浜ベイブリッジでは、2011年東北地方太平洋沖地震時に図 3.5-3 に示すように桁の接続部であるフィンガージョイント（伸縮装置）と高欄伸縮継ぎ手が損傷した。これは、長周期地震動で長大橋の桁の大きな変形を生じたためと考えられる。

## 被災の状況



伸縮装置の損傷



高欄伸縮継ぎ手の損傷

図 3.5-3 横浜ベイブリッジの損傷した床版の伸縮継ぎ手の様子（写真：国交省横浜国道事務所 HP より）。

### 5) その他の被害

日本においては、長周期地震動により構造物被害が発生した事例はこれまでに報告されていない。ただし、1985年メキシコ地震（M8.1）では、震源から約350km離れたメキシコ市で（太田・座間、2005）、また、2010年チリ・マウレ地震（M8.8）では、震源から約330km離れたサンチアゴ市およびその周辺地域で構造物被害が発生している（日本地震工学会・日本建築学会、2010）。一方、2011年東北地方太平洋沖地震においては、長周期地震動で揺れたと考えられる東京（約390km）や大阪（約760km）での超高層ビルでの2次部材や什器・設備関係の被害が報告されている。日本建築学会（2011）などの調査報告に基づいてエレベータ被害を除いた主なものを表3.5-2に示す。

表 3.5-2 2011 年東北地方太平洋沖地震での超高層ビルの主な被害(エレベータを除く)。

建物	被害
工学院大学新宿校舎	天井板の落下 固定をしていなかった重い本棚の転倒 コピー機などキャスター付きの什器類の移動 書類等の落下と散乱 間仕切り壁の変形及びそれに伴うドアの開閉障害 低層棟とのエキス番ジョイント部での内部材の剥落
東京都庁本庁舎	第二本庁舎 33 階体育室のスプリンクラー 議会棟 6 階空調機械室内暖房用温水の配管 第一本庁舎 8 階北側機械室内冷水系熱交換器 一部の天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損
新宿西口地区の 超高層ビル (アンケート調査)	天井の一部落下：7 件 外線電話の障害：5 件 内壁などのはがれ：4 件 防火戸の開閉障害：2 件 電気・ガス・水道の支障：2 件 パーティションの倒れ：1 件 スプリンクラーの破損：1 件 防災垂れ壁の損傷：1 件 外壁の一部落下：1 件
大阪府咲洲庁舎	内装材や防火戸の一部で破損

最後に、中低層ビルの 2 次部材の被害事例として多く見られたものであるが、超高層ビルにおいても発生する可能性があるものを以下にまとめる。

① 外装材の被害

- a) 押出成形セメント板 (ECP 板) の破損、脱落
- b) 石貼りのひびわれ、剥離・脱落
- c) タイルのひびわれ、剥離・脱落

② 内装材の被害

- a) 乾式壁 (軽量鉄骨下地ボード貼り壁が多い) の破損
- b) 天井の脱落

### (C) 長周期地震動に関連した振動実験

長周期地震動を受ける超高層ビルの挙動に関連した過去の実験について、①長周期地震動による多数繰り返し荷重に対する構造部材の挙動と変形性能の評価を目的とした静的加力実験、②長周期地震動を入力とした非構造部材を対象とした振動台実験、の観点から調査した。

構造部材の損傷に関する実験としては、長谷川・他（2011）による静的繰り返し実験や鍾・他（2008）の E-ディフェンスによる実験があり、これらでは、鉄骨造の建物における梁端部分の破断に関する知見が得られている。また、出水・他（2009）、田邊・他（2011）などでは、鉄筋コンクリート造の建物における梁や柱の剛性劣化性状を把握されている。

一方、非構造部材を対象とした実験としては、関松・他（2008）や平山・他（2008）の E-ディフェンスによる実験では、それぞれ間仕切り壁や設備配管の損傷に関する知見が得られているほか、城戸・他（2009）では、E-ディフェンスによる長周期地震動の実験により家具の転倒に関する知見が得られている。また、家具の転倒防止に関する実験等については、斉藤・他（2006）、酒入・他（2007）や金子・中村（2005）もあり、個別の対策の効果の大小とともに、複数組み合わせることにより効果が上がることも示されている。

また、鈴木・他（2009）は、人間の避難行動限界に関する行動難度や不安度に関する実験により、評価曲線を提示している。

### (D) 長周期地震動シミュレーション結果に基づく超高層ビルへの影響の検討

長周期地震動予測地図の利活用に資するため、「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」で実施した南海トラフの地震の長周期地震動のシミュレーション結果を基に、超高層ビルを対象とした応答解析を実施し、生じ得る被害の推定を行った。建物の振動解析モデルにはいくつかあるが、本検討では、強非線形領域の挙動を適切に評価する必要があること、超高層ビルで生ずる柱の伸縮による全体曲げ変形がする必要があることと計算時間を勘案して、平面フレームモデルを用いることとした。また、地震動シミュレーション結果の有効周期が 2 秒以上であること、実存する超高層ビルの階数の上限を考慮して、想定超高層ビルの階数は 30 階、45 階、60 階とした。設定した 3 種の応答解析モデルの概要を図 3.5-4 に示す。

ここで用いる入力地震動は、それぞれの地点において 2 波とする。1 波は標準ケースとしてケース 3-d-c、加えてもう 1 波は、Q 値を無限大としたものを除く全ケースのうち、その地点・方向において周期 3 秒から 8 秒の擬似速度応答スペクトルの平均が最大となるケースを選択して用いることとする。入力に用いた地震動の一覧を表 3.5-3 に示す。

大阪舞洲を例に、建物階数毎の最大層間変形角を、地震動の擬似速度応答スペクトルとともに示す（図 3.5-5）。大阪舞洲の地震動は、周期 3 秒から周期 6～7 秒に向かって周期とともに増大する特性を示しているが、地震動の最大ケース（図 3.5-5 右上図）では、建物が高くなるにつれて層間変形角が小さくなっている。これは、最大ケースの地震動が大きい

ため、非線形化による長周期化が起り、建物の高さによらず 6～8 秒の地震動の卓越成分で応答変形が決まるためと考えられる。すなわち、建物の高さによらず建物頂部の応答変形はほぼ同一で、これを高さで基準化した平均的な層間変形角は、建物が高いほど小さくなるためと考えられる。このように、建物の応答は、建物の固有周期の地震動成分と、常に正の相関関係にあるとは限らず、地震動の強さによって、負の相関関係を示す場合もあることに注意する必要がある。

以上の結果を基に、被害として、「建物機能」と、「構造部材」に関する損傷を想定し、それぞれについて損傷判定を行った。損傷判定は、北村・他（2006）による性能判断基準値表（表 3.5-4）によることとした。この表の中の各応答値は以下のものに対応する。

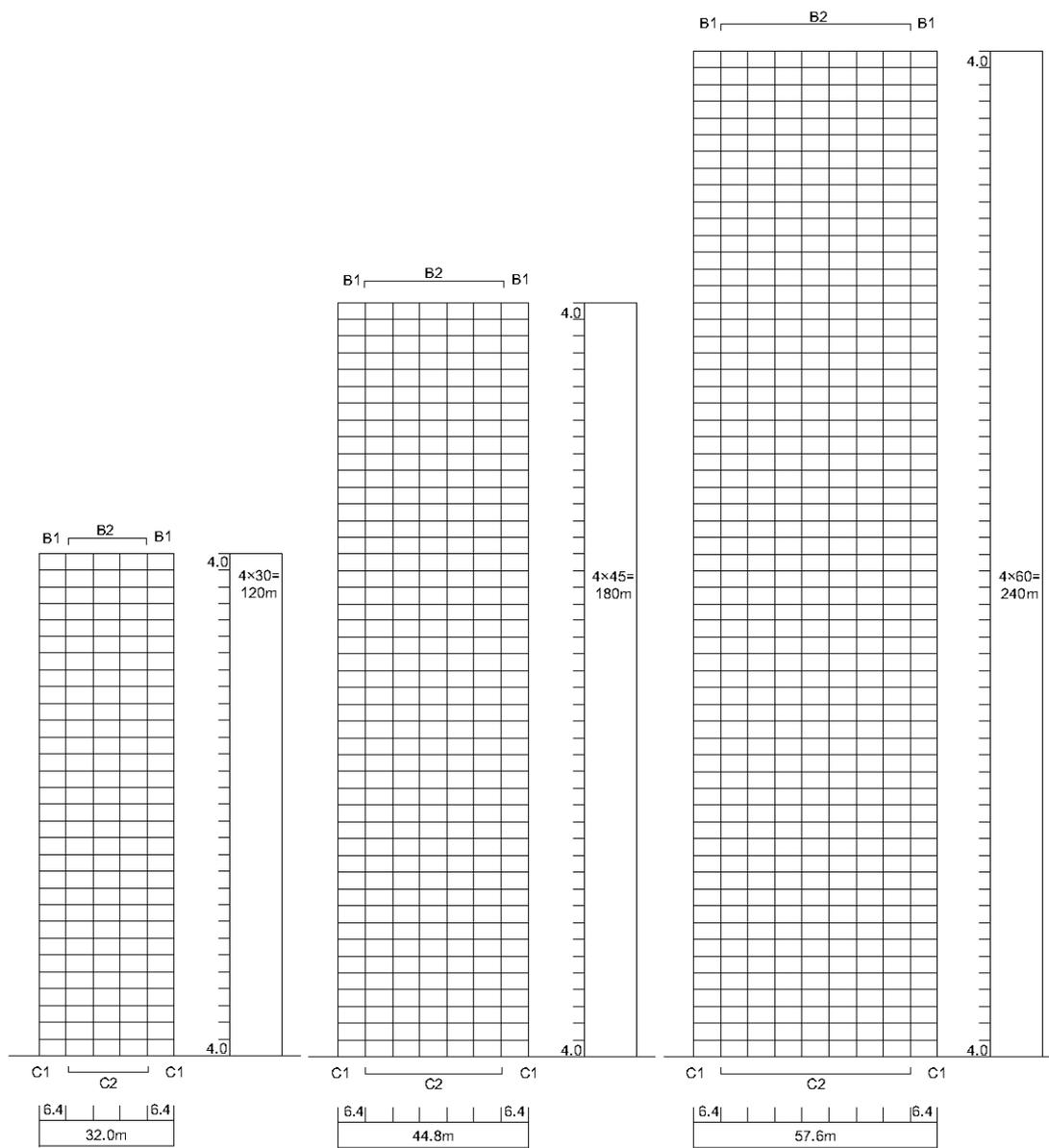
- ・建物挙動：層間変形角、応答加速度 → 建物の機能に関する指標
- ・構造骨組：層塑性率、塑性ヒンジ発生率 → 建物の損傷度に関する指標
- ・構造部材：部材塑性率、累積塑性変形倍率 → 建物の損傷度に関する指標

ここで、建物の機能に関する指標とは、設備機器・配管、外壁などの非構造部材、収容物への影響を念頭においたもの、また建物の損傷度に関する指標とは、構造体の損傷の程度を念頭においたもので、特に累積部材塑性変形倍率の $\lambda=1$ と0の境界値は、梁端接合部が破断に至る累積部材塑性変形倍率の平均値に対応している。ただし、これらの応答値の中で、層の塑性率については、今回の解析がすべて部材レベルの立体精算解析モデルでの応答解析であり、層の塑性率は直接出力されないため、判定には用いない。

この表の中で、現行の新築超高層ビルの耐震クライテリアは、 $\lambda=2$  すなわち安全限界余裕度Ⅱ（指定機能確保、小破、小規模修復）に対応していると考えられるため、これが長周期地震動に対する既存超高層ビルの耐震性確保の1つの目安になる。

以下では、NS 方向の評価結果について述べる。

表 3.5-5 から表 3.5-7 に、標準的な地震動に対する建物階数毎の損傷度の判定結果を示す。標準的な地震動に対しては、大阪舞洲、大分県庁などの地点で、安全限界を超える可能性があるが、多くの地点では、安全限界余裕度Ⅱ以下と評価されており、被害の拮りは限定的と考えられる。表 3.5-8 から表 3.5-10 に最大ケースの地震動に対する建物階数毎の損傷度の判定結果を示す。建物の階数に係わらず、多くの地点で安全限界を超えており、広い範囲で深刻な被害が発生する可能性がある。



(1) 30階建モデル

(2) 45階建モデル

(3) 60階建モデル

図 3.5-4 応答解析モデル概念図

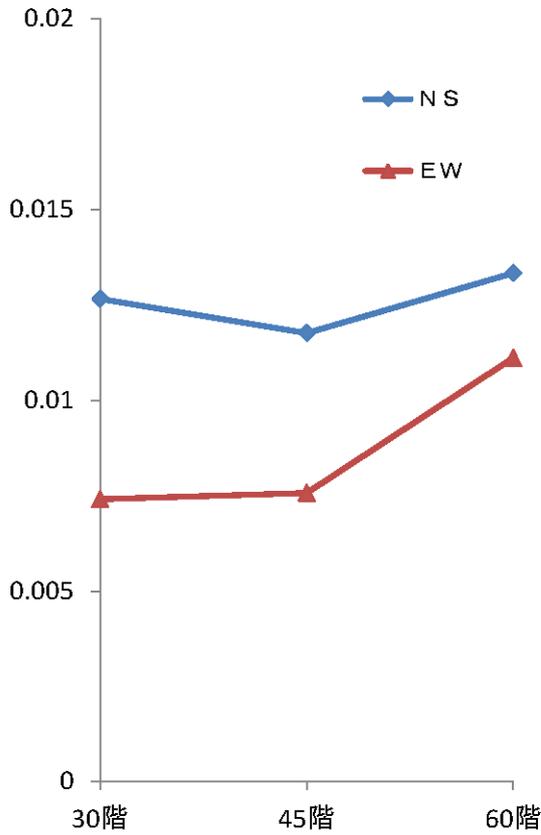
表 3.5-3 入力地震動の一覧。ケース名は表 3.4-2 を参照。

地点	表記	方向	標準ケース	最大ケース
愛知県庁県庁	AIC	NS	ANNI3-d-c	ANNI4c-s-c
		EW		ANNI4c-s-c
大分県庁	OIT	NS		ANNI4a-d-c
		EW		ANNI4a-d-c
大阪舞洲	OMS	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w
大阪府庁	OSK	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w
静岡県庁	SZO	NS		ANNI4c-s-w
		EW		ANNI4c-s-w
東京都庁	TKY	NS		ANNI4c-s-w
		EW		ANNI4c-s-w
四日市市役所	YKI	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w

表 3.5-4 耐震性能判断基準値表

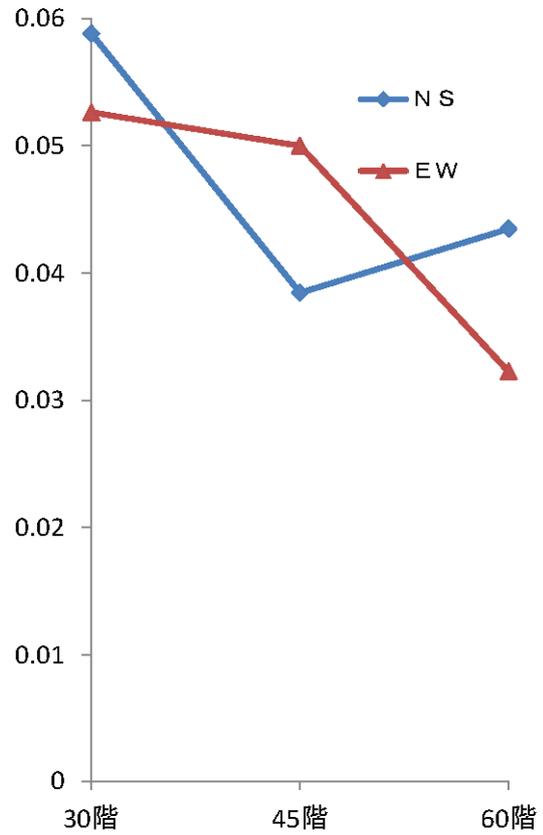
	性能評価項目	損傷限界	安全限界 余裕度 I	安全限界 余裕度 II	安全限界	安全限界 超過	
	判断値 $\lambda$	4	3	2	1	0	
建物機能	機能	機能維持	主要機能確保	指定機能確保	限定機能確保	機能確保困難	
	層間変形角 R (rad)	1/200 以下	1/200-1/150	1/150-1/100	1/100-1/75	1/75 以上	
	床加速度 a (cm/s <sup>2</sup> )	—	250 以下	250-500	500-1000	1000 以上	
構造部材	部材損傷度	無損傷	軽微	小損	中損～大損	大損以上	
	部材塑性率 $\mu_m$	1.0 以下	1.0-2.5	2.5-3.75	3.75-5.0	5.0 以上	
	累積塑性変形 倍率 $\eta_m$	JASS6 型	0	0-5.4	5.4-12.0	12.0-21.5	21.5 以上
		ノンスラップ <sup>o</sup>	0	0-9.0	9.0-20.5	20.5-36.5	36.5 以上
	梁端混用	0	0-3.5	3.5-7.5	7.5-13.5	13.5 以上	

層間変形角

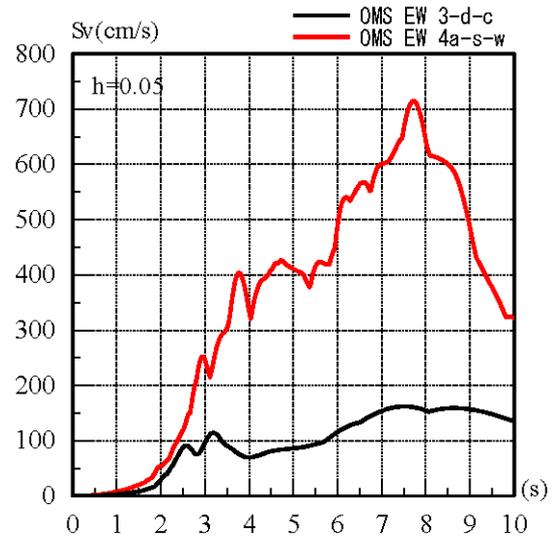
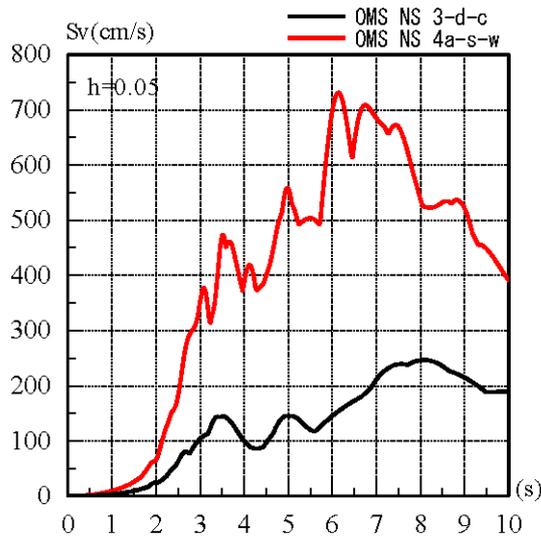


標準ケース

層間変形角



最大ケース



NS (黒：標準ケース、赤：最大ケース)

EW (黒：標準ケース、赤：最大ケース)

図 3.5-5 最大層間変形角と地震動特性 (大阪舞洲の例)。

表 3.5-5 30 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/410	1/161	1/79	1/246	1/177	1/100	1/234
	最大加速度(Gal)	73	168	389	128	171	336	133
	判定値 $\lambda$	4	3	1	4	3	2	4
	機能確保	機能維持	主要機能確保	限定機能確保	機能維持	主要機能確保	指定機能確保	機能維持
構造部材	部材塑性率	0.35	0.87	2.64	0.55	0.75	1.70	0.58
	累積塑性変形倍率	0	0	5	0	0	5	0
	判定値 $\lambda$	4	4	2	4	4	3	4
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	小損	無損傷	無損傷	軽微	無損傷

表 3.5-6 45 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/583	1/67	1/85	1/169	1/183	1/94	1/104
	最大加速度(Gal)	39	262	242	135	119	250	206
	判定値 $\lambda$	4	0	1	3	3	1	2
	機能確保	機能維持	機能確保困難	限定機能確保	主要機能確保	主要機能確保	限定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.26	3.97	2.34	0.79	0.75	2.01	1.71
	累積塑性変形倍率	0	6	6	0	0	4	3
	判定値 $\lambda$	4	1	3	4	4	3	3
	構造部材損傷度	無損傷	中～大損	軽微	無損傷	無損傷	軽微	軽微

表 3.5-7 60 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/627	1/78	1/75	1/236	1/206	1/125	1/132
	最大加速度(Gal)	39	227	237	83	115	141	150
	判定値 $\lambda$	4	1	0	4	4	2	2
	機能確保	機能維持	限定機能確保	機能確保困難	機能維持	機能維持	指定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.25	2.83	2.95	0.62	0.68	1.32	1.09
	累積塑性変形倍率	0	10	16	0	0	1	0
	判定値 $\lambda$	4	2	1～2	4	4	3	3
	構造部材損傷度	無損傷	小損	中損	無損傷	無損傷	軽微	軽微

表 3.5-8 30 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/73	1/118	1/17	1/57	1/104	1/47	1/30
	最大加速度(Gal)	440	246	541	476	315	473	415
	判定値 $\lambda$	0	2	0	0	2	0	0
	機能確保	機能確保困難	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	2.87	1.38	19.42	3.93	1.71	6.19	8.34
	累積塑性変形倍率	18	1	235	58	6	62	75
	判定値 $\lambda$	1~2	3	0	0~1	2~3	0	0
	構造部材損傷度	中損	軽微	大損以上	大損	小損	大損以上	大損以上

表 3.5-9 45 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/115	1/51	1/26	1/65	1/91	1/49	1/32
	最大加速度(Gal)	218	278	429	287	231	310	369
	判定値 $\lambda$	2	0	0	0	1	0	0
	機能確保	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	1.15	8.36	9.58	3.26	2.13	6.98	14.65
	累積塑性変形倍率	0	33	174	34	16	44	99
	判定値 $\lambda$	3	0	0	0~1	1~3	0	0
	構造部材損傷度	軽微	大損以上	大損以上	大損	小損	大損以上	大損以上

表 3.5-10 60 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/169	1/69	1/23	1/88	1/98	1/50	1/39
	最大加速度(Gal)	170	251	420	232	204	288	317
	判定値 $\lambda$	3	0	0	1	1	0	0
	機能確保	主要機能確保	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保	限定機能確保	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	0.81	3.24	11.22	2.33	2.02	4.97	6.46
	累積塑性変形倍率	0	31	149	16	1	44	96
	判定値 $\lambda$	4	0~1	0	1~2	3	0~1	0
	構造部材損傷度	無損傷	大損	大損以上	中損	軽微	大損	大損以上

(E) 長周期地震動を表す尺度の検討

長周期地震動の揺れに対する尺度としては、タンクのスロッシングなどのように固有周期で揺れる構造物については、速度応答スペクトルのように周期ごとの揺れの尺度を用いることが合理的である。しかし、特定の構造物ではなく様々な超高層ビルや免震構造物が建っている都市部のある地域での長周期地震の揺れを一般的に示す尺度としては、低層の建物や地上にいる住民に対する尺度である通常の震度のように周期に対して包括的で分かりやすいものが望ましい。そこで、長周期帯域の人間の体感（行動難度、不安度）の周期特性（高橋・他、2007）などを参考に、計測震度を算定する際に用いられるフィルタの振動数帯域を長周期側に変更した、神田・他（2012）による以下の尺度を示す。

計測震度は、時刻歴波形各成分の加速度フーリエスペクトルに対して、以下の三種類のフィルター

$$(k/f)^{1/2} \quad (3.5-2)$$

$$(1+0.694X^2+0.241X^4+0.0557X^6+0.009664X^8+0.00134X^{10}+0.000155X^{12})^{-1/2} \quad (3.5-3)$$

$$[1-\exp\{-(f/f_0)^3\}]^{1/2} \quad (3.5-4)$$

ただし、 $X=ff_c$

を通した後にフーリエ逆変換する。ベクトル合成波形の振幅があるレベル  $a$  以上となる時間を  $\tau(a)$  とすると、ちょうど  $\tau(a_0)=\tau_0$  となる  $a_0$  を求め、

$$I=2\cdot\log a_0+c \quad (3.5-5)$$

により求める。長周期震度は、パラメータ  $f_c$ 、 $f_0$ 、 $\tau_0$  および  $c$  を変えることによって定められる。ここでは、 $f_c=1$  (Hz)、 $f_0=0.05$  (Hz)、 $\tau_0=3.0$  (秒)、 $c=1.5$  として、南海トラフの地震のシミュレーション結果に対して求めたものを表 3.5-11 に示す。先に示した応答解析結果において、被害が生じる可能性が高いとされた地点（大阪舞洲など）で大きな値となっていることがわかる。なお、 $c$  の値は、震度 4 以上の領域面積がほぼ同じになるように調整されている。

表 3.5-11 南海トラフの地震のシミュレーション結果に対して求められた長周期地震動の尺度（長周期震度）。ケース名については、表 3.4-2 を参照。

領域	トラフ 沿い	深さ	破壊		大分県庁	大阪舞洲	大阪府庁	四日市市 役所	愛知県庁	静岡県庁	東京都庁
ANNI1		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.8	4.3	4.4	4.7
		s	e	cas	4.8	5.4	4.5	4.9	3.5	2.5	3.4
ANNI2		s	c	cas	2.5	4.3	3.7	4.5	4.3	4.9	5.4
ANNI3		d	w		3.6	6.1	5.3	5.8	5.3	5.6	5.8
		s	w		4.1	6.4	5.7	6.3	5.3	5.5	6.0
		s	w	cas	3.8	6.1	5.4	6.0	5.1	5.2	5.4
		d	c		5.8	6.0	5.2	5.1	4.8	5.5	5.5
		s	c		5.2	5.5	4.8	5.2	4.6	5.2	5.7
		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
		d	e		6.0	5.4	4.7	5.4	4.6	5.5	5.7
		s	e		5.2	5.7	4.8	5.3	4.2	5.1	5.8
ANNI4		s	e	cas	4.8	5.3	4.5	4.9	3.8	4.7	5.5
	a	s	w		4.6	6.9	6.2	6.6	5.6	5.5	6.1
	b	s	w		4.4	6.4	5.8	6.4	5.4	5.5	6.1
	c	s	w		4.2	6.4	5.8	6.4	5.9	5.9	6.3
	a	d	c		5.9	6.0	5.2	5.2	4.9	5.6	5.6
	b	d	c		5.8	6.0	5.2	5.3	5.1	5.6	5.5
	c	d	c		5.8	6.0	5.3	5.9	6.0	5.7	6.0
	a	s	c		5.9	5.6	4.9	5.3	4.7	5.3	5.8
	a	s	c	cas	5.1	5.3	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
	a	s	c	box	5.3	5.5	4.8	5.3	4.7	5.3	5.8
	b	s	c		5.4	5.8	5.0	5.5	5.2	5.3	5.8
	c	s	c		5.2	5.7	5.0	6.0	6.0	5.7	6.1
	c	s	c	cas	4.9	5.3	4.5	5.3	5.4	5.1	5.5
	c	s	c	box	5.2	5.5	4.9	5.3	5.1	5.3	5.8
	c	s	c	qi	5.6	6.2	5.5	6.6	6.4	5.9	6.5
	b	d	e		6.0	5.8	5.1	5.4	4.6	5.6	5.7
a	s	e		5.7	5.8	4.9	5.3	4.3	5.1	5.9	

7
6強
6弱
5強
5弱

(F) 耐震診断システムの検討

長周期地震動予測地図の成果は、地図のほか、最大速度や応答スペクトル、時刻歴波形として提示されているが、これらの情報をより一般に活用できるようにするため、長周期地震動予測結果に基づく耐震診断システムの概念に関する検討を実施した。

ここでは、住所、階数、居住階、構造種別などの簡単を入力データとして、標準的な建物を想定して、構造的損傷、家具転倒率、エレベータの運転状況、強い揺れの継続時間な

どを判定するものとした。耐震診断システムのフローチャートを図 3.5-6 に示す。

上述の評価項目の中には、既存の方法だけでは評価が難しい項目が含まれており、具体化するにあたっては技術的な検討が必要である。

#### (G) 長周期地震動対策

長周期地震動による被害の低減のために、まず、構造物被害の観点からは、長周期地震動を受ける超高層建物の揺れの振幅を低減しつつ、揺れの継続時間を短縮する、オイルダンパーや粘性系の制震装置が有効と思われる。

一方、超高層建物内の施設の耐震対策としては、エレベータの耐震性向上や閉じ込め対策の整備が必須となる。

また、必ずしも長周期地震動によって生じる被害ではない場合もあるものの、超高層ビルにおける耐震対策として、スプリンクラーや水槽等の耐震性の向上、ライフライン設備の多重化・分散化、非構造部材である壁や天井の落下の防止、ガラスの飛散防止フィルムを施すなどのハード的な対策が挙げられる。さらに、家具の転倒防止のための固定方法については、東京消防庁（2010）によりまとめられている「家具類の転倒・落下防止対策ハンドブックー室内の地震対策ー」が参考になる。

一方で、避難に関わる事前対策（避難誘導マニュアルの整備や訓練の実施）や不安心理軽減に関わる事前対策（事前の揺れの周知や被害情報の発信）といったソフト的な対策もきわめて有効である。

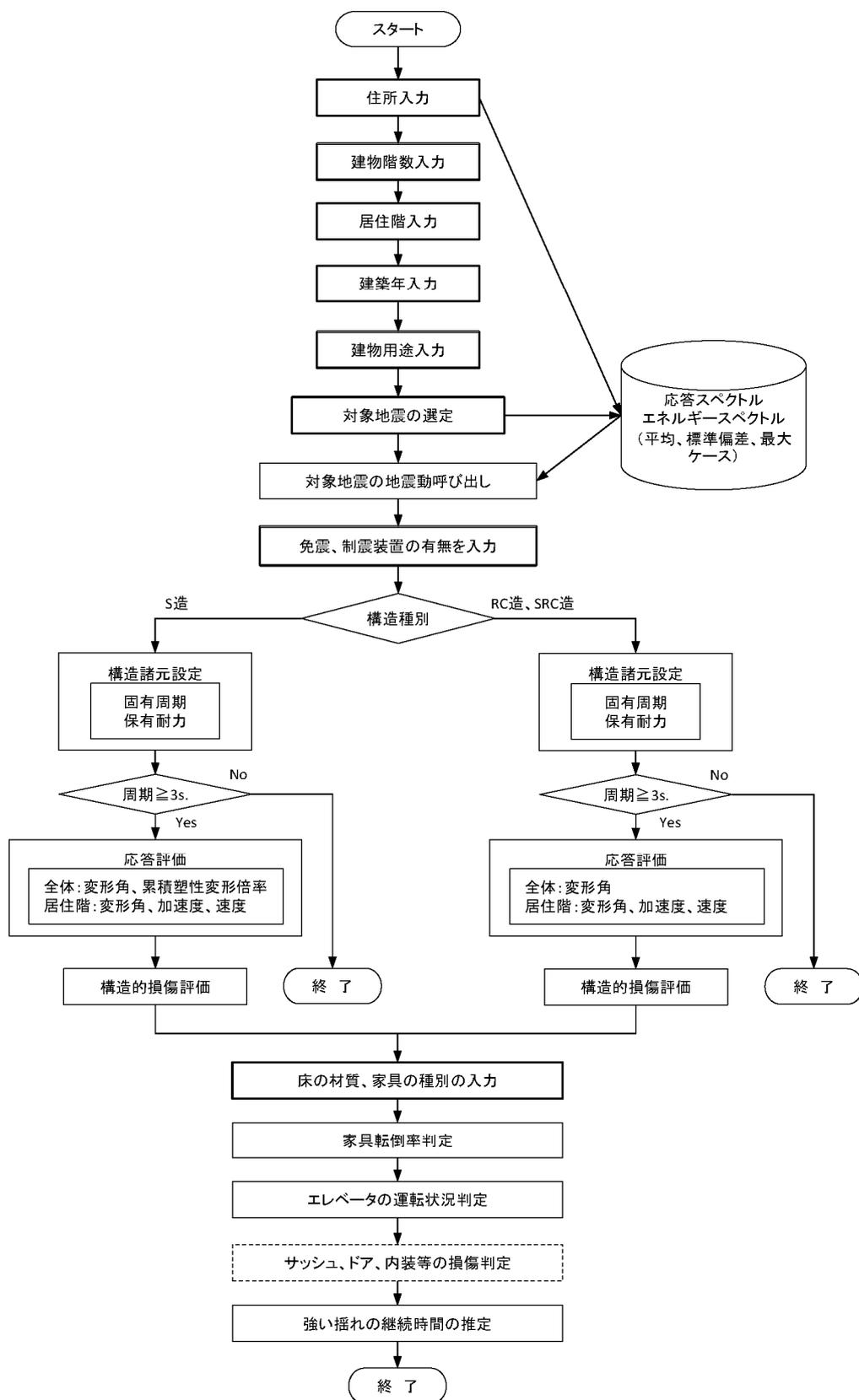


図 3.5-6 耐震診断システムの概念のフローチャート。

## 2) アプリケーションの開発

長周期地震動に関する情報や知識をより広くかつ分かりやすく伝えるため、ユーザーが必要とする任意の場所にける長周期地震動に関する情報の提供方法について検討した。また、長周期地震動の伝播の様子を伝える動画を作成するとともに、近年急速に普及が進んでいるスマートフォンを用いたアプリケーションを開発した。

### (A) 長周期伝播動画の作成

ユーザーが必要とする任意の地点における長周期地震動に関する情報を提供する手段として、「全国地震動予測地図」の公開システムとして開発されてきた地震ハザードステーション（藤原・他、2009）に、「長周期地震動予測地図」2012年試作版（地震調査委員会、2012）のコンテンツを追加する検討を実施した。これにより、Google Map 上での地図の拡大・縮小や地点検索機能を用いて任意の地点の長周期地震動予測結果などの情報を取得することが可能となる。

一方、震源から遠方の平野部においても長時間継続する長周期地震動によりどのような揺れに見舞われるかを視覚的に理解するためには、単純な最大振幅による地図の表示だけでなく震源からのどのくらいの時間で到達するのかや揺れがどれくらいの時間続くのかといった時間軸を含む可視化が重要である。そのためには、長周期地震動が伝播する様子を動画で伝えることは有効である。ここでは、「長周期地震動予測地図」2012年試作版の長周期地震動シミュレーション波形データを用いて、長周期地震動伝播の動画を作成した（図 3.5-7）。これらの動画データは、Windows 及び Mac いずれのコンピュータでも再生可能な形式で保存するとともに、YouTube にアップロードすることにより、スマートフォン等のアプリケーションを用いて閲覧することもできるようにした。

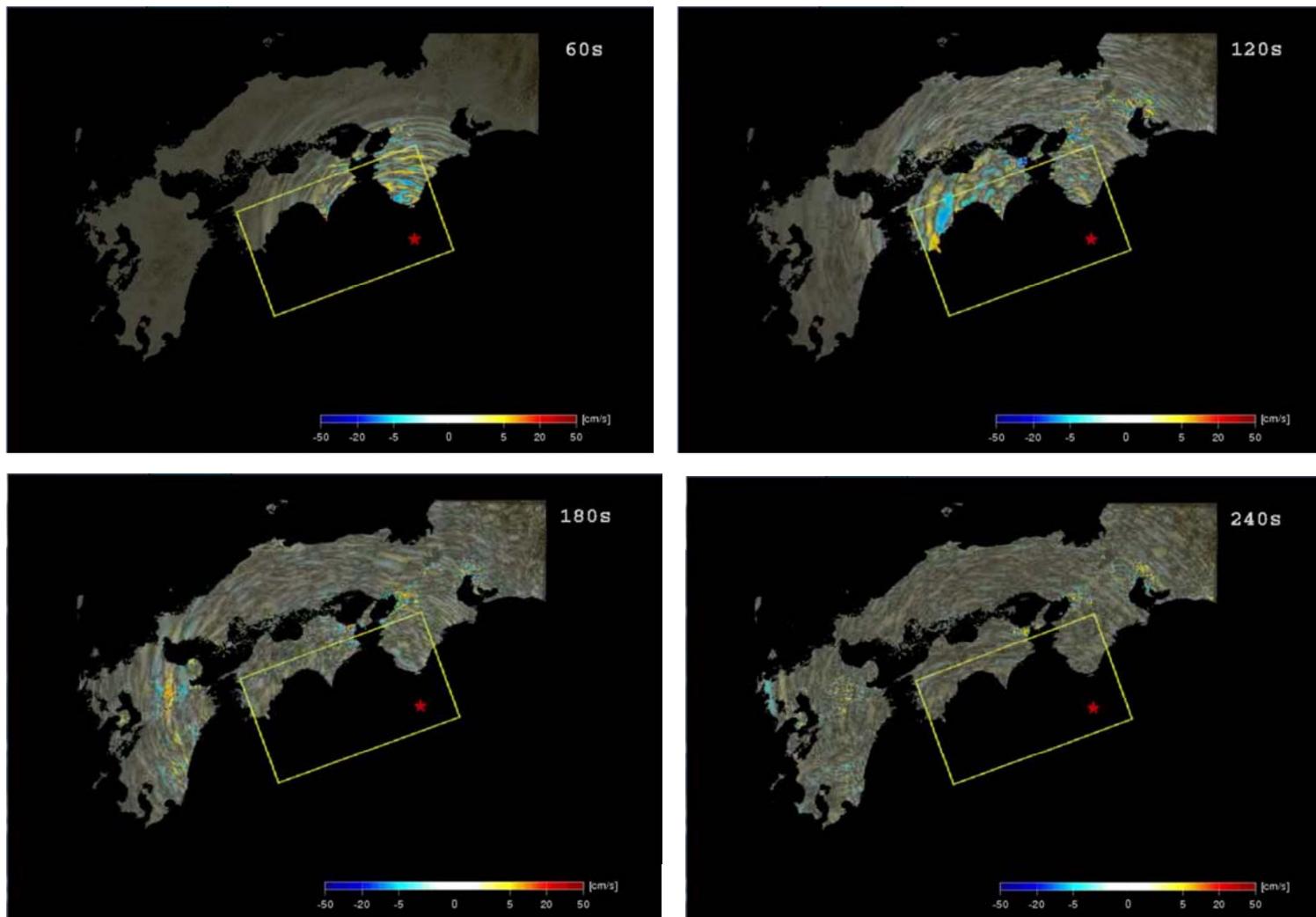


図 3.5-7 長周期地震動予測地図 2012 年試作版－南海地震（昭和型）－の動画。

## (B) スマートフォン用アプリケーションの開発

スマートフォンに関連する技術の発展は近年めざましいものであるとともに、利用者（ユーザー）も急速に増加している。このようなスマートフォンを用いて長周期地震動に関するアプリケーションを開発することにより、広く一般にその情報や知識を提供することが可能になると考えられる。ここでは、長周期地震動による高層ビルの最上階での揺れを表示する「ゆれビル」、長周期地震動による揺れのシミュレーション動画を見ることができる「ゆれの伝わり方」、防災科学技術研究所が YouTube へ登録している長周期地震動に関する実験等の動画を見ることができる「防災科研チャンネル」を開発した。これらのアプリケーションは、長周期地震動予測地図試作版（地震調査委員会、2009、2012）のデータをもとに作成した。なお、各アプリケーション Android OS 2.1 または iOS4.0 に対応しており、現在普及している Android 及び iPhone いずれのスマートフォンにおいても多くのユーザーが利用できるものとなっている。

「ゆれビル」は、地震の種類と都道府県庁所在地などの地点を選択する（図 3.5-8 左）ことにより、選択地点におけるビルの中での揺れの様子を人の動きと波形で表示する。ここで、「長周期地震動予測地図」試作版の選択地点に最も近い波形データをもとに、100 階建てまでのビルの応答を減衰定数及び固有周期を仮定することにより簡便に評価して再現している（図 3.5-8 右）。また、震源から遠い地点では揺れはじめるまで時間がかかることから、早送りの機能を付けている。



図 3.5-8 「ゆれビル」の画面の例。

「ゆれの伝わり方」(図 3.5-9) は、(A) で作成した南海地震(昭和型)をはじめとした長周期地震動シミュレーション結果の動画の閲覧を YouTube にアップロードしたファイルに対して、動画を再生するアプリケーションを起動することにより実現している。

「波形の達人」は、スマートフォンに内蔵されている加速度センサーを利用して、地震及び地点を選択し、画面に表示された長周期地震動の波形に合わせて動かす(揺らす)ことにより、長周期地震動を体感することができる。三通りの難易度があり、波形の一致度に応じて得点が設定されており、ゲーム感覚で長周期地震動を知ることができる。



図 3.5-9 「ゆれの伝わり方」の地震選択画面の例。

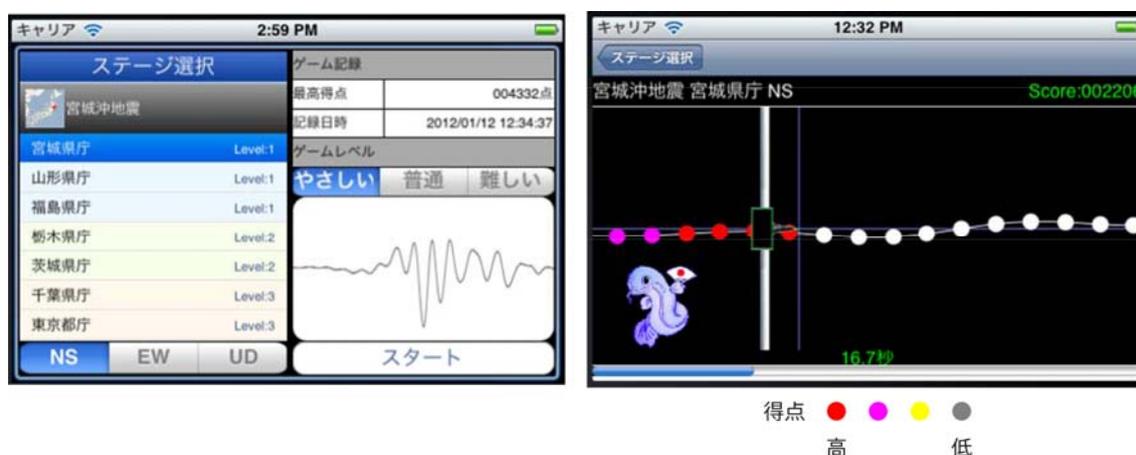


図 3.5-10 「波形の達人」の画面の例。左：波形、難易度選択画面、右：実行中画面。

さらに、スマートフォンアプリケーション「J-SHIS」に、「長周期地震動予測地図」試作版のコンテンツを追加した（図 3.5-11）。これにより、長周期地震動予測地図をスマートフォン上で閲覧できるだけでなく、特定の地点に対する詳細な情報を入手することもできる（図 3.5-12、3.5-13）。スマートフォンのアプリケーションにおいては、地点検索機能だけでなく、web 版にはない GPS 機能を使用することにより、ユーザーが現在いる地点の情報を入手することも可能である。

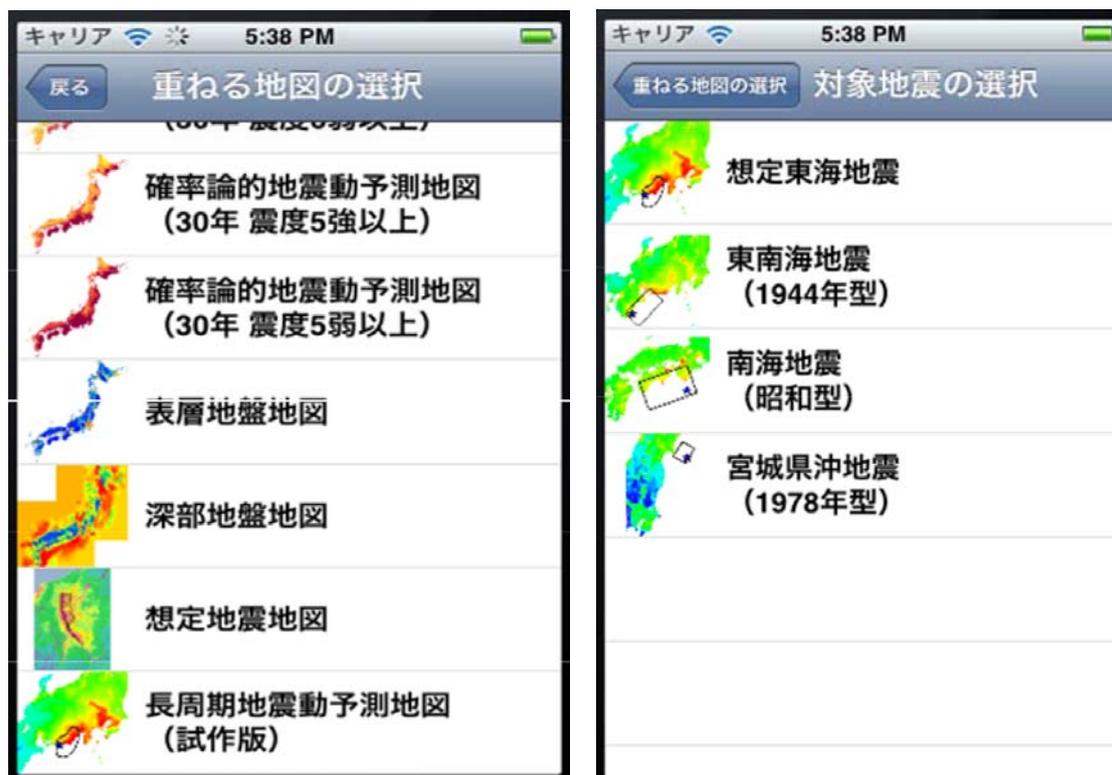
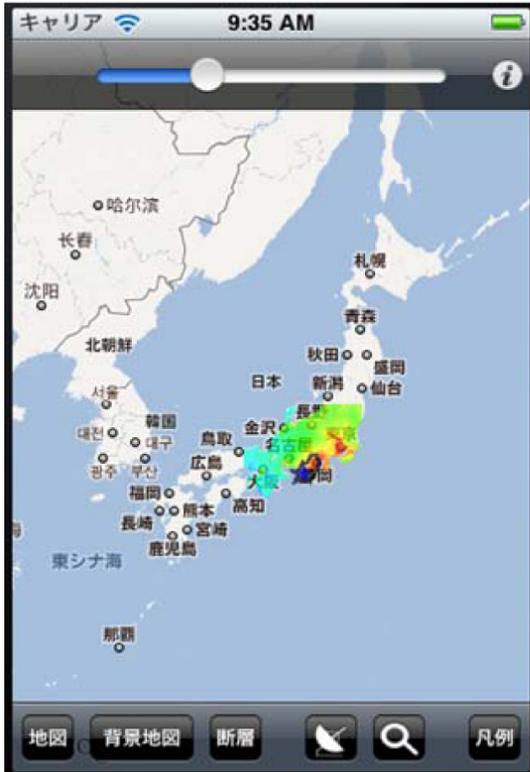
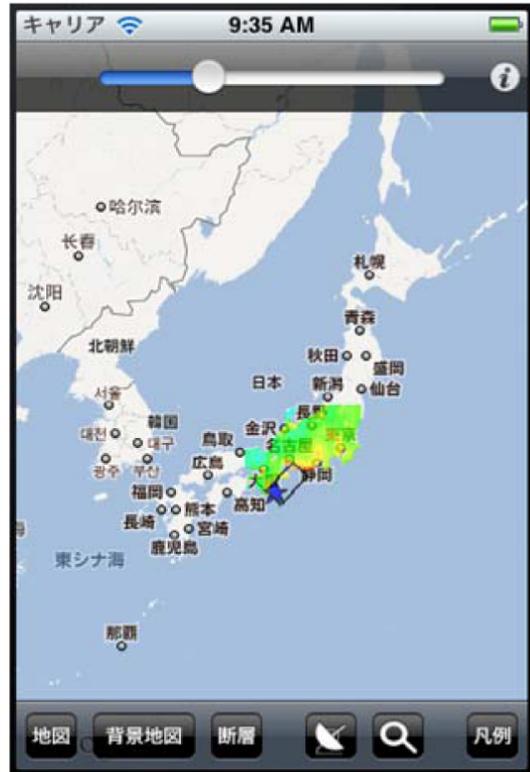


図 3.5-11 アプリケーション「J-SHIS」に追加された長周期地震動に関するコンテンツ。

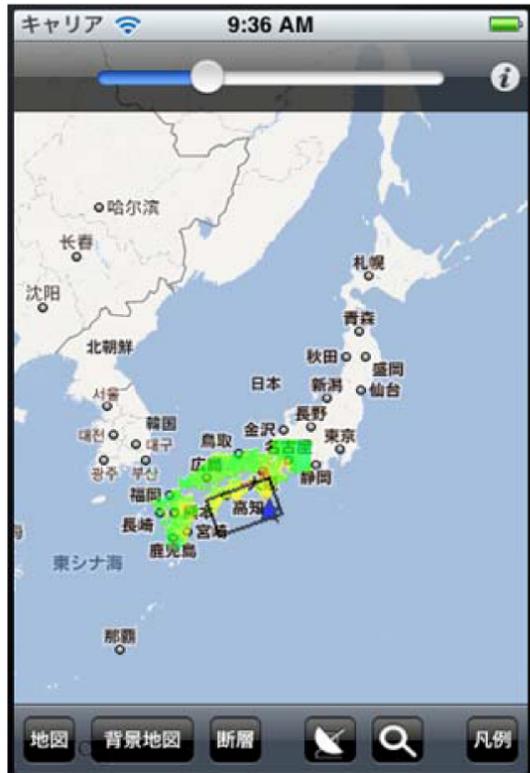
想定東海地震



東南海地震 (1944 年型)



南海地震 (昭和中)



宮城県沖地震 (1978 年型)

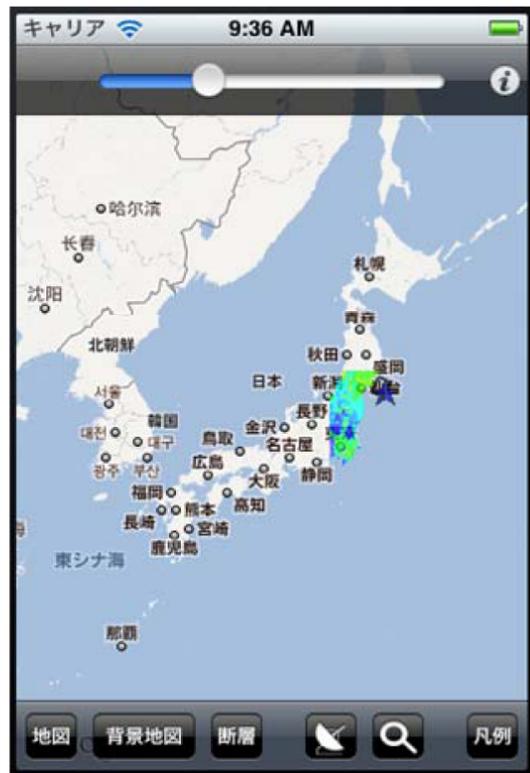


図 3.5-12 長周期地震動予測地図の表示例。

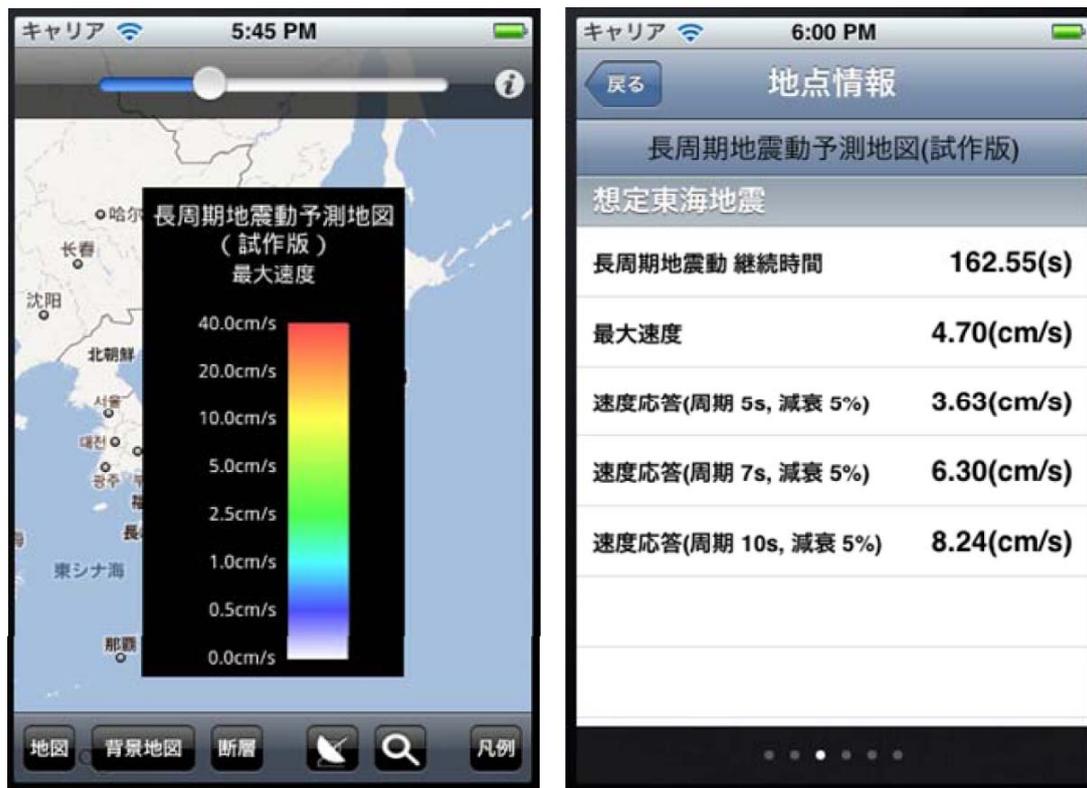


図 3.5-13 長周期地震動予測地図の凡例と地点情報の表示例

(c) 結論ならびに今後の課題

長周期地震動に関する解説書の作成を試みるとともに、様々な機種で利用できるスマートフォンアプリケーションを開発したことにより、長周期地震動に関する知識等の普及や長周期地震動予測地図の利活用を促進するためのツールが揃ってきた。また、J-SHIS とあわせて、長周期地震動予測地図だけでなく、全国地震動予測地図をはじめとした地震ハザードに関する網羅的な情報の提供が可能となる。今後は、解説書をウェブページ等においても閲覧できるようにするなどにより、さらに多くの人を対象として広く知識等を普及するための方策を進めることも必要である。また、情報を一方的に発信するだけでなく、利用者側から意見等を反映して機能の改良や追加といった高度化を行うことで、さらに利用や理解が深まると考えられ、防災意識の向上につながることを期待される。

(d) 引用文献

- 1) 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・若松加寿江・石川裕・奥村俊彦・石井透・松島信一・早川穰・遠山信彦・成田章, 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 336 号, 2009.
- 2) 長谷川隆・福元敏之・時野谷浩良・寺田岳彦・成原弘之・金子洋文・小鹿紀英, 長周期

- 地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討 その 1 全体研究計画，日本建築学会学術講演梗概集 C-1，1013-1014，2011，
- 3) 平山昌宏・斉藤大樹・長江拓也・森田高市，排水と配水管系の耐震性 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験—その 8，日本建築学会学術講演梗概集 C-1，877-878，2008.
  - 4) 堀郁夫・川端鋭憲，地震による石油タンク火災の技術的考察と社会問題，社会技術研究論文集，2，414-424，2004.
  - 5) 出水俊彦・斉藤大樹・福山洋・森田高市・向井智久・濱田真・菊田繁美・金川基・薬研地彰・佐々木仁，長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造性能 その 1 地震応答性状，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，499-500，2009.
  - 6) 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.
  - 7) 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—南海地震（昭和型）の検討—，2012.
  - 8) 神田克久・小鹿紀英・武村雅之・藤原広行，長周期地震動の尺度の検討，日本建築学会学術講演梗概集，2012（投稿中）.
  - 9) 金子美香・中村豊，家具転倒防止器具の振動台実験，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，437-438，2005.
  - 10) 城戸史郎・石塚悠伍・藤谷秀雄・長江拓也，長周期地震動を受ける超高層建築物のオフィス空間の家具等の挙動，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，263-264，2009.
  - 11) 北村春幸・宮内洋二・浦本弥樹，性能設計における耐震性能判断基準に関する研究，日本建築学会構造系論文集，604，185-191，2006.
  - 12) 日本地震工学会・日本建築学会，2010 年 2 月 27 日チリ・マウレ地震被害調査報告書，2010.
  - 13) 太田外気晴・座間信作，巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策，共立出版，2005.
  - 14) 斉藤大樹・高橋徹・小豆畑達哉・野口和也・箕輪親宏，大振幅の揺れを再現可能とする大ストローク振動台の開発とその性能検証実験，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，473-474，2006.
  - 15) 酒入行男・山岸秀之・中田信治・花井勉・福和伸夫・鶴田庸介・鈴木章弘・飛田潤，家具転倒防止対策促進のための振動実験・シミュレータウェブの作成，日本建築学会技術報告集，第 13 巻第 26 号，463-468，2007.
  - 16) 関松太郎・長江拓也・鍾育霖・福山國夫・梶原浩一・井上貴仁・中島正愛・斉藤大樹，非構造間仕切り壁の損傷過程 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験その 7，日本建築学会学術講演大会梗概集 C-1，875-876，2008.
  - 17) 鍾育霖・長江拓也・梶原浩一・福山國夫・井上貴仁・中島正愛・北村春幸・日高桃子，鋼構造架構の破壊形式と保有性能 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実

- 験—その 6, 日本建築学会学術講演梗概集 C-1, 873-874, 2008.
- 18) 鈴木稔子・鈴木典子・高橋徹・斉藤大樹・森田高市・野口和也・小豆畑達哉・箕輪親宏, 避難行動限界の周波数特性に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, 809-810, 2009.
- 19) 鈴木芳隆・那須正・福島出・小鹿紀英・渡部裕一, エレベータ・ロープの震動と長尺物振れ管制運転に関する研究, 構造工学論文集, 56B, 2010.
- 20) 田邊祐介・石川裕次・木村秀樹・前田匡樹・福山洋・壁谷沢寿一・宮内靖昌, 多数繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造柱の耐震性能 その 3 長周期地震動に対する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 C-2, 171-172, 2011.
- 21) 高橋徹・貞弘雅晴・斉藤大樹・小豆畑達哉・森田高市・野口和也・箕輪親宏, 長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, 497-498, 2007.
- 22) 東京消防庁, 家具類の転倒・落下防止対策ハンドブック—室内の地震対策—, 2010.
- 23) 座間信作・西晴樹・畑山健・山田實・廣川幹浩・井上涼介・柳沢大樹, 屋や長周期地震動と石油タンクのスロッシング, 月刊地球, 号外 49, 197-203, 2005.

#### 4. 全体成果概要

プレート境界構造に関する既往のモデルや地下構造探査のデータ及び資料を収集・整理した。南西諸島及び日本海東縁部の海域のプレート境界構造の初期モデルを作成し、「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」と統合した。

2003年十勝沖地震を対象として、広帯域地震動の観測記録に基づいた複数の震源モデルにおける震源時間関数について比較検討を実施した。結果として、マグニチュード8クラス以上の巨大地震における理論的な手法による計算を高度化するために、現状の特性化震源モデルにおいて設定されるアスペリティよりも小さいスケールの不均質性を与える必要があることを明らかにし、k-2モデルを適用することを提示し、2003年十勝沖地震に適用し、地震動シミュレーションを実施した。観測記録との比較により、従来の短周期成分の振幅の落ち込みが改善されるという手法の有効性を示した一方で、パラメータの詳細な設定方法についてはさらなる検討が必要であることを示した。

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。

過去の地震により観測された長周期地震動及びそれより被害が生じたと考えられる事例について収集・整理した。長周期地震動シミュレーション結果を基に超高層ビルの応答解析を実施し、予想される被害などに基づいて、構造物の長周期地震動による影響を表すための揺れの尺度を提案した。以上の長周期地震動そのものの性質やそれにより生じ得る被害に加えて、具体的な対策例を挙げることにより、長周期地震動予測地図の活用を促進するための解説書を作成した。「長周期地震動予測地図」2012年試作版のデータに基づき、地震波伝播の動画を作成し、提供するシステムを開発した。多様な機種の手持端末（スマートフォン）で利用できる、ユーザーが今いる場所での地震動に関する情報を入手でき、かつ、分かりやすく可視化するアプリケーションを開発した。また、スマートフォン用のアプリケーション J-SHIS において長周期地震動伝播の動画を再生する機能を開発した。

## 5. 成果の対外発表

### (a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
渡辺基史・藤原広行・森川信之・奥村俊彦	海溝型巨大地震の震源モデル設定手法についての考察（口頭）	日本地震学会 2011 年度秋季大会（国内）	2011 年 10 月 12 日
前田宜浩・森川信之・青井真・藤原広行	南海トラフの巨大地震による長周期地震動に関する検討（ポスター）	日本地震学会 2011 年度秋季大会（国内）	2011 年 10 月 13 日

### (b) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

#### 1) 特許出願

なし。

#### 2) ソフトウェア開発

なし。

#### 3) 仕様・標準等の策定

なし。

## 6. むすび

長周期地震動予測地図作成の本格化へ向けて、本研究では地下構造モデルを南西諸島まで拡張するとともに、長周期地震動予測の高度化に向けて、従来の特性化震源モデルの改良方策を具体的に提示するなどの成果が得られた一方で、今後の課題として以下のことが明らかとなった。

- ・海溝型巨大地震の広帯域地震動予測の高度化に向けて、現状の「レシピ」で設定される特性化震源モデルにアスペリティよりも不均質性を導入する必要であり、 $k=2$ モデルの導入が有効であることが確かめられたが、その具体的なパラメータの設定方法について、さらに検討する必要がある。
- ・ハイブリッド合成法における接続周期付近での落ち込みを改善するために、震源モデルにおけるそれぞれの計算手法での適切な要素断層の大きさの検討、及び地下構造モデルのさらなる高精度化が必要である。
- ・破壊開始点やアスペリティ位置などの不確実性を考慮した多数の震源モデルによる地震動シミュレーションにより得られる地震動群について、予測結果としてどのような形で提示していくべきかさらなる検討が必要である。また、大量の計算を実施する上で、計算そのものだけでなく、入出力も含めた高速化が必要である。

これらに加えて、日本周辺における観測史上最大規模の 2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w=9.0$ ) が発生したことを踏まえ、南海トラフにおいても発生の可能性があると考えられるマグニチュード 9 クラスの超巨大地震に対する手法の検証も必要である。