

令和元年度原子力規制庁委託成果報告書

海溝型地震による地震動の評価手法の検討

株式会社大崎総合研究所

令和2年2月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1. 序 論	1-1
1.1 はじめに.....	1-1
1.2 目 的	1-2
1.3 事業内容及び方法	1-3
1.4 実施体制.....	1-5
2. プレート間巨大地震の地震動評価の検討	2.1.1-1
2.1 プレート間巨大地震の地震動解析.....	2.1.1-1
2.1.1 2015年チリ Illapel 地震のアスペリティモデルの設定	2.1.1-1
2.1.2 2015年チリ Illapel 地震の地震動再現解析	2.1.2-1
2.1 節の参考文献	参 2.1-1
2.2 プレート間地震のスケーリング則等の検討	2.2.1-1
2.2.1 プレート間地震の地震動特性の調査	2.2.1-1
2.2.2 プレート間地震のスケーリング則の調査.....	2.2.2-1
2.2.3 プレート間地震の震源断層パラメータの整理・分析.....	2.2.3-1
2.2.4 プレート間地震の地震動特性の整理・分析.....	2.2.4-1
2.2.5 スロー地震の文献調査	2.2.5-1
2.2 節の参考文献	参 2.2-1
3. 海洋プレート内地震の地震動評価の検討	3.1.1-1
3.1 スラブ内地震の地震動解析	3.1.1-1
3.1.1 2017年メキシコ Puebla 地震の地震観測記録の収集及び波形処理.....	3.1.1-1
3.1.2 2017年メキシコ Puebla 地震の長周期インバージョン解析	3.1.2-1
3.1.3 2017年メキシコ Puebla 地震の特性化震源モデルの設定	3.1.3-1
3.1.4 2017年メキシコ Puebla 地震の地震動再現解析	3.1.4-1
3.1.5 2018年アラスカ Anchorage 地震の地震観測記録の収集及び波形処理	3.1.5-1

3.1.6 2018 年アラスカ Anchorage 地震の長周期インバージョン解析.....	3.1.6-1
3.1 節の参考文献.....	参 3.1-1
3.2 スラブ内地震のスケーリング則等の検討.....	3.2.1-1
3.2.1 スラブ内地震の地震動特性の調査.....	3.2.1-1
3.2.2 スラブ内地震のスケーリング則の調査.....	3.2.2-1
3.2.3 スラブ内地震の断層パラメータの整理・分析.....	3.2.3-1
3.2.4 スラブ内地震の地震動特性の整理・分析.....	3.2.4-1
3.2 節の参考文献.....	参 3.2-1
4. 結 論.....	4-1

1. 序 論

1.1 はじめに

基準地震動策定において想定地震は、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震の 3 つのタイプに分けて、それぞれの検討用地震を選定して地震動評価が行われている。特に、プレート間地震及び海洋プレート内地震の海溝型地震に関して、「国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構及びテクトニクス的背景の類似性を考慮した上で震源領域の設定を行うこと」が新規制基準で規定されている。

プレート間地震は、数十年程度の比較的短い周期で繰り返し発生する大規模地震の場合、過去の地震に対する調査研究で得た知見を基に、想定地震の発生場所や規模を推測できる。2011 年東北地方太平洋沖地震のような数百年程度の比較的長い周期で繰り返し発生するプレート間巨大地震は、国内の事例が少ないため、世界中で起きた巨大地震、特に観測記録が得られた巨大地震の調査研究が重要である。特に、短周期地震動について日本の手法で解析を行った事例は非常に少ないため、国外で起きた地震の観測記録を収集して国内と同様の解析を実施することが重要となる。

海洋プレート内地震は、特に敷地周辺で深さ数十 km 以上の深い場所で発生する場合、地表に痕跡が残っておらず、また、発生周期も特定されていないため、想定地震の発生場所や規模の推定は非常に困難である。さらに、敷地周辺で発生する海洋プレート内地震は、他のタイプの同規模の地震に比べて大きな短周期地震動を生ずるため、地震動評価において震源特性を明確にすることは重要である。

1.2 目 的

本研究では、断層モデルを用いた手法（以下「断層モデル法」という。）による地震動評価の精度向上のため、国内外で起きた海溝型地震を対象に、地震動解析や分析等を実施することとし、以下2項目の内容を実施する。

- (1) プレート間巨大地震の地震動評価の検討
- (2) 海洋プレート内地震の地震動評価の検討

1.3 事業内容及び方法

1.3.1 プレート間巨大地震の地震動評価の検討

「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」（以下「強震動予測レシピ」という。）は、強震動評価に関する既往の検討結果から、断層モデル法における震源特性パラメータの設定等について取りまとめた標準的な手法として、地震調査研究推進本部（以下「地震本部」という。）で公開されている（詳細は http://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf を参照）。強震動予測レシピでまとめたプレート間地震の震源特性パラメータの設定方法は、主に 1978 年宮城県沖地震や 2003 年十勝沖地震の地震動評価を踏まえて提案されたものであり、2011 年東北地方太平洋沖地震のようなプレート間巨大地震による地震動を評価するためには、過去の巨大地震の震源特性及び地震評価に関する知見を反映することが重要である。

そこで、本事業では、プレート間巨大地震を対象とし、地震動評価に用いた震源特性パラメータの設定手法の高度化を行うことを目的とし、以下の項目を実施する。

(1) プレート間巨大地震の地震動解析

国内外で発生したプレート間巨大地震（一つ以上）を対象に、(周期 1 秒以下) 短周期地震動に着目した特性化震源モデルの構築を検討し、強震動予測レシピの適用性に関する検証解析を行うとともに、プレート間巨大地震の地震動評価における現状及び課題についてまとめる。検討地震の選定、検討手法等の詳細は、原子力規制庁担当者と協議して決定する。

(2) プレート間地震のスケーリング則等の検討

国内外で発生したプレート間地震を対象に、(1)で得られた震源断層パラメータに加え、既往研究で得られた震源断層パラメータや地震動特性等に関するデータを整理・分析し、既往スケーリング則等との比較を行う。

1.3.2 海洋プレート内地震の地震動評価の検討

海洋プレート内地震は、海溝の海側の沈み込むプレート内で起きるやや浅い地震（所謂「アウターライズ地震」）と沈み込んだプレート内（スラブ内）で起きるやや深い地震（以下「スラブ内地震」という。）、2種類に分けられており、本事業では、震源が陸に近い且つ強震動が生じやすい後者のスラブ内地震を検討対象とする。地震本部では、国内のスラブ内地震のみを対象とした震源特性に関する研究成果を基に、スラブ内地震の特性化震源モデルの設定手法を新たに追加し、強震動予測レシピを2016年に更新した。一方、スラブ内地震は、国内に限らず、国外でも起きている。例えば、2017年9月にメキシコで続発した二つのスラブ内地震（9月7日 M_w 8.2 と9月19日 M_w 7.1）は、強い揺れを生じ、甚大な被害を及ぼした。このような国外で起きた地震を調査し検証を積み重ねることにより、海洋プレート内地震の特性をより明確にすることが重要である。

そこで、本事業では、海洋プレート内地震を対象とし、地震動評価に用いた震源特性パラメータの設定手法の高度化を行うことを目的とし、以下の項目を実施する。

(1) スラブ内地震の地震動解析

メキシコ等国外でおきたスラブ内地震（二つ程度）を対象に、(周期2秒以上) やや長周期地震動を用いて震源過程解析を実施する。さらに、震源過程解析の結果を踏まえ、短周期地震動に着目し二つの解析地震から一つ選び特性化震源モデルを構築し、断層モデル法に基づく地震動再現解析を行う。地震動再現解析の対象地震の選定等の詳細は、原子力規制庁担当者と協議して決定する。

(2) スラブ内地震のスケーリング則等の検討

国内外で発生したスラブ内地震を対象に、(1)で得られた震源断層パラメータに加え、既往研究で得られた震源断層パラメータや地震動特性等に関するデータの整理・分析を行い、既往スケーリング則等との比較を行う。

1.4 実施体制

本事業を進める上で、適宜、学識経験者からの指導・助言を仰ぐとともに、海外の研究者と連絡を取りながら、助言・示唆を受けるものとする。種々の参考情報は、必要に応じて、本事業に反映する。なお、本業務の一部を一般財団法人 地域地盤環境研究所および株式会社 サイスマ・リサーチに外注する。

2. プレート間巨大地震の地震動評価の検討

2.1 プレート間巨大地震の地震動解析

2.1.1 2015年チリ Illapel 地震のアスペリティモデルの設定

既往の研究 (原子力規制庁, 2018) で対象とした 2015 年チリ Illapel 地震を対象に、アスペリティモデルの設定を行った。既往の研究 (原子力規制庁, 2018) では、ターゲットの地震の長周期インバージョン結果からアスペリティ (主な強震動生成域) に相当すると思われる部分を取り出して SMGA (Strong Motion Generation Area) モデルを作成し、経験的グリーン関数法による検討を行ったが、本研究では、地震調査研究推進本部によるプレート間地震の「レシピ」と比較するために、背景領域も含む、アスペリティモデルとして考えた場合について検討した。その際、「レシピ」に基づき第 1 ステージのプレート間地震としてモデル化した場合 (Eshelby (1957) による円形クラック式、Case1 と呼ぶ) と、第 1 ステージから第 2 ステージへの遷移ステージの地震としたモデル化場合の、大きく 2 種類の場合について検討した。後者については、Eshelby (1957) による円形クラック式を用いるとともに、震源インバージョン解析結果を参考に、大すべり域を導入し、浅部のみに大すべり域がある場合 (Case2) と、浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case3) に分ける。なお、Case3 で浅部および深部ともに大すべり域の実効応力を背景領域と同じに設定したことに対して、大すべり域の実効応力を背景領域の 2 倍にした場合 (Case4) と、4 倍にした場合 (Case5) についても検討した。全部で計 5 ケースのアスペリティモデルを作成した。

■地震本部のレシピにより第 1 ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック、Case1)

■第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域)

- a) 浅部のみに大すべり域がある場合 (Case2)
- b) 浅部および深部ともに大すべり域がある場合

- $\sigma_{大} = \sigma_{back}$ (Case3)

- $\sigma_{大} = 2\sigma_{back}$ (Case4)

- $\sigma_{大} = 4\sigma_{back}$ (Case5)

(1) 対象地震

地震動再現解析の対象は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018) と同様で、2015年9月16日に発生したチリ Illapel 地震 ($M_W 8.3$ 、以降、ターゲットの地震と呼ぶ) とし、経験的グリーン関数法用の要素地震として2016年2月10日に発生した余震 ($M_W 6.4$) を用いた。ターゲットの地震の長周期インバージョン結果によるすべり変位分布、最大すべり速度分布と各小断層のすべり時間関数、要素地震の震央位置および地震動評価点 (13 地点) を図 2.1.1-1～図 2.1.1-3 に示す。

(2) アスペリティモデルおよび断層パラメータ

断層パラメータの設定では、既往の研究 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018) を参照に、ターゲットの地震のモーメントマグニチュード $M_{Wt}=8.3$ 、要素地震のモーメントマグニチュード $M_{Ws}=6.4$ 、ターゲットの地震の断層面積 $S_f=240 \text{ km} \times 150 \text{ km}=36,000 \text{ km}^2$ (図 2.1.1-2)、2015年チリ Illapel 地震の経験的グリーン関数法用のパラメータの見積り結果 (図 2.1.1-4、表 2.1.1-1) を参照に、要素地震のコーナー振動数 $f_{cs}=0.22 \text{ Hz}$ 、ターゲットの地震と要素地震の短周期レベルの比 $CN=13$ (ここに、経験的グリーン関数法による波形合成時に用いる重ね合わせ数 $N=7$ (7.4)、およびターゲットの地震と要素地震の応力降下量の比 $C=1.8$) の5つのパラメータを与条件として、ターゲットの地震のアスペリティモデルの断層パラメータを設定した。

■ 地震本部のレシピにより第1ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式、Case1)

ここでは、地震調査研究推進本部 (2005) でまとめられているプレート間地震の強震動予測レシピと同様に第1ステージの地震として断層モデルを設定した。地震調査研究推進本部 (2005) の強震動予測レシピによる、プレート間地震のアスペリティモデルの設定の流れは図 2.1.1-5 のようになっている。

プレート間地震のアスペリティモデルを記述する主なパラメータは、震源断層面積 S 、地震モーメント M_0 、短周期レベル A 、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ (強震動生成域) の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a の6つである。

地震調査研究推進本部 (2005) のプレート間地震の強震動予測レシピでは、震源域を明確に設定できる場合は、その範囲より震源断層の面積を計算し、地震規模-断層面積の経験的

関係式から地震規模を推定する、もしくは、過去の地震から想定されている値を基に、地震規模を設定し、地震規模-断層面積の経験的關係から震源断層の面積を設定するとしている。上記の地震規模 (地震モーメント M_0) と断層面積 S の経験式については、過去の地震のデータがある程度得られている場合には、地域性を考慮した式を用いるとしている。例えば、Kanamori and Anderson (1975) と同様に円形破壊面を仮定した次の関係式 (Eshelby, 1957) を基に震源域の地震の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa) を推定することで、地域的な地震モーメント M_0 (N·m) と断層面積 S (km²) の関係式を設定するとしている。

$$M_0 = 16 / (7 \cdot \pi^{3/2}) \cdot \Delta\sigma \cdot S^{3/2} \quad (2.1.1-1)$$

一方、過去の地震のデータがあまり得られていない場合には、平均的な特性を示す地震規模と断層面積 (例えば、宇津, 2001; 石井・佐藤, 2000)、または地震モーメント M_0 と断層面積 S (例えば、佐藤, 1989; Yamanaka and Shimazaki, 1990) などの経験式を用いるとしている。

対象地震の短周期レベル A に関しては、想定震源域における最新活動の地震の短周期レベル A が推定されていない場合には、壇・他 (2001) による地震モーメント M_0 と短周期レベル A の経験的關係により設定するとしている。想定震源域における最新活動の地震の短周期レベル A が推定されている場合には、その推定値と地震モーメント M_0 との経験的關係の傾向を参照して、想定する地震の地震モーメントに応じた短周期レベルを設定するとしている。

一方、アスペリティ (強震動生成域) の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a 、および短周期レベル A は下記の関係式を満たす。ここに、(2.1.1-2)式は Madariaga (1979) によるアスペリティモデルの一般式、(2.1.1-3)式は円形クラックモデルを念頭においた Brune (1970) による経験式であるが、のちに Boatwright (1988) が断層の動力学的破壊シミュレーションよりアスペリティモデルにも適用できることを示した式である。

$$\Delta\sigma_a = (S / S_a) \Delta\sigma \quad (2.1.1-2)$$

$$A = 4\pi\beta^2 (S_a / \pi)^{1/2} \Delta\sigma_a \quad (2.1.1-3)$$

ここでは、ターゲットの地震の地震モーメント M_{0i} は与えられた値を用い、ターゲットの地震の短周期レベル A_i については、既往の研究 (原子力規制庁, 2018) によるパラメータから推定した値を直接用いることにした。また、ターゲットの地震の断層面積 S_i も与条件として既往の研究 (原子力規制庁, 2018) で設定した値を用いたので、(2.1.1-1)式~(2.1.1-3)式に示した 3 つの関係式で、ターゲットの地震のアスペリティモデルにおける残りの 3 つの断層パラメータ、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ (強震動生成域) の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、ア

アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a を求めることができる。

一方、ターゲットの地震の短周期レベル A_l を推定するために、まず要素地震の短周期レベル A_s を求めた。要素地震の地震モーメント M_{0s} とモーメントマグニチュード M_{ws} は(2.1.1-4)式を満たす。次に、Brune (1970) の ω^2 モデルを仮定した場合の、(2.1.1-5)式によるコーナー振動数の値と、円形クラックの平均応力降下量を求める(2.1.1-6)式を用いて、要素地震の断層面積 S_s 、および要素地震の応力降下量 $\Delta\sigma_s$ を算定した。さらに、要素地震の断層面積 S_s 、および要素地震の応力降下量 $\Delta\sigma_s$ を用いて、(2.1.1-7)式より要素地震の短周期レベル A_s が求まる。

$$M_{0s} [\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{1.5M_{ws}+9.1} \quad (2.1.1-4)$$

$$f_{cs} = \beta\sqrt{(7/16)/S_s} = 0.22\text{Hz} \quad (2.1.1-5)$$

$$\Delta\sigma_s = (7/16)M_{0s} / (S_s / \pi)^{1.5} \quad (2.1.1-6)$$

$$A_s = 4\pi\beta^2 (S_s / \pi)^{1/2} \Delta\sigma_s \quad (2.1.1-7)$$

要素地震の短周期レベル A_s が求まったので(2.1.1-8)式よりターゲットの地震の短周期レベル A_l が求まる。

$$A_l / A_s = CN = 13 \quad (2.1.1-8)$$

ターゲットの地震の地震モーメント M_{0l} 、短周期レベル A_l 、ターゲットの地震の震源断層面積 S_l が分かったので、(2.1.1-1)式～(2.1.1-3)式より、ターゲットの地震における、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ (強震動生成域) の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a が求まる。

ほかに、ターゲットの地震の平均すべり量 D_l は下記の(2.1.1-9)式より算定した。ここに、剛性率 μ は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018) より、 $4.55 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ とした。

$$M_{0l} = \mu D_l S_l \quad (2.1.1-9)$$

また、アスペリティ (強震動生成域) の平均すべり量 D_a は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018) による長周期インバージョン結果 (図2.1.1-1の大すべり域の領域A1) によるすべり分布を参考に与えた。

最後に、背景領域の平均すべり量 D_{back} 、および実効応力 σ_{back} は下記の(2.1.1-10)式～(2.1.1-11)式より算定した。ここに、 $W_{back} = W_l$ とし、 $W_a = \sqrt{S_a}$ とした。

$$D_{back} = (D_l S_l - D_a S_a) / (S_l - S_a) \quad (2.1.1-10)$$

$$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \cdot \Delta\sigma_a \quad (2.1.1-11)$$

表 2.1.1-2 に要素地震の断層パラメータを示し、表 2.1.1-3 に本方法で設定したターゲット

の地震のアスペリティモデルの断層パラメータを示す。

ターゲットの地震の地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係を図 2.1.1-6 に、ターゲットの地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A の関係を図 2.1.1-7 に示す。ターゲットの地震のアスペリティモデルの断層モデルを図 2.1.1-8 に示す。

■ 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域)

ここでは、浅部断層における破壊が十分には成長していない第 1 ステージから第 2 ステージへの遷移ステージの地震として断層モデルを設定した。平均応力降下量の算定式としては、推本レシピと同様に Eshelby (1957)による円形クラック式を用い、さらに震源インバージョン解析結果を参考に大すべり域を導入した。

a) 浅部のみに大すべり域がある場合 (Case2)

まず、地震調査研究推進本部によるプレート間地震の「レシピ」に基づいた場合と同様に、ターゲットの地震の地震モーメント M_{0i} は与えられた値を用い、ターゲットの地震の短周期レベル A_i については、既往の研究 (原子力規制庁, 2018) によるパラメータから推定した値を直接用いることにした。また、ターゲットの地震の断層面積 S_i も与条件として既往の研究 (原子力規制庁, 2018) で設定した値を用いたので、(2.1.1-1)式~(2.1.1-3)式に示した 3 つの関係式で、ターゲットの地震のアスペリティモデルにおける残りの 3 つの断層パラメータ、平均応力降下量 $\Delta\sigma_i$ 、アスペリティ (強震動生成域) の応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a を求めることができる。

浅部の大すべり域のすべり量 $D_{\text{浅部大}}$ と、浅部の大すべり域の面積 $S_{\text{浅部大}}$ は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018) による長周期インバージョン結果による、すべり分布 (図 2.1.1-1 の大すべり域の領域 A2、A3) を参考に与えた。また、深部には長周期インバージョンからみられる大すべり域の領域 A1 にアスペリティ(強震動生成域)のみを設置し、その平均すべり量 D_a は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018) による長周期インバージョン結果 (図 2.1.1-1 の大すべり域の領域 A1) によるすべり分布を参考に与えた。

最後に、背景領域の平均すべり量 D_{back} 、背景領域の実効応力 σ_{back} 、および大すべり域の実効応力 σ_a は下記の(2.1.1-12)式~(2.1.1-14)式より算定した。ここに、 $W_{\text{back}}=W_i$ とし、 $W_a=\text{sqrt}(S_a)$ とした。

$$D_{back} = (D_l S_l - D_a S_a - D_{浅部大} S_{浅部大}) / (S_l - S_a - S_{浅部大}) \quad (2.1.1-12)$$

$$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \cdot \Delta\sigma_a \quad (2.1.1-13)$$

$$\sigma_{浅部大} = \sigma_{back} \quad (2.1.1-14)$$

表 2.1.1-4 に、本方法で設定したターゲットの地震のアスペリティモデルの断層パラメータを示し、ターゲットの地震のアスペリティモデルの断層モデルを図 2.1.1-9 に示す。

b) 浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case3～Case5)

ここでは、a) で設定した断層モデルにおいて、浅部および深部ともに、すなわち深部のアスペリティ (強震動生成域) の周囲にも大すべり域がある場合について検討した。

したがって、ターゲットの地震の地震モーメント M_{0l} 、短周期レベル A_l 、断層面積 S_l 、平均応力低下量 $\Delta\sigma_l$ 、アスペリティ (強震動生成域) の応力低下量 $\Delta\sigma_a$ 、アスペリティ (強震動生成域) の面積 S_a は a) と同じである。

深部および浅部の大すべり域のすべり量 $D_{大}$ と、大すべり域の面積 $S_{大}$ は既往の研究 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018) による長周期インバージョン結果による、すべり分布 (図 2.1.1-1 の大すべり域の領域 A1、A2 および A3) を参考に与えた。また、深部の大すべり域 A1 の中にアスペリティ (強震動生成域) が位置していると考え、その平均すべり量 D_a は、既往の研究 (原子力規制庁, 2018、郭・他, 2018) による長周期インバージョン結果 (図 2.1.1-1 の大すべり域の領域 A1) によるすべり分布を参考に与えた。すなわち、領域 A1 の地震モーメントは、アスペリティ (強震動生成域) とその周囲の深部の大すべり域で負担することになる。

最後に、背景領域の平均すべり量 D_{back} 、背景領域の実効応力 σ_{back} 、および大すべり域の実効応力 $\sigma_{大}$ は下記の(2.1.1-15)式～(2.1.1-17)式より算定した。ここに、 $W_{back} = W_l$ とし、 $W_a = \sqrt{S_a}$ (S_a) とした。

$$D_{back} = (D_l S_l - D_{大} S_{大}) / (S_l - S_{大}) \quad (2.1.1-15)$$

$$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \cdot \Delta\sigma_a \quad (2.1.1-16)$$

$$\sigma_{大} = \sigma_{back} \quad (2.1.1-17)$$

以上より設定したターゲットの地震のアスペリティモデルを Case3 とし、断層パラメータを表 2.1.1-5 に示し、断層モデルを図 2.1.1-10 に示す。

なお、Case3 では浅部および深部の大すべり域の実効応力を背景領域と同じに設定したことに対して、Case4 では(2.1.1-18)式により大すべり域の実効応力を背景領域の 2 倍にした場

合 (図 2.1.1-11) について、Case5 では(2.1.1-19)式により大すべり域の実効応力を背景領域の4倍にした場合 (図 2.1.1-12) について検討した。

$$\sigma_{大} = 2\sigma_{back} \quad (2.1.1-18)$$

$$\sigma_{大} = 4\sigma_{back} \quad (2.1.1-19)$$

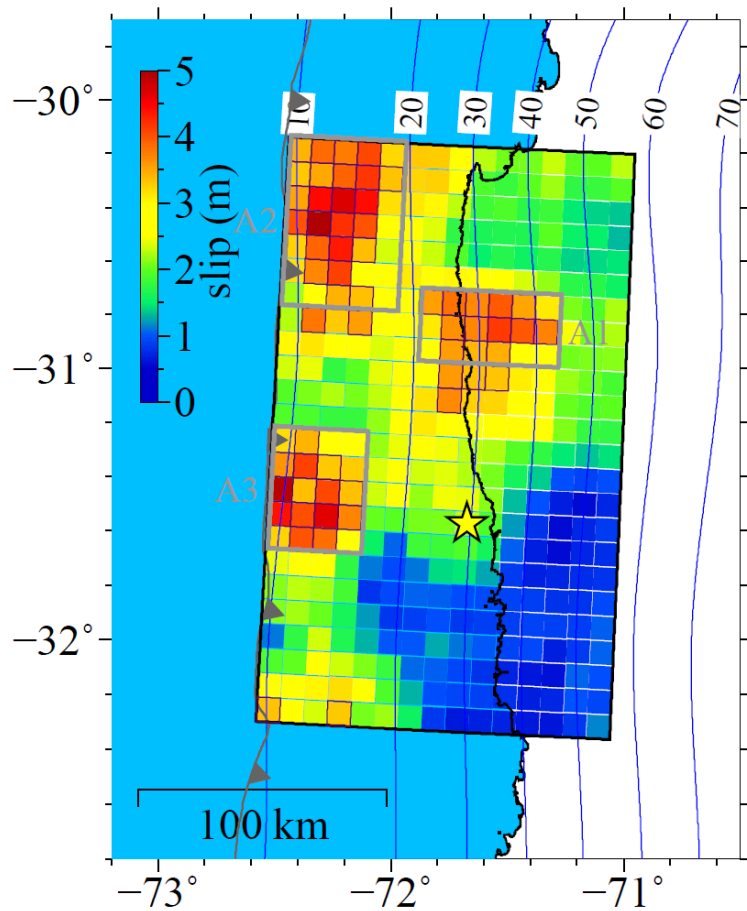


図2.1.1-1 2015年チリ Illapel地震のすべり変位分布 (原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018)

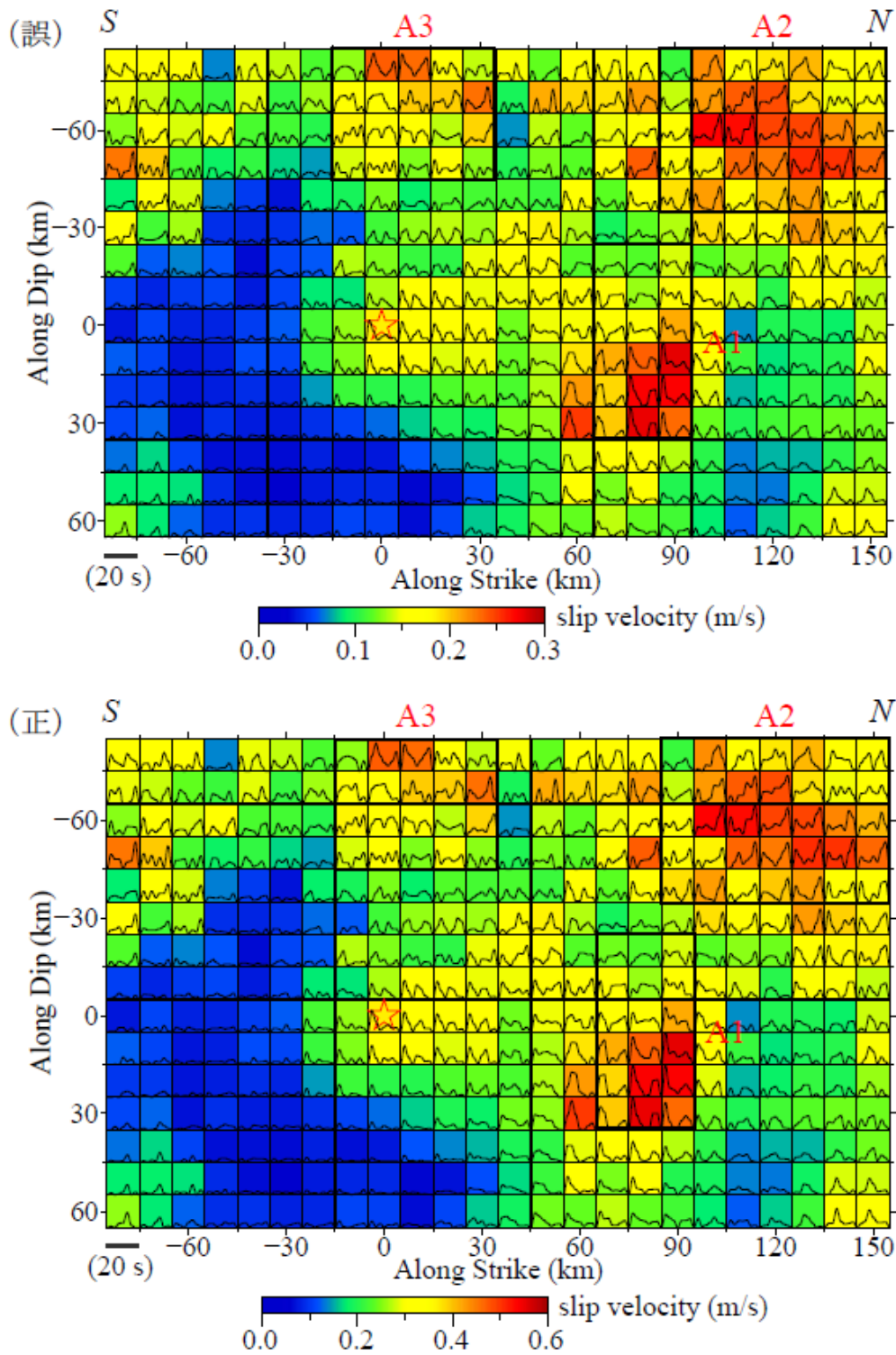


図 2.1.1-2 2015 年チリ Illapel 地震の最大すべり速度分布と各小断層のすべり時間関数
(原子力規制庁, 2018; 郭・他, 2018 の一部修正)

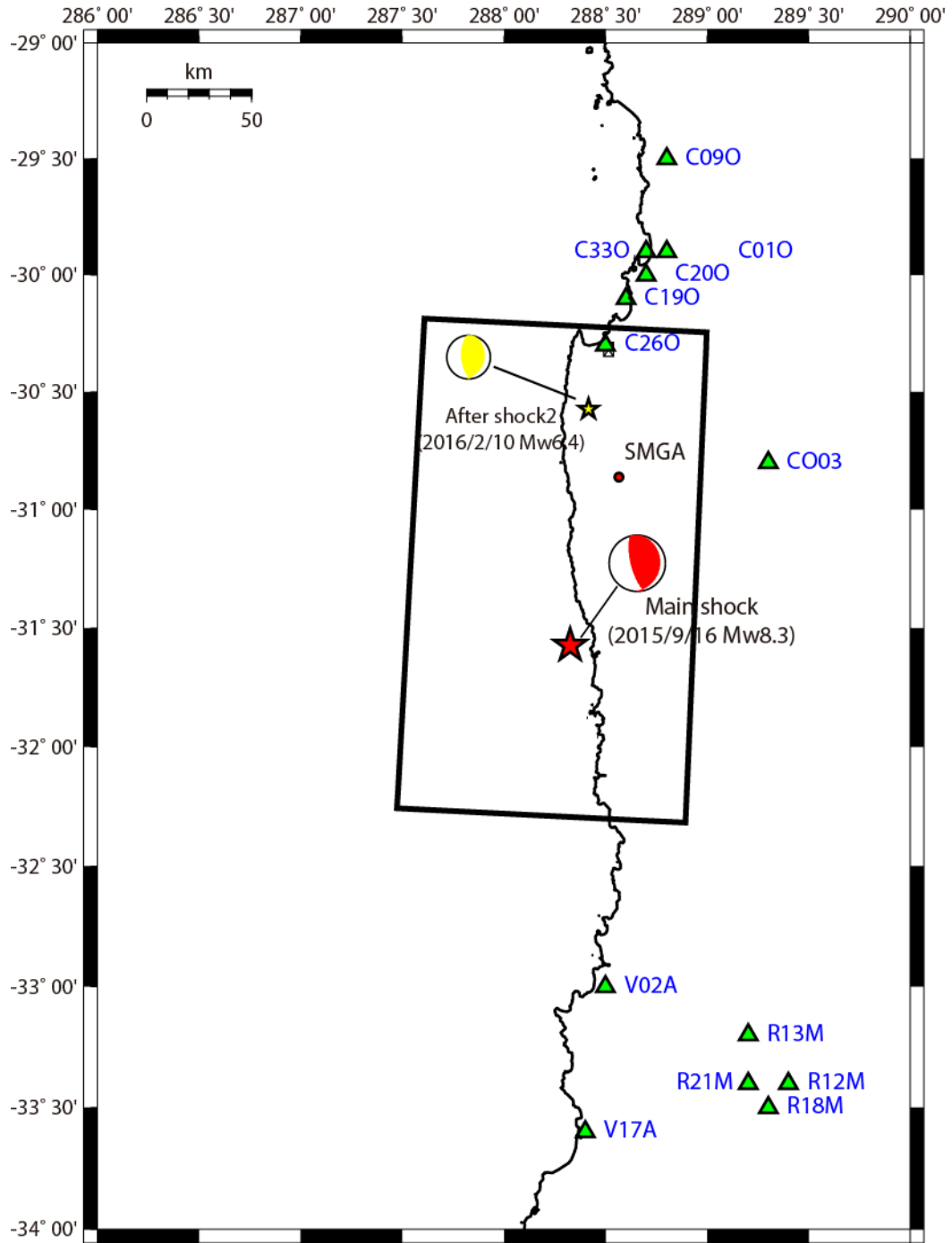


図 2.1.1-3 2015 年チリ Illapel 地震の本震の震央位置 (赤★印) とメカニズム解、余震の震央位置 (黄☆印) とメカニズム解、および観測点 (▲印) の位置

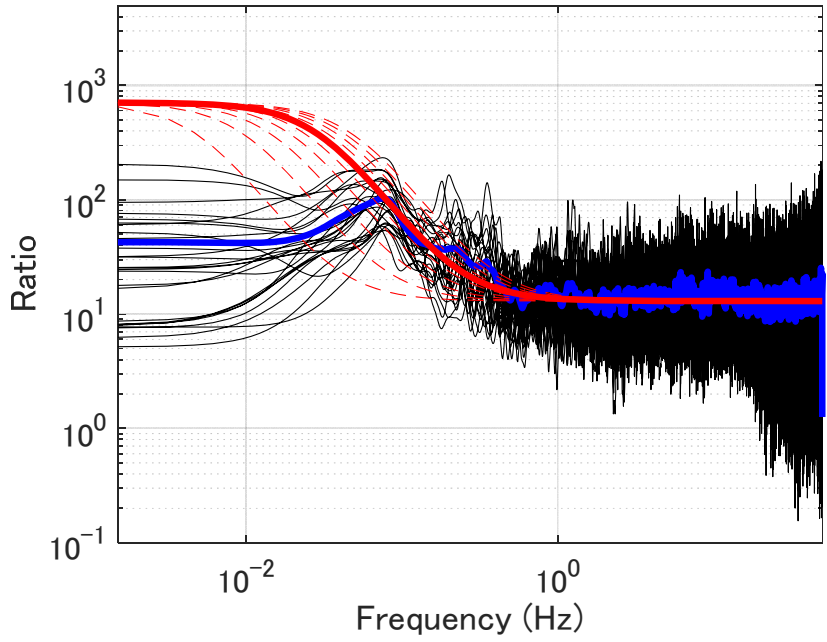


図 2.1.1-4 2015 年チリ Illapel 地震の経験的グリーン関数法用のパラメータの見積り

表 2.1.1-1 経験的グリーン関数法用のパラメータ

経験的 グリーン関数法用の パラメータ	長周期側 の比率 CN^3	短周期側 の比率 CN	重ね 合わせ数 N	応力降下 量の比 C	余震のコー ナー振動数 f_c (Hz)
本震(M_W 8.3)/ 余震(M_W 6.4)	708	13	7.4 ≒7	1.8	0.22

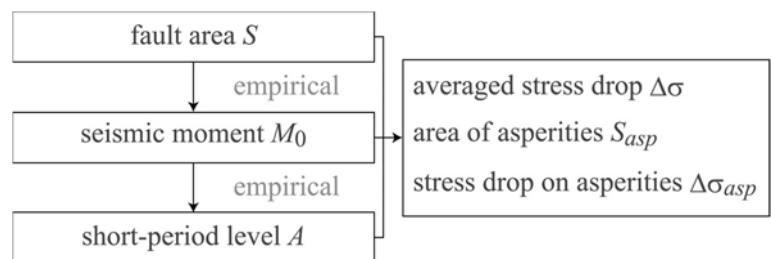


図 2.1.1-5 地震調査研究推進本部 (2005) の強震動予測レシピによるプレート間地震の断層パラメータ算定手順

表 2.1.1-2 2015 年チリ Illapel 地震の余震 (要素地震) の断層パラメータ

要素地震の断層パラメータ		設定方法
モーメントマグニチュード M_{Ws}	6.4	H30年度NRA安全研究報告書
地震モーメント M_{0s} (N・m)	5.01E+18	$M_{0s}[\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{(1.5M_{Ws} + 9.1)}$
応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	9.6	$\Delta\sigma_s = (7/16)[(M_{0s}/(S_s/\pi))^{1.5}]$
断層面積 S_s (km ²)	117	$S_s = (7/16)(\beta/f_c)^2$, ここに β は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 3.6 km/s とした。
断層長さ L_s (km)	11	$L_s = W_s = \sqrt{S_s}$
断層幅 W_s (km)	11	$L_s = W_s = \sqrt{S_s}$
平均すべり量 D_s (m)	0.9	$D_s = M_{0s}/(\mu S_s)$, ここに μ は H29 年度 NRA 安全研究報告書より 4.55×10^{10} N/m ² とした。
コーナー振動数 f_{cs} (Hz)	0.22	本研究
短周期レベル A_s (N・m/s ²)	9.58E+18	$A_s = 4\pi\beta^2(S_s/\pi)^{1/2}\Delta\sigma_s$

表 2.1.1-3 2015 年チリ Illapel 地震 (ターゲットの地震) のアスペリティモデルの断層パラメータ: 地震本部のレシピにより第 1 ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック、Case1)

ターゲットの地震の断層パラメータ		設定方法
モーメントマグニチュード M_{Wl}	8.3	H30年度NRA安全研究報告書
地震モーメント M_{0l} (N・m)	3.55E+21	$M_{0l}[\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{(1.5M_{Wl} + 9.1)}$
短周期レベル A_l (N・m/s ²)	1.24E+20	$A_l = A_s CN$, ここに CN は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 13 とした。
断層面積 S_l (km ²)	36000	$S_l = L_l \times W_l$
断層長さ L_l (km)	240	郭・他(2018, JEES)を参照
断層幅 W_l (km)	150	郭・他(2018, JEES)を参照
平均すべり量 D_l (m)	2.2	$D_l = M_{0l}/(\mu S_l)$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 4.55×10^{10} N/m ² とした。
平均応力降下量 $\Delta\sigma_l$ (MPa)	1.3	$\Delta\sigma_l = (7/16)[(M_{0l}/(S_l/\pi))^{1.5}]$
アスペリティの面積 S_a (km ²)	1131	$S_a = S_l \Delta\sigma_l / \Delta\sigma_a$
アスペリティの長さ L_a (km)	34	$L_a = W_a = \sqrt{S_a}$
アスペリティの幅 W_a (km)	34	$L_a = W_a = \sqrt{S_a}$
アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	40.3	$\Delta\sigma_a = A_s^2 S^{0.5} / (7\pi^{2.5} \beta^4 M_0)$
アスペリティのすべり量 D_a (m)	3.6	郭・他(2018, JEES)を参照
アスペリティの地震モーメント M_{0a} (N・m)	1.85E+20	$M_{0a} = \mu D_a S_a$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 4.55×10^{10} N/m ² とした。
背景領域の地震モーメント M_{0back} (N・m)	3.36E+21	$M_{0back} = M_{0l} - M_{0a}$
背景領域の面積 S_{back}	34869	$S_{back} = S_l - S_a$
背景領域のすべり量 D_{back} (m)	2.1	$D_{back} = (S_l D_l - S_a D_a) / S_{back}$
背景領域の実効応力 σ_{back} (MPa)	5.3	$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \Delta\sigma_a$

表 2.1.1-4 2015 年チリ Illapel 地震 (ターゲットの地震) のアスペリティモデルの断層パラメータ: 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部だけに大すべり域がある場合 (Case2)

ターゲットの地震の断層パラメータ		設定方法
モーメントマグニチュード M_{W1}	8.3	H30年度NRA安全研究報告書
地震モーメント M_{01} (N・m)	3.55E+21	$M_{01}[\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{(1.5M_{W1}+9.1)}$
短周期レベル A_1 (N・m/s ²)	1.24E+20	$A_1 = A_s CN$, ここに CN は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 13 とした。
断層面積 S_I (km ²)	36000	$S_I = L_I \times W_I$
断層長さ L_I (km)	240	郭・他(2018, JEES)を参照
断層幅 W_I (km)	150	郭・他(2018, JEES)を参照
平均すべり量 D_I (m)	2.2	$D_I = M_{01}/(\mu S_I)$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。
平均応力降下量 $\Delta\sigma_I$ (MPa)	1.3	$\Delta\sigma_I = (7/16)[(M_{01}/(S_I/\pi))^{1.5}]$
アスペリティの面積 S_{asp} (km ²)	1131	$S_a = S \Delta\sigma / \Delta\sigma_a$
アスペリティの長さ L_a (km)	34	$L_a = W_a = \text{sqrt}(S_a)$
アスペリティの幅 W_a (km)	34	$L_a = W_a = \text{sqrt}(S_a)$
アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	40.3	$\Delta\sigma_a = A^2 S^{0.5} / (7\pi^{2.5} \beta^4 M_0)$
アスペリティのすべり量 D_a (m)	3.6	郭・他(2018, JEES)を参照
アスペリティの地震モーメント M_{0a} (N・m)	1.85E+20	$M_{0a} = \mu D_a S_a$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。
浅部の大すべり域のすべり量 $D_{浅部大}$ (m)	3.6	郭・他(2018, JEES)
浅部の大すべり域の面積 $S_{浅部大}$ (km ²)	5500	郭・他(2018, JEES)。
浅部の大すべり域の地震モーメント $M_{0浅部大}$ (N・m)	9.01E+20	$M_{0大} = \mu D_{浅部大} S_{浅部大}$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。
浅部の大すべり域の実効応力 $\sigma_{浅部大}$ (MPa)	4.6	$\sigma_{浅部大} = \sigma_{back}$
背景領域の地震モーメント M_{0back} (N・m)	2.46E+21	$M_{0back} = M_{01} - M_{0a} - M_{0浅部大}$
背景領域の面積 S_{back}	29369	$S_{back} = S_I - S_a - S_{浅部大}$
背景領域のすべり量 D_{back} (m)	1.8	$D_{back} = (S_I D_I - S_a D_a - S_{浅部大} D_{浅部大}) / S_{back}$
背景領域の実効応力 σ_{back} (MPa)	4.6	$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \Delta\sigma_a$

表 2.1.1-5 2015 年チリ Illapel 地震 (ターゲットの地震) のアスペリティモデルの断層パラメータ: 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case3)

ターゲットの地震の断層パラメータ		設定方法
モーメントマグニチュード M_{W1}	8.3	H30年度NRA安全研究報告書
地震モーメント M_{01} (N・m)	3.55E+21	$M_{01}[\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{(1.5M_{W1}+9.1)}$
短周期レベル A_1 (N・m/s ²)	1.24E+20	$A_1 = A_s CN$, ここに CN は H30 年度 NRA 安全研究報告書より 13 とした。
断層面積 S_I (km ²)	36000	$S_I = L_I \times W_I$
断層長さ L_I (km)	240	郭・他(2018, JEES)を参照
断層幅 W_I (km)	150	郭・他(2018, JEES)を参照
平均すべり量 D_I (m)	2.2	$D_I = M_{01}/(\mu S_I)$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。
平均応力降下量 $\Delta\sigma_I$ (MPa)	1.3	$\Delta\sigma_I = (7/16)[(M_{01}/(S_I/\pi))^{1.5}]$
アスペリティの面積 S_{asp} (km ²)	1131	$S_a = S \Delta\sigma / \Delta\sigma_a$
アスペリティの長さ L_a (km)	34	$L_a = W_a = \text{sqrt}(S_a)$
アスペリティの幅 W_a (km)	34	$L_a = W_a = \text{sqrt}(S_a)$
アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	40.3	$\Delta\sigma_a = A^2 S^{0.5} / (7\pi^{2.5} \beta^4 M_0)$
アスペリティのすべり量 D_a (m)	3.6	郭・他(2018, JEES)を参照
アスペリティの地震モーメント M_{0a} (N・m)	1.85E+20	$M_{0a} = \mu D_a S_a$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。
大すべり域のすべり量 $D_{大}$ (m)	3.6	郭・他(2018, JEES)
大すべり域の面積 $S_{大}$ (km ²)	7300	郭・他(2018, JEES)。ここに、 $S_{大}$ の中には S_a が含まれている。
大すべり域の地震モーメント $M_{0大}$ (N・m)	1.20E+21	$M_{0大} = \mu D_{大} S_{大}$, ここに μ は H30 年度 NRA 安全研究報告書より $4.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ とした。ここに、 $M_{0大}$ の中には M_{0a} が含まれている。
大すべり域の実効応力 $\sigma_{大}$ (MPa)	4.5	$\sigma_{大} = \sigma_{back}$
背景領域の地震モーメント M_{0back} (N・m)	2.35E+21	$M_{0back} = M_{01} - M_{0大}$
背景領域の面積 S_{back}	28700	$S_{back} = S_I - S_{大}$
背景領域のすべり量 D_{back} (m)	1.8	$D_{back} = (S_I D_I - S_{大} D_{大}) / S_{back}$
背景領域の実効応力 σ_{back} (MPa)	4.5	$\sigma_{back} = (D_{back} / W_{back}) / (D_a / W_a) \Delta\sigma_a$

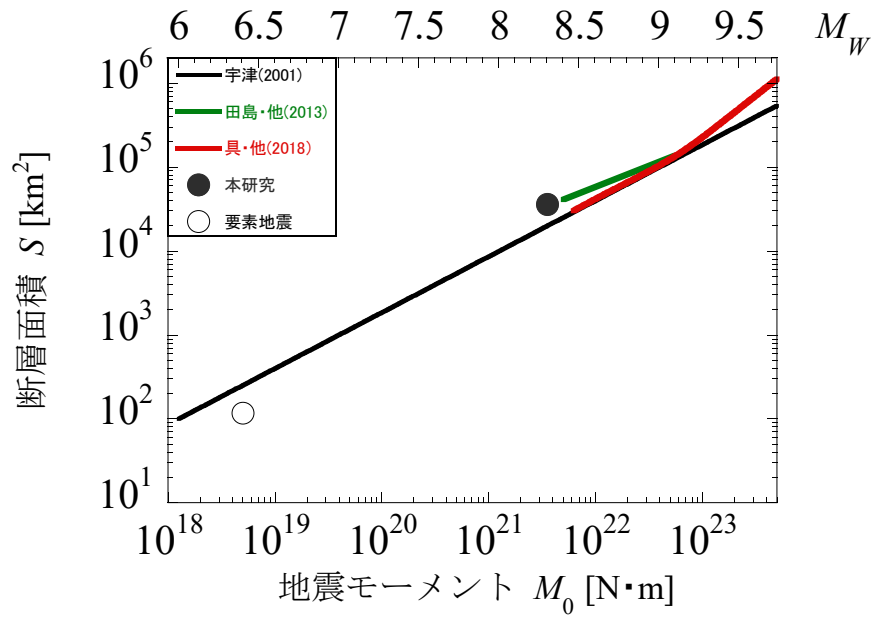


図 2.1.1-6 2015 年チリ Illapel 地震の地震モーメントと断層面積との関係

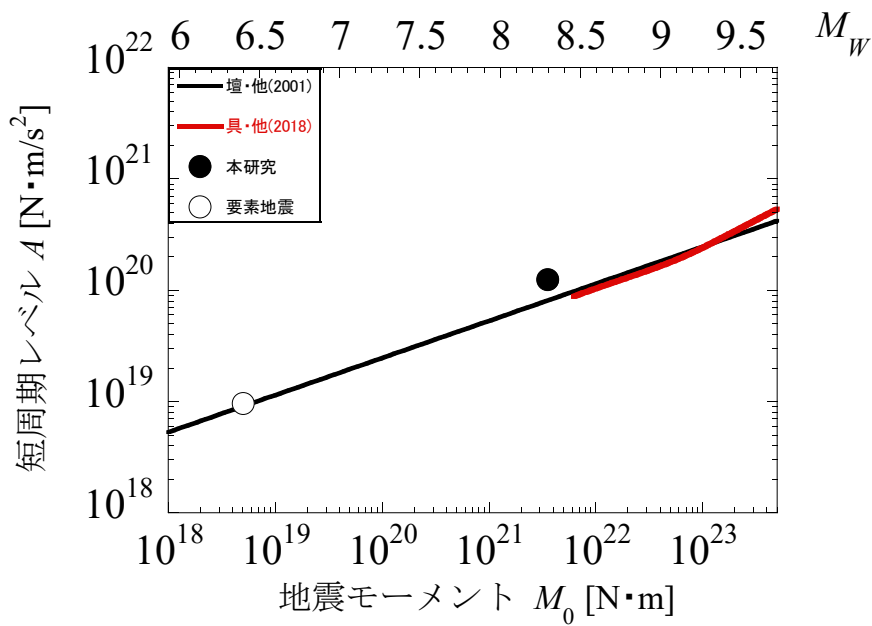


図 2.1.1-7 2015 年チリ Illapel 地震の地震モーメントと短周期レベルとの関係

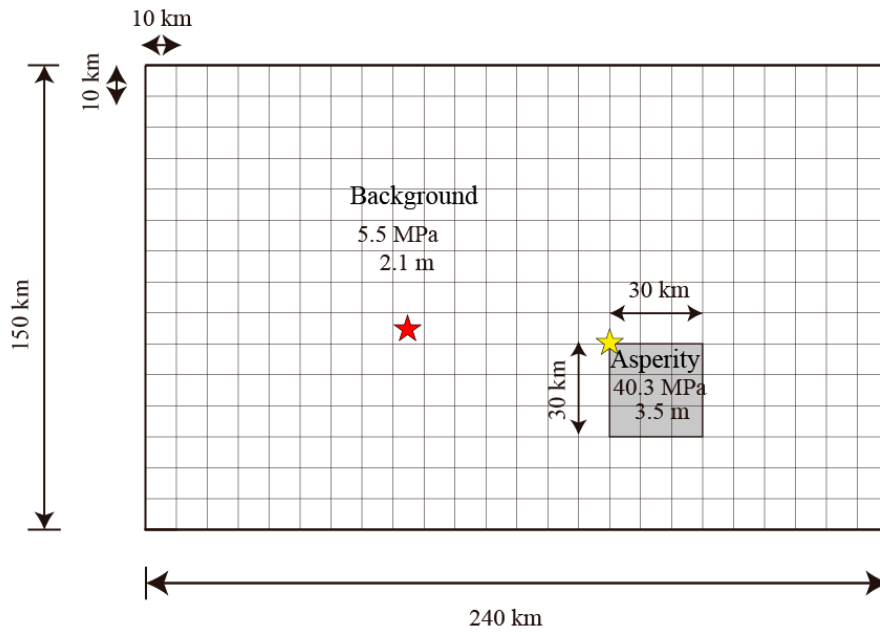


図 2.1.1-8 地震本部のレシピにより第 1 ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック、Case1)

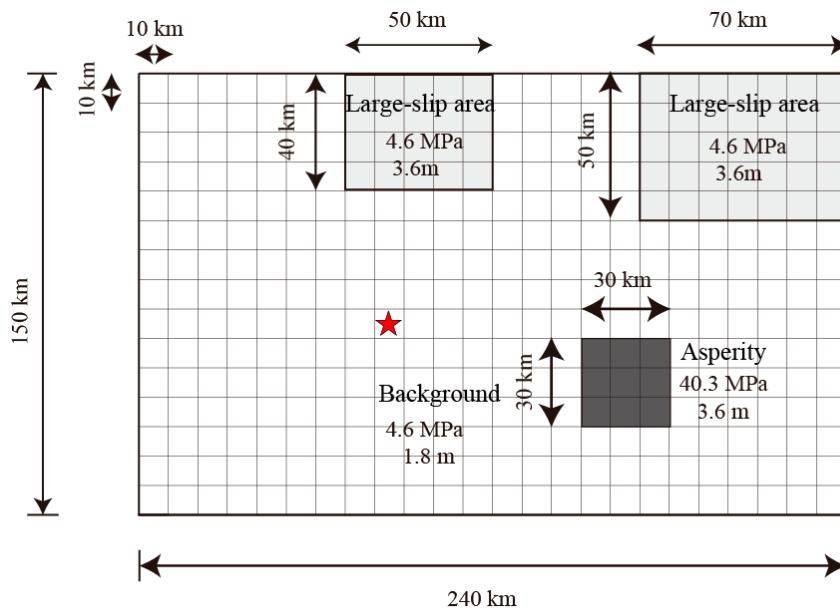


図 2.1.1-9 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部のみに大すべり域がある場合 (Case2)

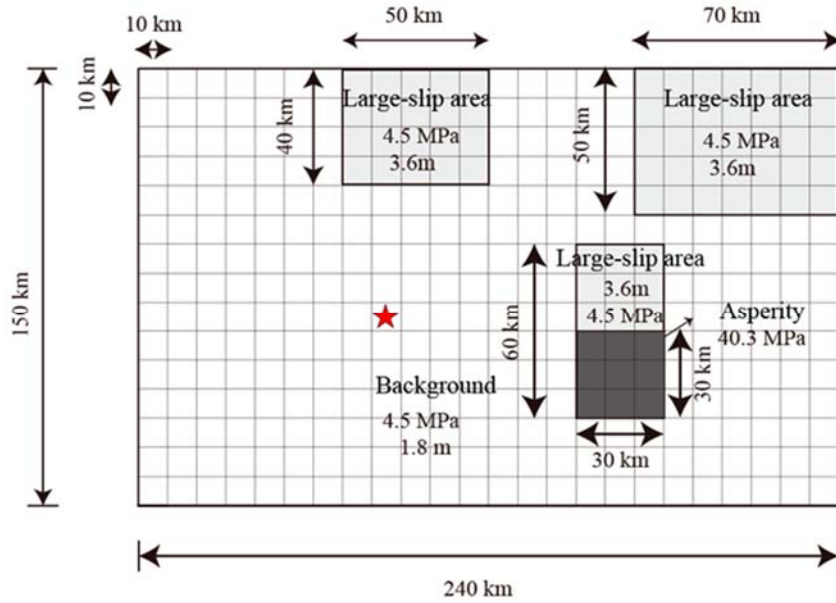


図 2.1.1-10 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case3: $\sigma_{\text{大}} = \sigma_{\text{back}}$)

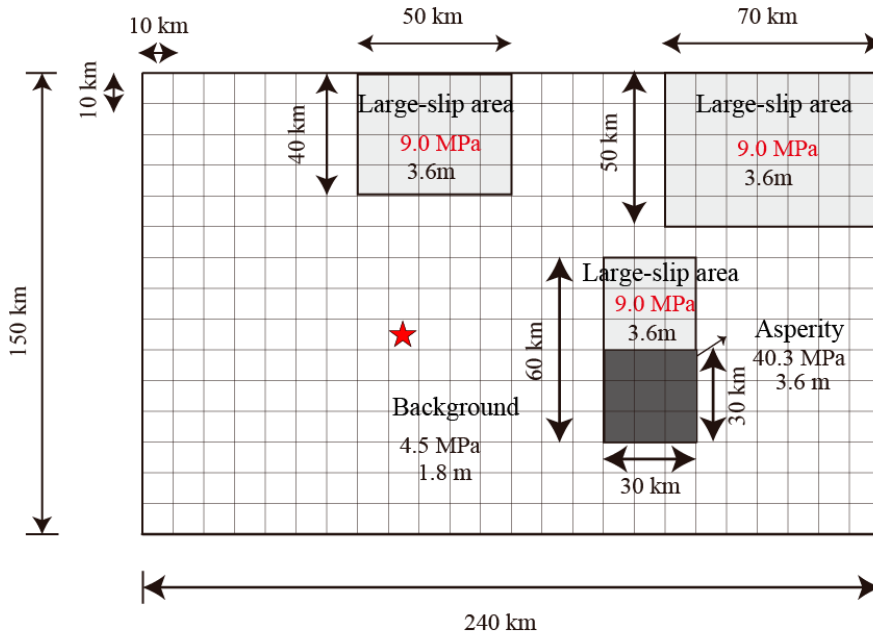


図 2.1.1-11 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震とした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case4: $\sigma_{\text{大}} = 2\sigma_{\text{back}}$)

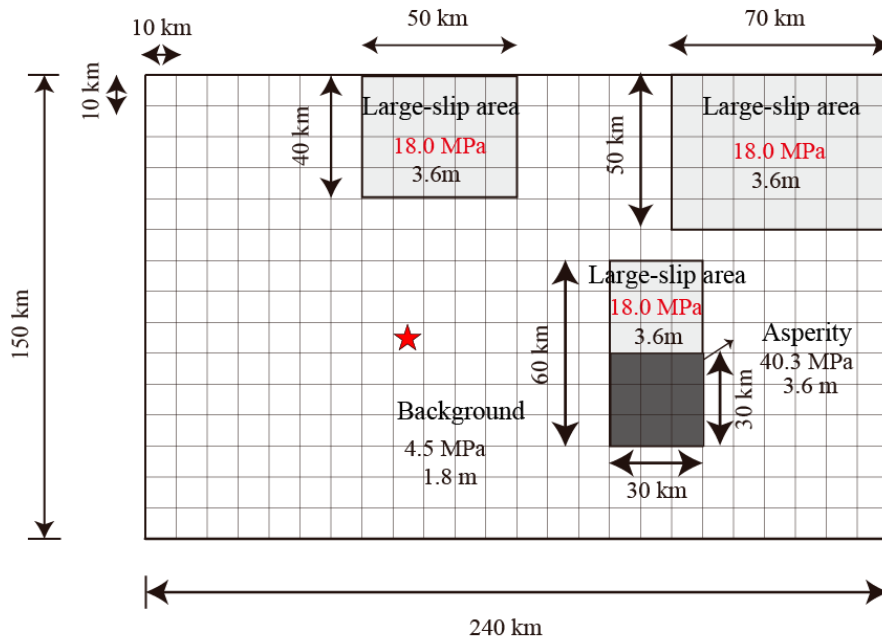


図 2.1.1-12 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル (円形クラック式+大すべり域): 浅部および深部ともに大すべり域がある場合 (Case5: $\sigma_{大} = 4\sigma_{back}$)

2.1.2 2015年チリ Illapel 地震の地震動再現解析

Dan *et al.* (1989) による経験的グリーン関数法を用いて、2015年チリ Illapel 地震の地震動再現解析を行った。図 2.1.2-1 に、2015年チリ Illapel 地震（ターゲットの地震）の、地震本部のレシピにより第1ステージの地震とした場合の断層モデル（円形クラック、Case1）の断層面と要素地震の震央の位置を示す。図中、星印（★印）はアスペリティモデルの破壊開始点で、三角印は計算地点である。同様に、図 2.1.2-2 に、第1から第2への遷移ステージの地震とした場合の（円形クラック式+大すべり域）のうち浅部のみ大すべり域がある場合（Case2）の断層モデルを、図 2.1.2-3 に、第1から第2への遷移ステージの地震とした場合の（円形クラック式+大すべり域）のうち浅部および深部ともに大すべり域がある場合（Case3～Case5）の断層モデルを示す。

2015年チリ Illapel地震のCase1のアスペリティモデルによる各観測点における合成結果を図2.1.2-4～図2.1.2-16に、Case2のアスペリティモデルによる合成結果を図2.1.2-17～図2.1.2-29に、Case3のアスペリティモデルによる合成結果を図2.1.2-30～図2.1.2-42に、Case4のアスペリティモデルによる合成結果を図2.1.2-43～図2.1.2-55に、Case5のアスペリティモデルによる合成結果を図2.1.2-56～図2.1.2-68に示す。上から順番に、各観測点における加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴および減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを示す。

Case1～Case3の各観測点における速度波形および減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを図2.1.2-69～図2.1.2-81に比較する。図より、地震本部のレシピにより第1ステージの地震としたモデル化した場合（Case1）と、第1から第2への遷移ステージの地震としてモデル化した場合（円形クラック式+大すべり域：Case2とCase3）の結果は、同程度であり、いずれも1秒以下の短周期側の観測記録を良く説明できていることがわかった。また大すべり域が浅部のみにある場合（Case2）と、浅部および深部ともにある場合（Case3）の差はほとんどない。

Case3～Case5の各観測点における速度波形および減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを図2.1.2-82～図2.1.2-94に比較する。図より、大すべり域の実効応力を背景領域の実効応力の2倍にした場合（Case4）と4倍にした場合（Case5）の結果は、背景領域の実効応力と同じにした場合（Case3）に比べて、大きく変わらないことから、大すべり域に背景領域と同程度の実効応力を設定すべきかどうかの判断まではできなかった。

本検討のアスペリティモデルによる地震動解析結果は、昨年度のSMGAモデル（原子力規

制序, 2018) に比べて継続時間が長くなっていて、より観測記録に近づいているが、中間周期の過小評価については引き続き改善する必要があると考えられる。

本検討では、断層面の深部に応力降下量が高い1つのアスペリティ（強震動生成域）を設定していて、残りの部分は実効応力の小さい背景領域（および大すべり域）でモデル化しているが、震源インバージョン結果で示している浅い側のすべり量が大きい領域を、大すべり域ではなく、アスペリティ（強震動生成域）としてモデル化した場合、中間周期が改善できるかどうかについても検討してみる必要がある。

さらに、短周期側は本検討による経験的グリーン関数法で、2秒以上の長周期側については、長周期インバージョンに基づいた理論計算を行い、最終的にハイブリッド法で合成することで中間周期の過小評価を改善する方法も考えられる。

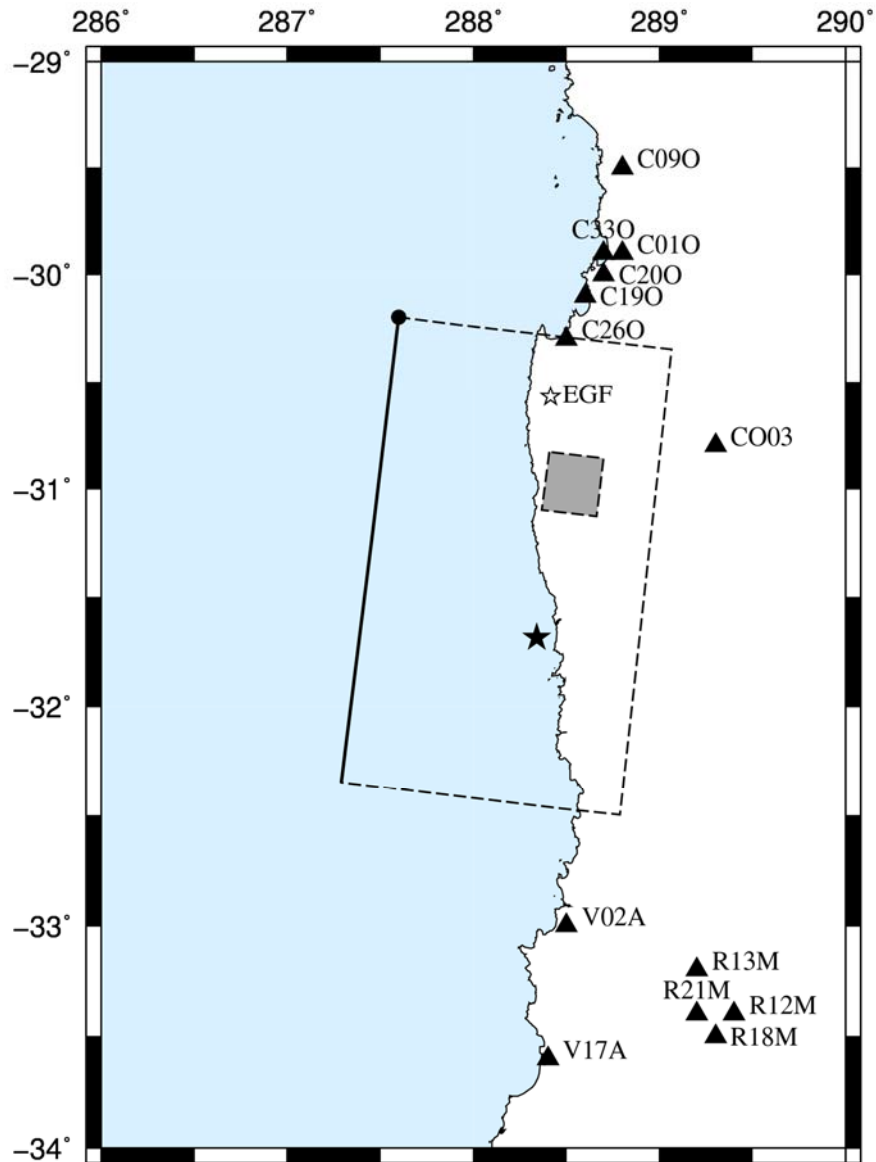


図2.1.2-1 地震本部のレシピにより第1ステージの地震とした場合の断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震の地震動再現解析 (破壊開始点：★印、要素地震の震源位置：☆印、観測点：▲印)

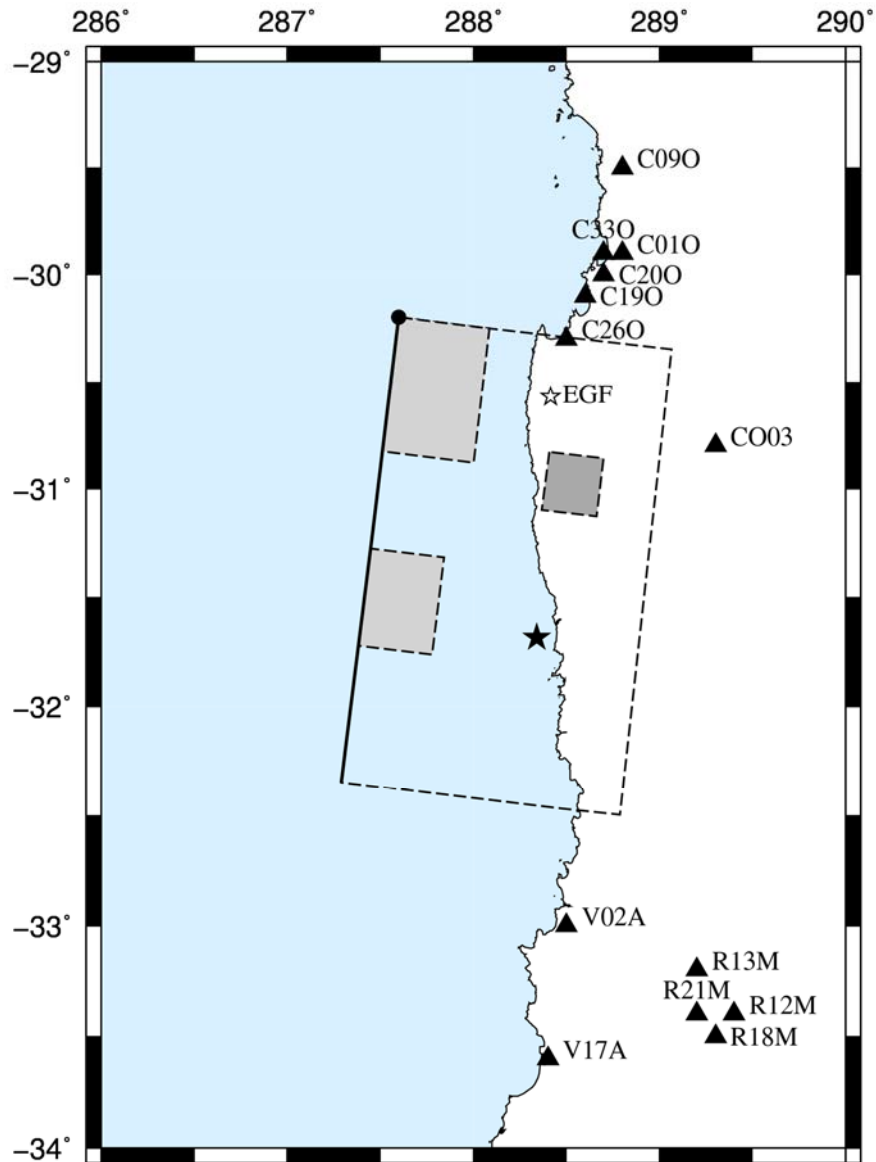


図 2.1.2-2 第 1 から第 2 への遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（円形クラック式+大すべり域：浅部のみ）（Case2）による 2015 年チリ Illapel 地震の地震動再現解析（破壊開始点：★印、要素地震の震源位置：☆印、観測点：▲印）

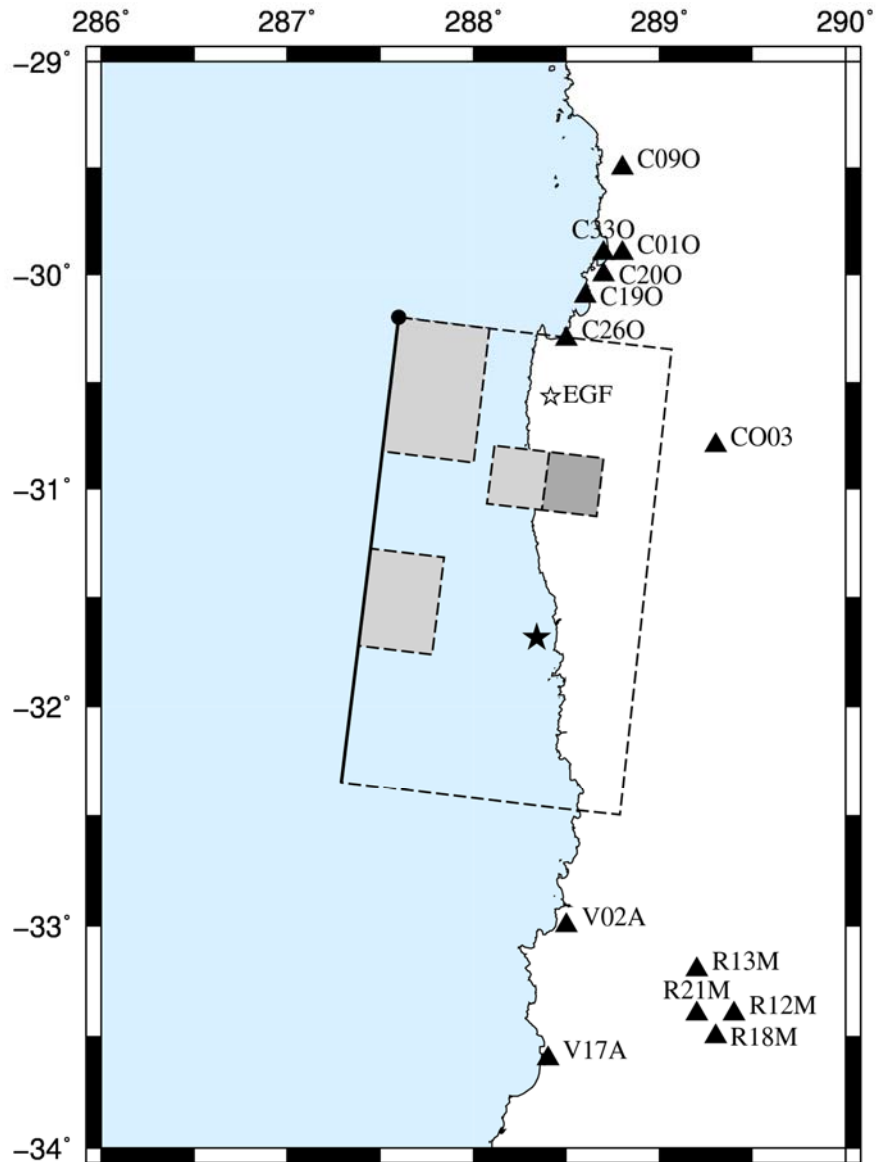


図2.1.2-3 第1から第2への遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+大すべり域：浅部および深部) (Case3～Case5) による2015年チリ Illapel地震の地震動再現解析 (破壊開始点：★印、要素地震の震源位置：☆印、観測点：▲印)

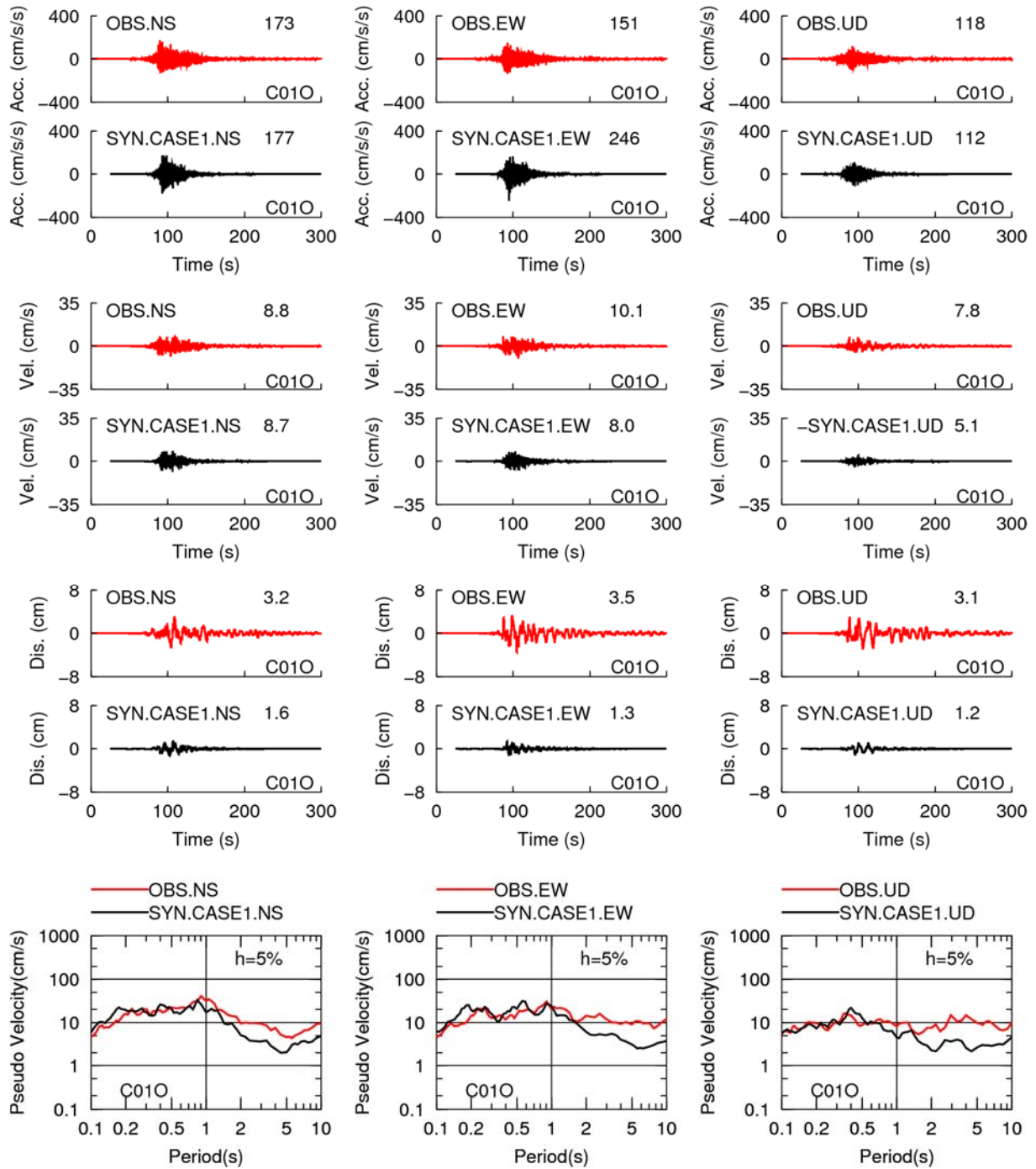


図2.1.2-4 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

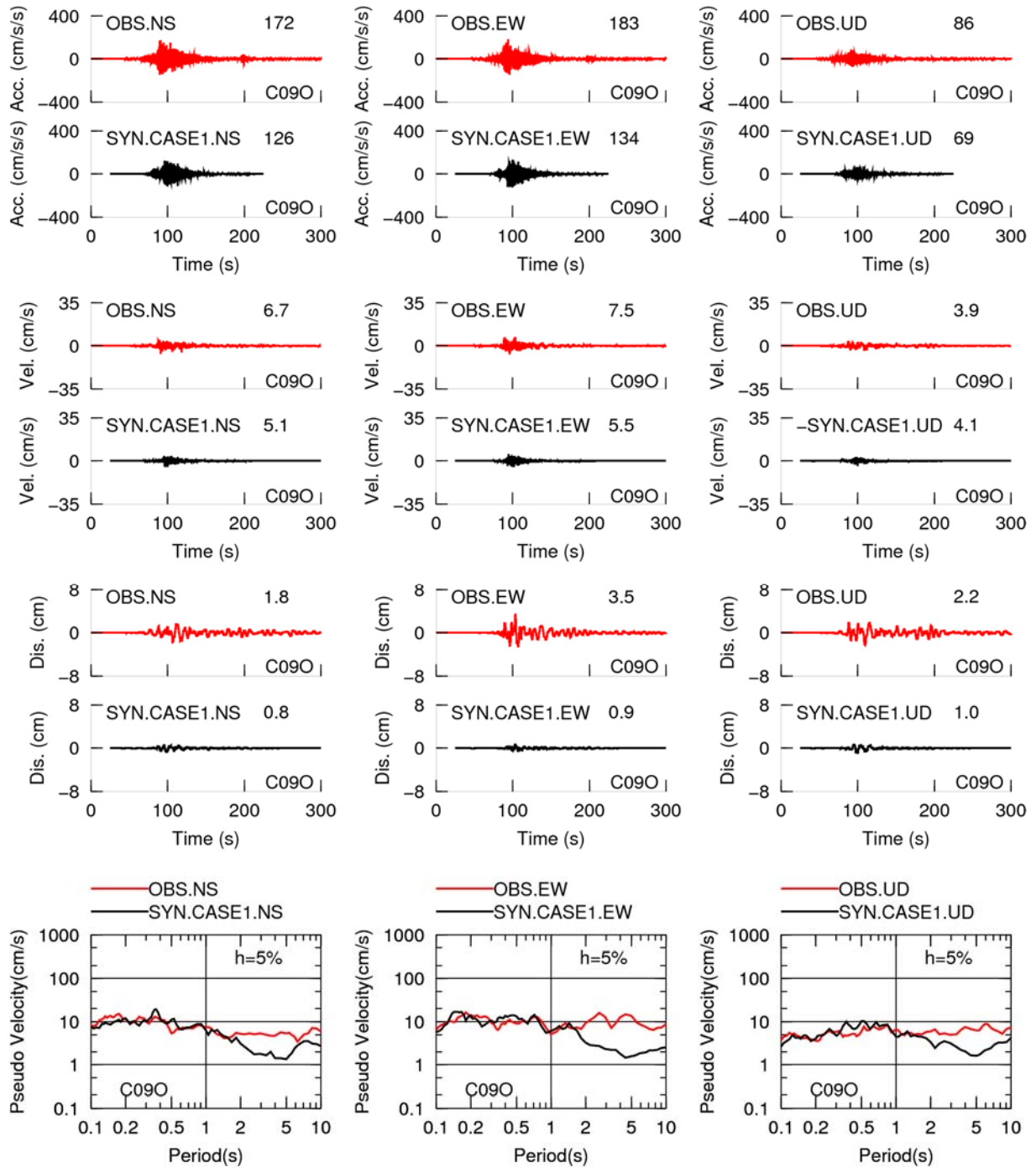


図2.1.2-5 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC09O観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

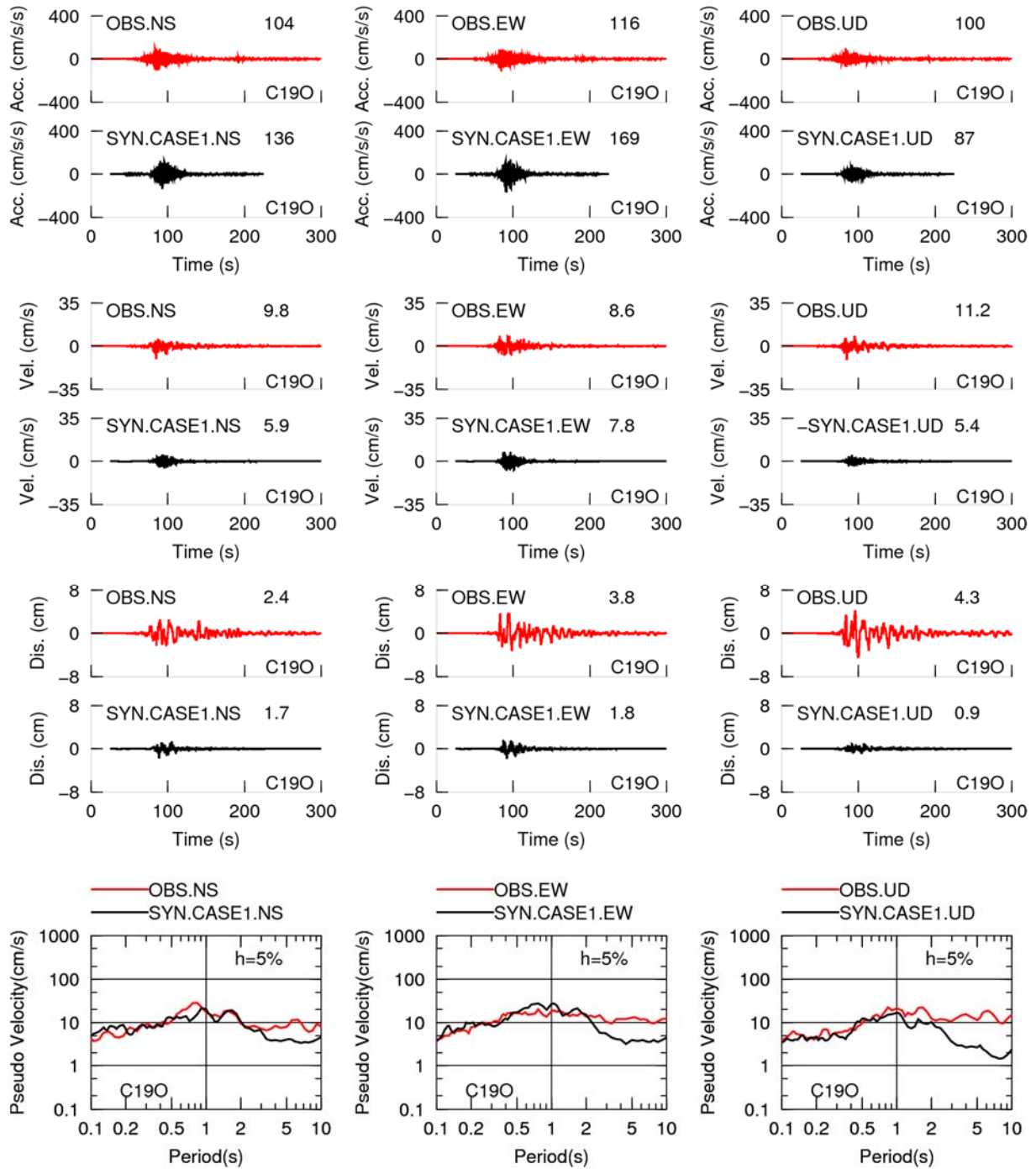


図2.1.2-6 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC19O観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

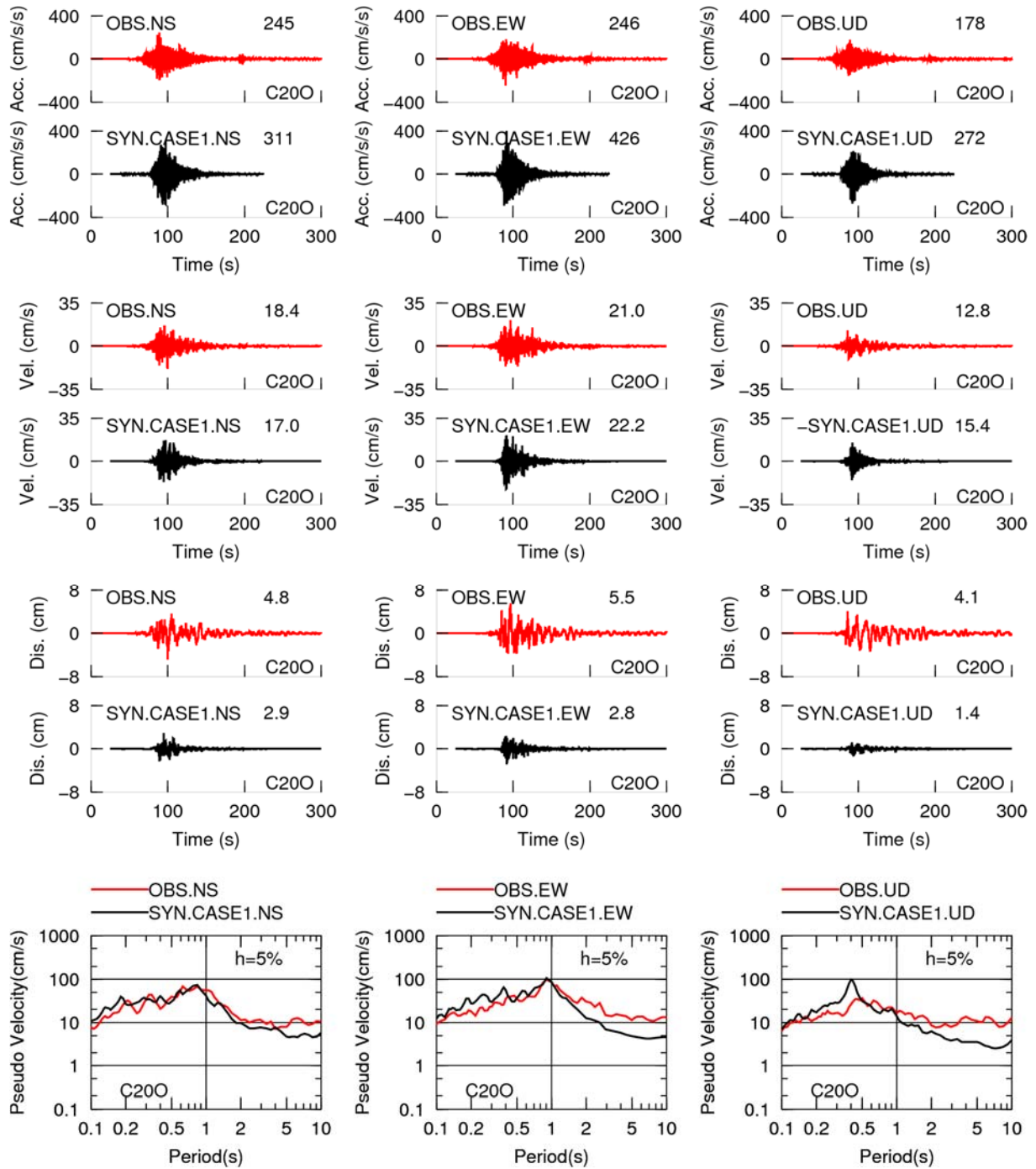


図2.1.2-7 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

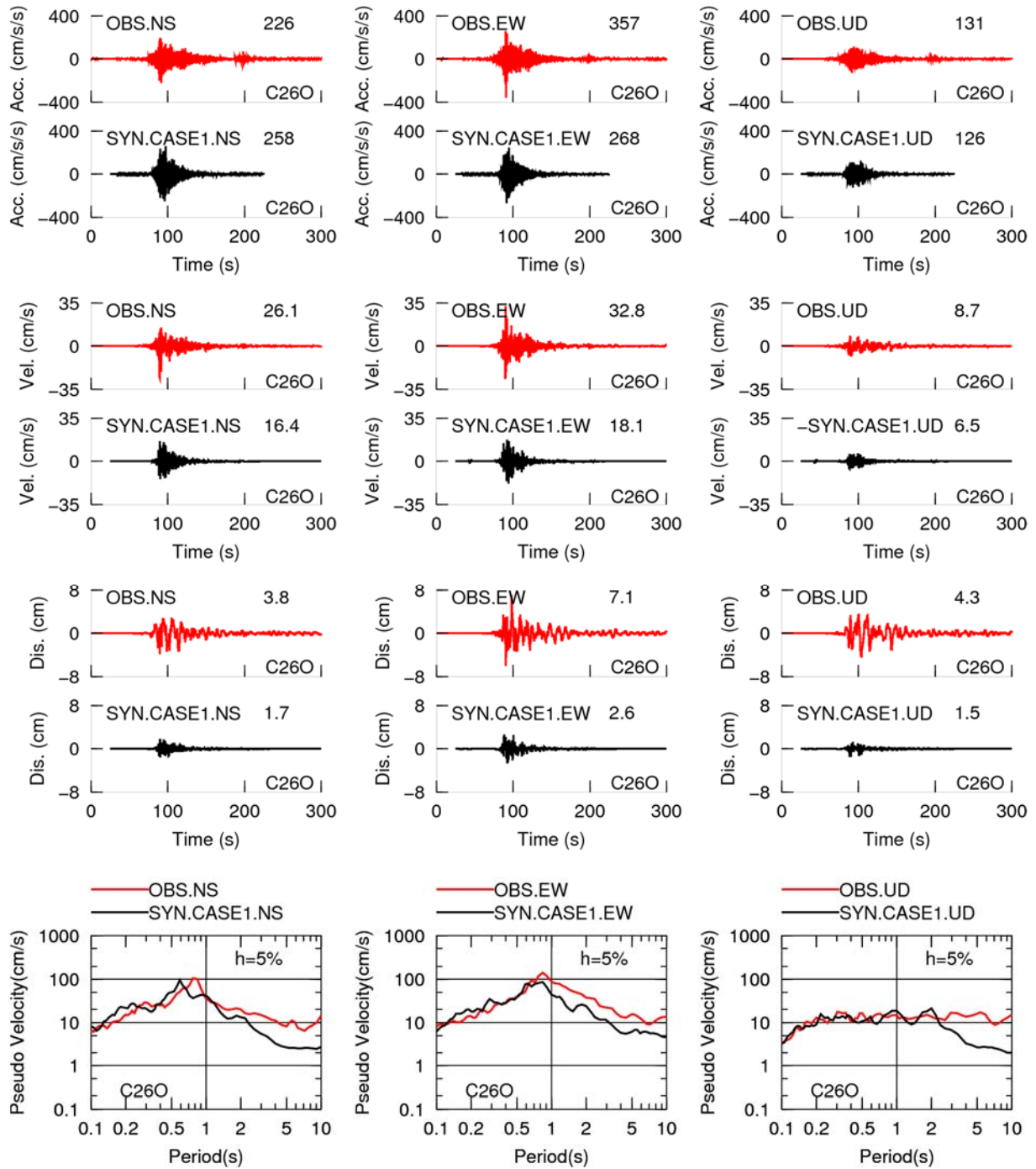


図2.1.2-8 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC26O観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

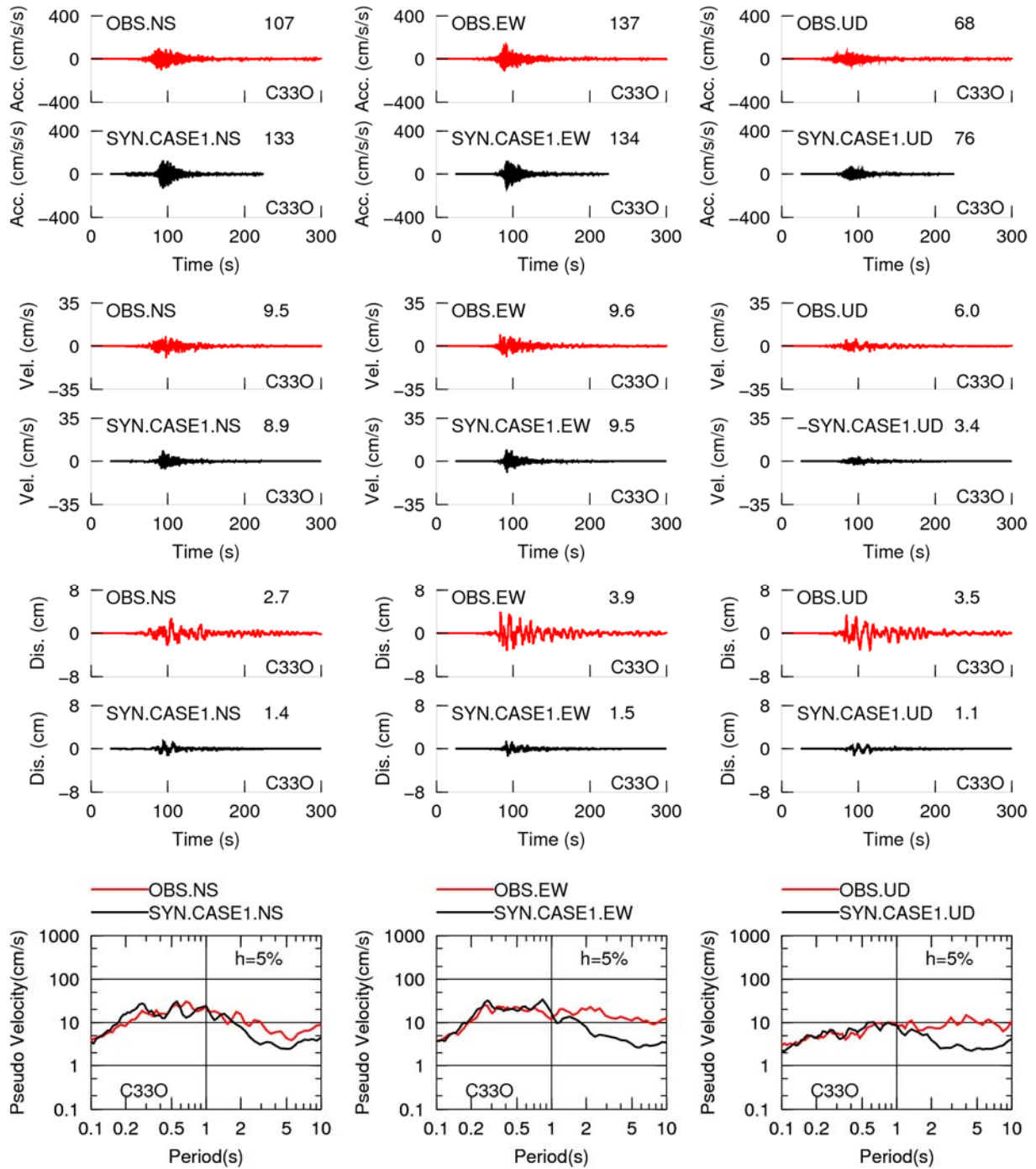


図2.1.2-9 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のC330観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

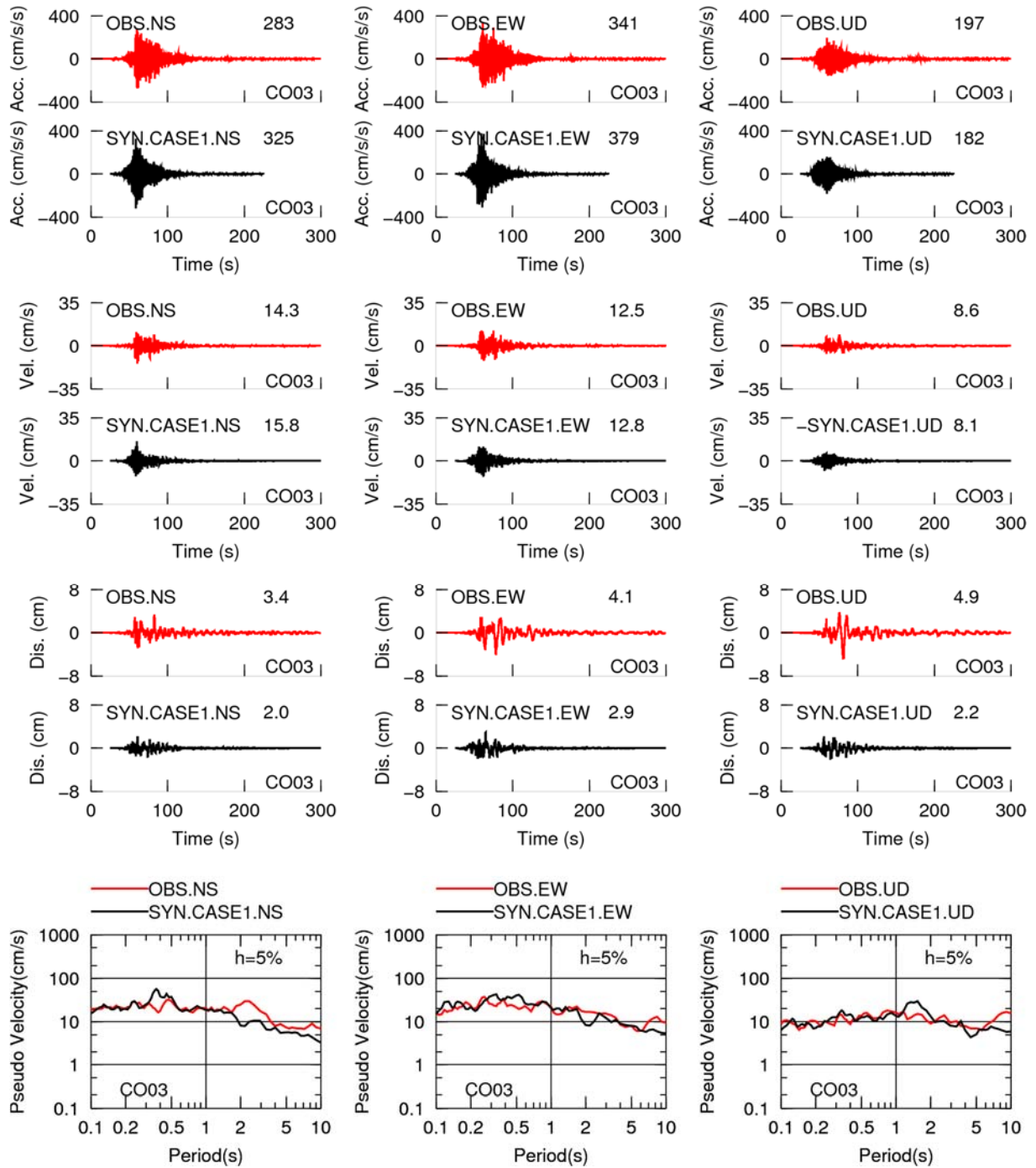


図2.1.2-10 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震のCO03観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

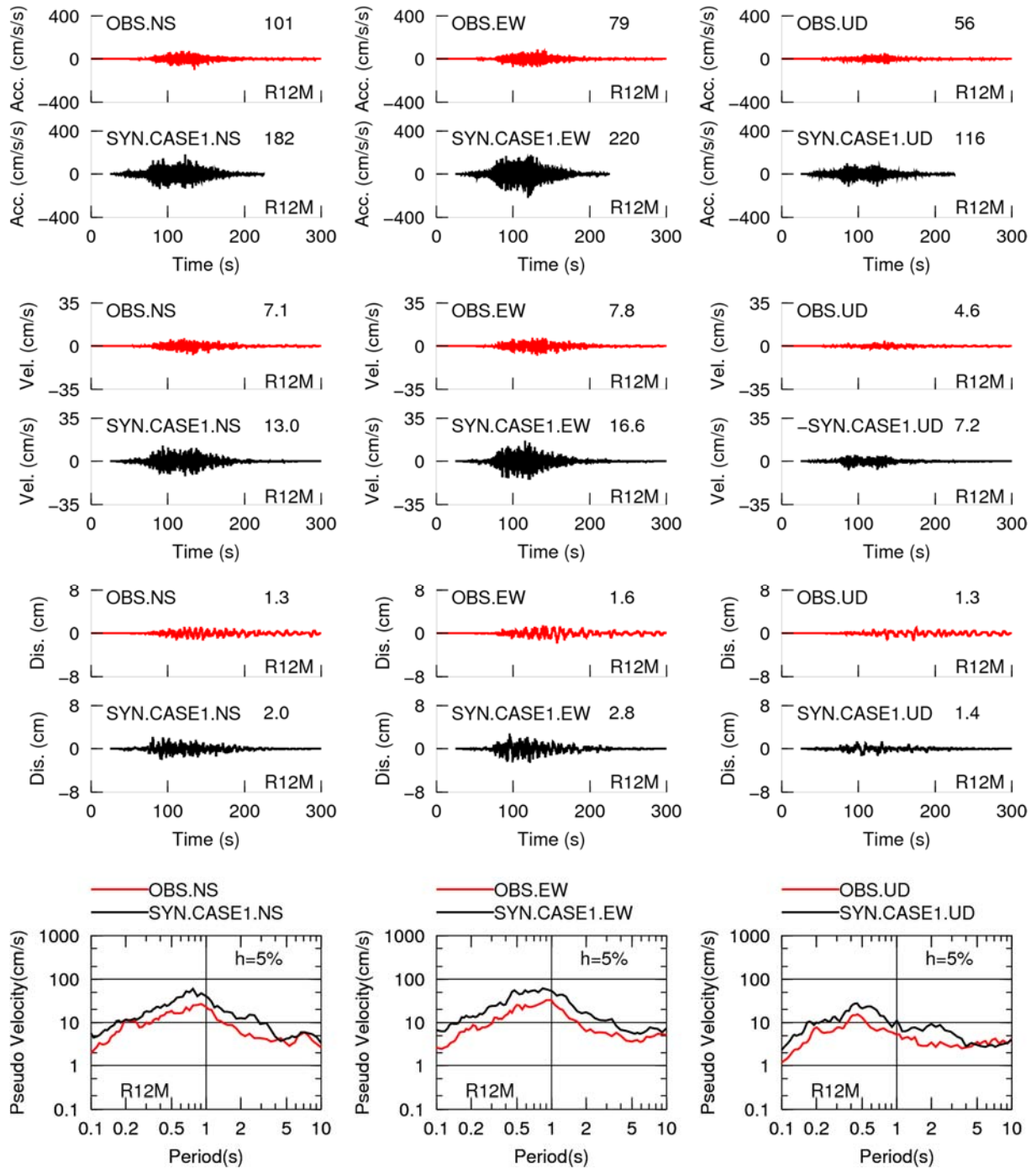


図2.1.2-11 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震のR12M観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

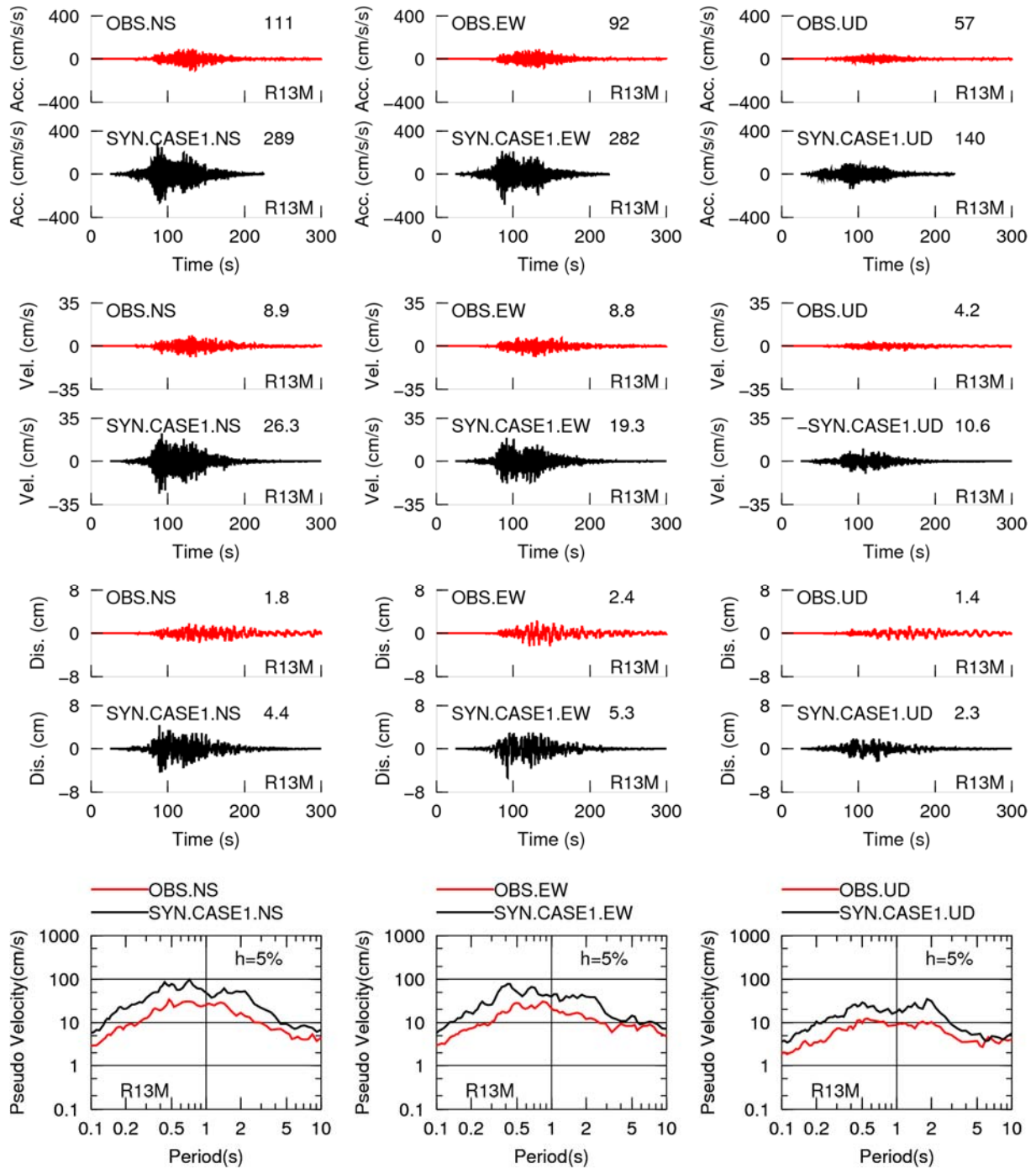


図2.1.2-12 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震のR13M観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

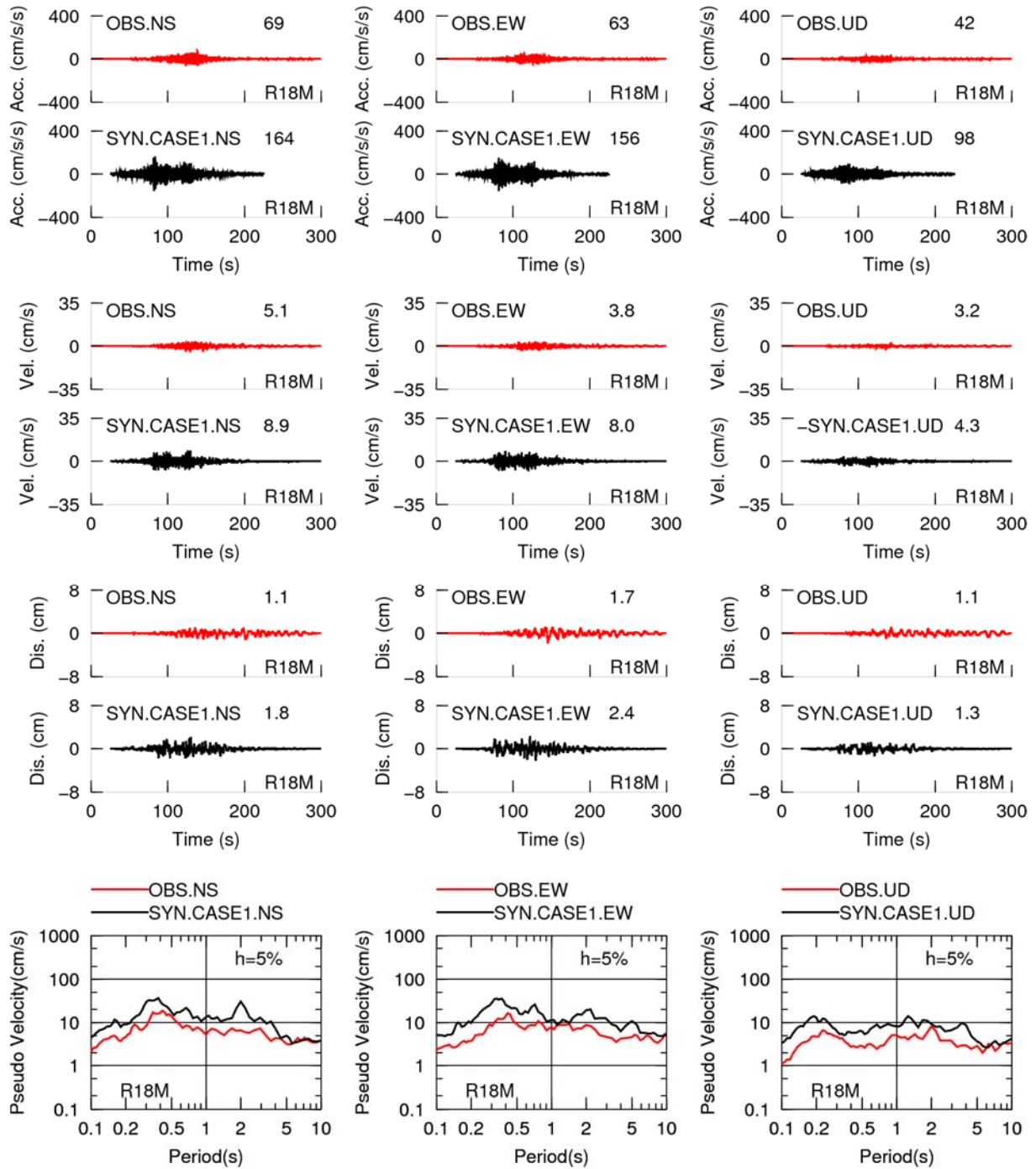


図2.1.2-13 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリ Illapel地震の R18M観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

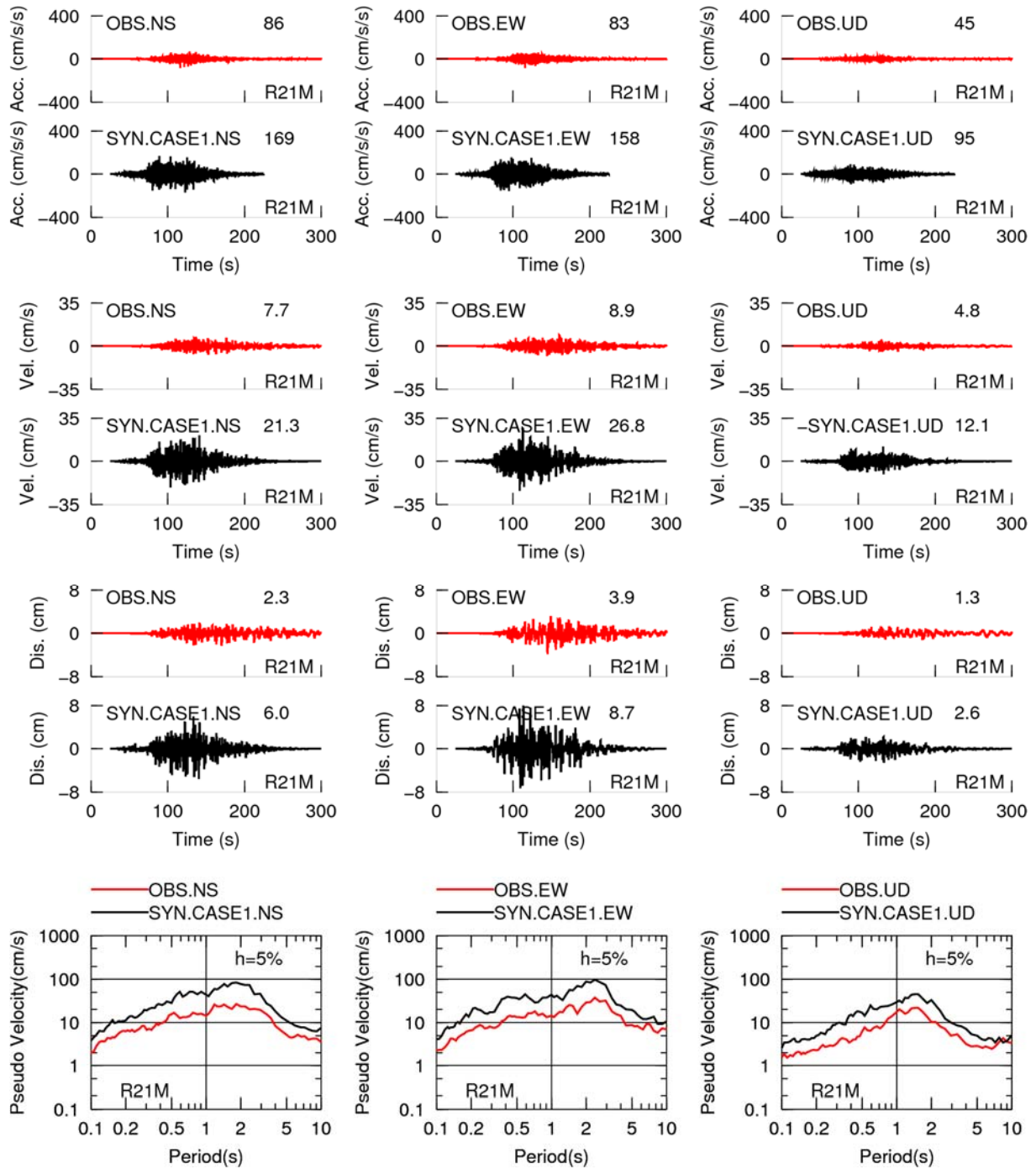


図2.1.2-14 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震のR21M観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

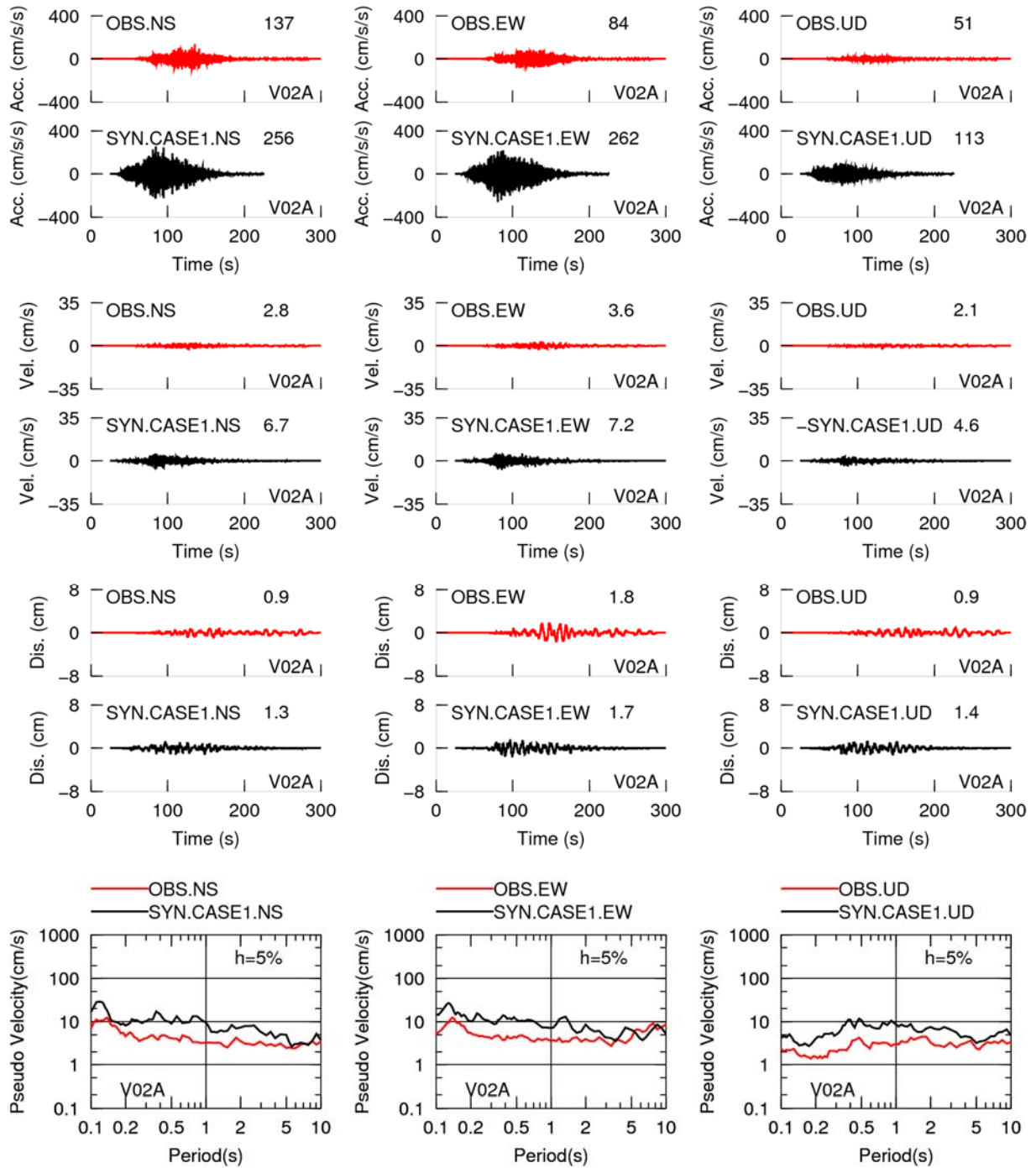


図2.1.2-15 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震のV02A観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

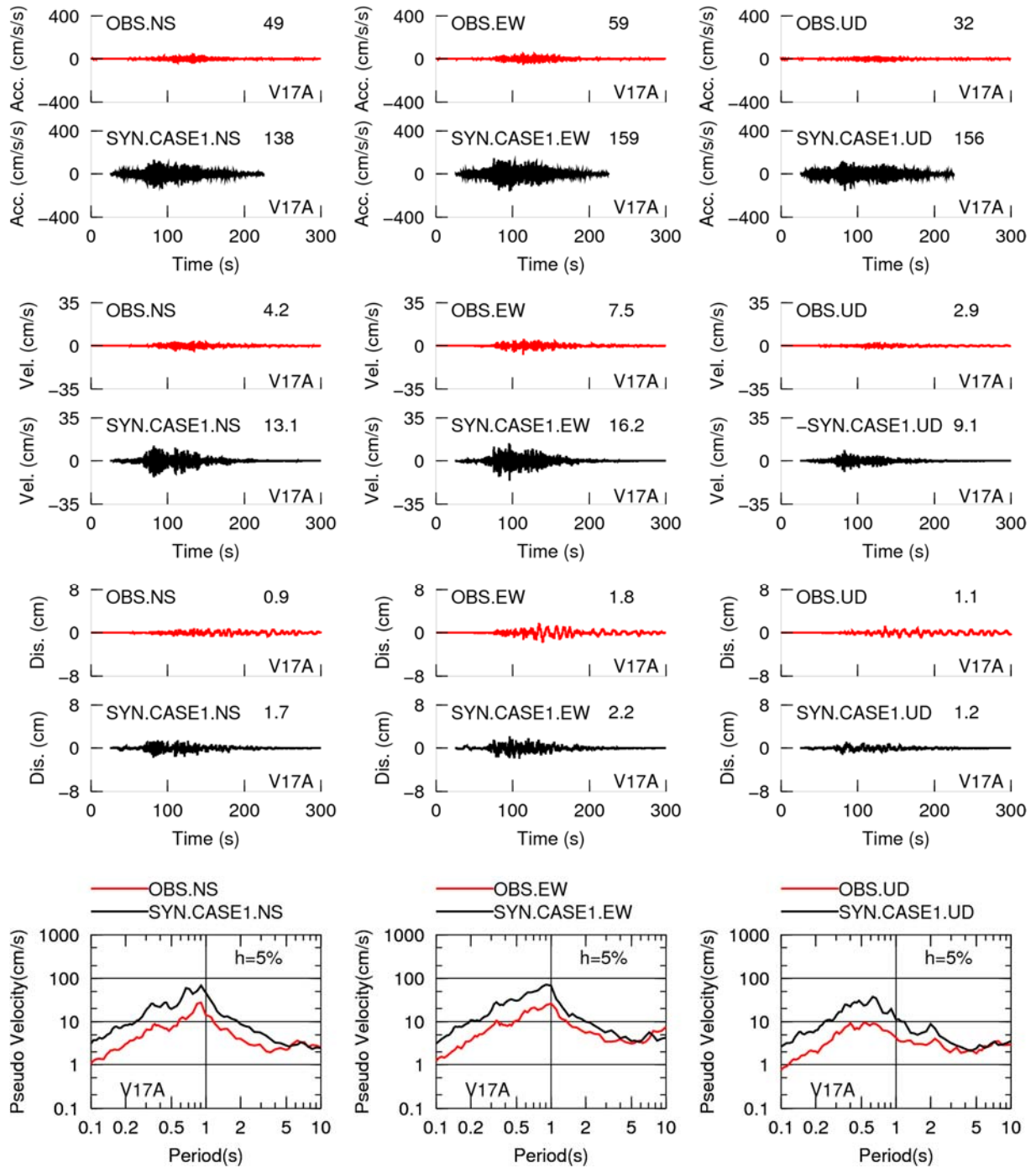


図2.1.2-16 地震本部のレシピによる断層モデル (Case1) による2015年チリIllapel地震のV17A観測点における合成結果 (上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

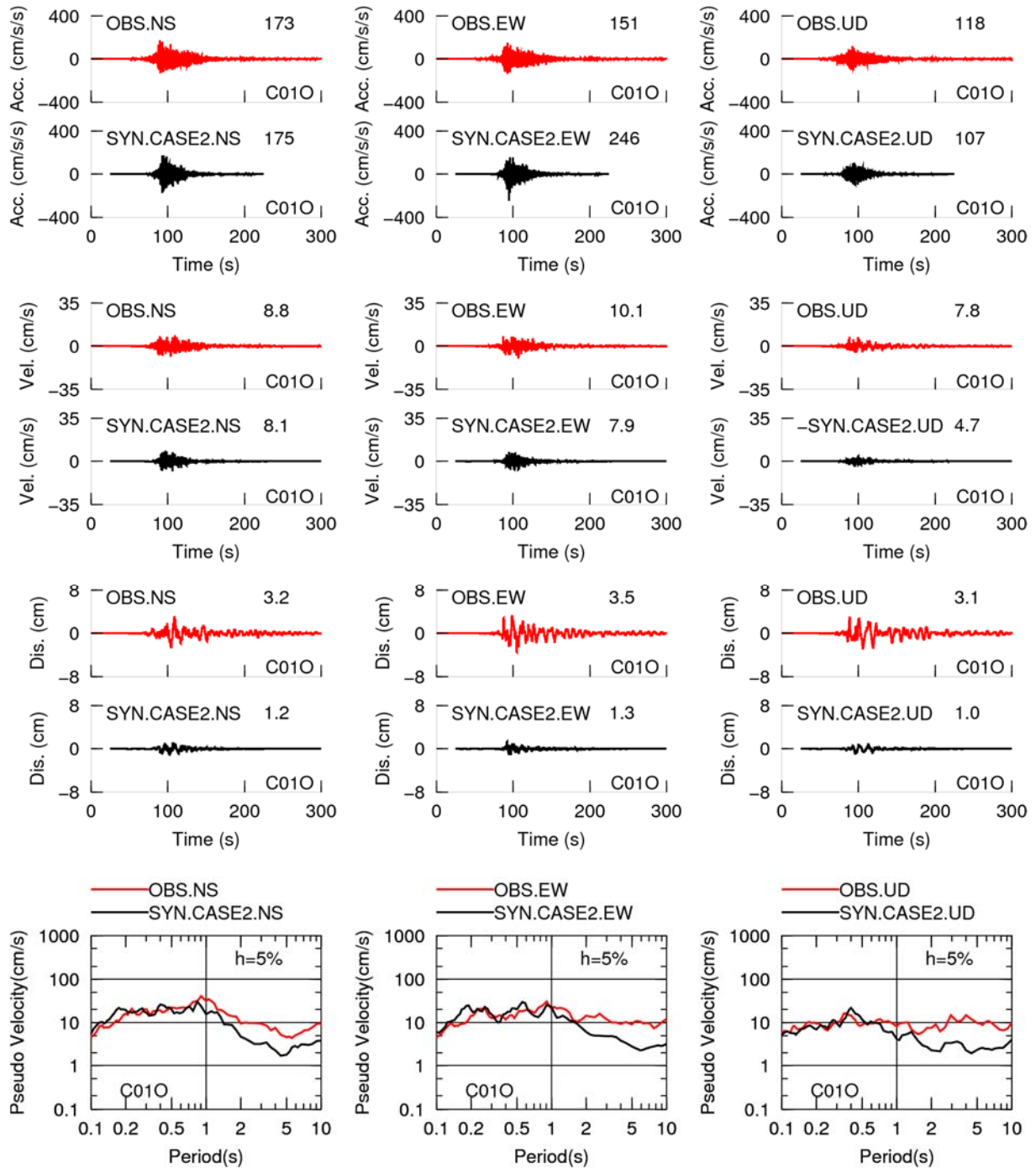


図2.1.2-17 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

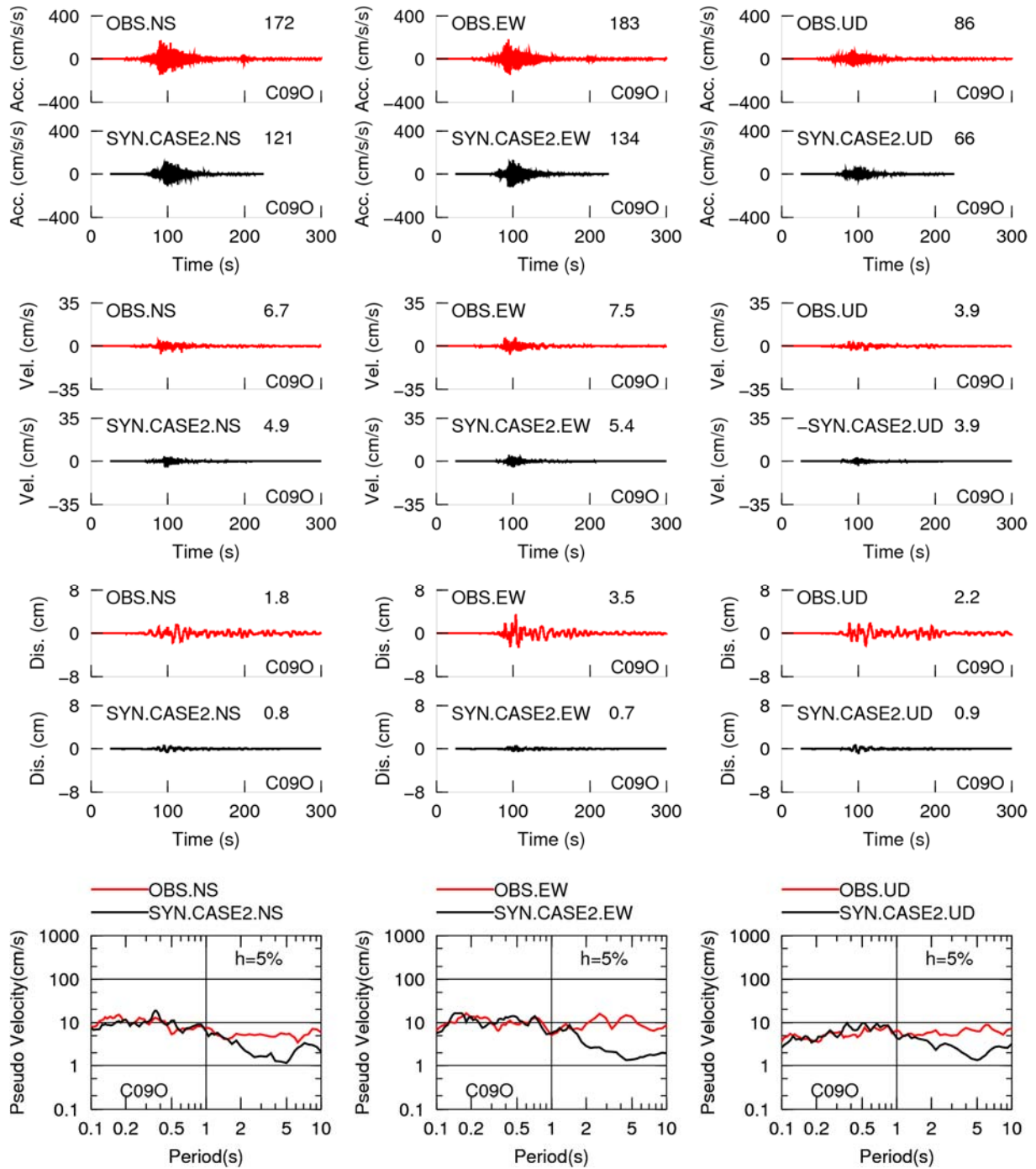


図2.1.2-18 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC09O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

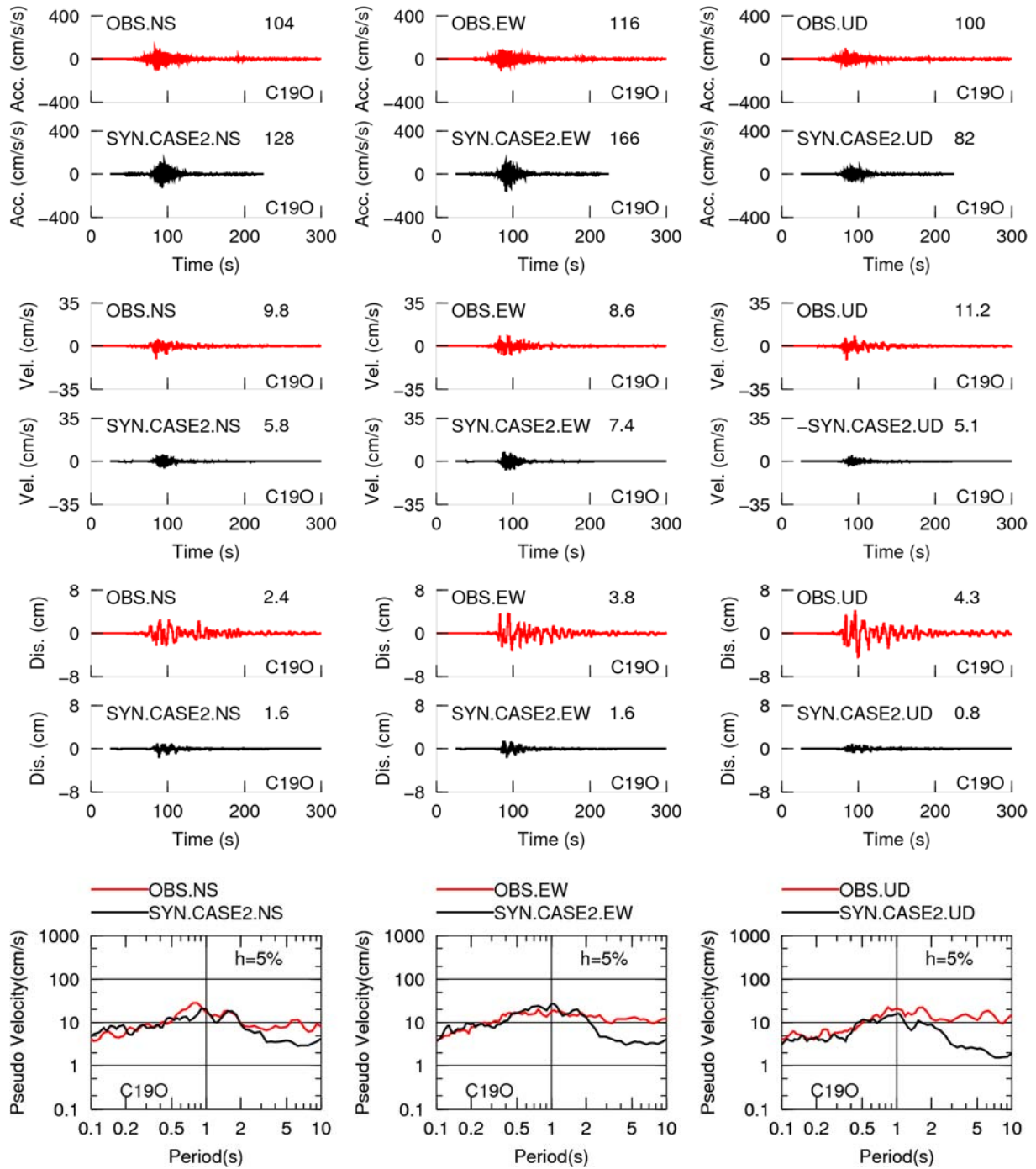


図2.1.2-19 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC190観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

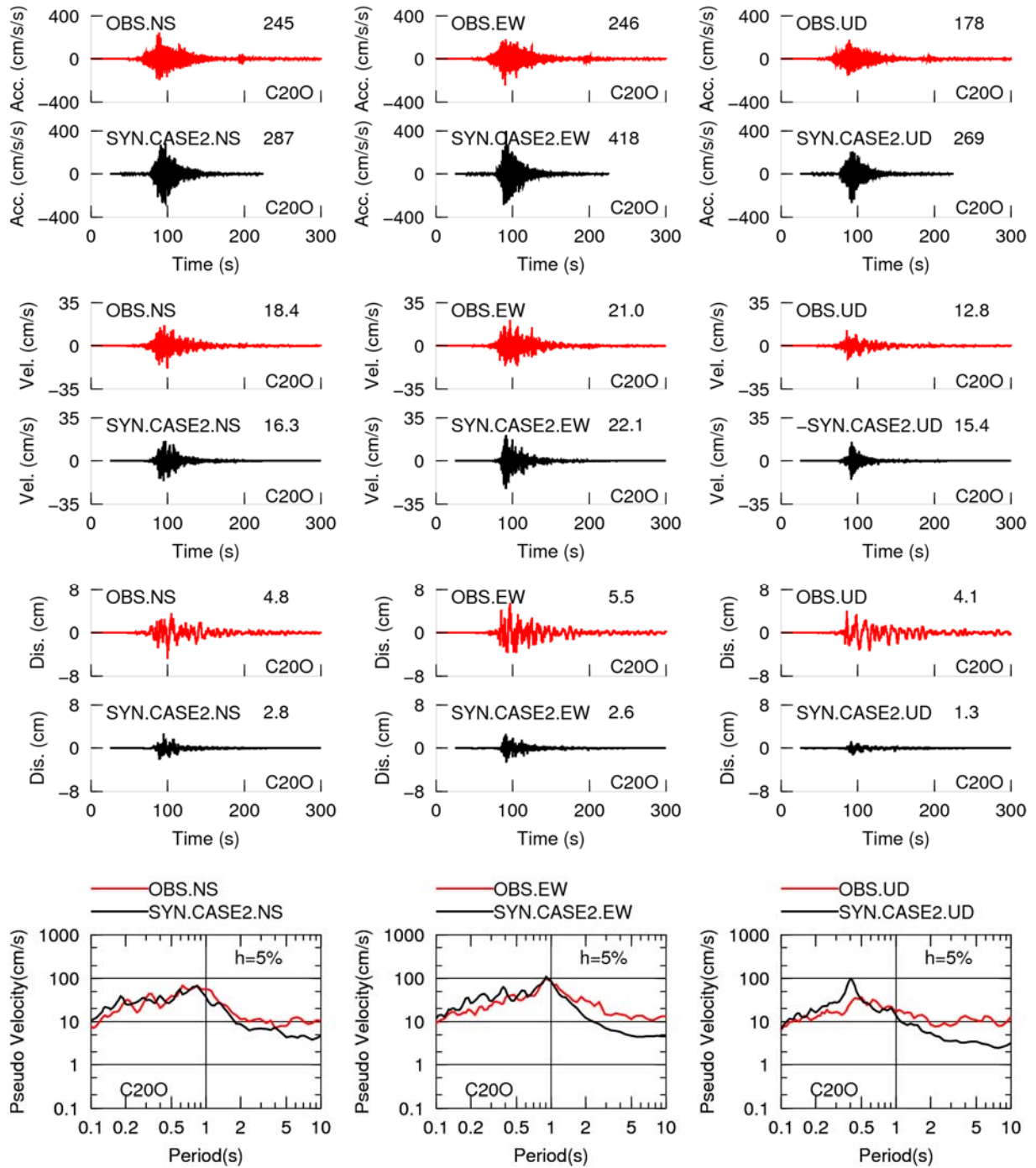


図2.1.2-20 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

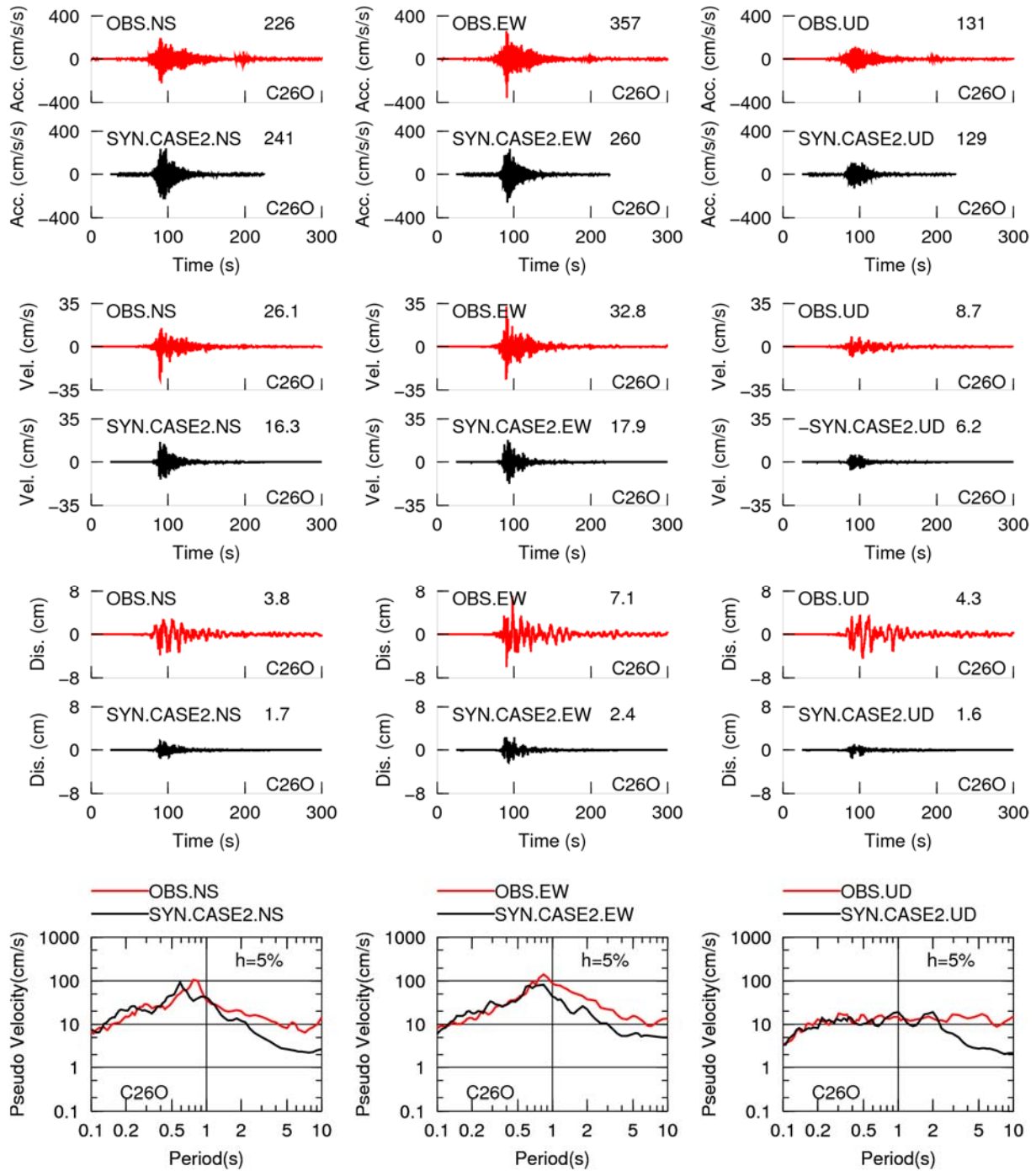


図2.1.2-21 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC26O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

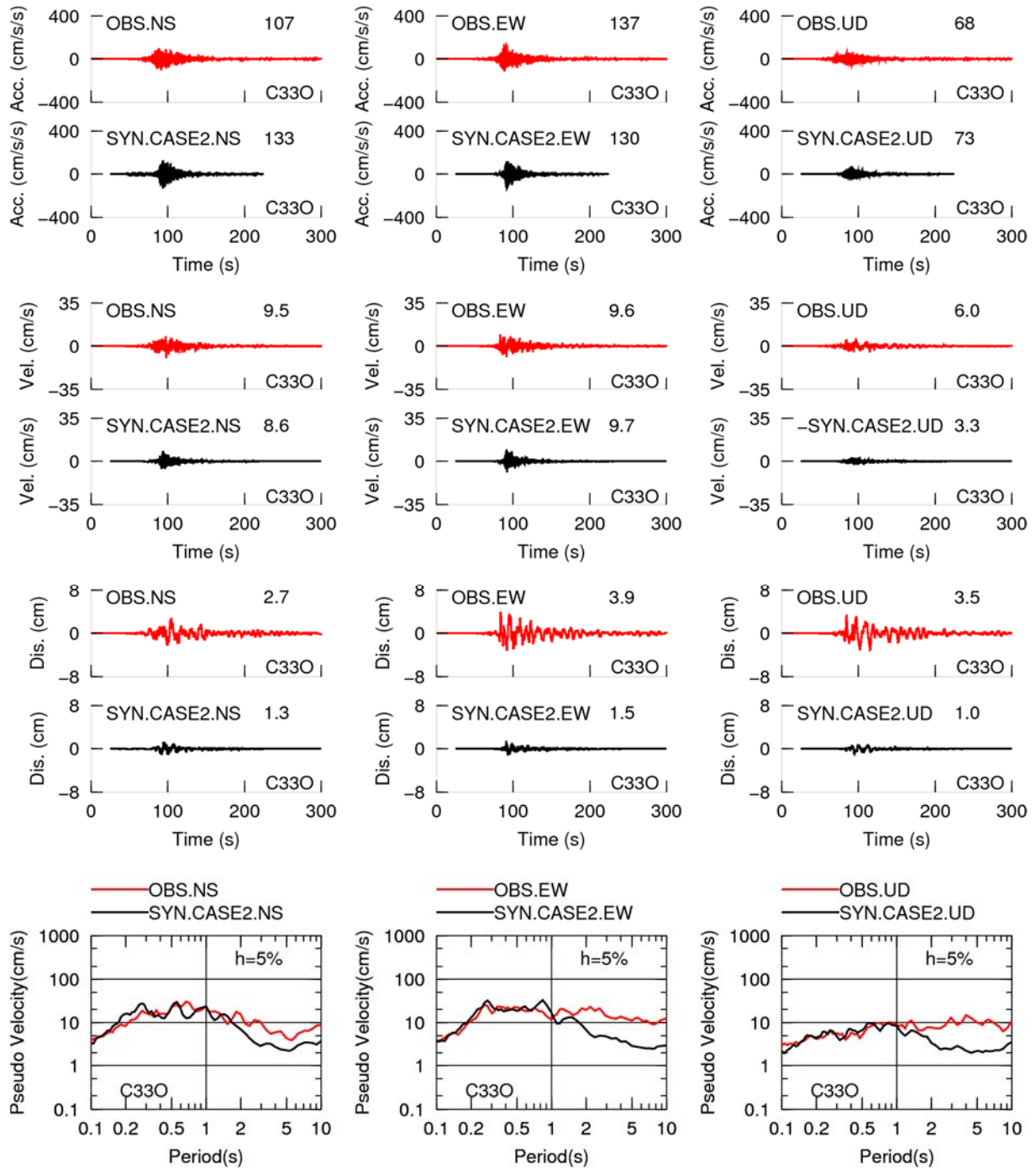


図2.1.2-22 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のC330観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

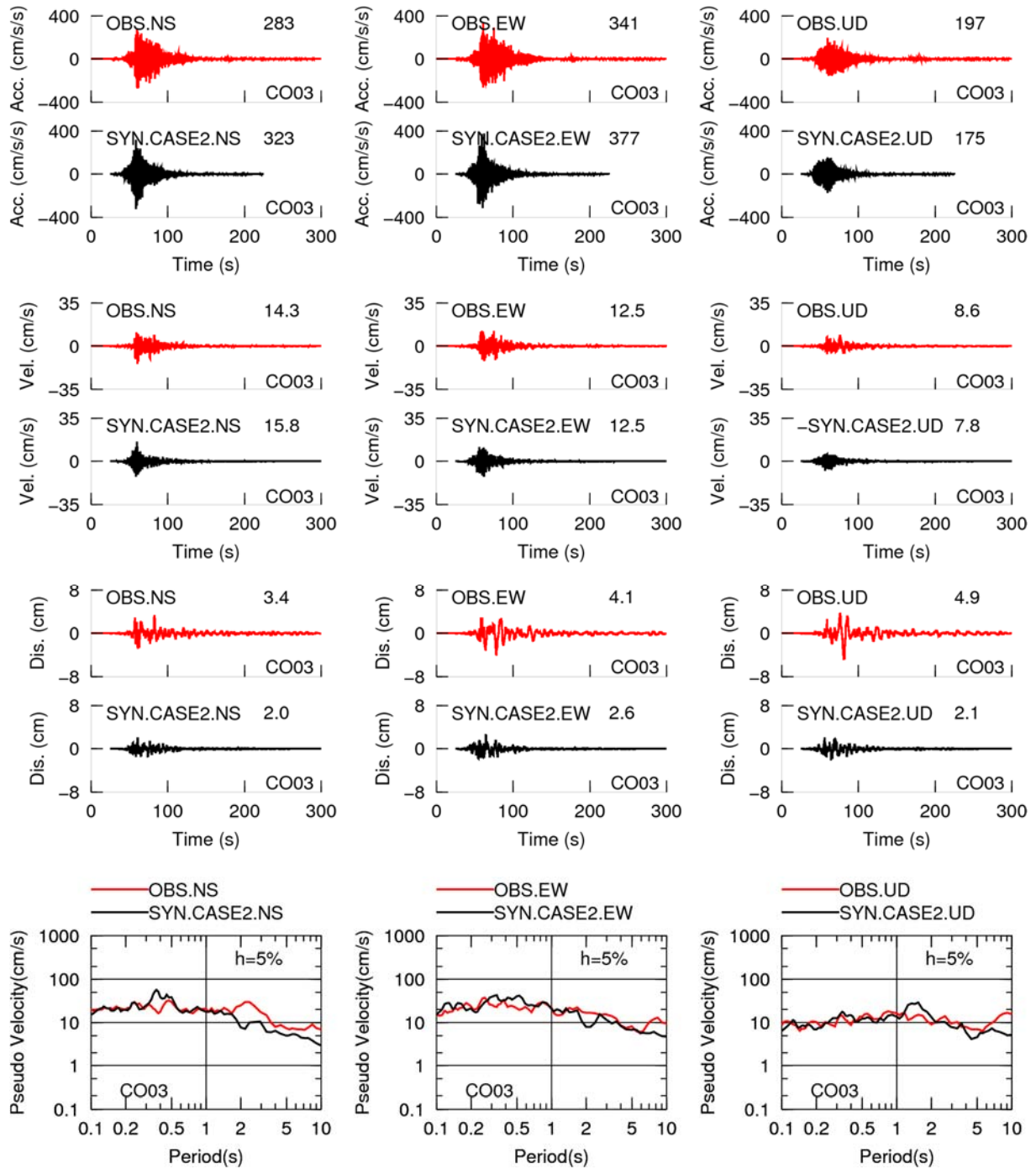


図2.1.2-23 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のCO03観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

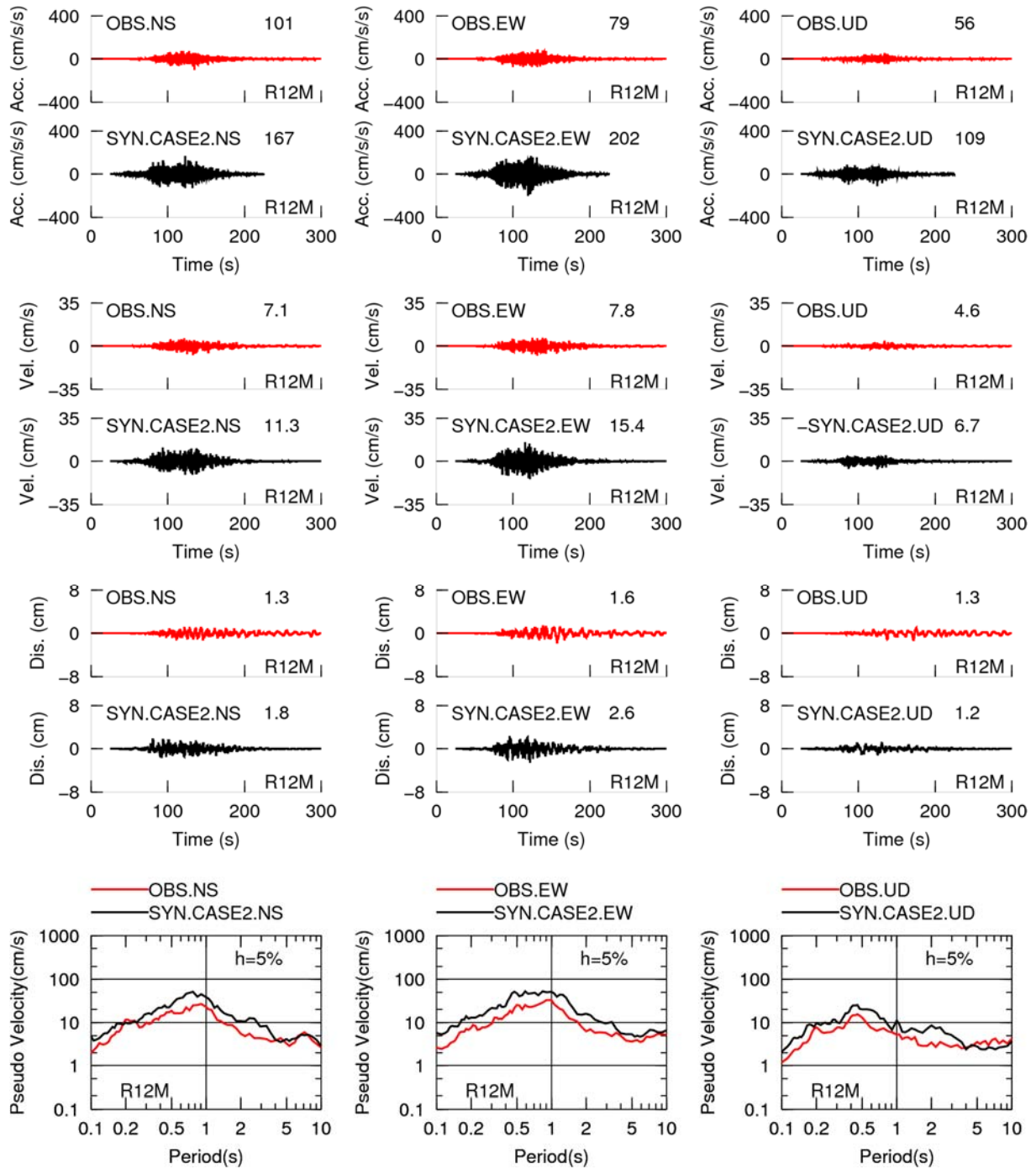


図2.1.2-24 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のR12M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

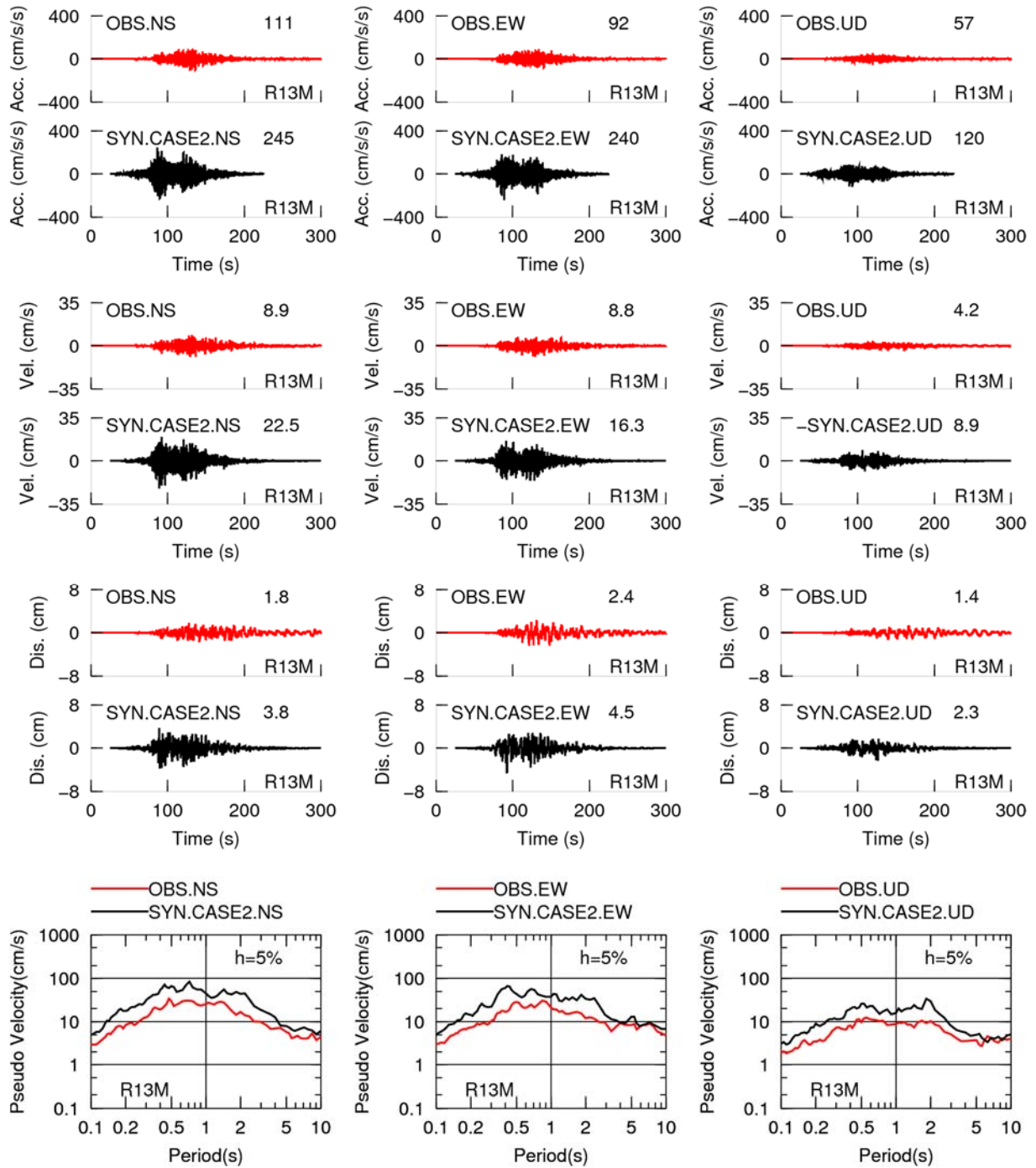


図2.1.2-25 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のR13M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

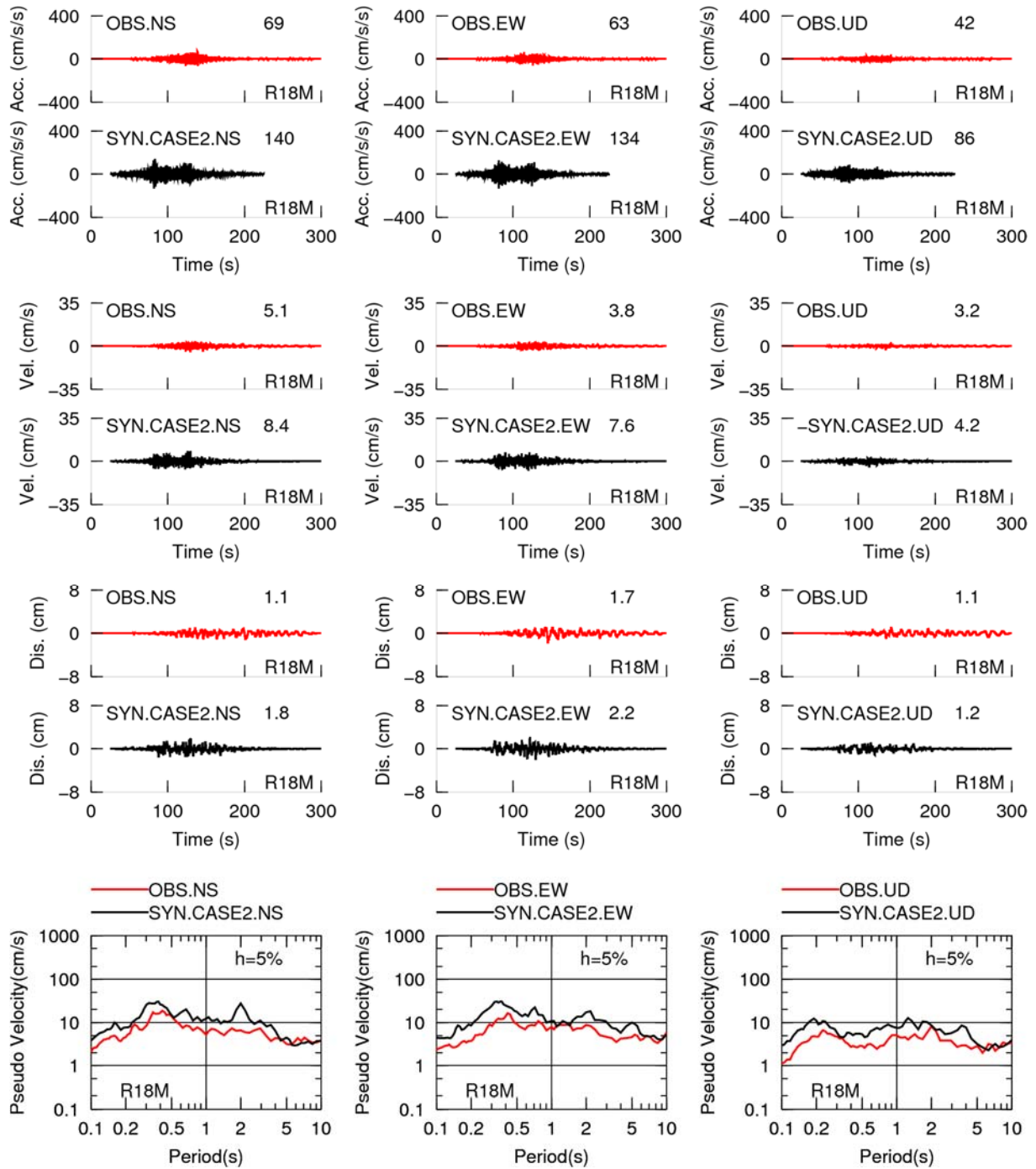


図2.1.2-26 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のR18M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

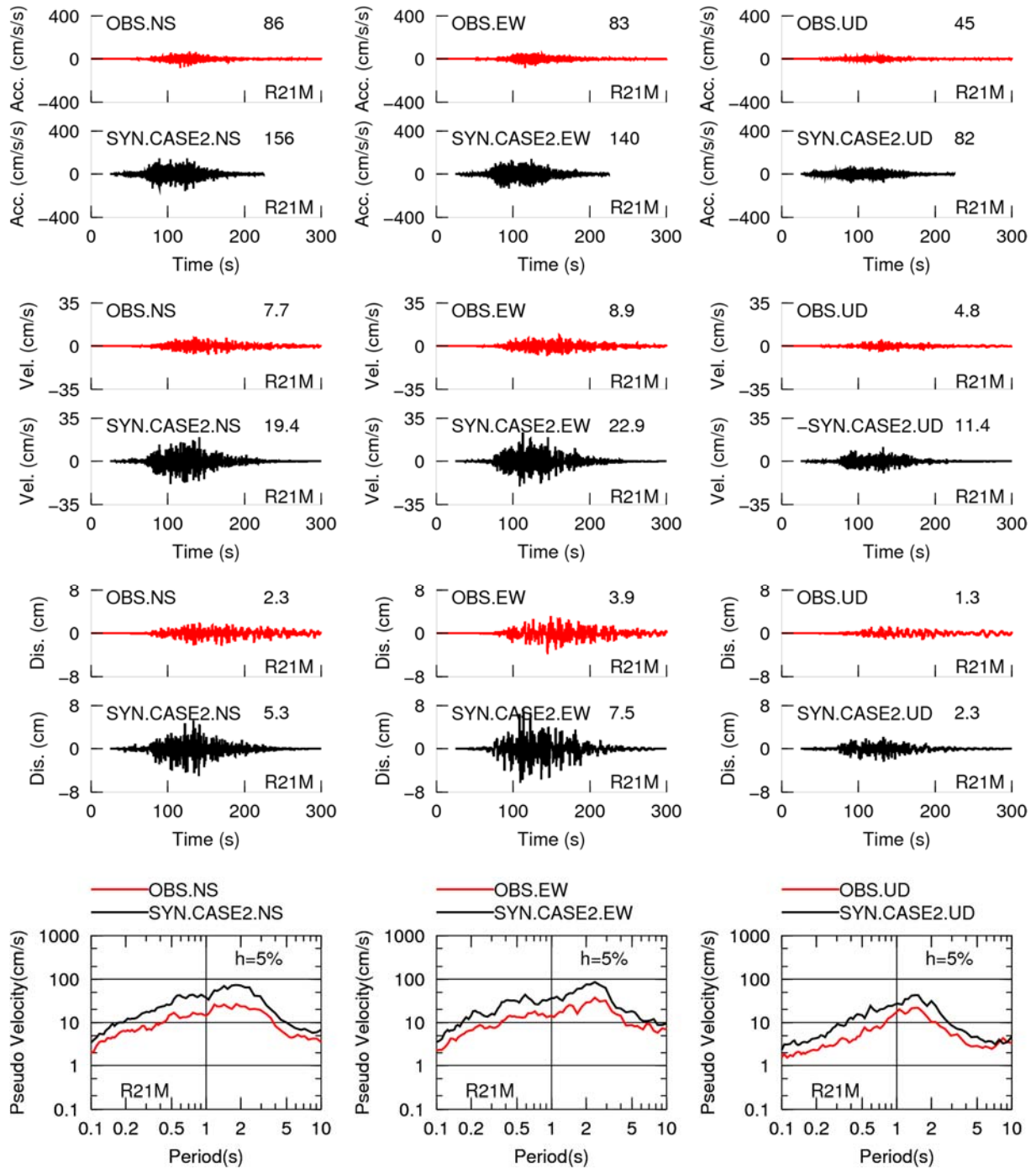


図2.1.2-27 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のR21M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

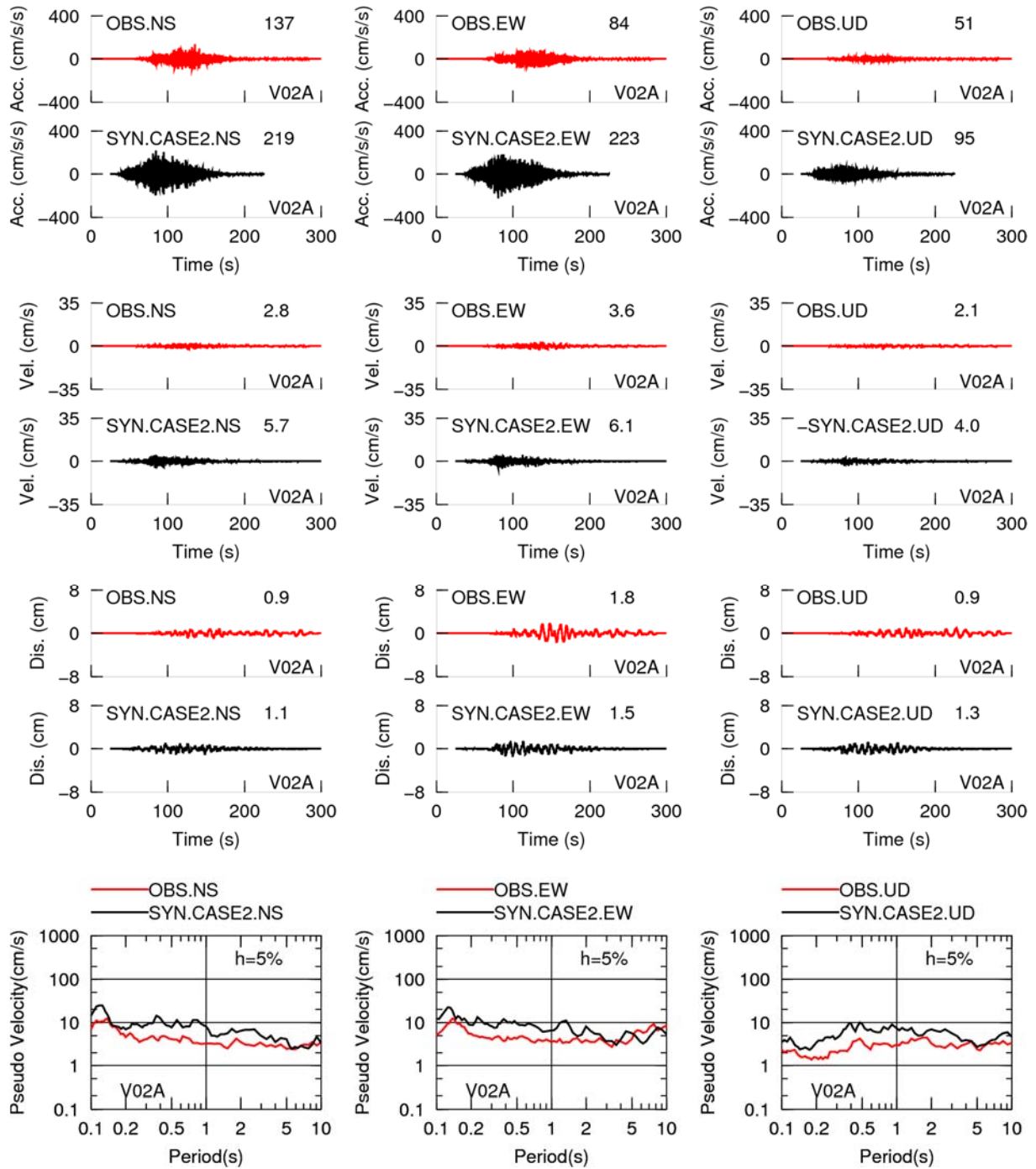


図2.1.2-28 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリIllapel地震のV02A観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

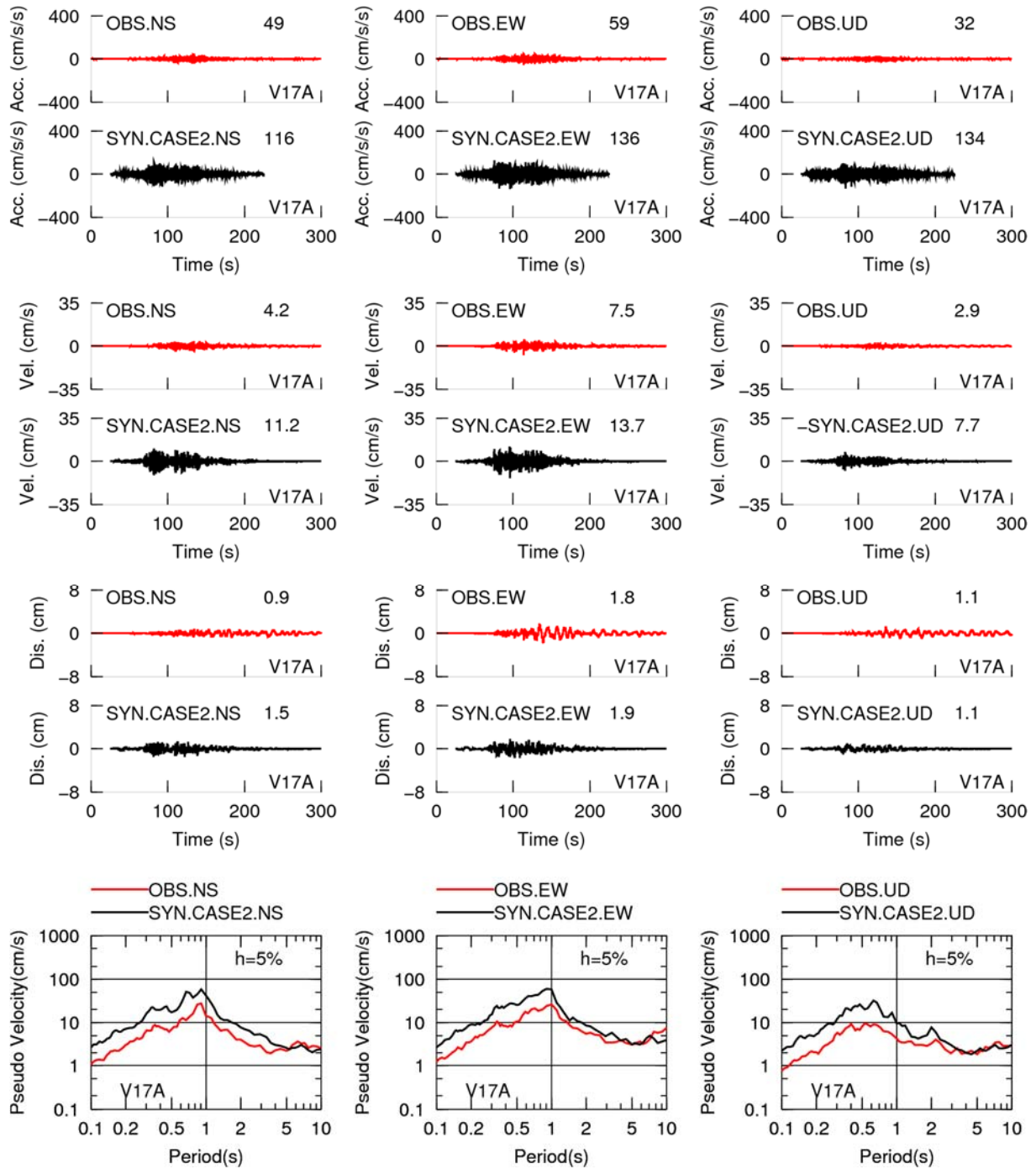


図2.1.2-29 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部のみの大すべり域: Case2)による2015年チリ Illapel地震のV17A観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

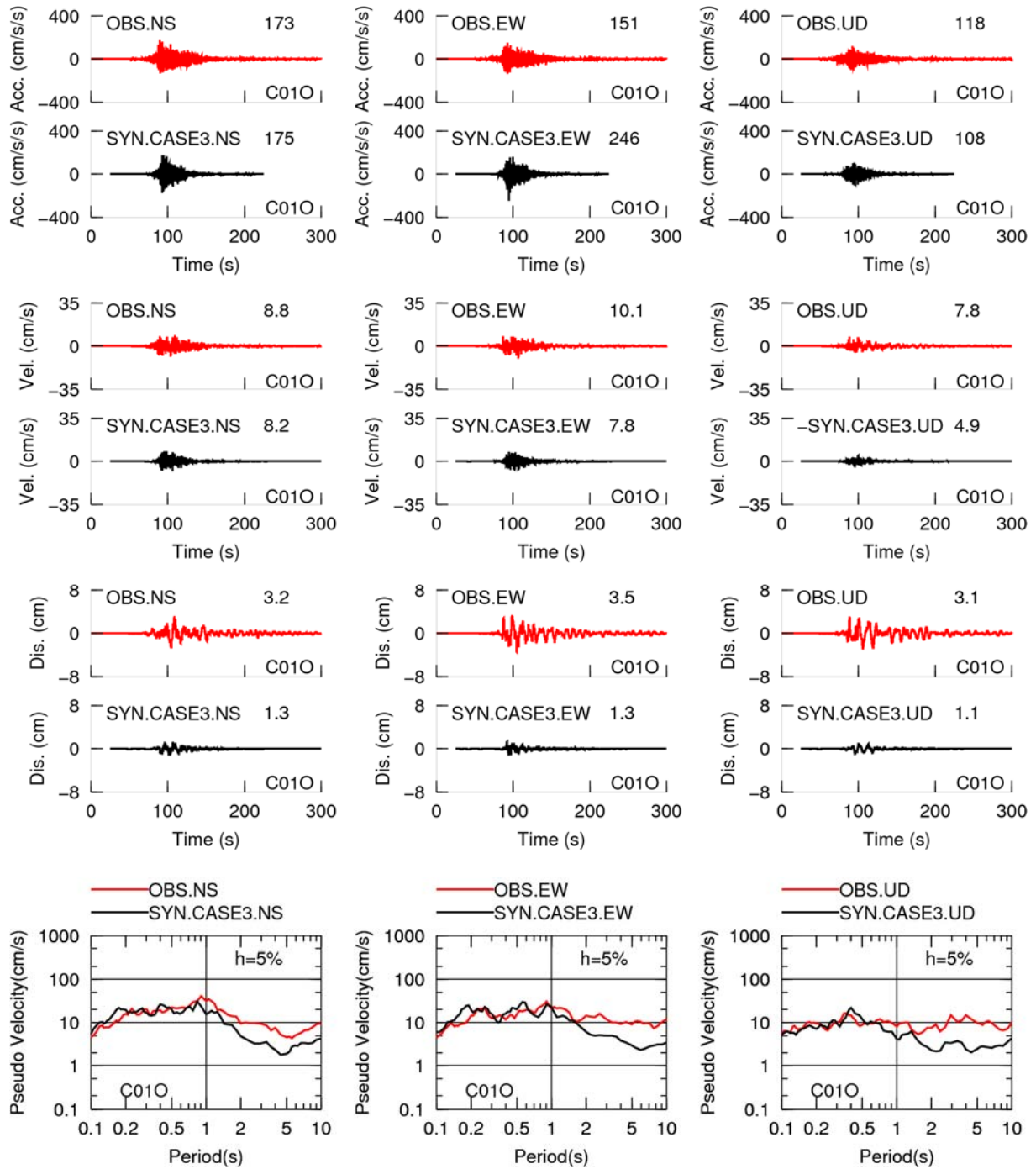


図2.1.2-30 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

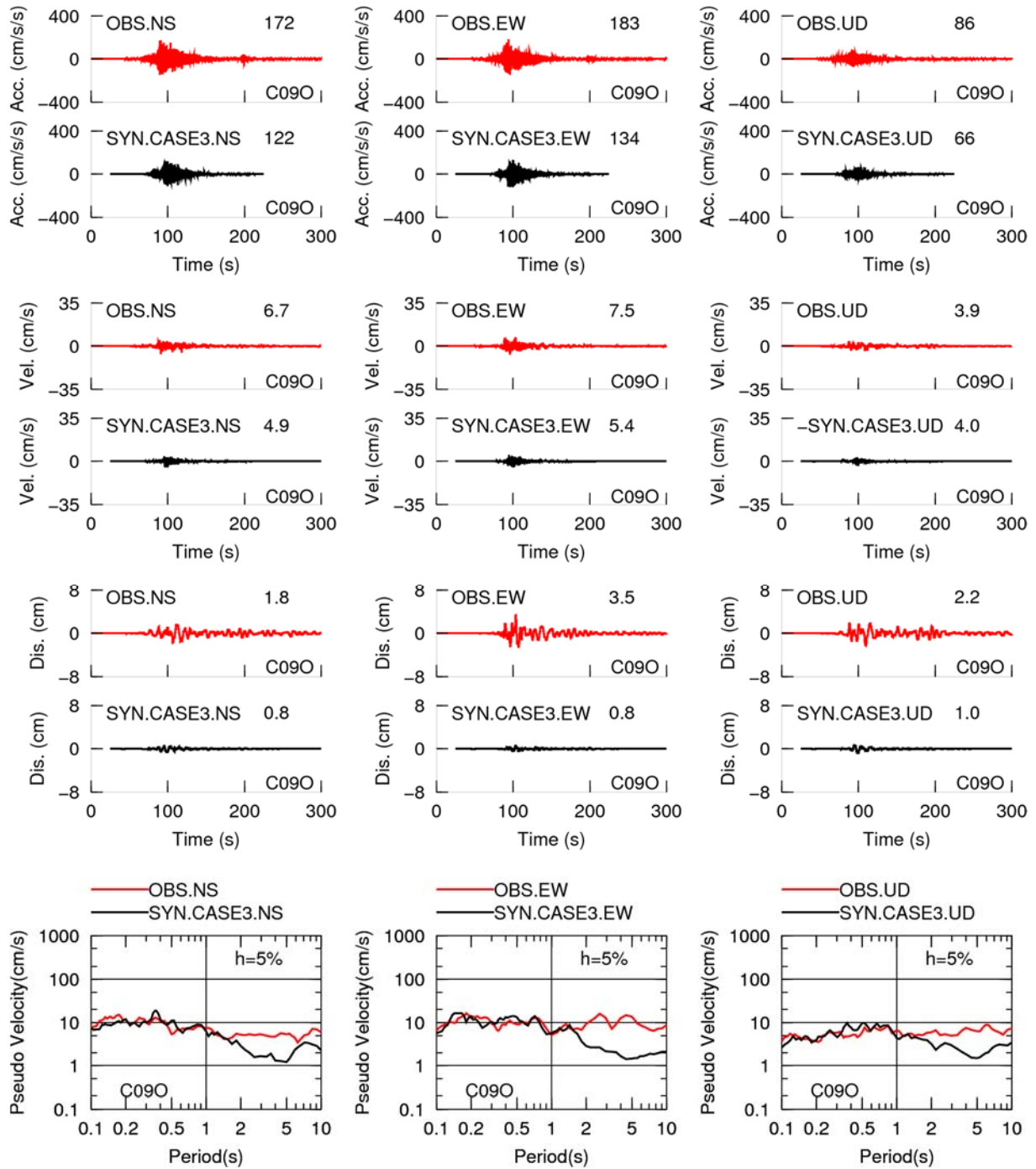


図2.1.2-31 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC09O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

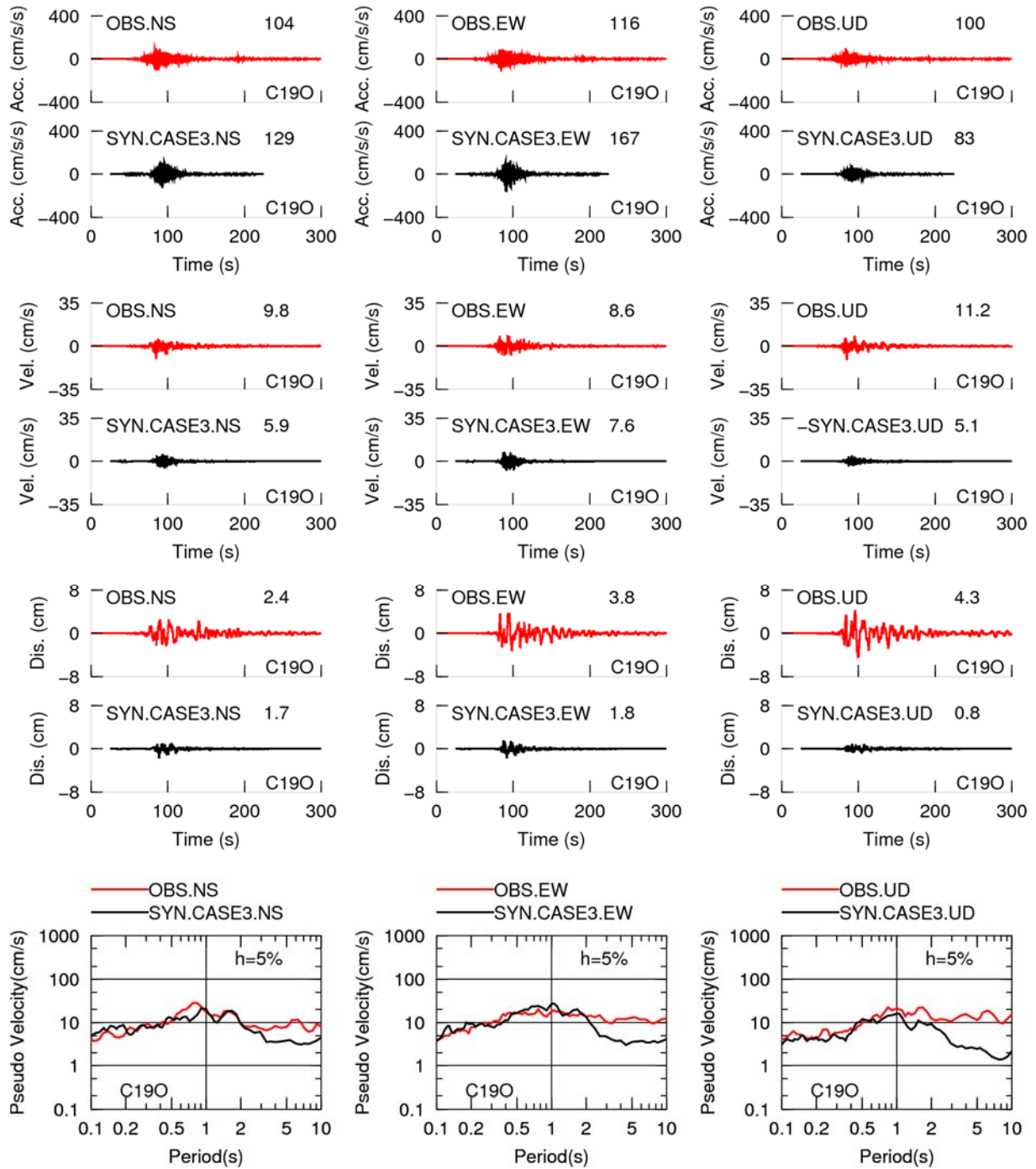


図2.1.2-32 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC190観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

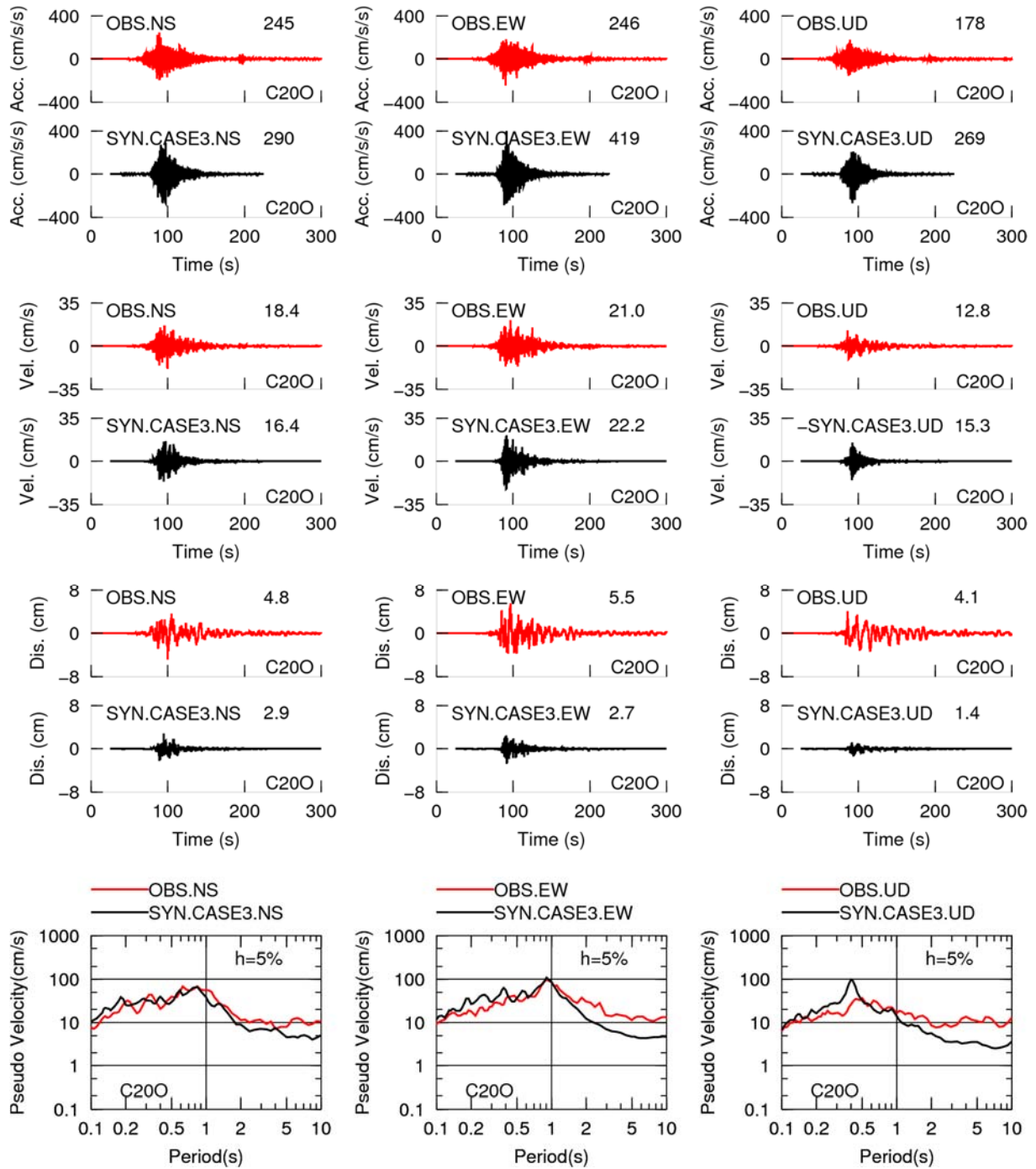


図2.1.2-33 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

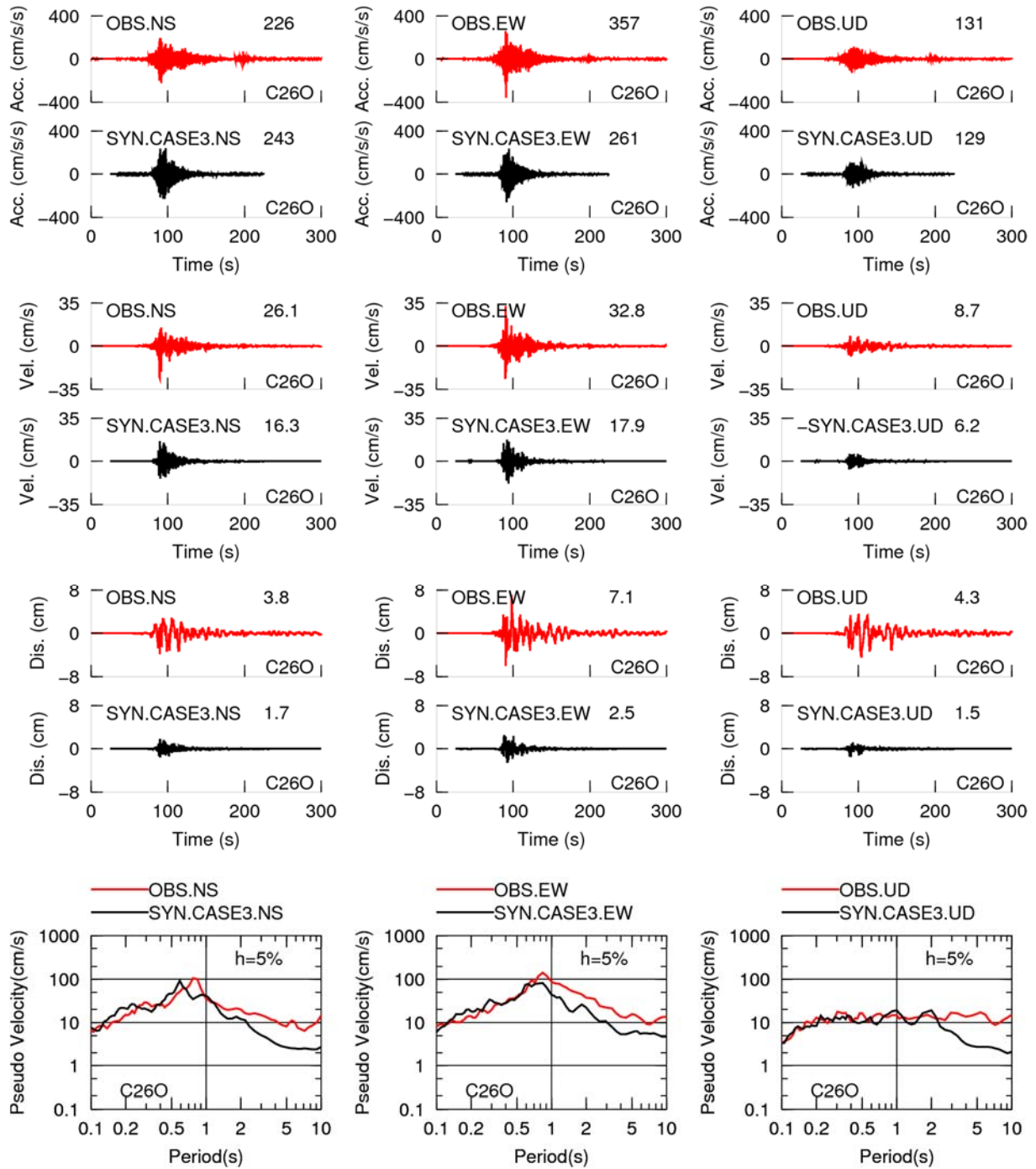


図2.1.2-34 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC26O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

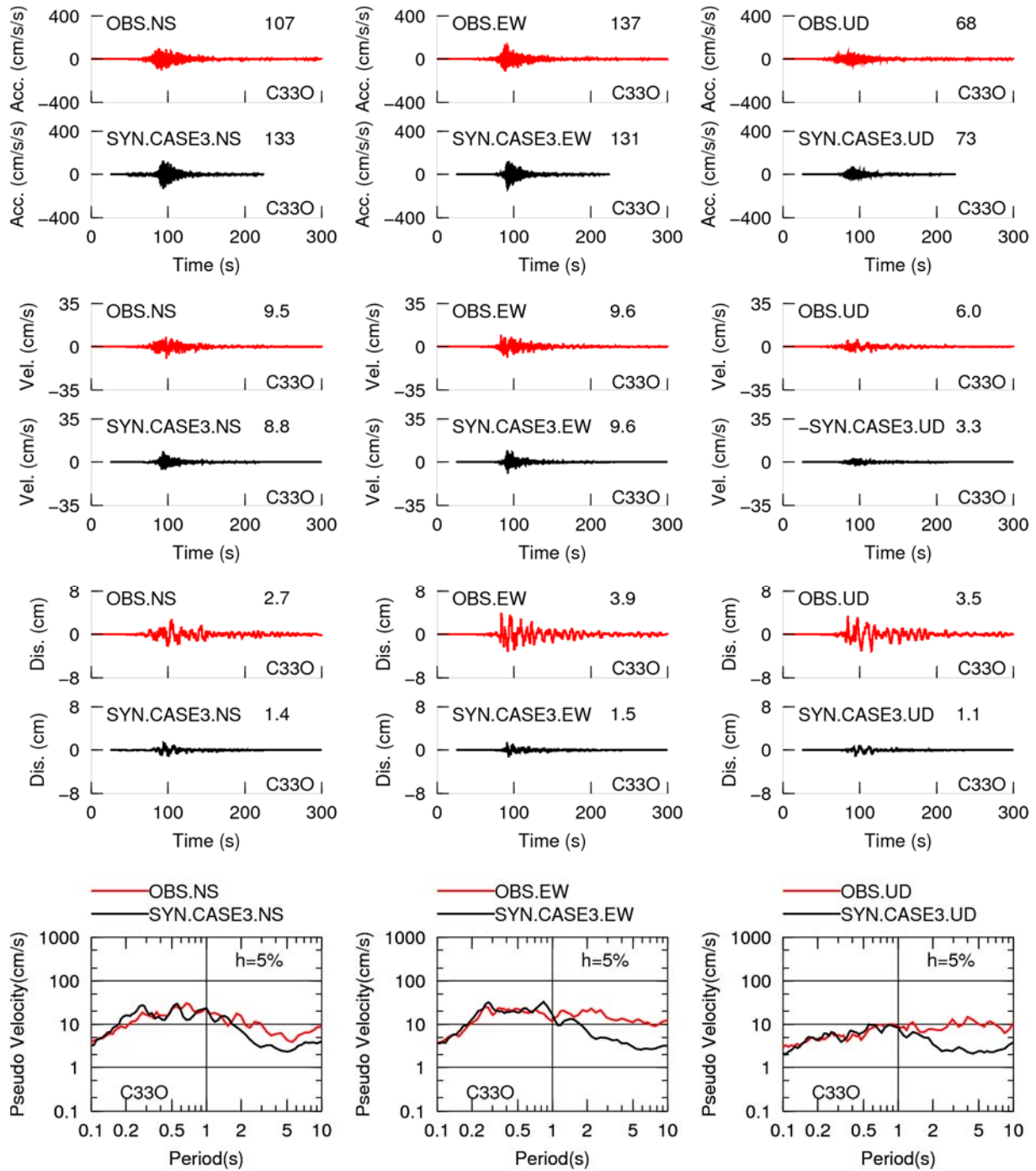


図2.1.2-35 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のC33O観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

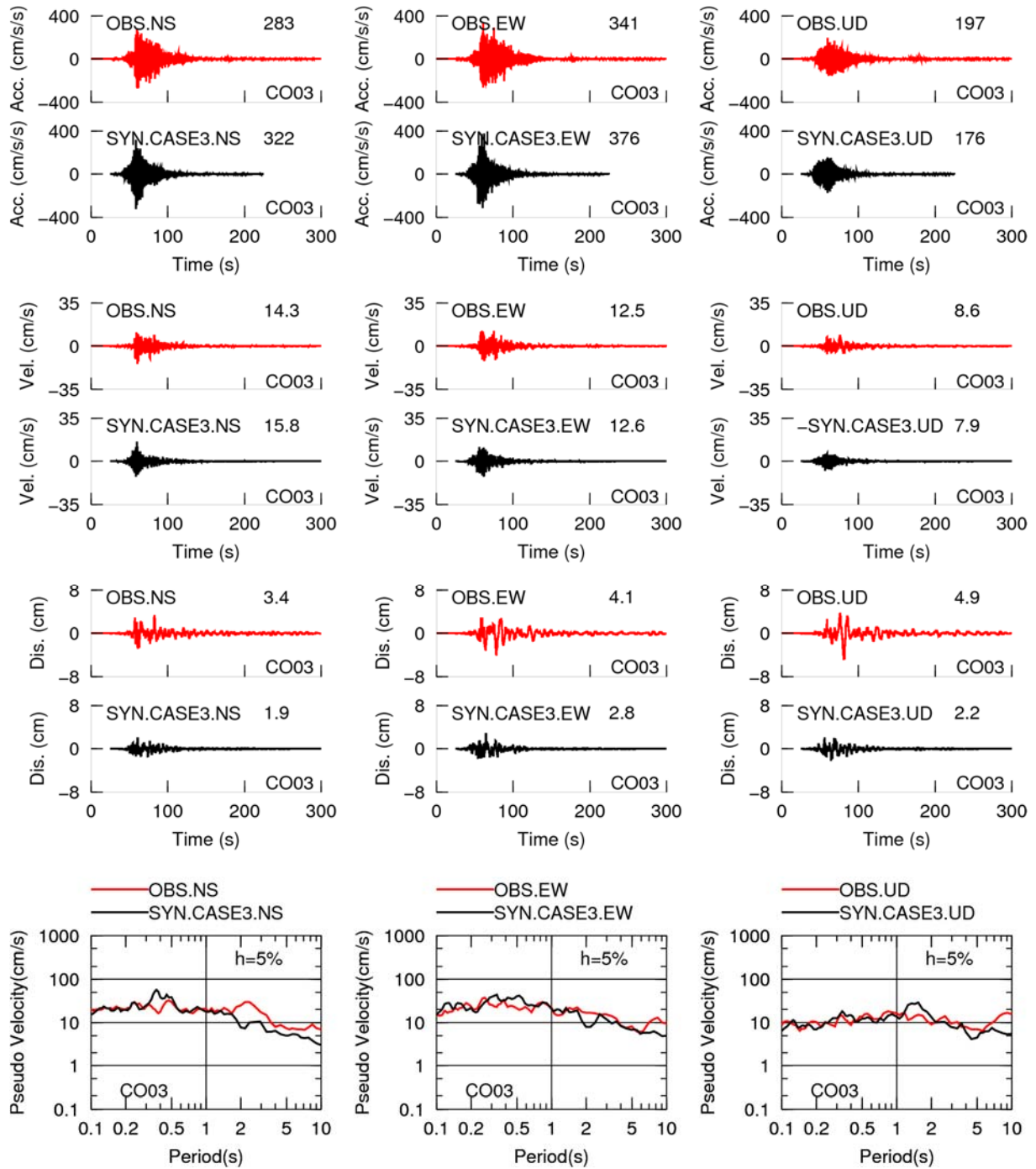


図2.1.2-36 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のCO03観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

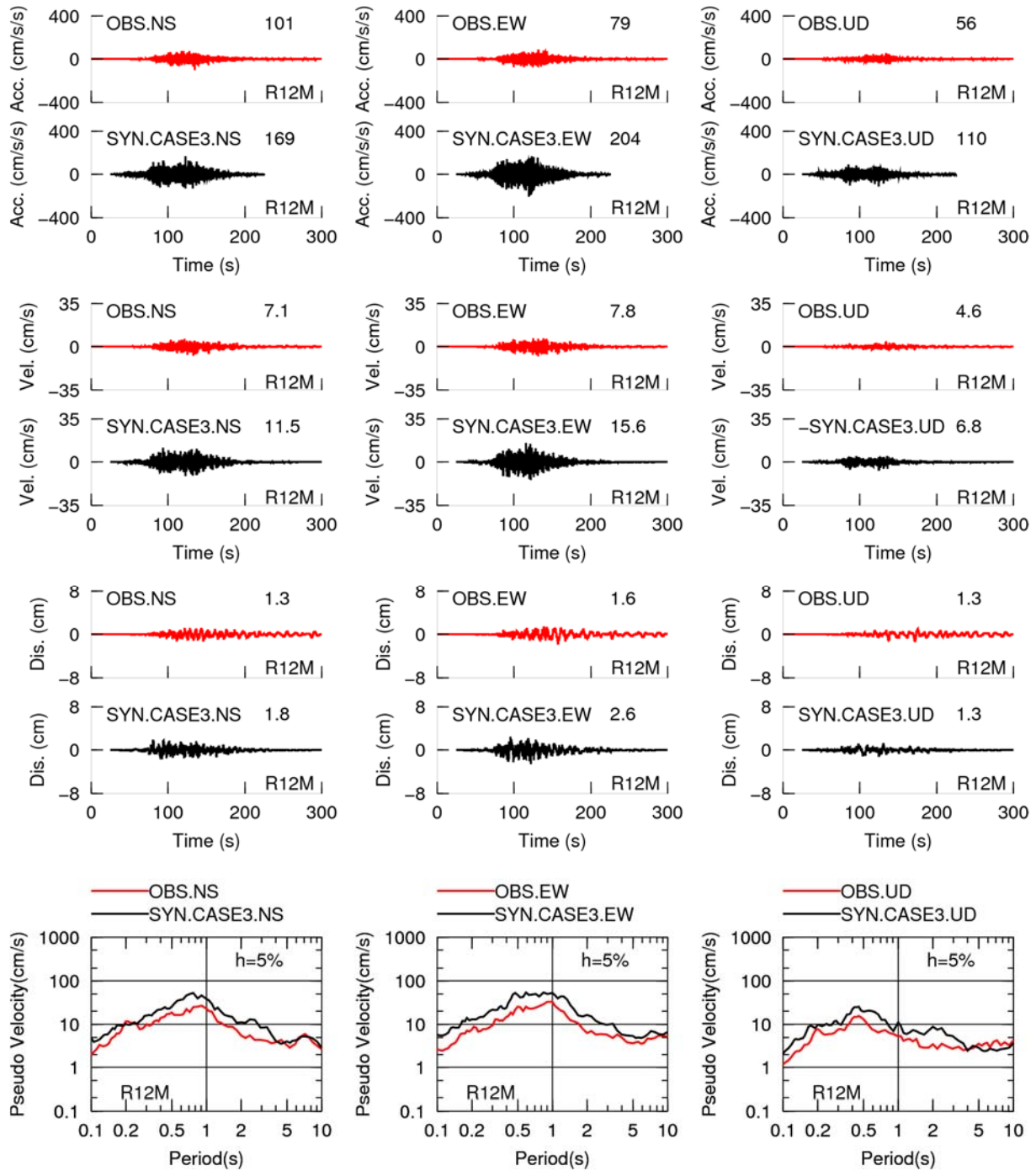


図2.1.2-37 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域:Case3)による2015年チリ Illapel地震のR12M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

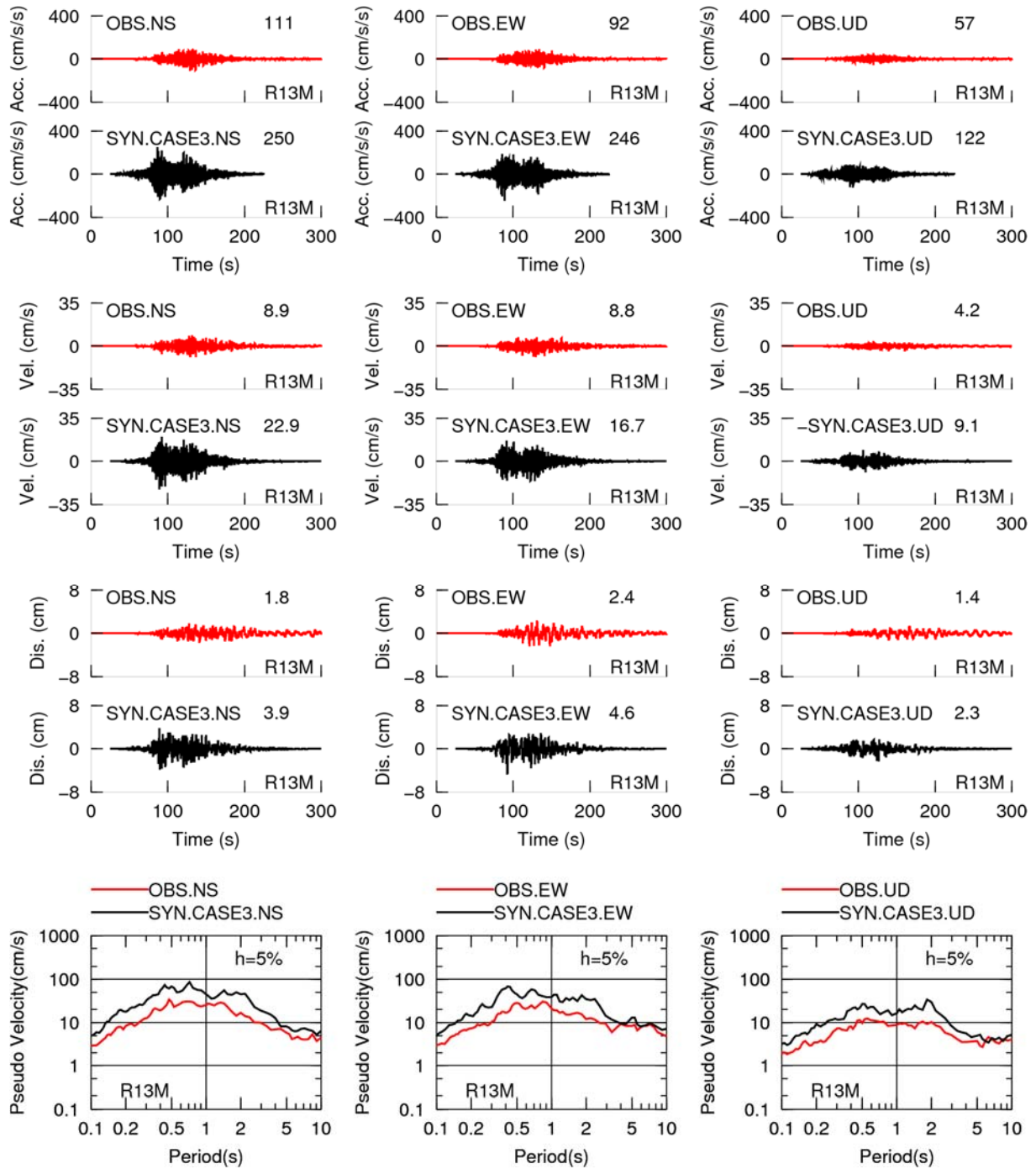


図2.1.2-38 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のR13M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

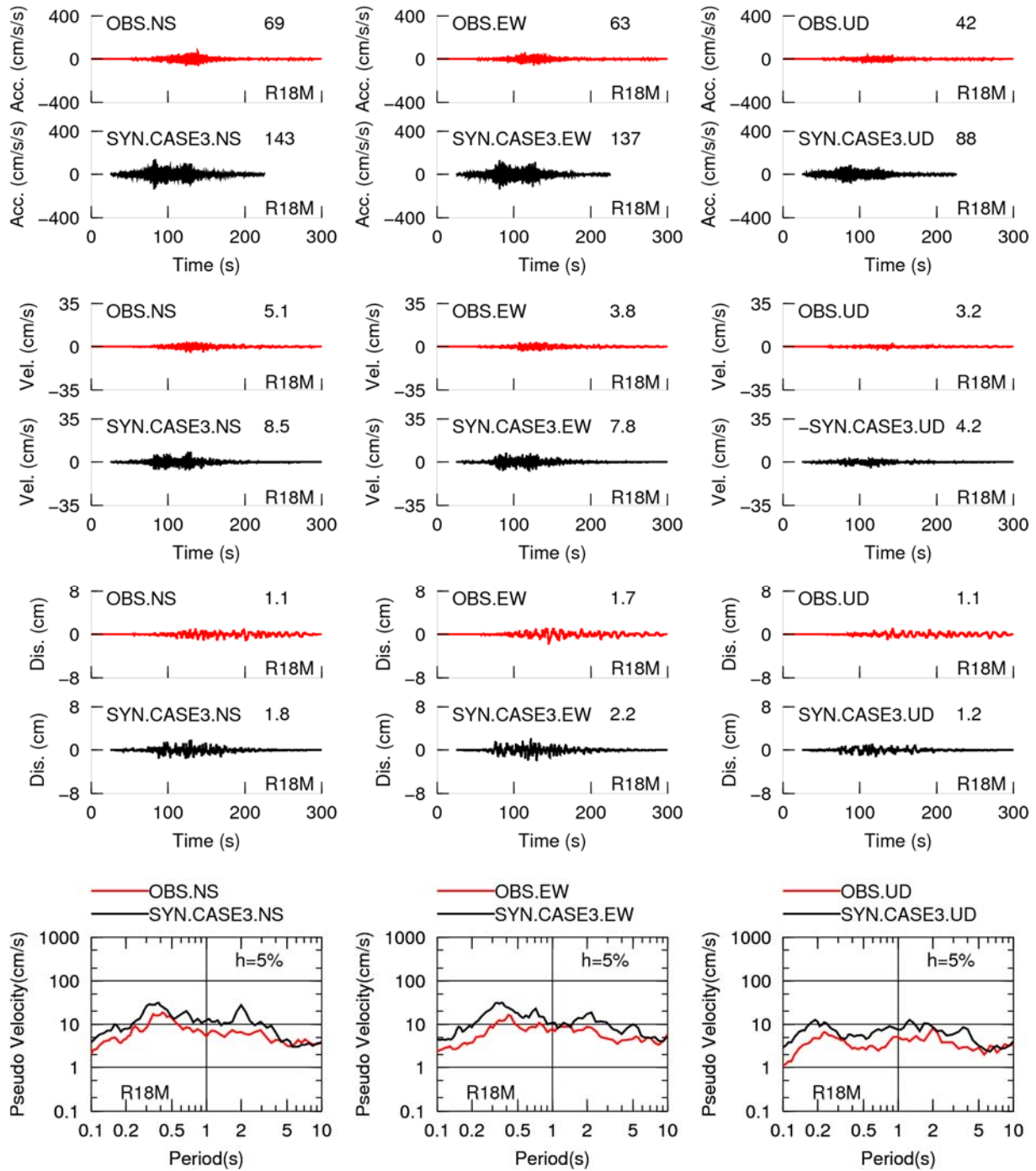


図2.1.2-39 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のR18M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

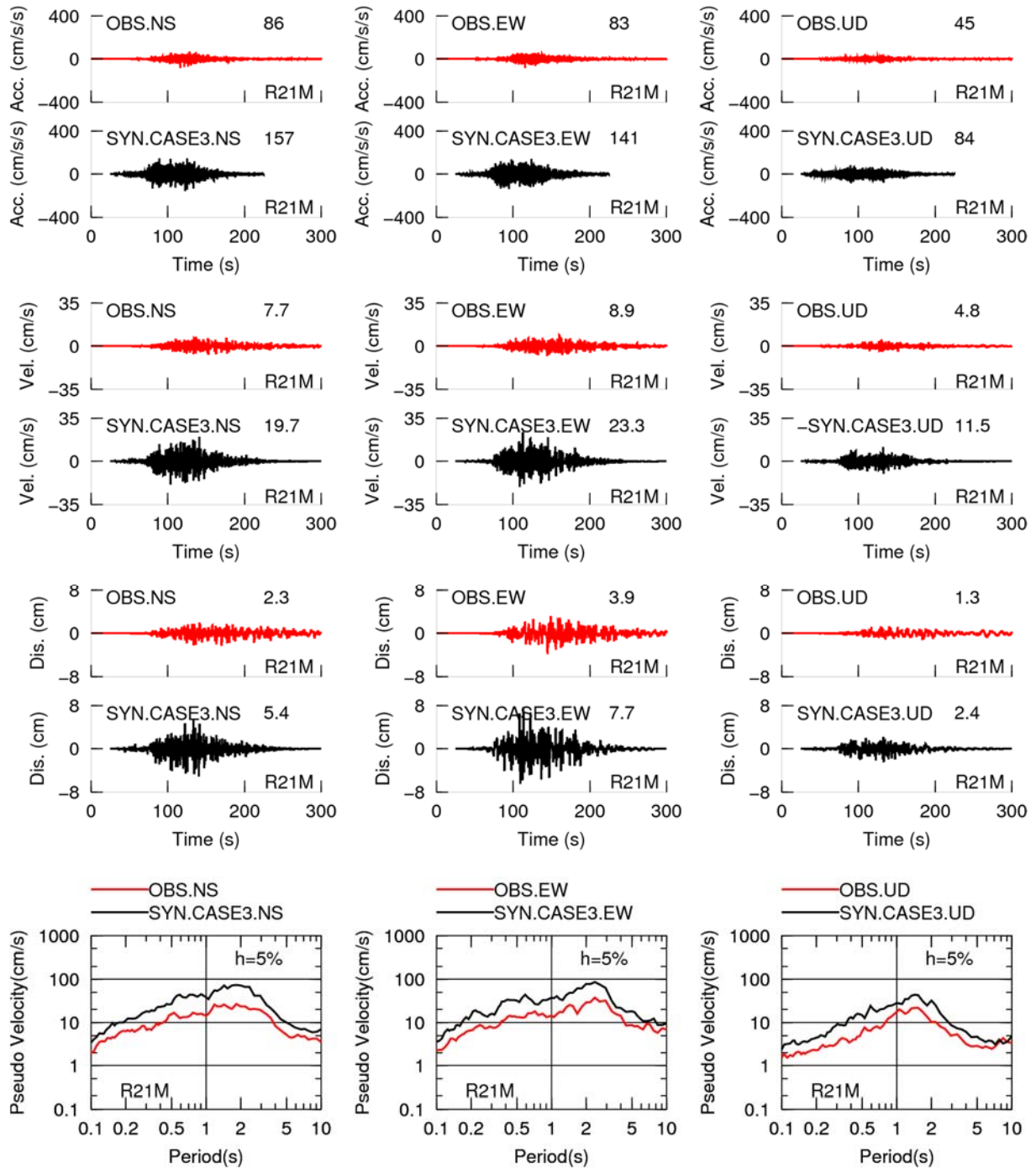


図2.1.2-40 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域:Case3)による2015年チリIllapel地震のR21M観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

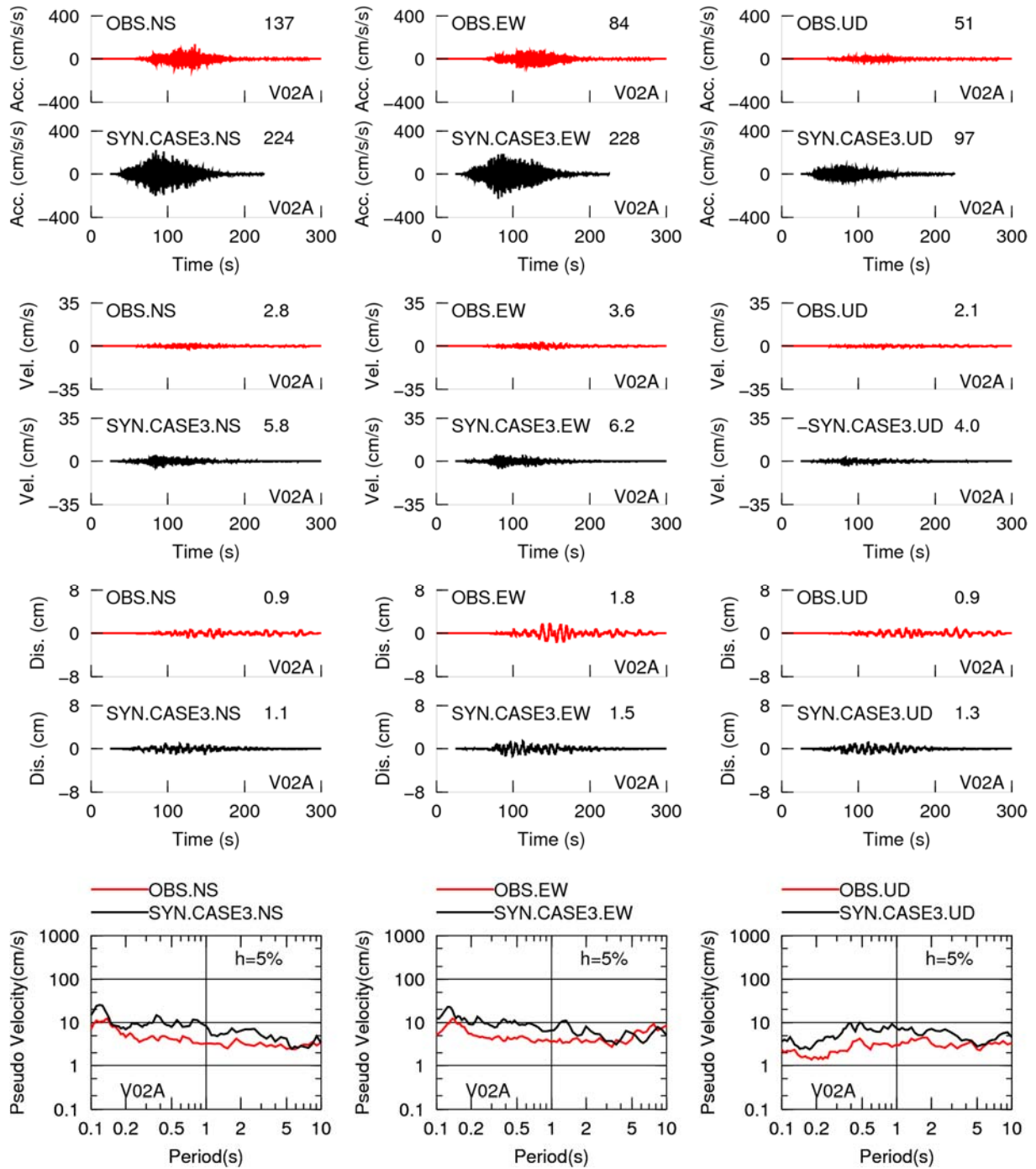


図2.1.2-41 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のV02A観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

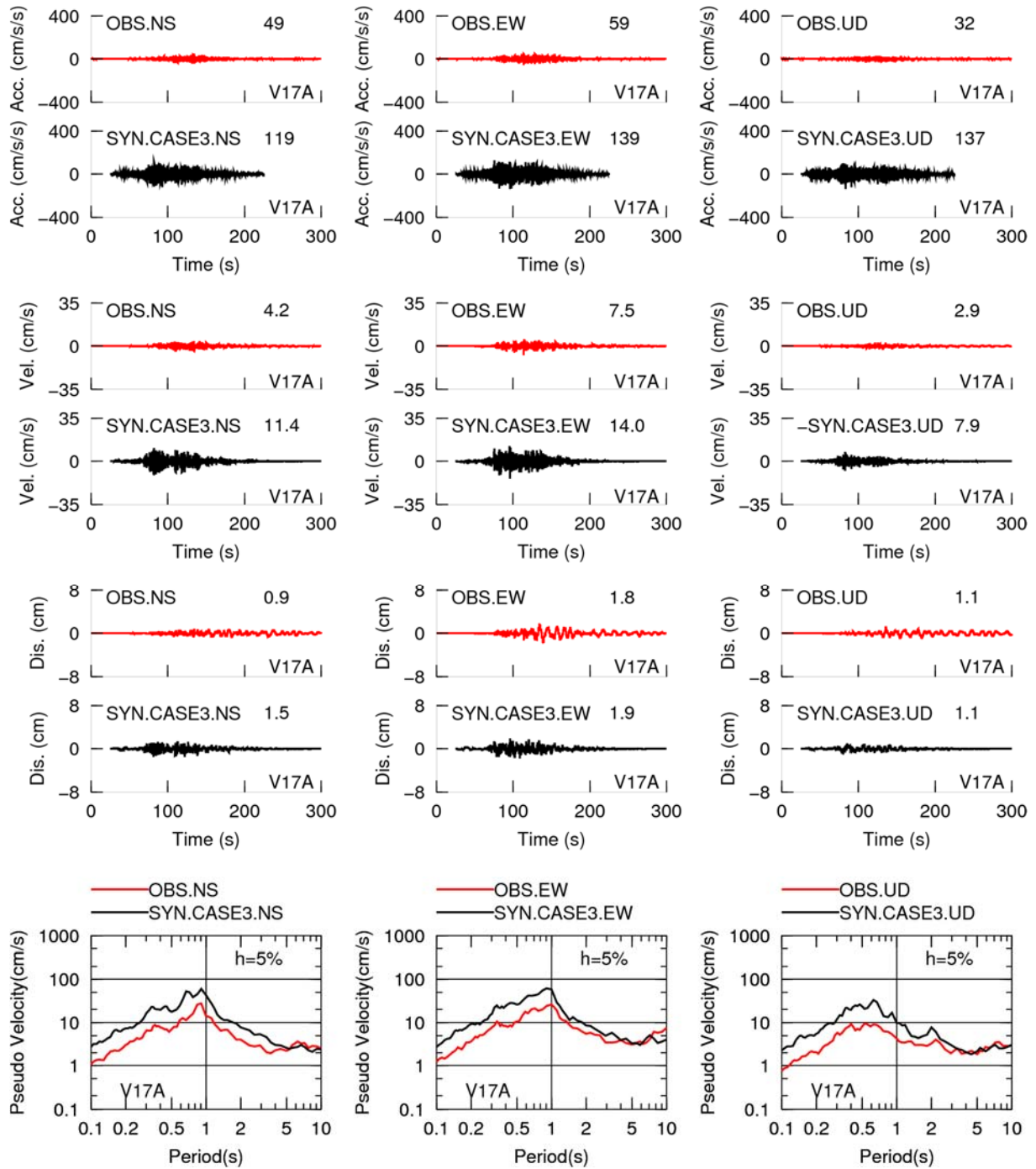


図2.1.2-42 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル(円形クラック式+浅部および深部の大すべり域: Case3)による2015年チリ Illapel地震のV17A観測点における合成結果(上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル)

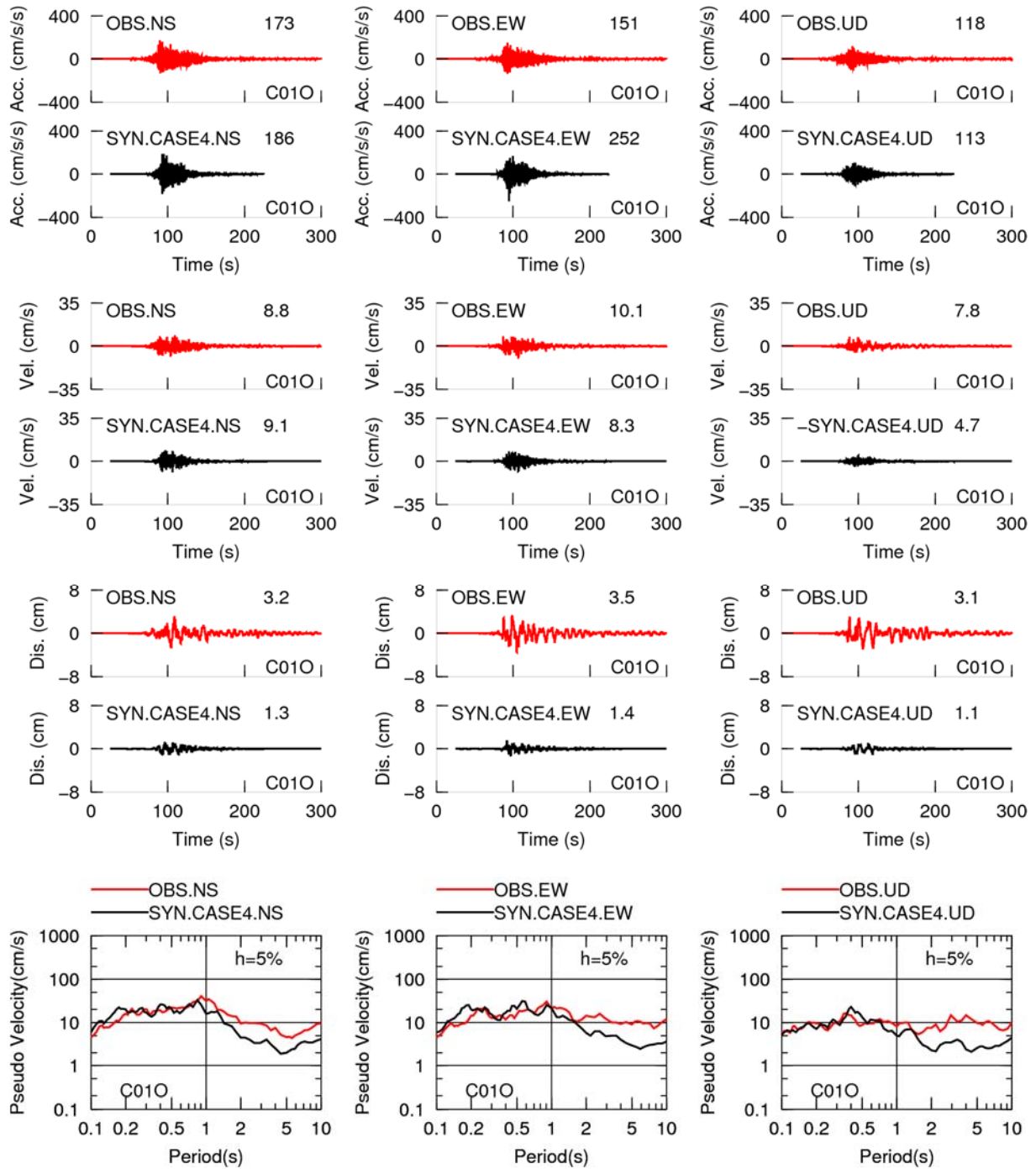


図2.1.2-43 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

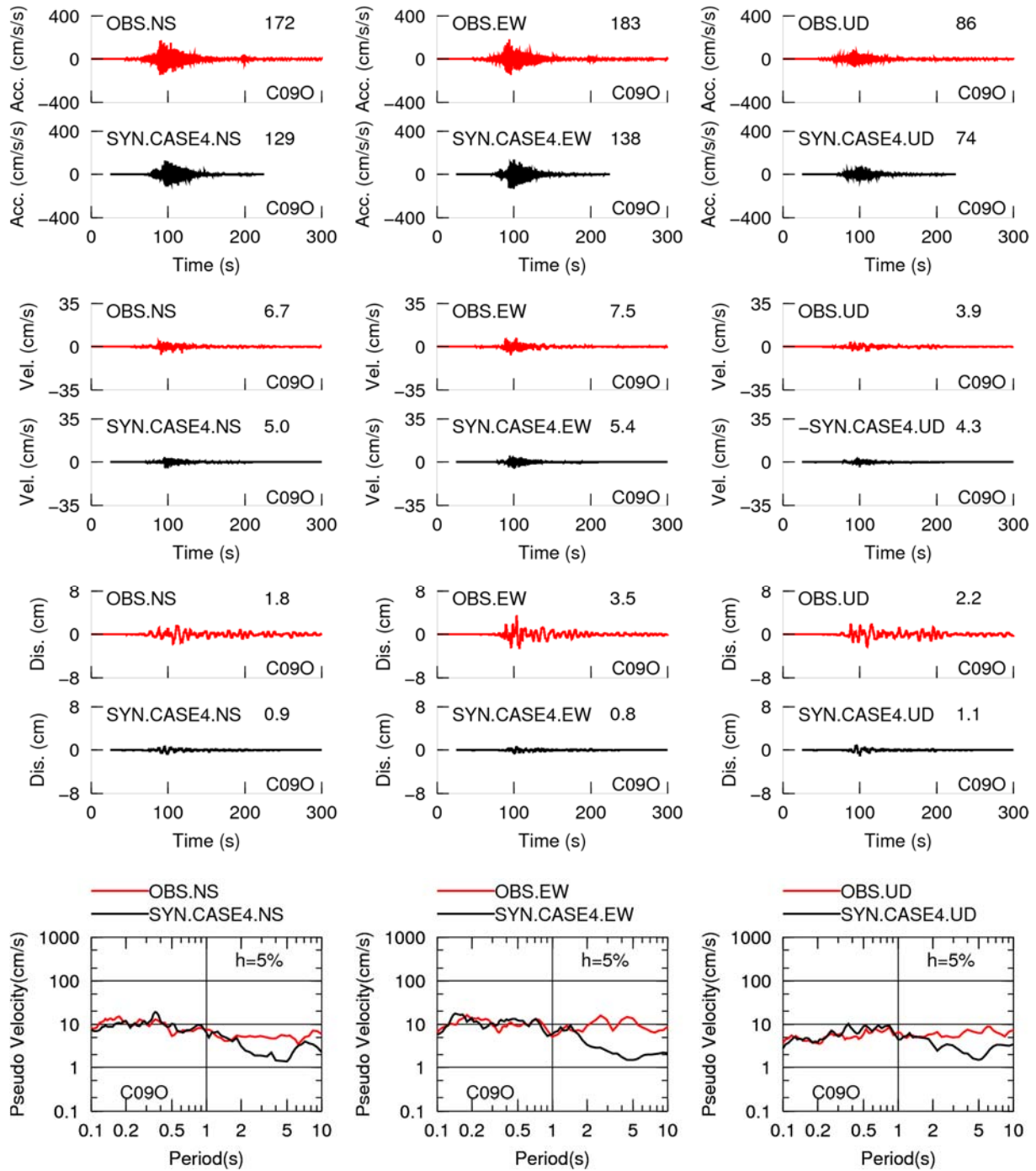


図2.1.2-44 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC09O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

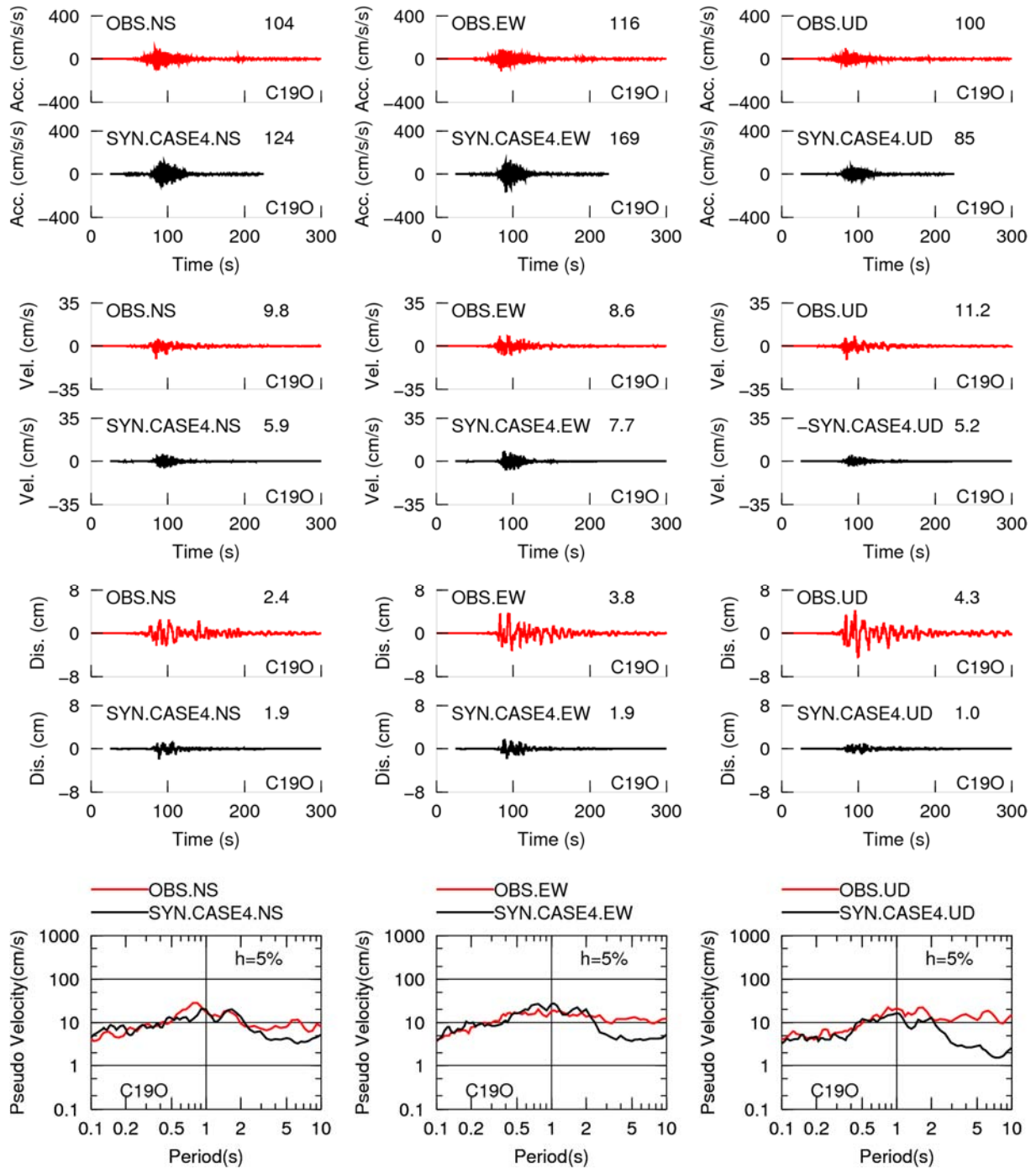


図2.1.2-45 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC19O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

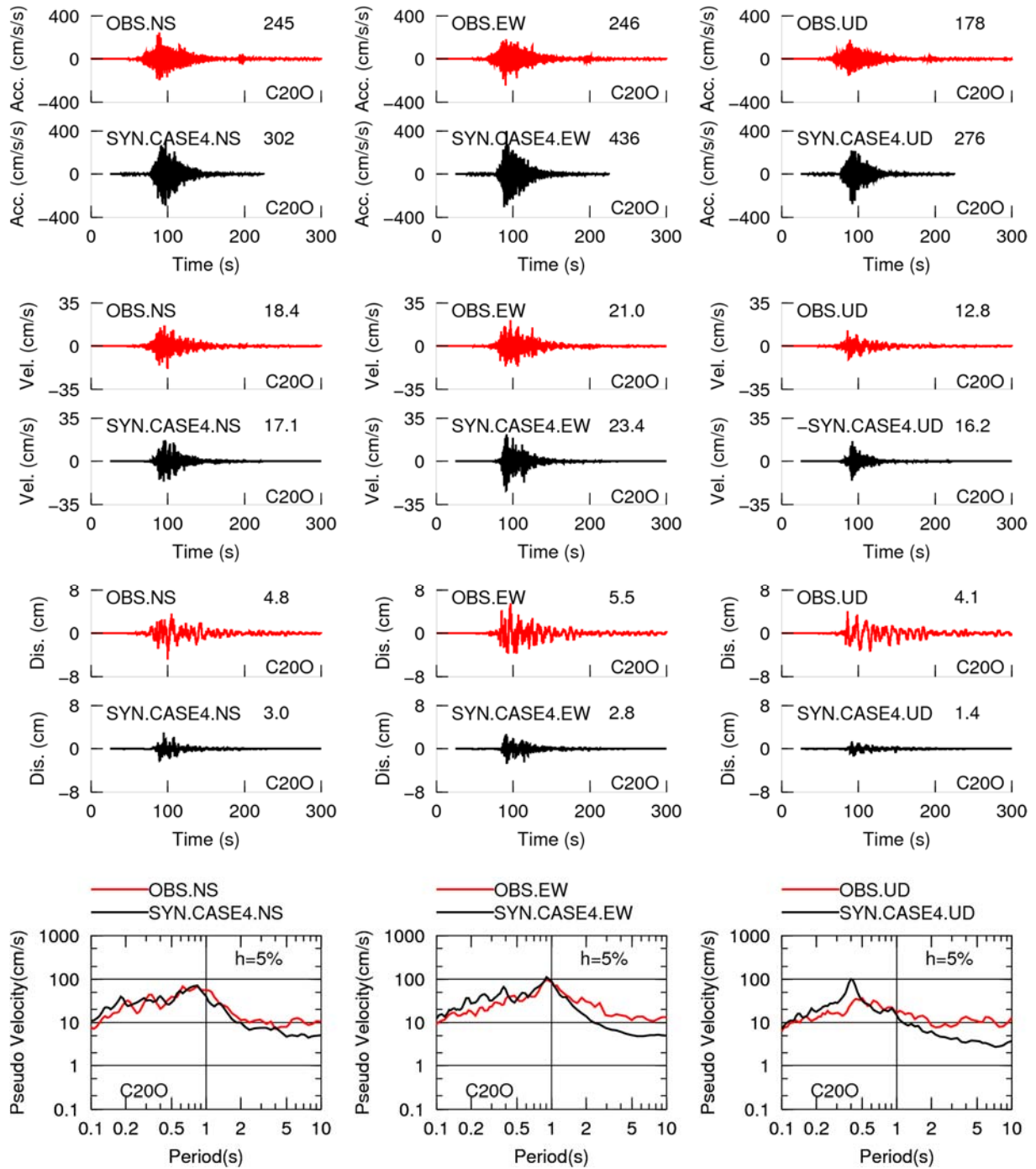


図2.1.2-46 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

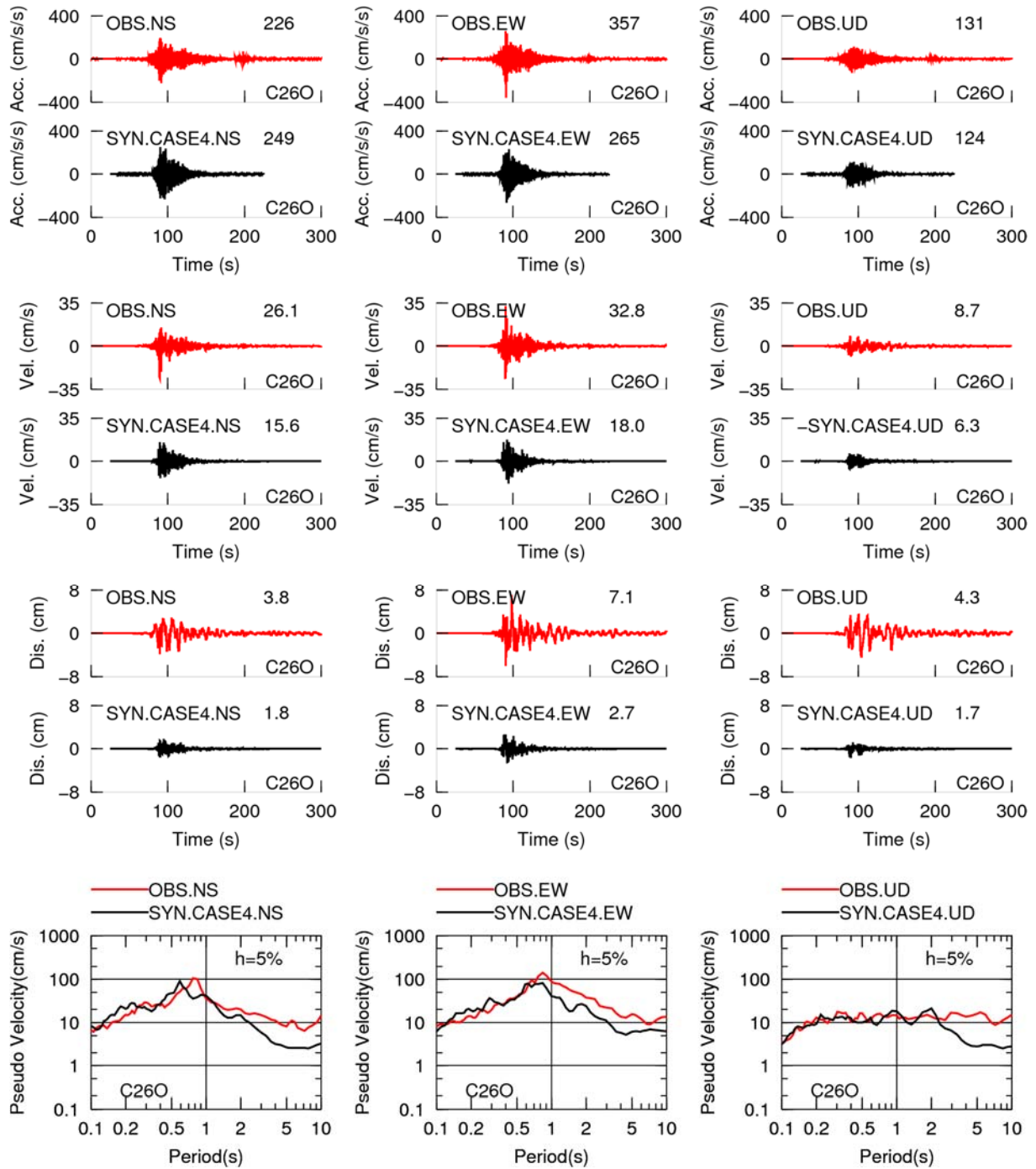


図2.1.2-47 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC26O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

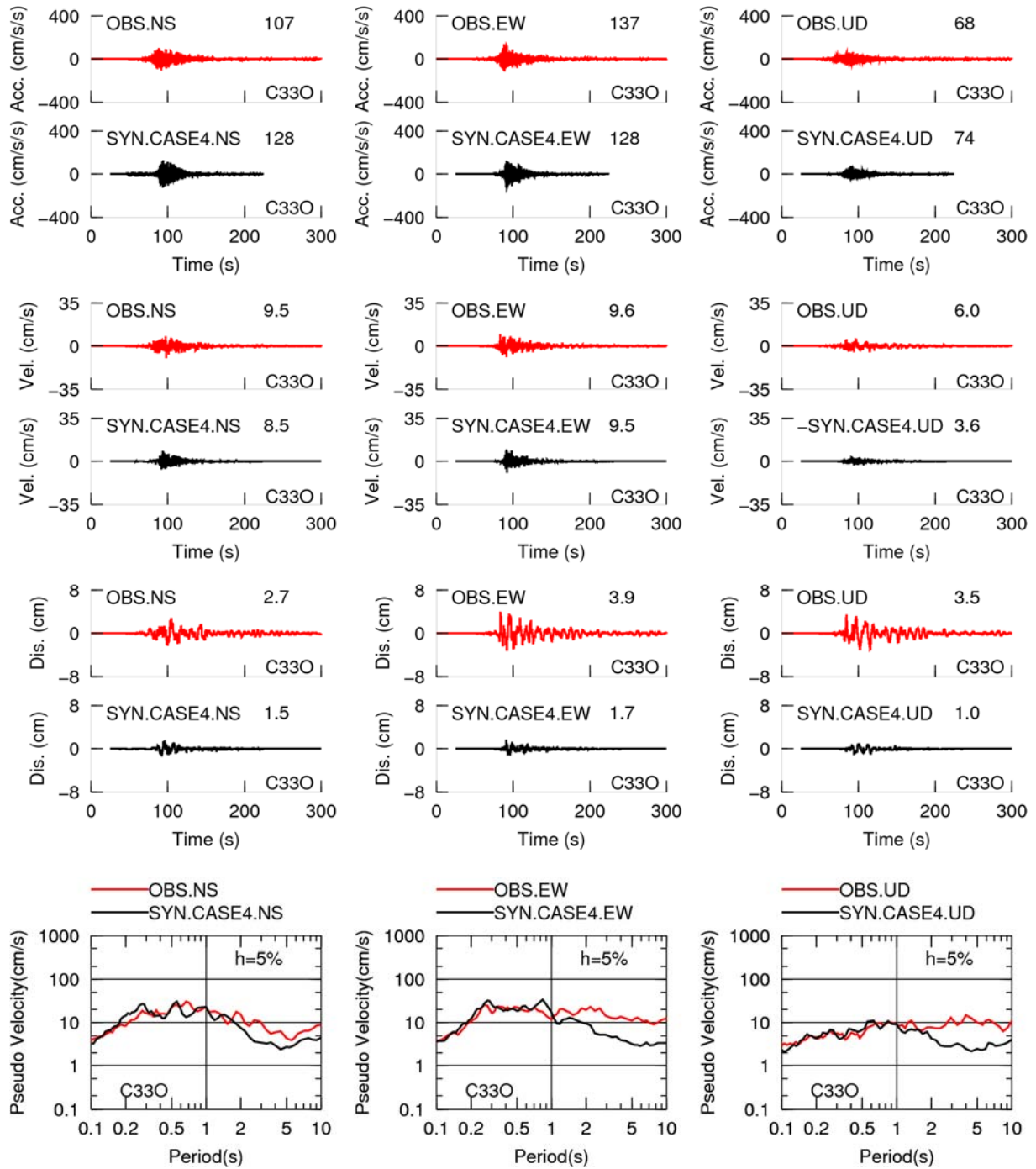


図2.1.2-48 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のC330観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

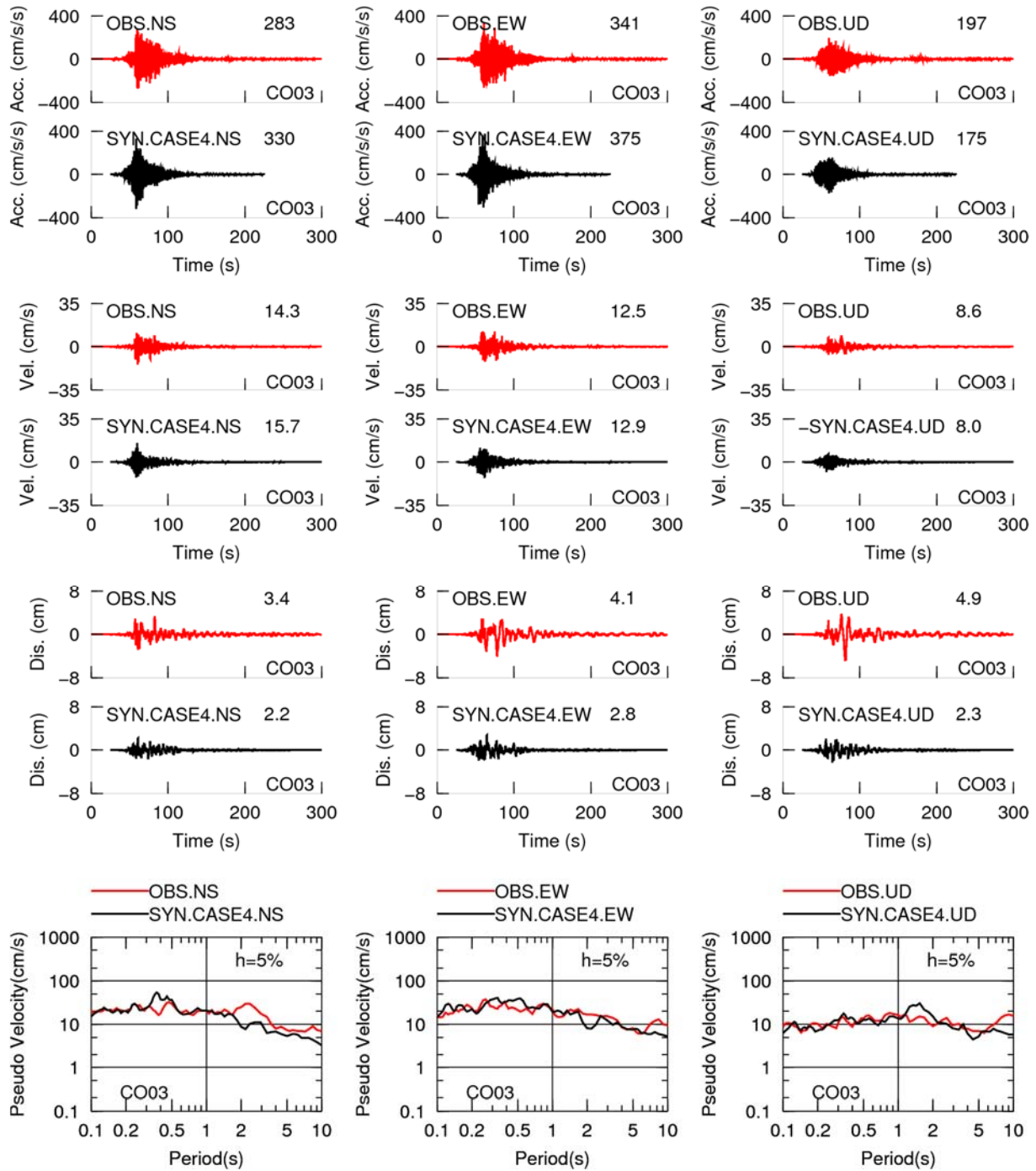


図2.1.2-49 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のCO03観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

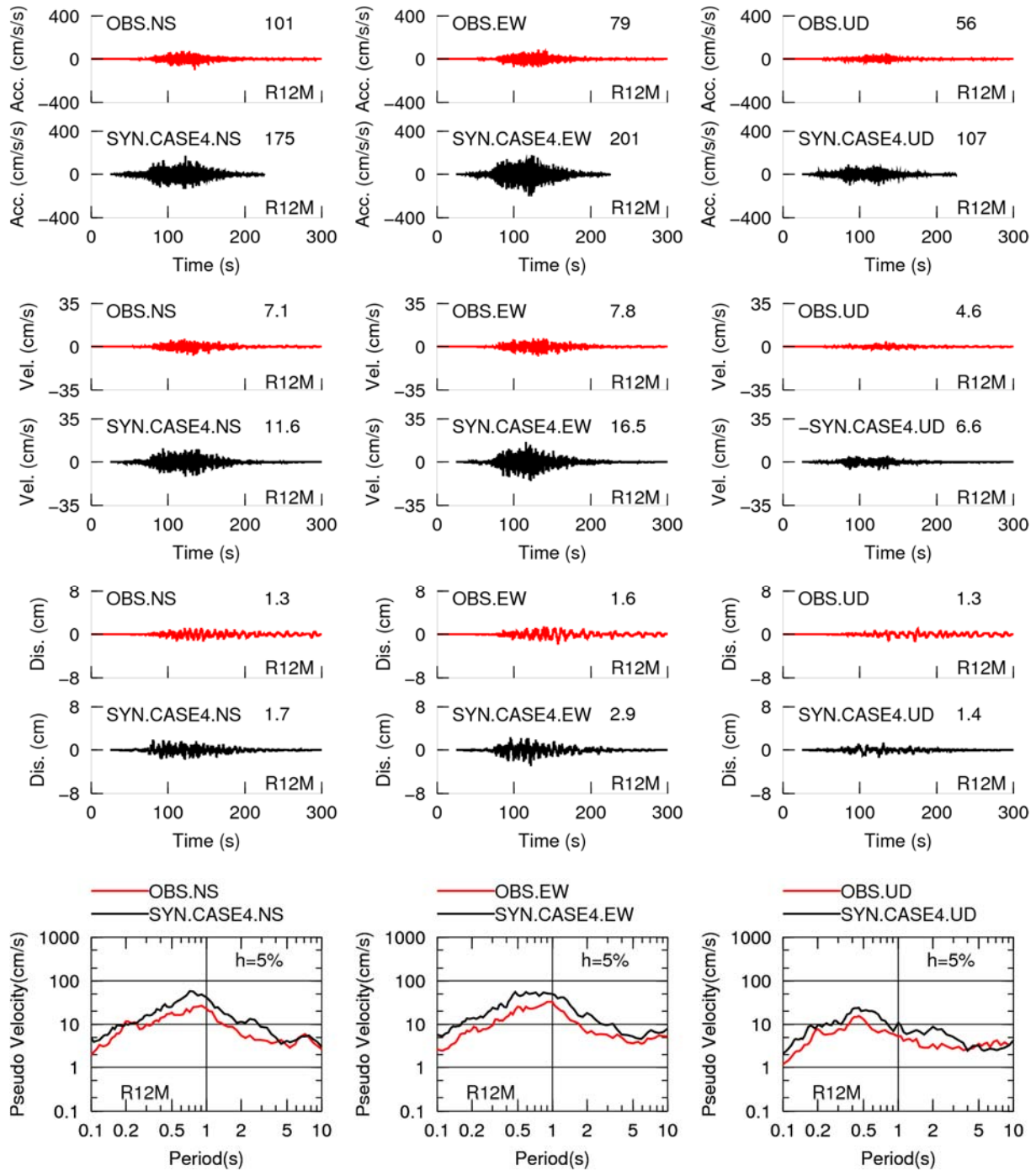


図2.1.2-50 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による図2.1.2-50 2015年チリIllapel地震のR12M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

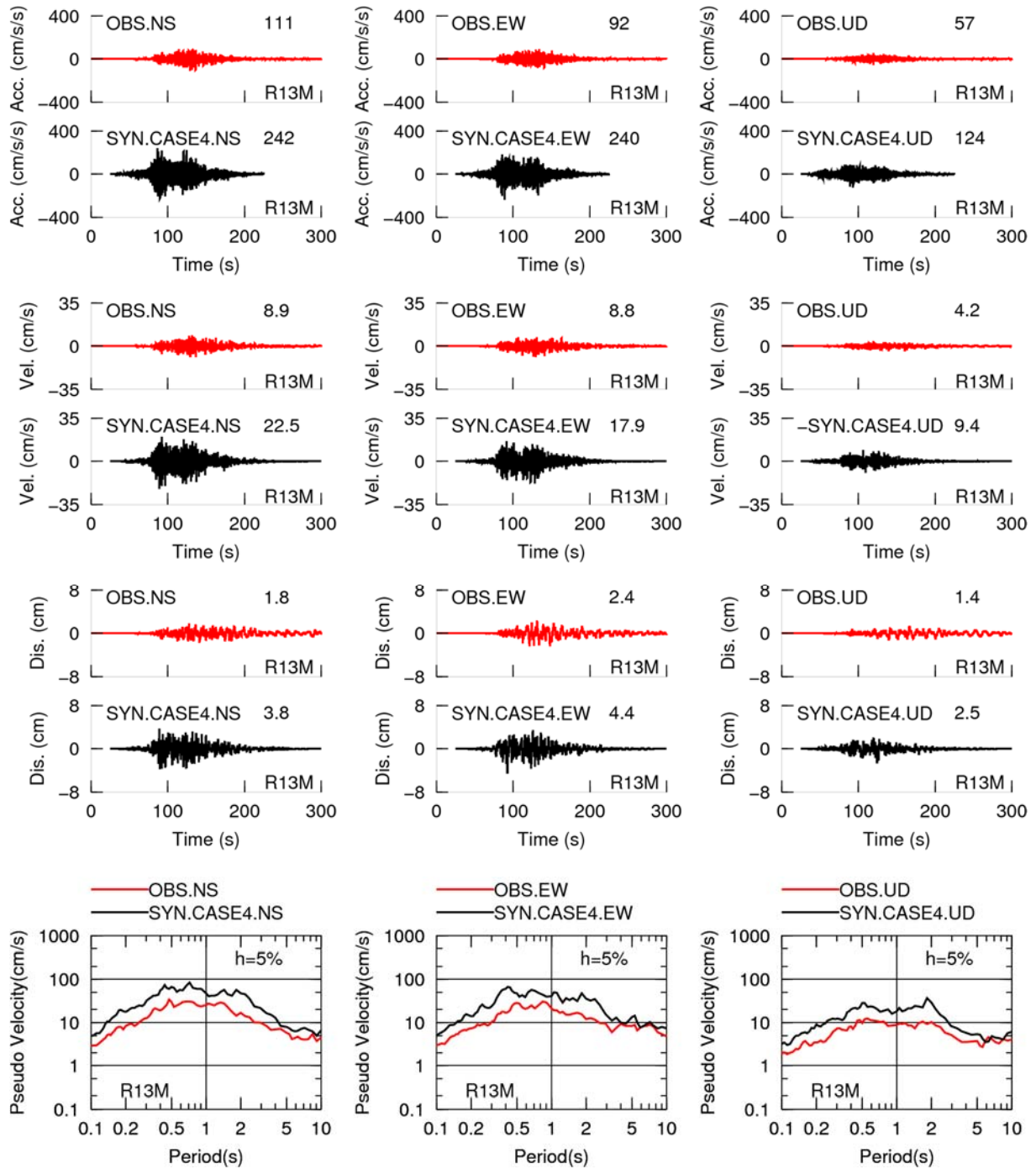


図2.1.2-51 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のR13M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

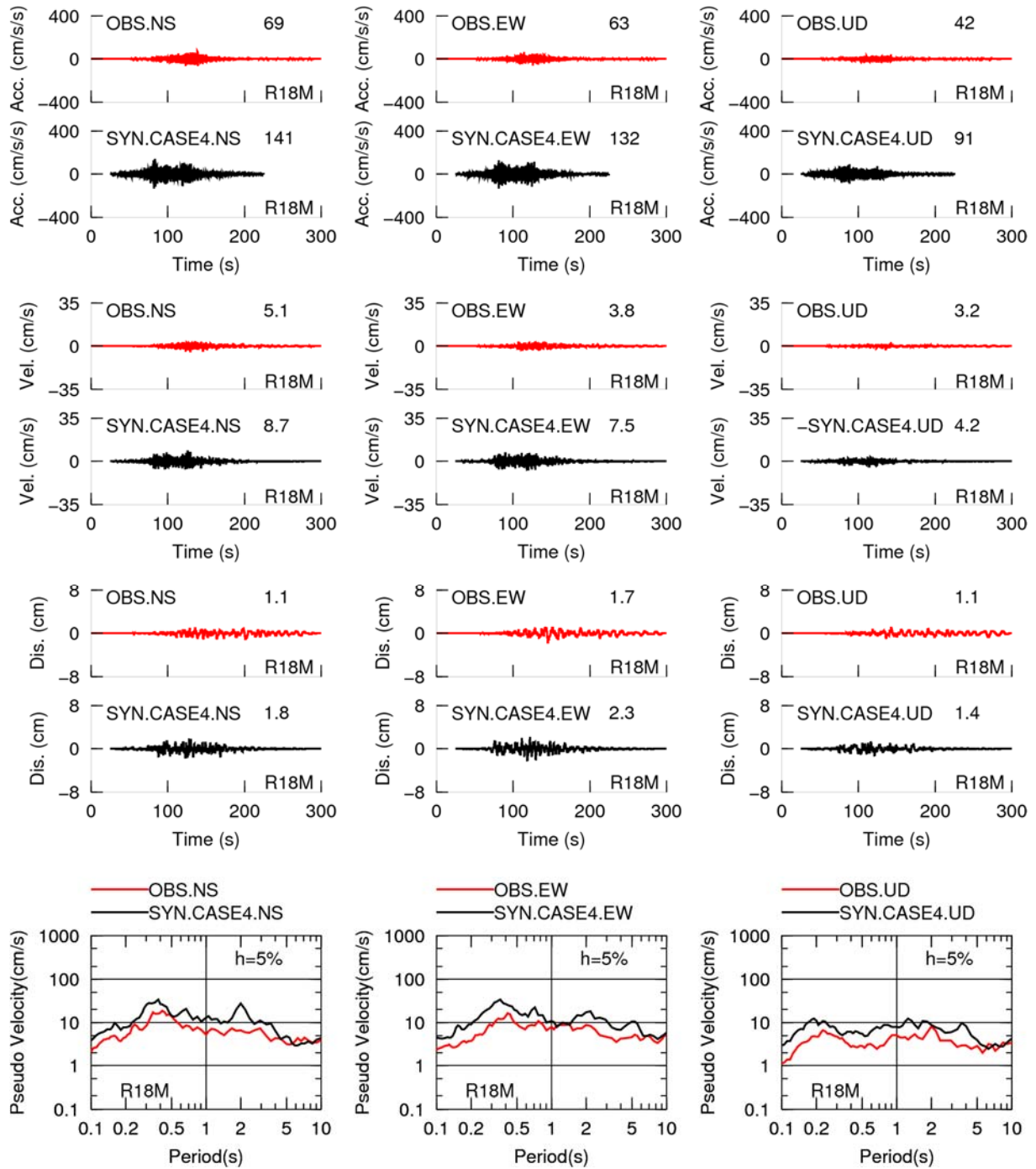


図2.1.2-52 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のR18M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

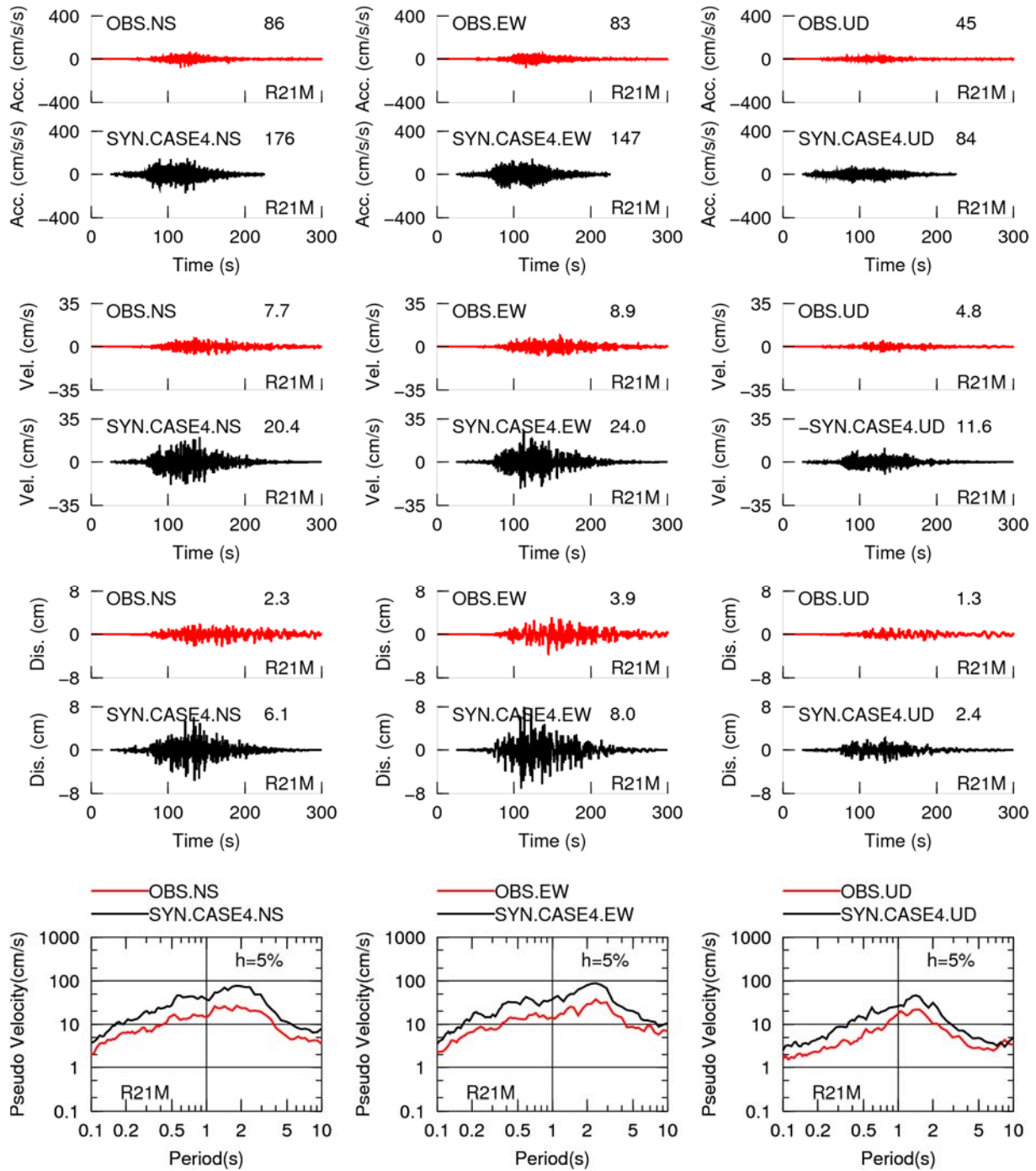


図2.1.2-53 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のR21M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

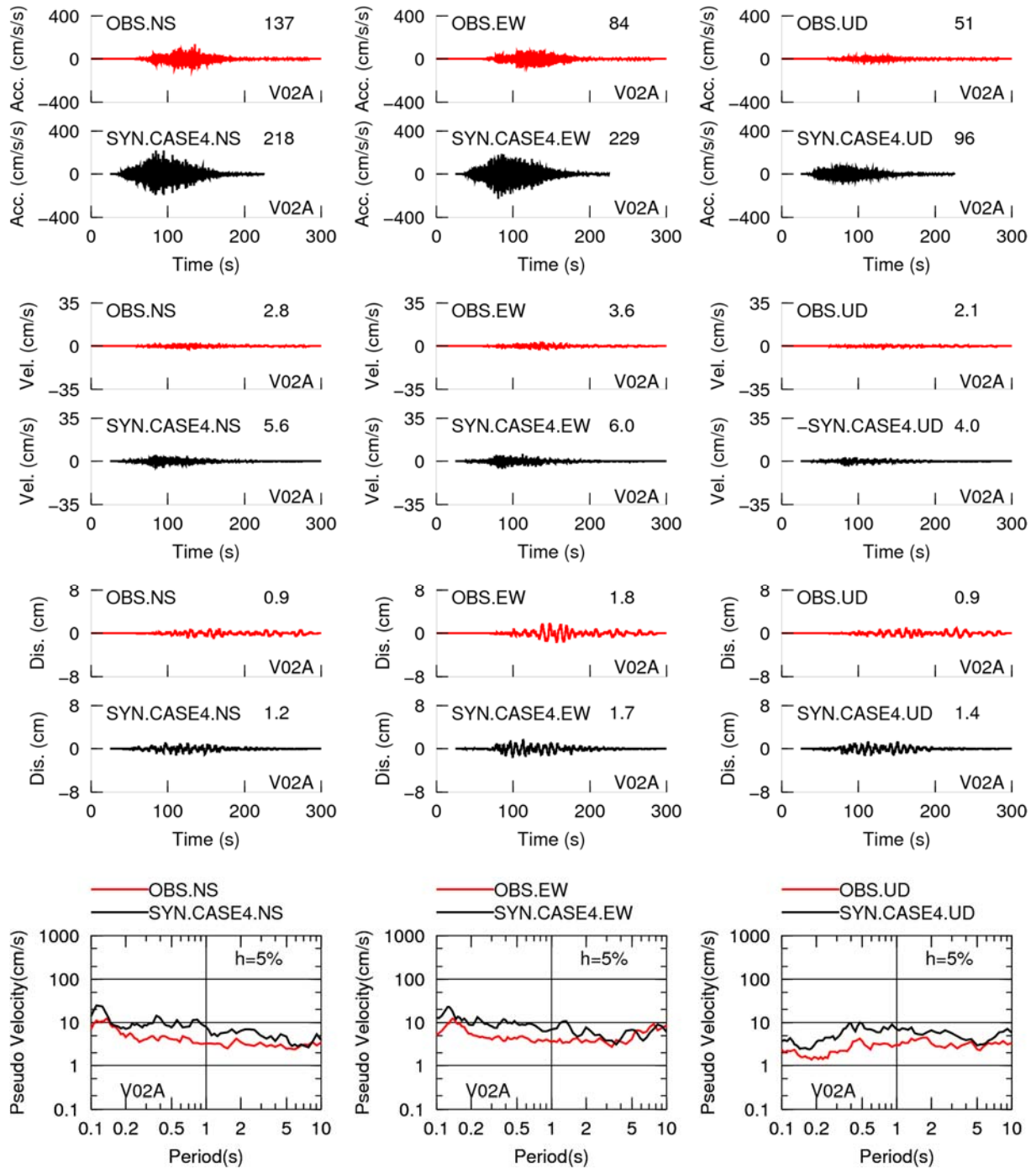


図2.1.2-54 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のV02A観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

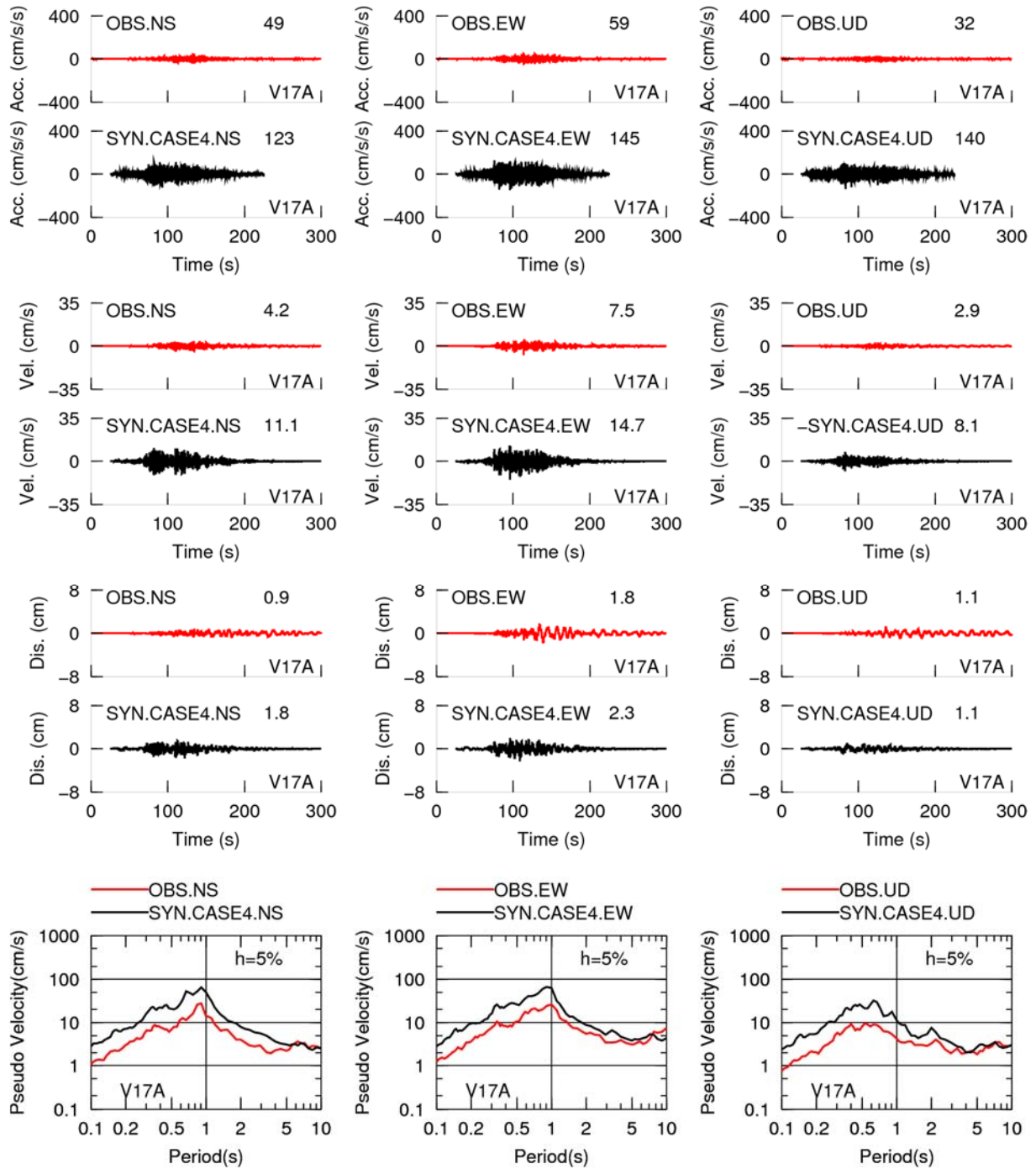


図2.1.2-55 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の2倍：Case4）による2015年チリ Illapel地震のV17A観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

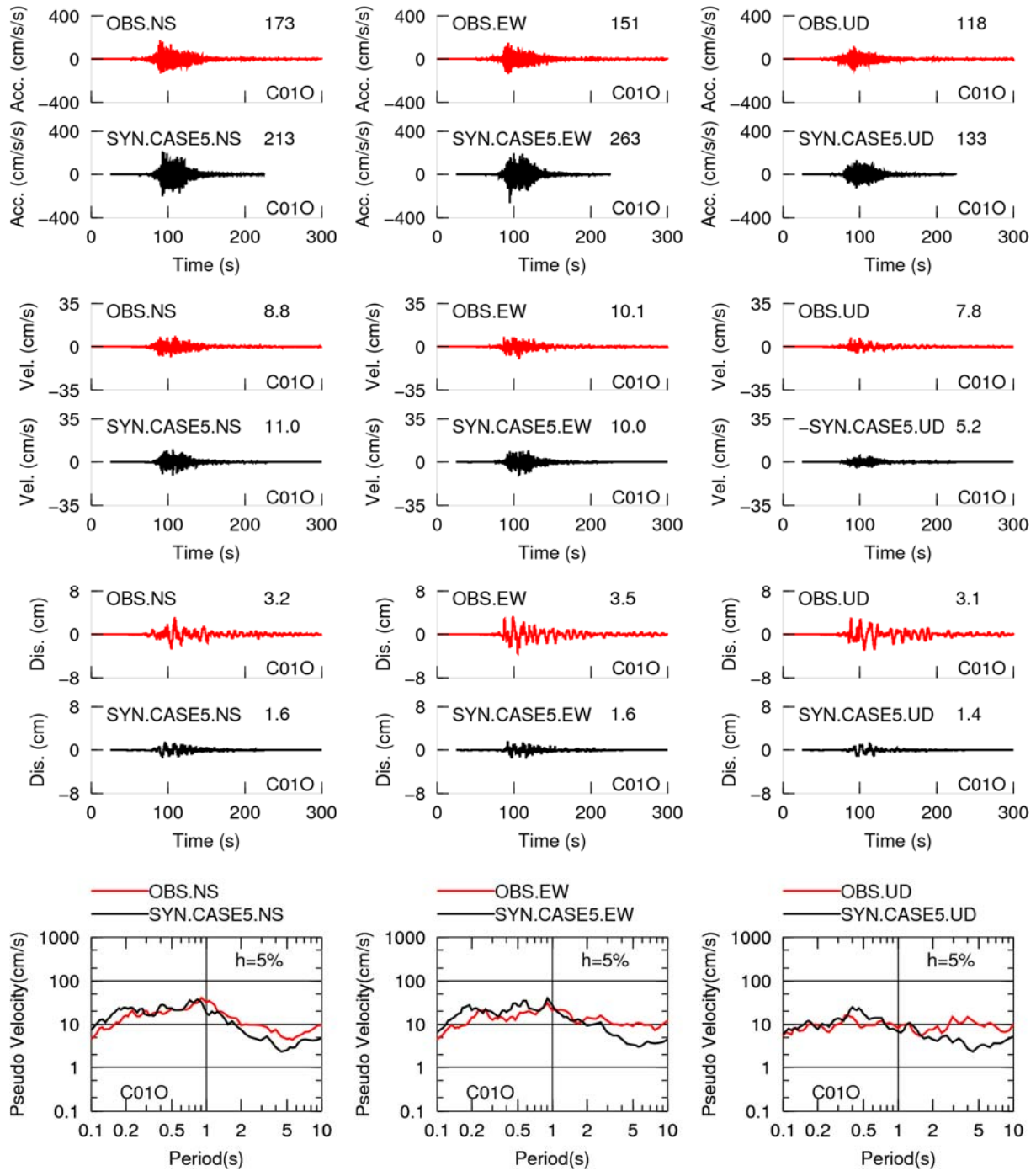


図2.1.2-56 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

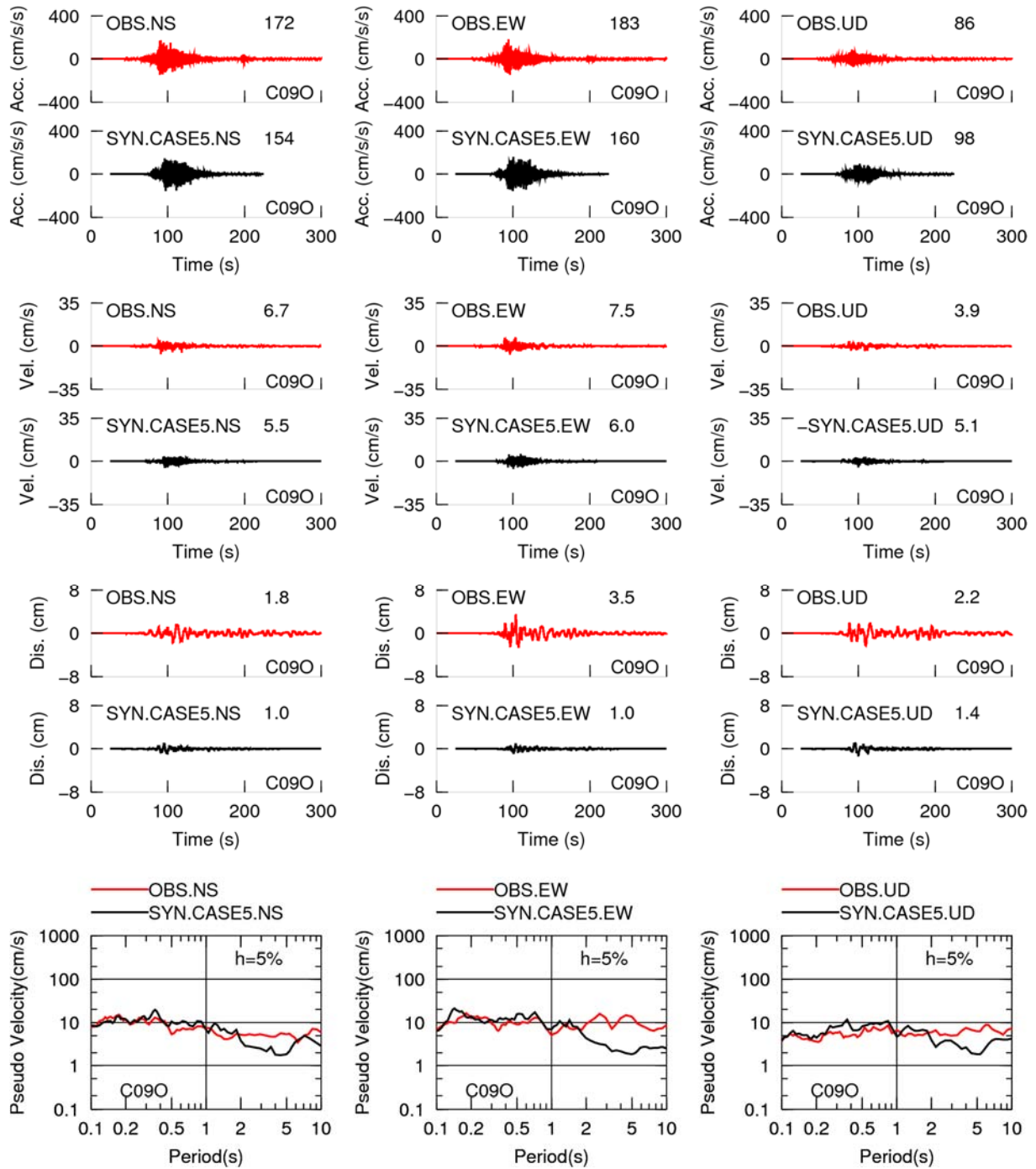


図2.1.2-57 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC09O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

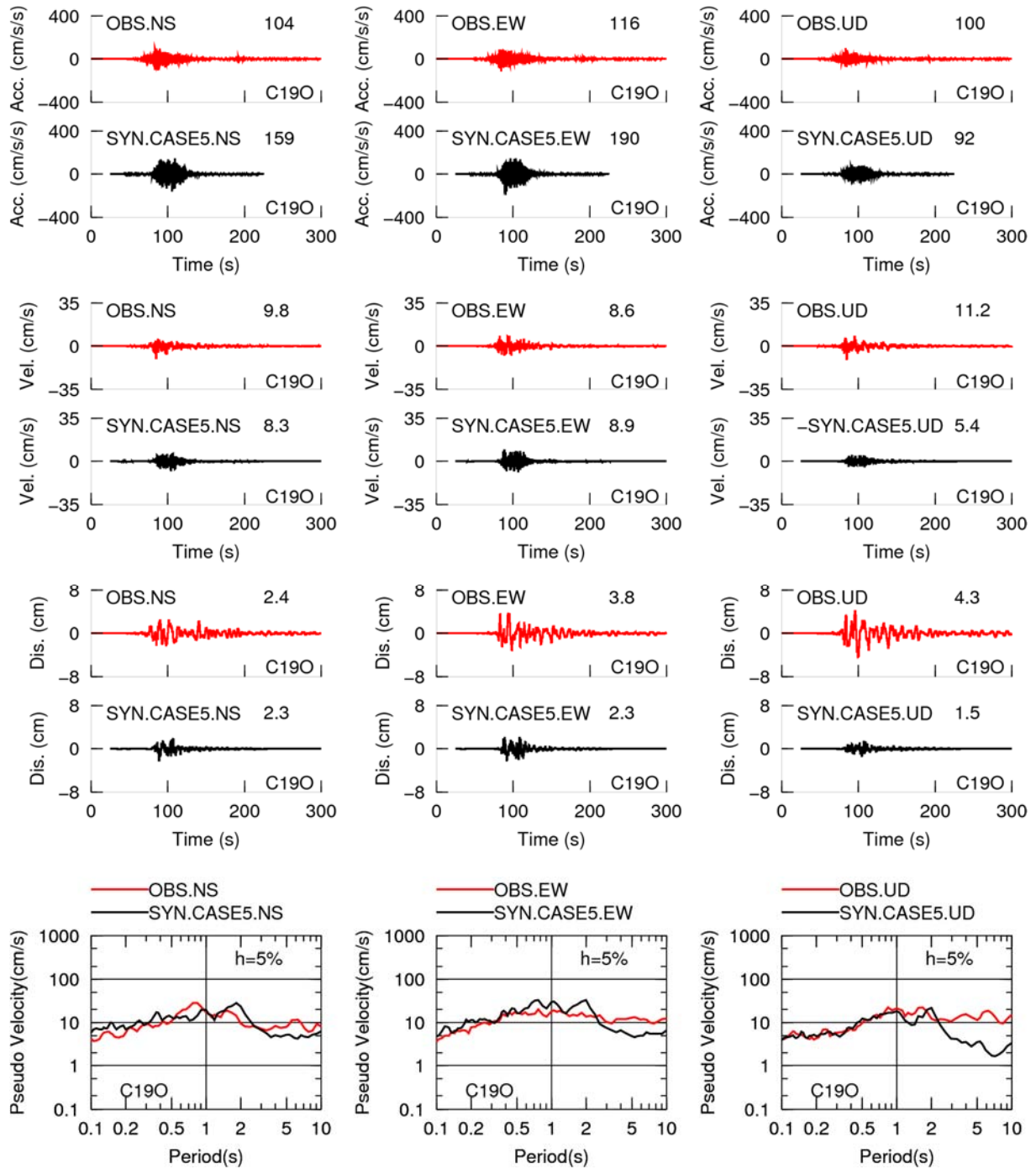


図2.1.2-58 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC19O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

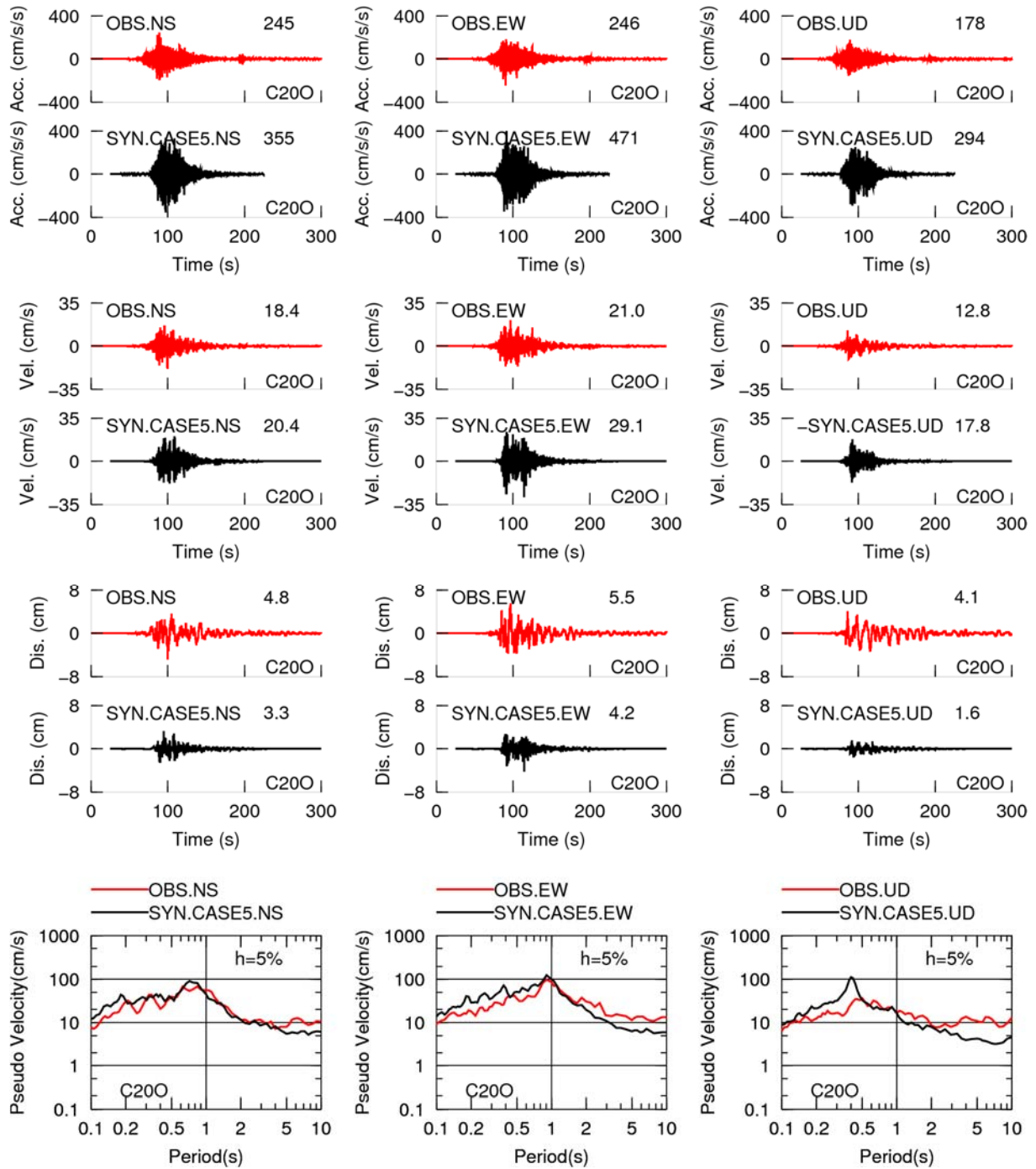


図2.1.2-59 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

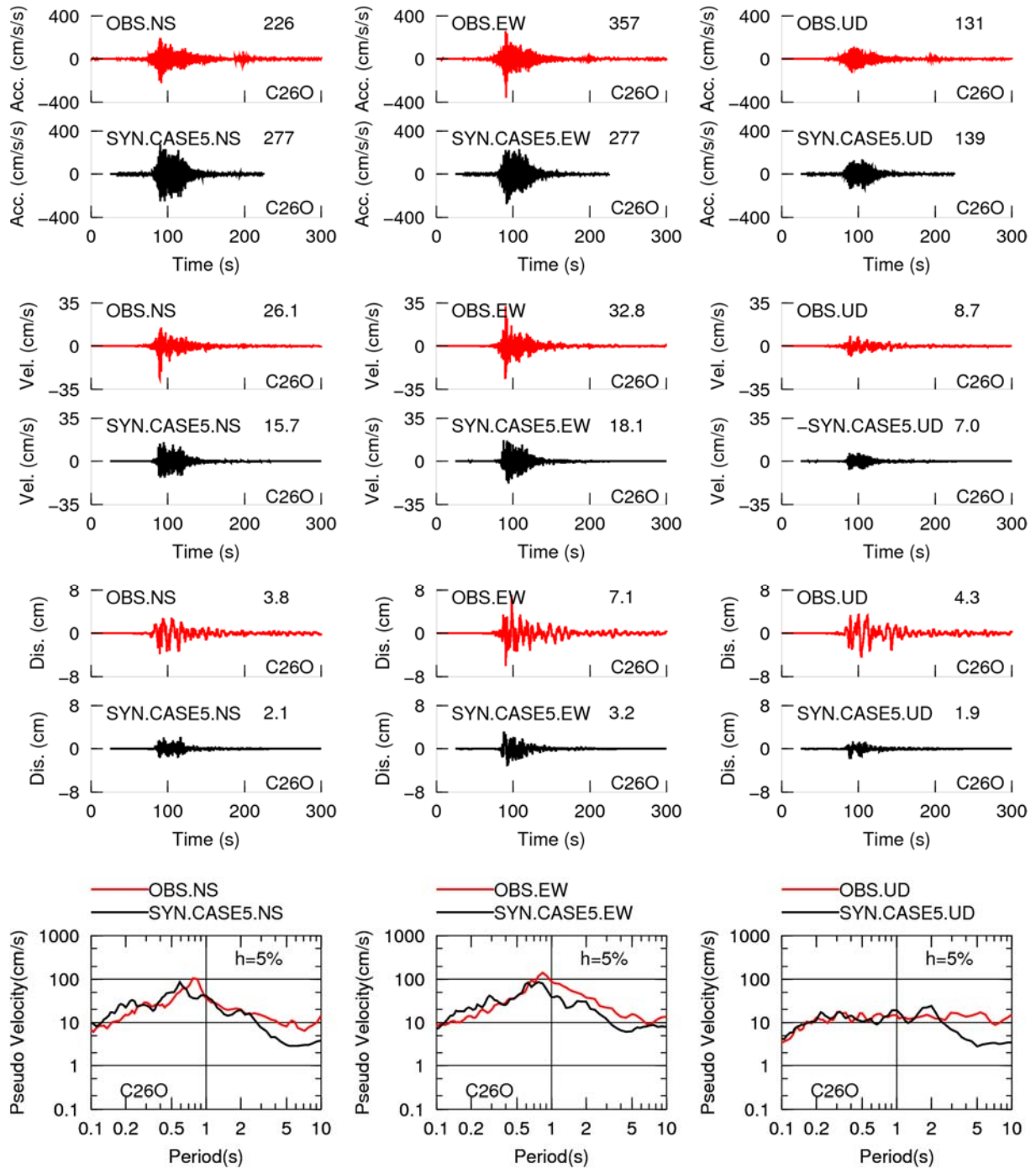


図2.1.2-60 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC26O観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

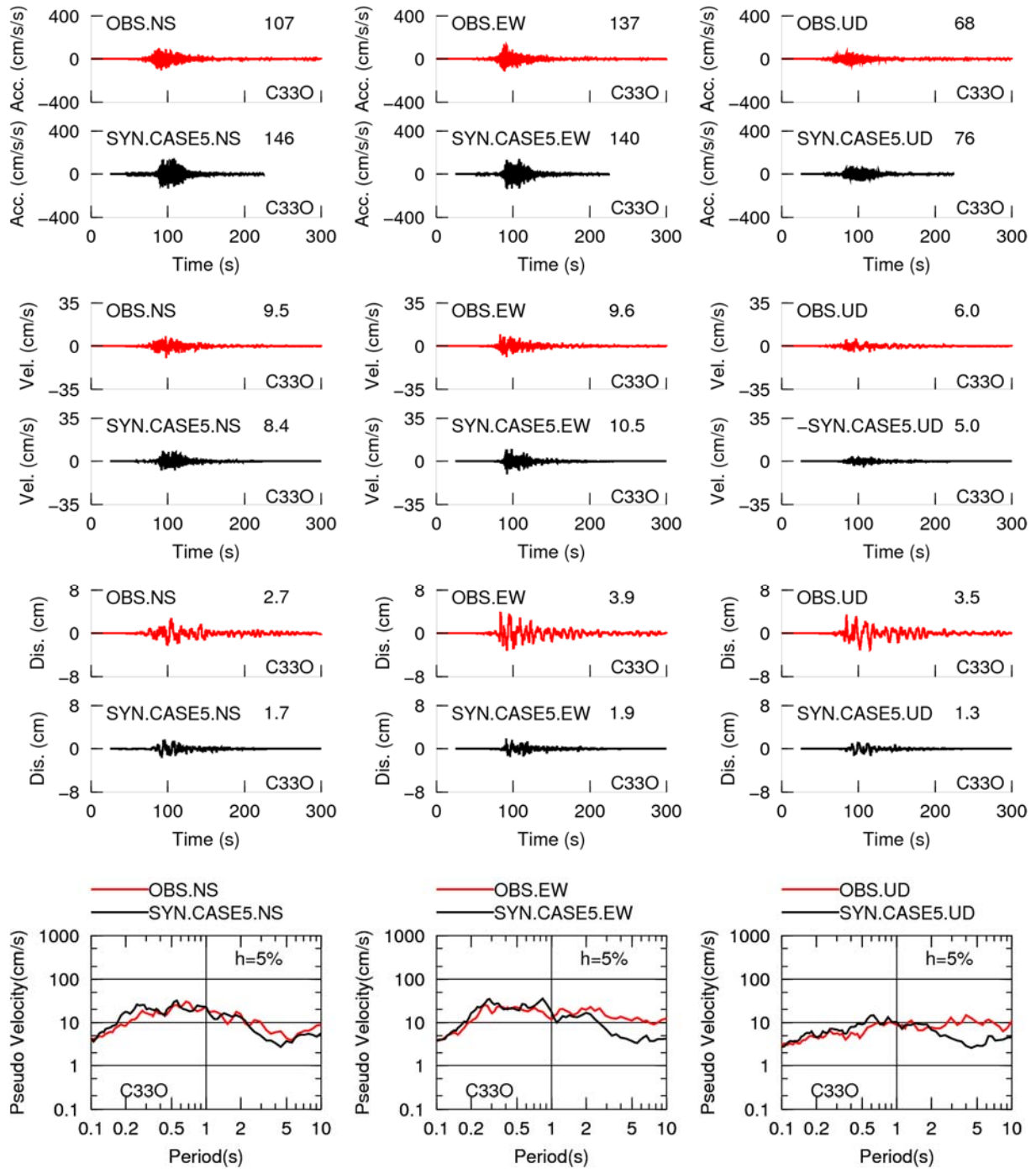


図2.1.2-61 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のC330観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

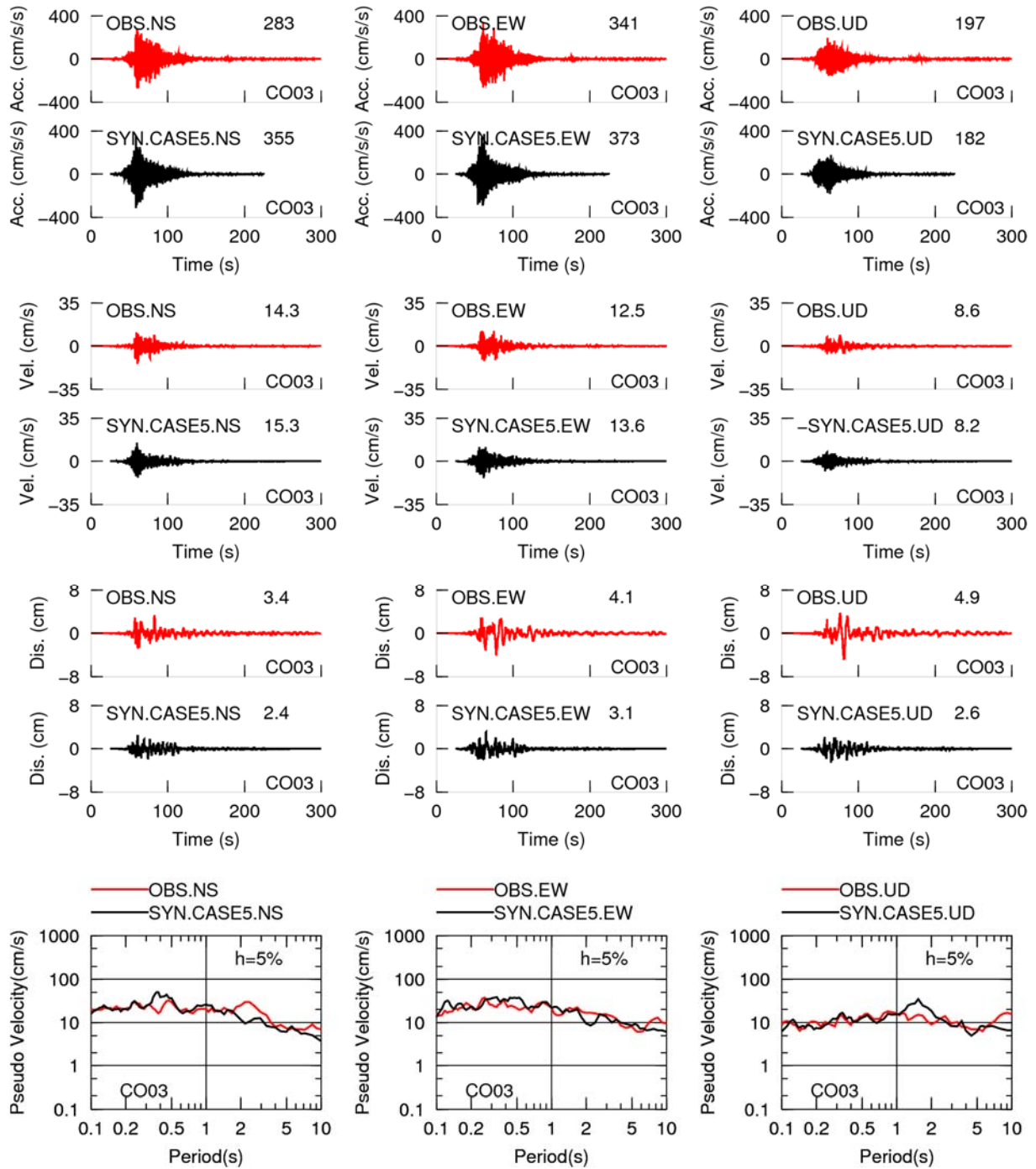


図2.1.2-62 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のCO03観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

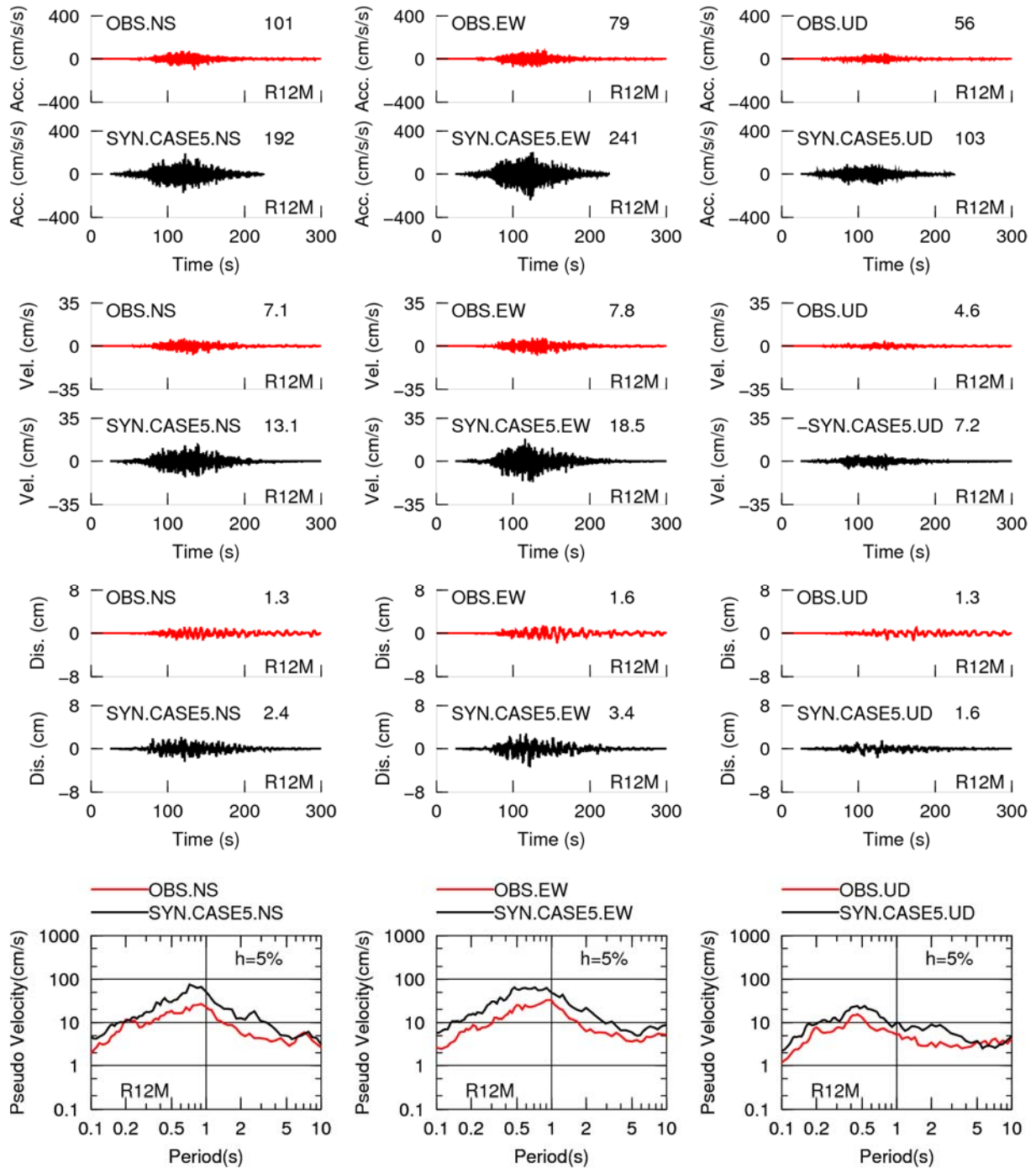


図2.1.2-63 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のR12M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

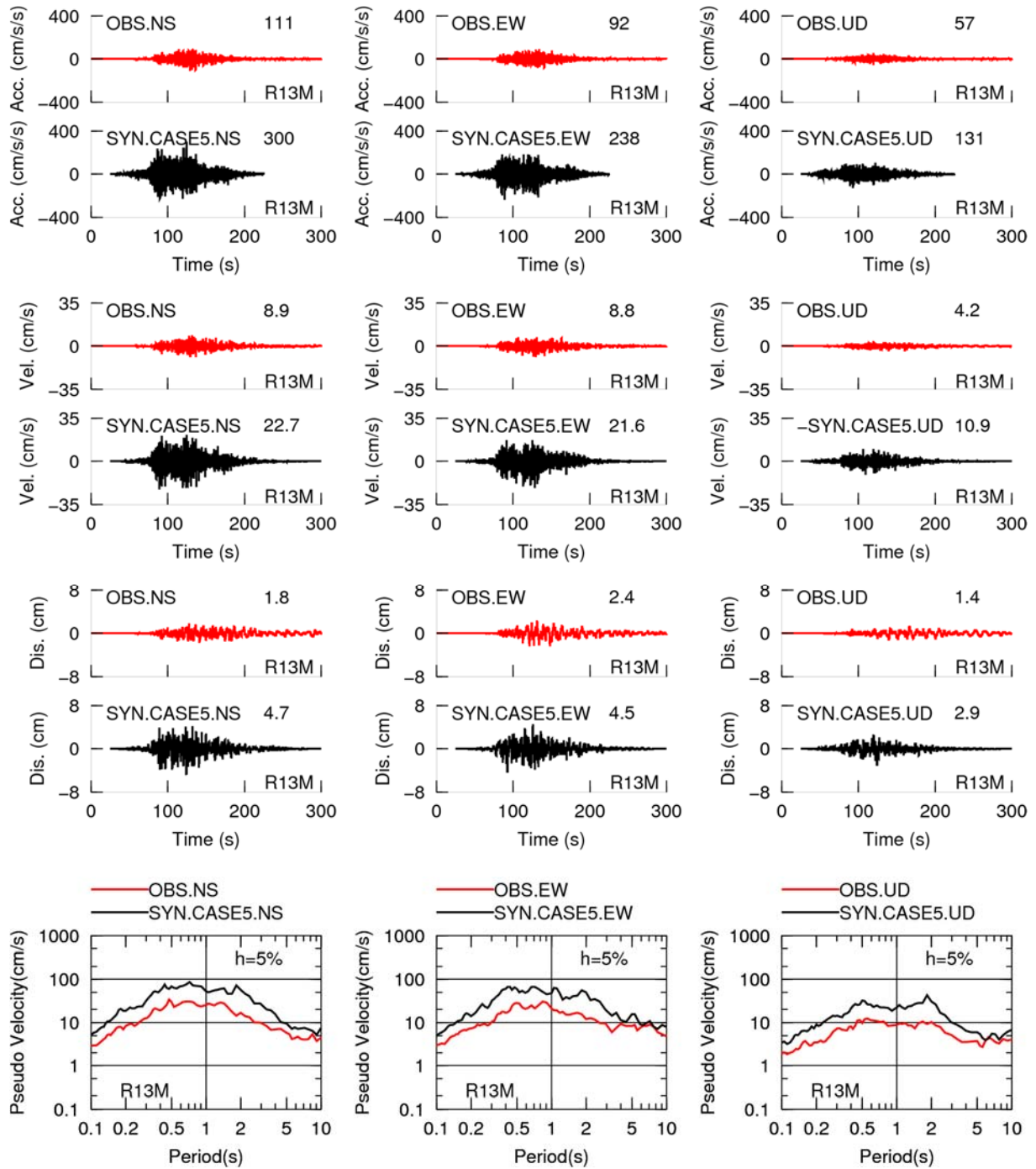


図2.1.2-64 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のR13M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

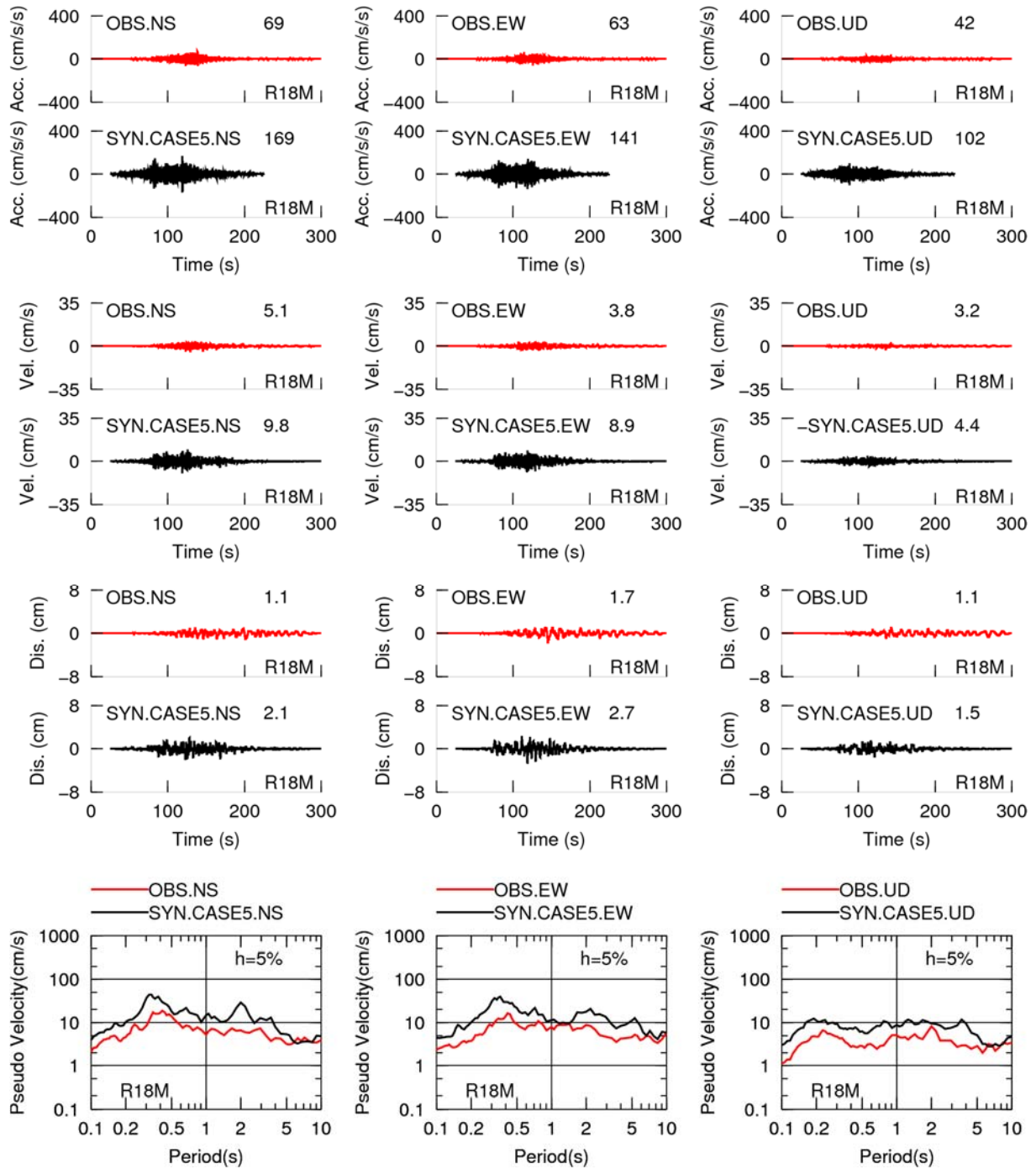


図2.1.2-65 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のR18M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

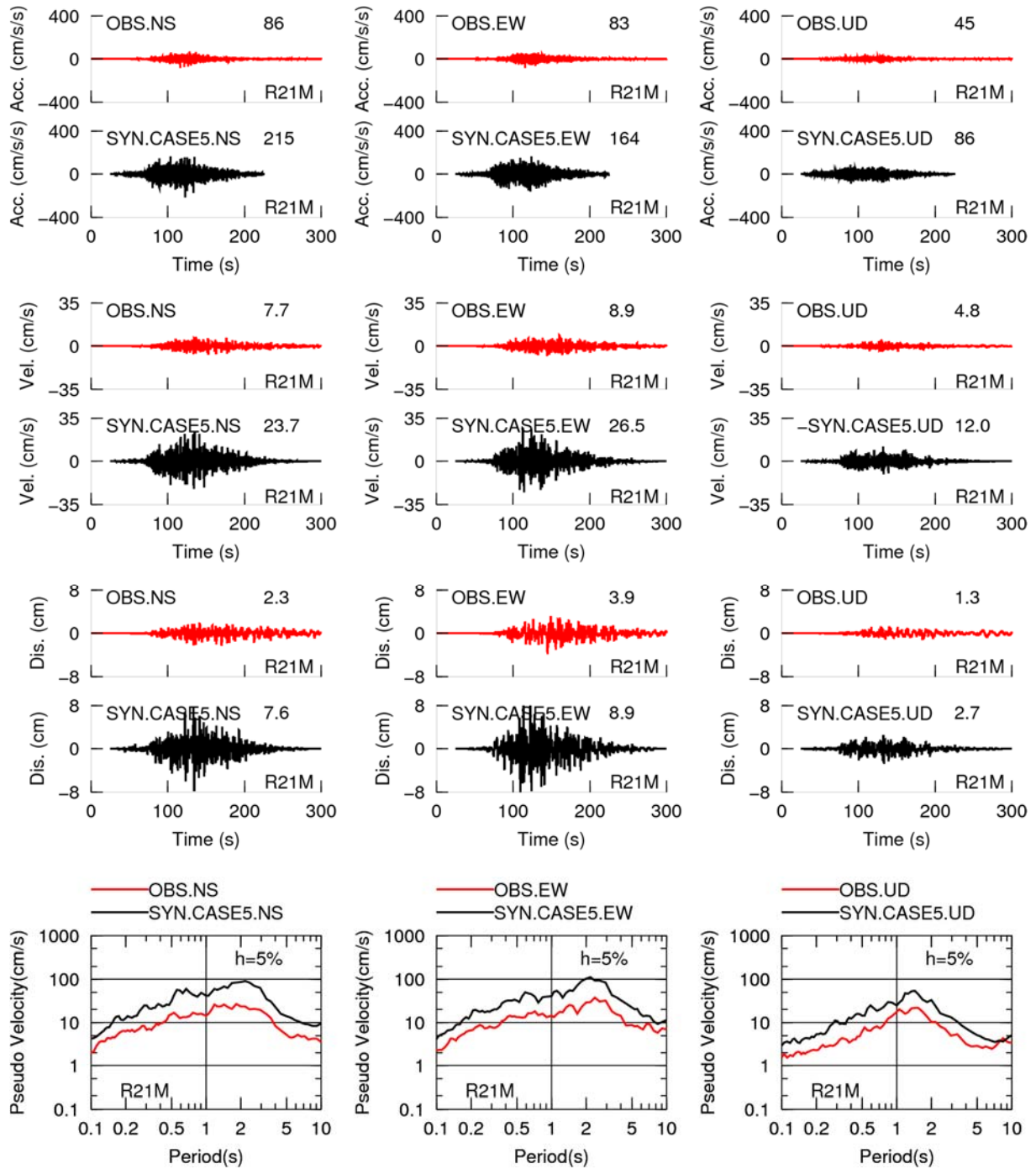


図2.1.2-66 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のR21M観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

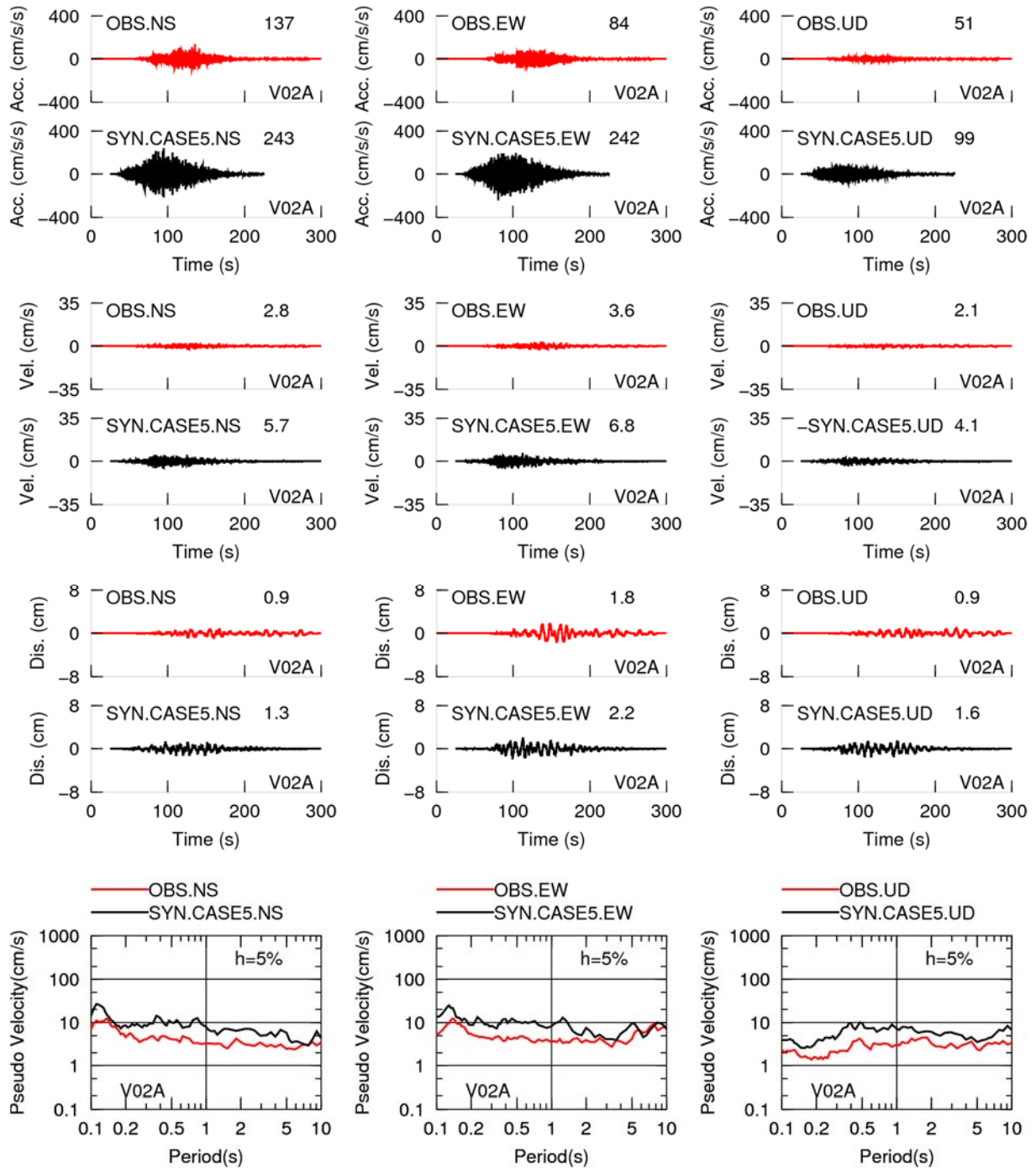


図2.1.2-67 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のV02A観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

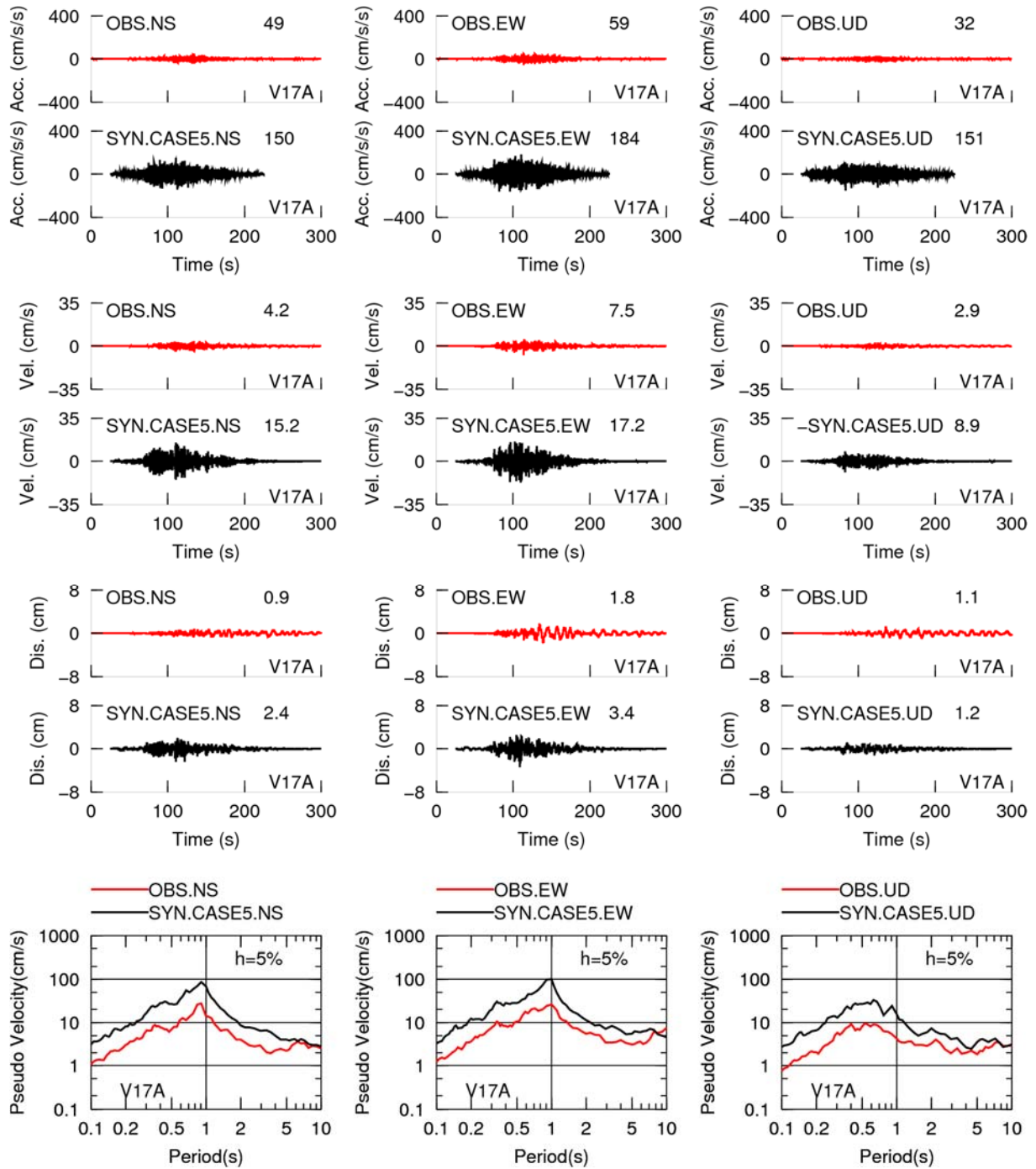


図2.1.2-68 遷移ステージの地震としたした場合の断層モデル（大すべり域の実効応力を背景領域の4倍：Case5）による2015年チリ Illapel地震のV17A観測点における合成結果（上段から、加速度時刻歴、速度時刻歴、変位時刻歴、擬似速度応答スペクトル）

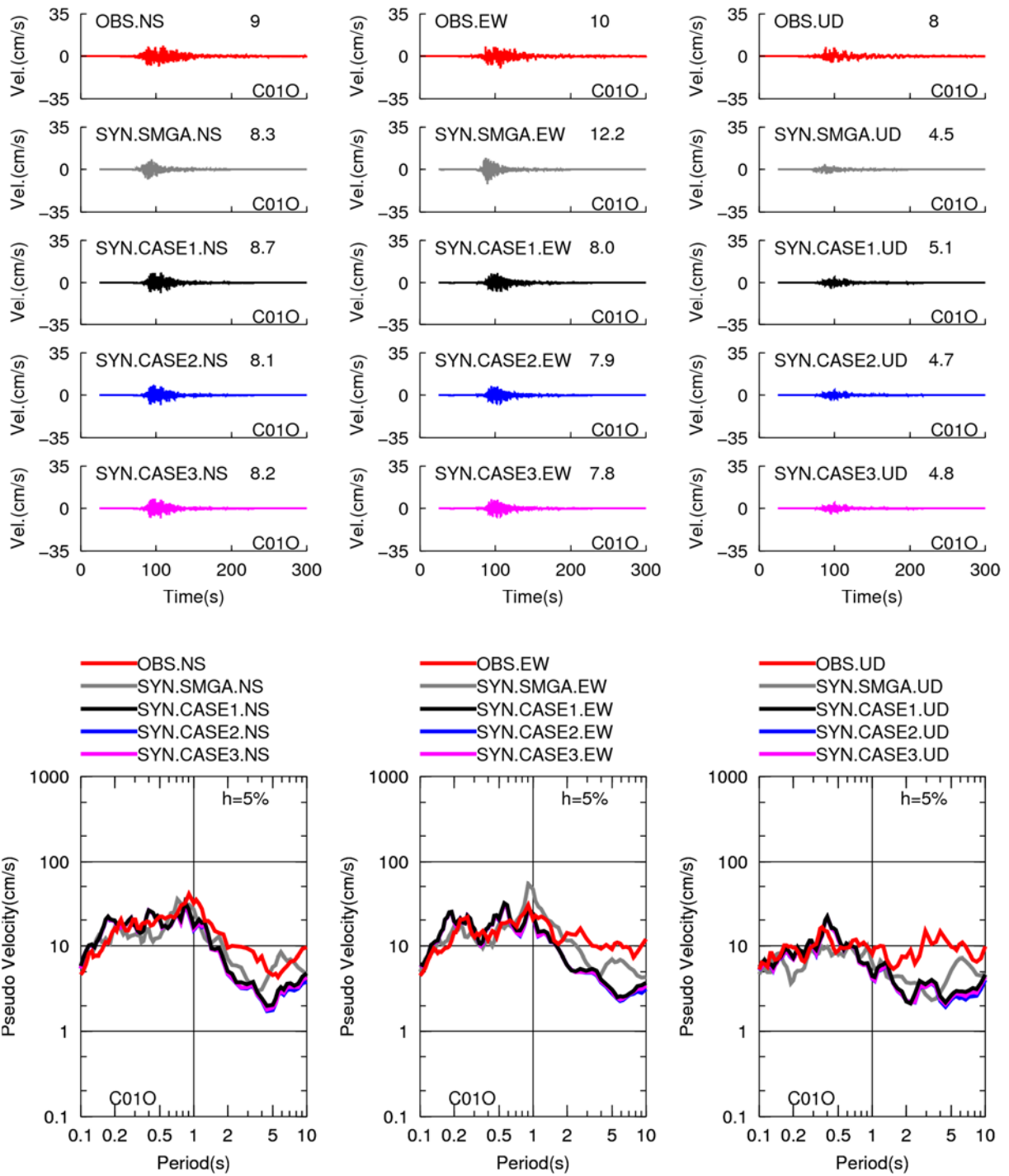


図2.1.2-69 2015年チリ Illapel地震のC01O観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

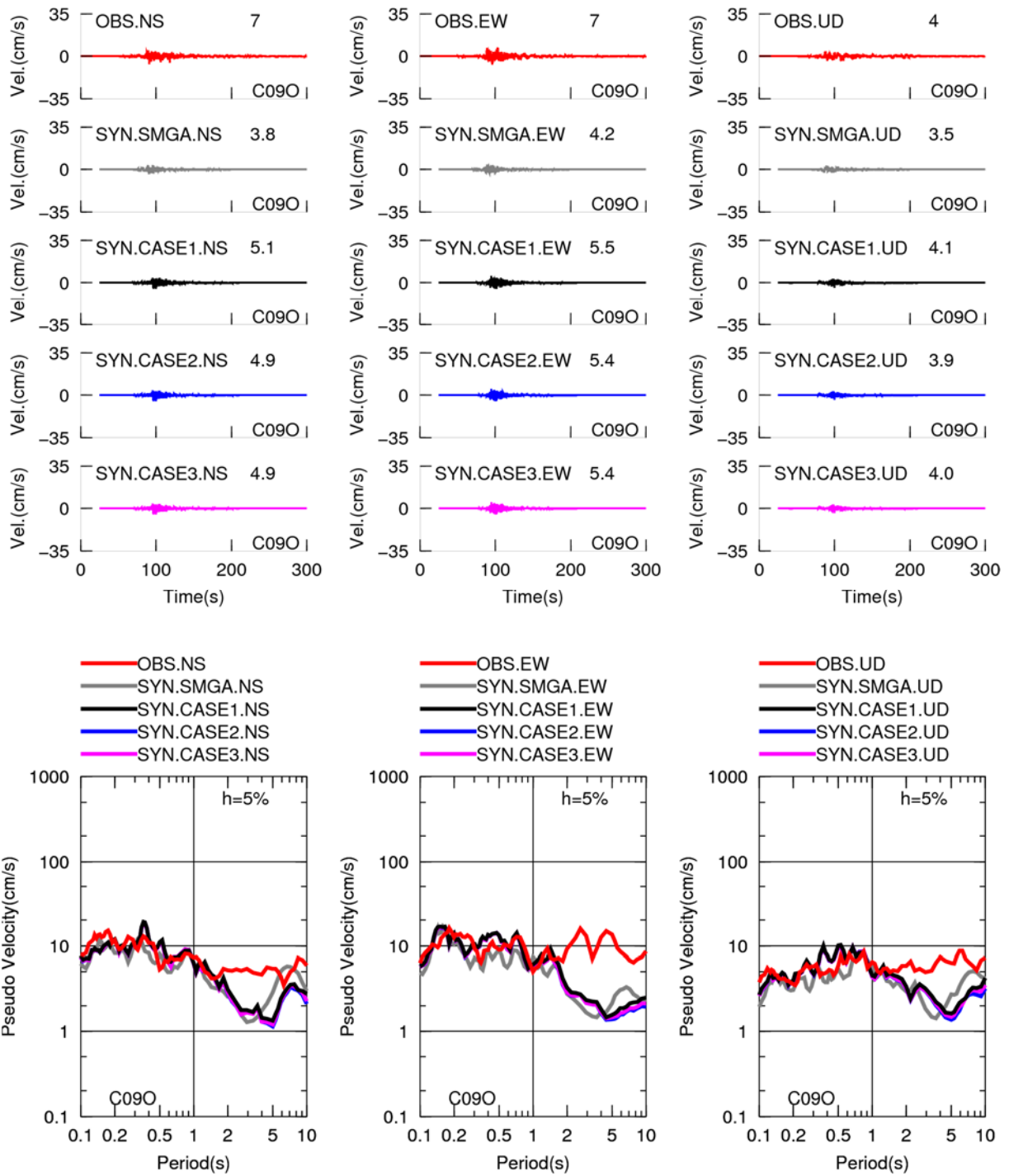


図2.1.2-70 2015年チリIllapel地震のC090観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

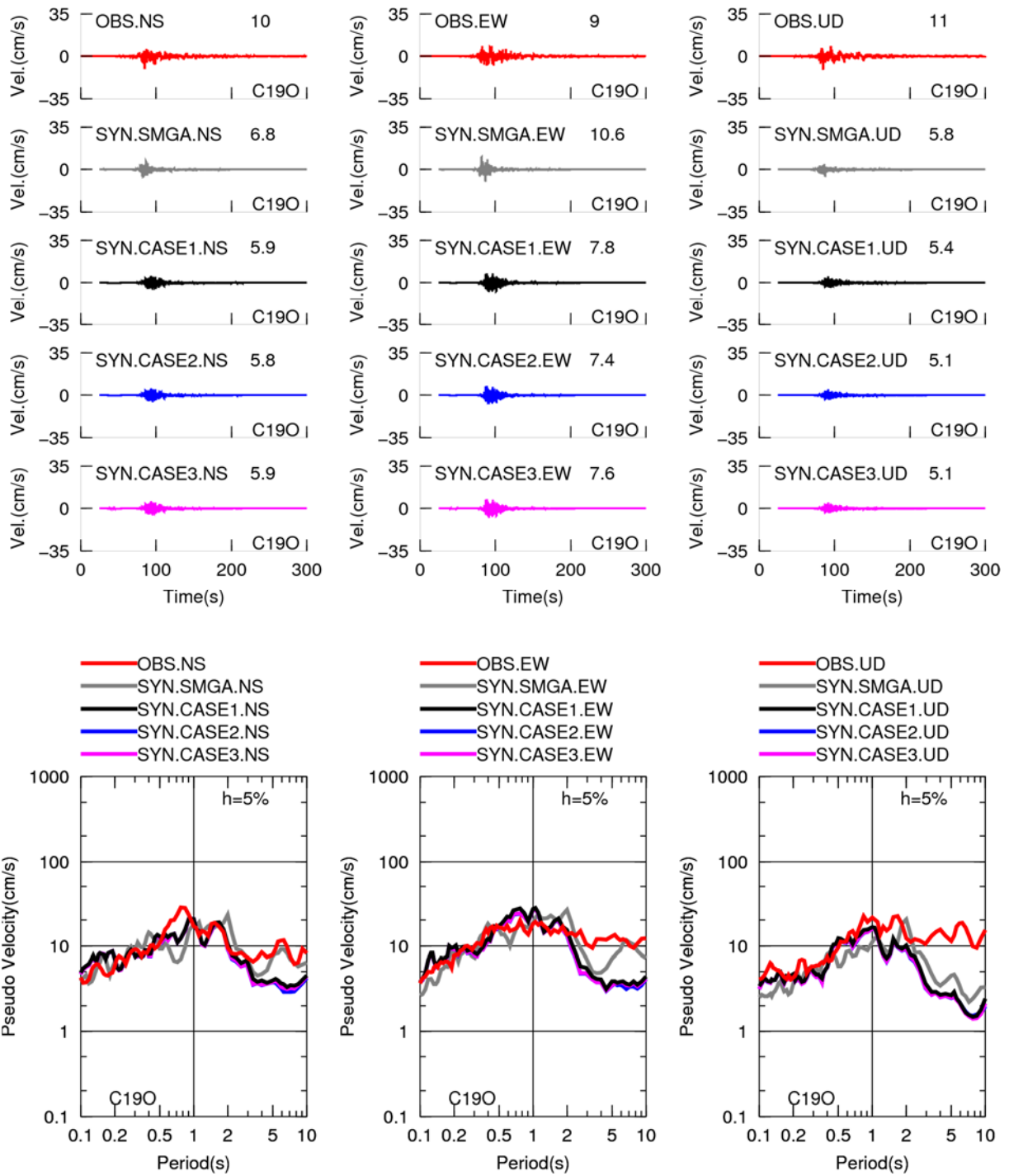


図2.1.2-71 2015年チリIllapel地震のC190観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

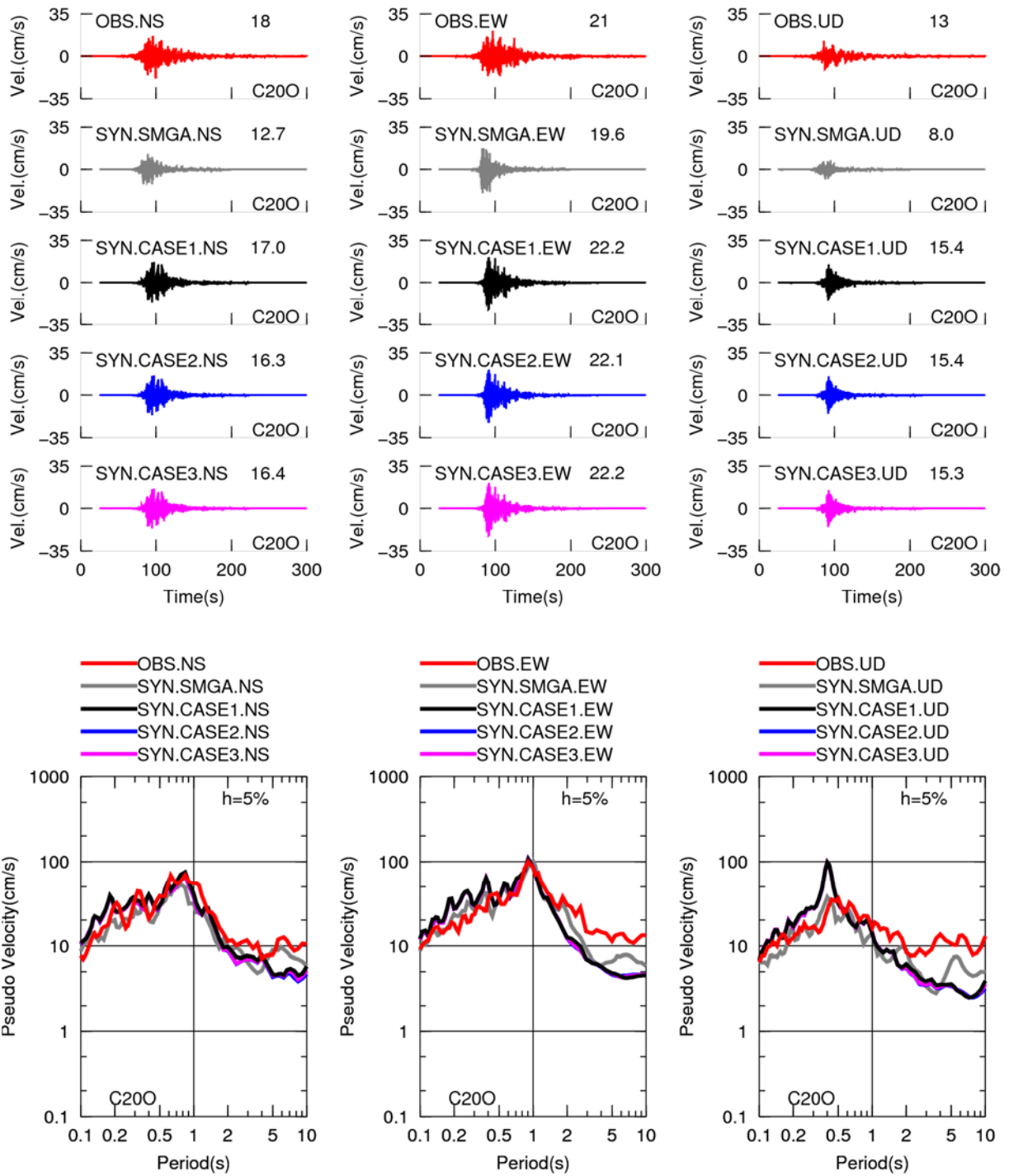


図2.1.2-72 2015年チリ Illapel地震のC200観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

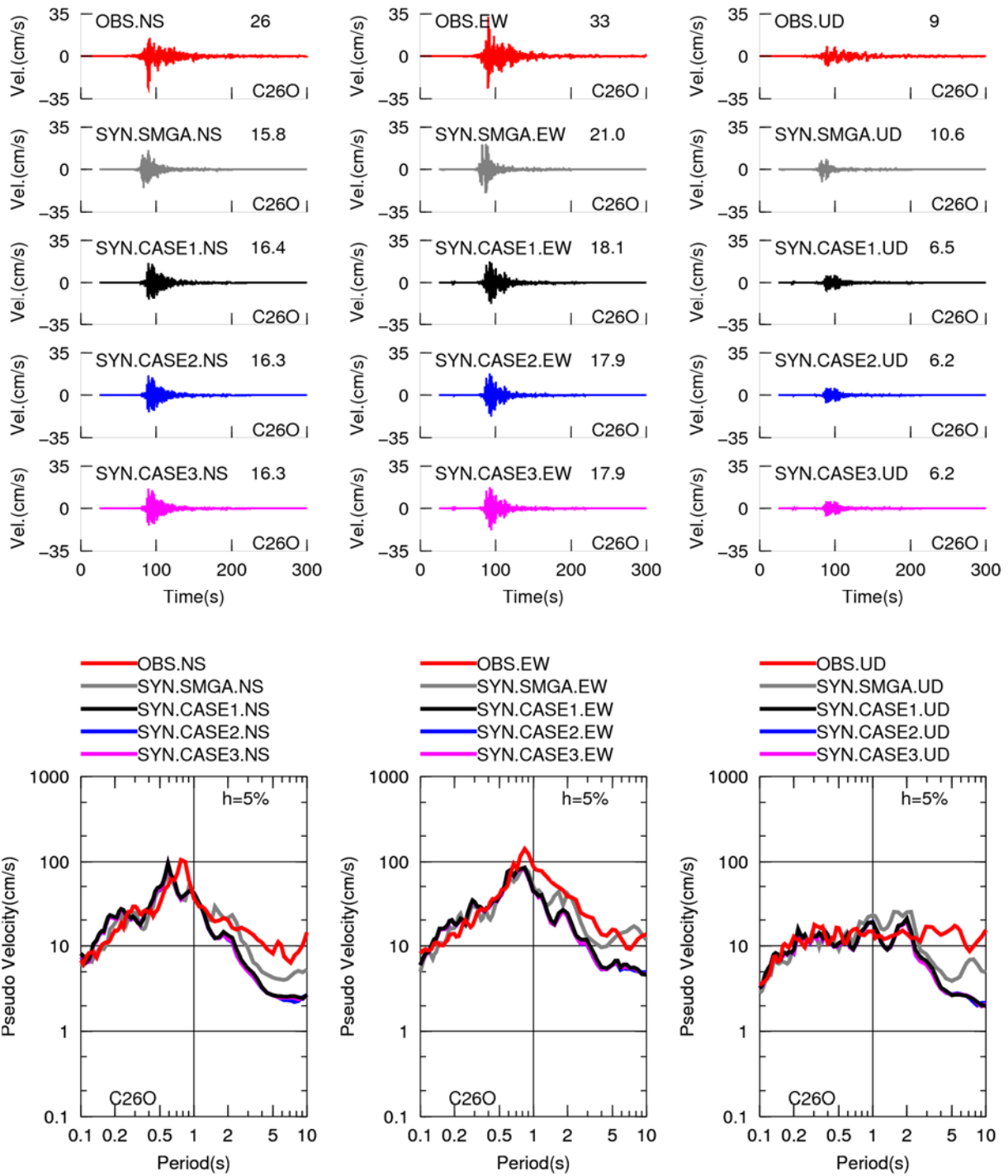


図2.1.2-73 2015年チリIllapel地震のC26O観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

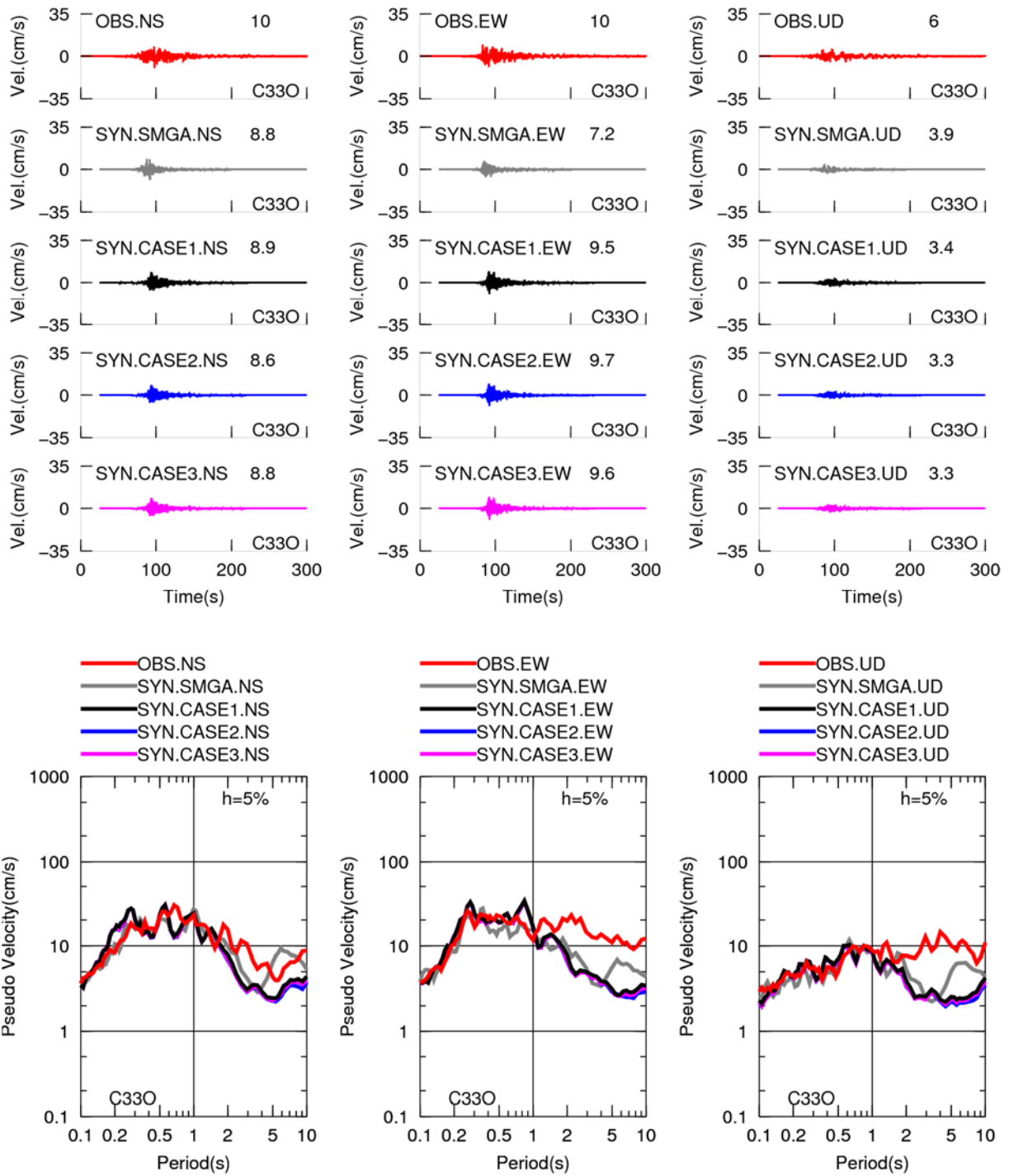


図2.1.2-74 2015年チリ Illapel地震のC330観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

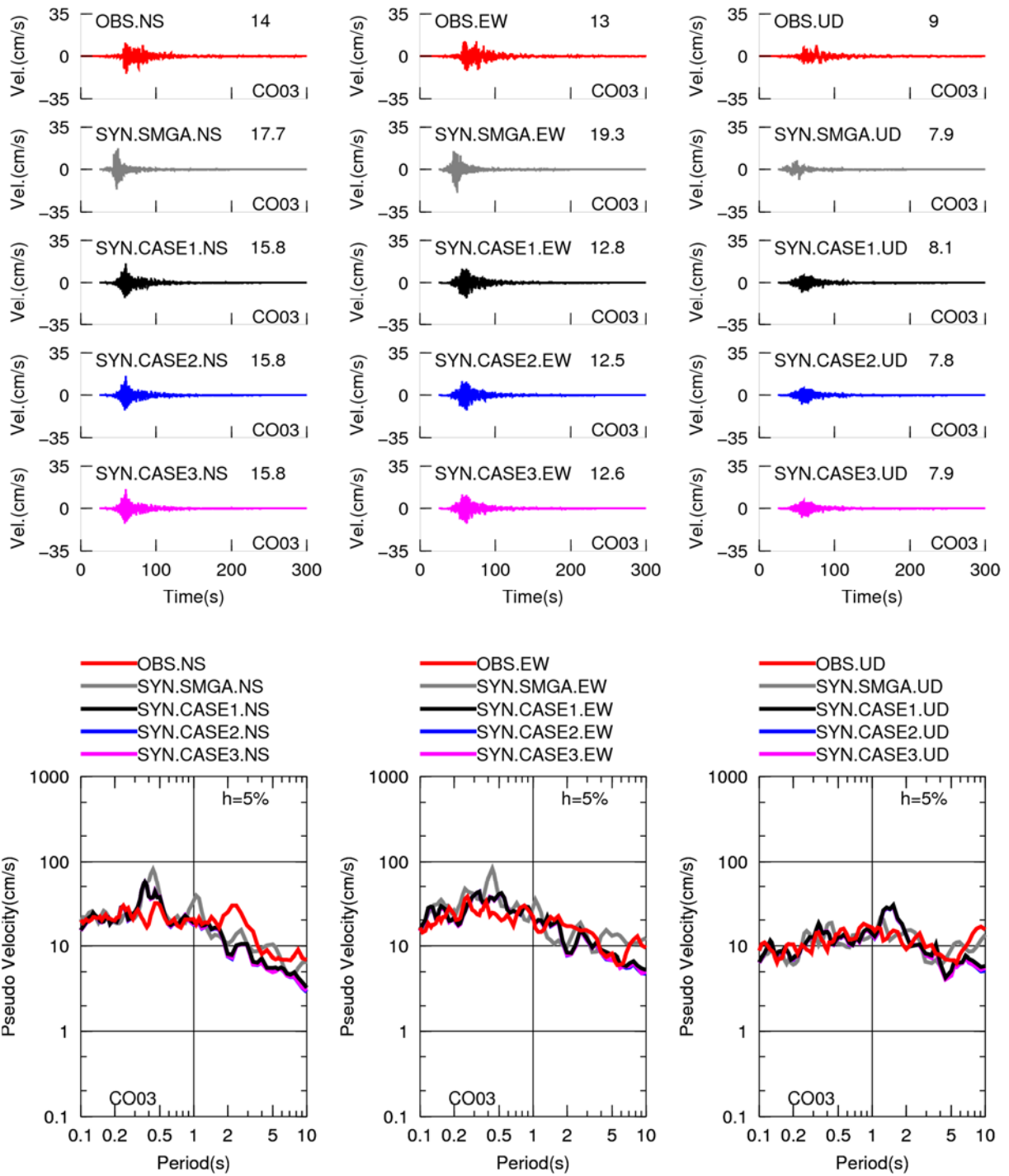


図2.1.2-75 2015年チリIllapel地震のCO03観測点における合成結果のCase1からCase3の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

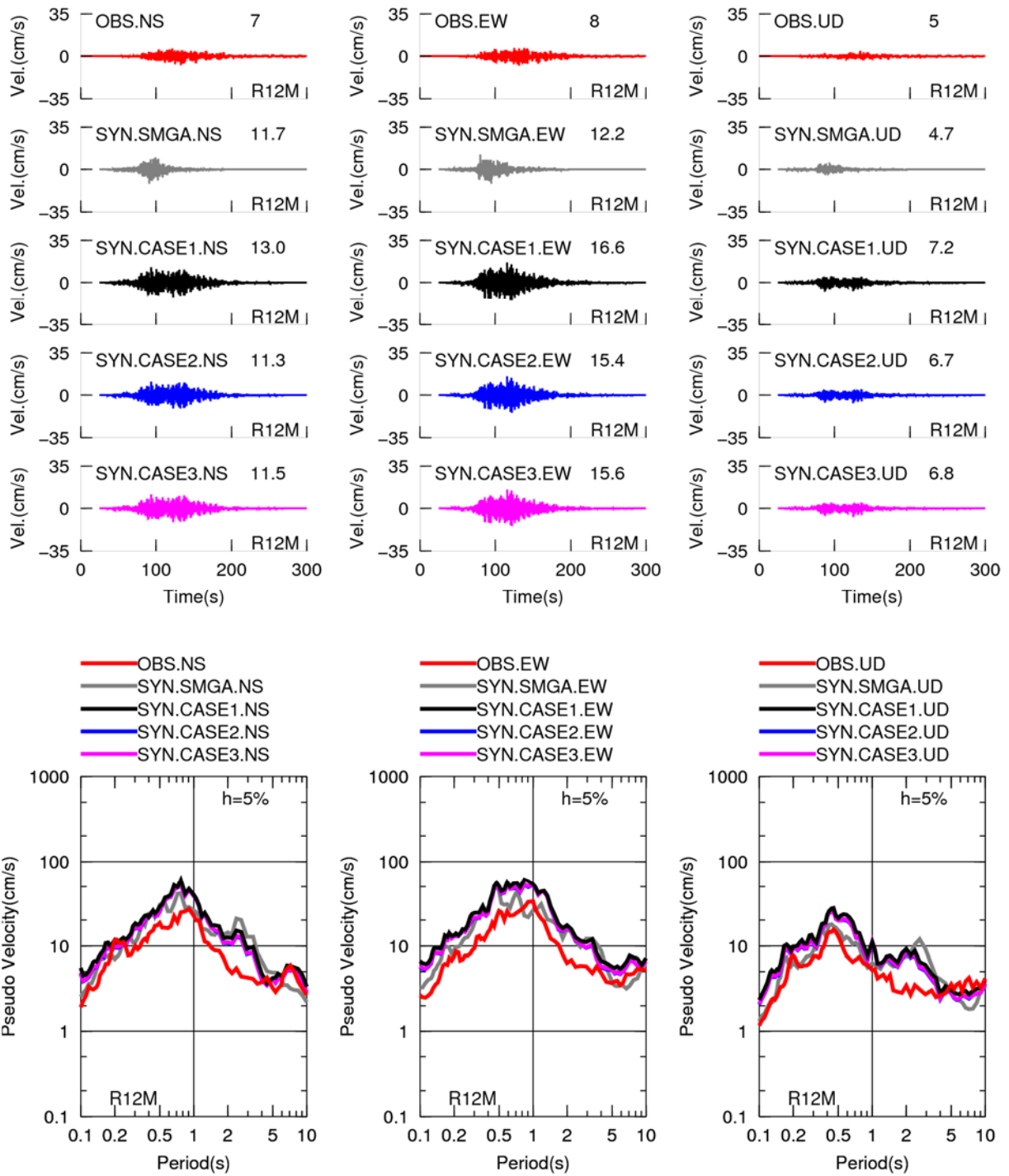


図2.1.2-76 2015年チリ Illapel地震のR12M観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

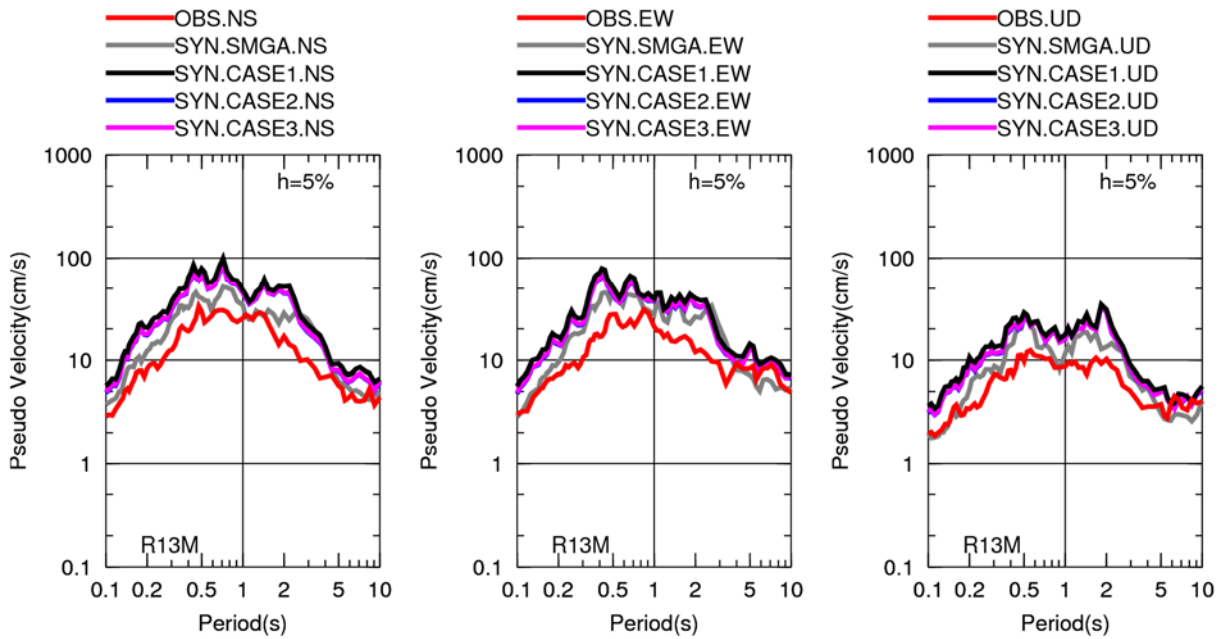
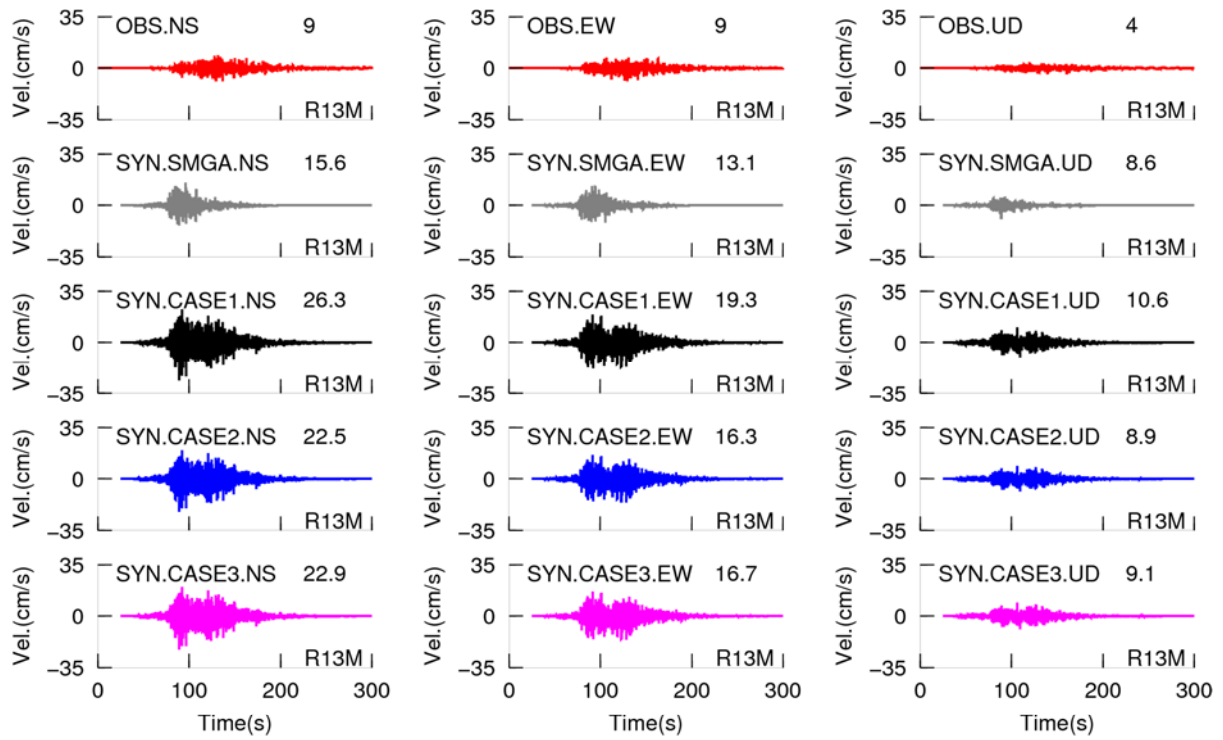


図2.1.2-77 2015年チリ Illapel地震のR13M観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

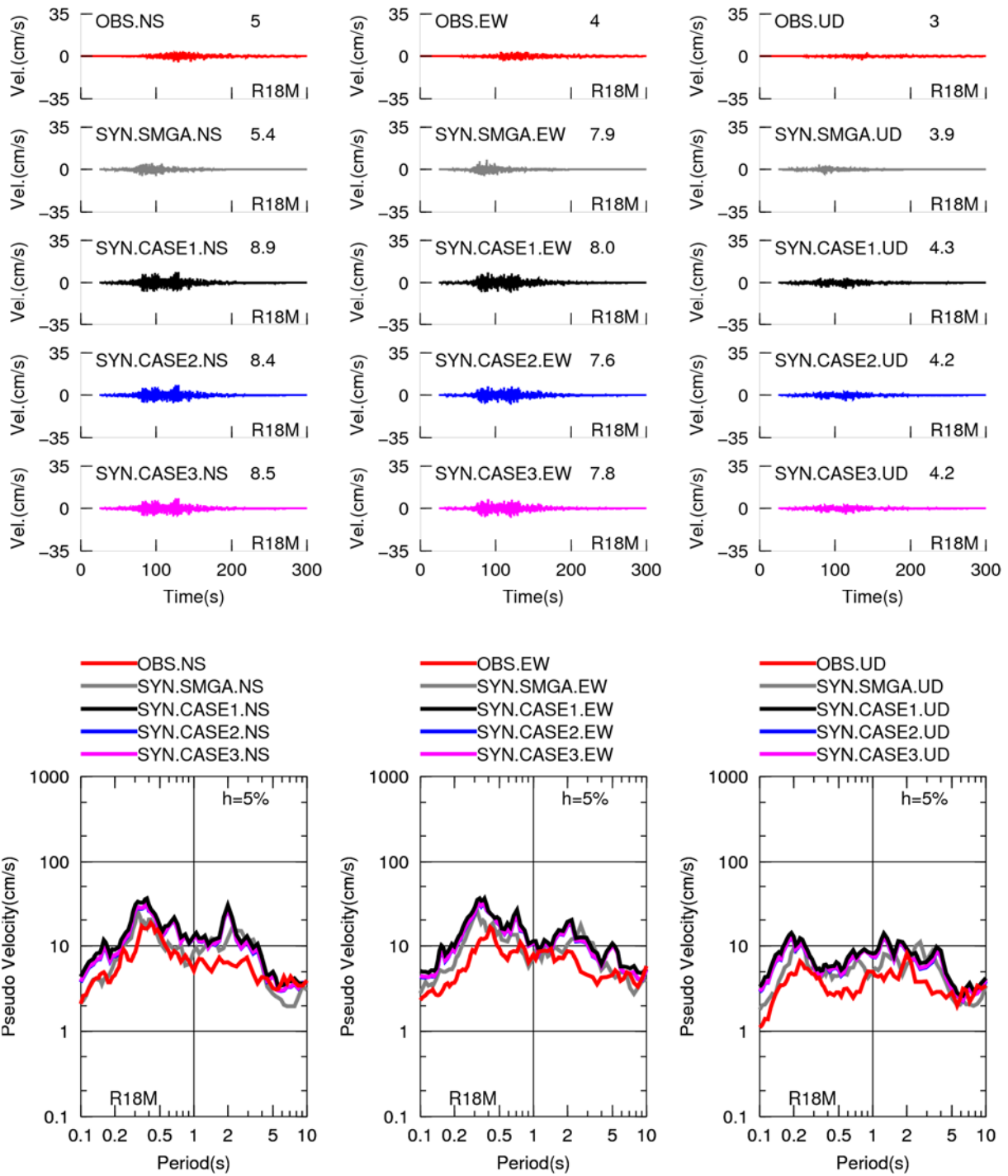


図2.1.2-78 2015年チリ Illapel地震のR18M観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

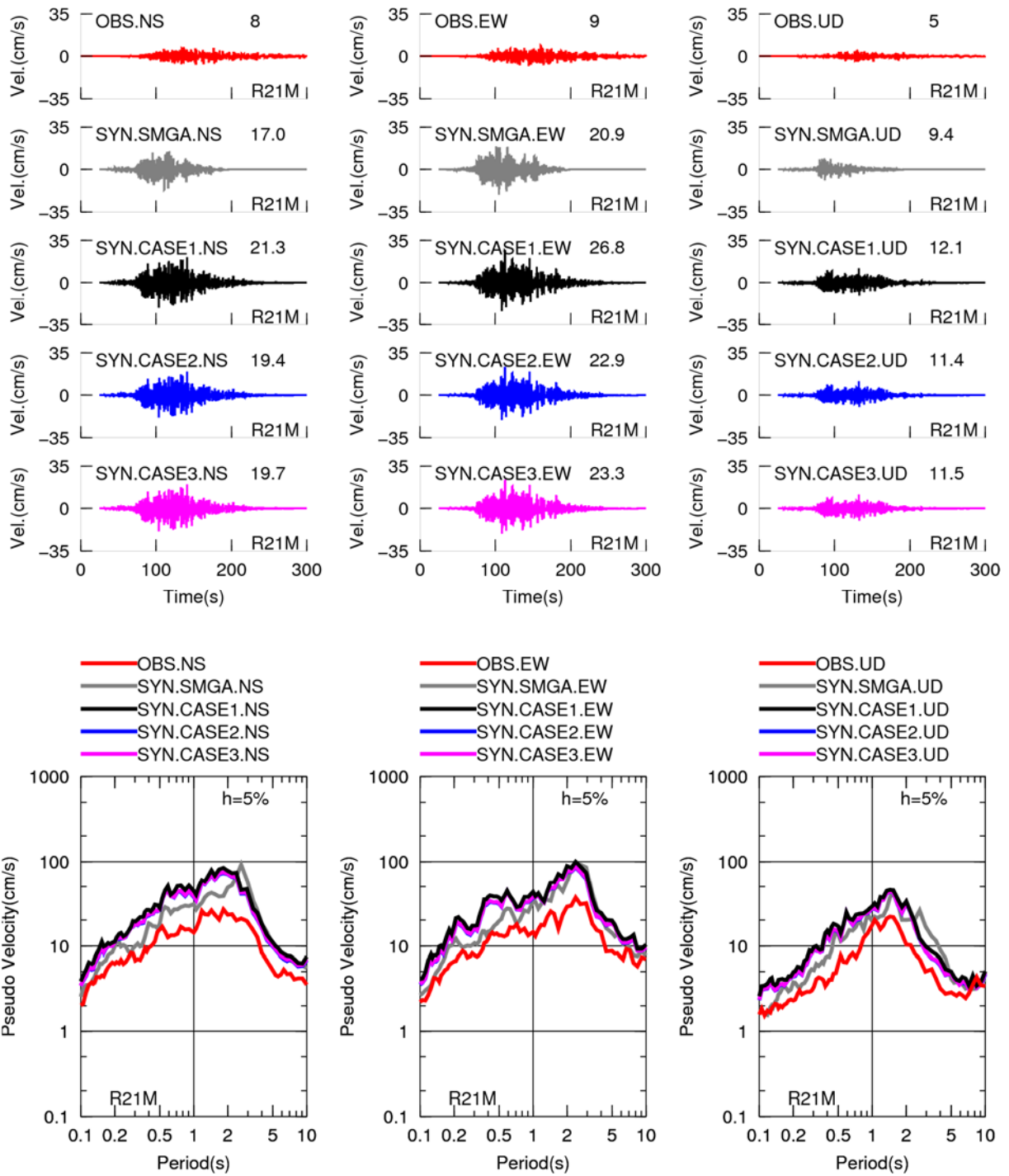


図2.1.2-79 2015年チリ Illapel地震のR21M観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

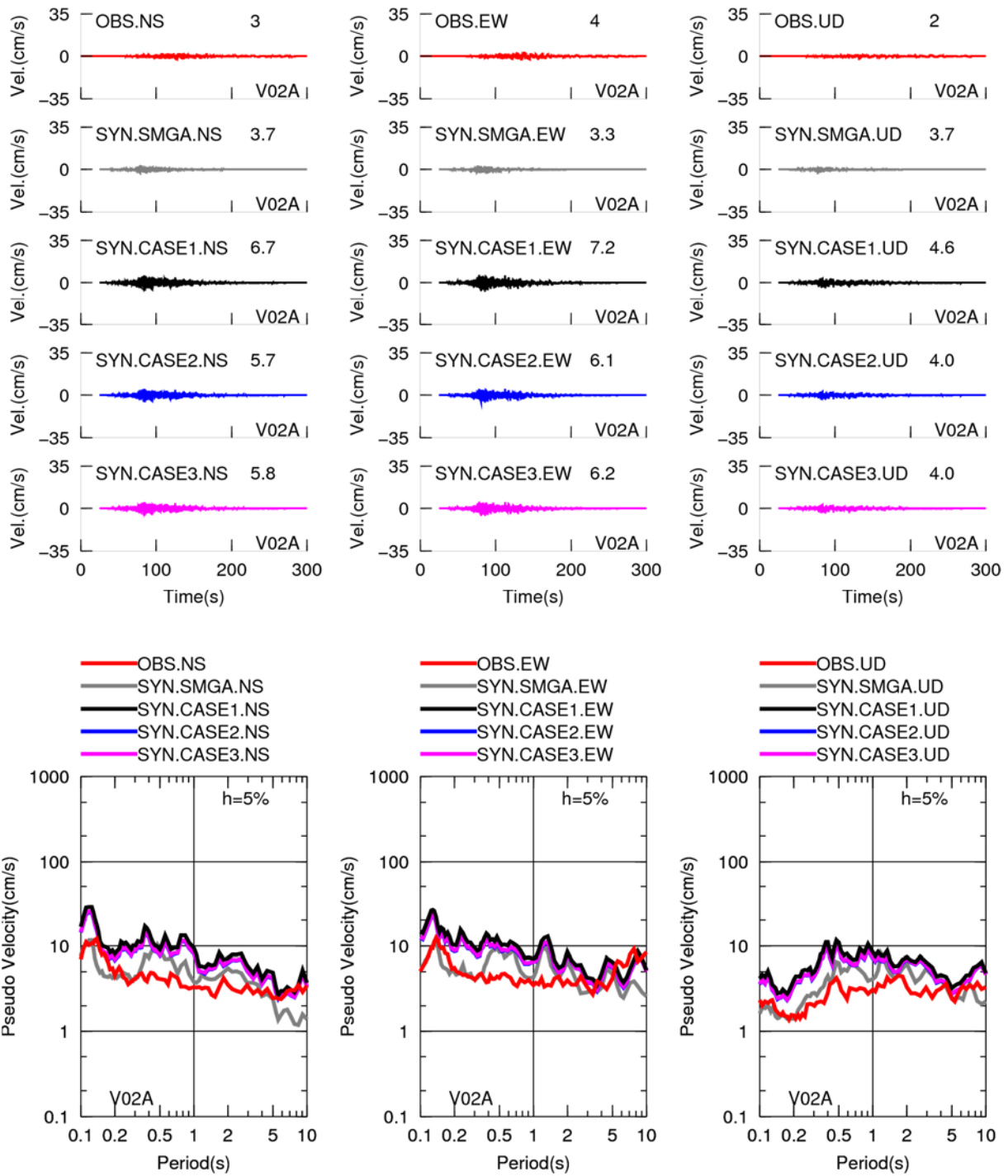


図2.1.2-80 2015年チリIllapel地震のV02A観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

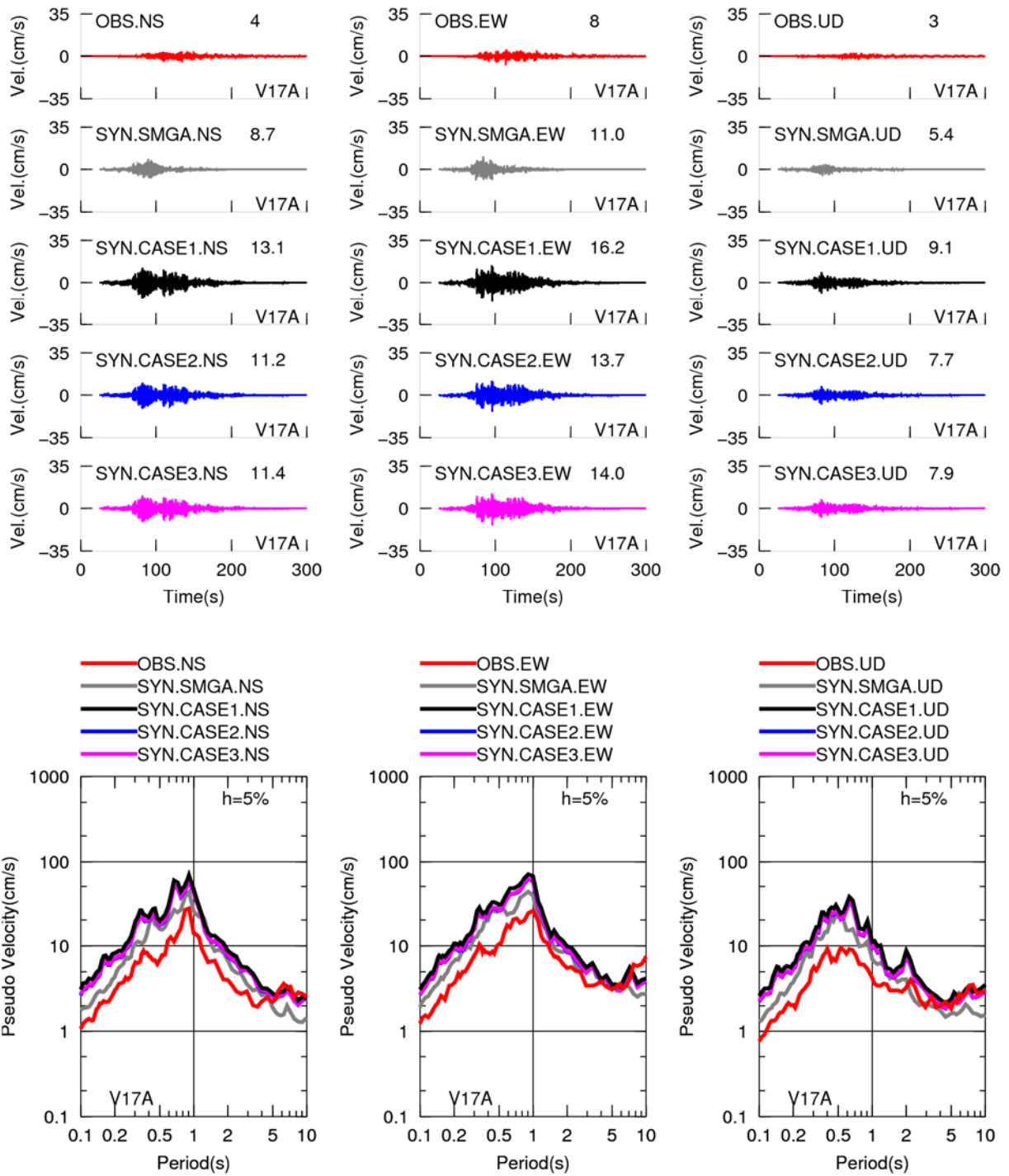


図2.1.2-81 2015年チリIllapel地震のV17A観測点における合成結果のCase1からCase3の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

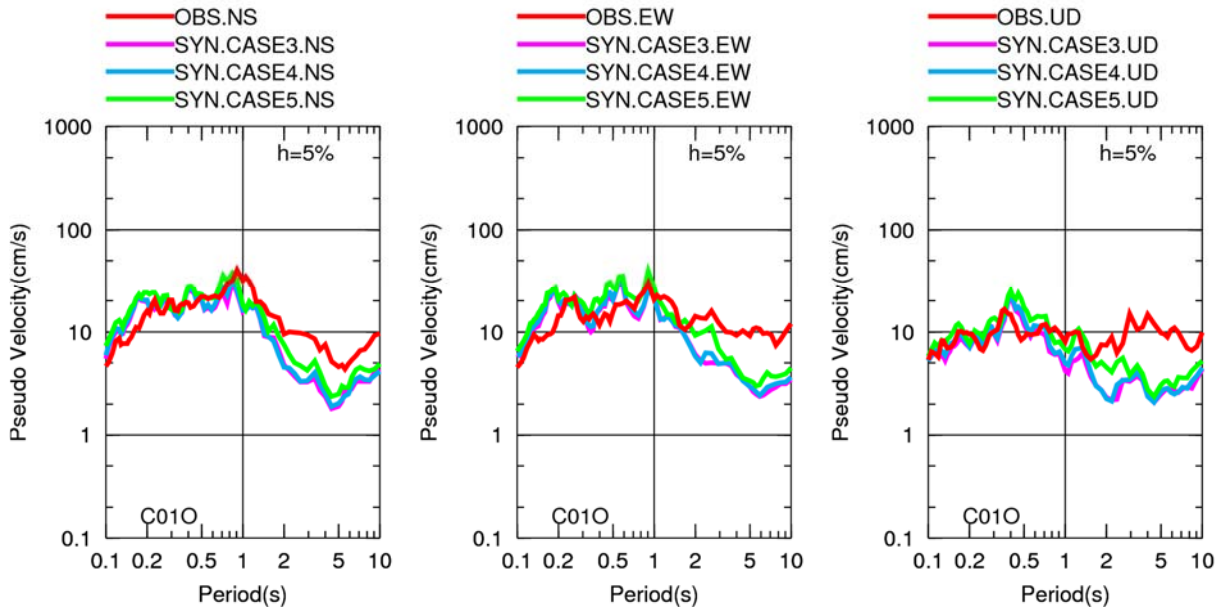
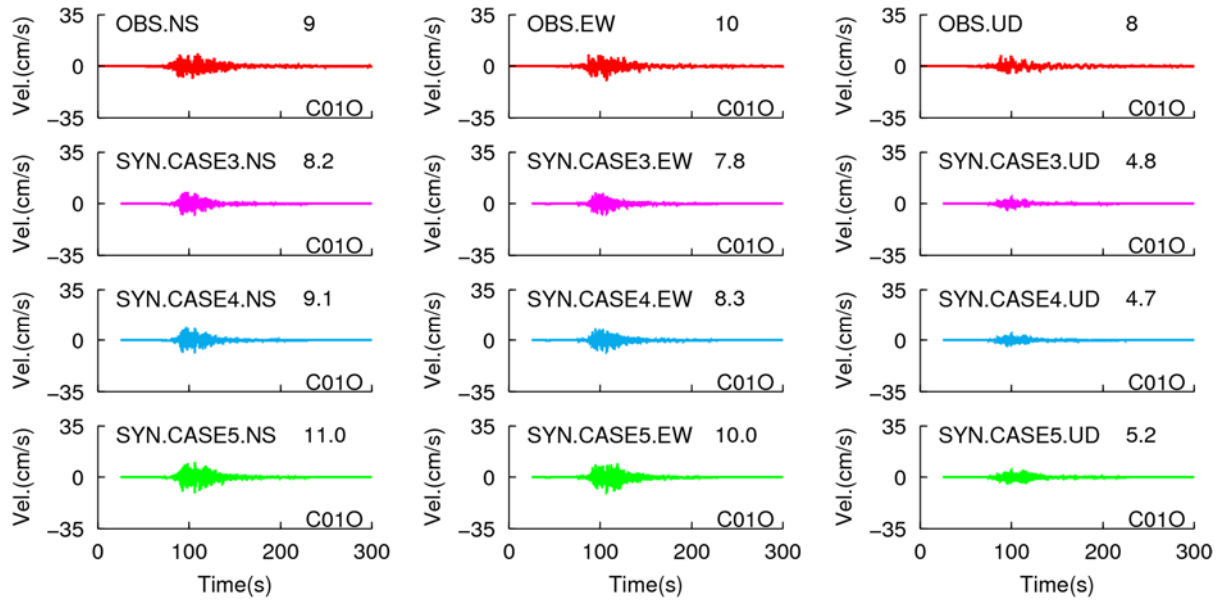


図2.1.2-82 Illapel地震のC01O観測点における合成結果のCase3からCase5の比較（上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル）

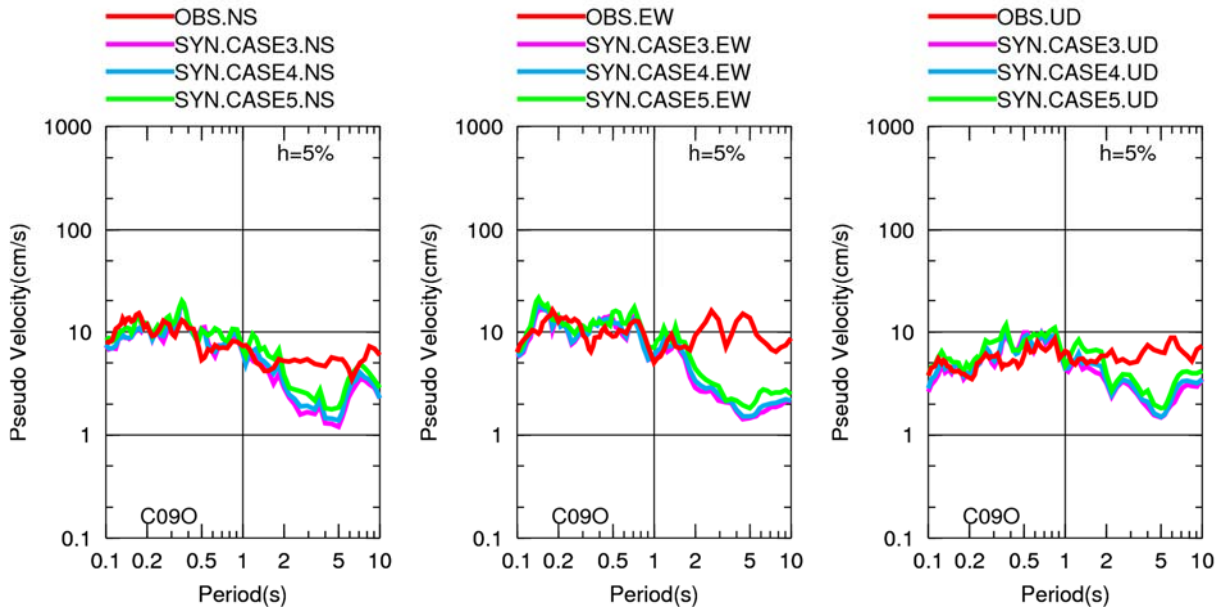
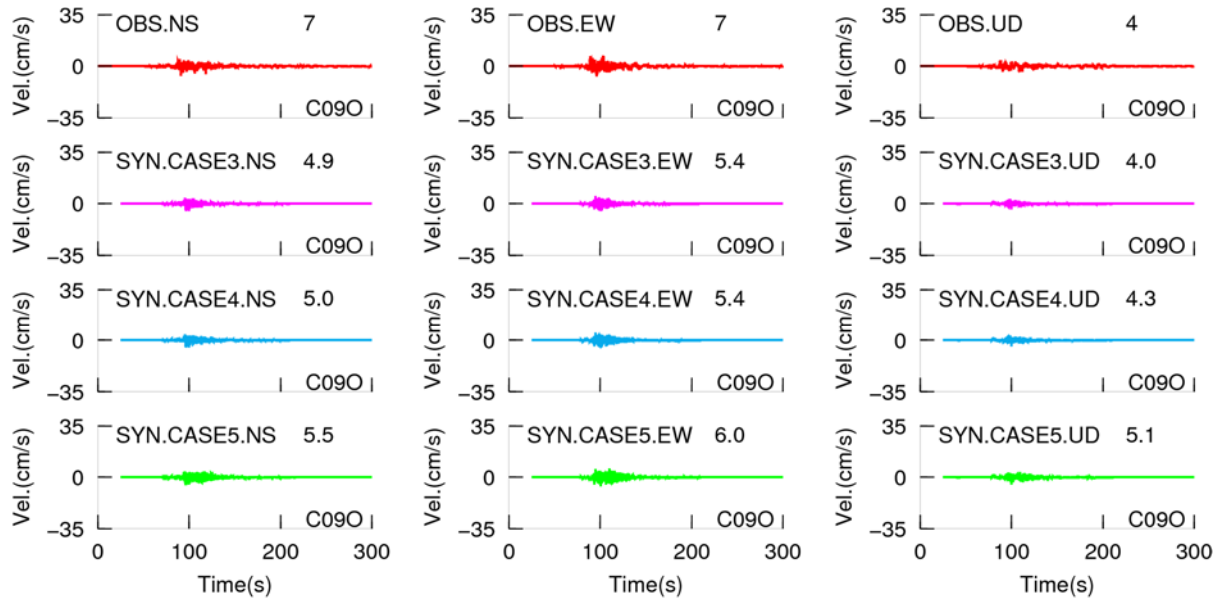


図2.1.2-83 2015年チリIllapel地震のC09O観測点における合成結果のCase3からCase5の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

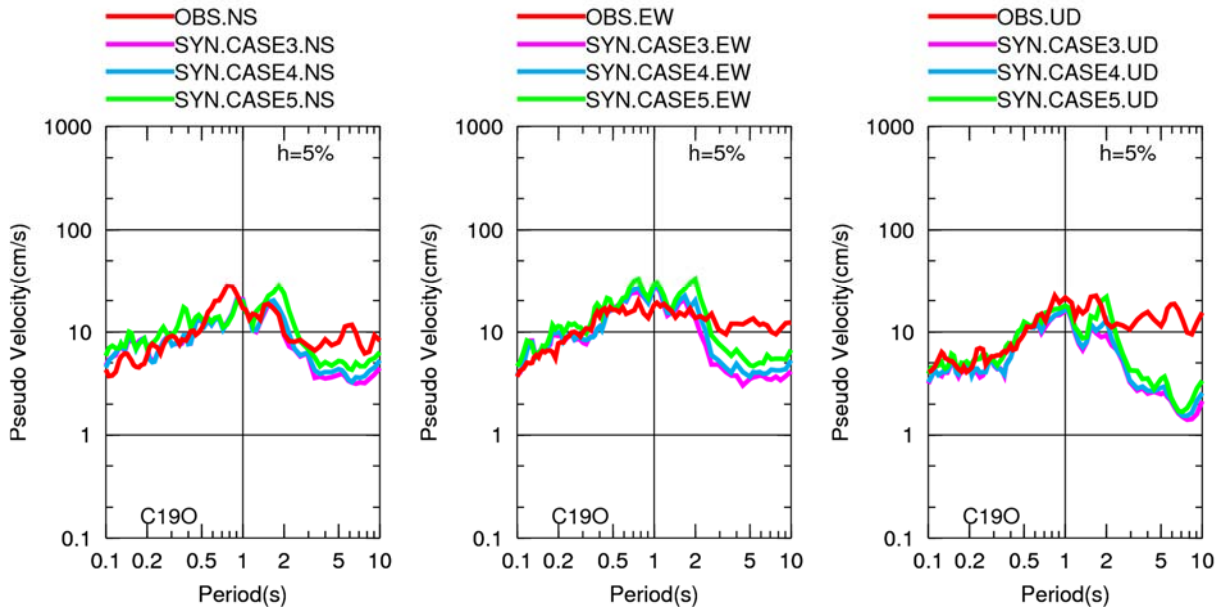
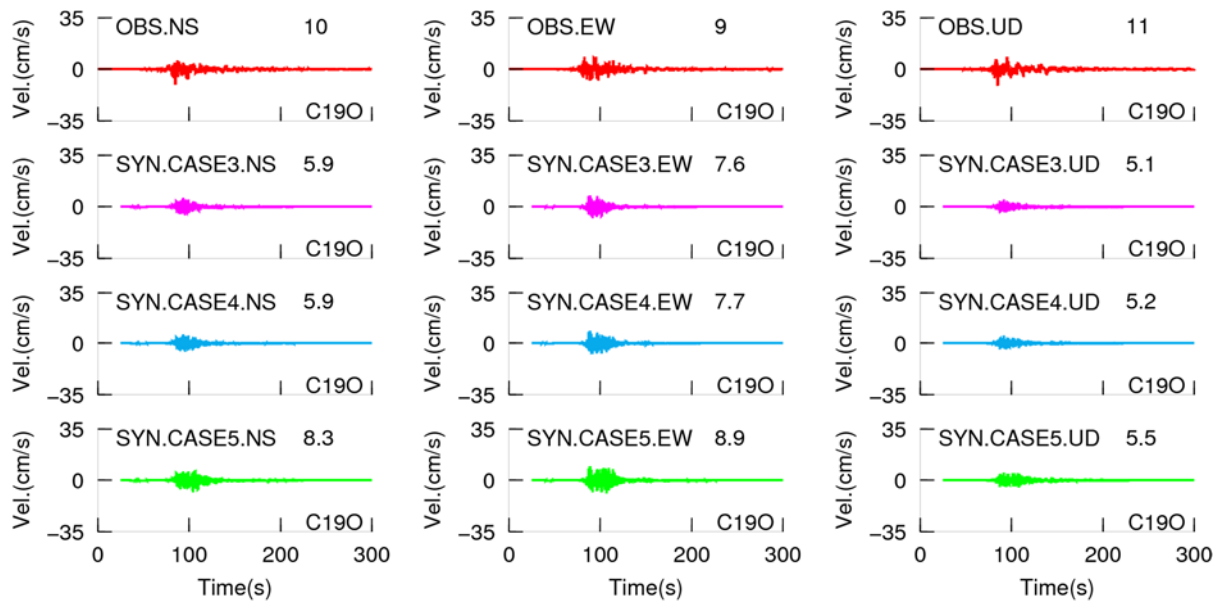


図2.1.2-84 2015年チリIllapel地震のC190観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

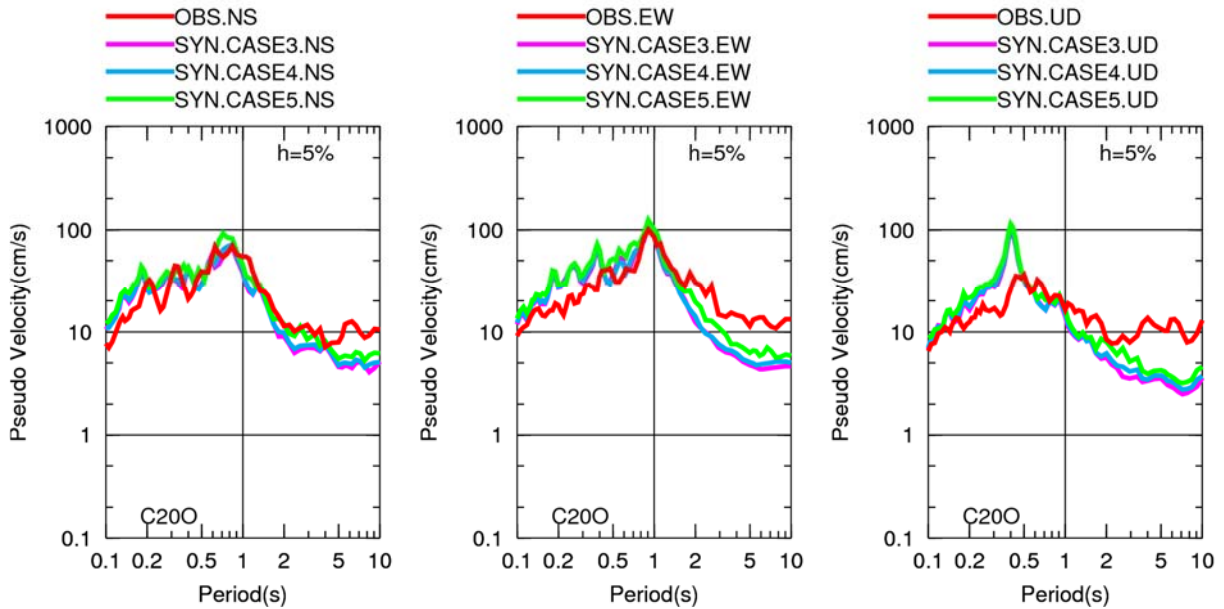
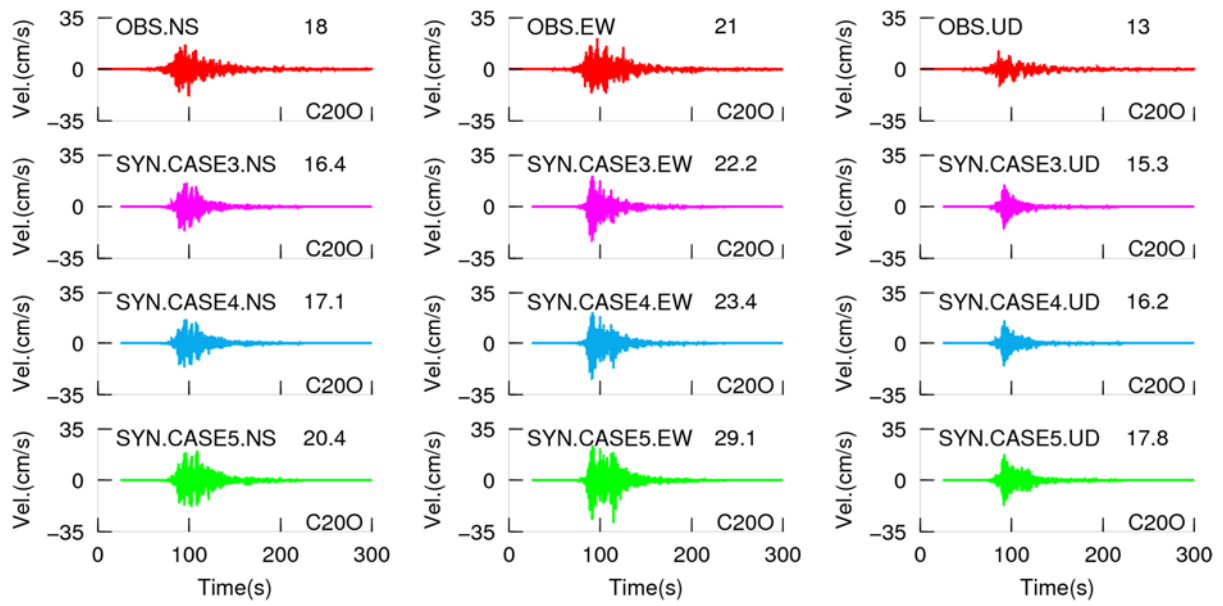


図2.1.2-85 2015年チリIllapel地震のC200観測点における合成結果のCase3からCase5の比較
 (上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

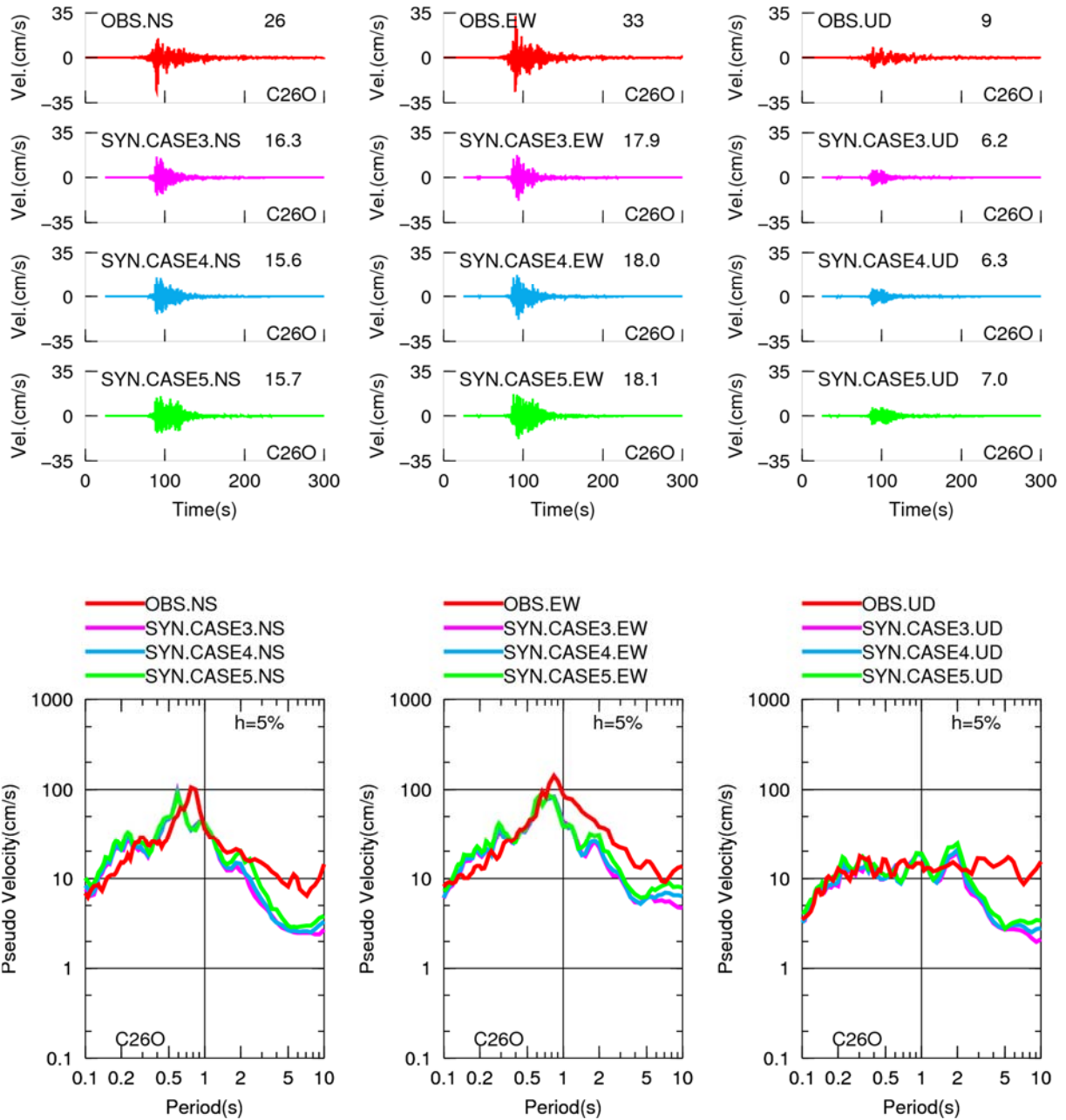


図2.1.2-86 2015年チリIllapel地震のC260観測点における合成結果のCase3からCase5の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

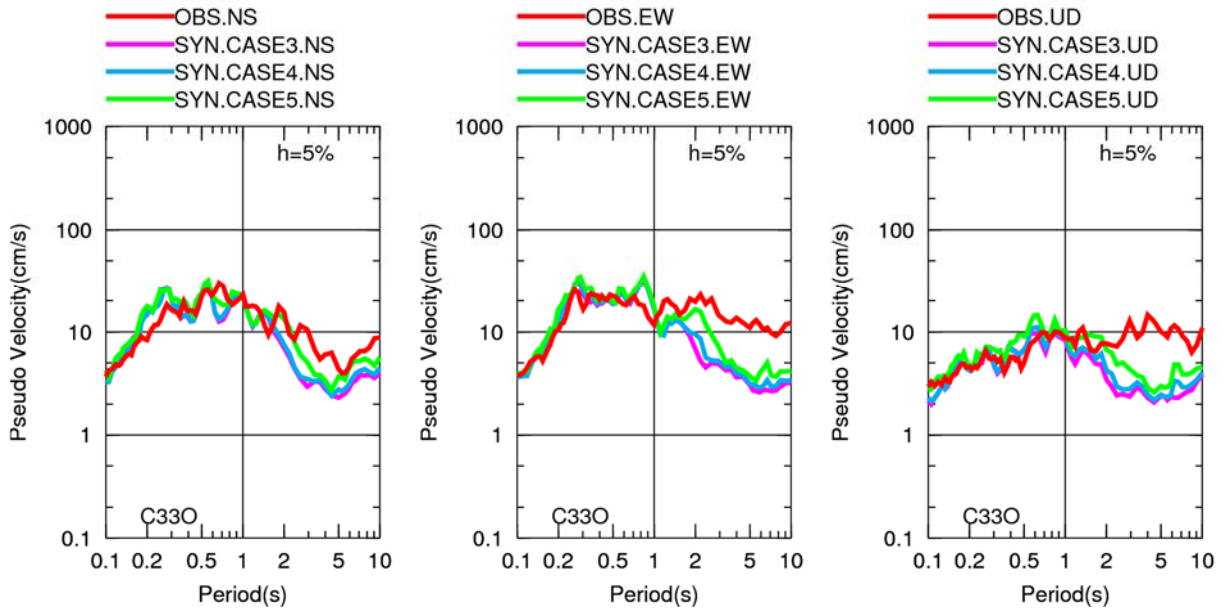
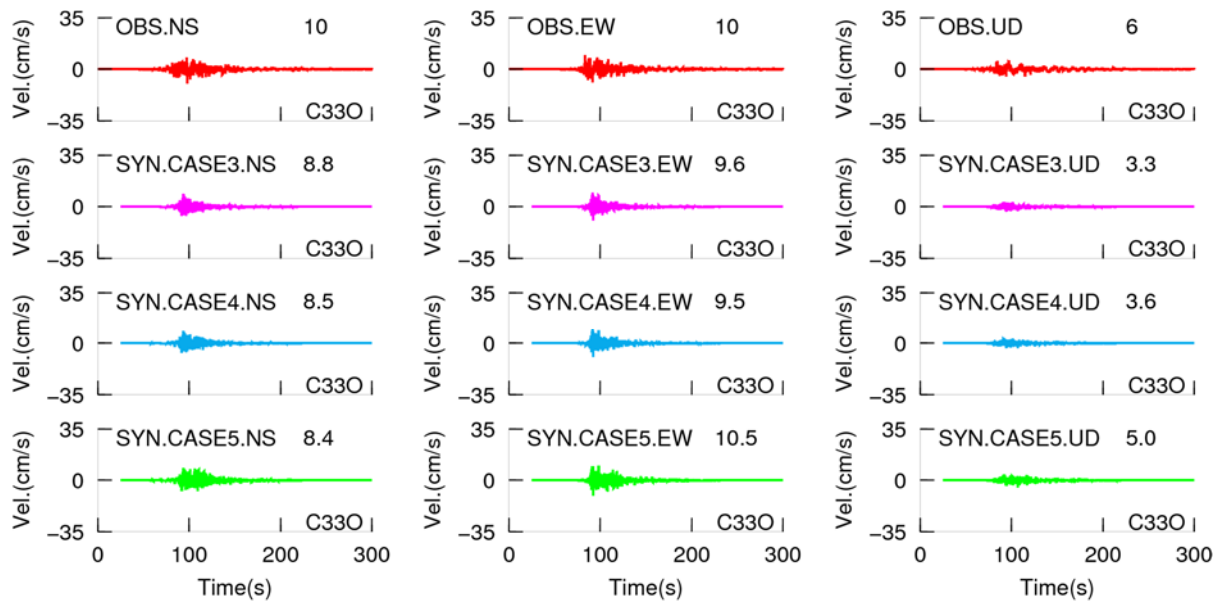


図2.1.2-87 2015年チリIllapel地震のC330観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

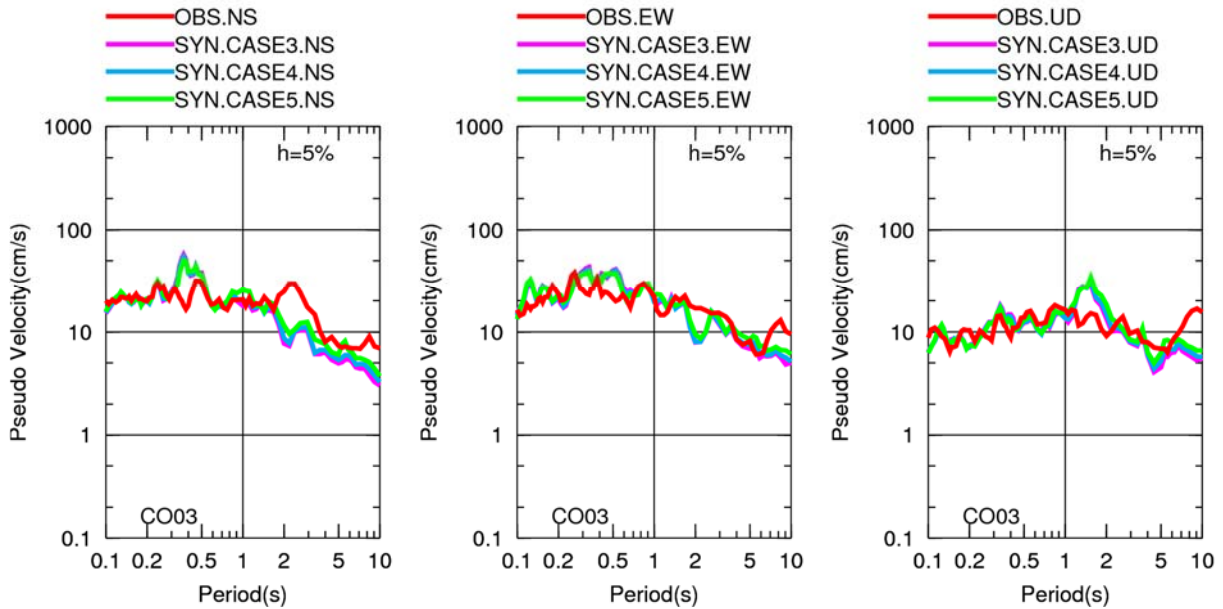
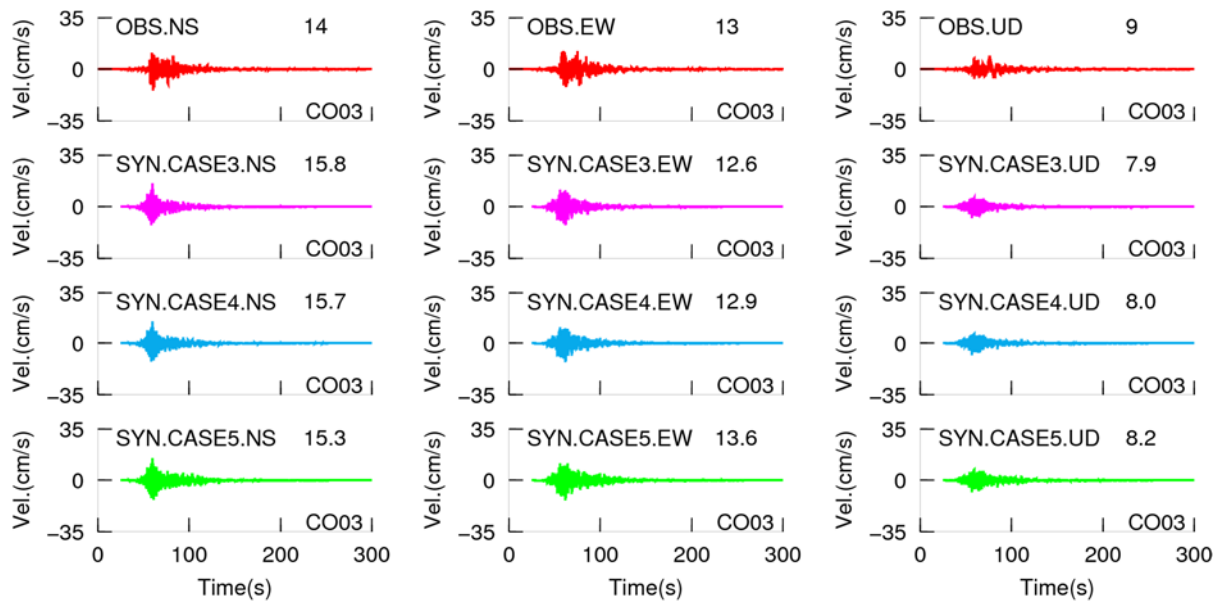


図2.1.2-88 2015年チリIllapel地震のCO03観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

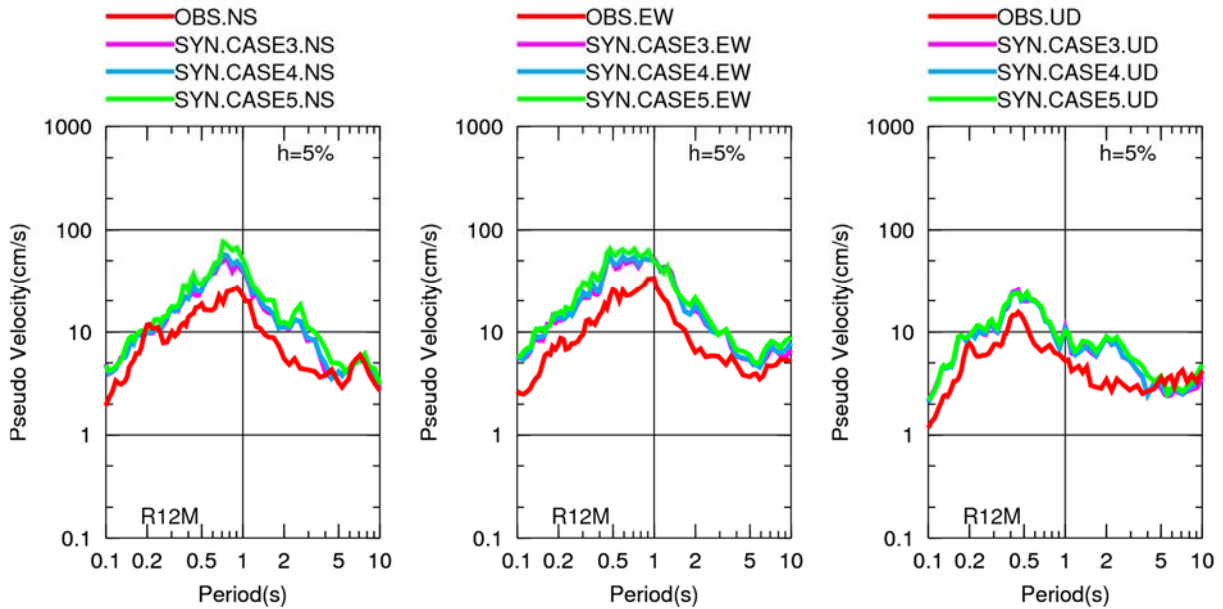
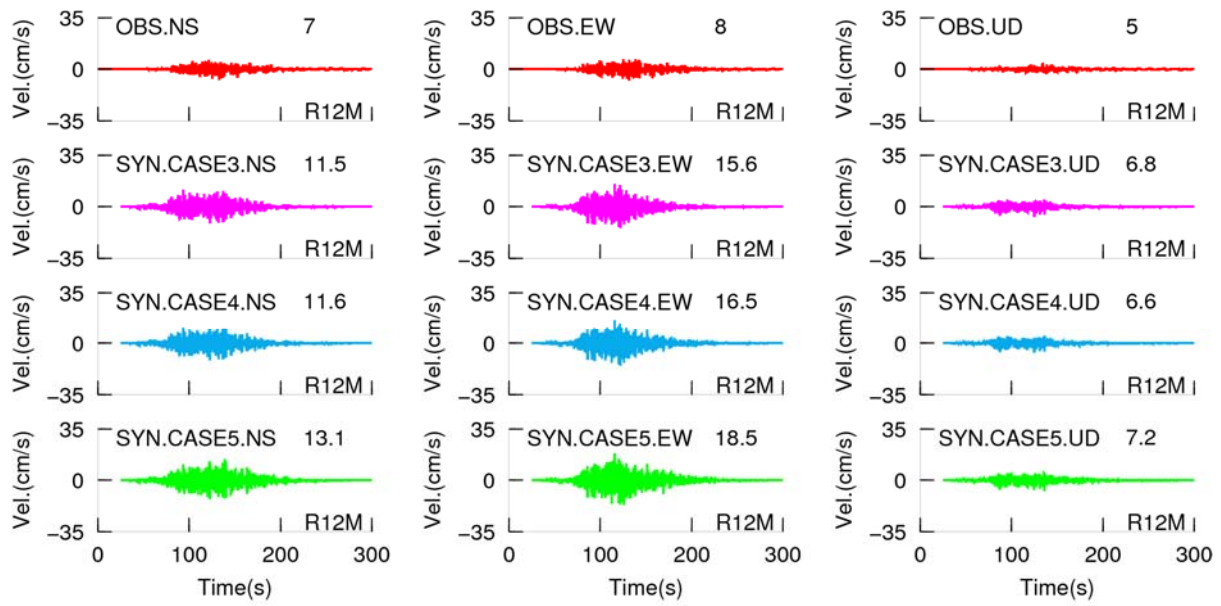


図2.1.2-89 2015年チリ Illapel地震のR12M観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

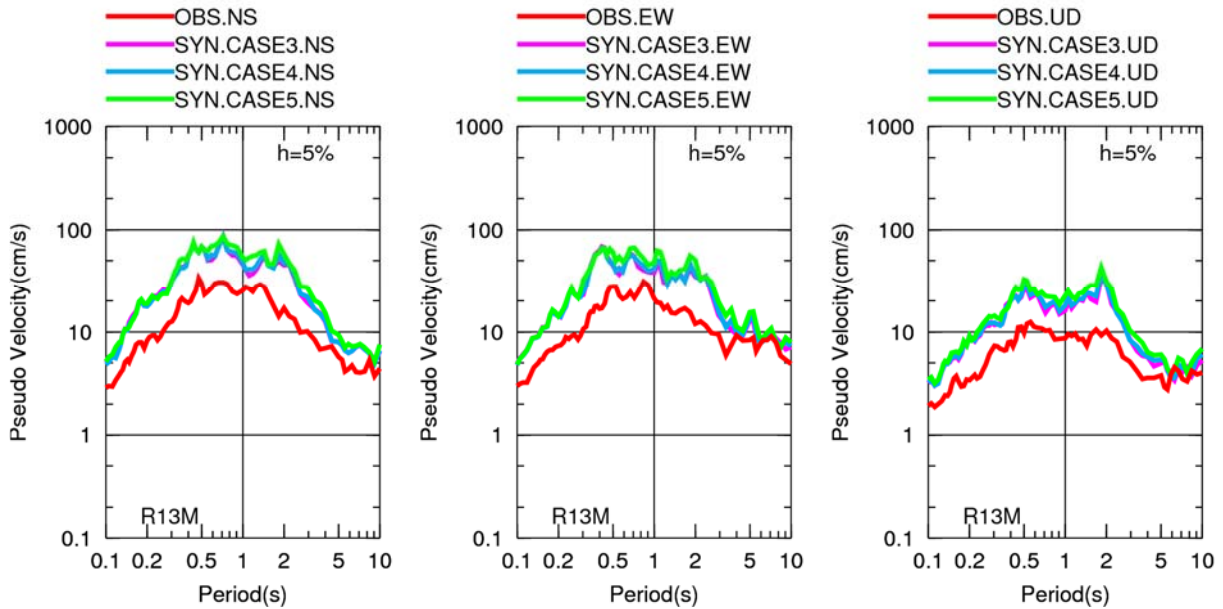
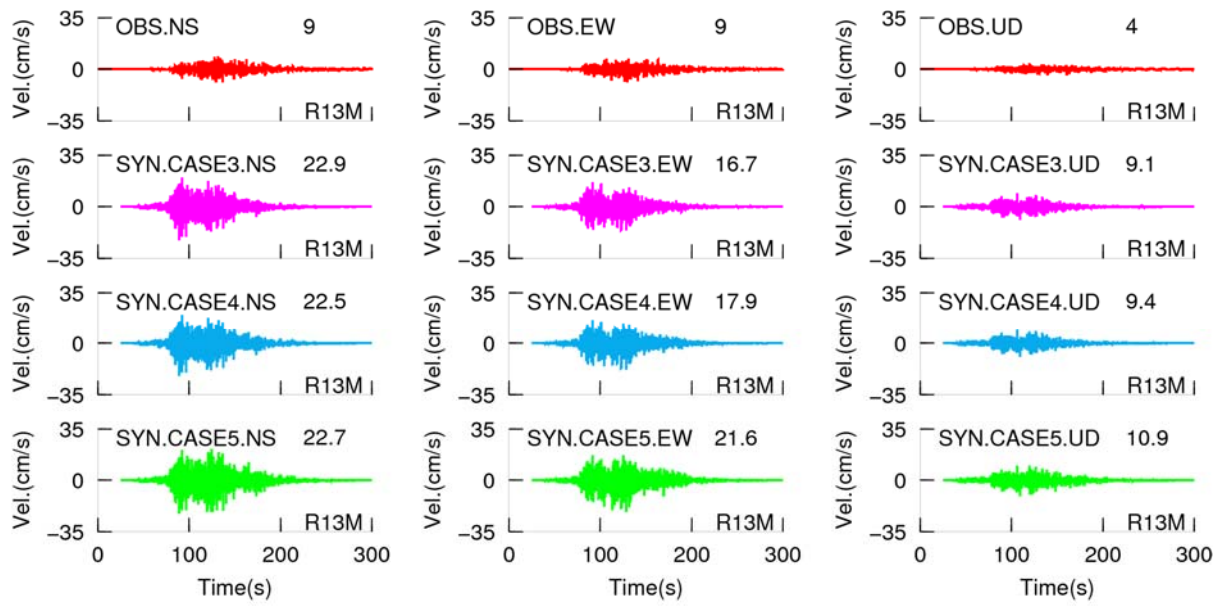


図2.1.2-90 2015年チリIllapel地震のR13M観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

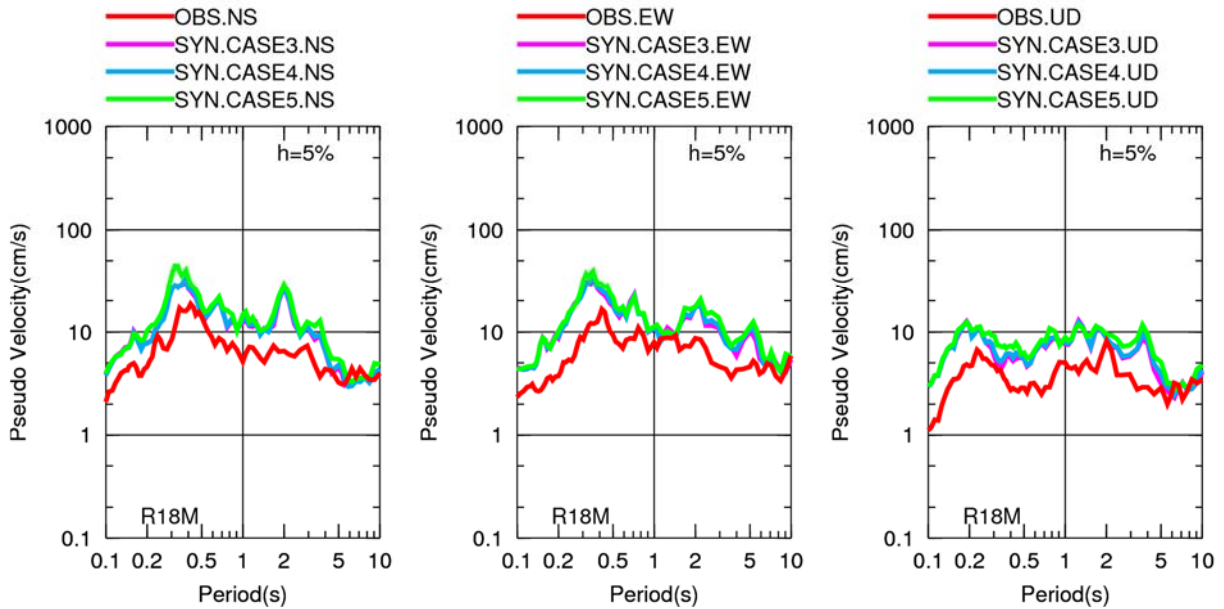
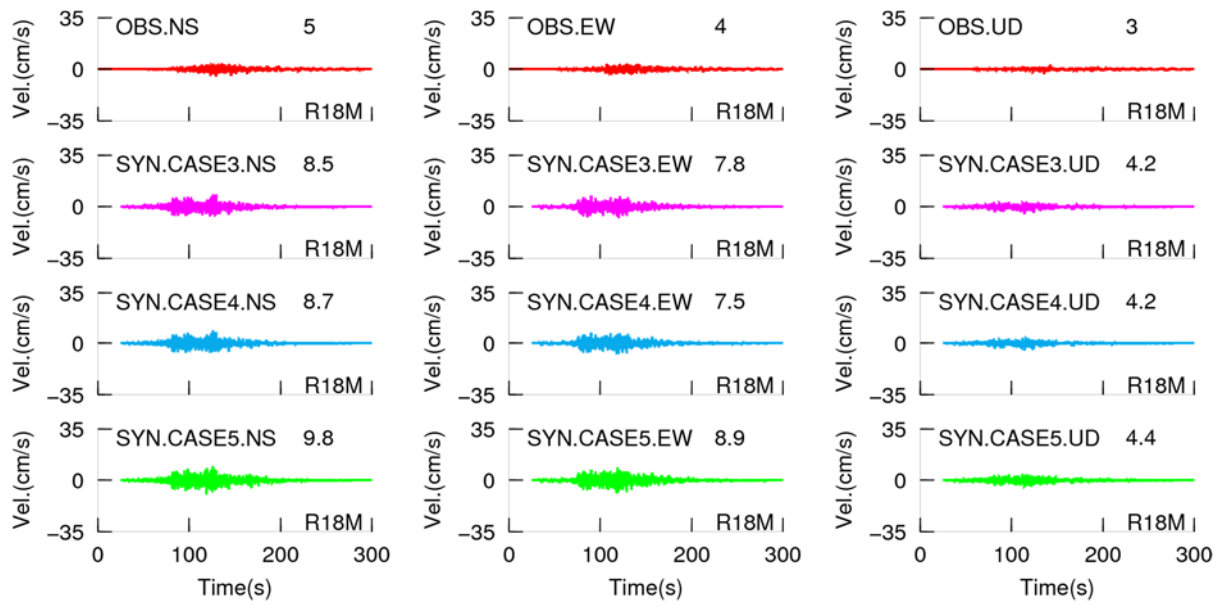


図2.1.2-91 2015年チリIllapel地震のR18M観測点における合成結果のCase3からCase5の比較
(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

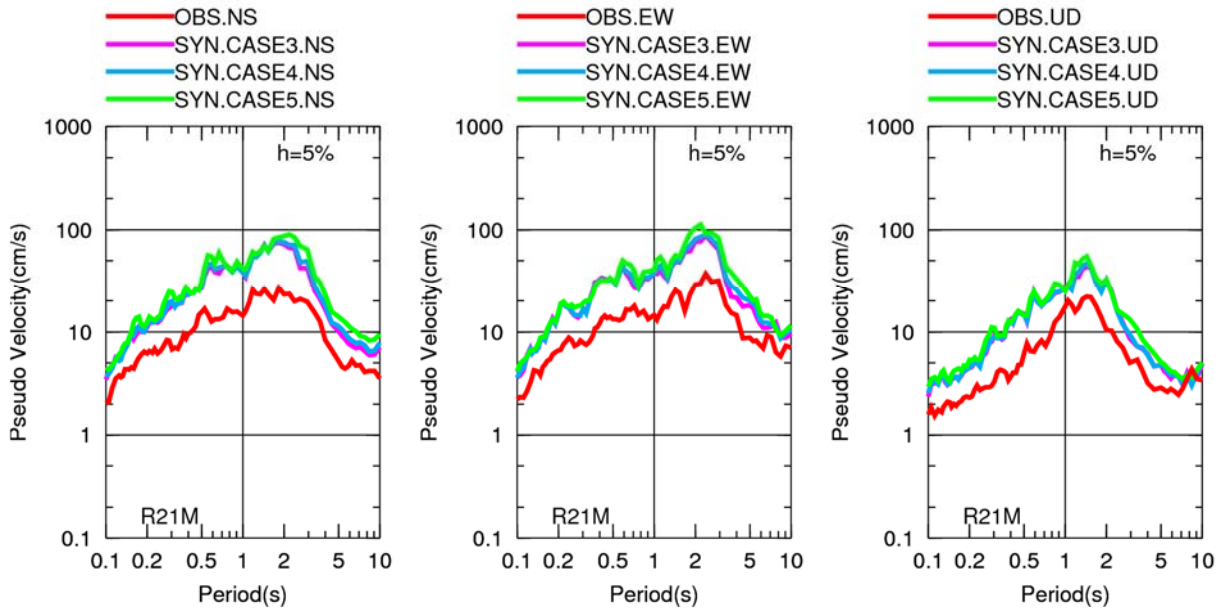
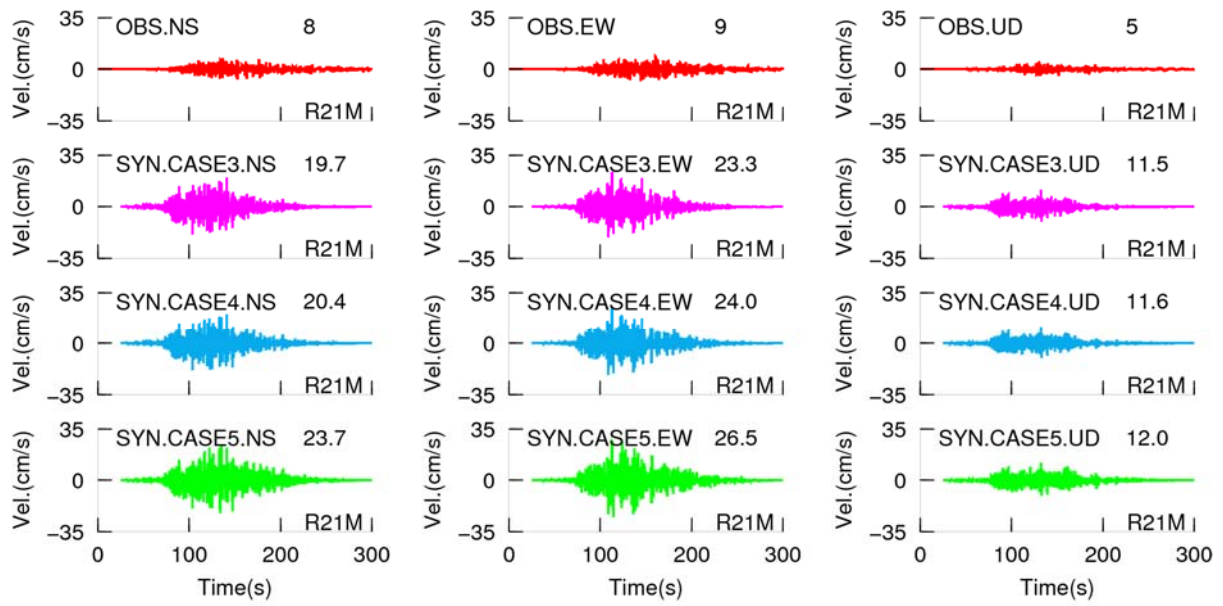


図2.1.2-92 2015年チリIllapel地震のR21M観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

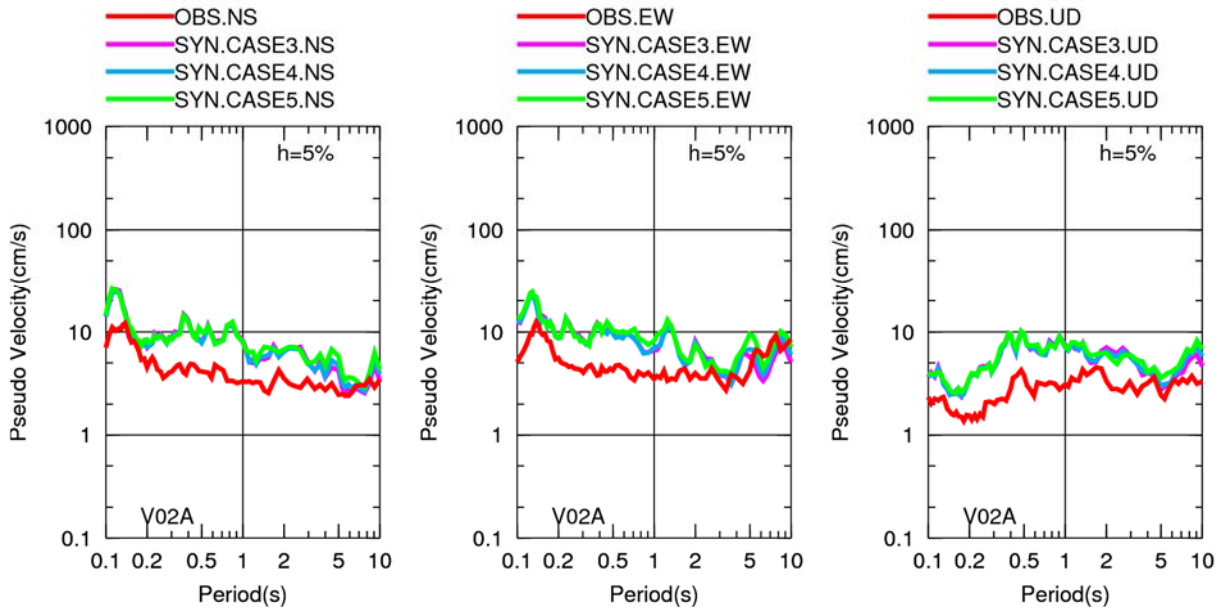
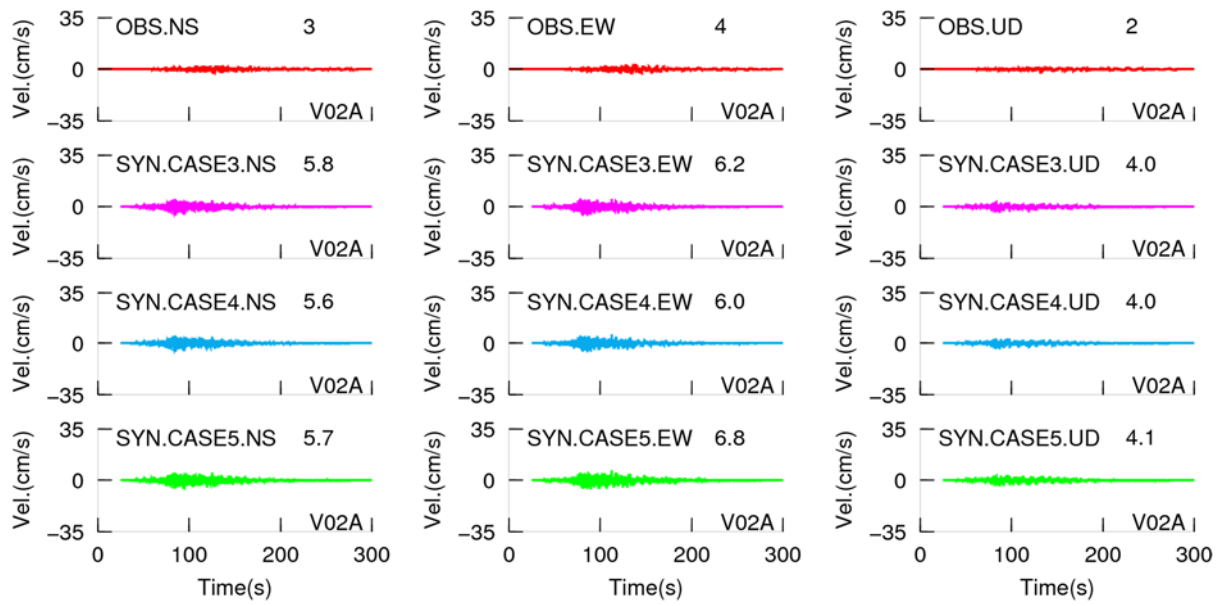


図2.1.2-93 2015年チリIllapel地震のV02A観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

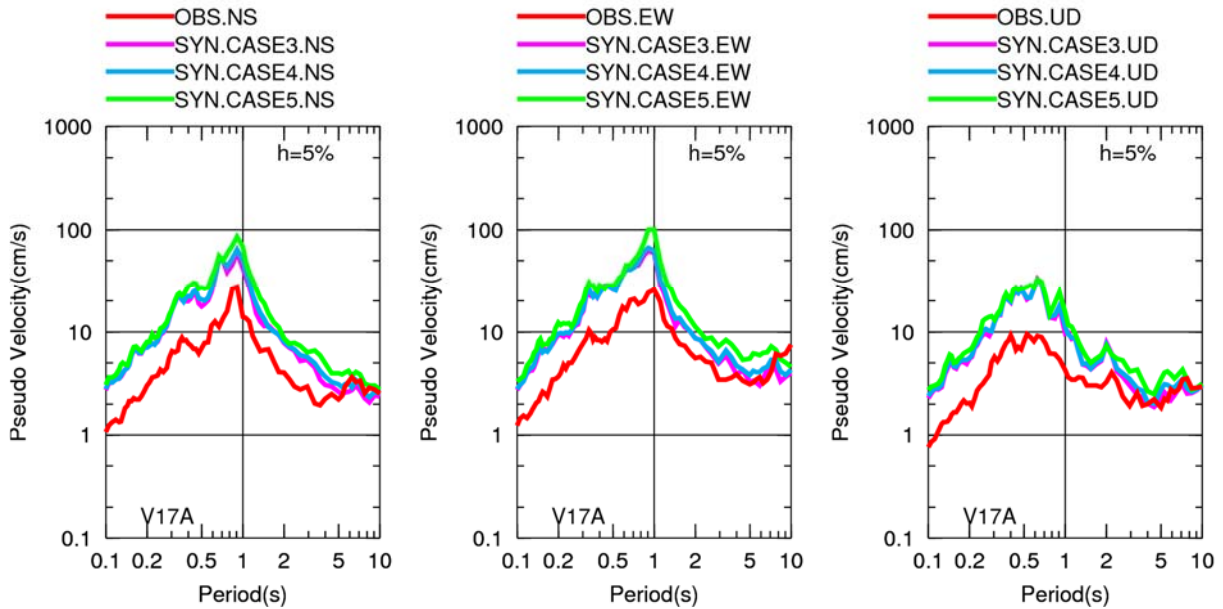
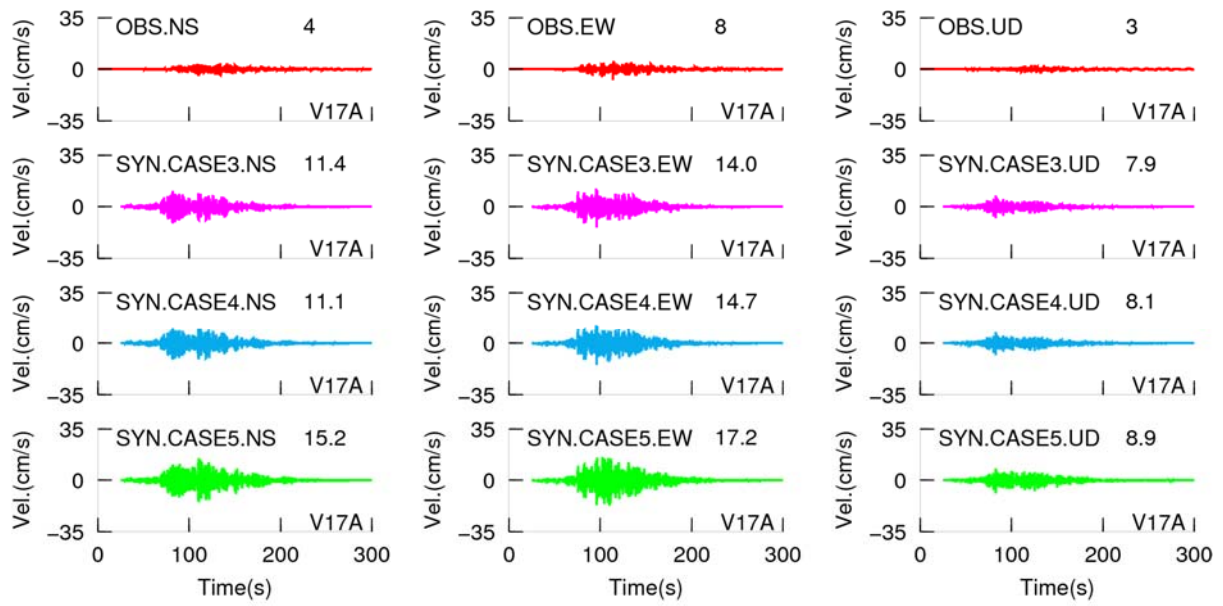


図2.1.2-94 2015年チリIllapel地震のV17A観測点における合成結果のCase3からCase5の比較

(上段：速度時刻歴、下段：擬似速度応答スペクトル)

2.1節の参考文献

2.1.1

- 1) 原子力規制庁 (2018): 平成29年度原子力規制庁安全研究, 原子力施設等防災対策等委託費 (海溝型地震による地震動の評価手法の検討) 事業業務報告書.
- 2) 郭雨佳・宮腰研・鶴来雅人 (2018): 強震波形インバージョンに基づくチリ沖プレート間巨大地震の震源特性化, 第15回日本地震工学シンポジウム, PS1-01-04.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2005): 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 (平成17年3月23日公表, 平成17年4月13日更新, 平成17年12月14日更新), 分冊2, 震源断層を特定した地震動予測地図の説明.
- 4) Eshelby, J. D. (1957): The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 241, pp. 376-396.
- 5) Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 65, No. 5, pp. 1073-1095.
- 6) 宇津徳治 (2001): 地震学 (第3版), 共立出版.
- 7) 石井透・佐藤俊明 (2000): 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の面積とモーメントの関係, 日本地震学会2000年秋季大会予稿集, B09.
- 8) 佐藤良輔 (1989): 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, p. 49.
- 9) Yamanaka, Y. and K. Shimazaki (1990): Scaling relationship between the number of aftershocks and the size of the main shock, *Journal of Physics of the Earth*, 38, pp. 305-324.
- 10) 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透 (2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No. 545, pp. 51-62.
- 11) Madariaga, R. (1979): On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B5, pp. 2243-2250.

- 12) Brune, J. N. (1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 26, pp.4997-5009.
- 13) Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 2, pp. 489-508.

2.1.2

- 1) Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka (1989): A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 396, pp. 27-36.
- 2) 原子力規制庁 (2018): 平成 29 年度原子力規制庁安全研究, 原子力施設等防災対策等委託費 (海溝型地震による地震動の評価手法の検討) 事業業務報告書.

2.2 プレート間地震のスケーリング則等の検討

2.2.1 プレート間地震の地震動特性の調査

(1) Crouse (1991)

Crouse (1991) は、日本、中部チリ、ペルー、メキシコ、北西太平洋、およびアラスカのプレート間地震の GMPE (Ground Motion Prediction Equation: 地震動予測式) を作成した。

表2.2.1-1に、Crouse (1991) がプレート間地震のGMPEの作成に用いた観測記録の数、マグニチュード、震央距離、および震源深さを示す。

Crouse (1991) がプレート間地震の GMPE に採用した式は、

$$\ln(\text{PGA}) = p_1 + p_2 M + p_3 M^2 + p_4 \ln(R + p_5 \exp(p_6 M)) + p_7 h \quad (2.2.1-1)$$

である。ここに、 M はモーメントマグニチュード、 R (km) はエネルギー中心までの距離、 h (km) は震源深さ、 p_i ($i=1\sim 7$) は回帰係数である。

表2.2.1-2に、Crouse (1991) によるプレート間地震のGMPEの回帰係数と残差を示す。また、図2.2.1-1に、Crouse (1991) によるプレート間地震のGMPEと観測記録との比較を示す。

表2.2.1-1 Crouse (1991) がプレート間地震のGMPEの作成に用いた観測記録の数、マグニチュード、震央距離、および震源深さ

TABLE 1
Strong-Motion Data Characteristics

Region	No. Comp.		Magnitude		Epicentral Dist.-km		Focal Depth-km	
	PGA	PSV	PGA	PSV	PGA	PSV	PGA	PSV
1. Japan	635	186	4.8-8.2	5.1-8.2	8-866	8-462	0-238	10-238
2. Central Chile	44	22	7.5-7.8	7.5-7.8	28-386	28-378	35-59	35-59
3. Peru	18	18	5.3-8.1	5.3-8.1	73-372	73-372	6-98	6-98
4. Mexico	78	45	6.9-8.0	7.6-8.0	21-469	23-469	17-31	28-31
5. Pacific N.W.	12	12	6.5-7.1	6.5-7.1	17-217	17-217	60	60
6. Alaska	4	4	5.2-7.9	5.2-7.9	46-135	46-135	33-52	33-52
	791	287						

表2.2.1-2 Crouse (1991) によるプレート間地震のGMPEの回帰係数と残差

TABLE 2
Results of PSV Regression Analyses using Equation (4) with p_3 , p_5 , and p_6 fixed as shown.

Period	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	σ^2
0.1 sec	3.26	1.12	0	-1.93	1.58	0.608	0.00566	0.544
0.2	4.44	1.09	0	-1.92	1.58	0.608	0.00531	0.455
0.4	3.03	1.18	0	-1.69	1.58	0.608	0.00357	0.406
0.6	2.86	1.41	0	-1.93	1.58	0.608	0.00257	0.477
0.8	1.82	1.50	0	-1.83	1.58	0.608	0.00215	0.497
1.0	1.43	1.56	0	-1.83	1.58	0.608	0.00114	0.560
1.5	-0.433	1.50	0	-1.45	1.58	0.608	-0.000843	0.542
2.0	-0.987	1.50	0	-1.38	1.58	0.608	-0.00220	0.517
3.0	-1.67	1.59	0	-1.41	1.58	0.608	-0.00367	0.647
4.0	-2.20	1.67	0	-1.46	1.58	0.608	-0.00439	0.656
PGA-gals	11.5	0.657	0	-2.09	63.7	0.128	-0.00397	0.398

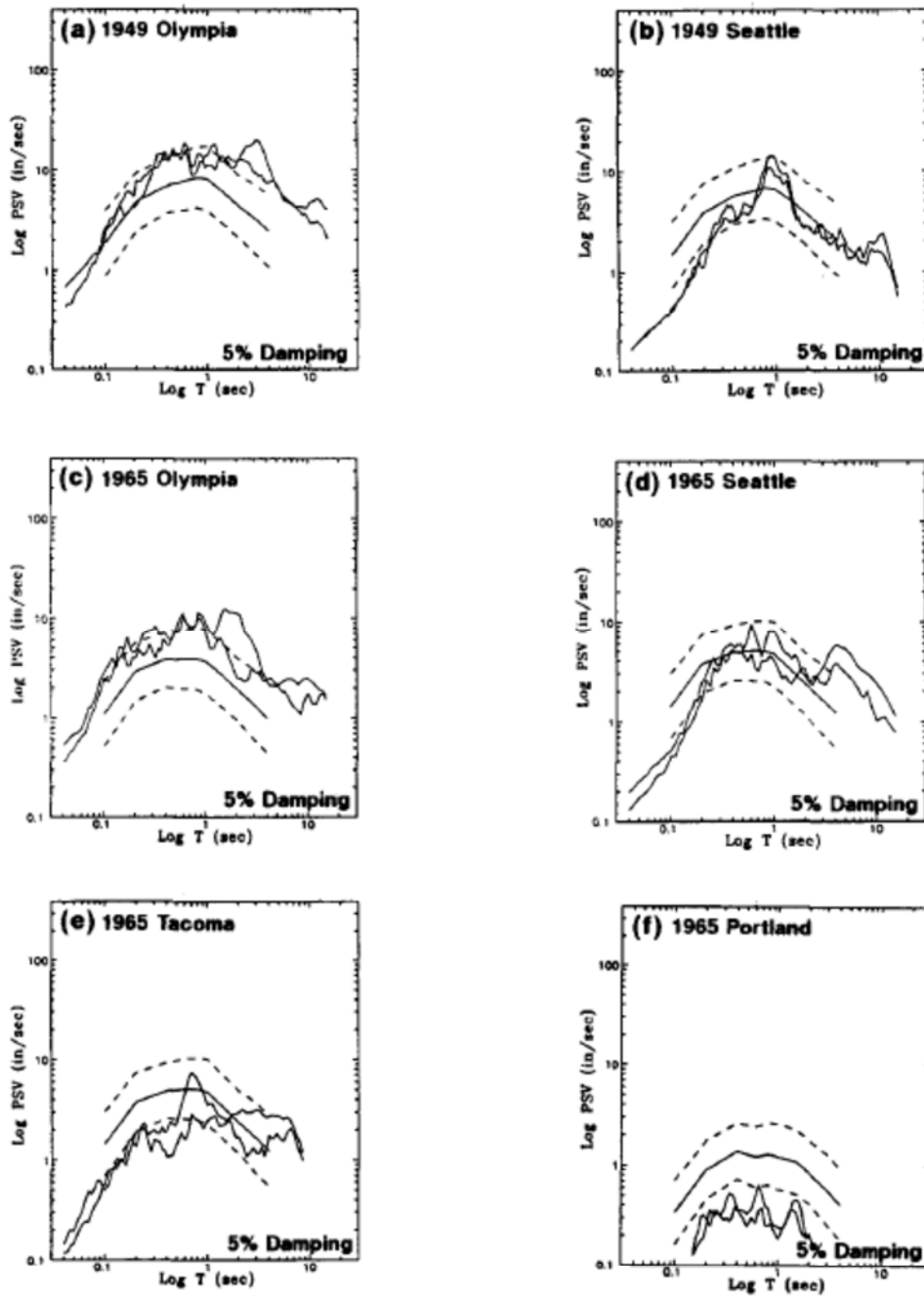


Figure 26. Comparison of median (solid line) and median $\pm 1\sigma$ (dashed lines) PSV spectra estimated from attenuation equations in Table 2 versus horizontal PSV spectra for following Pacific Northwest accelerogram data: (a) 1949 Olympia, (b) 1949 Seattle, (c) 1965 Olympia, (d) 1965 Seattle, (e) 1965 Tacoma, and (f) 1965 Portland.

図2.2.1-1 Crouse (1991) によるプレート間地震のGMPEと観測記録との比較

(2) Youngs *et al.* (1997)

Youngs *et al.* (1997) は、モーメントマグニチュードが5以上で、震源距離が10～500kmのプレート間地震とスラブ内地震の最大加速度と加速度応答スペクトルのGMPEを作成した。

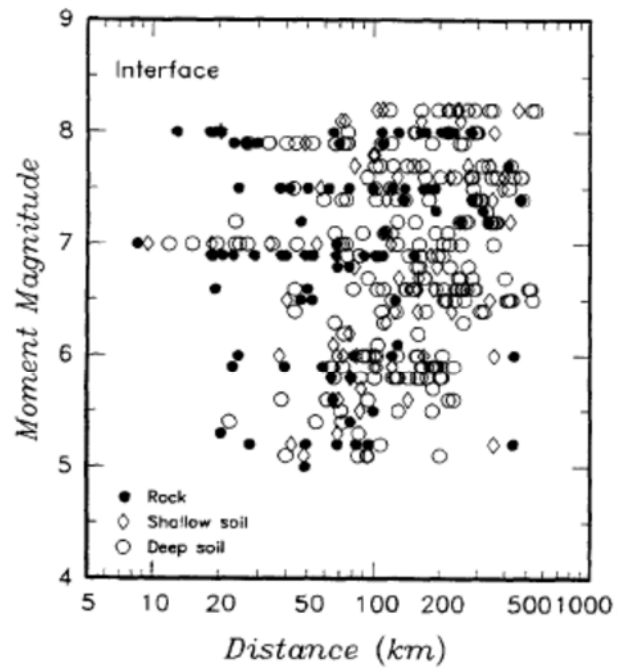
図2.2.1-2に、Youngs *et al.* (1997) がプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震のモーメントマグニチュードと震源距離との関係を示す。

Youngs *et al.* (1997) が用いたGMPEは、

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln(PGA)_{ij} = C_1^* + C_2 M_i + C_3^* \ln \left[(r_{rup})_{ij} + e^{\frac{C_4^* - C_2 M_i}{C_3^*}} \right] + C_5 Z_{ss} + C_8 Z_T + C_9 H_i + \eta_i + \varepsilon_{ij} \\ C_1^* = C_1 + C_3 C_4 - C_3^* C_4^* \\ C_3^* = C_3 + C_6 Z_s \\ C_4^* = C_4 + C_7 Z_s \\ \ln(SA/PGA)_{ij} = B_1 + B_2 (10 - M_i)^3 + B_3 \ln[(r_{rup})_{ij} + e^{\alpha_1 + \alpha_2 M_i}] \end{array} \right. \quad (2.2.1-2)$$

である。ここに、 i は地震番号、 j は観測点番号、 PGA は水平2成分の最大加速度の幾何平均（単位は g : 重力加速度）、 SA は加速度応答スペクトル、 M はモーメントマグニチュード、 r_{rup} は震源距離（単位はkm）、 H は震源深さ(単位はkm)、 $C_1 \sim C_9$ と $B_1 \sim B_3$ および $\alpha_1 \sim \alpha_2$ は回帰係数である。また、プレート間地震のとき $Z_T=0$ 、スラブ内地震のとき $Z_T=1$ である。

表2.2.1-3に、Youngs *et al.* (1997) が求めた沈み込み帯の地震のGMPEの回帰係数を示す。また、図2.2.1-3に、Youngs *et al.* (1997) によるプレート間地震のGMPEの例を示す。

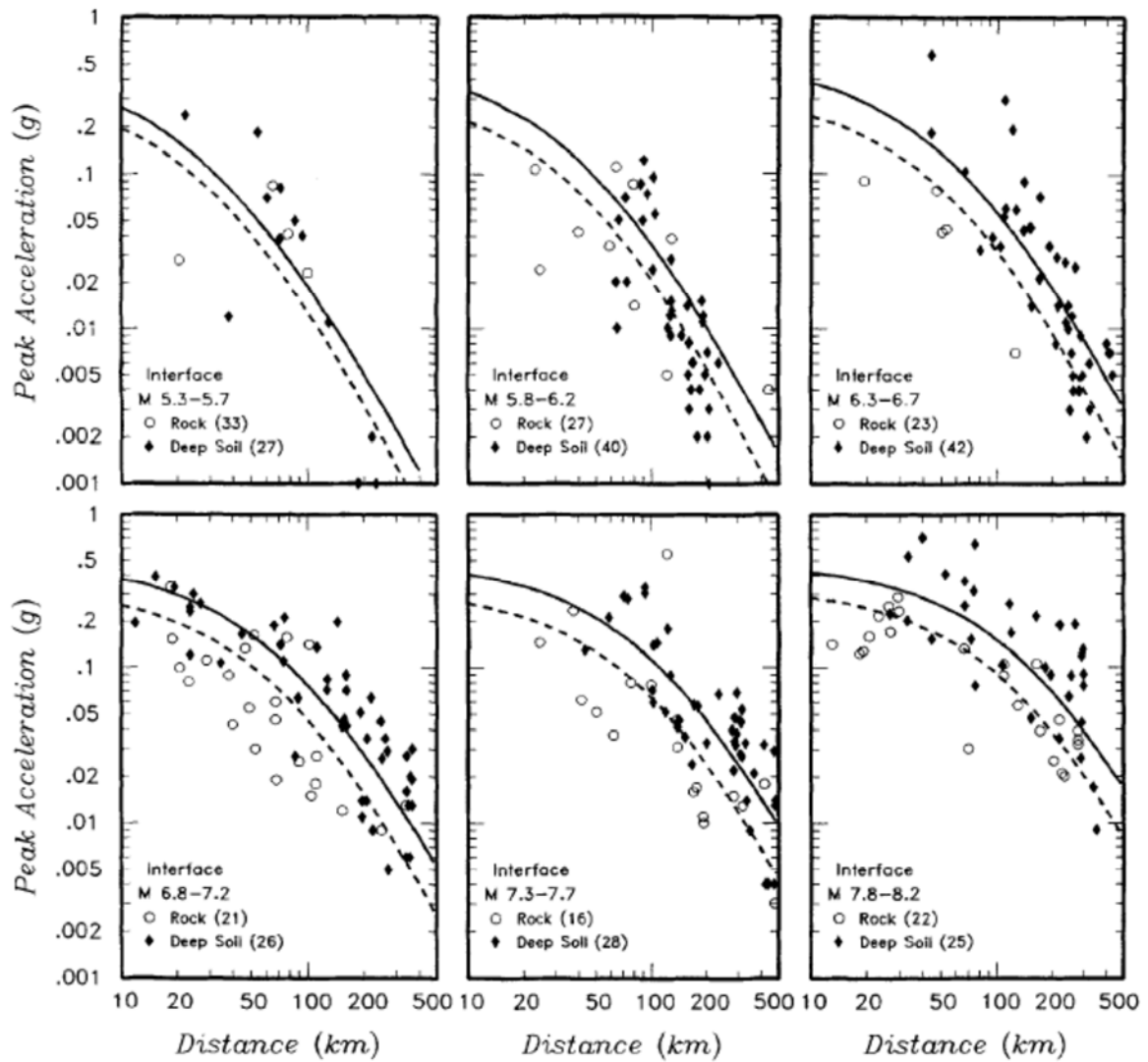


▲ Figure 1. Scattergram of subduction zone PGA data set.

図2.2.1-2 Youngs *et al.* (1997) がプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震のモーメントマグニチュードと震源距離との関係

表2.2.1-3 Youngs *et al.* (1997) が求めた沈み込み帯の地震のGMPEの回帰係数 ($Z_T=0$ はプレート間地震、 $Z_T=1$ はスラブ内地震)

TABLE 2 Attenuation Relationships for Horizontal Response Spectral Acceleration (5% Damping) for Subduction Earthquakes						
For Rock						
$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T$						
Standard Deviation = $C_4 + C_5M$						
Period(s)	C_1	C_2	C_3	C_4^*	C_5^*	
PGA	0.0	0.0	-2.552	1.45	-0.1	
0.075	1.275	0.0	-2.707	1.45	-0.1	
0.1	1.188	-0.0011	-2.655	1.45	-0.1	
0.2	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.1	
0.3	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.1	
0.4	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.1	
0.5	-0.400	-0.0048	-2.360	1.45	-0.1	
0.75	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.1	
1.0	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.1	
1.5	-2.634	-0.0073	-2.160	1.50	-0.1	
2.0	-3.328	-0.0080	-2.107	1.55	-0.1	
3.0	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1	
For Soil						
$\ln(y) = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(R + 1.097e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T$						
Standard Deviation = $C_4 + C_5M$						
Period(s)	C_1	C_2	C_3	C_4^*	C_5^*	
PGA	0.0	0.0	-2.329	1.45	-0.1	
0.075	2.400	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1	
0.1	2.516	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1	
0.2	1.549	-0.0019	-2.464	1.45	-0.1	
0.3	0.793	-0.0020	-2.327	1.45	-0.1	
0.4	0.144	-0.0020	-2.230	1.45	-0.1	
0.5	-0.438	-0.0035	-2.140	1.45	-0.1	
0.75	-1.704	-0.0048	-1.952	1.45	-0.1	
1.0	-2.870	-0.0066	-1.785	1.45	-0.1	
1.5	-5.101	-0.0114	-1.470	1.50	-0.1	
2.0	-6.433	-0.0164	-1.290	1.55	-0.1	
3.0	-6.672	-0.0221	-1.347	1.65	-0.1	
4.0	-7.618	-0.0235	-1.272	1.65	-0.1	
y = spectral acceleration in g M = moment magnitude r_{rup} = closest distance to rupture (km) H = depth (km) Z_T = source type, 0 for interface, 1 for intraslab * Standard deviation for magnitudes greater than M 8 set equal to the value for M 8						



▲ Figure 4. Comparison of PGA values predicted using attenuation models listed in Table 2 and the empirical data for interface earthquakes. Numbers in parentheses give the average depth of earthquakes in each data subset. The solid line is the attenuation relationship fit to deep soil site data and the dashed line is the relationship fit to the rock site data.

図2.2.1-3 Youngs *et al.* (1997) によるプレート間地震のGMPEの例

(3) Hong *et al.* (2009)

Hong *et al.* (2009) は、メキシコの沈み込み帯で発生した地震記録を用いて、プレート間地震のGMPEとスラブ内地震のGMPEを求めた。プレート間地震は40地震で、モーメントマグニチュードは5~8、震源深さは8~29km、記録数は418である。

Hong *et al.* (2009) が採用したプレート間地震のGMPEは、下のGarcia (2006) が用いた式である。

$$\log_{10} Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 R - c_4 \log_{10} (R + c_5 10^{c_6 M_w}) + c_7 H + \varepsilon \quad (2.2.1-3)$$

ここに、 Y (cm/s²) は、最大応答スペクトル $A_{\max R}(T_n)$ 、幾何平均応答スペクトル $A_{GM}(T_n)$ 、二乗和平方根応答スペクトル $A_{QM}(T_n)$ 、または最大加速度PGAで、 c_i ($i=1, \dots, 7$) は回帰係数、 M_w はモーメントマグニチュード、 R (km) は $M_w > 6.0$ のとき断層面までの最短距離で、それ以外の場合震源距離、 H (km) は震源深さ、 ε は標準偏差が σ の残差で、 σ_r を地震内の標準偏差、 σ_e を地震間の標準偏差として、 $\sigma = (\sigma_r^2 + \sigma_e^2)^{0.5}$ である。また、

$$c_4 = 1.82 - 0.16 M_w \quad (2.2.1-4)$$

である。

表2.2.1-4にHong *et al.* (2009) が求めたプレート間地震の最大応答スペクトル $A_{\max R}(T_n)$ のGMPEの回帰係数を、表2.2.1-5に幾何平均応答スペクトル $A_{GM}(T_n)$ のGMPEの回帰係数を、表2.2.1-6に二乗和平方根応答スペクトル $A_{QM}(T_n)$ のGMPEの回帰係数を示す。また、図2.2.1-4にHong *et al.* (2009) によるプレート間地震のGMPEの例を示す。

表2.2.1-4 Hong *et al.* (2009) が求めたプレート間地震の最大応答スペクトル $A_{\max R}(T_n)$ のGMPEの回帰係数

Table 3(a) Attenuation coefficients for the maximum resulting response (i.e., $A_{\max R}(T_n)$) considering the records of the interplate earthquakes (c_i is defined in Eq. (9))

T_n (s)	c_1	c_2	c_3	c_5	c_6	c_7	σ_s	σ_r	σ
0.10	3.128	0.096	-0.0045	0.0075	0.496	-0.0025	0.21	0.30	0.37
0.15	2.873	0.128	-0.0040	0.00825	0.4855	-0.0022	0.18	0.30	0.35
0.20	2.743	0.144	-0.0035	0.009	0.475	-0.0051	0.17	0.29	0.34
0.25	2.574	0.161	-0.0030	0.007	0.4835	-0.0066	0.16	0.28	0.33
0.30	2.395	0.179	-0.0027	0.005	0.492	-0.0070	0.16	0.28	0.33
0.40	1.961	0.218	-0.0021	0.004	0.504	-0.0048	0.18	0.29	0.34
0.50	1.655	0.247	-0.0016	0.003	0.515	-0.0041	0.17	0.29	0.33
0.60	1.403	0.270	-0.0013	0.002	0.527	-0.0041	0.17	0.29	0.33
0.70	1.168	0.290	-0.0011	0.002	0.512	-0.0034	0.16	0.29	0.33
0.80	1.118	0.287	-0.0008	0.002	0.504	-0.0044	0.15	0.28	0.32
0.90	0.986	0.299	-0.0007	0.002	0.507	-0.0050	0.15	0.28	0.32
1.00	0.828	0.310	-0.0006	0.002	0.509	-0.0045	0.15	0.28	0.32
1.10	0.735	0.313	-0.0005	0.002	0.507	-0.0045	0.16	0.27	0.32
1.20	0.629	0.323	-0.0004	0.002	0.504	-0.0052	0.16	0.27	0.31
1.30	0.528	0.332	-0.0004	0.002	0.501	-0.0059	0.16	0.28	0.32
1.40	0.413	0.340	-0.0004	0.002	0.498	-0.0054	0.16	0.27	0.32
1.50	0.289	0.349	-0.0004	0.002	0.495	-0.0045	0.17	0.27	0.32
1.60	0.158	0.365	-0.0004	0.002	0.494	-0.0047	0.17	0.26	0.31
1.70	0.031	0.383	-0.0004	0.002	0.493	-0.0055	0.16	0.26	0.30
1.80	-0.078	0.395	-0.0004	0.002	0.492	-0.0059	0.16	0.25	0.30
1.90	-0.142	0.398	-0.0003	0.002	0.49	-0.0059	0.17	0.25	0.30
2.00	-0.206	0.400	-0.0003	0.002	0.489	-0.0056	0.17	0.24	0.30
2.20	-0.386	0.420	-0.0004	0.002	0.4892	-0.0057	0.18	0.24	0.29
2.40	-0.527	0.433	-0.0004	0.002	0.4894	-0.0059	0.18	0.24	0.30
2.60	-0.604	0.436	-0.0004	0.002	0.4896	-0.0060	0.20	0.24	0.31
2.80	-0.692	0.440	-0.0004	0.002	0.4898	-0.0057	0.21	0.24	0.32
3.00	-0.802	0.445	-0.0004	0.002	0.49	-0.0046	0.22	0.24	0.33
PGA	2.594	0.112	-0.0037	0.0075	0.474	-0.0033	0.20	0.27	0.33

表2.2.1-5 Hong *et al.* (2009) が求めたプレート間地震の幾何平均応答スペクトル $A_{GM}(T_n)$ のGMPEの回帰係数

Table 4(a) Attenuation coefficients for the geometric mean (i.e., $A_{GM}(T_n)$) considering the records of the interplate earthquakes (c_i is defined in Eq. (9))

T_n (s)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_e	σ_r	σ_g	σ
0.10	3.040	0.091	-0.0045	0.0075	0.496	-0.0020	0.22	0.30	0.11	0.39	
0.15	2.769	0.126	-0.0040	0.00825	0.4855	-0.0017	0.19	0.30	0.11	0.37	
0.20	2.609	0.144	-0.0034	0.009	0.475	-0.0041	0.18	0.29	0.12	0.36	
0.25	2.419	0.161	-0.0030	0.007	0.4835	-0.0047	0.17	0.28	0.12	0.35	
0.30	2.256	0.178	-0.0026	0.005	0.492	-0.0058	0.17	0.29	0.12	0.36	
0.40	1.841	0.212	-0.0020	0.004	0.504	-0.0036	0.18	0.29	0.13	0.37	
0.50	1.542	0.238	-0.0015	0.003	0.515	-0.0030	0.17	0.29	0.13	0.36	
0.60	1.288	0.262	-0.0012	0.002	0.527	-0.0034	0.18	0.29	0.14	0.37	
0.70	1.058	0.282	-0.0009	0.002	0.512	-0.0029	0.17	0.29	0.14	0.36	
0.80	1.003	0.278	-0.0007	0.002	0.504	-0.0042	0.16	0.29	0.15	0.36	
0.90	0.866	0.291	-0.0006	0.002	0.507	-0.0048	0.16	0.29	0.15	0.36	
1.00	0.734	0.301	-0.0005	0.002	0.509	-0.0050	0.16	0.28	0.15	0.36	
1.10	0.616	0.308	-0.0004	0.002	0.507	-0.0047	0.16	0.28	0.15	0.36	
1.20	0.526	0.314	-0.0003	0.002	0.504	-0.0052	0.16	0.28	0.15	0.35	
1.30	0.424	0.323	-0.0003	0.002	0.501	-0.0058	0.16	0.28	0.15	0.36	
1.40	0.335	0.328	-0.0002	0.002	0.498	-0.0057	0.17	0.28	0.15	0.35	
1.50	0.214	0.336	-0.0002	0.002	0.495	-0.0049	0.17	0.27	0.15	0.35	
1.60	0.101	0.349	-0.0002	0.002	0.494	-0.0054	0.17	0.27	0.15	0.35	
1.70	-0.028	0.366	-0.0002	0.002	0.493	-0.0056	0.17	0.26	0.15	0.34	
1.80	-0.131	0.377	-0.0002	0.002	0.492	-0.0059	0.16	0.26	0.15	0.34	
1.90	-0.219	0.384	-0.0002	0.002	0.49	-0.0057	0.17	0.25	0.15	0.34	
2.00	-0.314	0.391	-0.0002	0.002	0.489	-0.0052	0.17	0.25	0.14	0.33	
2.20	-0.483	0.407	-0.0002	0.002	0.4892	-0.0053	0.18	0.24	0.15	0.33	
2.40	-0.610	0.419	-0.0003	0.002	0.4894	-0.0055	0.19	0.24	0.14	0.34	
2.60	-0.688	0.424	-0.0003	0.002	0.4896	-0.0059	0.20	0.24	0.14	0.34	
2.80	-0.773	0.428	-0.0003	0.002	0.4898	-0.0058	0.20	0.24	0.14	0.35	
3.00	-0.869	0.432	-0.0003	0.002	0.49	-0.0049	0.21	0.25	0.14	0.35	
PGA	2.545	0.108	-0.0037	0.0075	0.474	-0.0024	0.20	0.27	0.10	0.35	

表2.2.1-6 Hong *et al.* (2009) が求めたプレート間地震の二乗和平方根応答スペクトル $A_{QM}(T_n)$ のGMPEの回帰係数

Table 5(a) Attenuation coefficients for the quadratic mean (i.e., $A_{QM}(T_n)$) considering the records of the interplate earthquakes (c_i is defined in Eq. (9))

T_n (s)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	σ_e	σ_r	σ
0.10	3.027	0.098	-0.0045	0.0075	0.496	-0.0025	0.21	0.29	0.36	
0.30	2.259	0.184	-0.0026	0.005	0.492	-0.0067	0.17	0.28	0.33	
1.00	0.735	0.307	-0.0005	0.002	0.509	-0.0048	0.16	0.27	0.31	
3.00	-0.890	0.440	-0.0003	0.002	0.49	-0.0046	0.21	0.24	0.32	

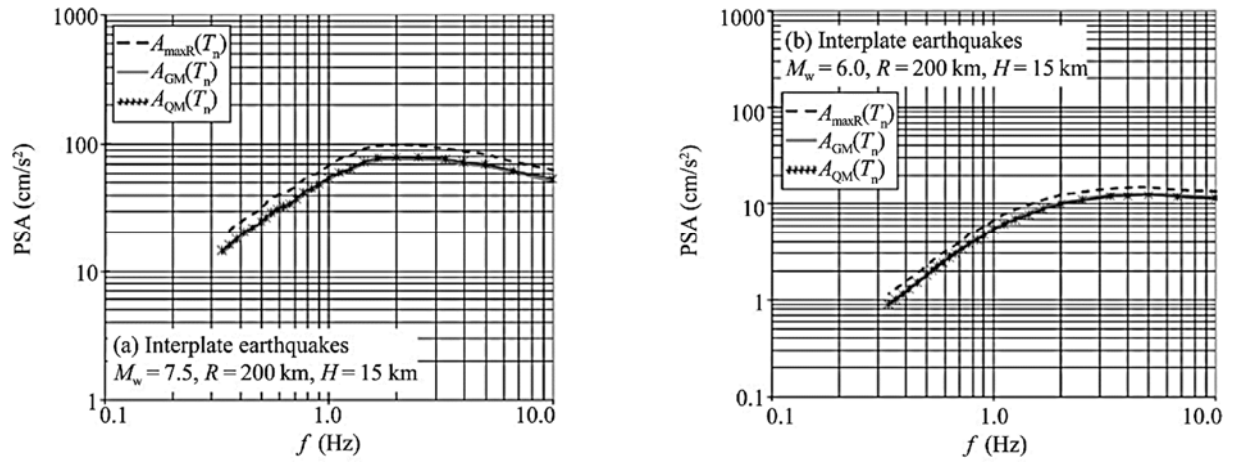


Fig. 10 Comparison of the attenuation relations

図2.2.1-4 Hong *et al.* (2009) によるプレート間地震のGMPEの例

(4) Arroyo *et al.* (2010)

Arroyo *et al.* (2010) は、Garcia *et al.* (2009) によるメキシコのプレート間地震の記録 (1985年～2004年に発生したモーメントマグニチュード5.0以上の地震による記録) を用いて、最大加速度と加速度応答スペクトルのGMPEを作成した。

図2.2.1-5に、Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震の震央 (○印) と観測点 (▲印) を、図2.2.1-6に、地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離を示す。

Arroyo *et al.* (2010) が用いたGMPEは、

$$SA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M_W + \alpha_3(T) \ln \left[\frac{E_1(\alpha_4(T)R) - E_1(\alpha_4(T)\sqrt{R^2 + r_0^2})}{r_0^2} \right] \quad (2.2.1-5)$$

である。ここに、 $\alpha_i(T)$ は回帰係数、 M_W はモーメントマグニチュード、 R は断層面までの最短距離、 r_0 は

$$r_0^2 = 1.4447 \times 10^{-5} e^{2.3026M_W} \quad (2.2.1-6)$$

である。

表2.2.1-7に、Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数を示す。また、図2.2.1-7に、Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例を示す。

Fig. 1 Map of central Mexico showing epicenters (circles) and stations (triangles) used in this study. Filled symbols represent strong-motion stations (accelerographs) and open symbols represent broadband stations. The grey square represents ACAP station (see text). MVB Mexican Volcanic Belt (shaded grey). MAT Middle American Trench. States mentioned in the text are labeled

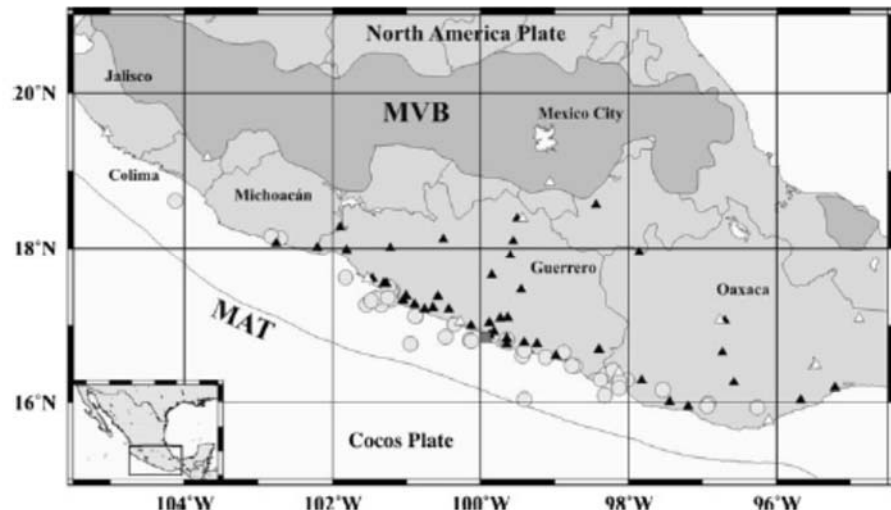


図2.2.1-5 Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震の震央 (○印) と観測点 (▲印)

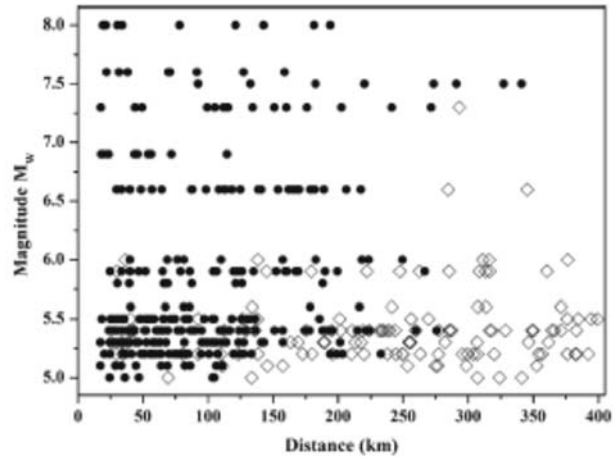


Fig. 2 Magnitude versus distance plot summarizing the data used in this study. Symbols indicate the type of data available. Circles accelerograms, open diamonds broadband velocity data

図2.2.1-6 Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離

表2.2.1-7 Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数

Table 2 Regression parameters of the proposed strong ground-motion model

T (s)	$\alpha_1(T)$	$\alpha_2(T)$	$\alpha_3(T)$	$\alpha_4(T)$	γ_e	b	σ	σ_e	σ_r
PGA	2.4862	0.9392	0.5061	0.0150	0.3850	-0.0181	0.7500	0.4654	0.5882
0.040	3.8123	0.8636	0.5578	0.0150	0.3962	-0.0254	0.8228	0.5179	0.6394
0.045	4.0440	0.8489	0.5645	0.0150	0.3874	-0.0285	0.8429	0.5246	0.6597
0.050	4.1429	0.8580	0.5725	0.0150	0.3731	-0.0181	0.8512	0.5199	0.6740
0.055	4.3092	0.8424	0.5765	0.0150	0.3746	0.0004	0.8583	0.5253	0.6788
0.060	4.3770	0.8458	0.5798	0.0150	0.4192	-0.0120	0.8591	0.5563	0.6547
0.065	4.5185	0.8273	0.5796	0.0150	0.3888	-0.0226	0.8452	0.5270	0.6607
0.070	4.4591	0.8394	0.5762	0.0150	0.3872	-0.0346	0.8423	0.5241	0.6594
0.075	4.5939	0.8313	0.5804	0.0150	0.3775	-0.0241	0.8473	0.5205	0.6685
0.080	4.4832	0.8541	0.5792	0.0150	0.3737	-0.0241	0.8421	0.5148	0.6664
0.085	4.5062	0.8481	0.5771	0.0150	0.3757	-0.0138	0.8344	0.5115	0.6593
0.090	4.4648	0.8536	0.5742	0.0150	0.4031	-0.0248	0.8304	0.5273	0.6415
0.095	4.3940	0.8580	0.5712	0.0150	0.4097	0.0040	0.8294	0.5309	0.6373
0.100	4.3391	0.8620	0.5666	0.0150	0.3841	-0.0045	0.8254	0.5116	0.6477
0.120	4.0505	0.8933	0.5546	0.0150	0.3589	-0.0202	0.7960	0.4768	0.6374
0.140	3.5599	0.9379	0.5350	0.0150	0.3528	-0.0293	0.7828	0.4650	0.6298
0.160	3.1311	0.9736	0.5175	0.0150	0.3324	-0.0246	0.7845	0.4523	0.6409
0.180	2.7012	1.0030	0.4985	0.0150	0.3291	-0.0196	0.7717	0.4427	0.6321
0.200	2.5485	0.9988	0.4850	0.0150	0.3439	-0.0250	0.7551	0.4428	0.6116
0.220	2.2699	1.0125	0.4710	0.0150	0.3240	-0.0205	0.7431	0.4229	0.6109
0.240	1.9130	1.0450	0.4591	0.0150	0.3285	-0.0246	0.7369	0.4223	0.6039
0.260	1.7181	1.0418	0.4450	0.0150	0.3595	-0.0220	0.7264	0.4356	0.5814
0.280	1.4039	1.0782	0.4391	0.0150	0.3381	-0.0260	0.7209	0.4191	0.5865
0.300	1.1080	1.1038	0.4287	0.0150	0.3537	-0.0368	0.7198	0.4281	0.5787
0.320	1.0652	1.0868	0.4208	0.0150	0.3702	-0.0345	0.7206	0.4384	0.5719
0.340	0.8319	1.1088	0.4142	0.0150	0.3423	-0.0381	0.7264	0.4250	0.5891
0.360	0.4965	1.1408	0.4044	0.0150	0.3591	-0.0383	0.7255	0.4348	0.5808
0.380	0.3173	1.1388	0.3930	0.0150	0.3673	-0.0264	0.7292	0.4419	0.5800
0.400	0.2735	1.1533	0.4067	0.0134	0.3956	-0.0317	0.7272	0.4574	0.5653
0.450	0.0990	1.1662	0.4127	0.0117	0.3466	-0.0267	0.7216	0.4249	0.5833
0.500	-0.0379	1.2206	0.4523	0.0084	0.3519	-0.0338	0.7189	0.4265	0.5788
0.550	-0.3512	1.2445	0.4493	0.0076	0.3529	-0.0298	0.7095	0.4215	0.5707
0.600	-0.6897	1.2522	0.4421	0.0067	0.3691	-0.0127	0.7084	0.4304	0.5627
0.650	-0.6673	1.2995	0.4785	0.0051	0.3361	-0.0192	0.7065	0.4096	0.5756
0.700	-0.7154	1.3263	0.5068	0.0034	0.3200	-0.0243	0.7070	0.3999	0.5830
0.750	-0.7015	1.2994	0.5056	0.0029	0.3364	-0.0122	0.7092	0.4113	0.5778
0.800	-0.8581	1.3205	0.5103	0.0023	0.3164	-0.0337	0.6974	0.3923	0.5766
0.850	-0.9712	1.3375	0.5201	0.0018	0.3435	-0.0244	0.6906	0.4047	0.5596
0.900	-1.0970	1.3532	0.5278	0.0012	0.3306	-0.0275	0.6923	0.3980	0.5665
0.950	-1.2346	1.3687	0.5345	0.0007	0.3264	-0.0306	0.6863	0.3921	0.5632
1.000	-1.2600	1.3652	0.5426	0.0001	0.3194	-0.0183	0.6798	0.3842	0.5608
1.100	-1.7687	1.4146	0.5342	0.0001	0.3336	-0.0229	0.6701	0.3871	0.5471
1.200	-2.1339	1.4417	0.5263	0.0001	0.3445	-0.0232	0.6697	0.3931	0.5422
1.300	-2.4122	1.4577	0.5201	0.0001	0.3355	-0.0231	0.6801	0.3939	0.5544
1.400	-2.5442	1.4618	0.5242	0.0001	0.3759	-0.0039	0.6763	0.4146	0.5343
1.500	-2.8509	1.4920	0.5220	0.0001	0.3780	-0.0122	0.6765	0.4159	0.5335
1.600	-3.0887	1.5157	0.5215	0.0001	0.3937	-0.0204	0.6674	0.4187	0.5197
1.700	-3.4884	1.5750	0.5261	0.0001	0.4130	-0.0208	0.6480	0.4164	0.4965
1.800	-3.7195	1.5966	0.5255	0.0001	0.3967	-0.0196	0.6327	0.3985	0.4914

Table 2 (continued)

T (s)	$\alpha_1(T)$	$\alpha_2(T)$	$\alpha_3(T)$	$\alpha_4(T)$	γ_e	b	σ	σ_e	σ_r
1.900	-4.0141	1.6162	0.5187	0.0001	0.4248	-0.0107	0.6231	0.4062	0.4726
2.000	-4.1908	1.6314	0.5199	0.0001	0.3967	-0.0133	0.6078	0.3828	0.4721
2.500	-5.1104	1.7269	0.5277	0.0001	0.4302	-0.0192	0.6001	0.3936	0.4530
3.000	-5.5926	1.7515	0.5298	0.0001	0.4735	-0.0319	0.6029	0.4148	0.4375
3.500	-6.1202	1.8077	0.5402	0.0001	0.4848	-0.0277	0.6137	0.4273	0.4405
4.000	-6.5318	1.8353	0.5394	0.0001	0.5020	-0.0368	0.6201	0.4393	0.4376
4.500	-6.9744	1.8685	0.5328	0.0001	0.5085	-0.0539	0.6419	0.4577	0.4500
5.000	-7.1389	1.8721	0.5376	0.0001	0.5592	-0.0534	0.6701	0.5011	0.4449

Fig. 10 Observed (*open circles*) and estimated SA (*curves; same symbols as in Fig. 9*) as a function of distance for the same periods as in Fig. 9 and magnitudes M_w 6.0 and 8.0

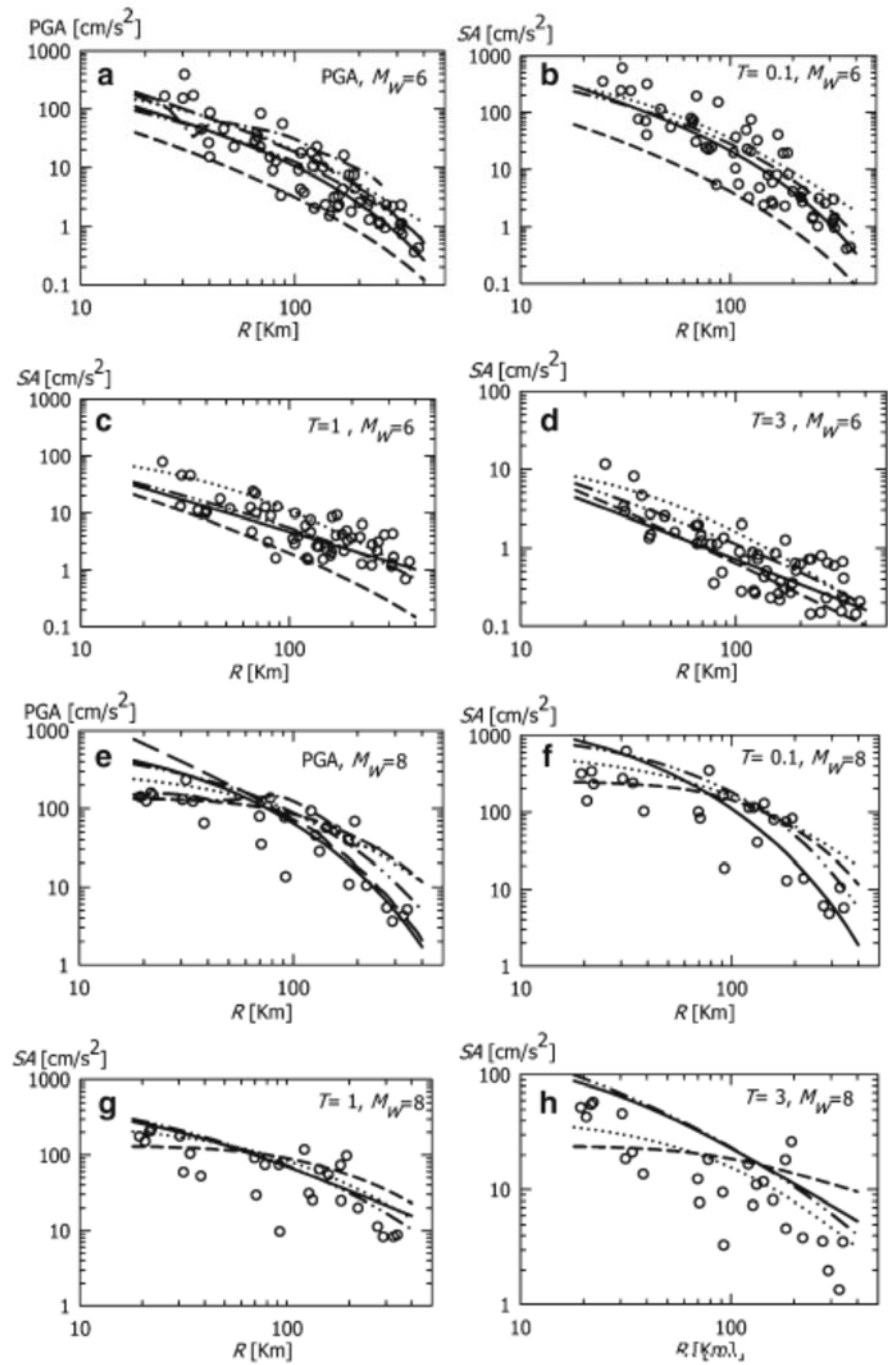


図2.2.1-7 Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例

(5) Contreras and Boroschek (2012)

Contreras and Boroschek (2012) は、2010年チリMaule地震 (Mw 8.8) を含む1985年～2010年にチリで発生したプレート間地震のGMPEを作成した。

図2.2.1-8に、Contreras and Boroschek (2012) がチリのプレート間地震のGMPEの作成に用いた地震の震央 (赤丸印) と観測点 (▲印) を、図2.2.1-9に、観測記録のモーメントマグニチュードと断層最短距離を示す。

Contreras and Boroschek (2012) が用いたGMPEは、

$$\log_{10}(Y) = C_1 + C_2 M_W + C_3 H + C_4 R - g \log_{10}(R) + C_5 Z \quad (2.2.1-7)$$

である。ここに、 Y は最大加速度 (PGA) もしくは加速度応答スペクトル (SA) である。いずれも水平2成分の幾何平均で単位は重力加速度である。 M_W はモーメントマグニチュード、 H は震源深さ (単位はkm)、 R は $R = \sqrt{R_{rup}^2 + \Delta^2}$ で R_{rup} は断層面までの最短距離 (単位はkm)、 Δ は震源近傍における頭打ちの項で $\Delta = C_6 10^{C_7 M_W}$ 、 g は幾何減衰項で $g = C_8 + C_9 M_W$ である。岩盤では $Z=0$ 、地盤では $Z=1$ である。 C_i ($i=1, \dots, 9$) は回帰係数である。

表2.2.1-8に、Contreras and Boroschek (2012) によるチリのプレート間地震のGMPEの回帰係数を、図2.2.1-10に、チリのプレート間地震のGMPEと観測記録の加速度応答スペクトルの比較を示す。

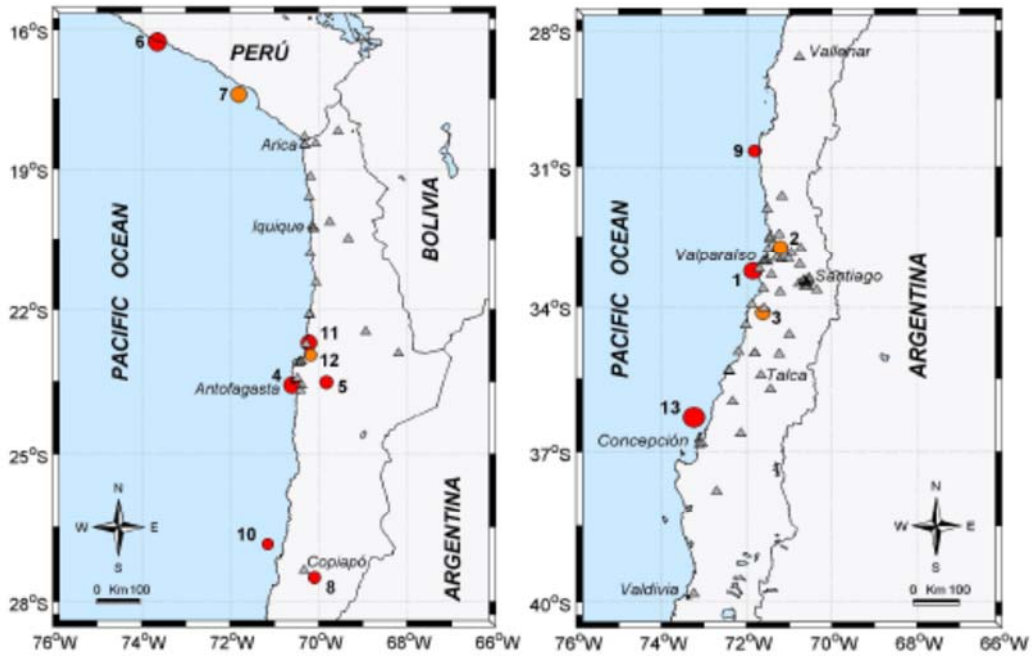


Figure 2.1. Map of north and central Chile showing epicenters (listed circles) of earthquakes used in this study. Red circles correspond to main events and orange circles correspond to aftershocks. The circles size is proportional to the Magnitud. Grey triangles represent the strong motion stations.

図2.2.1-8 Contreras and Boroschek (2012) がチリのプレート間地震のGMPEの作成に用いた地震の震央 (赤丸印) と観測点 (▲印)

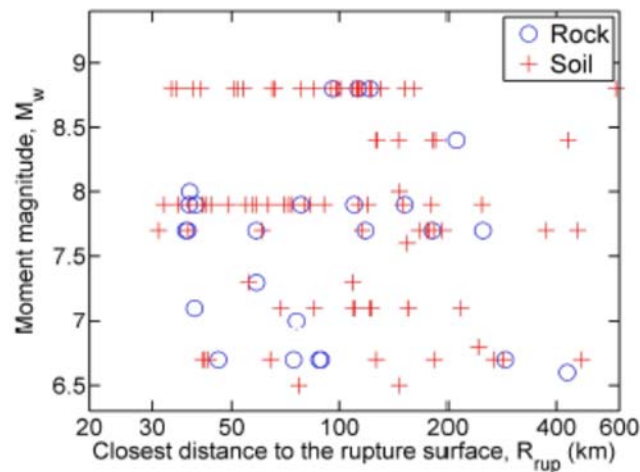


Figure 2.2. Distribution of the data for interface earthquakes used in this study.

図2.2.1-9 Contreras and Boroschek (2012) がチリのプレート間地震のGMPEの作成に用いた観測記録のモーメントマグニチュードと断層最短距離

表2.2.1-8 Contreras and Borosc hek (2012) によるチリのプレート間地震のGMPEの回帰係数

Table 4.1. Regression coefficients dependent of period and standard deviations of the residuals

Period (sec)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	σ
PGA	-1.8559	0.2549	0.0111	-0.0013	0.3061	0.2137
0.04	-1.7342	0.2567	0.0111	-0.0016	0.2865	0.2311
0.10	-1.4240	0.2597	0.0081	-0.0019	0.2766	0.2557
0.15	-1.1244	0.2373	0.0062	-0.0017	0.2811	0.2594
0.20	-1.0028	0.2375	0.0023	-0.0014	0.2699	0.2469
0.25	-1.0232	0.2405	0.0014	-0.0011	0.2690	0.2349
0.30	-1.2836	0.2519	0.0044	-0.0009	0.2977	0.2434
0.35	-1.2239	0.2430	0.0031	-0.0007	0.3097	0.2495
0.40	-1.4161	0.2568	0.0049	-0.0008	0.3150	0.2414
0.45	-1.8610	0.2943	0.0084	-0.0008	0.3093	0.2322
0.50	-2.1228	0.3208	0.0094	-0.0008	0.2834	0.2272
0.60	-2.7134	0.3668	0.0141	-0.0008	0.2824	0.2174
0.70	-2.9001	0.3795	0.0152	-0.0009	0.2969	0.2221
0.80	-3.0909	0.4005	0.0147	-0.0009	0.2834	0.2279
0.90	-3.1439	0.3952	0.0163	-0.0010	0.2730	0.2260
1.00	-3.3352	0.4013	0.0186	-0.0010	0.2839	0.2351
1.10	-3.5092	0.4093	0.0202	-0.0011	0.2849	0.2379
1.20	-3.5599	0.4079	0.0211	-0.0011	0.2700	0.2374
1.30	-3.6365	0.4090	0.0218	-0.0010	0.2631	0.2429
1.40	-3.7061	0.4096	0.0225	-0.0010	0.2555	0.2425
1.50	-3.7750	0.4089	0.0228	-0.0010	0.2528	0.2459
1.60	-3.7924	0.4047	0.0226	-0.0009	0.2406	0.2483
1.70	-3.8670	0.4045	0.0234	-0.0008	0.2355	0.2498
2.00	-3.9051	0.4079	0.0215	-0.0008	0.2057	0.2592

The coefficients associated to the near-source saturation term were fixed for all periods as $C_6 = 0.0734$ and $C_7 = 0.3552$. The coefficients associated to the geometrical spreading term were fixed for all periods as $C_8 = 1.5149$ and $C_9 = -0.103$.

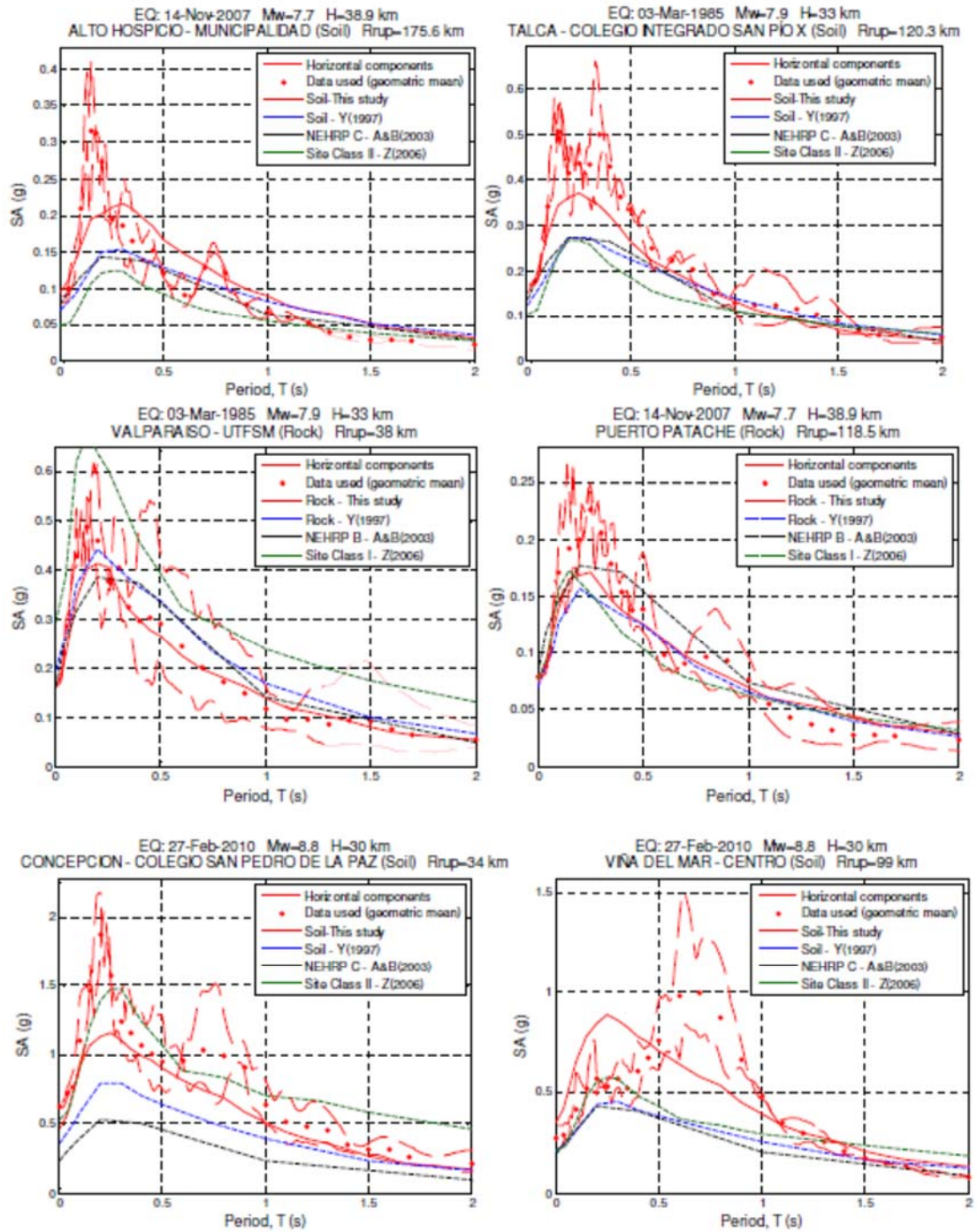


Figure 4.5. Comparison of observed response spectra versus predicted response spectra.

図2.2.1-10 Contreras and Boroschek (2012) によるチリのプレート間地震のGMPEと観測記録の加速度応答スペクトルの比較

(6) Rodriguez-Perez (2014)

Rodriguez-Perez (2014) は、メキシコのプレート間地震 (モーメントマグニチュード5.1～8.0、震源深さ6～20km、8地震) と正断層で起ったスラブ内地震 (モーメントマグニチュード5.0～7.2、震源深さ32.2～198km、25地震) の観測記録を用いて、GMPEを作成した。

図2.2.1-11に、Rodriguez-Perez (2014) がメキシコのプレート間地震のGMPEの作成に用いた震央位置と観測点を、図2.2.1-12に地震記録のマグニチュードと距離を示す。

Rodriguez-Perez (2014) が採用した式はGarcia *et al.* (2005) による下式である。

$$\log Y = c_1 + c_2 M_W + c_3 H + c_4 R - c_5 \log R + \sigma \quad (2.2.1-8)$$

ここに、 Y は最大速度 (cm/s)、最大加速度 (cm/s²)、または擬似加速度応答スペクトル (cm/s²) で水平2成分の二乗和平方根である。 H は震源深さ (km)、 R は断層面までの平均距離 (km) で $R=(D_{\text{fault}}^2+\Delta^2)^{0.5}$ で定義される (Atkinson and Boore, 2003)。 $M_W \geq 6.5$ のとき、 D_{fault} は断層面までの最短距離、それ以外るとき震源距離である。 Δ はAtkinson and Boore (2003) により定義された震源近傍における頭打ち項で、 $\Delta=0.00750 \times 10^{0.507} M_W$ である。また、 c_i は回帰係数、 σ は残差の標準偏差で、地震内の偏差を σ_r 、地震間の偏差を σ_e とすると $\sigma=(\sigma_r^2+\sigma_e^2)^{0.5}$ と表される。

表2.2.1-9に、Rodriguez-Perez (2014) が求めたメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数を示す。また、図2.2.1-13に、Rodriguez-Perez (2014) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例 (破線はArroyo *et al.*, 2010によるGMPE) を示す。

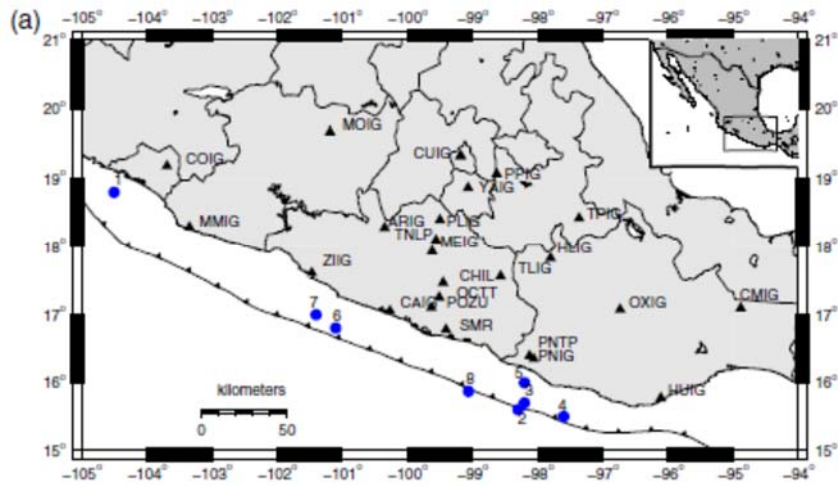


図2.2.1-11 Rodriguez-Perez (2014) がメキシコのプレート間地震のGMPEの作成に用いた震央位置と観測点

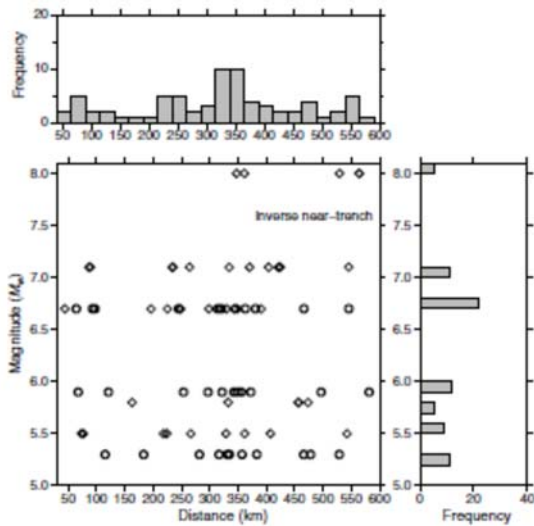


Figure 2. Magnitude-distance data distribution for near-trench high-frequency-depleted interplate events in central Mexico. Open circles, acceleration records; diamonds, broadband velocity records.

図2.2.1-12 Rodriguez-Perez (2014) がメキシコのプレート間地震のGMPEの作成に用いた地震記録のマグニチュードと距離

表2.2.1-9 Rodriguez-Perez (2014) が求めたメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数

Table 3

Regression Coefficients of the Ground-Motion Relations for Near-Trench Events in Central Mexico

f (Hz)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	σ	σ_r	σ_e
0.20	-2.7903	0.5844	-0.0050	0.0008	0.7850	0.34	0.32	0.11
0.25	-2.9584	0.6062	0.0022	0.0006	0.7369	0.32	0.30	0.10
0.33	-2.9877	0.5947	0.0091	0.0006	0.6287	0.33	0.31	0.10
0.50	-2.8916	0.5682	0.0156	0.0006	0.5917	0.39	0.37	0.12
0.67	-2.6288	0.5439	0.0205	0.0005	0.5893	0.43	0.41	0.14
1.00	-2.4817	0.5389	0.0243	0.0002	0.5669	0.43	0.41	0.14
1.33	-2.1798	0.5307	0.0265	-0.0001	0.5815	0.42	0.40	0.13
2.00	-1.6906	0.5171	0.0270	-0.0002	0.7313	0.43	0.42	0.14
2.50	-1.1774	0.5092	0.0263	-0.0001	0.9831	0.43	0.41	0.14
3.33	-0.9550	0.5087	0.0243	-0.0001	1.1475	0.42	0.40	0.13
5.00	-0.7533	0.5129	0.0211	-0.0003	1.2962	0.42	0.40	0.13
10.00	-0.6695	0.5094	0.0178	-0.0005	1.3684	0.42	0.40	0.13
13.33	-0.6695	0.5019	0.0154	-0.0006	1.3555	0.42	0.40	0.13
20.00	-0.9193	0.4987	0.0153	-0.0006	1.2683	0.42	0.40	0.13
25.00	-1.2115	0.5050	0.0161	-0.0005	1.2079	0.41	0.39	0.13
PGA	-1.2324	0.5016	0.0141	-0.0006	0.9432	0.37	0.35	0.12
PGV	-3.3589	0.5817	0.0000	-0.0005	0.3860	0.26	0.24	0.08

The regression equation is $\log Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 H + c_4 R - c_5 \log R + \sigma$.

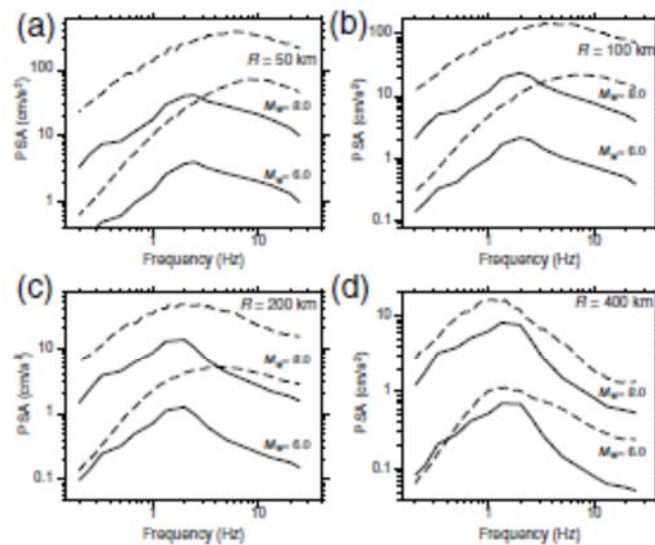


Figure 12. Predicted PSA response spectra for near-trench earthquakes of M_w 6.0 and 8.0 with $H = 15$ km, at the distances of (a) 50, (b) 100, (c) 200, and (d) 400 km. Dashed lines show predicted curves from Arroyo *et al.* (2010) for interplate events in central Mexico.

図2.2.1-13 Rodriguez-Perez (2014) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例 (破線は Arroyo *et al.*, 2010によるGMPE)

(7) Haendel *et al.* (2014)

Haendel *et al.* (2014) は、チリのプレート間地震とスラブ内地震の観測記録を用いてGMPEを作成した。

図2.2.1-14に、Haendel *et al.* (2014) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた観測記録のモーメントマグニチュードと距離を示す。

Haendel *et al.* (2014) が採用したGMPEは、

$$\ln Z = aM_W + br_{rup} - (c + dM_W) \ln r_{rup} + e \begin{cases} h, & h \leq 125 \text{ km} \\ 125, & h > 125 \text{ km} \end{cases} \quad (2.2.1-9)$$

$$+ \begin{cases} q_i(M_W - 6.3)^2 + s_i, & \text{Interface} \\ q_s(M_W - 6.5)^2 + s_s + s_{sl} \cdot \ln r_{rup}, & \text{Intraslab} \end{cases}$$

$$+ \begin{cases} x, & \text{NEHRP} \neq B \\ 0, & \text{NEHRP} = B \end{cases} + \epsilon + \eta$$

である。ここに、 Z は最大加速度PGA (cm/s^2)、 M_W はモーメントマグニチュード、 r_{rup} は断層までの距離、 h は震源深さ、 $a, b, c, d, e, q_i, q_s, s_i, s_s, s_{sl}$ および x は回帰係数、 i と s はそれぞれプレート間地震とスラブ内地震に関する添字、 s_{sl} はスラブ内地震のときに複雑な伝播経路を考慮するマグニチュードによらない項である。 x はNEHRPのサイトクラスの項、 ϵ は地震内の誤差、 η は地震間の誤差である。

回帰結果は論文にはなく、別途、インターネット上で公開されている。

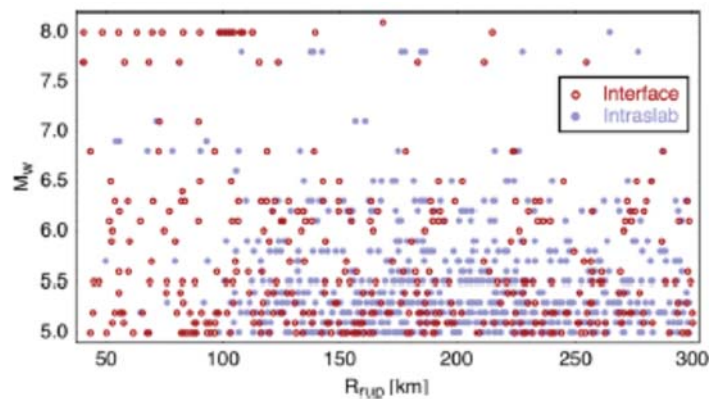


Fig. 2 Magnitude-distance distribution of the Chilean recordings

図2.2.1-14 Haendel *et al.* (2014) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた観測記録のモーメントマグニチュードと距離

(8) Abrahamson *et al.* (2016)

Abrahamson *et al.* (2016) は、63のスラブ内地震 ($5.0 \leq M \leq 7.9$) による2590の記録と、43のプレート間地震 ($6.0 \leq M \leq 8.4$) による953の記録を用いて、GMPEを作成した。距離は300 km以内で、モーメントマグニチュードが8を超えるとマグニチュードのスケールリングが変わることも考慮している。

図2.2.1-15に、Abrahamson *et al.* (2016) がプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの作成のために用いた記録のモーメントマグニチュードと距離を示す。

Abrahamson *et al.* (2016) が採用したGMPEは、

$$\ln(Sa_{interface}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{100}, V_{S30}) \quad (2.2.1-10)$$

$$\ln(Sa_{slab}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{hypo} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{hypo} + \theta_{10} F_{event} + f_{mag}(M) + f_{depth}(Z_h) + f_{FABA}(R_{hypo}) + f_{site}(PGA_{100}, V_{S30}) \quad (2.2.1-11)$$

である。ここに、

Sa : 加速度応答スペクトル (単位はg: 重力加速度)

M : モーメントマグニチュード

R_{rup} : 断層最短距離 (km)

R_{hypo} : 震源距離 (km)

Z_h : 震源深さ (km)

$$F_{event} = \begin{cases} 0 & \text{プレート間地震のとき} \\ 1 & \text{スラブ内地震のとき} \end{cases}$$

$$F_{FABA} = \begin{cases} 0 & \text{前弧もしくは不明のサイトのとき} \\ 1 & \text{背弧のサイトのとき} \end{cases}$$

である。また、マグニチュードの項は、

$$f_{mag}(M) = \begin{cases} \theta_4(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_3(10 - M)^2 & \text{for } M \leq C_1 + \Delta C_1 \\ \theta_5(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_3(10 - M)^2 & \text{for } M > C_1 + \Delta C_1 \end{cases} \quad (2.2.1-12)$$

である。ここに、 $C_1=7.8$ である。 ΔC_1 はマグニチュードのスケールリングが変わることを考慮する回帰係数で、はじめは0.0であるが、巨大地震の記録から、周期依存の値で表されることになった。震源深さの項は、

$$f_{depth}(Z_h) = \theta_{11}(\min(Z_h, 120) - 60)F_{event} \quad (2.2.1-13)$$

で、前弧/背弧の項は、

$$f_{FABA}(R) = \begin{cases} \left[\theta_7 + \theta_8 \text{Ln} \left(\frac{\max(R_{\text{hypo}}, 85)}{40} \right) \right] F_{FABA} & \text{For } F \text{ event} = 1 \\ \left[\theta_{15} + \theta_{16} \text{Ln} \left(\frac{\max(R_{\text{rup}}, 100)}{40} \right) \right] F_{FABA} & \text{For } F \text{ event} = 0 \end{cases} \quad (2.2.1-14)$$

である。サイト特性の項は、

$$f_{\text{site}}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \begin{cases} \theta_{12} \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) - b \text{Ln}(PGA_{1000} + c) + b \text{Ln} \left(PGA_{1000} + c \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right)^n \right) & \text{for } V_{S30} < V_{\text{lin}} \\ \theta_{12} \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) + b \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) & \text{for } V_{S30} \geq V_{\text{lin}} \end{cases} \quad (2.2.1-15)$$

である。ここに、 PGA_{1000} は $V_{S30}=1,000\text{m/s}$ のときの最大加速度PGAの中央値で、

$$V_S^* = \begin{cases} 1,000 & \text{for } V_{S30} > 1,000 \\ V_{S30} & \text{for } V_{S30} \leq 1,000 \end{cases} \quad (2.2.1-16)$$

である。

表2.2.1-10に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期によらない係数を、表2.2.1-11に、GMPEの回帰係数のうち周期による係数を示す。また、表2.2.1-12に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEで使
用が推奨されている回帰係数 ΔC_1 を、図2.2.1-16に、Abrahamson *et al.* (2016) により用い
ることが推奨されている回帰係数 ΔC_1 の影響を示す。

図2.2.1-17に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEの例を示す。

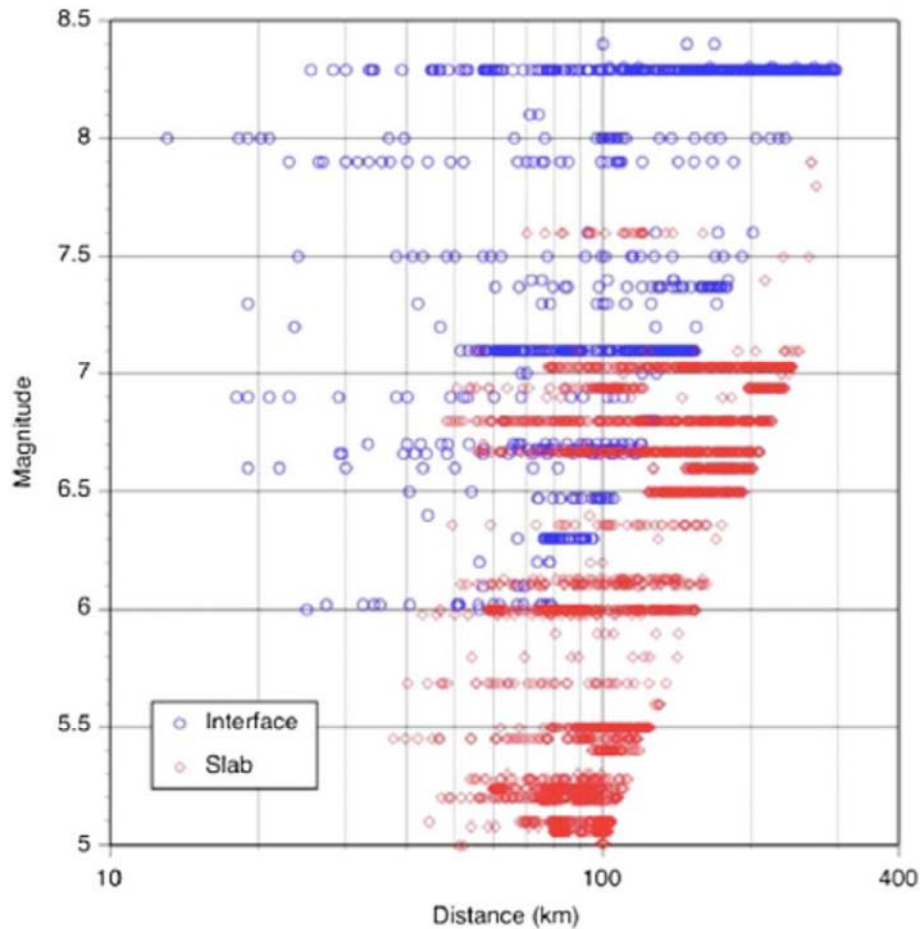


Figure 1. Distribution of magnitude and distance (interface events are plotted versus rupture distance; intraslab events, versus hypocentral distance) in the final data set used to develop the GMPE, prior to the 2010 Maule, Chile, and 2011 Tohoku, Japan, earthquakes.

図2.2.1-15 Abrahamson *et al.* (2016) がプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの作成のために用いた記録のモーメントマグニチュードと距離

表2.2.1-10 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期によらない係数

Table 2. Period-independent subduction model coefficients used in the regression analysis

Coefficient	Value over all periods
n	1.18
c	1.88
θ_3	0.1
θ_4	0.9
θ_5	0.0
θ_9	0.4
C_4	10

表2.2.1-11 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期による係数

Table 3. Regression coefficients for the median (g) subduction GMPE model

Period (s)	V_{bn}	b	θ_1	θ_2	θ_6	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	ϕ	τ	σ
0.000	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.020	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.050	1053.5	-1.346	4.5371	-1.400	-0.0012	1.2536	-1.65	3.37	0.0130	1.288	-0.0138	-0.40	1.1030	-1.18	0.60	0.43	0.74
0.075	1085.7	-1.471	5.0733	-1.450	-0.0012	1.4175	-1.80	3.37	0.0130	1.483	-0.0142	-0.40	1.2732	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.100	1032.5	-1.624	5.2892	-1.450	-0.0012	1.3997	-1.80	3.33	0.0130	1.613	-0.0145	-0.40	1.3042	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.150	877.6	-1.931	5.4563	-1.450	-0.0014	1.3582	-1.69	3.25	0.0130	1.882	-0.0153	-0.40	1.2600	-1.30	0.60	0.43	0.74
0.200	748.2	-2.188	5.2684	-1.400	-0.0018	1.1648	-1.49	3.03	0.0129	2.076	-0.0162	-0.35	1.2230	-1.25	0.60	0.43	0.74
0.250	654.3	-2.381	5.0594	-1.350	-0.0023	0.9940	-1.30	2.80	0.0129	2.248	-0.0172	-0.31	1.1600	-1.17	0.60	0.43	0.74
0.300	587.1	-2.518	4.7945	-1.280	-0.0027	0.8821	-1.18	2.59	0.0128	2.348	-0.0183	-0.28	1.0500	-1.06	0.60	0.43	0.74
0.400	503.0	-2.657	4.4644	-1.180	-0.0035	0.7046	-0.98	2.20	0.0127	2.427	-0.0206	-0.23	0.8000	-0.78	0.60	0.43	0.74
0.500	456.6	-2.669	4.0181	-1.080	-0.0044	0.5799	-0.82	1.92	0.0125	2.399	-0.0231	-0.19	0.6620	-0.62	0.60	0.43	0.74
0.600	430.3	-2.599	3.6055	-0.990	-0.0050	0.5021	-0.70	1.70	0.0124	2.273	-0.0256	-0.16	0.5800	-0.50	0.60	0.43	0.74
0.750	410.5	-2.401	3.2174	-0.910	-0.0058	0.3687	-0.54	1.42	0.0120	1.993	-0.0296	-0.12	0.4800	-0.34	0.60	0.43	0.74
1.000	400.0	-1.955	2.7981	-0.850	-0.0062	0.1746	-0.34	1.10	0.0114	1.470	-0.0363	-0.07	0.3300	-0.14	0.60	0.43	0.74
1.500	400.0	-1.025	2.0123	-0.770	-0.0064	-0.0820	-0.05	0.70	0.0100	0.408	-0.0493	0.00	0.3100	0.00	0.60	0.43	0.74
2.000	400.0	-0.299	1.4128	-0.710	-0.0064	-0.2821	0.12	0.70	0.0085	-0.401	-0.0610	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
2.500	400.0	0.000	0.9976	-0.670	-0.0064	-0.4108	0.25	0.70	0.0069	-0.723	-0.0711	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
3.000	400.0	0.000	0.6443	-0.640	-0.0064	-0.4466	0.30	0.70	0.0054	-0.673	-0.0798	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
4.000	400.0	0.000	0.0657	-0.580	-0.0064	-0.4344	0.30	0.70	0.0027	-0.627	-0.0935	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
5.000	400.0	0.000	-0.4624	-0.540	-0.0064	-0.4368	0.30	0.70	0.0005	-0.596	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
6.000	400.0	0.000	-0.9809	-0.500	-0.0064	-0.4586	0.30	0.70	-0.0013	-0.566	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
7.500	400.0	0.000	-1.6017	-0.460	-0.0064	-0.4433	0.30	0.70	-0.0033	-0.528	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
10.000	400.0	0.000	-2.2937	-0.400	-0.0064	-0.4828	0.30	0.70	-0.0060	-0.504	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74

表2.2.1-12 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEで使用が推奨されている回帰係数 ΔC_1

Table 4. Recommended period-dependent ΔC_1 Values for Interface earthquakes based on residual analysis of the Maule and Tohoku earthquakes with the GMPE model

Period (s)	Lower value ¹	Central value ¹	Upper value ¹
PGA	0.0	0.2	0.4
0.3	0.0	0.2	0.4
0.5	-0.1	0.1	0.3
1.0	-0.2	0.0	0.2
2.0	-0.3	-0.1	0.1
3.0-10.0	-0.4	-0.2	0.0

Note: Lower, central, and upper values are included to capture the model's epistemic uncertainty.

¹For intermediate spectral periods, values should be interpolated based on log-spectral periods and linear values.

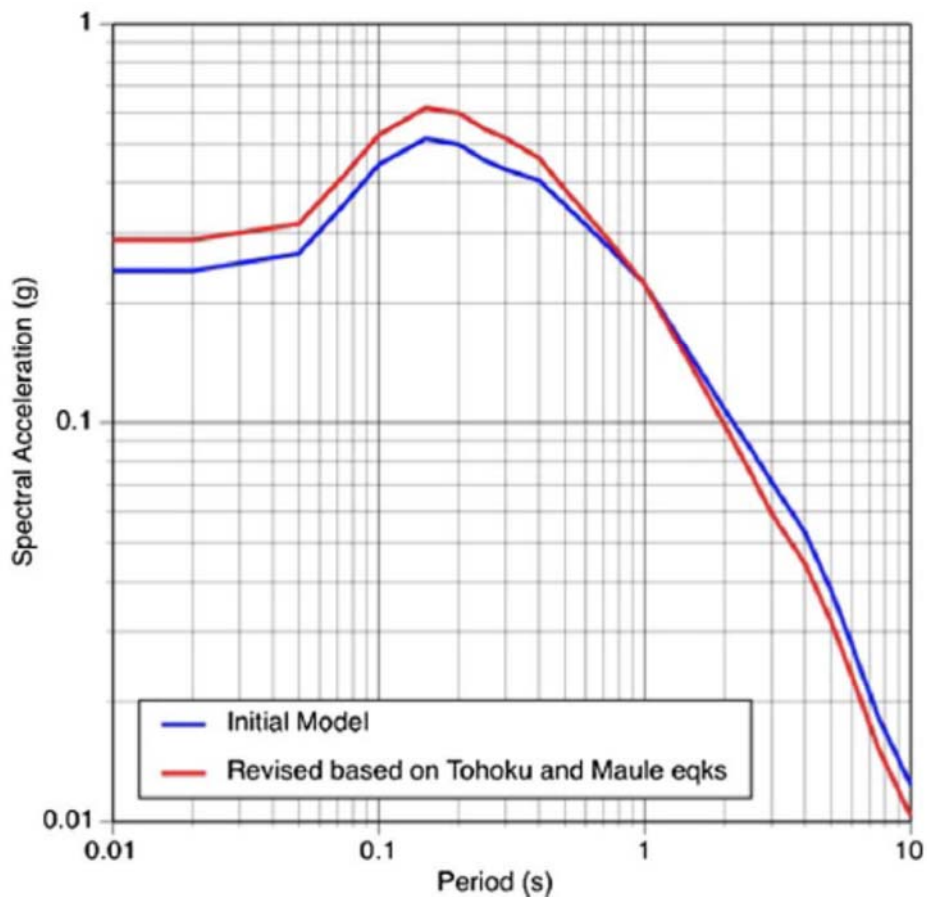


Figure 8. Effect of the recommended change (i.e., initial model versus revised model based on Tohoku and Maule earthquake data) in the ΔC_1 terms from Table 4.

図2.2.1-16 Abrahamson *et al.* (2016) により用いることが推奨されている回帰係数 ΔC_1 の影響

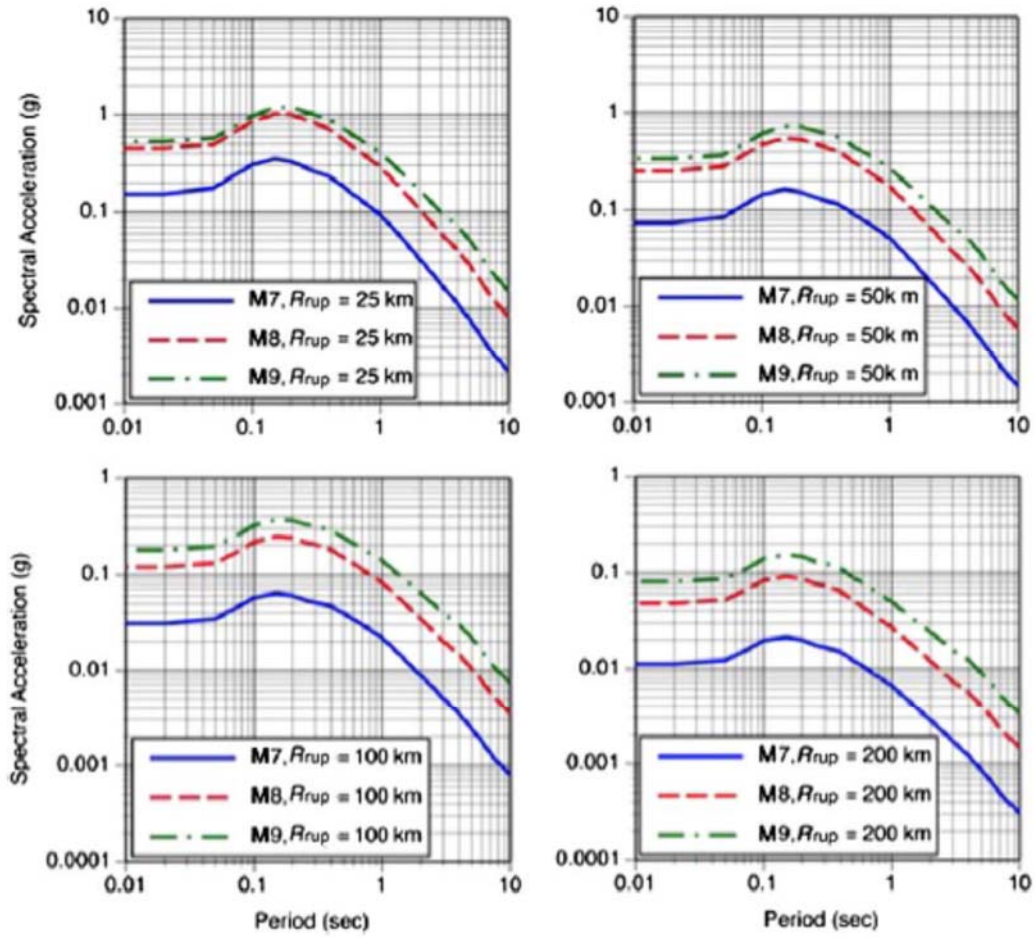


Figure 10. Examples of median spectra for interface earthquakes at sites with $V_{S30} = 760$ m/s located in the forearc region.

図2.2.1-17 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEの例

(9) Idini *et al.* (2017)

Idini *et al.* (2017) は、チリで発生した65のプレート間地震の369の観測記録および38のスラブ内地震の114の観測記録を用いてGMPEを作成した。

図2.2.1-18に、Idini *et al.* (2017) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた地震を示す。

Idini *et al.* (2017) が採用したGMPEは、

$$\log_{10} Y = F_F(M_w, H, F_{eve}) + F_D(R, M_w, F_{eve}) + F_S \quad (2.2.1-17)$$

である。ここに、 Y は最大加速度または加速度応答スペクトルで単位は g (重力加速度)、 F_F は震源項、 F_D は伝播特性、 F_S はサイト特性である。また、 M_w はモーメントマグニチュード、 H は震源深さ、 F_{eve} はプレート間地震のとき0でスラブ内地震のとき1、 R はスラブ内地震か $M_w < 7.7$ のプレート間地震のとき震源距離、 $M_w \geq 7.7$ のプレート間地震のとき断層最短距離である。

震源項 F_F は、

$$F_F(M_w, H, F_{eve}) = c_1 + c_2 M_w + c_8 (H - h_o) F_{eve} + \Delta f_M \quad (2.2.1-18)$$

である。ここに、

$$\Delta f_M = \begin{cases} c_9 M_w^2; & F_{eve} = 0 \\ \Delta c_1 + \Delta c_2 M_w; & F_{eve} = 1 \end{cases} \quad (2.2.1-19)$$

で、 $h_o = 50\text{km}$ である。また、 F_D は

$$F_D(R, M_w, F_{eve}) = g \log_{10}(R + R_o) + c_5 R \quad (2.2.1-20)$$

で、 $R_o = (1 - F_{eve}) c_6 \cdot 10^{c_7 [M_w - M_r]}$ 、 $g = (c_3 + c_4 [M_w - M_r] + \Delta c_3 F_{eve})$ 、 $M_r = 5$ である。 c_i ($i=1, 2, \dots, 9$) と Δc_j ($j=1, 2, 3$) は回帰係数である。

表2.2.1-13に、Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの第一段階の回帰係数を、表2.2.1-14に第二段階の回帰係数を示す。また、図2.2.1-19に、Idini *et al.* (2017) によるチリのプレート間地震のGMPEの例を示す。

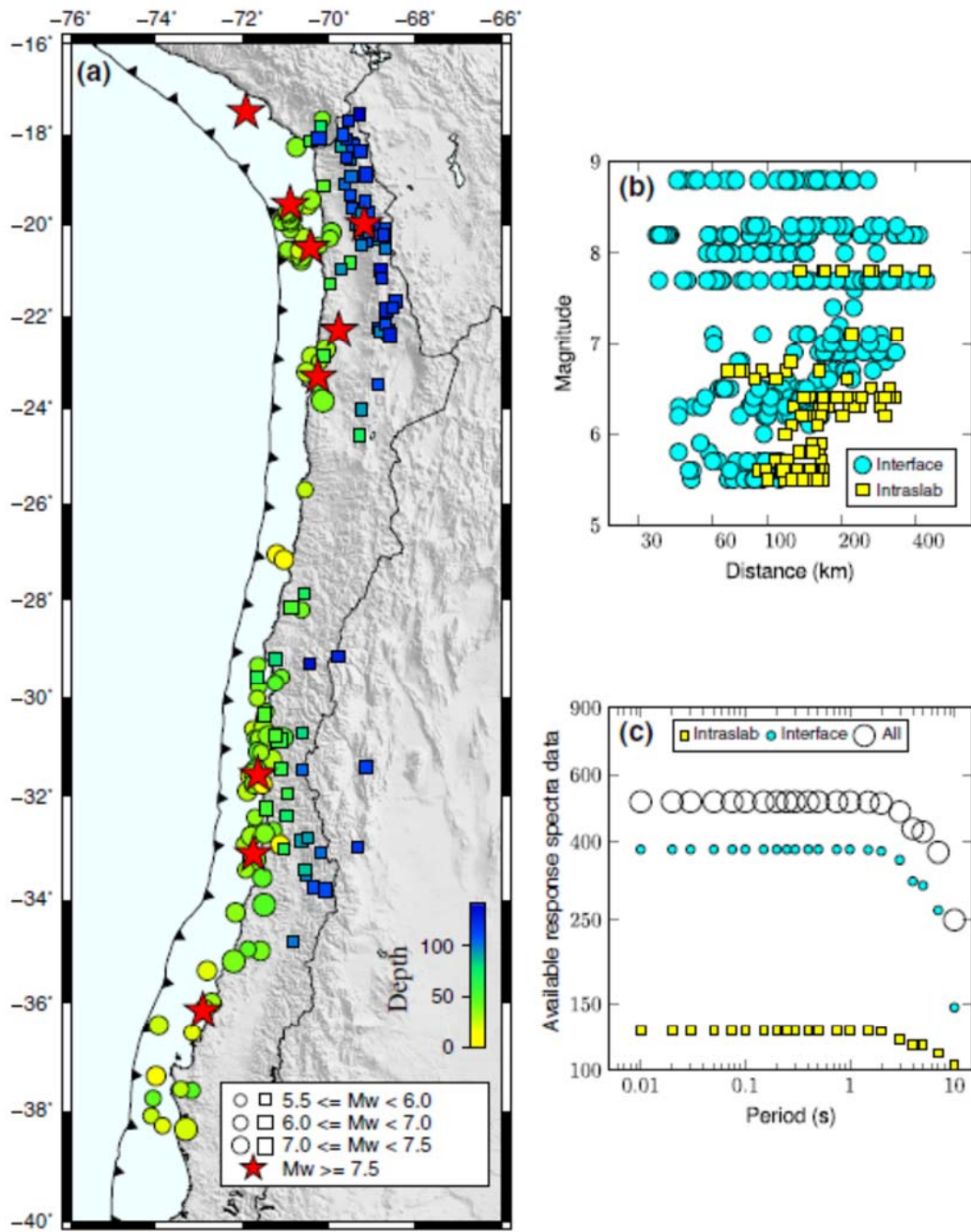


Fig. 1 The database used in this study. **a** Spatial distribution of the hypocenters. *Circles* indicate interface earthquakes and *squares* indicate intraslab earthquakes. **b** Magnitude versus distance of the data subset used in the GMPE derivation. **c** Total number of response spectra data used in the GMPE derivation at each period

図2.2.1-18 Idini *et al.* (2017) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた地震

表2.2.1-13 Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPE (第一
 段階) の回帰係数

Table 4 Standard deviation and coefficient results of the first stage of the regression methodology

Period (s)	c_3	c_5	Δc_3	σ_r
PGA	-0.97558	-0.00174	-0.52745	0.232
0.01	-1.02993	-0.00175	-0.50466	0.231
0.02	-1.08567	-0.00176	-0.48043	0.233
0.03	-1.15951	-0.00176	-0.42490	0.235
0.05	-1.28640	-0.00178	-0.31239	0.241
0.07	-1.34644	-0.00181	-0.17995	0.251
0.10	-1.32353	-0.00182	-0.13208	0.255
0.15	-1.17687	-0.00183	-0.26451	0.255
0.20	-1.04508	-0.00182	-0.39105	0.268
0.25	-0.94363	-0.00178	-0.34348	0.264
0.30	-0.84814	-0.00173	-0.36695	0.260
0.40	-0.69278	-0.00166	-0.46301	0.263
0.50	-0.57899	-0.00161	-0.54098	0.261
0.75	-0.56887	-0.00158	-0.46266	0.252
1.00	-0.53282	-0.00154	-0.42314	0.247
1.50	-0.46263	-0.00145	-0.58519	0.246
2.00	-0.40594	-0.00139	-0.65999	0.245
3.00	-0.33957	-0.00137	-0.79004	0.231
4.00	-0.26479	-0.00137	-0.86545	0.228
5.00	-0.22333	-0.00137	-0.88735	0.232
7.50	-0.30346	-0.00131	-0.91259	0.231
10.00	-0.33771	-0.00117	-0.96363	0.204

表2.2.1-14 Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPE (第二段階) の回帰係数

Table 5 Standard deviation and coefficient results of the second stage of the regression methodology

Period (s)	c_1	c_2	c_9	c_8	Δc_1	Δc_2	σ_e	σ_f
PGA	-2.8548	0.7741	-0.03958	0.00586	2.5699	-0.4761	0.172	0.289
0.01	-2.8424	0.8052	-0.04135	0.00584	2.7370	-0.5191	0.173	0.288
0.02	-2.8337	0.8383	-0.04325	0.00583	2.9087	-0.5640	0.176	0.292
0.03	-2.8235	0.8838	-0.04595	0.00586	3.0735	-0.6227	0.178	0.295
0.05	-2.7358	0.9539	-0.05033	0.00621	3.2147	-0.7079	0.190	0.307
0.07	-2.6004	0.9808	-0.05225	0.00603	3.0851	-0.7425	0.213	0.329
0.10	-2.4891	0.9544	-0.05060	0.00571	2.8091	-0.7055	0.195	0.321
0.15	-2.6505	0.9232	-0.04879	0.00560	2.6260	-0.6270	0.160	0.302
0.20	-3.0096	0.9426	-0.05034	0.00573	2.6063	-0.5976	0.157	0.310
0.25	-3.3321	0.9578	-0.05143	0.00507	2.3654	-0.5820	0.142	0.299
0.30	-3.5422	0.9441	-0.05052	0.00428	2.2017	-0.5412	0.141	0.296
0.40	-3.3985	0.7773	-0.03885	0.00308	1.6367	-0.3448	0.157	0.306
0.50	-2.8041	0.5069	-0.01973	0.00257	0.7621	-0.0617	0.152	0.302
0.75	-4.4588	0.8691	-0.04179	0.00135	2.1003	-0.4349	0.146	0.291
1.00	-5.3391	1.0167	-0.04999	0.00045	2.5610	-0.5678	0.153	0.290
1.50	-6.1204	1.1005	-0.05426	0.00068	2.8923	-0.5898	0.152	0.289
2.00	-7.0334	1.2501	-0.06356	0.00051	3.3941	-0.7009	0.157	0.291
3.00	-8.2507	1.4652	-0.07797	0.00066	4.0033	-0.8465	0.155	0.279
4.00	-8.7433	1.4827	-0.07863	0.00063	3.9337	-0.8134	0.160	0.279
5.00	-8.9927	1.4630	-0.07638	0.00067	3.7576	-0.7642	0.167	0.286
7.50	-9.8245	1.6383	-0.08620	0.00108	4.3948	-0.9313	0.164	0.283
10.00	-9.8671	1.5877	-0.08168	0.00014	4.3875	-0.8892	0.176	0.270

Global standard deviation is computed as $\sigma_f = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_r^2}$

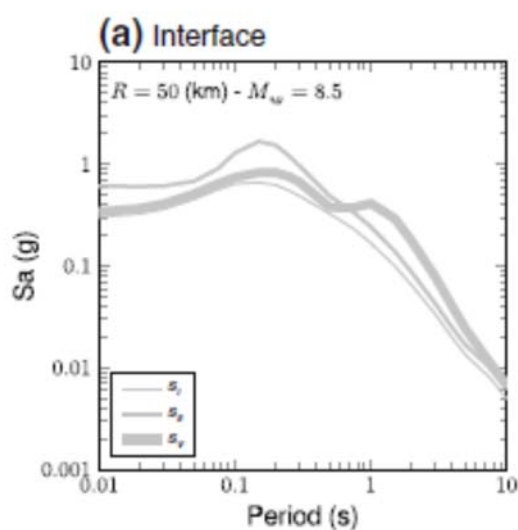


図2.2.1-19 Idini *et al.* (2017) によるチリのプレート間地震のGMPEの例

2.2.2 プレート間地震のスケーリング則の調査

(1) Kanamori and Anderson (1975)

Kanamori and Anderson (1975) は、プレート間地震とプレート内地震の断層パラメータのスケーリング則を調べた。

図2.2.2-1に、Kanamori and Anderson (1975) によるプレート間地震とプレート内地震の地震モーメントと断層面積との関係を示す。図より、断層面積の対数と地震モーメントの対数は顕著な線形関係（勾配はほぼ2/3）があり、円形クラックの式を適用すると、プレート間地震で応力降下量は30 bar、プレート内地震で100 barであることがわかる。

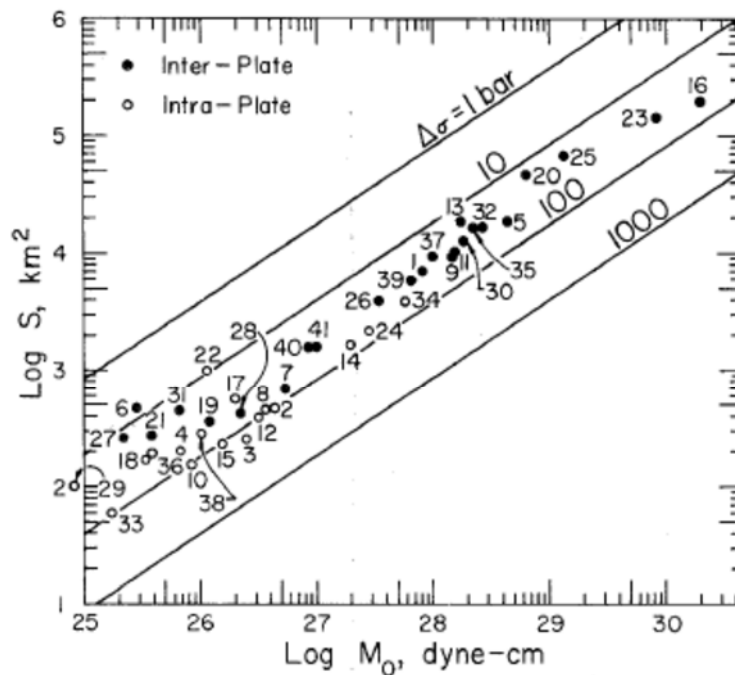


FIG. 2. Relation between S (fault surface area) and M_0 (seismic moment). The straight lines give the relations for circular cracks with constant $\Delta\sigma$ (stress drop). The numbers attached to each event correspond to those in Table 1.

図2.2.2-1 Kanamori and Anderson (1975) によるプレート間地震（黒丸）とプレート内地震（白丸）の地震モーメントと断層面積との関係

(2) Fujii and Matsu'ura (2000)

Fujii and Matsu'ura (2000) は、最近の140年間にプレート境界で発生した67の地震を4つのグループに分類した。この4つのグループとは、横ずれ断層によるプレート間地震、横ずれ断層によるプレート内地震、島弧の沈み込み帯で発生するプレート間地震、大陸の縁の沈み込み帯で発生するプレート間地震である。

図2.2.2-2に、Fujii and Matsu'ura (2000) がプレート間地震のスケーリング則を求めるために用いた地震の断層面積と地震モーメントとの関係を、表2.2.2-1にデータを、図2.2.2-3に地震の震央を示す。

図2.2.2-4に、Fujii and Matsu'ura (2000) による地震モーメントと断層長さとの関係を示す。(a)は島弧の沈み込み帯で発生するプレート間地震のもので、(b)は大陸の縁で発生するプレート間地震のものである。

図2.2.2-5に、Fujii and Matsu'ura (2000) による島弧で発生するプレート間地震の断層幅と断層長さとの関係および平均すべり量と断層長さとの関係を、図2.2.2-6に、大陸の縁で発生するプレート間地震の断層幅と断層長さとの関係および平均すべり量と断層長さとの関係を示す。

図より、島弧の沈み込み帯で発生するプレート間地震は、断層幅に120 kmの頭打ちがあり、長さが200 kmを超えると長さの3乗と地震モーメントとの比例関係がくずれること、大陸の縁の沈み込み帯で発生するプレート間地震には、現在のデータベース (断層幅200km以下、断層長さ1000km以下) では、そのような断層幅の頭打ちは見られないことがわかる。

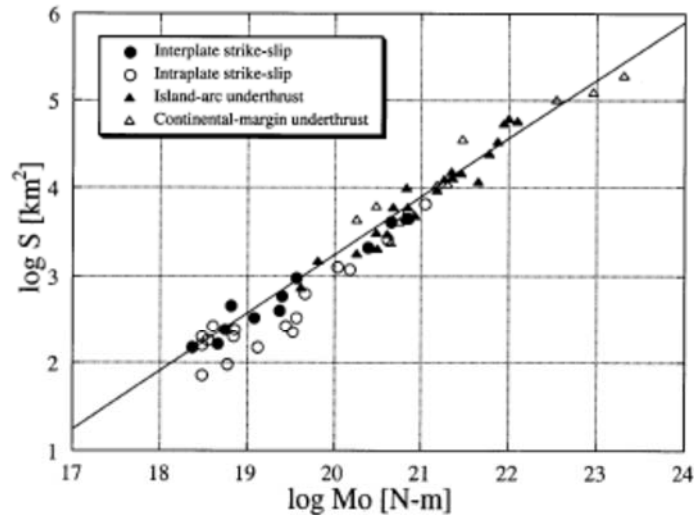


Figure 1
Plots of fault area S versus seismic moment M_0 for all earthquakes used in the present study. The solid and open circles indicate interplate and intraplate strike-slip events, respectively, and the solid and open triangles indicate island-arc and continental-margin underthrust events, respectively. The $S^{3/2}$ dependence of M_0 is denoted by the solid line.

図2.2.2-2 Fujii and Matsu'ura (2000) がプレート間地震のスケーリング則を求めるために用いた地震の断層面積と地震モーメントとの関係

表2.2.2-1 Fujii and Matsu'ura (2000) がプレート間地震のスケーリング則を調べた地震のデータ

Table 1 (continued)

No.	Date	Location	Lat.	Long.	M_s	M_0 (10^{20} N-m)	L (km)	W (km)	S (km^2)	D (m)	Reference
C: Underthrust events at island-arc subduction zones											
1	1965 0204	Central Aleutians	51.3	178.6	8.2	125	580	100	58000	4.8(e)	59, 65
2	1938 1110	Eastern Aleutians	55.5	-158.4	8.1	100	525	120	63000	3.2(e)	60
3	1957 0309	Central Aleutians	51.6	-175.4	8.1	88	550	100	55000	3.2(e)	16, 31
4	1963 1013	South Kuril	44.9	149.6	8.1	75	275	125	34375	4.3(e)	16, 37
5	1946 1221	Japan	33.1	135.8	8.0	60	250	100	25000	3.7(e)	9, 66
6	1958 1106	South Kuril	44.4	148.6	8.1	44	150	80	12000	5.1(e)	25
7	1968 0516	Japan	41.0	143.6	8.1	28	150	100	15000	4.1(e)	33
8	1952 0304	Japan	42.5	143.0	8.3	23	130	100	13000	3.5(e)	8
9	1969 0812	South Kuril	43.4	147.8	8.2	22	180	85	15300	2.9(e)	2
10	1971 0726	Solomon Islands	-4.9	153.2	7.7	18	180	70	12600	2.8(e)	52
11	1944 1207	Japan	33.8	136.0	7.8	15	120	80	9600	3.1(e)	34
12	1923 0901	Japan	35.4	139.2	8.0	8.4	93	53	4929	4.6(c)	41
13	1938 1105	Japan	37.0	141.7	7.5	7.0	100	60	6000	2.3(e)	5
14	1963 1020	South Kuril	44.9	150.3	7.2	7.0	100	60	6000	2.3(e)	24, 27
15	1973 0617	Japan	43.0	146.0	7.4	6.7	100	100	10000	1.0(d)	8
16	1938 1105	Japan	37.2	141.8	7.5	4.8	100	60	6000	1.6(e)	5
17	1938 0523	Japan	36.5	141.3	7.4	4.0	75	40	3000	2.7(e)	5
18	1978 0612	Japan	38.2	142.2	7.5	3.1	61	34	2074	2.2(e)	53
19	1965 0811	Vanuatu Islands	-15.5	166.9	7.3	3.0	63	50	3150	1.5(e)	22
20	1968 0401	Japan	32.5	132.3	7.6	1.8	56	32	1792	1.6(e)	54
21	1986 1114	Taiwan	24.0	121.8	7.8	1.7	68				28, 30
22	1985 0703	New Britain	-4.4	152.8	7.2	0.65	50	30	1500	0.9(e)	46
23	1970 0726	Japan	32.2	131.7	7.0	0.41	31	24	744	1.0(c)	54
D: Underthrust events at continental-margin subduction zones											
1	1960 0522	South Chile	-38.2	-73.5	8.5	2000	1000	200	200000	20(e)	36, 50
2	1964 0328	Central Alaska	61.1	-147.6	8.4	900	700	180	126000	14(e)	32, 50
3	1952 1104	Kamchatka	52.8	159.5	8.2	350	650	160	104000	6.7(e)	15, 35
4	1979 1212	Colombia-Ecuador	1.6	-79.4	7.6	29	280	130	36400		29
5	1966 1017	Northern Peru	-10.9	-78.8	7.8	20	80	140	11200	3.6(e)	1
6	1974 1003	Northern Peru	-12.4	-77.7	7.6	15	180	60	10800	2.8(e)	20
7	1971 1215	Kamchatka	56.0	163.2	7.5	6.7	50				67
8	1971 0708	Central Chile	-32.5	-71.2	7.7	5.6	70	60	4200	2.7(e)	23, 39
9	1966 1228	Central Chile	-25.5	-70.7	7.7	4.5	80	30	2400	2.4(e)	19
10	1973 0130	Mexico	18.4	-103.2	7.3	3.0	90	70	6300	1.4(e)	51
11	1978 1129	Mexico	15.8	-96.8	7.3	3.0	90	70	6300	1.0(e)	58
12	1979 0314	Mexico	17.3	-101.4	7.4	1.8	70	64	4480	0.8(e)	58

(a) Determined from surface offsets. (b) Determined from seismic wave data. (c) Determined from geodetic data. (d) Determined from tsunami data. (e) Estimated from M_0 and S with $M_0 = \mu DS$.

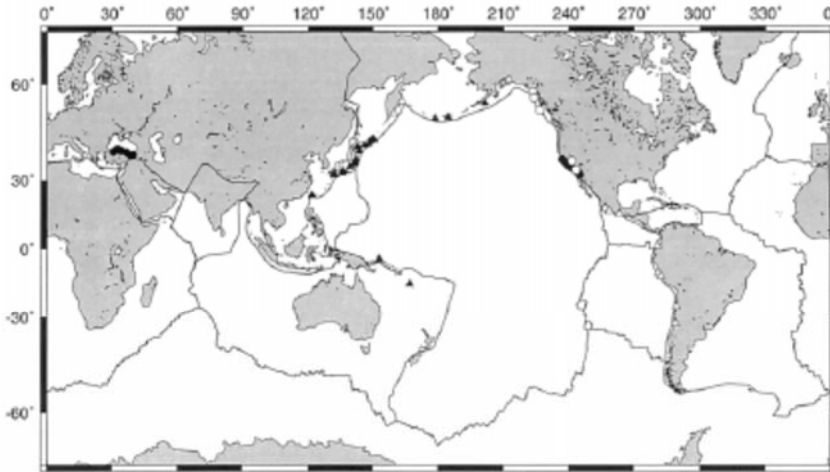


Figure 2
 A map showing the epicenter distribution of all earthquakes used in the present study. The solid and open circles indicate epicenters of interplate and intraplate strike-slip events, respectively, and the solid and open triangles indicate epicenters of island-arc and continental-margin underthrust events, respectively.

図2.2.2-3 Fujii and Matsu'ura (2000) がスケーリング則を調べた地震の震央

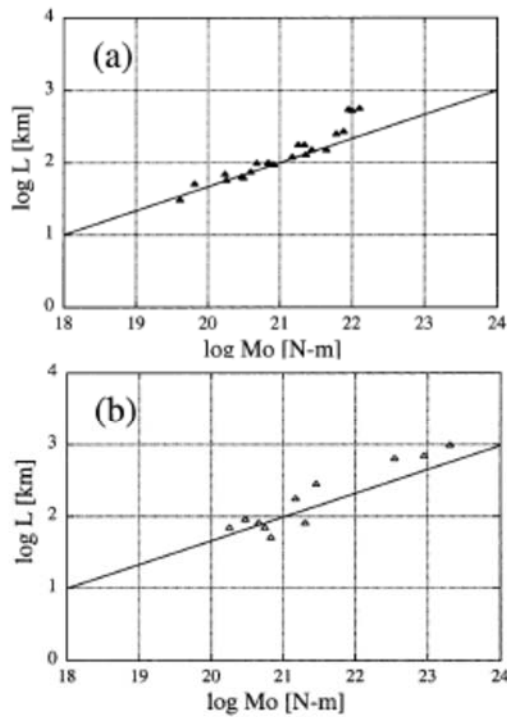


Figure 8
 Plots of seismic moment M_0 versus fault length L for (a) the island-arc underthrust events and (b) the continental-margin underthrust events. In either case the solid line denotes the L -cubed dependence of M_0 .

図2.2.2-4 Fujii and Matsu'ura (2000) による地震モーメントと断層長さとの関係

(a)島弧の沈み込み帯で発生するプレート間地震 (b)大陸の縁で発生するプレート間地震

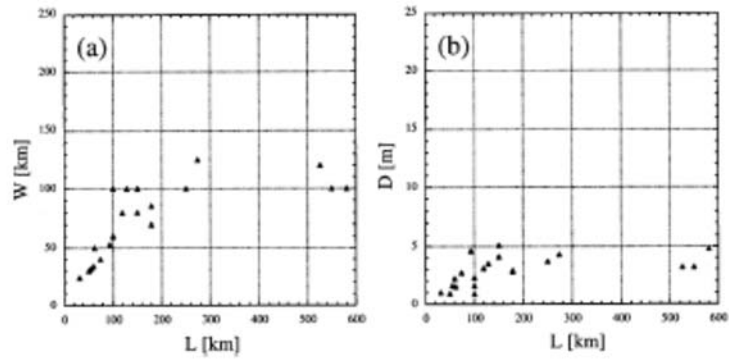


Figure 9
Plots of W vs. L (left) and D vs. L (right) for the island-arc underthrust events.

図2.2.2-5 Fujii and Matsu'ura (2000) による島弧で発生するプレート間地震の断層幅と断層長さとの関係および平均すべり量と断層長さとの関係

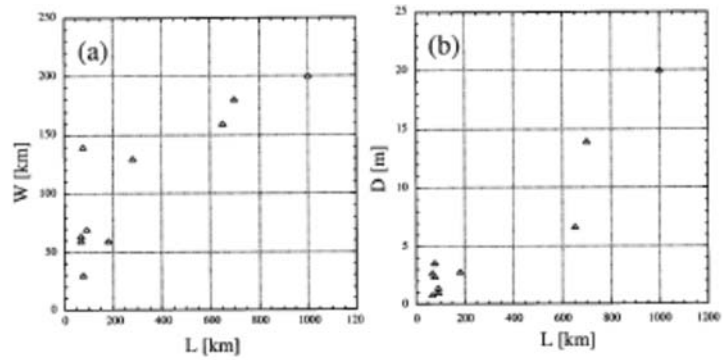


Figure 10
Plots of W vs. L (left) and D vs. L (right) for the continental-margin underthrust events.

図2.2.2-6 Fujii and Matsu'ura (2000) による大陸の縁で発生するプレート間地震の断層幅と断層長さとの関係および平均すべり量と断層長さとの関係

(3) Somerville・他 (2002)

Somerville・他 (2002) は、プレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を求めて、内陸地殻内地震のスケーリング則と比較した。

表2.2.2-2にSomerville・他 (2002) がプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を求めるために用いた地震を、表2.2.2-3にそのデータを示す。また、表2.2.2-4にSomerville・他 (2002) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を、表2.2.2-5にプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則と内陸地殻内地震のスケーリング則との比較を示す。

表2.2.2-2 Somerville・他 (2002) がプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を求めるために用いた地震

Table 1 Source Parameters of Subduction Earthquakes

Earthquake	Date	M_0 $\times 10^{24}$ dyne.cm	M_w	Overall Slip Duration (sec)	Rise Time from max. slip velocity (sec)	Rupture Velocity (km/sec)
Valparaiso	1985.3.3	150	8.1	14	2.85	3.0
Michoacan	1985.9.19	150	8.1	5	3.88	2.6
Peru	1974.10.3	120	8.0	11	7.0	3.0
Hokkaido nansei	1993.11.12	34	7.65	5	2.41	3.0
Petalan	1979.3.14	15	7.4	5	2.5	3.3
Zihuatanejo	1985.9.21	13.5	7.4	>1#	(>1)*	2.6
Playa Azul	1981.10.25	7.14	7.2	>1#	(>1)*	2.6
Peru	1974.11.9	5.4	7.1	2	1.25	3.0
Tonankai	1944.12.12	108	8.0	15	13.13	3.0
Kanto	1923.9.1	75	7.9	8	8.73	3.0

#minimum rise time value * only one time window

表2.2.2-3 Somerville・他 (2002) がプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を求めするために用いたデータ

Table 2 Orientation and References of Fault Planes

Earthquake	depth of Top (km)	depth of Hinge (km)	depth of Bottom (km)	strike	dip	rake	slip model reference
Valparaiso	6.6	26	71	5 5	15 30	90 110	Mendoza et al., 1994
Michoacan	6	-	40	300	14	var	Mendoza & Hartzell, 1989
Peru	1.2	22	50	350	11	92.5	Hartzell & Langer, 1993
Hokkaido ・nansei	5 2	-	40 37	20 340	30 30	100 90	Mendoza & Fukuyama, 1996
Petalan	3	-	25	293	14	87	Mendoza, 1995
Zihuatanejo	12	-	26	300	14	90	Mendoza, 1993
Playa Azul	6	-	20	300	14	90	Mendoza, 1993
Peru	6.1	-	21.4	350	11	92.5	Hartzell & Langer, 1993
Tonankai	2.0		40	235	20	var	Ichinose et al., 2001
Kanto	2.0		31.6	250	25	var	Wald et al., 1995

表2.2.2-4 Somerville・他 (2002) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則

**Table 4 Form of Scaling Relations of Slip Models
Assuming Self-Similarity**

Rupture Area vs. Seismic Moment:	$A = C1 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$
Average Slip vs. Seismic Moment:	$D = C2 \times 10^{-8} \times M_0^{1/3}$
Combined Area of Asperities vs. Seismic Moment:	$A_a = C3 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3}$
Area of Largest Asperity vs. Seismic Moment:	$A_1 (\text{km}^2) = C4 \times 10^{-16} \times M_0^{2/3}$
Radius of Largest Asperity vs. Seismic Moment:	$r_1 (\text{km}) = C5 \times 10^{-8} \times M_0^{1/3}$
Average Number of Asperities	C6
Area of Fault Covered by Asperities	C7
Average Asperity Slip Contrast:	C8
Hypocentral Distance to Center of Closest Asperity Vs. Moment:	$R_A = C9 \times 10^{-8} \times M_0^{1/3}$
Overall Slip Duration vs. Seismic Moment:	$T_S = C10 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3}$
Rise Time from Maximum Slip Velocity vs Seismic Moment	$T_R = C11 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3}$

表2.2.2-5 Somerville・他 (2002) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則と内陸地殻内地震のスケーリング則との比較

Table 5 Comparison of Parameters of Scaling Models of Subduction and Crustal Earthquakes

No.	Parameter	Subduction	Crustal	Subduction/ Crustal	Relationship of Subduction to Crustal
C1	Rupture Area	5.20	2.23	2.33	Larger
C2	Average Slip	5.30	15.6	0.34	Smaller
C3	Combined Area of Asperities	1.21	0.50	2.42	Larger
C4	Area of Largest Asperity	8.87	3.64	2.44	Larger
C5	Radius of Largest Asperity	1.68	1.08	1.56	Larger
C6	Number of Asperities	2.4	2.6	0.92	Similar
C7	Fraction of Fault Covered by Asperities	0.25	0.22	1.14	Similar
C8	Asperity Slip Contrast	2.13	2.01	1.06	Similar
C9	Hypocentral Distance to Asperity	1.76	1.35	1.30	Similar
C10	Slip Duration	3.62	2.03	1.78	Larger
C11	Rise Time	1.79	1.76	1.02	Similar

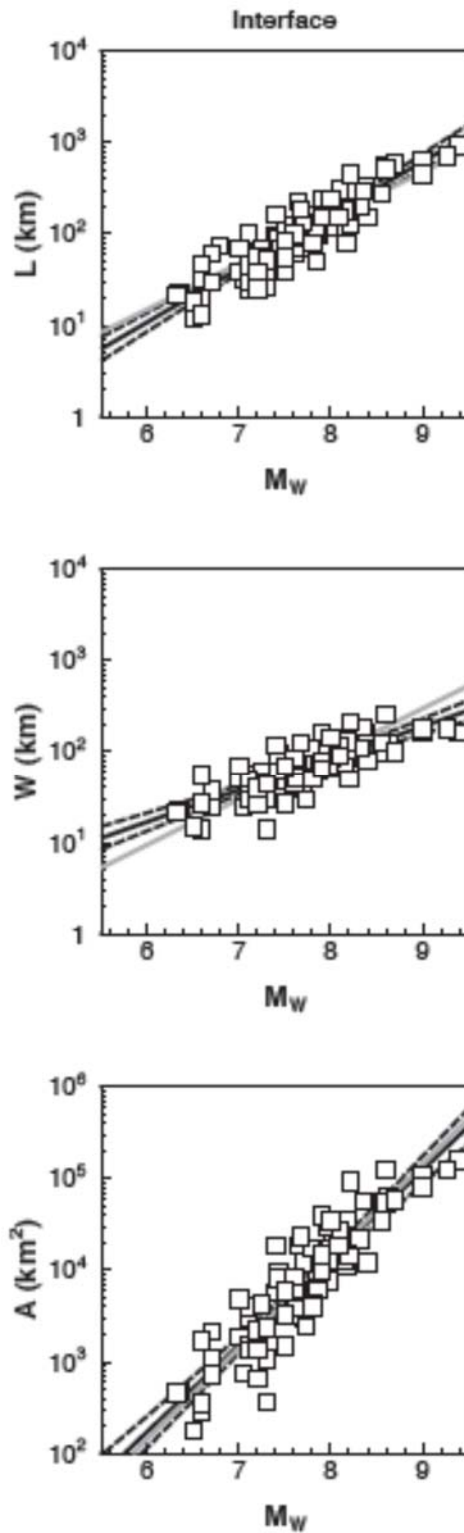
(4) Strasser *et al.* (2010)

Strasser *et al.* (2010) は、モーメントマグニチュードが6.3～9.4の95のプレート間地震 (断層モデル数は139) と、モーメントマグニチュードが5.9～7.8の20のスラブ内地震 (断層モデル数は21) のデータを用いて、断層パラメータのスケーリング則を求めた。

表2.2.2-6に、Strasser *et al.* (2010) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則を示す。また、図2.2.2-7に、Strasser *et al.* (2010) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則とデータを示す。

表2.2.2-6 Strasser *et al.* (2010) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則

TABLE 1							
Regression results for relations between rupture dimensions, rupture area, and moment magnitude, for interface events. s.e. denotes the standard error of the coefficient under consideration, R^2 the coefficient of multiple determination, and N the total number of points used in the regression.							
	a	s.e. (a)	b	s.e. (b)	σ	R^2	N
$\log_{10}(L) = a + b \times M_w$	-2.477	0.222	0.585	0.029	0.180	0.814	95
$\log_{10}(W) = a + b \times M_w$	-0.882	0.226	0.351	0.029	0.173	0.634	85
$\log_{10}(A) = a + b \times M_w$	-3.476	0.397	0.952	0.051	0.304	0.805	85
$M_w = a + b \times \log_{10}(L)$	4.868	0.141	1.392	0.069	0.277	0.814	95
$M_w = a + b \times \log_{10}(W)$	4.410	0.277	1.805	0.151	0.392	0.634	85
$M_w = a + b \times \log_{10}(A)$	4.441	0.179	0.846	0.046	0.286	0.805	85



▲ Figure 2. Regression results for the prediction of rupture dimensions as a function of moment magnitude. The dashed lines indicate the $\pm 95\%$ confidence intervals for the mean, and the heavy gray line indicates the best fit when self-similar scaling is assumed. The values shown for the individual data points are averaged over all models in the database in the case of multiple models being available for the same event.

図2.2.2-7 Strasser *et al.* (2010) が求めたプレート間地震の断層パラメータのスケーリング則とデータ

(5) Leonard (2010)

Leonard (2010) は、縦ずれ断層によるプレート間地震、横ずれ断層によるプレート間地震、および縦ずれ断層による安定大陸領域の地震の断層パラメータの相似則を求めた。

表2.2.2-7に、Leonard (2010) による断層パラメータの相似則を示す。また、図2.2.2-8に、Leonard (2010) による正断層と逆断層によるプレート間地震の断層長さと幅との関係を示す。

表2.2.2-7 Leonard (2010) による断層パラメータの相似則 (DS: 縦ずれ、SS: 横ずれ、SCR: 安定大陸領域)

Table 5
Summary of Constants for the More Common Fault-Scaling Relations,
in Meters and Newtons

	a^*	b^*	$S(b)^{\dagger}$	Range A (m^2), L (m)
DS				
$\log(W) = a \times \log(L) + b$	0.667	1.24	1.15–1.40	> 5, 500
$\log(D_{Av}) = a \times \log(A) + b$	0.5	-4.42	-4.82–-3.92	> 0
$\log(D_{Av}) = a \times \log(L) + b$	0.833	-3.80	-4.21–-3.29	> 5, 500
$\log(M_0) = a \times \log(A) + b$	1.5	6.10	5.69–6.60	> 0
$\log(M_0) = a \times \log(L) + b$	3.0	6.10	–	0–5,500
	2.5	7.96	7.53–8.51	> 5, 500
$\log(M_0) = a \times \log(SRL) + b^{\ddagger}$	2.27	9.25	–	> 5, 500
SS				
$\log(W) = a \times \log(L) + b$	0.667	1.18	1.04–1.30	3,400–45,000
$\log(D_{Av}) = a \times \log(A) + b$	0.5	-4.43	-4.82–-4.05	> 0
$\log(D_{Av}) = a \times \log(L) + b$	1.0	–	–	0–3,400
	0.833	-3.84	-4.24–-3.45	3,400–45,000
	0.5	-2.29	-2.72–-1.93	> 45, 000
$\log(M_0) = a \times \log(A) + b$	1.5	6.09	5.69–6.47	> 0
$\log(M_0) = a \times \log(L) + b$	3.0	6.09 [§]	5.65–6.52 [§]	0–3,400
	2.5	7.85	7.41–8.28	3,400–45,000
	1.5	12.50 [§]	12.01–12.88 [§]	> 45, 000
$\log(M_0) = a \times \log(SRL) + b$	2.27	9.15	–	3,400–65,000
	1	15.26	–	> 65, 000
SCR				
$\log(W) = a \times \log(L) + b$	0.667	1.13	1.04–1.23	> 2, 500
$\log(D_{Av}) = a \times \log(A) + b$	0.5	-4.14	-4.30–-4.00	> 0
$\log(D_{Av}) = a \times \log(L) + b$	0.833	-3.57	-3.72–-3.43	> 2, 500
$\log(M_0) = a \times \log(A) + b$	1.5	6.38	6.22–6.52	> 0
$\log(M_0) = a \times \log(L) + b$	3.0	6.39	–	0–2,500
	2.5	8.08	7.87–8.28	> 2, 500
$\log(M_0) = a \times \log(SRL) + b$	2.5 [¶]	8.08 [¶]	–	–

*The value of a and b in each row is the value applicable to the algebraic equation in the first column of that row.

[†] $S(b)$ are the uncertainties calculated from the uncertainties in C_1 and C_2 that were estimated from the $W \sim L$, $M_0 \sim A$, and $M_0 \sim L$ data.

[‡]SRL variables are derived by substituting the relation $SRL = 1.1 \log RLD - 0.275$ into the L results.

[§]These values were set so they intersect with the values estimated from the data between 3.4 and 40 km, where $a = 2.5$.

^{||}These values are set such that they meet the previously identified relation at 65 km and the moment at 400 km is identical for both SRL and L relations.

[¶]The data suggest that for SCR the relation $SRL = RLD$ is preferred so the SLR and L relations are identical.

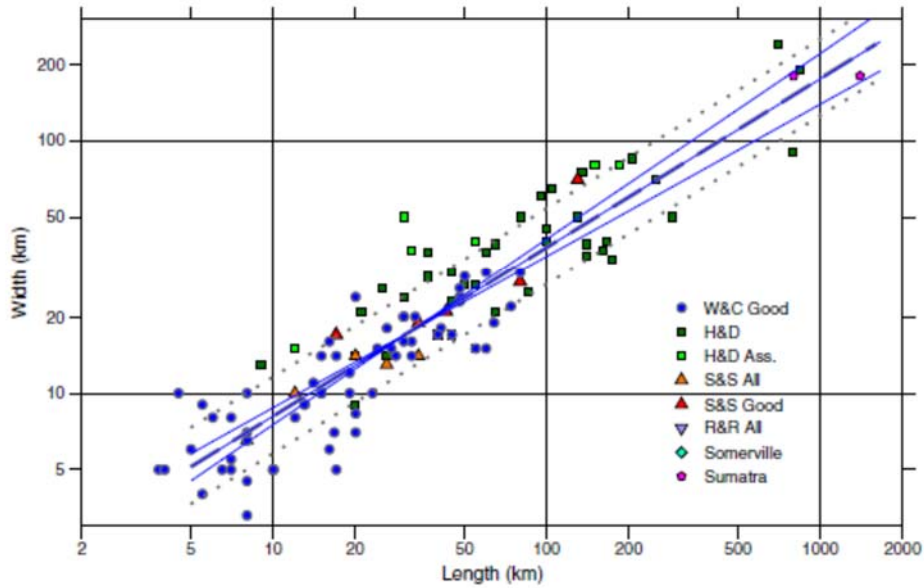


Figure 1. Width versus length for normal and reverse dip-slip interplate faults. The least-squares estimate has a slope of 0.668. The three solid thin lines have slopes of 0.57, 0.67 and 0.73 with a common value at the point of smallest least-squares error. They encompass the range of slopes allowed within the $\pm 1\sigma$ confidence interval. The gray dashed line is defined by $W = C_1 L^\beta$, where $\beta = 2/3$ with $C_1 = 1.7$; it has a slope of $2/3$ for $5.5 < L < 1500$ km. The gray dotted lines show the 67% confidence interval. The catalogs referred to are W&C for Wells and Coppersmith (1994), H&D for Henry and Das (2001), S&S for the Shaw and Scholz (2001) catalog published in Manighetti *et al.* (2007), R&R for Romanowicz and Ruff (2002), and Somerville is Somerville *et al.* (1999). See text for details on the two values shown for the 2004 M 9.3 Sumatra–Andaman earthquake. This color coding is used in all figures. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.2.2-8 Leonard (2010) による正断層と逆断層によるプレート間地震の断層長さとの関係

(6) Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013)

Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) は、カリフォルニア湾とメキシコの沈み込み帯で発生した地震の断層パラメータのスケーリング則を調べた。

図2.2.2-9に、Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) が断層パラメータのスケーリング則を求めたカリフォルニア湾とメキシコの沈み込み帯で発生した地震の震央を示す。

表2.2.2-8に、Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) が求めたメキシコの沈み込み帯で発生した地震の断層パラメータのスケーリング則の式を、図2.2.2-10に、スケーリング則の線を示す。

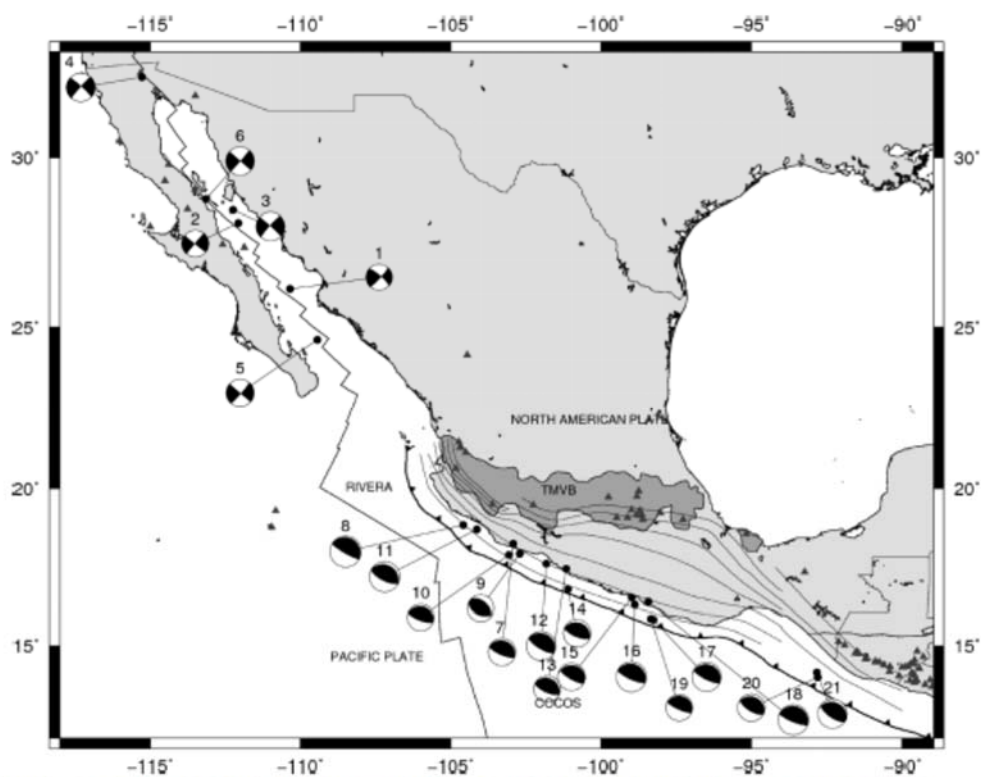


Figure 2. Focal mechanisms of earthquakes 21 earthquakes used in the inversion. The focal mechanisms shown here were obtained in this study.

図2.2.2-9 Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) が断層パラメータのスケーリング則を求めたカリフォルニア湾とメキシコの沈み込み帯で発生した地震の震央

表2.2.2-8 Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) が求めたメキシコの沈み込み帯で発生した地震の断層パラメータのスケーリング則

Table 3. Regression results for subduction zone events. L_{eff} is the effective length; W_{eff} is the effective width; A_{eff} is the effective area; D_{mean} is the average slip on the plane; D_{max} is the maximum displacement; A_A is the combined area of asperities; τ is the duration of the source time function. RV are reverse events. R^2 is the determination coefficient, a is the intercept, s_a is the standard error of a , b is the slope, s_b is the standard error of b and S_{xy} is the standard deviation of the error.

Parameter	range	Equation	Slip type	a	s_a	b	s_b	S_{xy}	R^2	M_w -range
L_{eff} (km)	18.55–169.65	$\log_{10} L_{eff} = a + b M_w$	RV	-2.271	0.262	0.555	0.037	0.065	0.981	6.48–8.00
W_{eff} (km)	13.88–88.02	$\log_{10} W_{eff} = a + b M_w$	RV	-1.689	0.470	0.462	0.067	0.116	0.940	6.48–8.00
A_{eff} (km ²)	319.24–10028.06	$\log_{10} A_{eff} = a + b M_w$	RV	-4.174	0.488	1.048	0.069	0.121	0.932	6.48–8.00
D_{eff} (m)	0.30–4.05	$\log_{10} D_{eff} = a + b M_w$	RV	-4.109	0.604	0.581	0.086	0.150	0.901	6.48–8.00
D_{max} (m)	0.84–4.35	$\log_{10} D_{max} = a + b M_w$	RV	-2.696	0.296	0.423	0.042	0.073	0.975	6.48–8.00
A_A (km ²) [§]	78–2700	$\log_{10} A_A = a + b M_w$	RV	-4.393	0.424	0.991	0.060	0.105	0.949	6.48–8.00
A_A (km ²) [‡]	78–2700	$\log_{10} A_A = a + b \log_{10} A_{eff}$	RV	-0.455	0.085	0.948	0.026	0.048	0.990	6.48–8.00
A_A (km ²) [‡]	48–1800	$\log_{10} A_A = a + b M_w$	RV	-5.581	0.480	1.137	0.068	0.119	0.934	6.48–8.00
A_A (km ²) [‡]	18–1200	$\log_{10} A_A = a + b M_w$	RV	-6.013	0.654	1.146	0.093	0.162	0.876	6.48–8.00
T (s)	15–92	$\log_{10} \tau = a + b M_w$	RV	-1.289	0.365	0.396	0.052	0.090	0.963	6.48–8.00
E_R (J)	2.3×10^{13} – 7.5×10^{15}	$\log_{10} E_R = a + b M_w$	RV	2.000	0.691	1.762	0.098	0.171	0.854	6.48–8.00

§Somerville *et al.* (1999) asperity definition.

‡Mai *et al.* (2005) large asperity definition.

‡Mai *et al.* (2005) very large asperity definition.

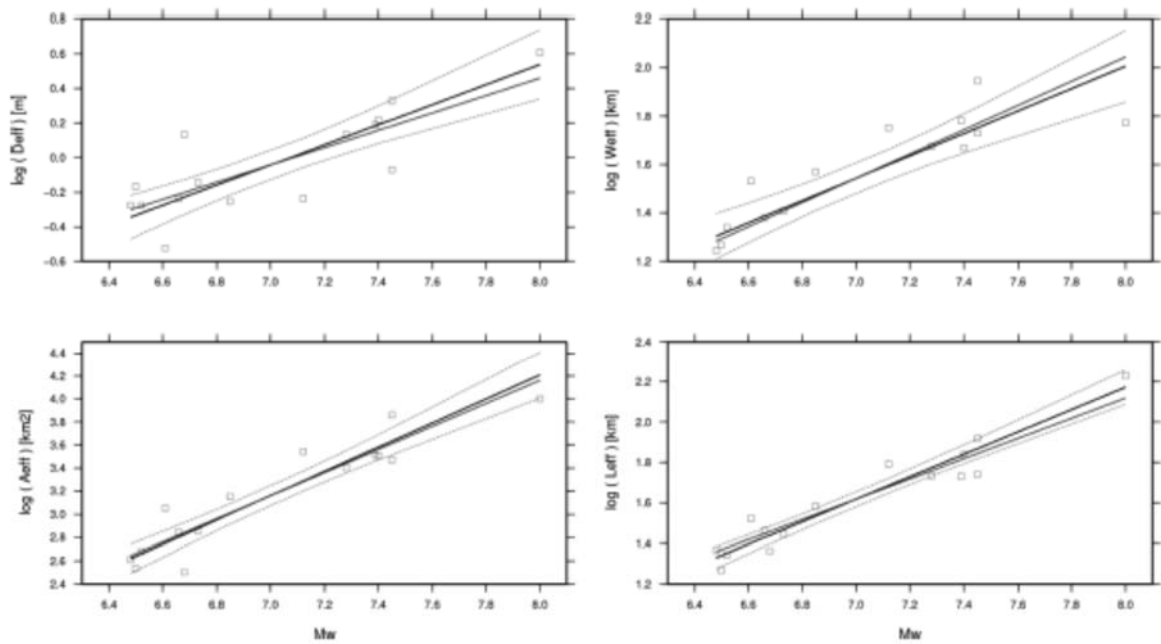


Figure 7. Scaling relationships obtained in this study. The solid black lines are the regression relationships; the dashed lines are the 95 percent confidence intervals in the regression; and the solid gray lines indicate the slope for self-similar scaling. Results are shown for effective slip (D_{eff}) (left top panel), effective width (W_{eff}) (right top panel), effective area (A_{eff}) (left bottom panel) and effective length (L_{eff}) (right bottom panel).

図2.2.2-10 Rodriguez-Perez and Ottemoller (2013) が求めたメキシコの沈み込み帯で発生した地震の断層パラメータのスケーリング則

(7) Kumar *et al.* (2017)

Kumar *et al.* (2017) は、逆断層による内陸地殻内地震、沈み込み帯のプレート間地震、正断層による地震、横ずれ断層による地震の断層パラメータのスケーリング則を求めた。

表2.2.2-9に、Kumar *et al.* (2017) による断層長さ L とモーメントマグニチュード M_w 、断層幅 W とモーメントマグニチュード M_w 、および断層面積 A とモーメントマグニチュード M_w との関係を示す。また、表2.2.2-10に、平均くい違い量 D とモーメントマグニチュード M_w 、平均くい違い量 D と断層面積 A 、平均くい違い量 D と断層長さ L 、平均くい違い量 D と断層幅 W との関係を示す。

表2.2.2-9 Kumar *et al.* (2017) による断層長さ L とモーメントマグニチュード M_w 、断層幅 W とモーメントマグニチュード M_w 、および断層面積 A とモーメントマグニチュード M_w との関係

Table 1
Scaling Coefficients between Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Moment Magnitude

Faulting Regime	Equation	b (sb)	a (sa)	σ	r^2	Data Range	
						M_w	Dimension
Reverse faulting (shallow crustal)	$\log_{10} L = a + bM_w$	0.614 (0.043)	-2.693 (0.292)	0.083	0.93	5.59–7.69	4.9–108.0 km
	$\log_{10} W = a + bM_w$	0.435 (0.050)	-1.669 (0.336)	0.087	0.90	5.59–7.69	4.8–45.0 km
	$\log_{10} A = a + bM_w$	1.049 (0.066)	-4.362 (0.445)	0.121	0.94	5.59–7.69	23.5–4,860.0 km ²
Subduction interface	$\log_{10} L = a + bM_w$	0.583 (0.037)	-2.412 (0.288)	0.107	0.85	6.68–9.19	29.2–1420.0 km
	$\log_{10} W = a + bM_w$	0.366 (0.031)	-0.880 (0.243)	0.099	0.75	6.68–9.19	29.2–260.0 km
	$\log_{10} A = a + bM_w$	0.949 (0.049)	-3.292 (0.377)	0.150	0.86	6.68–9.19	852.6–318,080.0 km ²
Normal faulting	$\log_{10} L = a + bM_w$	0.485 (0.036)	-1.722 (0.260)	0.128	0.88	5.86–8.39	9.0–262.5 km
	$\log_{10} W = a + bM_w$	0.323 (0.047)	-0.829 (0.333)	0.128	0.77	5.86–8.39	6.0–112.5 km
	$\log_{10} A = a + bM_w$	0.808 (0.059)	-2.551 (0.423)	0.181	0.88	5.86–8.39	54.0–29,531.3 km ²
Strike slip	$\log_{10} L = a + bM_w$	0.681 (0.052)	-2.943 (0.357)	0.151	0.88	5.38–8.70	6.0–580.0 km
	$\log_{10} W = a + bM_w$	0.261 (0.026)	-0.543 (0.179)	0.105	0.75	5.38–8.70	6.5–50.0 km
	$\log_{10} A = a + bM_w$	0.942 (0.058)	-3.486 (0.399)	0.184	0.88	5.38–8.70	39.0–29,000.0 km ²

Scaling coefficients were obtained by general orthogonal regressions, except for the scaling relationships between moment magnitude and rupture area, which were calculated using those of rupture length and rupture width. The notations in the equations: L , W , A , and M_w denote rupture length, rupture width, rupture area, and moment magnitude. The slope and intercept are given by a and b , their standard errors by sa and sb , while the standard deviation is given by σ . The correlation coefficient is denoted by r^2 .

表2.2.2-10 Kumar *et al.* (2017) による平均くい違い量 D とモーメントマグニチュード M_w 、平均くい違い量 D と断層面積 A 、平均くい違い量 D と断層長さ L 、平均くい違い量 D と断層幅 W との関係

Table 2
Scaling Coefficients between Average Slip, Rupture Width, Rupture Length, Rupture Area, and Moment Magnitude

Faulting Regime	Equation	b (sb)	a (sa)	σ	r^2
Reverse faulting (shallow crustal)	$\log_{10} D = a + bM_w$	0.451 (0.093)	-3.156 (0.639)	0.149	0.77
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} A$	0.429 (0.134)	-1.213 (0.379)	0.180	0.72
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} L$	0.975 (0.203)	-1.456 (0.309)	0.132	0.78
Subduction interface	$\log_{10} D = a + b \log_{10} W$	0.767 (0.397)	-1.022 (0.522)	0.200	0.58
	$\log_{10} D = a + bM_w$	0.552 (0.067)	-4.226 (0.526)	0.171	0.74
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} A$	0.582 (0.136)	-2.375 (0.558)	0.257	0.35
Normal faulting	$\log_{10} D = a + b \log_{10} L$	1.092 (0.223)	-2.320 (0.477)	0.213	0.34
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} W$	1.244 (0.577)	-2.438 (1.154)	0.213	0.25
	$\log_{10} D = a + bM_w$	0.693 (0.066)	-4.967 (0.484)	0.195	0.86
Strike slip	$\log_{10} D = a + b \log_{10} A$	0.858 (0.214)	-2.779 (0.683)	0.330	0.29
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} L$	1.302 (0.303)	-2.302 (0.531)	0.252	0.43
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} W$	2.512 (0.842)	-3.698 (1.216)	0.223	0.00
Strike slip	$\log_{10} D = a + bM_w$	0.558 (0.054)	-4.032 (0.376)	0.227	0.77
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} A$	0.593 (0.112)	-1.875 (0.342)	0.302	0.43
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} L$	0.789 (0.144)	-1.473 (0.259)	0.276	0.48
	$\log_{10} D = a + b \log_{10} W$	2.391 (0.485)	-3.092 (0.602)	0.178	0.10

Scaling coefficients were obtained by general orthogonal regressions. The notations are as in Table 1. D , A , and M_w denote average slip (in m), rupture area (in km²), and moment magnitude.

2.2.3 プレート間地震の震源断層パラメータの整理・分析

本項では、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の断層パラメータのデータベースと、今年度業務における地震動解析対象地震の断層パラメータの関係を調べた。主に断層長さ、断層幅、断層面積および短周期レベル等の断層パラメータを対象に整理・分析を行った。

a) 国内外のプレート間地震の断層幅 W と断層長さ L との関係

図 2.2.3-1 に、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の断層幅 W と断層長さ L のデータと、今年度業務における地震動解析対象地震の断層パラメータを比較した。

図中、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集したデータのうち、国内の地震については白丸印で、国外の地震については黒丸印で示し、地震動解析対象地震である 2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) のデータを赤■で示す。参考に、既往の研究（原子力規制庁，2018）の地震動解析対象地震である 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) のデータを青■で示す。図中、赤線は渡辺・他 (2002) による、プレート間地震の断層幅と断層長さの経験的關係式である。

図より、2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) と 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) の断層幅は概ね 150 km 程度であり、渡辺・他 (2002) で得られた、断層長さ 300 km 以上で飽和する断層幅とよく整合していることが分かった。2 つの地震のデータともに、渡辺・他 (2002) による経験則の折り曲げのところに位置していることから、これらの地震は、第 1 ステージから第 2 ステージへの遷移ステージの地震である可能性が示唆されており、長周期震源イメージング結果で見られた、海溝軸まで破壊が達しているけど、超大すべりなどは見られていないこととも整合していると考えられる。

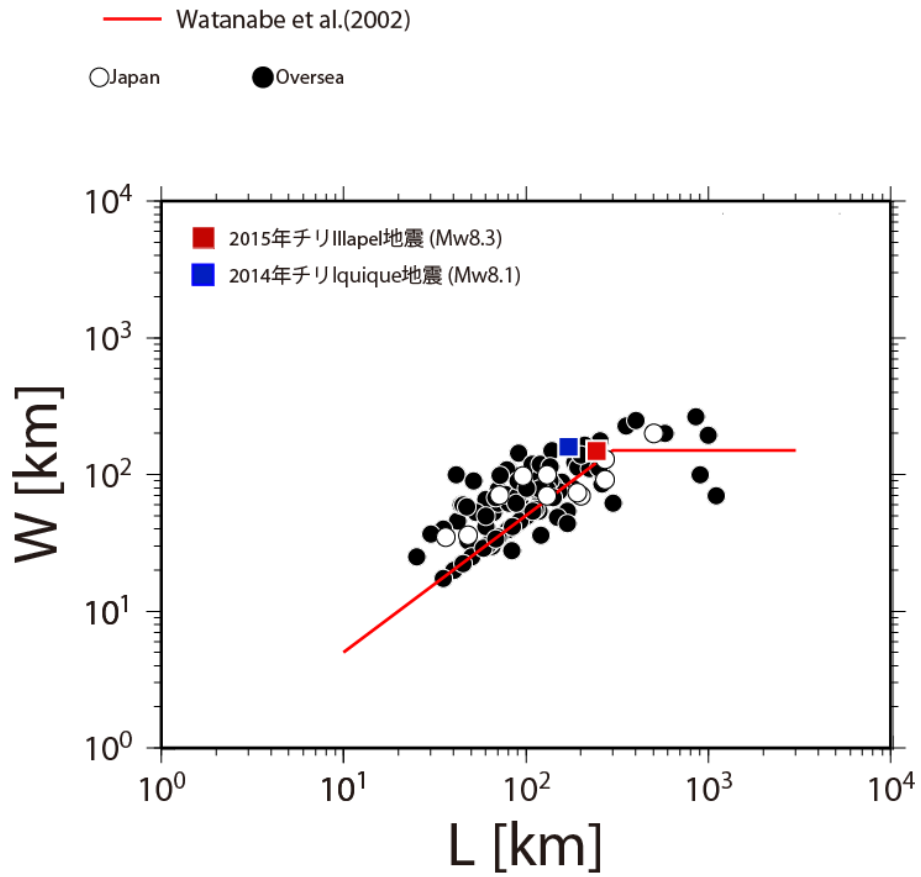


図 2.2.3-1 国内外のプレート間地震の断層幅 W と断層長さ L との関係

b) 国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 と関係の分析

図 2.2.3-2 の a) に、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 のデータと、今年度業務における地震動解析対象地震の断層パラメータを比較した。

図中、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集したデータのうち、国内の地震については白丸印で、国外の地震については黒丸印で示し、地震動解析対象地震である 2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) のデータを赤■で示す。参考に、既往の研究（原子力規制庁，2018）の地震動解析対象地震である 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) のデータを青■で示す。図中、黒線は(2.2.3-1)式で表される Murotani *et al.* (2008) による断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験式で、赤線は(2.2.3-2)式で表される、田島・他 (2013) による断層幅が飽和する第 2 ステージのプレート間地震を対象とした、断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験的關係式(2.2.3-2)式である。参考として、(2.2.3-3)式で表される、地震調査研究推進本部 (2005) によるプレートの地震の強震動予測のためのレシピで採用されている宇津 (2001) も、青点線で示す。

$$S[\text{km}^2] = 1.48 \times 10^{-10} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3} \quad (2.2.3-1)$$

$$S[\text{km}^2] = 5.82 \times 10^{-7} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{1/2} \quad (2.2.3-2)$$

$$S[\text{km}^2] = 8.58 \times 10^{-11} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3} \quad (2.2.3-3)$$

図より、2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) と 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) の断層パラメータは、第 2 ステージ以降の既往の経験則（田島・他, 2013）の下限值より小さい側への延長線上にあるように見える。長周期震源インバージョン結果で見られたように、海溝軸まで破壊が達しているけど、超大すべりなどは見られていない、第 1 ステージから第 2 ステージへの遷移ステージの地震である可能性がこちらでも示唆されている。

一方、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 のデータを対象に、第 1 ステージのみ ($S \propto M_0^{2/3}$) で回帰分析した場合と、第 1 ステージから第 2 ステージへの折り曲げ点を持つ折れ線 ($S \propto M_0^{2/3}$ から $S \propto M_0^{1/2}$ に変わる) で回帰した場合に、データはどの相似則とより整合しているかを、赤池の情報量規準 (AIC) 法で調べた。

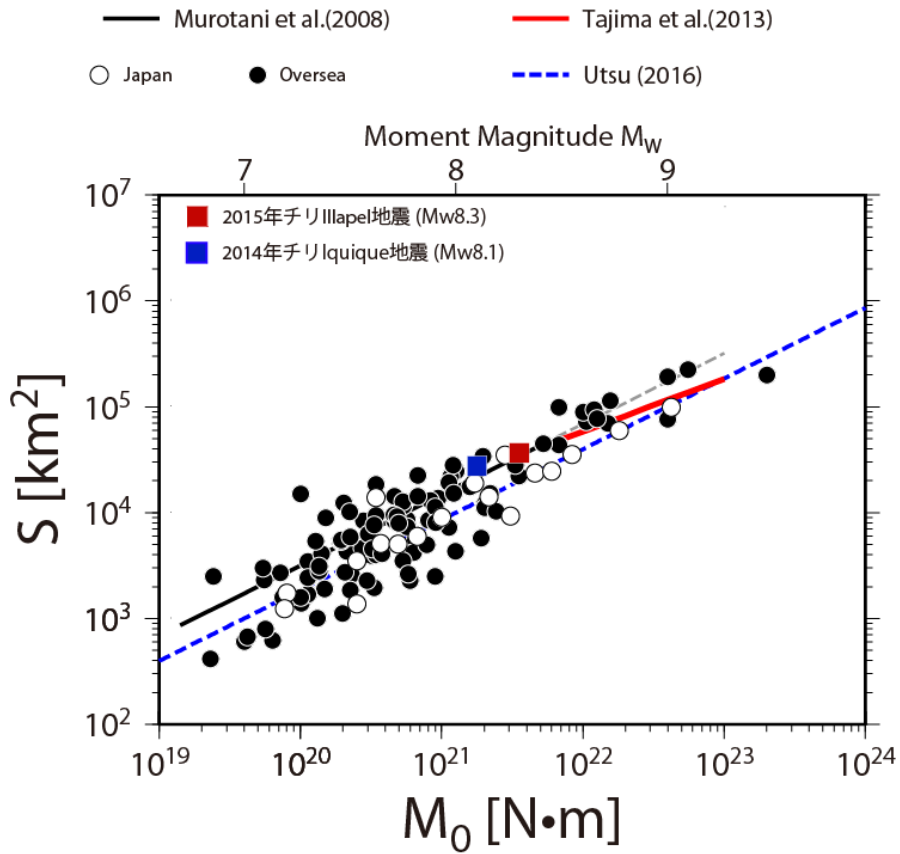
図 2.2.3-2 の b)に、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 のデータと、本検討による回帰分析の結果を比較した。

図中、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集したデータのうち、破壊が海溝軸まで達して、かつ超大すべり域も表れている地震（第 2 ステージ）を赤丸で、それ以外の地震を青丸印で示す。図中、黒点線は(2.2.3-4)式で表される第 1 ステージのみ ($S \propto M_0^{2/3}$) で回帰分析した場合の断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験式で、緑の点線は(2.2.3-5)式で表される、第 1 ステージから第 2 ステージへの折り曲げ点を持つ折れ線 ($S \propto M_0^{2/3}$ から $S \propto M_0^{1/2}$ に変わる)で回帰した場合断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験式である。参考として、(2.2.3-1)式で表される Murotani *et al.* (2008) による断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験式を灰色の実線で、(2.2.3-2)式で表される、田島・他 (2013) による断層幅が飽和する第 2 ステージのプレート間地震を対象とした、断層面積 S と地震モーメント M_0 との経験的關係式(2.2.3-2)式を赤線で、(2.2.3-3)式で表される、地震調査研究推進本部 (2005) によるプレートの地震の強震動予測のためのレシピで採用されている宇津 (2001) を灰色の点線で示す。

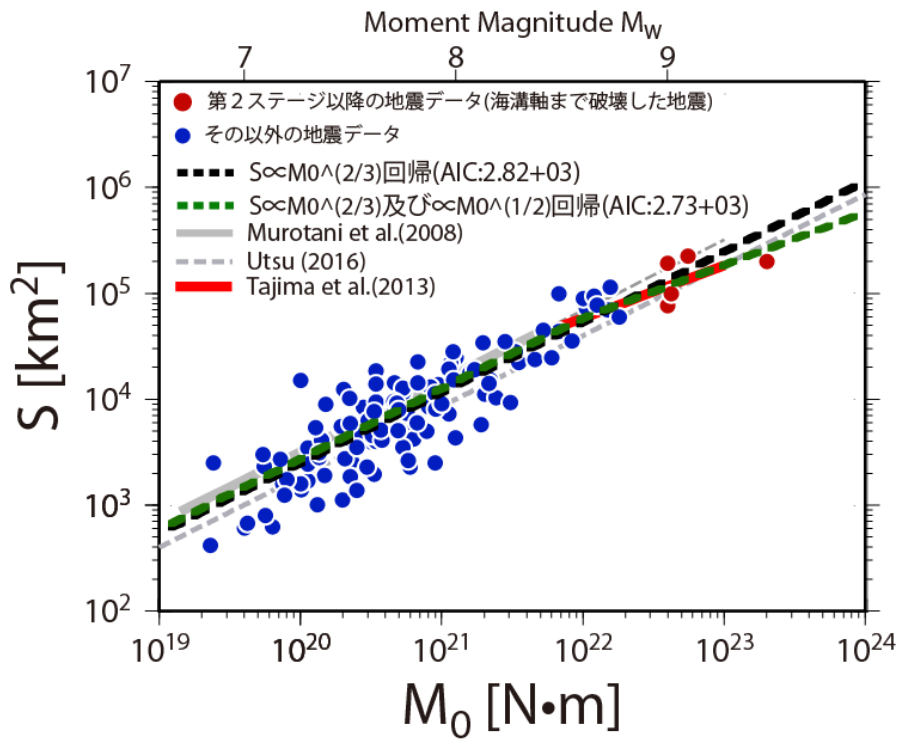
それぞれの AIC は $2.82+03$ と、 $2.73+03$ となり、折り曲げ線で回帰した方がよりデータと整合していることがわかった。折り曲げ線で回帰した場合の折り曲げ点の M_w は 8.6 で田島・他 (2013) による経験則の下限值である 8.4 より多少大きい、第 2 ステージの部分は田島・他 (2013) とよく整合していることがわかる。

$$S[\text{km}^2] = 1.17 \times 10^{-10} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3} \quad (2.2.3-4)$$

$$\begin{cases} S[\text{km}^2] = 1.28 \times 10^{-10} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3}, M_w < 8.6 \\ S[\text{km}^2] = 5.95 \times 10^{-7} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{1/2}, M_w \geq 8.6 \end{cases} \quad (2.2.3-5)$$



a) 地震動解析対象地震との比較



b) 回帰分析

図 2.2.3-2 国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 との関係
2.2.3-5

c) 国内外のプレート間地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係の分析

図 2.2.3-3 に、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集した国内外のプレート間地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A のデータと、今年度業務における地震動解析対象地震の断層パラメータを比較した。

図中、既往の研究（原子力規制庁，2018）で収集したデータのうち、国内の地震については白丸印で、国外の地震については黒丸印で示し、地震動解析対象地震である 2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) のデータを赤■で示す。参考に、既往の研究（原子力規制庁，2018）の地震動解析対象地震である 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) のデータを青■で示す。図中、黒線は(2.2.3-6)式で表される、地震調査研究推進本部 (2005) による強震動予測のためのレシピで採用されている壇・他 (2001) の式で、黒実線は平均値で、黒点線はその 2 倍と 1/2、灰色部分は外挿である。

$$A[\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2] = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0[\text{N}\cdot\text{m}] \times 10^7)^{1/3} \quad (2.2.3-6)$$

図より、2015 年チリ Illapel 地震 (M_w 8.3) と 2014 年チリ Iquique 地震 (M_w 8.1) の断層パラメータは、壇・他 (2001) の 0.5 倍から 2 倍の間にあり、平均的には経験式と整合していることが分かった。

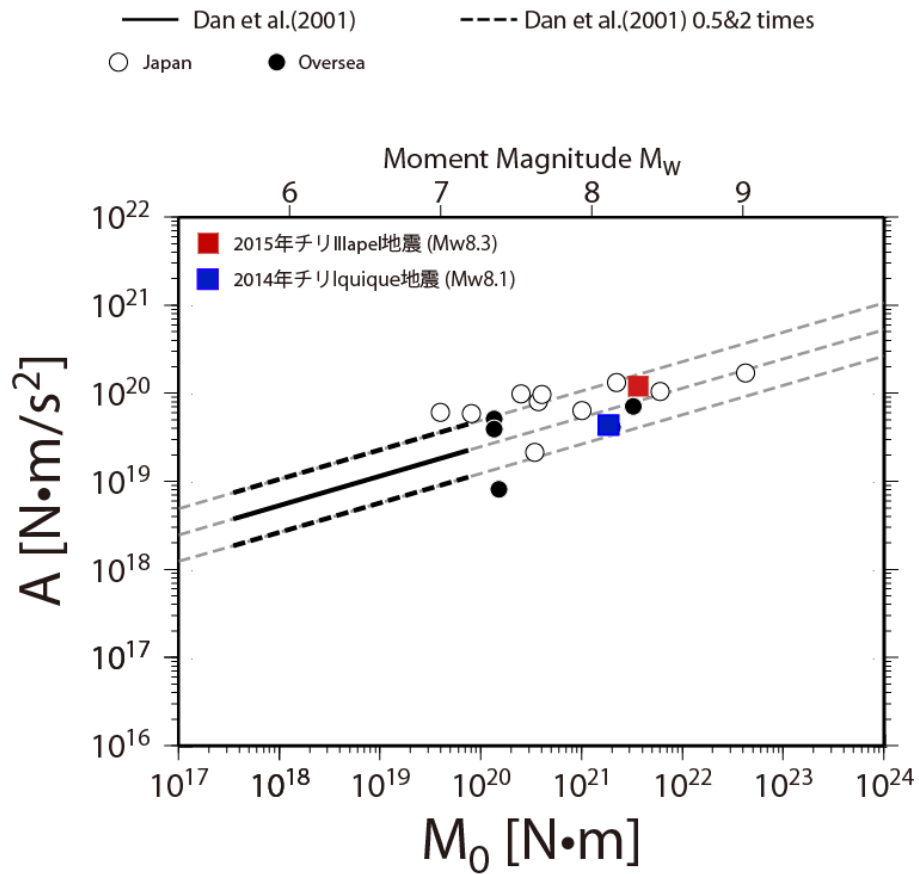


図 2.2.3-3 国内外のプレート間地震の短周期レベル A と地震モーメント M_0 との関係

2.2.4 プレート間地震の地震動特性の整理・分析

本検討では、プレート間地震の地震動予測式（GMPE）について、以下の7つの式を用いて、地震動予測式による予測値の比較によって、地震動の地域性の有無を検討することとした。

2.2.4.1 項では、対象とする地震動予測式の概要を述べ、2.2.4.2 項では地震動予測式による予測値の比較を示す。

2.2.4.1 対象地震動予測式の概要

(1) Atkinson and Boore (2003)

Atkinson and Boore (2003) は、世界の沈み込み帯で起こったプレート間地震とスラブ内地震 (M 5~ M 8.3) の強震記録を用いて、最大加速度および減衰定数 5%の擬似加速度応答スペクトルの回帰分析を行った。データベースには、日本やメキシコおよび中米の沈み込み帯の多くの地震が含まれている。Atkinson and Boore (2003) がプレート間地震の検討に用いた地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離を図 2.2.4-1 に示す。

回帰モデルは下の(2.2.4-1)式で表される。

$$\log Y = fn(M) + c_3 h + c_4 R - g \log R + c_5 sl S_C + c_6 sl S_D + c_7 sl S_E \quad (2.2.4-1)$$

ここに、 Y は最大加速度もしくは減衰定数 5%の擬似加速度応答スペクトル(cm/s^2)、 M はモーメントマグニチュード (プレート間地震の場合 $M \leq 8.5$)、 $fn(M) = c_1 + c_2 M$ 、 h は震源深さ(km)、 $R = \sqrt{D_{\text{fault}}^2 + \Delta^2}$ 、 D_{fault} は断層のトレースからの最短距離、 Δ は断層近傍の飽和を示す項で、 $\Delta = 0.00724 \times 10^{0.507M}$ 、 $g = 10^{1.2-0.18M}$ である。また、 $c_1 \sim c_7$ は回帰係数で、 S_C 、 S_D 、 S_E は地盤種別を表す係数である。 sl は最大加速度の大きさと振動数による係数で、表 2.2.4-1 に示す値である。

Atkinson and Boore (2003) による最大加速度の例を図 2.2.4-2 に、擬似加速度応答スペクトルの例を図 2.2.4-3 に示す。

一方、図 2.2.4-4 に示すように、マグニチュード、距離、地震タイプおよび地盤種別を同一にした場合、高振動数における加速度応答スペクトルが日本の地震では大きく、Cascadia の地震では小さいといった地域性が見られることを指摘している。

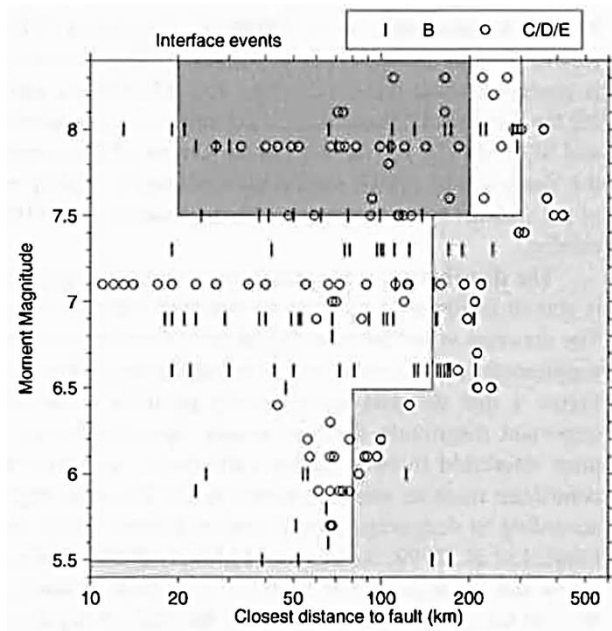


Figure 1. Database for subduction-zone earthquakes. The top frame shows data available for interface events, by NEHRP site class; the lower frame shows data available for in-slab events, by NEHRP site class. Data of $M < 5.4$ are not shown. The magnitude-distance range of most engineering interest is shaded dark gray. Magnitude-distance cutoffs imposed on final regressions are shaded light gray. KNET data that are believed to be unreliable at higher frequencies (moderate magnitudes at large distances; see text) are not included.

図2.2.4-1 Atkinson and Boore (2003) が検討に用いたプレート間地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離（工学的に重要なのは、濃い灰色の部分の地震の記録である。モーメントマグニチュードが小さすぎたり、断層最短距離が遠すぎる淡い灰色の部分の地震の記録は回帰分析に用いていない。）

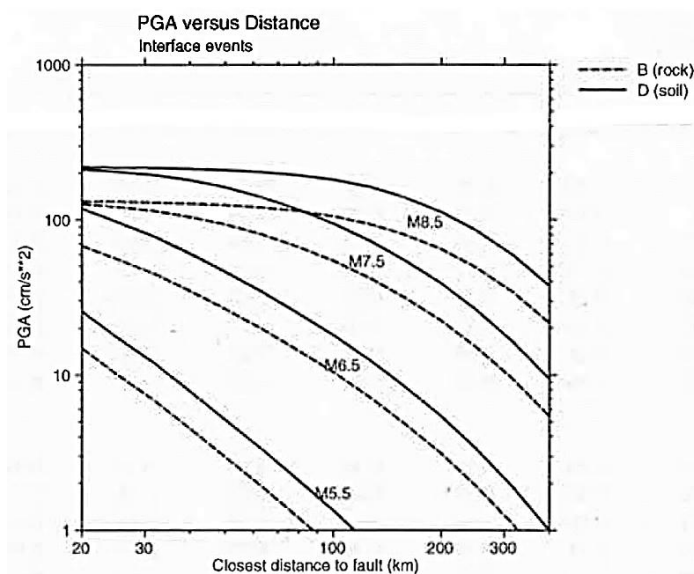


Figure 9. Peak ground acceleration for rock (NEHRP B) and soil (NEHRP D) for interface events (depth = 20 km) of M 5.5, 6.5, 7.5, and 8.5 (top frame) and in-slab events (depth = 50 km) of M 5.5, 6.5, and 7.5. Nonlinear soil response is assumed for records with $PGA_{rx} > 100 \text{ cm/sec}^2$.

図2.2.4-2 Atkinson and Boore (2003) によるプレート間地震の最大加速度の例

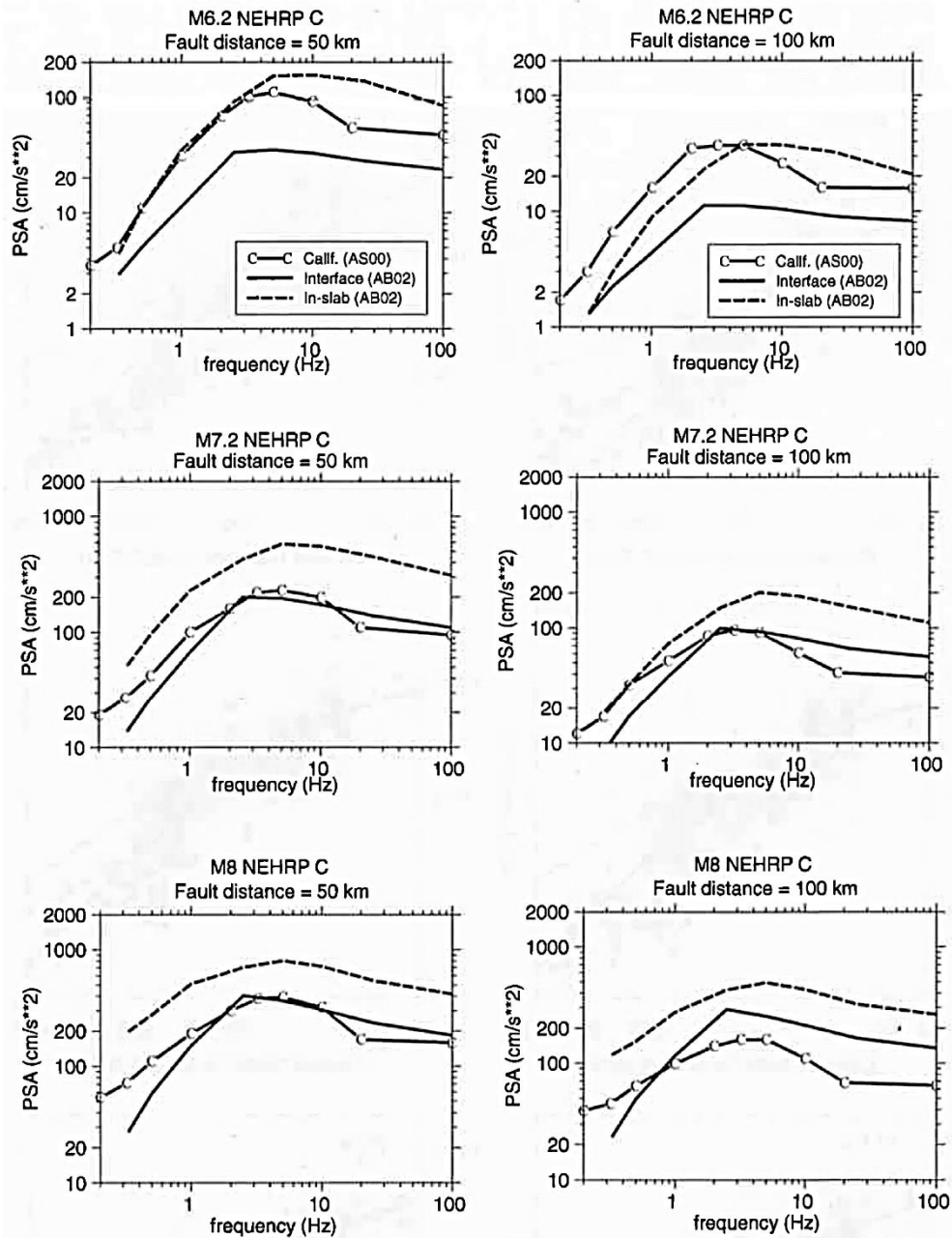


Figure 18. Predicted spectra for earthquakes of M 6.2 (top frames), 7.2 (middle frames), and 8.0 (lower frames), at distances of 50 km (left) and 100 km (right) from the fault, for NEHRP C site conditions, for interface (solid lines) and in-slab (dashed lines) events. Corresponding predictions for shallow California earthquakes (from Atkinson and Silva, 2000) are denoted by lines with "C."

図2.2.4-3 Atkinson and Boore (2003) によるプレート間地震とスラブ内地震の擬似加速度応答スペクトルの例 (プレート間地震の擬似加速度スペクトルは実線で、スラブ内地震の擬似加速度スペクトルは破線で示されている。Cのついた線はカルフォルニアの浅い地震の擬似加速度スペクトルである。)

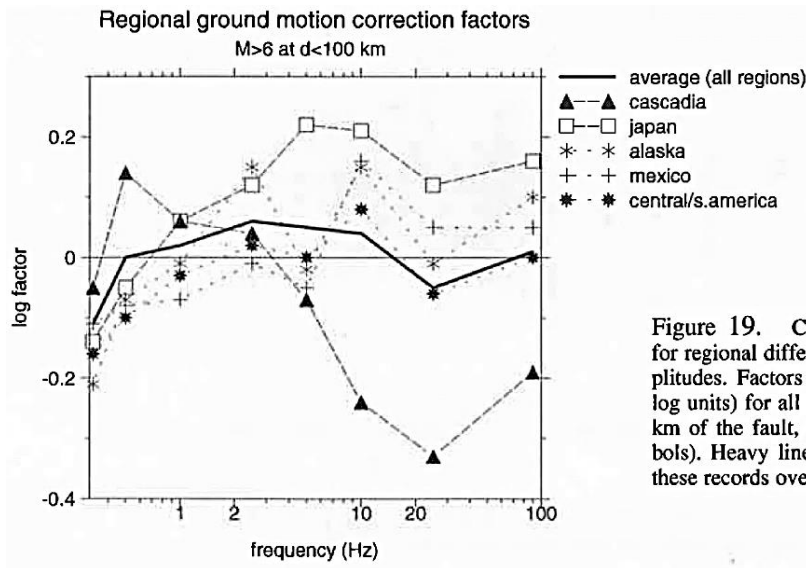


Figure 19. Correction factors to account for regional differences in ground-motion amplitudes. Factors are the average residual (in log units) for all records of $M \geq 6$ within 100 km of the fault, within a given region (symbols). Heavy lines show average residual for these records over all regions.

図2.2.4-4 Atkinson and Boore (2003) による擬似加速度応答スペクトルの地域性

表2.2.4-1 Atkinson and Boore (2003) の地震動予測式の sl

$$sl = 1.$$

for $PGA_{rx} \leq 100 \text{ cm/sec}^2$ or frequencies $\leq 1 \text{ Hz}$

$$sl = 1. - (f - 1) (PGA_{rx} - 100.) / 400.$$

for $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm/sec}^2$ ($1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$)

$$sl = 1. - (f - 1)$$

for $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm/sec}^2$ ($1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$)

$$sl = 1. - (PGA_{rx} - 100.) / 400.$$

for $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm/sec}^2$ ($f \geq 2 \text{ Hz}$ and PGA)

$$sl = 0.$$

for $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm/sec}^2$ ($f \geq 2 \text{ Hz}$ and PGA);

PGA_{rx} is predicted PGA on rock (NEHRP B)

(2) Zhao *et al.* (2006)

Zhao *et al.* (2006) は、日本で起ったプレート間地震を対象に、はじめに 25 km より浅い地震による記録を用いて、最大加速度および減衰定数 5% の加速度応答スペクトルの統計処理を行った。統計処理に用いた回帰式は、

$$\ln Y(T) = aM_w + bX - \ln r + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL}\ln X + C_k + \xi + \eta \quad (2.2.4-2)$$

$$r = X + c \exp(dM_w) \quad (2.2.4-3)$$

$$\delta_h = \begin{cases} 0, & h < h_c \\ 1, & h \geq h_c \end{cases} \quad (2.2.4-4)$$

である。ここに、 Y は対象観測点における最大加速度もしくは加速度応答スペクトルで、単位は g (重力加速度)、 T は周期 (s)、 X は断層最短距離、 M_w はモーメントマグニチュード。 F_R は内陸地殻内の逆断層地震の場合の係数、 S_I はプレート間地震の場合の係数、 S_S は海洋プレート内地震の場合の係数である。 S_{SL} はマグニチュードに依存しない海洋プレート内地震の場合複雑なパスの影響を補正するための係数である。 C_k は地盤特性の項である。 h_c は深さの定数である。 δ_h は深さ h が h_c より大きい場合 1 となり、 h が h_c より小さい場合は 0 になる。 h が 125 km より深い場合は、 $h=125$ km となる。 a 、 b 、 c 、 d 、 e は回帰係数である。また、 $\xi_{i,j}$ は地震間の誤差、 η_i は地震内の誤差である。

表 2.2.4-2 と表 2.2.4-3 に回帰係数を、図 2.2.4-5 に加速度応答スペクトルの例を示す。

表2.2.4-2 Zhao *et al.* (2006) が日本のプレート間地震の記録を統計処理して求めた回帰係数

Table 4
Coefficients for Source and Path Terms of the Models in the Present Study

Period (sec)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>S_R</i>	<i>S_I</i>	<i>S_S</i>	<i>S_{SL}</i>
PGA	1.101	-0.00564	0.0055	1.080	0.01412	0.251	0.000	2.607	-0.528
0.05	1.076	-0.00671	0.0075	1.060	0.01463	0.251	0.000	2.764	-0.551
0.10	1.118	-0.00787	0.0090	1.083	0.01423	0.240	0.000	2.156	-0.420
0.15	1.134	-0.00722	0.0100	1.053	0.01509	0.251	0.000	2.161	-0.431
0.20	1.147	-0.00659	0.0120	1.014	0.01462	0.260	0.000	1.901	-0.372
0.25	1.149	-0.00590	0.0140	0.966	0.01459	0.269	0.000	1.814	-0.360
0.30	1.163	-0.00520	0.0150	0.934	0.01458	0.259	0.000	2.181	-0.450
0.40	1.200	-0.00422	0.0100	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506
0.50	1.250	-0.00338	0.0060	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554
0.60	1.293	-0.00282	0.0030	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575
0.70	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.220	-0.146	2.654	-0.572
0.80	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.480	-0.540
0.90	1.433	-0.00232	0.0020	1.109	0.00972	0.220	-0.206	2.332	-0.522
1.00	1.479	-0.00220	0.0020	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509
1.25	1.551	-0.00207	0.0020	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469
1.50	1.621	-0.00224	0.0020	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379
2.00	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248
2.50	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221
3.00	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263
4.00	1.826	-0.00195	0.0040	1.044	0.00590	0.353	-0.390	0.561	-0.169
5.00	1.825	-0.00237	0.0050	1.065	0.00510	0.248	-0.498	0.225	-0.120

表2.2.4-3 Zhao *et al.* (2006) が日本のプレート間地震の記録を統計処理して求めた回帰係数

Table 5
Coefficients for Site Class Terms and Prediction Error

Period (sec)	<i>C_H</i>	<i>C₁</i>	<i>C₂</i>	<i>C₃</i>	<i>C₄</i>	σ	τ	σ_T
PGA	0.293	1.111	1.344	1.355	1.420	0.604	0.398	0.723
0.05	0.939	1.684	1.793	1.747	1.814	0.640	0.444	0.779
0.10	1.499	2.061	2.135	2.031	2.082	0.694	0.490	0.849
0.15	1.462	1.916	2.168	2.052	2.113	0.702	0.460	0.839
0.20	1.280	1.669	2.085	2.001	2.030	0.692	0.423	0.811
0.25	1.121	1.468	1.942	1.941	1.937	0.682	0.391	0.786
0.30	0.852	1.172	1.683	1.808	1.770	0.670	0.379	0.770
0.40	0.365	0.655	1.127	1.482	1.397	0.659	0.390	0.766
0.50	-0.207	0.071	0.515	0.934	0.955	0.653	0.389	0.760
0.60	-0.705	-0.429	-0.003	0.394	0.559	0.653	0.401	0.766
0.70	-1.144	-0.866	-0.449	-0.111	0.188	0.652	0.408	0.769
0.80	-1.609	-1.325	-0.928	-0.620	-0.246	0.647	0.418	0.770
0.90	-2.023	-1.732	-1.349	-1.066	-0.643	0.653	0.411	0.771
1.00	-2.451	-2.152	-1.776	-1.523	-1.084	0.657	0.410	0.775
1.25	-3.243	-2.923	-2.542	-2.327	-1.936	0.660	0.402	0.773
1.50	-3.888	-3.548	-3.169	-2.979	-2.661	0.664	0.408	0.779
2.00	-4.783	-4.410	-4.039	-3.871	-3.640	0.669	0.414	0.787
2.50	-5.444	-5.049	-4.698	-4.496	-4.341	0.671	0.411	0.786
3.00	-5.839	-5.431	-5.089	-4.893	-4.758	0.667	0.396	0.776
4.00	-6.598	-6.181	-5.882	-5.698	-5.588	0.647	0.382	0.751
5.00	-6.752	-6.347	-6.051	-5.873	-5.798	0.643	0.377	0.745

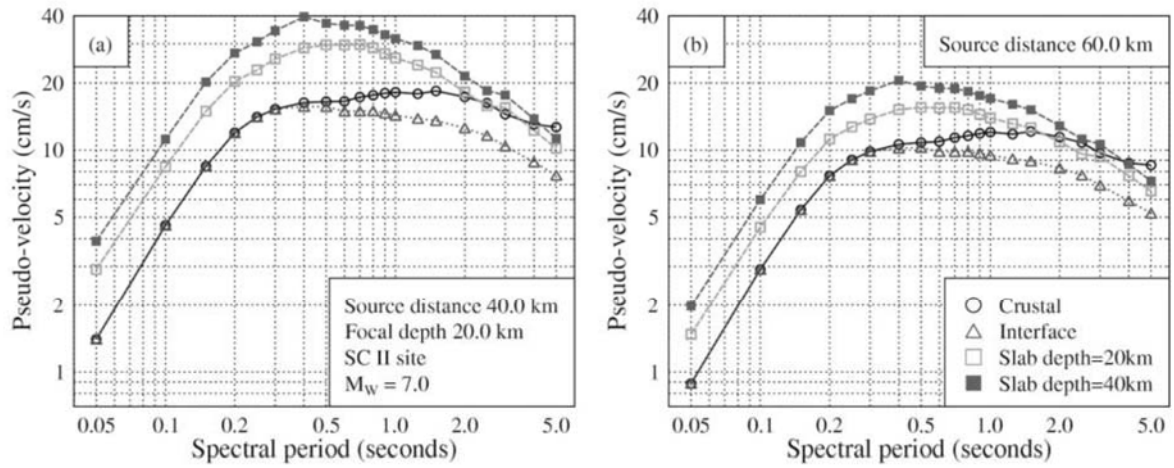


Figure 7. Pseudovelocity spectra calculated for crustal strike-slip and normal events, interface events, and slab events with a magnitude of 7.0 and a depth of 20 km for SC II sites at a source distance of (a) 40 km and (b) 60 km. The spectra from a slab event at a depth of 40 km are also presented for comparison.

図2.2.4-5 Zhao *et al.* (2006) による日本のプレート間地震の加速度応答スペクトルの例

(3) Arroyo *et al.* (2010)

Arroyo *et al.* (2010) は、Garcia *et al.* (2009) によるメキシコのプレート間地震の記録 (1985年～2004年に発生したモーメントマグニチュード5.0以上の地震による記録) を用いて、最大加速度と加速度応答スペクトルのGMPEを作成した。

図2.2.4-6に、Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震の震央 (○印) と観測点 (▲印) を、図2.2.4-7に、地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離を示す。

Arroyo *et al.* (2010) が用いたGMPEは、

$$SA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M_w + \alpha_3(T) \ln \left[\frac{E_1(\alpha_4(T)R) - E_1(\alpha_4(T)\sqrt{R^2 + r_0^2})}{r_0^2} \right] \quad (2.2.4-5)$$

である。ここに、 $\alpha_i(T)$ は回帰係数、 M_w はモーメントマグニチュード、 R は断層面までの最短距離、 r_0 は

$$r_0^2 = 1.4447 \times 10^{-5} e^{2.3026M_w} \quad (2.2.4-6)$$

である。

表2.2.4-4に、Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数を示す。また、図2.2.4-8に、Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例を示す。

Fig. 1 Map of central Mexico showing epicenters (circles) and stations (triangles) used in this study. Filled symbols represent strong-motion stations (accelerographs) and open symbols represent broadband stations. The grey square represents ACAP station (see text). MVB Mexican Volcanic Belt (shaded grey). MAT Middle American Trench. States mentioned in the text are labeled

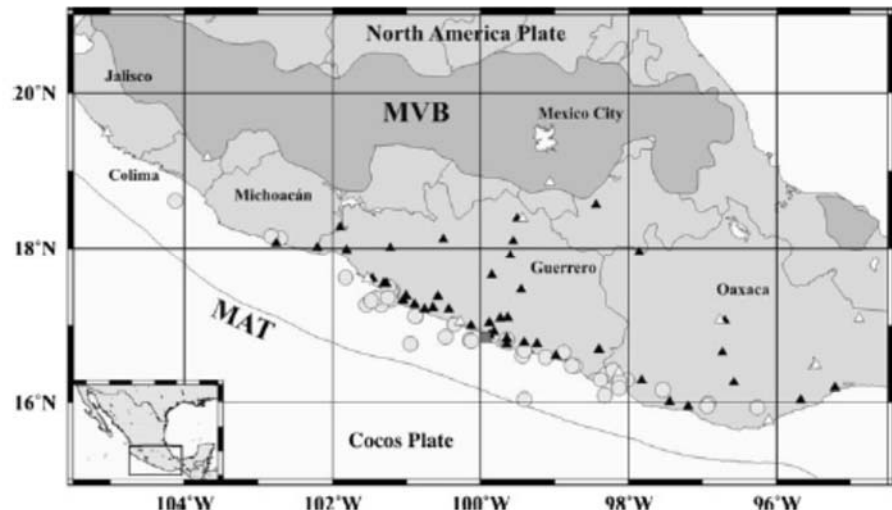


図2.2.4-6 Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震の震央 (○印) と観測点 (▲印)

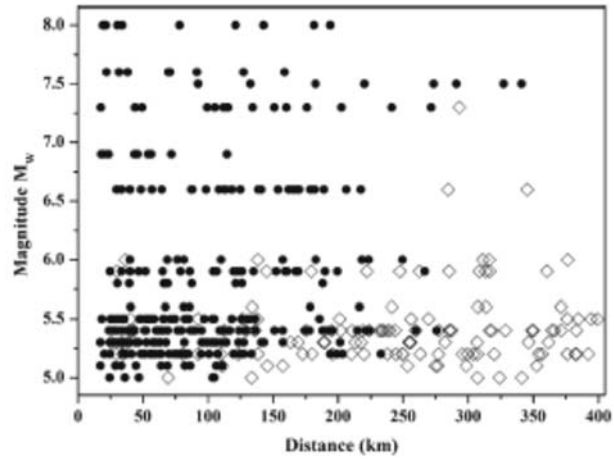


Fig. 2 Magnitude versus distance plot summarizing the data used in this study. Symbols indicate the type of data available. Circles accelerograms, open diamonds broadband velocity data

図2.2.4-7 Arroyo *et al.* (2010) がメキシコのプレート間地震のGMPEを作成するのに用いた地震のモーメントマグニチュードと断層最短距離

表2.2.4-4 Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの回帰係数

Table 2 Regression parameters of the proposed strong ground-motion model

T (s)	$\alpha_1(T)$	$\alpha_2(T)$	$\alpha_3(T)$	$\alpha_4(T)$	γ_e	b	σ	σ_e	σ_r
PGA	2.4862	0.9392	0.5061	0.0150	0.3850	-0.0181	0.7500	0.4654	0.5882
0.040	3.8123	0.8636	0.5578	0.0150	0.3962	-0.0254	0.8228	0.5179	0.6394
0.045	4.0440	0.8489	0.5645	0.0150	0.3874	-0.0285	0.8429	0.5246	0.6597
0.050	4.1429	0.8580	0.5725	0.0150	0.3731	-0.0181	0.8512	0.5199	0.6740
0.055	4.3092	0.8424	0.5765	0.0150	0.3746	0.0004	0.8583	0.5253	0.6788
0.060	4.3770	0.8458	0.5798	0.0150	0.4192	-0.0120	0.8591	0.5563	0.6547
0.065	4.5185	0.8273	0.5796	0.0150	0.3888	-0.0226	0.8452	0.5270	0.6607
0.070	4.4591	0.8394	0.5762	0.0150	0.3872	-0.0346	0.8423	0.5241	0.6594
0.075	4.5939	0.8313	0.5804	0.0150	0.3775	-0.0241	0.8473	0.5205	0.6685
0.080	4.4832	0.8541	0.5792	0.0150	0.3737	-0.0241	0.8421	0.5148	0.6664
0.085	4.5062	0.8481	0.5771	0.0150	0.3757	-0.0138	0.8344	0.5115	0.6593
0.090	4.4648	0.8536	0.5742	0.0150	0.4031	-0.0248	0.8304	0.5273	0.6415
0.095	4.3940	0.8580	0.5712	0.0150	0.4097	0.0040	0.8294	0.5309	0.6373
0.100	4.3391	0.8620	0.5666	0.0150	0.3841	-0.0045	0.8254	0.5116	0.6477
0.120	4.0505	0.8933	0.5546	0.0150	0.3589	-0.0202	0.7960	0.4768	0.6374
0.140	3.5599	0.9379	0.5350	0.0150	0.3528	-0.0293	0.7828	0.4650	0.6298
0.160	3.1311	0.9736	0.5175	0.0150	0.3324	-0.0246	0.7845	0.4523	0.6409
0.180	2.7012	1.0030	0.4985	0.0150	0.3291	-0.0196	0.7717	0.4427	0.6321
0.200	2.5485	0.9988	0.4850	0.0150	0.3439	-0.0250	0.7551	0.4428	0.6116
0.220	2.2699	1.0125	0.4710	0.0150	0.3240	-0.0205	0.7431	0.4229	0.6109
0.240	1.9130	1.0450	0.4591	0.0150	0.3285	-0.0246	0.7369	0.4223	0.6039
0.260	1.7181	1.0418	0.4450	0.0150	0.3595	-0.0220	0.7264	0.4356	0.5814
0.280	1.4039	1.0782	0.4391	0.0150	0.3381	-0.0260	0.7209	0.4191	0.5865
0.300	1.1080	1.1038	0.4287	0.0150	0.3537	-0.0368	0.7198	0.4281	0.5787
0.320	1.0652	1.0868	0.4208	0.0150	0.3702	-0.0345	0.7206	0.4384	0.5719
0.340	0.8319	1.1088	0.4142	0.0150	0.3423	-0.0381	0.7264	0.4250	0.5891
0.360	0.4965	1.1408	0.4044	0.0150	0.3591	-0.0383	0.7255	0.4348	0.5808
0.380	0.3173	1.1388	0.3930	0.0150	0.3673	-0.0264	0.7292	0.4419	0.5800
0.400	0.2735	1.1533	0.4067	0.0134	0.3956	-0.0317	0.7272	0.4574	0.5653
0.450	0.0990	1.1662	0.4127	0.0117	0.3466	-0.0267	0.7216	0.4249	0.5833
0.500	-0.0379	1.2206	0.4523	0.0084	0.3519	-0.0338	0.7189	0.4265	0.5788
0.550	-0.3512	1.2445	0.4493	0.0076	0.3529	-0.0298	0.7095	0.4215	0.5707
0.600	-0.6897	1.2522	0.4421	0.0067	0.3691	-0.0127	0.7084	0.4304	0.5627
0.650	-0.6673	1.2995	0.4785	0.0051	0.3361	-0.0192	0.7065	0.4096	0.5756
0.700	-0.7154	1.3263	0.5068	0.0034	0.3200	-0.0243	0.7070	0.3999	0.5830
0.750	-0.7015	1.2994	0.5056	0.0029	0.3364	-0.0122	0.7092	0.4113	0.5778
0.800	-0.8581	1.3205	0.5103	0.0023	0.3164	-0.0337	0.6974	0.3923	0.5766
0.850	-0.9712	1.3375	0.5201	0.0018	0.3435	-0.0244	0.6906	0.4047	0.5596
0.900	-1.0970	1.3532	0.5278	0.0012	0.3306	-0.0275	0.6923	0.3980	0.5665
0.950	-1.2346	1.3687	0.5345	0.0007	0.3264	-0.0306	0.6863	0.3921	0.5632
1.000	-1.2600	1.3652	0.5426	0.0001	0.3194	-0.0183	0.6798	0.3842	0.5608
1.100	-1.7687	1.4146	0.5342	0.0001	0.3336	-0.0229	0.6701	0.3871	0.5471
1.200	-2.1339	1.4417	0.5263	0.0001	0.3445	-0.0232	0.6697	0.3931	0.5422
1.300	-2.4122	1.4577	0.5201	0.0001	0.3355	-0.0231	0.6801	0.3939	0.5544
1.400	-2.5442	1.4618	0.5242	0.0001	0.3759	-0.0039	0.6763	0.4146	0.5343
1.500	-2.8509	1.4920	0.5220	0.0001	0.3780	-0.0122	0.6765	0.4159	0.5335
1.600	-3.0887	1.5157	0.5215	0.0001	0.3937	-0.0204	0.6674	0.4187	0.5197
1.700	-3.4884	1.5750	0.5261	0.0001	0.4130	-0.0208	0.6480	0.4164	0.4965
1.800	-3.7195	1.5966	0.5255	0.0001	0.3967	-0.0196	0.6327	0.3985	0.4914

Table 2 (continued)

T (s)	$\alpha_1(T)$	$\alpha_2(T)$	$\alpha_3(T)$	$\alpha_4(T)$	γ_e	b	σ	σ_e	σ_r
1.900	-4.0141	1.6162	0.5187	0.0001	0.4248	-0.0107	0.6231	0.4062	0.4726
2.000	-4.1908	1.6314	0.5199	0.0001	0.3967	-0.0133	0.6078	0.3828	0.4721
2.500	-5.1104	1.7269	0.5277	0.0001	0.4302	-0.0192	0.6001	0.3936	0.4530
3.000	-5.5926	1.7515	0.5298	0.0001	0.4735	-0.0319	0.6029	0.4148	0.4375
3.500	-6.1202	1.8077	0.5402	0.0001	0.4848	-0.0277	0.6137	0.4273	0.4405
4.000	-6.5318	1.8353	0.5394	0.0001	0.5020	-0.0368	0.6201	0.4393	0.4376
4.500	-6.9744	1.8685	0.5328	0.0001	0.5085	-0.0539	0.6419	0.4577	0.4500
5.000	-7.1389	1.8721	0.5376	0.0001	0.5592	-0.0534	0.6701	0.5011	0.4449

Fig. 10 Observed (*open circles*) and estimated SA (*curves; same symbols as in Fig. 9*) as a function of distance for the same periods as in Fig. 9 and magnitudes M_w 6.0 and 8.0

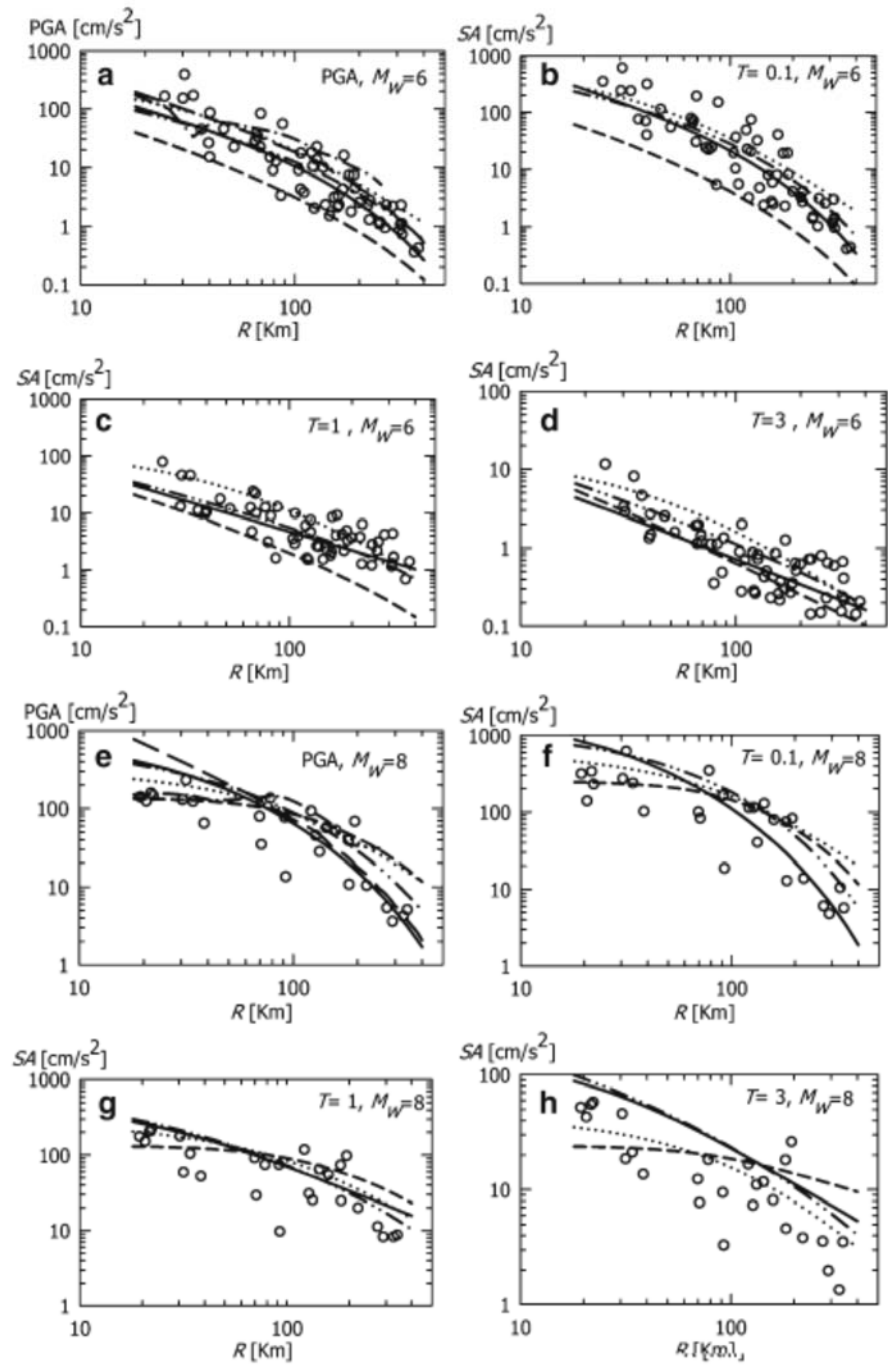


図2.2.4-8 Arroyo *et al.* (2010) によるメキシコのプレート間地震のGMPEの例

(4) Si *et al.* (2013)

(a) 用いたデータ

1983年5月26日日本海中部地震から2011年4月11日浜通り地震までの34地震 ($5.5 \leq M_w \leq 9.1$), 水平・上下成分それぞれ600記録のデータベースを構築した. 各強震記録には水平成分ではアメリカ NGA のデータベースに準じた GMRotI50 (平均加速度応答スペクトル), 上下動成分では, 通常の加速度応答スペクトルをデータとして整備した.

距離の定義については, 司・翠川 (1999) と同様に断層最短距離, 等価震源距離の双方を用いた. データの距離範囲についても司・翠川 (1999) と同様とした.

(b) 地震のタイプ

司・翠川 (1999) と同様に, 地殻内・プレート間・プレート内地震との地震タイプを考慮した. ただし, 地震タイプと震源深と相関性があるとの説があることから, 統計上では, プレート内地震, プレート間地震の各々について深さの係数を求めてその平均を最終結果とするなどの工夫をしてパラメータ間の相関関係による影響の回避を図っている.

(c) 近距離での頭打ち

硬質岩盤上のデータに限定しているため, 近距離での頭打ちを決められるようなデータを持ち合わせていないため, 0.6秒より長周期成分については司・翠川 (1999) の PGV, 0.3秒より短周期成分について司・翠川 (1999) の PGA で用いられている係数をそれぞれ用いた. また, その間の成分については両者を線形補間した値とした.

(d) 距離減衰

既往の研究から, 震源がやや深い地震の場合には, 浅い地震に比べて距離減衰の傾きが大きくなる傾向が見られるために, 震源深さ 30km を境界に幾何減衰を表す係数を変化させている. これにより, 震源がやや深い地震での評価精度を向上させている.

(e) 地盤特性

KiK-net の観測点のうち, 地中地震計が Vs2km/s の層に設置されている観測点をターゲットに地盤同定などにより基盤地震波を求め, その他硬質岩盤で観測された地震波をもとに, 距離減衰式で用いる地震動パラメータを硬質岩盤上に定義した. 最終的には S 波速度の分かっている地震記録との比較により, 距離減衰式の定義されている地盤について検討を行っている.

(f) ばらつき

回帰誤差（地震内誤差と地震間誤差の双方を含めたもの）は、全地震における S 波速度の分かっている地点に対して求められており、常用対数で 0.37 より小さい値となっている。ただし、地盤が硬いほどばらつきが小さくなる傾向を確認されている。

(g) 回帰モデル

$$\begin{aligned} \log SA(T) &= b(T) + g(X) - kX + \varepsilon(T) \\ g(X) &= \begin{cases} -\log(X + C); D \leq 30km \\ 0.6\log(1.7D + C) - 1.6\log(X + C); D > 30km \ \& \ X \geq 1.7D \end{cases} \\ C &= 0.0055 \cdot 10^{0.5M_w}, T < 0.3s \\ &= 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w}, T \geq 0.6s \\ k &= 0.003, T < 0.3s \\ &= 0.002, T \geq 0.6s \end{aligned} \tag{2.2.4-7}$$

ただし

$$b(T) = \begin{cases} a_1(T)M_w + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_1(T) \\ M \leq 8.3 \text{ or } M \leq 7.5 \text{ if } T \geq 2s \\ a_2(T)M_w + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_2(T) \\ M > 8.3 \text{ or } M > 7.5 \text{ if } T \geq 2s \end{cases}$$

ただし、 $SA(T)$ は GMRot150、 X は断層最短距離、 D は震源断層の平均的な深さ、 S_i は地震タイプを示す。なお、回帰係数は表 2.2.4-5 に示す。

表2.2.4-5 Si *et al.* (2013) によるGMPEの回帰係数

T	$a1$	h	d		ε_1
			Intra-plate	Inter-plate	
PGA	0.5715	0.0090	0.1532	-0.0794	-0.3347
0.10	0.5435	0.0109	0.1125	-0.1026	0.1060
0.15	0.5632	0.0100	0.1346	-0.1055	0.0569
0.20	0.5646	0.0093	0.1871	-0.0605	0.0250
0.25	0.6001	0.0089	0.1659	-0.0946	-0.2238
0.30	0.6246	0.0084	0.1608	-0.0775	-0.4348
0.40	0.6296	0.0078	0.1757	-0.0838	-0.5861
0.50	0.6300	0.0073	0.1718	-0.0726	-0.6950
0.60	0.6261	0.0069	0.1704	-0.0637	-0.7698
0.70	0.6343	0.0065	0.1568	-0.0583	-0.8798
0.80	0.6428	0.0062	0.1730	-0.0347	-0.9966
0.90	0.6700	0.0060	0.1736	-0.0558	-1.2224
1.00	0.6834	0.0058	0.1800	-0.0704	-1.3557
1.50	0.7352	0.0048	0.2017	-0.0871	-1.8910
2.00	0.7843	0.0042	0.1357	-0.1280	-2.3476
2.50	0.8306	0.0037	0.0826	-0.1513	-2.7504
3.00	0.8422	0.0033	0.0728	-0.1270	-2.9291
5.00	0.9647	0.0022	0.0025	-0.2890	-3.9748
10.00	0.9696	0.0006	0.0480	-0.2778	-4.5504
PGV	0.6644	0.0066	0.0885	-0.1350	-2.0972

T	$a2$	ε_2
PGA	-0.0618	4.8992
0.10	0.0149	4.4289
0.15	0.0030	4.6353
0.20	-0.0187	4.8599
0.25	-0.0802	5.3885
0.30	-0.0496	5.1429
0.40	-0.0801	5.3208
0.50	-0.1383	5.7114
0.60	-0.1246	5.4563
0.70	-0.1507	5.6355
0.80	-0.2196	6.1928
0.90	-0.2921	6.7926
1.00	-0.3291	7.0575
1.50	-0.3164	6.8051
2.00	0.1482	2.5895
2.50	0.1734	2.2843
3.00	0.1825	2.1437
5.00	0.1626	2.0980
10.00	0.0831	2.3704
PGV	-0.2951	5.8245

※ d : 地殻内地震の場合は0

(5) Abrahamson *et al.* (2016)

Abrahamson *et al.* (2016) は、63のスラブ内地震 ($5.0 \leq M \leq 7.9$) による2590の記録と、43のプレート間地震 ($6.0 \leq M \leq 8.4$) による953の記録を用いて、GMPEを作成した。距離は300 km以内で、モーメントマグニチュードが8を超えるとマグニチュードのスケールリングが変わることも考慮している。

図2.2.4-9に、Abrahamson *et al.* (2016) がプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの作成のために用いた記録のモーメントマグニチュードと距離を示す。

Abrahamson *et al.* (2016) が採用したGMPEは、

$$\ln(Sa_{interface}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{100}, V_{S30}) \quad (2.2.4-8)$$

$$\ln(Sa_{slab}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{hypo} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{hypo} + \theta_{10} F_{event} + f_{mag}(M) + f_{depth}(Z_h) + f_{FABA}(R_{hypo}) + f_{site}(PGA_{100}, V_{S30}) \quad (2.2.4-9)$$

である。ここに、

Sa : 加速度応答スペクトル (単位はg: 重力加速度)

M : モーメントマグニチュード

R_{rup} : 断層最短距離 (km)

R_{hypo} : 震源距離 (km)

Z_h : 震源深さ (km)

$$F_{event} = \begin{cases} 0 & \text{プレート間地震のとき} \\ 1 & \text{スラブ内地震のとき} \end{cases}$$

$$F_{FABA} = \begin{cases} 0 & \text{前弧もしくは不明のサイトのとき} \\ 1 & \text{背弧のサイトのとき} \end{cases}$$

である。また、マグニチュードの項は、

$$f_{mag}(M) = \begin{cases} \theta_4(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_3(10 - M)^2 & \text{for } M \leq C_1 + \Delta C_1 \\ \theta_5(M - (C_1 + \Delta C_1)) + \theta_3(10 - M)^2 & \text{for } M > C_1 + \Delta C_1 \end{cases} \quad (2.2.4-10)$$

である。ここに、 $C_1=7.8$ である。 ΔC_1 はマグニチュードのスケールリングが変わることを考慮する回帰係数で、はじめは0.0であるが、巨大地震の記録から、周期依存の値で表されることになった。震源深さの項は、

$$f_{depth}(Z_h) = \theta_{11}(\min(Z_h, 120) - 60)F_{event} \quad (2.2.4-11)$$

で、前弧/背弧の項は、

$$f_{FABA}(R) = \begin{cases} \left[\theta_7 + \theta_8 \text{Ln} \left(\frac{\max(R_{\text{hypo}}, 85)}{40} \right) \right] F_{FABA} & \text{For } F \text{ event} = 1 \\ \left[\theta_{15} + \theta_{16} \text{Ln} \left(\frac{\max(R_{\text{rup}}, 100)}{40} \right) \right] F_{FABA} & \text{For } F \text{ event} = 0 \end{cases} \quad (2.2.4-12)$$

である。サイト特性の項は、

$$f_{\text{site}}(PGA_{1000}, V_{S30}) = \begin{cases} \theta_{12} \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) - b \text{Ln}(PGA_{1000} + c) + b \text{Ln} \left(PGA_{1000} + c \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right)^n \right) & \text{for } V_{S30} < V_{\text{lin}} \\ \theta_{12} \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) + b \text{Ln} \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}} \right) & \text{for } V_{S30} \geq V_{\text{lin}} \end{cases} \quad (2.2.4-13)$$

である。ここに、 PGA_{1000} は $VS30=1,000\text{m/s}$ のときの最大加速度PGAの中央値で、

$$V_S^* = \begin{cases} 1,000 & \text{for } V_{S30} > 1,000 \\ V_{S30} & \text{for } V_{S30} \leq 1,000 \end{cases} \quad (2.2.4-14)$$

である。

表2.2.4-6に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期によらない係数を、表2.2.4-7に、GMPEの回帰係数のうち周期による係数を示す。また、表2.2.4-8に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEで使用が推奨されている回帰係数 ΔC_1 を、図2.2.4-10に、Abrahamson *et al.* (2016) により用いることが推奨されている回帰係数 ΔC_1 の影響を示す。

図2.2.4-11に、Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEの例を示す。

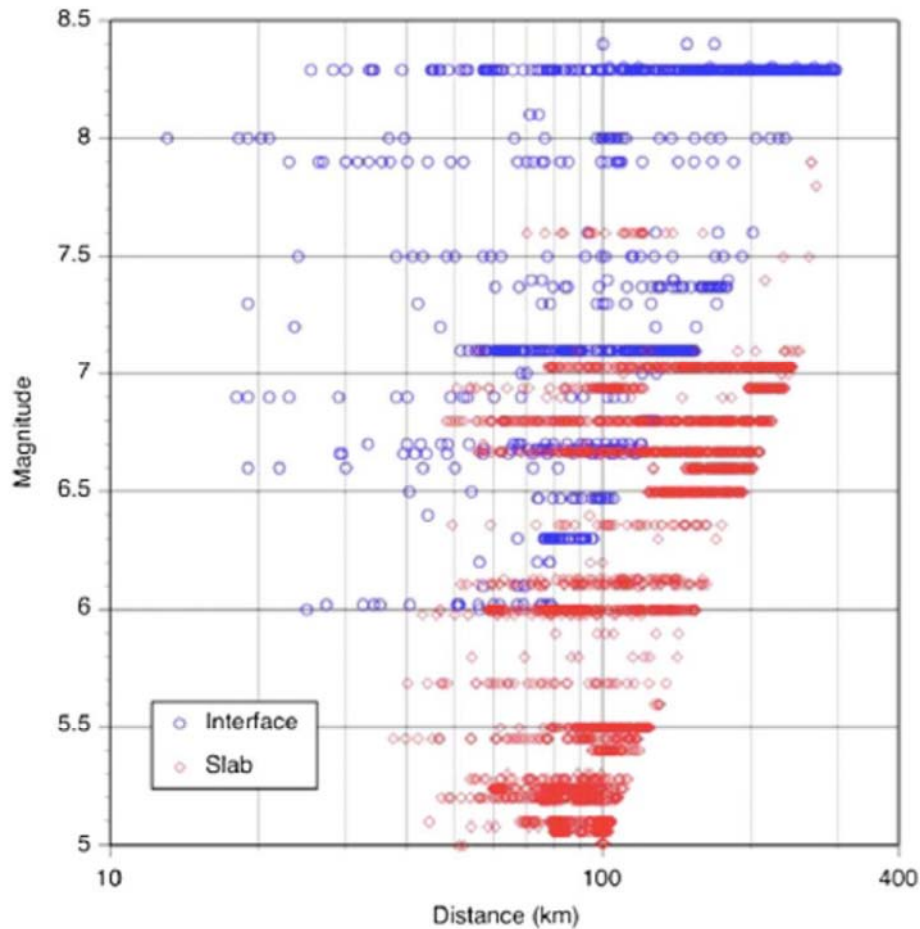


Figure 1. Distribution of magnitude and distance (interface events are plotted versus rupture distance; intraslab events, versus hypocentral distance) in the final data set used to develop the GMPE, prior to the 2010 Maule, Chile, and 2011 Tohoku, Japan, earthquakes.

図2.2.4-9 Abrahamson *et al.* (2016) がプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの作成のために用いた記録のモーメントマグニチュードと距離

表2.2.4-6 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期によらない係数

Table 2. Period-independent subduction model coefficients used in the regression analysis

Coefficient	Value over all periods
n	1.18
c	1.88
θ_3	0.1
θ_4	0.9
θ_5	0.0
θ_9	0.4
C_4	10

表2.2.4-7 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの回帰係数のうち周期による係数

Table 3. Regression coefficients for the median (g) subduction GMPE model

Period (s)	V_{bn}	b	θ_1	θ_2	θ_6	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	ϕ	τ	σ
0.000	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.020	865.1	-1.186	4.2203	-1.350	-0.0012	1.0988	-1.42	3.12	0.0130	0.980	-0.0135	-0.40	0.9996	-1.00	0.60	0.43	0.74
0.050	1053.5	-1.346	4.5371	-1.400	-0.0012	1.2536	-1.65	3.37	0.0130	1.288	-0.0138	-0.40	1.1030	-1.18	0.60	0.43	0.74
0.075	1085.7	-1.471	5.0733	-1.450	-0.0012	1.4175	-1.80	3.37	0.0130	1.483	-0.0142	-0.40	1.2732	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.100	1032.5	-1.624	5.2892	-1.450	-0.0012	1.3997	-1.80	3.33	0.0130	1.613	-0.0145	-0.40	1.3042	-1.36	0.60	0.43	0.74
0.150	877.6	-1.931	5.4563	-1.450	-0.0014	1.3582	-1.69	3.25	0.0130	1.882	-0.0153	-0.40	1.2600	-1.30	0.60	0.43	0.74
0.200	748.2	-2.188	5.2684	-1.400	-0.0018	1.1648	-1.49	3.03	0.0129	2.076	-0.0162	-0.35	1.2230	-1.25	0.60	0.43	0.74
0.250	654.3	-2.381	5.0594	-1.350	-0.0023	0.9940	-1.30	2.80	0.0129	2.248	-0.0172	-0.31	1.1600	-1.17	0.60	0.43	0.74
0.300	587.1	-2.518	4.7945	-1.280	-0.0027	0.8821	-1.18	2.59	0.0128	2.348	-0.0183	-0.28	1.0500	-1.06	0.60	0.43	0.74
0.400	503.0	-2.657	4.4644	-1.180	-0.0035	0.7046	-0.98	2.20	0.0127	2.427	-0.0206	-0.23	0.8000	-0.78	0.60	0.43	0.74
0.500	456.6	-2.669	4.0181	-1.080	-0.0044	0.5799	-0.82	1.92	0.0125	2.399	-0.0231	-0.19	0.6620	-0.62	0.60	0.43	0.74
0.600	430.3	-2.599	3.6055	-0.990	-0.0050	0.5021	-0.70	1.70	0.0124	2.273	-0.0256	-0.16	0.5800	-0.50	0.60	0.43	0.74
0.750	410.5	-2.401	3.2174	-0.910	-0.0058	0.3687	-0.54	1.42	0.0120	1.993	-0.0296	-0.12	0.4800	-0.34	0.60	0.43	0.74
1.000	400.0	-1.955	2.7981	-0.850	-0.0062	0.1746	-0.34	1.10	0.0114	1.470	-0.0363	-0.07	0.3300	-0.14	0.60	0.43	0.74
1.500	400.0	-1.025	2.0123	-0.770	-0.0064	-0.0820	-0.05	0.70	0.0100	0.408	-0.0493	0.00	0.3100	0.00	0.60	0.43	0.74
2.000	400.0	-0.299	1.4128	-0.710	-0.0064	-0.2821	0.12	0.70	0.0085	-0.401	-0.0610	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
2.500	400.0	0.000	0.9976	-0.670	-0.0064	-0.4108	0.25	0.70	0.0069	-0.723	-0.0711	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
3.000	400.0	0.000	0.6443	-0.640	-0.0064	-0.4466	0.30	0.70	0.0054	-0.673	-0.0798	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
4.000	400.0	0.000	0.0657	-0.580	-0.0064	-0.4344	0.30	0.70	0.0027	-0.627	-0.0935	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
5.000	400.0	0.000	-0.4624	-0.540	-0.0064	-0.4368	0.30	0.70	0.0005	-0.596	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
6.000	400.0	0.000	-0.9809	-0.500	-0.0064	-0.4586	0.30	0.70	-0.0013	-0.566	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
7.500	400.0	0.000	-1.6017	-0.460	-0.0064	-0.4433	0.30	0.70	-0.0033	-0.528	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74
10.000	400.0	0.000	-2.2937	-0.400	-0.0064	-0.4828	0.30	0.70	-0.0060	-0.504	-0.0980	0.00	0.3000	0.00	0.60	0.43	0.74

表2.2.4-8 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEで使用が推奨されている
 回帰係数 ΔC_1

Table 4. Recommended period-dependent ΔC_1 Values for Interface earthquakes based on residual analysis of the Maule and Tohoku earthquakes with the GMPE model

Period (s)	Lower value ¹	Central value ¹	Upper value ¹
PGA	0.0	0.2	0.4
0.3	0.0	0.2	0.4
0.5	-0.1	0.1	0.3
1.0	-0.2	0.0	0.2
2.0	-0.3	-0.1	0.1
3.0-10.0	-0.4	-0.2	0.0

Note: Lower, central, and upper values are included to capture the model's epistemic uncertainty.

¹For intermediate spectral periods, values should be interpolated based on log-spectral periods and linear values.

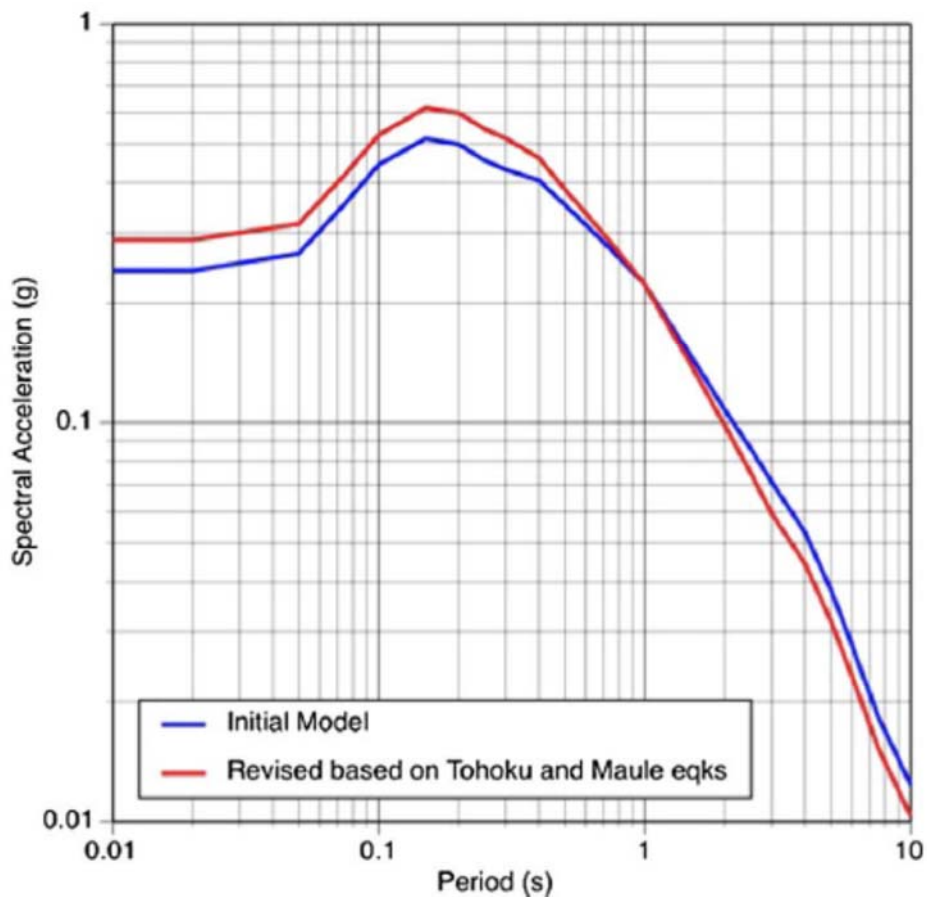


Figure 8. Effect of the recommended change (i.e., initial model versus revised model based on Tohoku and Maule earthquake data) in the ΔC_1 terms from Table 4.

図2.2.4-10 Abrahamson *et al.* (2016) により用いることが推奨されている回帰係数 ΔC_1 の影響

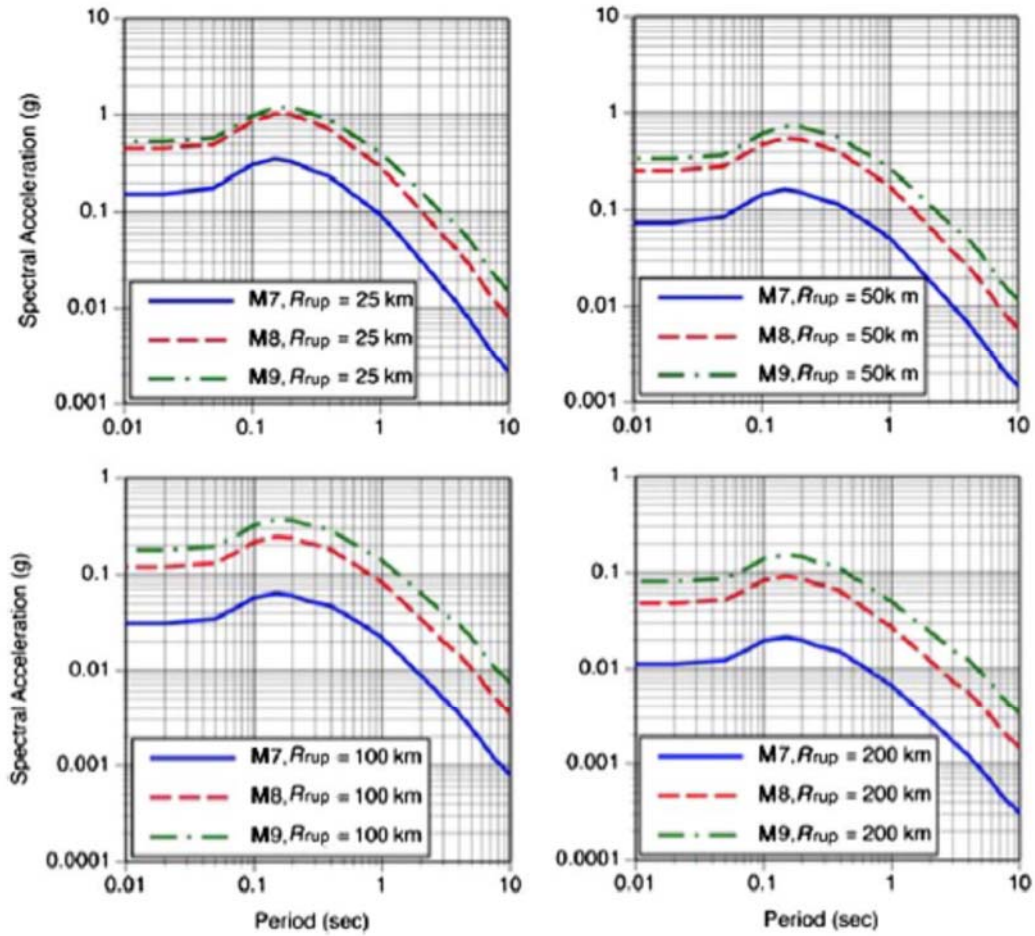


Figure 10. Examples of median spectra for interface earthquakes at sites with $V_{S30} = 760$ m/s located in the forearc region.

図2.2.4-11 Abrahamson *et al.* (2016) によるプレート間地震のGMPEの例

(6) Idini *et al.* (2017)

Idini *et al.* (2017) は、チリで発生した65のプレート間地震の369の観測記録および38のスラブ内地震の114の観測記録を用いてGMPEを作成した。

図2.2.4-12に、Idini *et al.* (2017) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた地震を示す。

Idini *et al.* (2017) が採用したGMPEは、

$$\log_{10} Y = F_F(M_w, H, F_{eve}) + F_D(R, M_w, F_{eve}) + F_S \quad (2.2.4-15)$$

である。ここに、 Y は最大加速度または加速度応答スペクトルで単位はg(重力加速度)、 F_F は震源項、 F_D は伝播特性、 F_S はサイト特性である。また、 M_w はモーメントマグニチュード、 H は震源深さ、 F_{eve} はプレート間地震のとき0でスラブ内地震のとき1、 R はスラブ内地震か $M_w < 7.7$ のプレート間地震のとき震源距離、 $M_w \geq 7.7$ のプレート間地震のとき断層最短距離である。

震源項 F_F は、

$$F_F(M_w, H, F_{eve}) = c_1 + c_2 M_w + c_8 (H - h_o) F_{eve} + \Delta f_M \quad (2.2.4-16)$$

である。ここに、

$$\Delta f_M = \begin{cases} c_9 M_w^2; & F_{eve} = 0 \\ \Delta c_1 + \Delta c_2 M_w; & F_{eve} = 1 \end{cases} \quad (2.2.4-17)$$

で、 $h_o = 50\text{km}$ である。また、 F_D は

$$F_D(R, M_w, F_{eve}) = g \log_{10}(R + R_o) + c_5 R \quad (2.2.4-18)$$

で、 $R_o = (1 - F_{eve}) c_6 \cdot 10^{c_7 [M_w - M_r]}$ 、 $g = (c_3 + c_4 [M_w - M_r] + \Delta c_3 F_{eve})$ 、 $M_r = 5$ である。 c_i ($i=1, 2, \dots, 9$) と Δc_j ($j=1, 2, 3$) は回帰係数である。

表2.2.4-9に、Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEの第一段階の回帰係数を、表2.2.4-10に第二段階の回帰係数を示す。また、図2.2.4-13に、Idini *et al.* (2017) によるチリのプレート間地震のGMPEの例を示す。

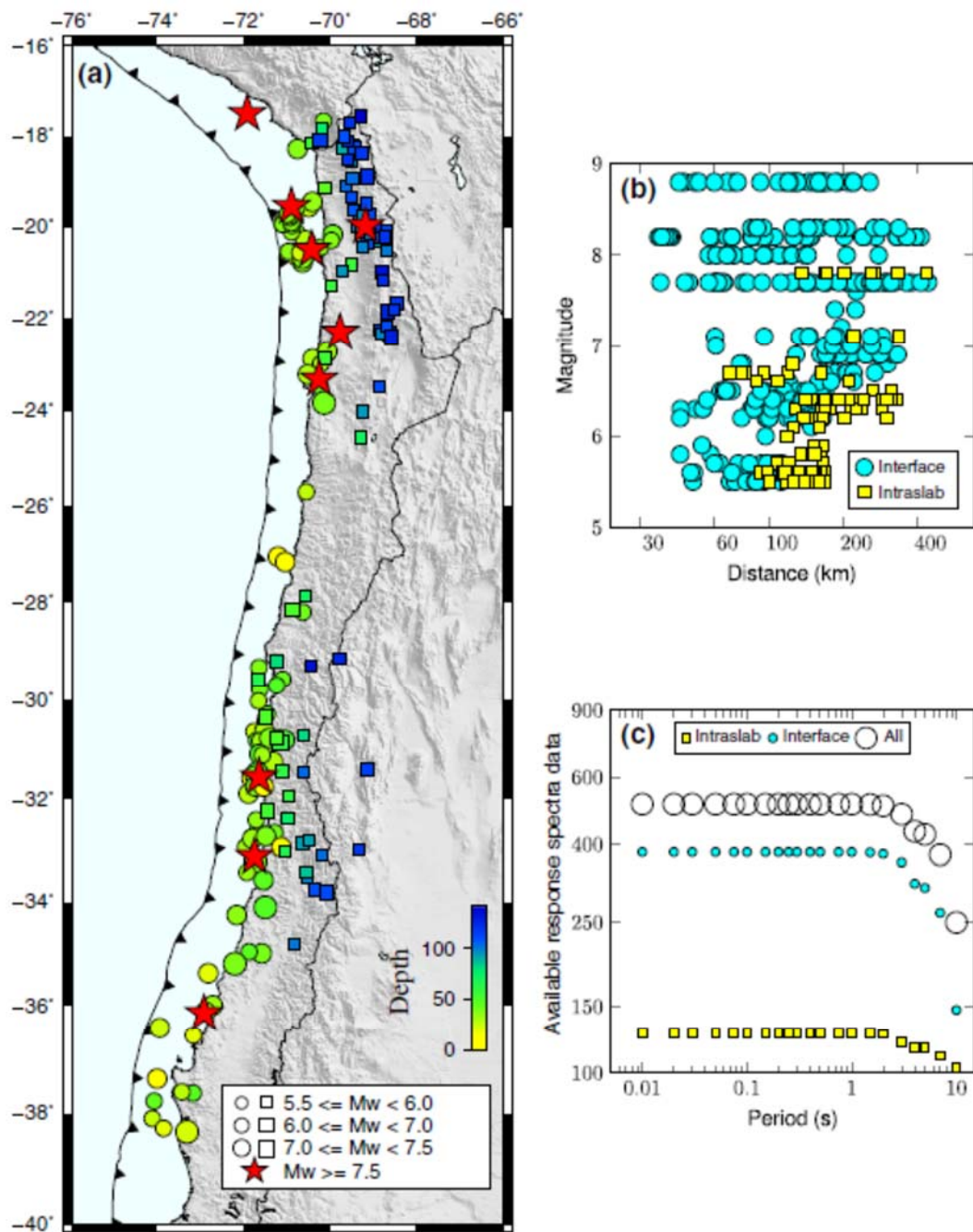


Fig. 1 The database used in this study. **a** Spatial distribution of the hypocenters. *Circles* indicate interface earthquakes and *squares* indicate intraslab earthquakes. **b** Magnitude versus distance of the data subset used in the GMPE derivation. **c** Total number of response spectra data used in the GMPE derivation at each period

図2.2.4-12 Idini *et al.* (2017) がチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPEを作成するために用いた地震

表2.2.4-9 Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPE (第一段階) の回帰係数

Table 4 Standard deviation and coefficient results of the first stage of the regression methodology

Period (s)	c_3	c_5	Δc_3	σ_r
PGA	-0.97558	-0.00174	-0.52745	0.232
0.01	-1.02993	-0.00175	-0.50466	0.231
0.02	-1.08567	-0.00176	-0.48043	0.233
0.03	-1.15951	-0.00176	-0.42490	0.235
0.05	-1.28640	-0.00178	-0.31239	0.241
0.07	-1.34644	-0.00181	-0.17995	0.251
0.10	-1.32353	-0.00182	-0.13208	0.255
0.15	-1.17687	-0.00183	-0.26451	0.255
0.20	-1.04508	-0.00182	-0.39105	0.268
0.25	-0.94363	-0.00178	-0.34348	0.264
0.30	-0.84814	-0.00173	-0.36695	0.260
0.40	-0.69278	-0.00166	-0.46301	0.263
0.50	-0.57899	-0.00161	-0.54098	0.261
0.75	-0.56887	-0.00158	-0.46266	0.252
1.00	-0.53282	-0.00154	-0.42314	0.247
1.50	-0.46263	-0.00145	-0.58519	0.246
2.00	-0.40594	-0.00139	-0.65999	0.245
3.00	-0.33957	-0.00137	-0.79004	0.231
4.00	-0.26479	-0.00137	-0.86545	0.228
5.00	-0.22333	-0.00137	-0.88735	0.232
7.50	-0.30346	-0.00131	-0.91259	0.231
10.00	-0.33771	-0.00117	-0.96363	0.204

表2.2.4-10 Idini *et al.* (2017) が求めたチリのプレート間地震とスラブ内地震のGMPE (第二段階) の回帰係数

Table 5 Standard deviation and coefficient results of the second stage of the regression methodology

Period (s)	c_1	c_2	c_9	c_8	Δc_1	Δc_2	σ_e	σ_f
PGA	-2.8548	0.7741	-0.03958	0.00586	2.5699	-0.4761	0.172	0.289
0.01	-2.8424	0.8052	-0.04135	0.00584	2.7370	-0.5191	0.173	0.288
0.02	-2.8337	0.8383	-0.04325	0.00583	2.9087	-0.5640	0.176	0.292
0.03	-2.8235	0.8838	-0.04595	0.00586	3.0735	-0.6227	0.178	0.295
0.05	-2.7358	0.9539	-0.05033	0.00621	3.2147	-0.7079	0.190	0.307
0.07	-2.6004	0.9808	-0.05225	0.00603	3.0851	-0.7425	0.213	0.329
0.10	-2.4891	0.9544	-0.05060	0.00571	2.8091	-0.7055	0.195	0.321
0.15	-2.6505	0.9232	-0.04879	0.00560	2.6260	-0.6270	0.160	0.302
0.20	-3.0096	0.9426	-0.05034	0.00573	2.6063	-0.5976	0.157	0.310
0.25	-3.3321	0.9578	-0.05143	0.00507	2.3654	-0.5820	0.142	0.299
0.30	-3.5422	0.9441	-0.05052	0.00428	2.2017	-0.5412	0.141	0.296
0.40	-3.3985	0.7773	-0.03885	0.00308	1.6367	-0.3448	0.157	0.306
0.50	-2.8041	0.5069	-0.01973	0.00257	0.7621	-0.0617	0.152	0.302
0.75	-4.4588	0.8691	-0.04179	0.00135	2.1003	-0.4349	0.146	0.291
1.00	-5.3391	1.0167	-0.04999	0.00045	2.5610	-0.5678	0.153	0.290
1.50	-6.1204	1.1005	-0.05426	0.00068	2.8923	-0.5898	0.152	0.289
2.00	-7.0334	1.2501	-0.06356	0.00051	3.3941	-0.7009	0.157	0.291
3.00	-8.2507	1.4652	-0.07797	0.00066	4.0033	-0.8465	0.155	0.279
4.00	-8.7433	1.4827	-0.07863	0.00063	3.9337	-0.8134	0.160	0.279
5.00	-8.9927	1.4630	-0.07638	0.00067	3.7576	-0.7642	0.167	0.286
7.50	-9.8245	1.6383	-0.08620	0.00108	4.3948	-0.9313	0.164	0.283
10.00	-9.8671	1.5877	-0.08168	0.00014	4.3875	-0.8892	0.176	0.270

Global standard deviation is computed as $\sigma_f = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_r^2}$

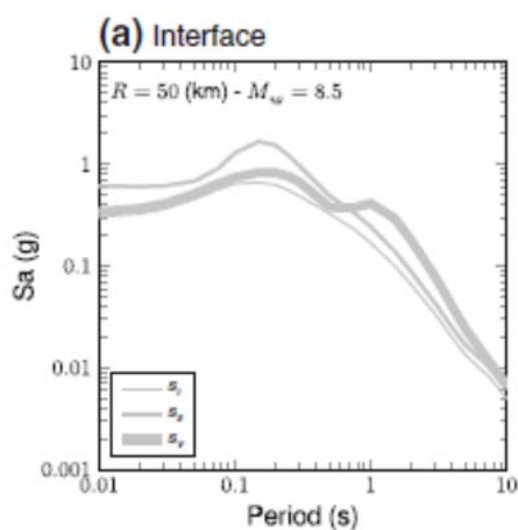


図2.2.4-13 Idini *et al.* (2017) によるチリのプレート間地震のGMPEの例

(7) Montalva *et al.* (2017)

Montalva *et al.* (2017) は、チリの沈み込み帯で発生した地震の水平成分の応答スペクトルのGMPEを開発した。データベースは、2010年Maule地震 (M_W 8.8) や2014年Iquique地震 (M_W 8.1)、2015年Illapel地震 (M_W 8.3) を含む473地震による3774記録である。

応答スペクトルの中央値は下式で表されている。

$$\mu(Z|\theta) = \ln SA(T) = \theta_1 + f_{\text{source}} + f_{\text{path}} + f_{\text{event/depth}} + f_{\text{site}} + f_{\text{FABA}} \quad (2.2.4-19)$$

$$f_{\text{source}} = \theta_4 \Delta C_1 + f_{\text{mag}}(M_W) \quad (2.2.4-20)$$

$$f_{\text{mag}}(M_W) = \begin{cases} \theta_4(M_W - (C_1 + \Delta C_1)), & \text{if } M_W \leq C_1 + \Delta C_1 \\ \theta_5(M_W - (C_1 + \Delta C_1)), & \text{if } M_W > C_1 + \Delta C_1 \end{cases} \quad (2.2.4-21)$$

$$f_{\text{path}} = [\theta_2 + \theta_{14} F_{\text{event}} + \theta_3(M_W - 7.8)] \times \ln(R + C_4 \exp(\theta_9(M_W - 6))) + \theta_6 R \quad (2.2.4-22)$$

$$f_{\text{event/depth}} = [\theta_{10} + \theta_{11}(\min(Z_h, 120) - 60)] F_{\text{event}} \quad (2.2.4-23)$$

$$f_{\text{site}}(\text{PGA}_{1000}, V_{S30}) = \begin{cases} \theta_{12} \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}}\right) - b \ln(\text{PGA}_{1000} + c) \\ + b \ln\left(\text{PGA}_{1000} + c \left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}}\right)^n\right), & \text{if } V_{S30} < V_{\text{lin}} \\ \theta_{12} \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}}\right) + b \ln\left(\frac{V_S^*}{V_{\text{lin}}}\right), & \text{if } V_{S30} > V_{\text{lin}} \end{cases} \quad (2.2.4-24)$$

$$V_S^* = \begin{cases} 1000, & \text{if } V_{S30} > 1000 \\ V_{S30}, & \text{if } M_W \leq C_1 + \Delta C_1 \end{cases} \quad (2.2.4-25)$$

$$f_{\text{FABA}}(R) = \begin{cases} \left(\theta_4 + \theta_8 \ln\left(\frac{\max(R, 85)}{40}\right)\right) \times F_{\text{FABA}}, & \text{if } F_{\text{event}} = 1 \\ \left(\theta_{15} + \theta_{16} \ln\left(\frac{\max(R, 100)}{40}\right)\right) \times F_{\text{FABA}}, & \text{if } F_{\text{event}} = 0 \end{cases} \quad (2.2.4-26)$$

ここに、 $\mu(Z|\theta)$ は中央値、 Z は変数、 θ は回帰係数、 SA は減衰定数5%の加速度応答スペクトルか最大加速度で単位は重力加速度、 M_W はモーメントマグニチュード、 Z_h は震源深さで単位はkm、 R はプレート間地震の場合、断層最短距離で、スラブ内地震の場合、震源距離、 PGA_{1000} は V_{S30} が1000m/sのときの最大加速度の中央値、 F_{event} はスラブ内地震のとき1で、プレート間地震のとき0である。 f_{FABA} の項は、背弧で1、前弧もしくは不明の場合に0である。 ΔC_1 , θ , C_4 , V_{lin} , b , c , and n は、背弧の影響を表したBC Hydroモデルから直接採用される係数

である。

図2.2.4-14に、GMPEを求めるのに用いたチリのプレート間地震とスラブ内地震のモーメントマグニチュードと距離との関係およびモーメントマグニチュードと震源深さとの関係を示す。

表2.2.4-11に、チリのプレート間地震とスラブ内地震の記録を用いて求めた回帰係数を示す。また、図2.2.4-15に、プレート間地震のGMPEの例を示す。

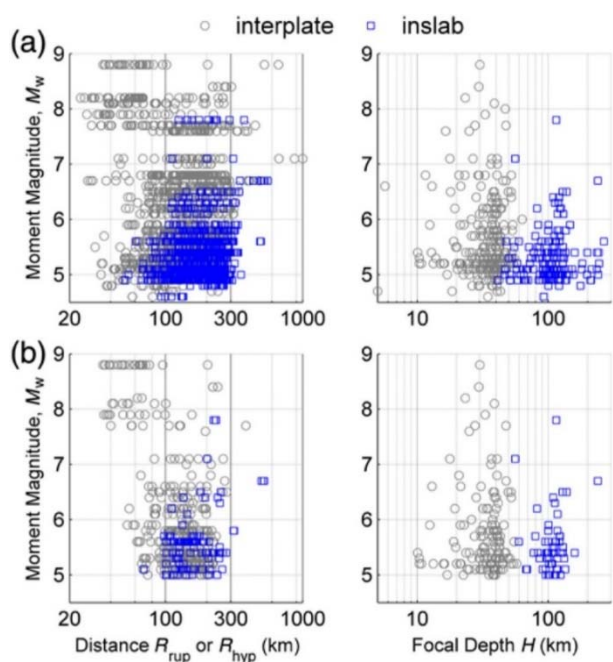


Figure 1. Distribution of records and earthquakes from the strong ground motion database used for the regression. (a,b) Full dataset; (c,d) high-quality (HQ) dataset. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.2.4-14 Montalva *et al.* (2017) がGMPEを求めるのに用いたチリのプレート間地震とスラブ内地震のモーメントマグニチュードと距離との関係およびモーメントマグニチュードと震源深さとの関係

表2.2.4-11 Montalva *et al.* (2017) がチリのプレート間地震とスラブ内地震の記録を用いて求めた回帰係数

Table 1
Model Coefficients

Period (s)	Number of Data Points	θ_1	θ_4	θ_5	θ_2	θ_3	θ_6	θ_{14}	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	τ	ϕ_{25}	ϕ_{55}
0.00	3657	5.87504	0.80277	-0.33487	-1.75360	0.13125	-0.00039	-0.73080	4.53143	0.00567	1.01495	0.47462	0.56436	0.39903
0.02	3657	5.97631	0.84132	-0.28055	-1.77011	0.12246	-0.00039	-0.73869	4.57416	0.00565	1.03738	0.47632	0.57188	0.40261
0.05	3658	7.45297	1.03131	-0.03954	-2.03336	0.08332	0.00000	-0.69849	4.56071	0.00848	1.31034	0.53776	0.57850	0.39720
0.075	3656	8.04760	1.03437	-0.01295	-2.10610	0.08013	-0.00010	-0.65336	4.36639	0.00922	1.48158	0.56188	0.59937	0.38824
0.1	3652	7.76085	1.07565	0.00758	-1.99371	0.07303	-0.00079	-0.55051	3.90923	0.00630	1.65619	0.52707	0.63410	0.38365
0.15	3654	6.17192	1.17061	0.10491	-1.58654	0.05482	-0.00268	-0.42997	3.06236	0.00559	1.93944	0.50642	0.63022	0.39930
0.2	3657	4.83403	1.20531	0.17968	-1.29711	0.05250	-0.00338	-0.53088	3.50113	0.00320	2.08901	0.44619	0.61699	0.41782
0.25	3682	4.42688	1.37607	0.22912	-1.18774	0.02995	-0.00355	-0.58086	3.62816	0.00182	2.25003	0.45040	0.58609	0.43277
0.3	3673	4.57009	1.34991	0.15593	-1.24896	0.03866	-0.00245	-0.66281	3.87634	0.00213	2.28339	0.42549	0.57014	0.44123
0.4	3643	3.98311	1.37954	0.11671	-1.13377	0.04683	-0.00208	-0.72244	4.03388	0.00069	2.31409	0.42945	0.54796	0.45157
0.5	3591	4.86034	1.51950	0.18348	-1.38020	0.03822	-0.00002	-0.79644	4.31418	0.00065	2.33333	0.43334	0.49113	0.45476
0.6	3634	4.67510	1.66663	0.21968	-1.35362	0.02524	0.00000	-0.90120	4.75197	0.00087	2.23422	0.44599	0.49078	0.45219
0.75	3614	4.30862	1.85625	0.29783	-1.30800	0.00995	0.00000	-0.89829	4.70452	-0.00031	2.05217	0.46723	0.48213	0.45553
1	3685	3.57339	1.81217	0.24372	-1.23082	0.03605	0.00000	-0.87331	4.56020	-0.00101	1.63506	0.50143	0.45955	0.43828
1.5	3717	2.92216	2.03469	0.22521	-1.18750	0.02769	-0.00010	-0.94686	4.83343	0.00010	0.69338	0.51633	0.42573	0.42297
2	3648	2.39780	2.04340	0.27383	-1.16319	0.04011	-0.00033	-0.90845	4.59029	0.00109	-0.09762	0.50688	0.40179	0.40377
2.5	3583	1.64148	1.88987	0.18740	-1.06544	0.08310	-0.00121	-0.80518	4.13415	0.00035	-0.34932	0.51465	0.39825	0.38489
3	3525	1.66483	1.90504	0.13268	-1.12678	0.09404	-0.00088	-0.81689	4.18978	0.00073	-0.33270	0.50365	0.38493	0.37384
4	3283	0.90565	1.71178	0.01380	-1.07620	0.13838	-0.00062	-0.87331	4.50907	0.00084	-0.41321	0.45311	0.35579	0.37020
5	3102	0.61234	1.59359	0.06465	-1.13080	0.15259	0.00000	-0.87800	4.56386	0.00068	-0.42395	0.43900	0.34991	0.37674
6	2921	0.32672	1.69184	0.32368	-1.15734	0.12421	0.00000	-0.88436	4.55837	0.00137	-0.38760	0.42084	0.32048	0.37173
7.5	2780	-0.24140	1.71126	0.60252	-1.14070	0.10951	0.00000	-0.98803	5.08282	0.00167	-0.32638	0.41701	0.29895	0.36349
10	2473	-0.96314	1.67160	0.77621	-1.09295	0.11344	0.00000	-1.05008	5.49692	-0.00070	-0.25811	0.38872	0.28454	0.36173

Period (s)	σ	θ_7	θ_8	θ_{15}	θ_{16}	θ_9	$\Delta C_{1, \text{interface}}$	$\Delta C_{1, \text{in-slab}}$	V_{lin}	b	n	c	C_4	C_1
0.00	0.83845	1.0988	-1.420	0.9969	-1.000	0.4	0.200	-0.300	865.1	-1.186	1.18	1.88	10	7.2
0.02	0.84618	1.0988	-1.420	0.9969	-1.000	0.4	0.200	-0.300	865.1	-1.186	1.18	1.88	10	7.2
0.05	0.88409	1.2536	-1.650	1.1030	-1.180	0.4	0.200	-0.300	1053.5	-1.346	1.18	1.88	10	7.2
0.075	0.90867	1.4175	-1.800	1.2732	-1.360	0.4	0.200	-0.300	1085.7	-1.471	1.18	1.88	10	7.2
0.1	0.90944	1.3997	-1.800	1.3042	-1.360	0.4	0.200	-0.300	1032.5	-1.624	1.18	1.88	10	7.2
0.15	0.90171	1.3582	-1.690	1.2600	-1.300	0.4	0.200	-0.300	877.6	-1.931	1.18	1.88	10	7.2
0.2	0.86853	1.1648	-1.490	1.2230	-1.250	0.4	0.200	-0.300	748.2	-2.188	1.18	1.88	10	7.2
0.25	0.85654	0.9940	-1.300	1.1600	-1.170	0.4	0.200	-0.300	654.3	-2.381	1.18	1.88	10	7.2
0.3	0.83713	0.8821	-1.180	1.0500	-1.060	0.4	0.200	-0.300	587.1	-2.518	1.18	1.88	10	7.2
0.4	0.82982	0.7046	-0.980	0.8000	-0.780	0.4	0.144	-0.300	503	-2.657	1.18	1.88	10	7.2
0.5	0.79737	0.5799	-0.820	0.6620	-0.620	0.4	0.100	-0.300	456.6	-2.669	1.18	1.88	10	7.2
0.6	0.80265	0.5021	-0.700	0.5800	-0.500	0.4	0.074	-0.300	430.3	-2.599	1.18	1.88	10	7.2
0.75	0.81134	0.3687	-0.540	0.4800	-0.340	0.4	0.042	-0.300	410.5	-2.401	1.18	1.88	10	7.2
1	0.80914	0.1746	-0.340	0.3300	-0.140	0.4	0.000	-0.300	400	-1.955	1.18	1.88	10	7.2
1.5	0.79168	-0.0820	-0.050	0.3100	0.000	0.4	-0.058	-0.300	400	-1.025	1.18	1.88	10	7.2
2	0.76249	-0.2821	0.120	0.3000	0.000	0.4	-0.100	-0.300	400	-0.299	1.18	1.88	10	7.2
2.5	0.75605	-0.4108	0.250	0.3000	0.000	0.4	-0.155	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
3	0.73593	-0.4466	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
4	0.68480	-0.4344	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
5	0.67609	-0.4368	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
6	0.64653	-0.4586	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
7.5	0.62881	-0.4433	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2
10	0.60243	-0.4828	0.300	0.3000	0.000	0.4	-0.200	-0.300	400	0	1.18	1.88	10	7.2

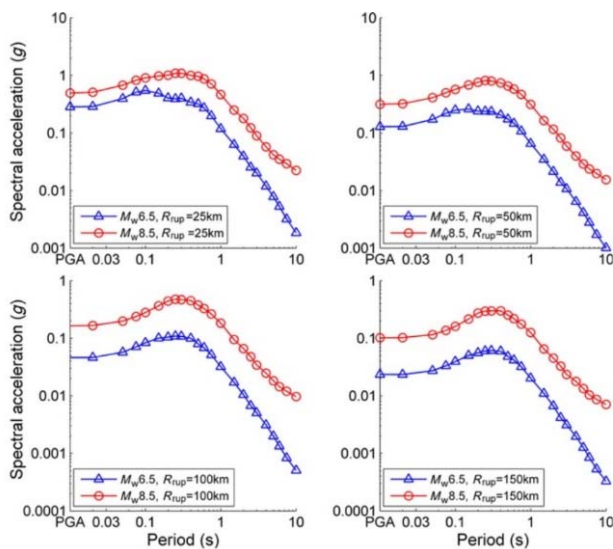


Figure 3. Response spectra obtained for a fore-arc site with $V_{s30} = 300$ m/s for an interplate earthquake. PGA, peak ground acceleration. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.2.4-15 Montalva *et al.* (2017) によるプレート間地震のGMPEの例

2.2.4.2 対象地震動予測式の比較検討

検討はプレート間地震を対象に、 $M7$ 、 8 、 9 、震源深さ 30 km 、距離が 30 km 、 50 km 、 100 km 、 200 km の各ケースに対して行った。それぞれのケースについて、地震動予測式をプロットして比較を行った。計算の際には *Si et al. (2013)*による地震動予測式については、*Si et al. (2016)*による地盤特性の評価式を用いて予測値を対象地盤上のものに変換された。また、比較は地震動予測式における地震動強さの定義が無視できると仮定した。計算の結果を図 2.2.4-16～図 2.2.4-18 に示す。これらの図から、マグニチュードが 7 の場合はそれぞれの地震動予測式による予測値に比較的大きなバラツキがみられるが、マグニチュードが大きくなるにつれて、そのバラツキが若干小さくなることが見受けられる。そのうち、チリの地震を対象とした地震動予測式、*Idini et al. (2017)*と *Montalva et al. (2017)*による予測値の違いが大きいことが分かった。また、メキシコのプレート間地震で開発された *Arroyo et al. (2010)* が全般的に比較的に小さめであることがみられた。なお、 $M9$ の場合、*Zhao et al. (2006)*は外挿になってしまうことから、その他の地震動予測式との違いが顕著になったと見受けられた。

図 2.2.4-19～図 2.2.4-21 には、検討対象の地震動予測式のうち、同様な回帰モデルを使用している *Abrahamson et al. (2016)*と *Montalva et al. (2017)*との地震動予測式の比較を示している。この2つの式の間に見られる違いは、回帰モデルによる影響はすくなく、主にデータセットと統計手法によるものとみられる。したがって、仮に統計手法に起因する違いが無視できる程度であれば、地震動予測式間の違いは地域性による差とみることができよう。検討の結果、図に示す通り、マグニチュード 7 の場合両者の違いが大きい、マグニチュードが 8 から 9 になるにつれてその違いが小さくなっていることが分かった。このことは、マグニチュードの大きい場合は二つの地震動予測式のデータベースが同程度のものであることで制つめい出来るが、マグニチュード 7 の場合はデータベースの違いによって差が大きくなっていることが考えられる。ただし、*Montalva et al. (2017)*による地震動予測式は *Idini et al. (2017)*とも異なることから、*Abrahamson et al. (2016)*と *Montalva et al. (2017)*との差はデータセットのほかに、統計手法によるものとも考えられる。したがって、地震動の地域性を確認するには、たとえ同じ回帰モデルで地震動予測式を作成することだけではなく、回帰分析手法も同一ものとしたほうが良いと考えられる。さらに、データセットのマグニチュード、震源距離、および震源深さに対する分布の違いにも配慮する必要があると考えられる。

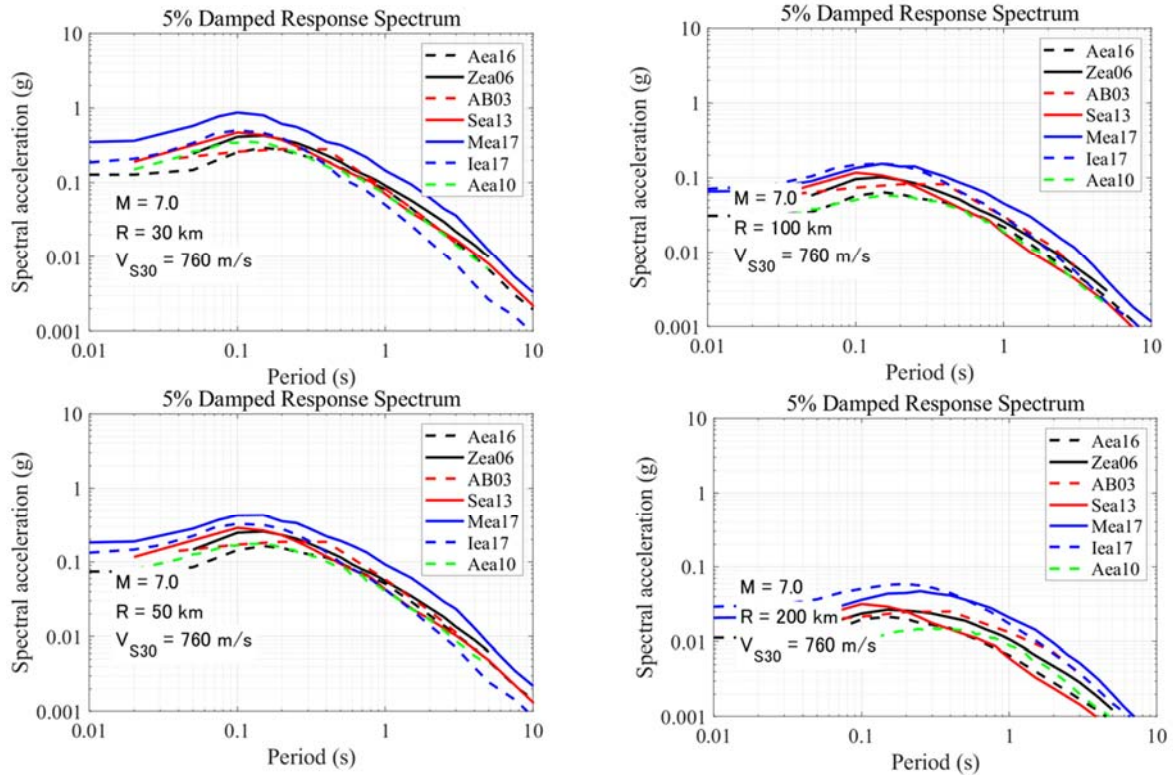


図2.2.4-16 プレート間地震を対象とした地震動予測式の比較図 ($M7$ の場合)

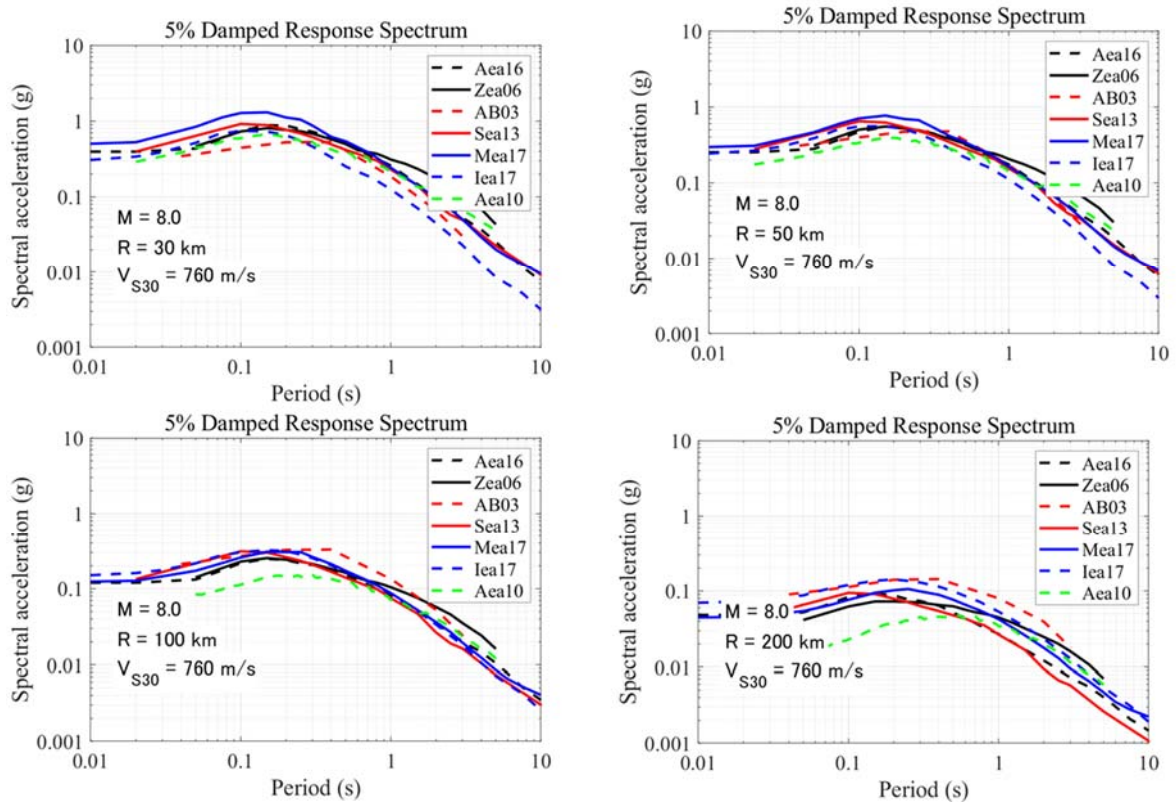


図2.2.4-17 プレート間地震を対象とした地震動予測式の比較図 (M8の場合)

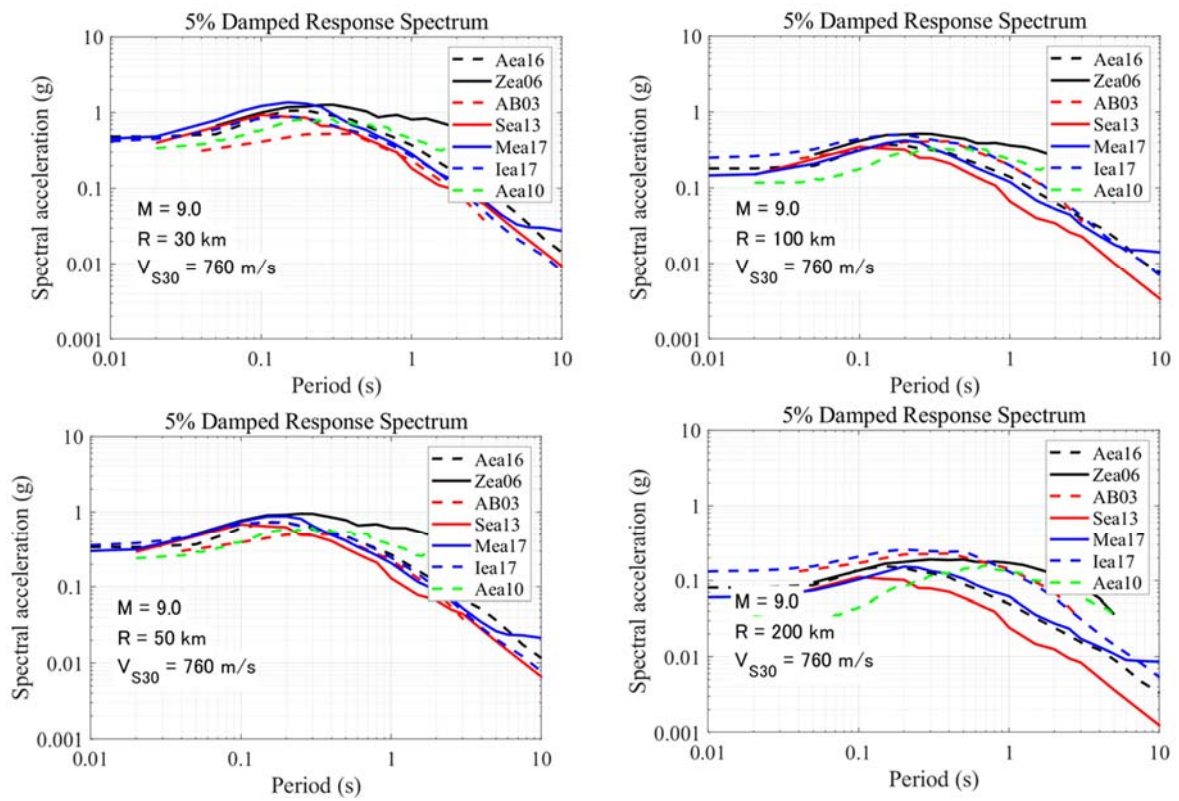


図2.2.4-18 プレート間地震を対象とした地震動予測式の比較図 ($M9$ の場合)

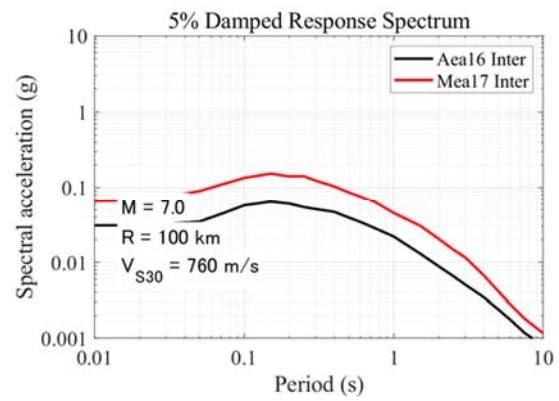
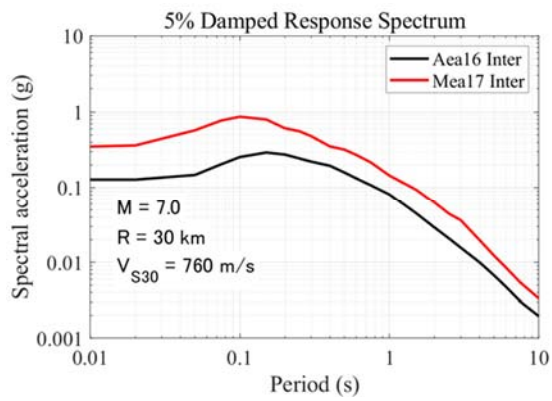


図2.2.4-19 同様な回帰モデルで得られたAbrahamson *et al.* (2016)とMontalva *et al.* (2017)の比較 (M 7の場合)

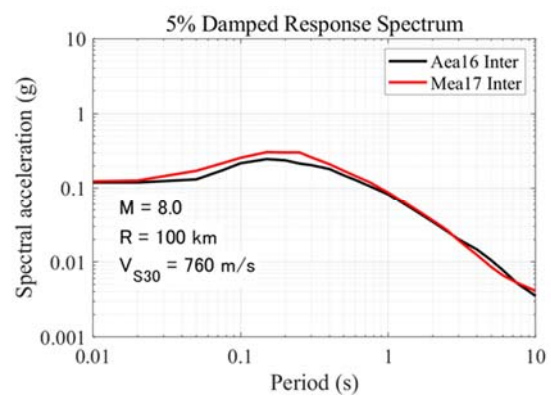
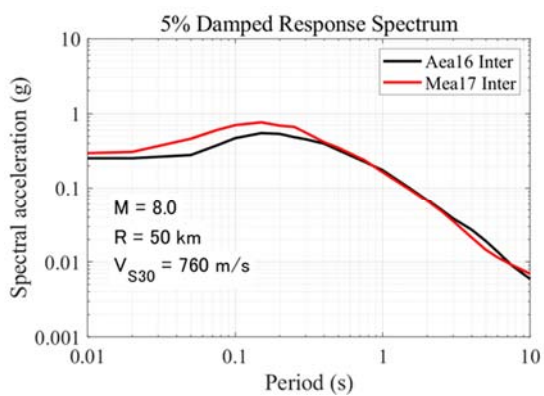


図2.2.4-20 同様な回帰モデルで得られたAbrahamson *et al.* (2016)とMontalva *et al.* (2017)の比較 (M 8の場合)

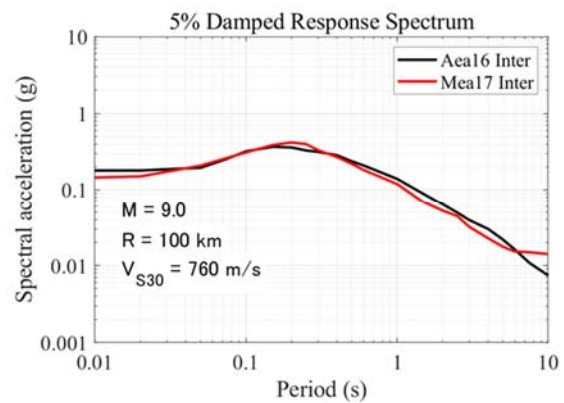
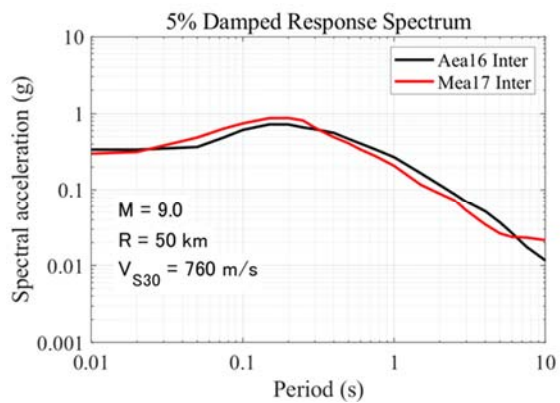


図2.2.4-21 同様な回帰モデルで得られたAbrahamson *et al.* (2016)とMontalva *et al.* (2017)の比較 (M 9の場合)

2.2.4.3 まとめ

本項では、プレート間地震について、7つの地震動予測式による予測値の比較検討を行い、地震動の地域性がみられるかについて検討を行った。同じ地震規模と、距離、および地盤情報を与条件とした場合、メキシコで発生する地震による地震動予測式は、他の地震動予測式に比べて小さめである一方、チリ地震を対象とした2つの地震動予測式の間では比較的にやや大きな差がみられた。また、回帰モデルの同じ2つの地震動予測式による比較では、マグニチュード7程度では地震動予測式による予測値に違いがみられ、観測記録にみられる地域性を示唆するものとなったが、統計手法とデータの質による影響もあると考えられることから、地域性を検討するには、観測記録に基づき、回帰モデルや回帰分析手法による違いとデータセットの質による違いなどを分離して、さらなる検討が必要と考えられる。

2.2.5 スロー地震の文献調査

2000年頃にスロー地震が発見されて以降、世界中のプレートにおいて、スロー地震の存在が報告されている（図2.2.5-1）。本項ではプレートの地域性を検討する観点から、スロー地震とプレート間地震の関連性について議論している既往研究の調査を行った。

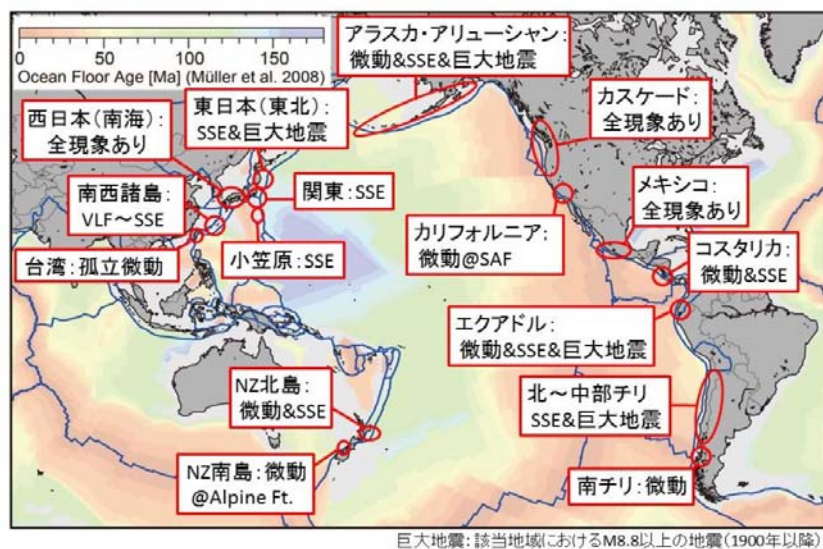


図2.2.5-1 世界のそれぞれの地域で発生するスロー地震の種類

(1) Obara and Kato (2016)

Obara and Kato (2016) は、2000年頃から始まった約20年間のスロー地震研究によって明らかにされたスロー地震の活動様式の特徴（図2.2.5-2）や種類を整理した上で、巨大地震との関連性に焦点を絞りスロー地震が担う役割を以下に示す3つのポイントに分けて議論を行った。

① 類似現象

数種類のスロー地震のうち、ETS（Episodic Tremor and Slip）は、その発生様式が巨大地震と類似している。更に、ETSは頻繁に発生しており、多くの観測事例から発生様式の揺らぎ等における法則性を見出すことができれば、巨大地震の発生間隔や破壊域にみられる規則性やその揺らぎ、連動性を含めた発生様式の理解に役立つ可能性がある。

② 応力状態を反映するインジケータ

スロー地震の発生域では断層強度が弱く、周囲の応力変化の影響を受けやすい。従っ

て、スロー地震域に隣接する巨大地震震源域における応力蓄積状態を反映して、スロー地震活動の発生パターンが変化することが期待される。

③ 周囲への応力载荷

2011 年東北地方太平洋沖地震の大すべり域周辺で微動やスロースリップイベントが地震以前に起きて、断層破壊を促進させた可能性があることが分かった。また、2013 年メキシコのパパノア地震や、2014 年チリ北部のイキケ地震でも観測された。スロースリップによる震源域への応力载荷により破壊が促進された可能性を示すものと考えられる。

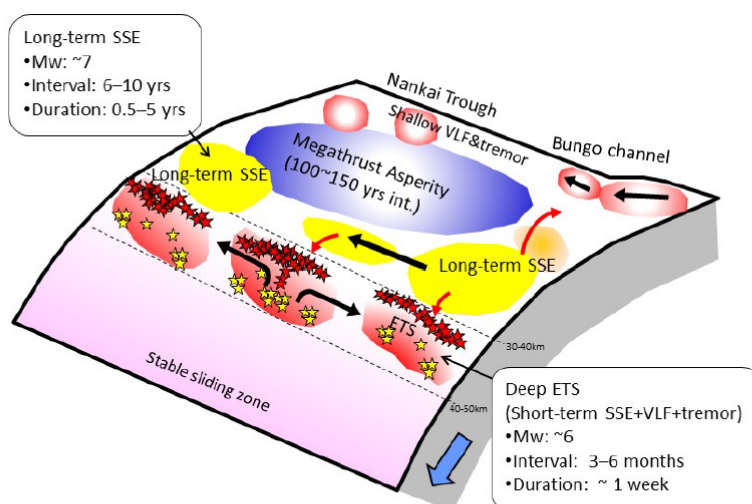


図4. 南海トラフ沈み込み帯で発生するスロー地震の多様性や相互作用を示す概念図。黒の矢印はスロー地震の移動方向を、赤の矢印は長期的スロースリップイベントから他のスロー地震に対する誘発作用を表す。赤と黄の星印はそれぞれ浅部側、及び深部側の深部低周波微動を表し、浅部側の深部低周波微動は長期的スロースリップイベントの影響を受けやすい。また、長期的スロースリップイベントは、浅部のスロー地震の活動にも影響を及ぼす。

図 2.2.5-2 スロー地震の活動様式の特徴

(2) 高木 (2018)

高木 (2018) は、南海トラフ西部における新たなスロースリップイベント (SSE) カタログに基づき、SSE 活動と巨大地震を発生させるプレート間固着の空間的相関性について述べた後、南海トラフのプレート境界浅部の固着域と深部の SSE 活動の相関関係は、他の沈み込みプレート境界においても見られることを指摘した (図 2.2.5-3)。

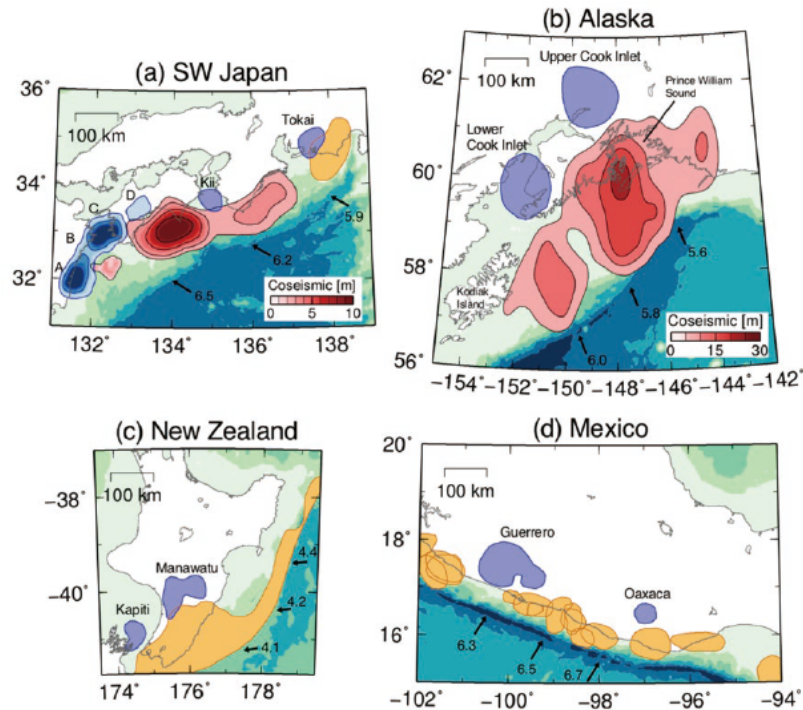
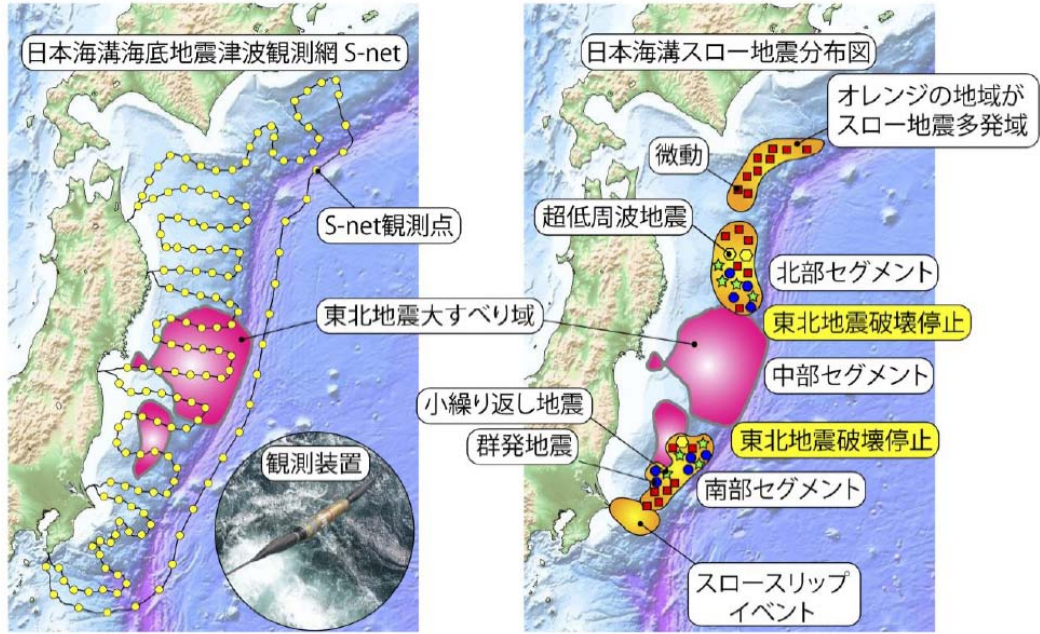


図2 長期的SSE(青)と固着域(赤・橙)の分布。(a) 西南日本、(b) アラスカ、(c) ニューージーランド、(d) メキシコ。

図2.2.5-3 4地域におけるプレート境界浅部の固着域と深部のSSE活動の相関関係

(3) Nishikawa *et al.* (2019)

Nishikawa *et al.* (2019) は、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) をはじめとする陸海域の地震・測地観測網のデータを用いて詳細なスロー地震分布図を作成し、東北地震の破壊がスロー地震多発域で停止していたことを明らかにした。これによりスロー地震多発域が巨大地震の破壊に対するバリアとして働く可能性が示唆された。図2.2.5-4に日本海溝のスロー地震分布を示す。



図：日本海溝海底地震津波観測網(S-net)(左)と、日本海溝のスロー地震分布を単純化したもの(右)。左図の S-net 観測装置の写真は防災科学技術研究所提供。東北地震大すべり域は linuma et al. (2012)に基づく。

図2.2.5-4 日本海溝のスロー地震分布と2011年東北地方太平洋沖地震の破壊域

2.2節の参考文献

2.2.1

- 1) Crouse C. B. (1991): Ground-motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zones. *Earthquake Spectra*, Vol. 7, No. 2, pp. 201-236.
- 2) Youngs R. R., S. J. Chiou, W. J. Silva and J. R. Humphrey (1997): Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 58-73.
- 3) Hong H. P., A. Pozos-Estrada and R. Gomez (2009): Orientation effect on ground motion measurements for Mexican subduction earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-16.
- 4) Arroyo D., D. Garcia, M. Ordaz, M. A. Mora and S. K. Singh (2010): Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes, *Journal of Seismology*, Vol. 14, No. 4, pp. 769-785.
- 5) Contreras V. and R. Boroschek (2012): Strong ground motion attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes, In *Proceedings of Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering 2012*, Lisbon, Portugal.
- 6) Rodriguez-Perez Q. (2014): Ground-motion prediction equations for near-trench interplate and normal-faulting inslab subduction zone earthquakes in Mexico, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 1, pp. 427-438.
- 7) Haendel A., S. Specht, N. M. Kuehn and F. Scherbaum (2014): Mixtures of ground-motion prediction equations as backbone models for a logic tree: An application to the subduction zone in northern Chile, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 3, DOI10.1007/s10518-014-9636-7.
- 8) Abrahamson N., N. Gregor and K. Addo (2016): BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes, *Earthquake Spectra*, Vol. 32, No. 1, pp. 23-44.
- 9) Idini B., F. Rojas, S. Ruiz and C. Pasten (2017): Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 1853-1880.

2.2.2

- 1) Kanamori, H. and D. L. Anderson (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 5, pp. 1073-1095.
- 2) Fujii, Y. and Matsu'ura, M. (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication. *Pure and Applied Geophysics*, No. 157, pp. 2283-2302.
- 3) Somerville, P. G., T. Sato, T. Ishii, N. F. Collins, K. Dan and H. Fujiwara (2002): Characterizing heterogeneous slip models for large subduction earthquakes for strong ground motion prediction. *Proceedings of the 11th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Architectural Institute of Japan, pp. 163-166.
- 4) Strasser, F. O., M. C. Arango and J. J. Bommer (2010): Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude, *Seismological Research Letters*, Vol. 81, No. 6, pp. 941-950.
- 5) Leonard, M. (2010): Earthquake fault scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 5, pp. 1971-1988.
- 6) Rodriguez-Perez, Q. and L. Ottemoller (2013): Finite-fault scaling relations in Mexico, *Geophysical Journal International*, No. 193, pp. 1570-1588.
- 7) Kumar, K., S. Thingbaijam, P. M. Mai and K. Goda (2017): New empirical earthquake source-scaling laws, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 5, pp. 2225-2246.

2.2.3

- 1) 原子力規制庁 (2018): 平成 29 年度原子力規制庁安全研究, 原子力施設等防災対策等委託費 (海溝型地震による地震動の評価手法の検討) 事業業務報告書.
- 2) Murotani, S, H. Miyake and K. Koketsu (2008): Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, pp. 987-991.
- 3) 宇津徳治 (2001): 地震学 (第3版), 共立出版.

- 4) 田島礼子・松元康広・司宏俊・入倉孝次郎 (2013): 内陸地殻内および沈み込みプレート境界で発生する巨大地震の震源パラメータに関するスケーリング則の比較研究, 地震, 第2輯, 第66巻, pp. 31-45.
- 5) 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透 (2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第545号, pp. 51-62.
- 6) 佐藤智美 (2010): 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 651, pp. 923-932.
- 7) 渡辺基史・壇一男・佐藤俊明 (2002): 巨視的断層パラメータの相似則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-II, pp. 117-118.
- 8) 地震調査研究推進本部 (2005): 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 (平成 17 年 3 月 23 日公表, 平成 17 年 4 月 13 日更新, 平成 17 年 12 月 14 日更新), 分冊 2, 震源断層を特定した地震動予測地図の説明.

2.2.4

- 1) Atkinson, G. M. and D. M. Boore (2003): Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4):1703-1729.
- 2) Arroyo, D., D. G., M. Ordaz, M. A. Mora and S. K. Singh (2010): Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, 14(4):769785, doi: 10.1007/s10950-010-9200-0.
- 3) Zhao, J. X., J. Zhang, A. Asano, Y. Ohno, T. Oouchi, T. Takahashi, H. Ogawa, K. Irikura, H. K. Thio, P. G. Somerville, Y. Fukushima and Y. Fukushima (2006): Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3): 898-913, doi: 10.1785/0120050122.
- 4) Si, H., S. Midorikawa, H. Tsutsumi, C. Wu, T. Masatsuki and A. Noda (2013): Preliminary analysis of attenuation relationship for response spectra on bedrock based on strong motion records including the 2011 Mw9.0 Tohoku earthquake, *Proceedings of 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.

- 5) Abrahamson, N., N. Gregor and K. Addo (2016): BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1):23-44, doi: 10.1193/051712EQS188MR.
- 6) Idini, B., F. Rojas, S. Ruiz and C. Pastén (2017): Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5):18531880, doi: 10.1007/s10518-016-0050-1.
- 7) Montalva, G. A., N. Bastías and A. Rodriguez-Marek (2017): Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2):901911, doi:10.1785/0120160221.
- 8) Montalva, G. A., N. Bastías and A. Rodriguez-Marek (2017): Erratum to Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5):2541, doi:10.1785/0120170189.

2.2.5

- 1) Obara, K. and A. Kato (2016): Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, Vol. 353, Issue 6296, pp. 253-257, DOI: 10.1126/science.aaf1512.
- 2) 高木涼太 (2018): スロースリップとプレート間固着の空間的相関, *Slow Earthquakes Newsletter Vol. 03*, pp. 5-6, 2018, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/sloweq/newsletters/pdf/newsletter_03.pdf, (参照2019-02-07).
- 3) Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura and S. Ide (2019): The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor, *Science*, Vol. 365, pp. 808-813, DOI : 10.1126/science.aax5618.