

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

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

株式会社大崎総合研究所

平成 30 年 3 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。

平成 29 年度 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

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	1-6
2. プレート間巨大地震の地震動評価手法の検討	2.1.1-1
2.1 過去の地震の震源特性の調査	2.1.1-1
2.1.1 プレート間地震の地震動特性の調査	2.1.1-1
2.1.2 プレート間地震のスケーリング則の調査	2.1.2-1
2.1.3 プレート間地震の断層パラメータの調査	2.1.3-1
2.1.4 プレート間地震の断層パラメータの分析	2.1.4-1
2.1 節の参考文献 (アルファベット順、五十音順)	参 2.1-1
2.2 巨大地震の観測記録の収集及び解析	2.2.1-1
2.2.1 2014 年チリ Iquique 地震等の地震動解析事例の調査	2.2.1-1
2.2.2 2014 年チリ Iquique 地震等の地震観測記録の収集及び波形処理	2.2.2-1
2.2.3 2014 年チリ Iquique 地震の長周期インバージョン解析	2.2.3-1
2.2.4 2014 年チリ Iquique 地震の特性化震源モデルの設定	2.2.4-1
2.2.5 2014 年チリ Iquique 地震の地震動再現解析	2.2.5-1
2.2.6 経験的・統計的グリーン関数法に関する知見の調査	2.2.6-1
2.2 節の参考文献 (アルファベット順、五十音順)	参 2.2-1
2.3 巨大地震の震源特性パラメータの設定手法の調査	2.3-1
2.3 節の参考文献 (アルファベット順、五十音順)	参 2.3-1

3. 海洋プレート内地震の地震動評価手法の検討	3. 1. 1-1
3.1 スラブ内地震の震源特性等の調査	3. 1. 1-1
3.1.1 スラブ内地震の地震動特性の調査	3. 1. 1-1
3.1.2 スラブ内地震のスケーリング則の調査	3. 1. 2-1
3.1.3 スラブ内地震の断層パラメータの調査	3. 1. 3-1
3.1.4 スラブ内地震の断層パラメータの分析	3. 1. 4-1
3.1 節の参考文献（アルファベット順、五十音順）	参 3. 1-1
3.2 アウターライズ地震の震源特性の調査	3. 2. 1-1
3.2.1 アウターライズ地震の地震動特性の調査	3. 2. 1-1
3.2.2 アウターライズ地震のスケーリング則の調査	3. 2. 2-1
3.2.3 アウターライズ地震の断層パラメータの調査	3. 2. 3-1
3.2.4 アウターライズ地震の断層パラメータの分析	3. 2. 4-1
3.2 節の参考文献（アルファベット順、五十音順）	参 3. 2-1
3.3 スラブ内地震の地震動解析	3. 3. 1-1
3.3.1 2005 年チリ Tarapaca 地震の地震観測記録の収集及び波形処理	3. 3. 1-1
3.3.2 2005 年チリ Tarapaca 地震の震源モデルの設定	3. 3. 2-1
3.3.3 2005 年チリ Tarapaca 地震の地震動再現解析	3. 3. 3-1
3.3.4 1986 年ルーマニア Vrancea 地震の震源モデルの再検討	3. 3. 4-1
3.3.5 1986 年ルーマニア Vrancea 地震の地震動再現解析	3. 3. 5-1
3.3 節の参考文献（アルファベット順、五十音順）	参 3. 3-1
4. 結 論	4-1
付録 A. 収集した文献のリスト	付 A-1
付録 B. 収集した断層パラメータ	付 B-1
付録 C. 地震タイプごとの断層パラメータ	付 C-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（以下「海溝型地震」という。）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、地震動評価に必要な震源特性等に関する知見を蓄積するため、国内外で起きた巨大地震、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。

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の地震動特性及び震源特性に関する研究を対象に文献調査や地震動解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手法の検討
- (2) 海洋プレート内地震の地震動評価手法の検討

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手法の検討

「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/16_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必要がある。

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整備並びに巨大地震に適応できる統計的及び経験的グリーン関数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）過去の地震の震源特性の調査

国内外で起きたプレート間地震（マグニチュード7以上）を対象に、地震動評価又は津波再現解析のための断層モデル構築並びに統計的及び経験的グリーン関数法の適用に係る既往研究を（100件程度）調査し、震源特性パラメータのスケーリング則等について整理する。

（2）巨大地震の観測記録の収集及び解析

海外で起きたプレート間巨大地震（マグニチュード8以上）を対象に、3個以上の地震の観測記録の収集を行う。それら地震の地震動特性を分析し、検討地震を1個以上選択し、震源過程解析や地震動解析等を実施する。検討地震選定等の詳細は、原子力規制庁担当者と協議して決定するものとする。

（3）巨大地震の震源特性パラメータの設定手法の調査

国内外のマグニチュード 8 クラスから 9 クラスのプレート間巨大地震による強震動又は津波の予測のための断層モデルの構築方法の調査を行い、強震動予測レシピの手法並びに（１）及び（２）での調査結果と比べ課題を抽出し、巨大地震の震源特性パラメータの設定についてまとめる。

1.3.2 海洋プレート内地震の地震動評価手法の検討

本事業は、海溝の海側（アウターライズ）の沈み込むプレート内で起きるやや浅い地震（以下「アウターライズ地震」という。）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。）の２種類の海洋プレート内地震を検討対象とする。地震本部では、後者のスラブ内地震の震源特性に関する近年の研究成果を基に、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、想定地震の発生周期や場所に関する情報が少ないため、強震動予測レシピでは、想定地震の規模の推定手法が提示されていない。さらに、敷地周辺で発生するスラブ内地震は、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。また、国内で起きたスラブ内地震に関する研究事例が限られているため、国内外で起きたアウターライズ地震及びスラブ内地震を対象により数多くの地震を調査し、地域的な特性または海洋プレートの特性を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）スラブ内地震の震源特性等の調査

国内外のスラブ内地震の地震動特性、伝播経路特性及び震源特性に関する研究を対象に文献調査（100 件程度）を行い、特に余震分布等の情報を収集し、震源断層面積の設定について分析する。また、地域性等に着目して震源断層パラメータの設定手法を整理する。

（２）アウターライズ地震の震源特性の調査

国内外のアウターライズ地震の地震動特性、伝播経路特性及び震源特性に関する研究を対象に文献調査（100 件程度）を行い、スラブ内地震との比較を行う。

(3) スラブ内地震の地震動解析

国外のスラブ内地震を対象に、パラメータの不確かさを考慮した特性化震源モデルを（三つ程度）構築し、断層モデル法に基づく地震動再現解析を行う。また、検討結果を踏まえ、強震動予測レシピの適用性について整理する。

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手法の検討

2.1 過去の地震の震源特性の調査

2.1.1 プレート間地震の地震動特性の調査

(1) Crouse *et al.* (1988)

Crouse *et al.* (1988) は、図2.1.1-1に示した環太平洋の7つの沈み込み帯で発生した低角逆断層、正断層、および横ずれ断層の地震による地盤上の258の水平成分を回帰分析した。回帰分析に用いた各沈み込み帯の地震数を表2.1.1-1に示す。

周期0.1～4秒における減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを統計処理した結果、日本の北部本州の地震では断層タイプによる系統的な差は見られなかった。用いた擬似速度応答スペクトルの回帰式は、

$$\ln[PSV(T)] = a + bM + c \ln[R] + dh \quad (2.1.1-1)$$

である。ここに、 $PSV(T)$ は周期 T における擬似速度応答スペクトル、 $a \sim d$ は回帰係数、 M は気象庁マグニチュード、 R はエネルギー放出中心からの距離、 h は震源深さである。回帰係数 $a \sim d$ を表2.1.1-2に示す。

地域性を調べたところ、0.8～3秒の中周期帯域において、北部本州や南海、千島列島、メキシコ、アラスカの地震ではペルー/北部チリとニューブリテン/ブーゲンビールの地震より、岩盤サイトで擬似速度応答スペクトルが顕著に大きいことがわかった。

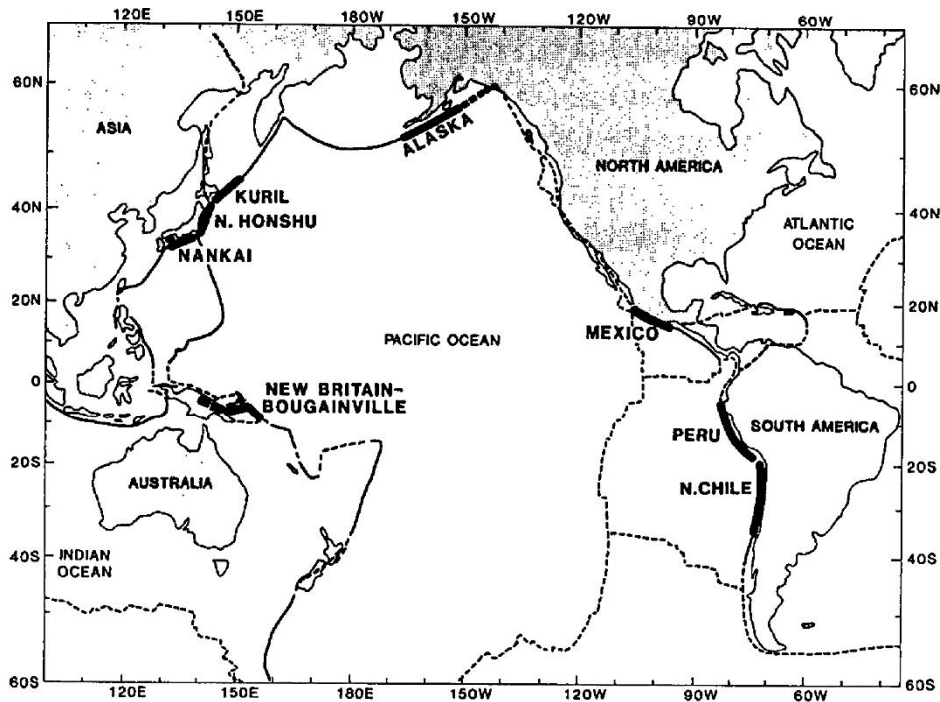


FIG. 1. Location map of subduction zones around the Pacific Ocean. Solid lines represent subduction zones with well-developed seafloor trenches; dashed lines indicate subduction zones without well-developed trenches or indicate other lithospheric plate margins. The labeled wide solid lines and wide dashed lines are the zones considered in this study.

図2.1.1-1 Crouse *et al.* (1988) が回帰分析に用いた地震が起った沈み込み帯

表2.1.1-1 Crouse *et al.* (1988) が回帰分析に用いた地震の数

Subduction Zone	No. of Components			
	Thrust	Normal	Strike-Slip	Total
Northern Honshu	98	22	8	128
Nankai	22	10	6	38
Kuril	14	4	4	22
Alaska	4	6	—	10
Peru/Northern Chile	13	6	—	19
Mexico	19	6	—	25
New Britain/Bougainville	12	4	—	16
Total	182	58	18	258

表2.1.1-2 Crouse *et al.* (1988) が北部本州の沈み込み帯で起った地震の記録を統計処理して求めた回帰係数

TABLE 3
RESULTS OF REGRESSION ANALYSES ON 128 COMPONENT DATA BASES FROM THE NORTHERN HONSHU SUBDUCTION ZONE [SEE EQUATION (1)]

Period (sec)	Regression Coefficients				$P(H_0/d)^*$	S.E.
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
0.1	1.86	0.48	-1.02	0.0093	1.00	0.668
0.2	3.19	0.44	-0.98	0.0053	0.94	0.672
0.4	1.29	0.68	-0.84	0.0041	0.90	0.597
0.6	0.67	0.85	-0.95	0.0030	0.71	0.674
0.8	-0.38	0.96	-0.87	0.0017	0.44	0.703
1.0	-1.13	1.06	-0.83	0.0000	0.00	0.713
1.5	-2.79	1.18	-0.69	-0.0007	0.19	0.663
2.0	-3.04	1.26	-0.78	-0.0008	0.21	0.718
3.0	-3.46	1.34	-0.85	-0.0046	0.87	0.730
4.0	-4.09	1.39	-0.85	-0.0053	0.92	0.720

* $P(H_0/d)$ = probability of hypothesis, H_0 ; d is significantly different from zero.

(2) Houston and Kanamori (1990)

Houston and Kanamori (1990) は、1985年メキシコMichoacan地震、1985年チリValparaiso地震、1983年日本秋田沖地震の水平2成分の加速度フーリエスペクトルの二乗和平方根をとって、

$$|f_0| = Cr^p \quad (2.1.1-2)$$

でモデル化した。ここに、 f_0 は振動数、 c と p は回帰係数、 r は距離で、震源距離、断層面中心からの距離、断層最短距離、あるいは大きなアスペリティからの最短距離である。

表2.1.1-3に回帰係数 C と p を示す。図2.1.1-2に、距離を断層中心からとった場合の加速度フーリエスペクトルの距離減衰の比較を示す。図中、MはMichoacan地震、VはValparaiso地震、Aは秋田沖地震である。

表2.1.1-3 Houston and Kanamori (1990)

TABLE 1
DECAY OF SPECTRAL AMPLITUDES WITH DISTANCE

Distance from station to:	10 Hz		5 Hz		2 Hz		1 Hz		0.5 Hz		0.2 Hz	
	<i>p</i>	log <i>C</i>	<i>p</i>	log <i>C</i>	<i>p</i>	log <i>C</i>	<i>p</i>	log <i>C</i>	<i>p</i>	log <i>C</i>	<i>p</i>	log <i>C</i>
1985 Michoacán, Mexico earthquake												
Hypocenter	-0.83	2.48	-0.76	2.94	-0.69	2.98	-0.41	2.45	-0.56	2.76	-0.51	2.35
Center of fault plane	-0.97	2.74	-0.88	3.16	-0.83	3.26	-0.50	2.61	-0.60	2.82	-0.62	2.58
Closest part of fault plane	-0.80	2.13	-0.74	2.63	-0.64	2.66	-0.43	2.34	-0.47	2.41	-0.43	2.03
Center of closest large asperity	-0.93	2.48	-0.89	3.02	-0.73	2.92	-0.52	2.57	-0.56	2.64	-0.47	2.17
1985 Valparaíso, Chile earthquake												
Hypocenter	-1.10	3.48	-1.04	3.86	-0.84	3.66	-0.82	3.54	-0.39	2.34	-0.84	2.88
Center of fault plane	-1.38	4.07	-1.29	4.38	-1.14	4.27	-0.99	3.89	-0.59	2.78	-1.11	3.43
Closest part of fault plane	-1.45	3.80	-1.15	3.79	-0.84	3.42	-0.63	2.96	-0.32	2.12	-1.04	3.01
1983 Akita-Oki, Japan earthquake												
Hypocenter	-2.10	5.50	-2.08	5.99	-1.84	5.68	-1.55	5.17	-1.06	4.23	-0.07	1.95
Center of fault plane	-2.05	5.25	-1.80	5.24	-1.45	4.71	-0.92	3.70	-0.54	3.03	0.00	1.80
Closest part of fault plane	-1.64	4.20	-1.57	4.58	-1.34	4.35	-0.92	3.61	-0.58	3.06	0.01	1.77

Spectral Amplitudes vs Distance to Center of Fault Plane
 Michoacan, Valparaiso, Akita-Oki Earthquakes

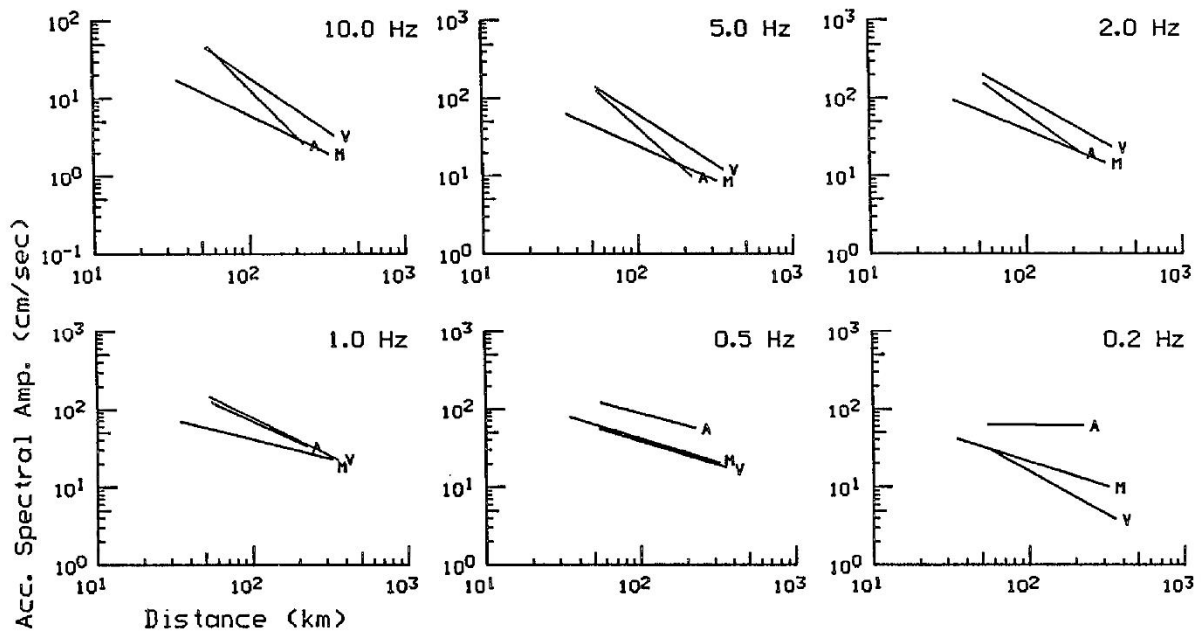


FIG. 9. Comparison of the decay of amplitude with distance for the 1985 Michoacán, Mexico, 1985 Valparaiso, Chile, and 1983 Akita-Oki, Japan earthquakes, labeled M, V, and A, respectively. The measure of distance used is the distance from the center of the fault plane to the station. Each panel shows the decay with distance at a given frequency.

図2.1.1-2 Houston and Kanamori (1990) による加速度フーリエスペクトルの距離減衰の比較 (距離は断層中心からの距離で、MはMichoacan地震、VはValparaiso地震、Aは秋田沖地震である。)

(3) Nicholas *et al.* (2002)

Nicholas *et al.* (2002) は、モーメントマグニチュードが8.0と8.5および9.0のCascadia沈み込み帯のプレート間地震を対象に、断層モデルを作成して、統計的グリーン関数法で地震波形を計算したうえで、計算波形を用いて、最大加速度と加速度応答スペクトルの回帰分析を行った。回帰式は、

$$\text{Ln} Y = C_1 + C_2 * M + (C_3 + C_4 * M) * \text{Ln}[R + \exp(C_5)] + C_6 * (M - 10)^3 \quad (2.1.1-3)$$

である。ここに、 Y は最大加速度もしく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 は断層面までの最短距離、 C_1 から C_6 は表2.1.1-4に示した回帰係数で、岩盤サイトと地盤サイトに分けている。

図2.1.1-3に $M=8$ と $M=9$ の場合の最大加速度の例を示す。

表2.1.1-4 Nicholas *et al.* (2002) が統計処理で求めた回帰係数Table 2
Coefficients and Standard Errors for Rock-Site Conditions

Period (sec)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	Param. Sigma	Model Sigma	Total Sigma
PGA	21.0686	-1.7712	-5.0631	0.4153	4.2	0.0017	0.6083	0.3926	0.7240
0.010	20.9932	-1.7658	-5.0404	0.4132	4.2	0.0226	0.6031	0.3926	0.7195
0.020	21.072	-1.772	-5.0529	0.4142	4.2	0.0025	0.6036	0.3926	0.7195
0.025	21.152	-1.779	-5.0663	0.4154	4.2	0.0023	0.6042	0.3983	0.7235
0.032	21.366	-1.797	-5.1036	0.4187	4.2	0.0017	0.6062	0.3926	0.7221
0.040	17.525	-1.339	-4.8602	0.3868	4.2	-0.0318	0.5836	0.3818	0.6969
0.050	19.347	-1.519	-4.9731	0.3960	4.2	-0.0155	0.5908	0.3925	0.7086
0.056	20.774	-1.625	-5.1875	0.4118	4.3	-0.0155	0.5974	0.4052	0.7215
0.063	21.331	-1.672	-5.2561	0.4173	4.3	-0.0146	0.6028	0.4132	0.7302
0.071	24.221	-1.924	-5.6250	0.4478	4.4	-0.0071	0.6116	0.4042	0.7326
0.083	24.950	-1.979	-5.6696	0.4493	4.4	-0.0018	0.6337	0.4584	0.7815
0.100	30.005	-2.349	-6.3862	0.5009	4.7	-0.0019	0.6448	0.4668	0.7954
0.125	39.719	-3.090	-7.8541	0.6161	5.1	-0.0064	0.6654	0.5461	0.8605
0.143	43.414	-3.385	-8.3122	0.6513	5.2	-0.0001	0.6769	0.5225	0.8544
0.167	39.579	-2.957	-7.9723	0.6139	5.2	-0.0264	0.6810	0.5050	0.8478
0.200	39.345	-3.087	-7.6002	0.5972	5.1	0.0060	0.7034	0.5089	0.8679
0.250	37.690	-2.960	-7.3790	0.5842	5.1	-0.0023	0.7121	0.4539	0.8444
0.333	34.787	-2.899	-6.7855	0.5616	4.9	0.0256	0.7372	0.4764	0.8776
0.400	33.393	-2.776	-6.9595	0.5863	4.9	-0.0039	0.7110	0.5187	0.8801
0.500	29.159	-2.424	-6.2114	0.5216	4.7	0.0161	0.6745	0.4382	0.8039
0.769	15.279	-1.220	-4.3240	0.3618	3.9	-0.0011	0.6111	0.5611	0.8295
1.000	6.528	-0.406	-3.1991	0.2589	3.2	-0.0225	0.5898	0.4751	0.7567
1.667	7.467	-0.676	-2.6465	0.2193	2.8	0.0416	0.4931	0.4889	0.6943
2.000	8.657	-0.851	-2.7398	0.2339	2.8	0.0370	0.4666	0.4247	0.6305
2.500	6.637	-0.651	-2.3124	0.1879	2.8	0.0364	0.4163	0.5198	0.6657
5.000	8.013	-0.943	-2.4087	0.2154	2.3	0.0647	0.3931	0.6656	0.7730

Table 3
Coefficients and Standard Errors for Soil-Site Conditions

Period (sec)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	Param. Sigma	Model Sigma	Total Sigma
PGA	23.8613	-2.2742	-4.8803	0.4399	4.7	0.0366	0.3760	0.3926	0.5436
0.010	25.4516	-2.4206	-5.1071	0.4605	4.8	0.0372	0.3742	0.3926	0.5422
0.020	25.4339	-2.4185	-5.1044	0.4602	4.8	0.0370	0.3742	0.3926	0.5422
0.025	25.4200	-2.4168	-5.1026	0.4600	4.8	0.0369	0.3743	0.3983	0.5464
0.032	25.3849	-2.4127	-5.0977	0.4594	4.8	0.0366	0.3743	0.3926	0.5422
0.040	22.7042	-2.1004	-4.9006	0.4353	4.8	0.0164	0.3590	0.3818	0.5241
0.050	23.2948	-2.1619	-4.8855	0.4332	4.8	0.0263	0.3592	0.3925	0.5319
0.056	23.2165	-2.1528	-4.8744	0.4319	4.8	0.0255	0.3598	0.4052	0.5413
0.0625	24.7067	-2.2814	-5.0947	0.4509	4.9	0.0245	0.3607	0.4132	0.5480
0.070	24.9425	-2.3045	-5.0672	0.4476	4.9	0.0295	0.3609	0.4042	0.5413
0.083	26.5395	-2.4402	-5.3025	0.4677	5.0	0.0276	0.3617	0.4584	0.5835
0.100	29.9693	-2.7254	-5.8054	0.5098	5.2	0.0226	0.3654	0.4668	0.5926
0.125	35.6660	-3.1853	-6.6251	0.5769	5.5	0.0123	0.3821	0.5461	0.6665
0.143	50.7368	-4.5292	-8.7213	0.7649	5.9	0.0108	0.3923	0.5225	0.6532
0.167	55.6402	-4.9662	-9.5555	0.8435	6.0	-0.0070	0.3927	0.5050	0.6393
0.200	75.8218	-6.8396	-12.0687	1.0753	6.3	0.0096	0.4231	0.5089	0.6618
0.250	100.3357	-9.0324	-15.3511	1.3731	6.6	-0.0043	0.4472	0.4539	0.6371
0.330	71.7967	-6.4990	-11.6056	1.0415	6.2	0.0102	0.4324	0.4764	0.6431
0.400	67.3720	-6.1755	-11.1567	1.0167	6.1	0.0035	0.4243	0.5187	0.6699
0.500	56.0088	-5.1176	-9.5083	0.8632	5.9	0.0164	0.4305	0.4382	0.6139
0.770	26.3013	-2.4482	-5.3818	0.4957	4.8	0.0259	0.4601	0.5611	0.7256
1.000	17.2330	-1.5506	-4.3287	0.3930	4.2	0.0133	0.4599	0.4751	0.6606
1.670	11.9971	-1.1180	-2.9451	0.2639	3.7	0.0538	0.4781	0.4889	0.6837
2.000	17.9124	-1.7505	-3.8150	0.3574	4.1	0.0583	0.4628	0.4247	0.6276
2.500	16.1666	-1.5091	-3.7101	0.3344	4.1	0.0473	0.4193	0.5198	0.6676
5.000	7.4856	-0.8360	-2.0627	0.1779	-0.2	0.0821	0.4802	0.6656	0.8207

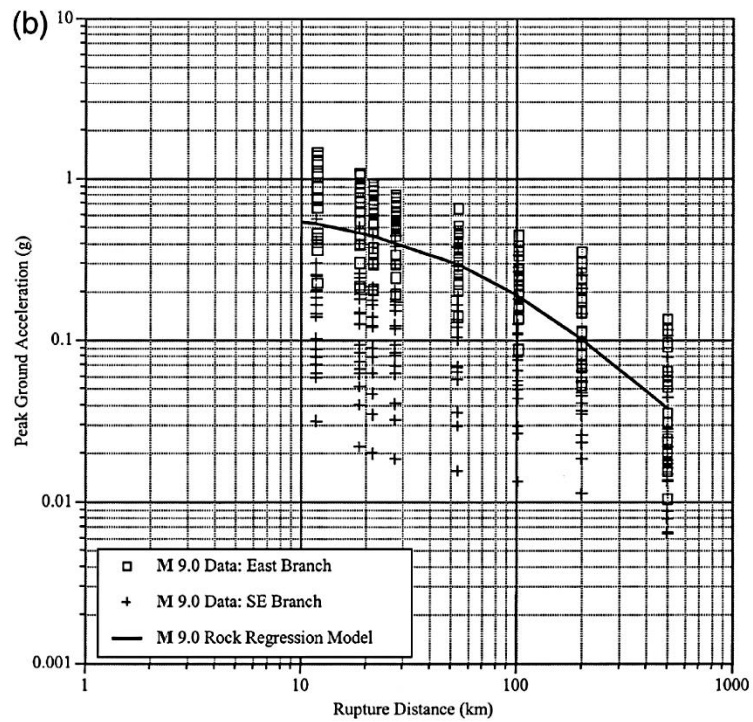
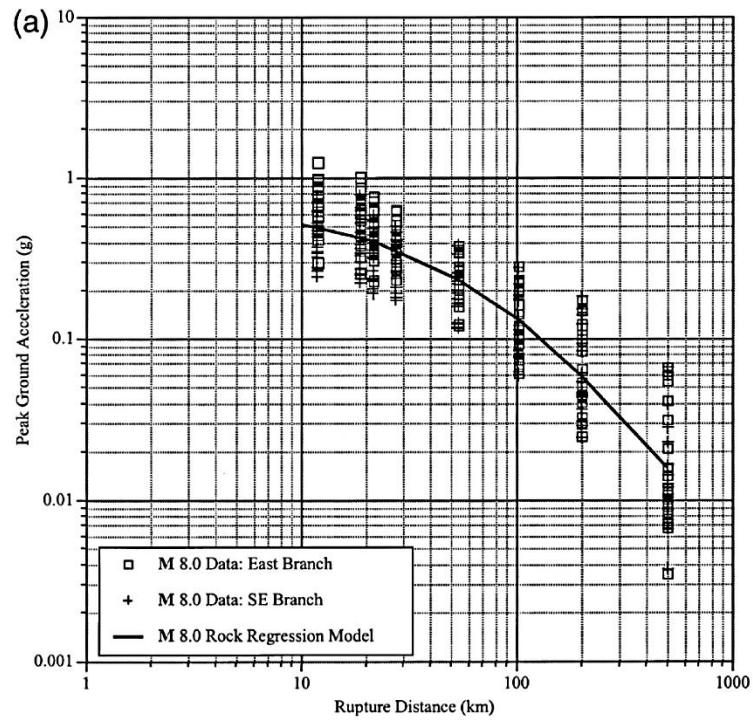


Figure 3. Regression of finite-fault simulations for (a) M 8.0 and (b) 9.0 earthquakes for rock-site conditions. Triangles represent results for the central limb and pluses for the southern limb indicating the lower simulated ground motions for the southern limb of stations.

図2.1.1-3 Nicholas *et al.* (2002) によるM=8とM=9の最大加速度の例

(4) 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 (M5~M8.3) 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 2.1.1-4 に示す。

回帰モデルは下の(2.1.1-4)式で表される。

$$\log Y = fn(\mathbf{M}) + c_3 h + c_4 R - g \log R + c_5 sl S_C + c_6 sl S_D + c_7 sl S_E \quad (2.1.1-4)$$

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/s²)、 M はモーメントマグニチュード (プレート間地震の場合 $M \leq 8.5$)、 $fn(\mathbf{M}) = c_1 + c_2 M$ 、 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 2.1.1-5 に示す値である。

Atkinson and Boore (2003) による最大加速度の例を図 2.1.1-5 に、擬似加速度応答スペクトルの例を図 2.1.1-6 に示す。

一方、図 2.1.1-7 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。

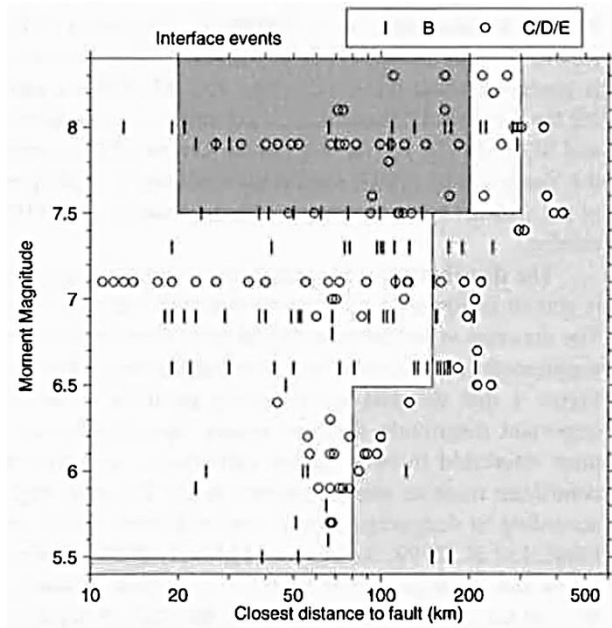


Figure 1. Database for subduction-zone earthquakes. The top frame shows data available for interface events, by NEHRP site class; the lower frame shows data available for in-slab events, by NEHRP site class. Data of $M < 5.4$ are not shown. The magnitude-distance range of most engineering interest is 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2.1.1-4 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。)

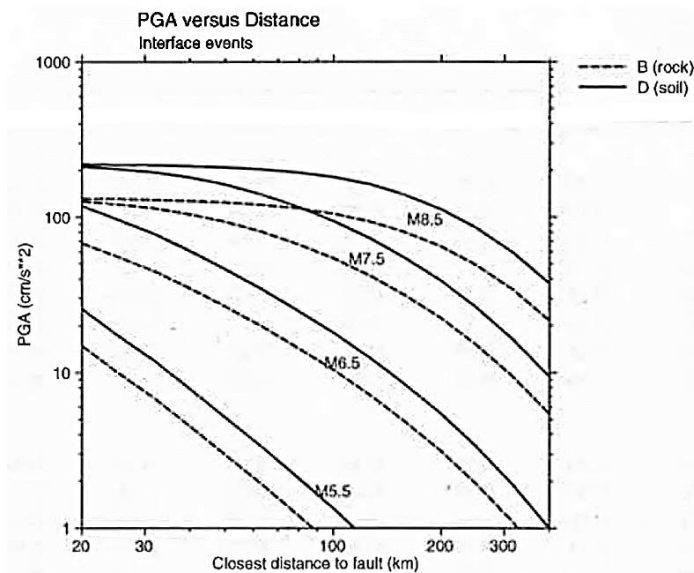


Figure 9. Peak ground acceleration for rock (NEHRP B) and soil (NEHRP D) for interface events (depth = 20 km) of M 5.5, 6.5, 7.5, and 8.5 (top frame) and in-slab events (depth = 50 km) of M 5.5, 6.5, and 7.5. Nonlinear soil response is assumed for records with $PGA_{rx} > 100 \text{ cm/sec}^2$.

図2.1.1-5 Atkinson and Boore (2003) によるプレート間地震の最大加速度の例

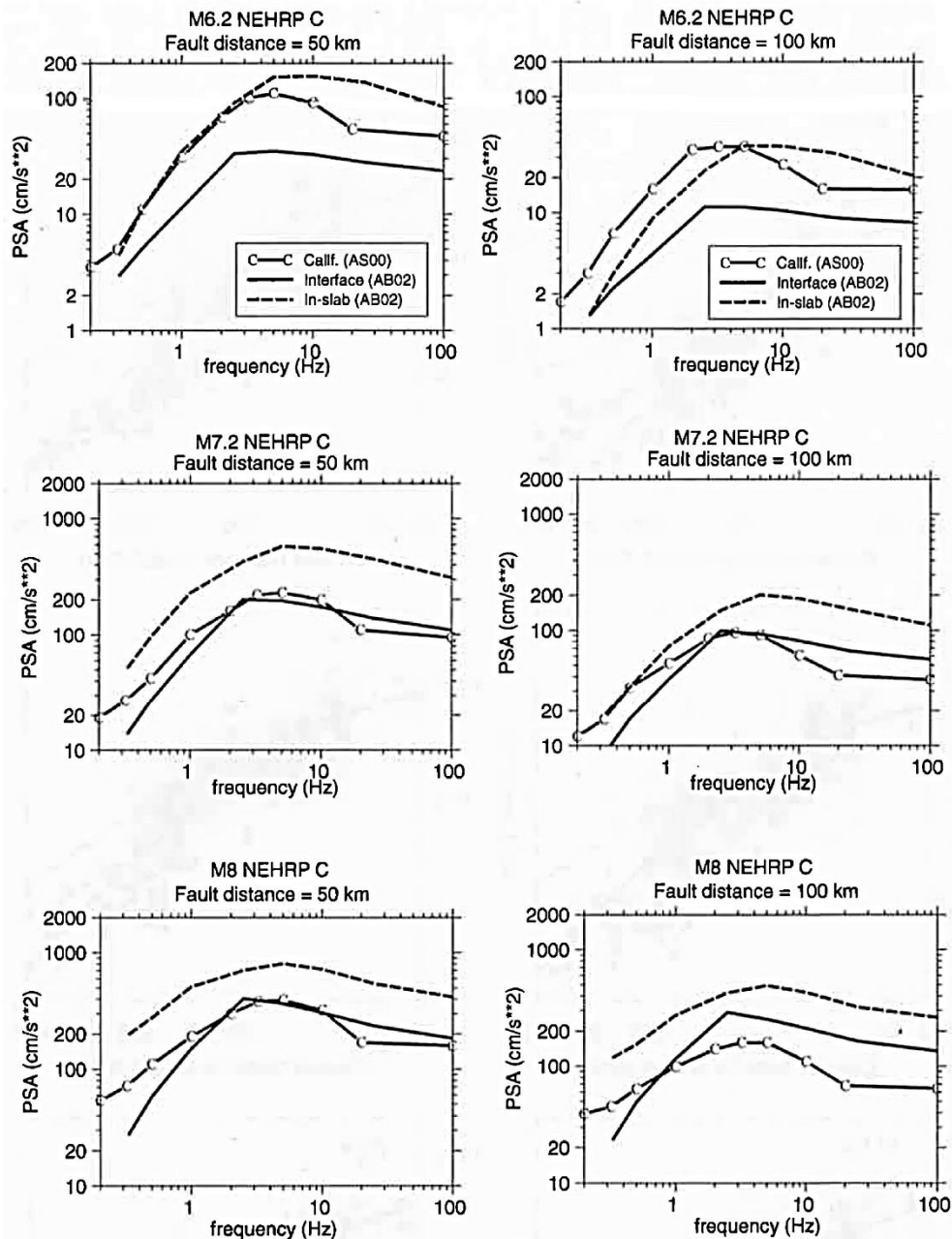


Figure 18. Predicted spectra for earthquakes of M 6.2 (top frames), 7.2 (middle frames), and 8.0 (lower frames), at distances of 50 km (left) and 100 km (right) from the fault, for NEHRP C site conditions, for interface (solid lines) and in-slab (dashed lines) events. Corresponding predictions for shallow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

図2.1.1-6 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。)

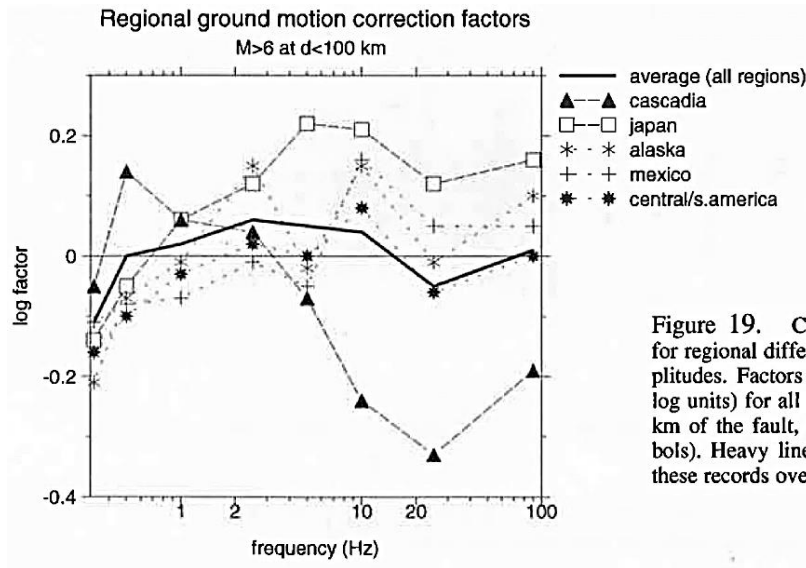


Figure 19. Correction factors to account for regional differences in ground-motion amplitudes. Factors are the average residual (in log units) for all records of $M \geq 6$ within 100 km of the fault, within a given region (symbols). Heavy lines show average residual for these records over all regions.

図2.1.1-7 Atkinson and Boore (2003) による擬似加速度応答スペクトルの地域性

表2.1.1-5 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)

(5) Lin and Lee (2008)

Lin and Lee (2008) は、台湾北東部の沈み込み帯に起ったプレート間地震とスラブ内地震の記録を用いて、最大加速度と加速度応答スペクトルの地震動予測式を求めた。図 2.1.1-8 は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震源距離との関係である。

回帰分析の結果、岩盤上の最大加速度の式として、

$$\ln(\text{PGA}) = -2.5 + 1.205M - 1.905 \ln(R + 0.516e^{0.6325M}) + 0.0075H + 0.275Z_t \quad (2.1.1-5)$$

を得た。また、地盤上の最大加速度の式として、

$$\ln(\text{PGA}) = -0.9 + 1.00M - 1.90 \ln(R + 0.9918e^{0.5263M}) + 0.004H + 0.31Z_t \quad (2.1.1-6)$$

を得た。ここに、 PGA は水平2成分の幾何平均で単位は重力加速度、 M はモーメントマグニチュード、 R は震源距離、 H は震源深さ(km)、 Z_t はプレート間地震では0、スラブ内地震では1である。

加速度応答スペクトルの場合の回帰係数を表2.1.1-6と表2.1.1-7に示す。また、図2.1.1-9にプレート間地震の最大加速度の例を示す。

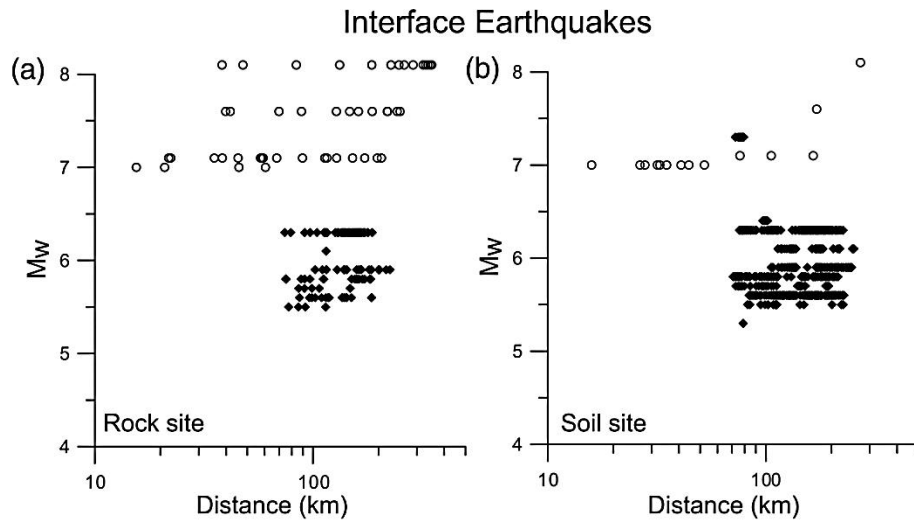


Figure 3. The magnitude and distance distribution of the strong-motion data set used in this study. The solid rhomboids represent data from the Taiwan area; the open circles represent data from other areas.

図2.1.1-8 Lin and Lee (2008) 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震源距離との関係

表2.1.1-6 Lin and Lee (2008) が統計処理で求めた岩盤サイトにおける回帰係数

Table 3
Regression Coefficients of Attenuations for Rock Sites

Period	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	$\sigma_{\ln y}$
PGA	-2.500	1.205	-1.905	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5268
0.01	-2.500	1.205	-1.895	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5218
0.02	-2.490	1.200	-1.880	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5189
0.03	-2.280	1.155	-1.875	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5235
0.04	-2.000	1.100	-1.860	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5352
0.05	-1.900	1.090	-1.855	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.537
0.06	-1.725	1.065	-1.840	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5544
0.09	-1.265	1.020	-1.815	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5818
0.10	-1.220	1.000	-1.795	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5806
0.12	-1.470	1.040	-1.770	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5748
0.15	-1.675	1.045	-1.730	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5817
0.17	-1.846	1.065	-1.710	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5906
0.20	-2.170	1.085	-1.675	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6059
0.24	-2.585	1.105	-1.630	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6315
0.30	-3.615	1.215	-1.570	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6656
0.36	-4.160	1.255	-1.535	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.701
0.40	-4.595	1.285	-1.500	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7105
0.46	-5.020	1.325	-1.495	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7148
0.50	-5.470	1.365	-1.465	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7145
0.60	-6.095	1.420	-1.455	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7177
0.75	-6.675	1.465	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7689
0.85	-7.320	1.545	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7787
1.0	-8.000	1.620	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7983
1.5	-9.240	1.705	-1.440	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8411
2.0	-10.200	1.770	-1.430	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8766
3.0	-11.470	1.830	-1.370	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.859
4.0	-12.550	1.845	-1.260	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8055
5.0	-13.390	1.805	-1.135	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7654

The regression equation is $\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3 \ln(R + C_4e^{C_5M}) + C_6H + C_7Z_r$.

表2.1.1-7 Lin and Lee (2008) が統計処理で求めた岩盤サイトにおける回帰係数

Table 4

Regression Coefficients of Attenuations for Soil Sites

Period	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	$\sigma_{\ln y}$
PGA	-0.900	1.000	-1.900	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6277
0.01	-2.200	1.085	-1.750	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5800
0.02	-2.290	1.085	-1.730	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5730
0.03	-2.340	1.095	-1.720	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5774
0.04	-2.215	1.090	-1.730	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5808
0.05	-1.895	1.055	-1.755	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5937
0.06	-1.110	1.010	-1.835	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6123
0.09	-0.210	0.945	-1.890	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6481
0.10	-0.055	0.920	-1.880	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6535
0.12	0.055	0.935	-1.895	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6585
0.15	-0.040	0.955	-1.880	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6595
0.17	-0.340	1.020	-1.885	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6680
0.20	-0.800	1.045	-1.820	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6565
0.24	-1.575	1.120	-1.755	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6465
0.30	-3.010	1.315	-1.695	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6661
0.36	-3.680	1.380	-1.660	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6876
0.40	-4.250	1.415	-1.600	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7002
0.46	-4.720	1.430	-1.545	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7092
0.50	-5.220	1.455	-1.490	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7122
0.60	-5.700	1.470	-1.445	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7280
0.75	-6.450	1.500	-1.380	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7752
0.85	-7.250	1.565	-1.325	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7931
1.0	-8.150	1.605	-1.235	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8158
1.5	-10.300	1.800	-1.165	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8356
2.0	-11.620	1.860	-1.070	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8474
3.0	-12.630	1.890	-1.060	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8367
4.0	-13.420	1.870	-0.990	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7937
5.0	-13.750	1.835	-0.975	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7468

The regression equation is $\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3 \ln(R + C_4e^{C_5M}) + C_6H + C_7Z_t$.

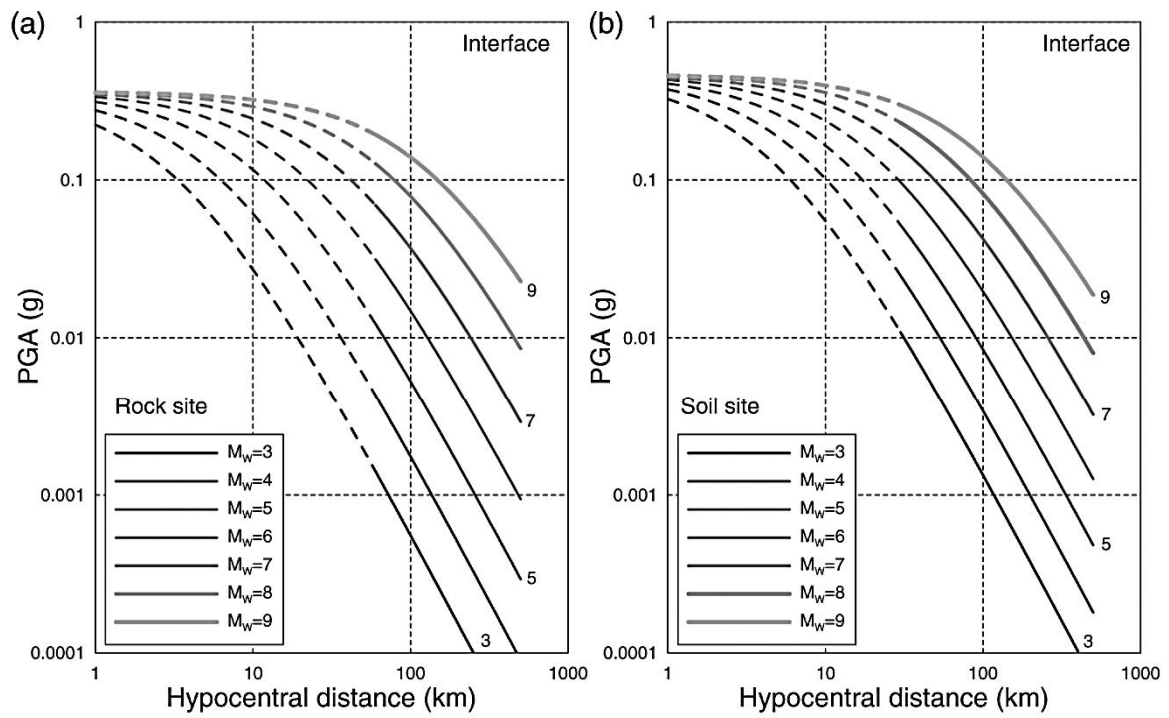


Figure 4. Results of the PGA attenuation curves for interface earthquakes at different magnitudes: (a) rock sites and (b) soil sites.

図2.1.1-9 Lin and Lee (2008) によるプレート間地震の最大加速度の例

(6) Zhao and Xu (2012)

Zhao and Xu (2012) は、日本で起ったマグニチュードが6.5から9.0のプレート間地震の強震記録を用いて、応答スペクトルのマグニチュード依存性を調べている。図2.1.1-10に検討に用いた地震のモーメントマグニチュードと震源深さとの関係、およびモーメントマグニチュードと強震記録数との関係を示す。

マグニチュード依存性の検討に当っては、直線と折れ線以外に下式で表される曲線を用いている。

$$F(M_W) = (M_W - 6.5) \exp[\mu \log_e(M_W - 6.5 + \rho) + \varphi] \quad (2.1.1-7)$$

ここに、 μ 、 ρ 、 φ は回帰で求まる定数である。

回帰分析の結果得られた応答スペクトルのモーメントマグニチュード依存性を図2.1.1-11に示す。図より、Zhao (2010) による直線より、本研究による折れ線か曲線のほうがデータに合っていることがわかる。

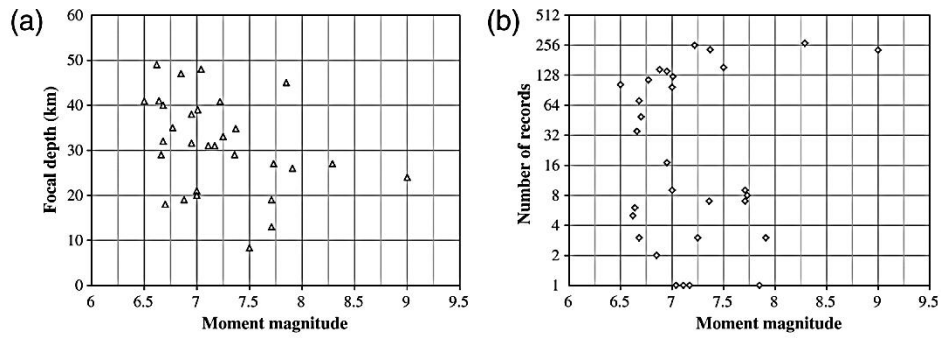


Figure 5. (a) The distribution of strong-motion records from large subduction interface earthquakes from Japan, with respect to magnitude and focal depth. (b) The number of records for each of the 30 earthquakes with a magnitude of 6.5 or larger, including 230 records from the 11 March 2011 earthquake with M_w 9.0.

図2.1.1-10 Zhao and Xu (2012) が応答スペクトルのマグニチュード依存性の検討に用いた地震のモーメントマグニチュードと震源深さとの関係およびモーメントマグニチュードと強震記録数との関係

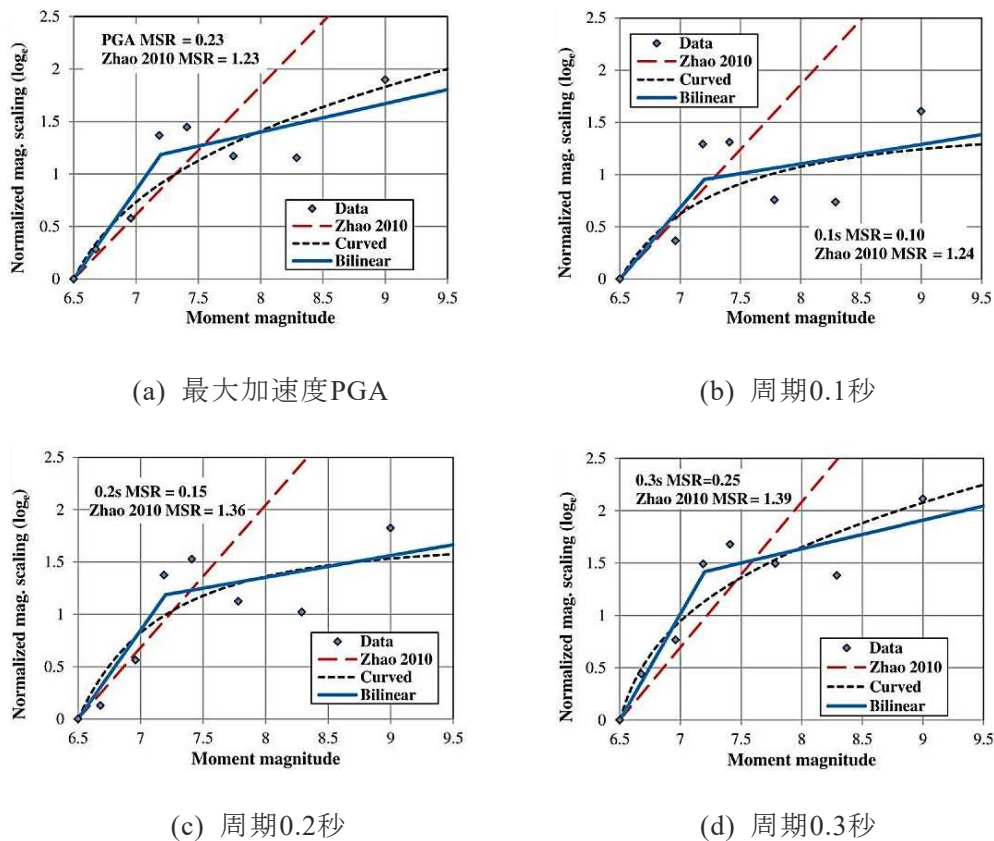
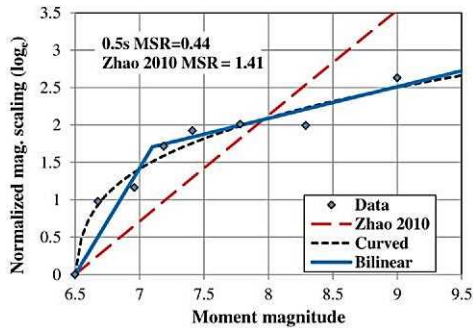
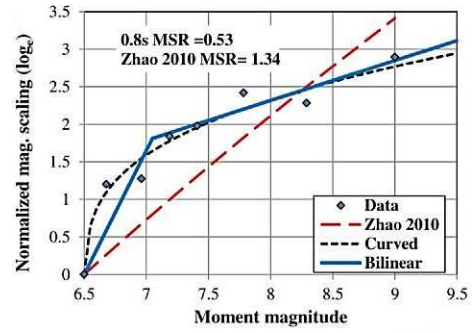


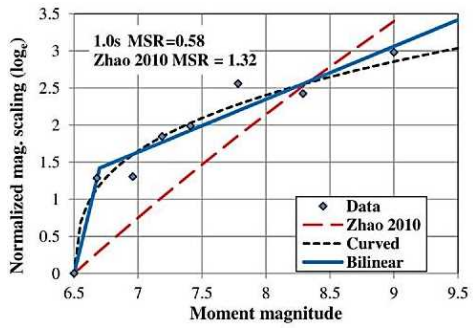
図2.1.1-11 Zhao and Xu (2012) により求められた応答スペクトルのモーメントマグニチュード依存性



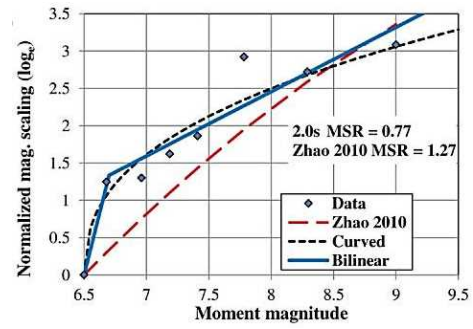
(e) 周期0.5秒



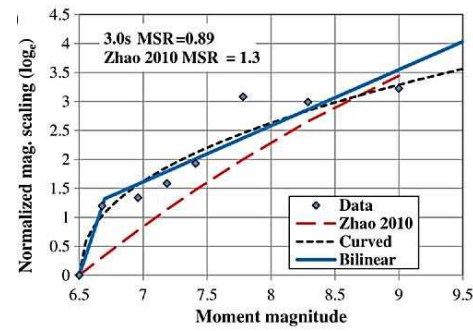
(f) 周期0.8秒



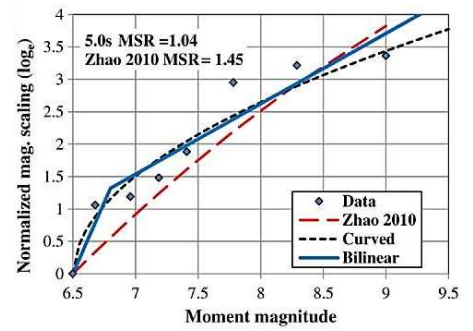
(g) 周期1.0秒



(h) 周期2.0秒



(i) 周期3.0秒



(j) 周期5.0秒

図2.1.1-11 Zhao and Xu (2012) により求められた応答スペクトルのモーメントマグニチュード依存性 (つづき)

(7) Zhao *et al.* (2016)

Zhao *et al.* (2016) 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、

$$\begin{aligned} \log_e(y_{i,j}) = & f_{\text{mint}S} + g_{\text{int}} \log_e(r_{i,j}) + g_{\text{int}SL} \log_e(x_{i,j} + 200.0) \\ & + e_{\text{int}S} x_{i,j} + e_{\text{int}}^V x_{i,j}^V + \gamma_{\text{int}} + \log_e(A) + \xi_{i,j} + \eta_i \end{aligned} \quad (2.1.1-8)$$

である。ここに、 $y_{i,j}$ は i 番目の地震の j 番目の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)、 $f_{\text{mint}S}$ は震源項で(2.1.1-9)式による値、 $r_{i,j}$ は距離で(2.1.1-10)式による値、 $x_{i,j}$ は断層最短距離、 $x_{i,j}^V$ は火山帯を通ってきた距離、 A は地盤増幅比である。また、 $\xi_{i,j}$ は地震間の誤差、 η_i は地震内の誤差である。

$$f_{\text{mint}S}(m_i, h_i) = b_{\text{int}} h_i + \gamma_{\text{int}S} + \begin{cases} c_{\text{int}S} m_i & \text{if } m_i \leq m_c \\ c_{\text{int}S} m_c + d_{\text{int}}(m_i - m_c) & \text{if } m_i > m_c \end{cases} \quad (2.1.1-9)$$

$$r_{i,j} = x_{\text{int}o} + x_{i,j} + \exp(c_1 + c_2 C_m) \quad (2.1.1-10)$$

$$C_m = \begin{cases} m_i & \text{if } m_i \leq C_{\text{max}} \\ C_{\text{max}} & \text{if } m_i > C_{\text{max}} \end{cases} \quad (2.1.1-11)$$

ここに、 m_i は i 番目の地震のモーメントマグニチュード、 h_i は断層上端深さ、 b_{int} 、 $\gamma_{\text{int}S}$ 、 $C_{\text{int}S}$ 、 d_{int} は回帰係数である。 m_c は 7.1 である。また、 $x_{\text{int}o} = 10.0$ km、 c_1 と c_2 は回帰係数、 $C_{\text{max}} = m_c = 7.1$ である。

一方、25 km より深いプレート間地震については、

$$\begin{aligned} \log_e(y_{i,j}) = & f_{\text{mint}D} + g_{\text{int}} \log_e(r_{i,j}) + g_{\text{int}DL} \log_e(x_{i,j} + 200.0) \\ & + e_{\text{int}}^V x_{i,j}^V + \gamma_{\text{int}} + \log_e(A) + \xi_{i,j} + \eta_i \end{aligned} \quad (2.1.1-12)$$

を用いている。ここに、 $f_{\text{mint}D}$ は震源項で、下式による値である。

$$f_{\text{mint}D}(m_i, h_i) = b_{\text{int}} h_i + \gamma_{\text{int}S} + \begin{cases} c_{\text{int}D} m_i & \text{if } m_i \leq m_c \\ c_{\text{int}D} m_c + d_{\text{int}}(m_i - m_c) & \text{if } m_i > m_c \end{cases} \quad (2.1.1-13)$$

表 2.1.1-8 と表 2.1.1-9 に回帰係数を、図 2.1.1-12 に加速度応答スペクトルの例を示す。

表2.1.1-8 Zhao *et al.* (2016) 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 3
Model Parameters

T (s)	c_1	c_2	c_{intD}	c_{intS}	d_{int}	γ_{intS}	b_{int}	g_{int}
PGA	-5.301	1.151	1.0997	1.3148	0.553	-3.8953	0.0200	-2.0559
0.01	-5.288	1.151	1.0985	1.3174	0.553	-3.8953	0.0200	-2.0657
0.02	-5.276	1.151	1.0923	1.3192	0.553	-3.8953	0.0200	-2.1023
0.03	-5.268	1.151	1.1069	1.3410	0.553	-3.8953	0.0207	-2.1923
0.04	-5.263	1.151	1.1158	1.3805	0.553	-3.8953	0.0231	-2.2464
0.05	-5.259	1.151	1.1023	1.4325	0.553	-3.8953	0.0271	-2.2934
0.06	-5.255	1.151	1.0861	1.4624	0.553	-3.8953	0.0297	-2.3117
0.07	-5.253	1.151	1.0729	1.4712	0.553	-3.8953	0.0321	-2.3110
0.08	-5.250	1.151	1.0638	1.4643	0.553	-3.8946	0.0320	-2.2878
0.09	-5.248	1.151	1.0586	1.4470	0.553	-3.9018	0.0297	-2.2468
0.10	-5.246	1.151	1.0567	1.4232	0.553	-3.9077	0.0279	-2.2041
0.12	-5.243	1.151	1.0605	1.3683	0.553	-3.9164	0.0247	-2.1201
0.14	-5.240	1.151	1.0714	1.3156	0.553	-3.9227	0.0212	-2.0434
0.15	-5.239	1.151	1.0786	1.2928	0.553	-3.9253	0.0195	-2.0109
0.16	-5.237	1.151	1.0866	1.2732	0.553	-3.9275	0.0179	-1.9830
0.18	-5.235	1.151	1.1047	1.2483	0.553	-3.9313	0.0151	-1.9461
0.20	-5.233	1.151	1.1244	1.2372	0.553	-3.9345	0.0126	-1.9270
0.25	-5.229	1.151	1.1769	1.2239	0.553	-3.9407	0.0077	-1.8988
0.30	-5.226	1.151	1.2297	1.2285	0.553	-3.9455	0.0044	-1.8914
0.35	-5.223	1.151	1.2806	1.2422	0.553	-3.9494	0.0022	-1.8930
0.40	-5.221	1.151	1.3287	1.2608	0.553	-3.9527	0.0000	-1.8953
0.45	-5.218	1.151	1.3739	1.2819	0.553	-3.9556	0.0000	-1.9058
0.50	-5.216	1.151	1.4163	1.3043	0.553	-3.9580	0.0000	-1.9147
0.60	-5.213	1.151	1.4931	1.3502	0.553	-3.9618	0.0000	-1.9274
0.70	-5.210	1.151	1.5607	1.3952	0.560	-3.9648	0.0000	-1.9345
0.80	-5.208	1.151	1.6206	1.4382	0.580	-3.9673	0.0000	-1.9374
0.90	-5.206	1.151	1.6739	1.4788	0.602	-3.9696	0.0000	-1.9373
1.00	-5.204	1.151	1.7217	1.5169	0.622	-3.9720	0.0000	-1.9351
1.25	-5.200	1.151	1.8219	1.6015	0.667	-3.9795	0.0000	-1.9247
1.50	-5.196	1.151	1.9008	1.6728	0.705	-3.9905	0.0000	-1.9119
2.00	-5.191	1.151	2.0148	1.7837	0.768	-4.0265	0.0000	-1.8886
2.50	-5.187	1.151	2.0889	1.8624	0.820	-4.0830	0.0000	-1.8725
3.00	-5.183	1.151	2.1357	1.9171	0.863	-4.1594	0.0000	-1.8635
3.50	-5.181	1.151	2.1625	1.9532	0.902	-4.2542	0.0000	-1.8597
4.00	-5.178	1.151	2.1739	1.9745	0.935	-4.3658	0.0000	-1.8595
4.50	-5.176	1.151	2.1730	1.9836	0.966	-4.4927	0.0000	-1.8615
5.00	-5.174	1.151	2.1620	1.9826	0.994	-4.6331	0.0000	-1.8645

表2.1.1-9 Zhao *et al.* (2016) 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
Model Parameters

T (s)	g_{intLD}	g_{intLS}	e_{int}^V	e_{intS}	γ_{int}	Rock-Site Factor
PGA	0.5454	1.1336	-0.01123	-0.00628	-4.4986	1.358
0.01	0.5498	1.1336	-0.01125	-0.00625	-4.4589	1.247
0.02	0.5617	1.1336	-0.01127	-0.00616	-4.2581	1.149
0.03	0.5789	1.1336	-0.01158	-0.00572	-3.9180	1.097
0.04	0.4933	0.9881	-0.01203	-0.00532	-3.1142	1.065
0.05	0.4910	0.9044	-0.01256	-0.00503	-2.7604	1.037
0.06	0.5085	0.8877	-0.01312	-0.00528	-2.6409	1.038
0.07	0.5275	0.9049	-0.01359	-0.00569	-2.6562	1.050
0.08	0.5460	0.9421	-0.01382	-0.00619	-2.7527	1.103
0.09	0.5631	0.9865	-0.01393	-0.00673	-2.8992	1.192
0.10	0.5762	1.0355	-0.01395	-0.00718	-3.0770	1.277
0.12	0.5926	1.1353	-0.01381	-0.00793	-3.4828	1.400
0.14	0.6098	1.2342	-0.01351	-0.00853	-3.9161	1.525
0.15	0.6196	1.2813	-0.01333	-0.00879	-4.1348	1.578
0.16	0.6308	1.3266	-0.01312	-0.00902	-4.3524	1.625
0.18	0.6620	1.4113	-0.01269	-0.00927	-4.7803	1.705
0.20	0.6998	1.4885	-0.01223	-0.00942	-5.1944	1.768
0.25	0.7845	1.6521	-0.01108	-0.00959	-6.1580	1.868
0.30	0.8594	1.7813	-0.00998	-0.00952	-7.0200	1.917
0.35	0.9234	1.8844	-0.00898	-0.00933	-7.7915	1.938
0.40	0.9801	1.9676	-0.00808	-0.00911	-8.4955	1.944
0.45	1.0222	2.0355	-0.00727	-0.00888	-9.1135	1.945
0.50	1.0587	2.0914	-0.00656	-0.00866	-9.6852	1.942
0.60	1.1180	2.1764	-0.00534	-0.00824	-10.6895	1.928
0.70	1.1630	2.2360	-0.00437	-0.00787	-11.5460	1.911
0.80	1.1973	2.2783	-0.00359	-0.00755	-12.2872	1.892
0.90	1.2236	2.3085	-0.00296	-0.00726	-12.9363	1.873
1.00	1.2437	2.3299	-0.00244	-0.00700	-13.5100	1.853
1.25	1.2725	2.3585	-0.00153	-0.00644	-14.6903	1.799
1.50	1.2854	2.3665	-0.00097	-0.00597	-15.6030	1.740
2.00	1.2883	2.3554	-0.00043	-0.00518	-16.9001	1.620
2.50	1.2773	2.3311	-0.00023	-0.00451	-17.7366	1.508
3.00	1.2605	2.3041	-0.00016	-0.00393	-18.2714	1.416
3.50	1.2411	2.2779	0.0	-0.00344	-18.5926	1.347
4.00	1.2203	2.2537	0.0	-0.00302	-18.7547	1.304
4.50	1.1986	2.2316	0.0	-0.00267	-18.7935	1.285
5.00	1.1763	2.2115	0.0	-0.00240	-18.7339	1.267

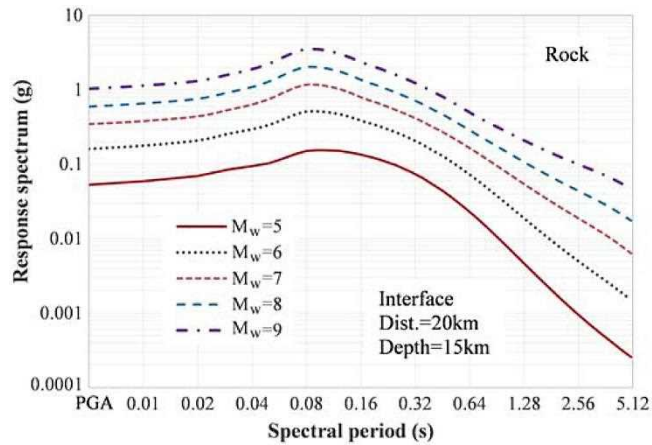


Figure 13. Predicted rock-site spectra for shallow interface events with M_w 5–9 and a depth of 15.0 km at a source distance of 20.0 km. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

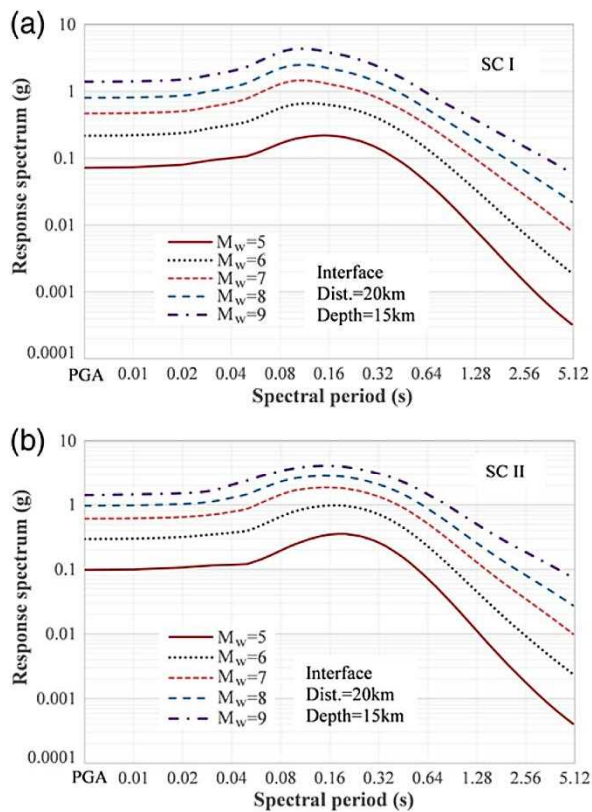


Figure 14. Predicted spectra for shallow interface events with M_w 5–9 and a depth of 15.0 km at a source distance of 20.0 km for (a) an SC I site and (b) an SC II site. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

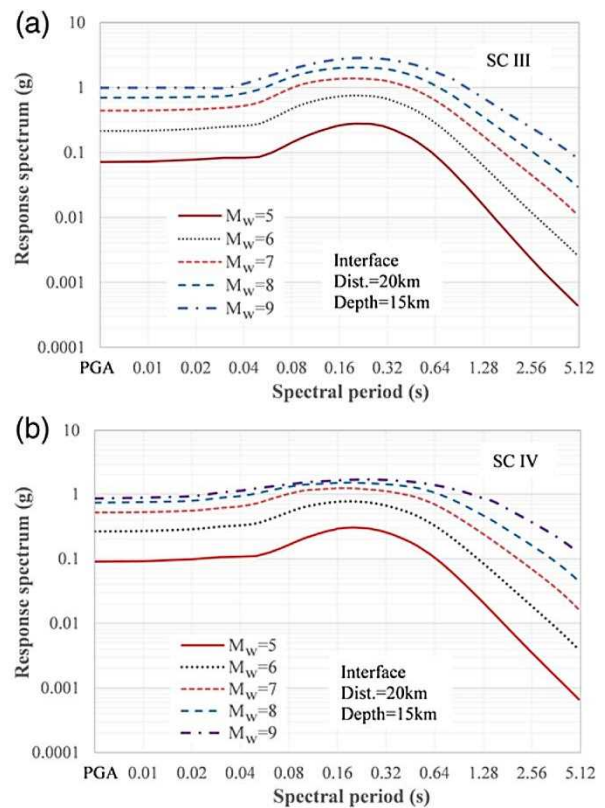


Figure 15. Predicted spectra for shallow interface events with M_w 5–9 and a depth of 15.0 km at a source distance of 20.0 km for (a) an SC III site and (b) an SC IV site. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.1.1-12 Zhao *et al.* (2016) による日本の浅いプレート境界地震の加速度応答スペクトルの例

2.1.2 プレート間地震のスケーリング則の調査

(1) 田島・他 (2013)

田島・他 (2013) は、 M_W 8.4から9.1までのプレート境界の6地震および M_W 7.5から7.9までの内陸地殻内の6地震の計12地震について、震源モデルの構築に用いたデータの周期帯が異なる長周期および短周期の震源モデルを収集し、強震動予測レシピで使用される震源パラメータを整理してスケーリング則を求め、両者の共通点や相違点について既往研究との比較も含めて研究している。

収集したデータ ($8.4 \leq M_W \leq 9.1$) から M_0 と断層幅(W)の関係を調べたところ、図2.1.2-1に示すように、文献によるばらつきが大きい(図中の藤色丸印)、平均的にはおよそ200 km弱 (180~200 km程度) で飽和することが分かった(図中の大きな色付きの印)。

そこで、 M_W 8.4以上の地震に対し、断層面積 S と地震モーメント M_0 との間に $S \propto M_0^{1/2}$ との関係を仮定し、以下の回帰式を導いている。

$$S(\text{km}^2) = 5.82 \times 10^{-7} \times M_0^{1/2}(\text{Nm}) \quad (2.1.2-1)$$

結果を図2.1.2-2のa)に示す。

同様に、平均すべり量 D についても $D \propto M_0^{1/2}$ との関係を仮定し、以下の回帰式を導いている。

$$D(\text{m}) = 3.37 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2}(\text{Nm}) \quad (2.1.2-2)$$

結果を図2.1.2-2のb)に示す。

以上の検討より、プレート間巨大地震のスケーリング則については、巨視的パラメータである M_0 - S および M_0 - D の関係は、沈み込み帯での地震発生層の厚さの制限による断層幅の飽和に起因して、 M_W 8.4程度以上の地震では3 stage scaling modelの2段階目であると述べている。

一方、微視的パラメータについては、長周期震源モデルから求めた地震モーメント M_0 と大すべり域の面積 S_{aL} との関係は、同様の長周期震源モデルによる検討を行ったMurotani *et al.* (2008) による経験的關係 ($S_{aL} = 0.20 \times S$) と調和的であるが、短周期震源モデルから求めた地震モーメント M_0 と強震動生成域の面積 S_{aS} との関係は、長周期震源モデルから求めた M_0 - S_{aL} の関係の0.35倍と顕著に小さく、短周期震源モデルによる検討を行った佐藤 (2010)

による結果と整合的であることが分かった。断層破壊面積(S)と大すべり域の面積(S_{aL})および強震動生成域の面積(S_{aL})の相互関係を表2.1.2-1に示す。

地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係については、図2.1.2-3に示すように、内陸地殻内地震およびプレート間地震ともに、既往研究による経験的關係 (内陸地殻内地震については壇・他 (2001)、プレート間地震については佐藤 (2010)) と整合的であり、巨大地震についてもプレート間地震の A の方が内陸地殻内地震のそれよりも大きくなる傾向も見受けられるが、解析に用いた両タイプの地震の地震規模は重なっておらず、ばらつきも大きいいため、今回の結果から地震タイプによる A の違いを判断することは難しいと述べている。

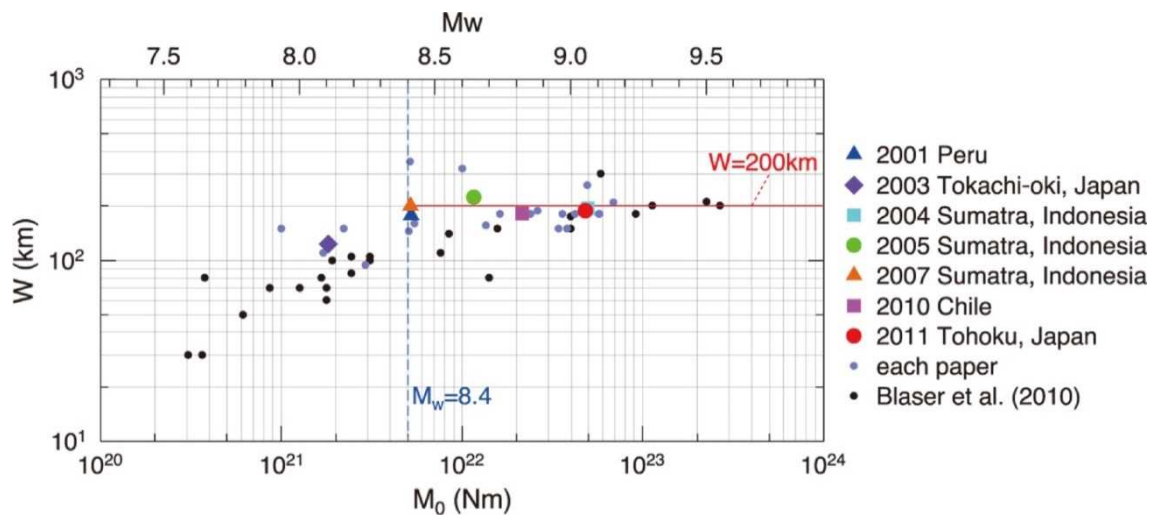


Fig. 4. Relationship between fault width W and M_0 for plate-boundary earthquakes shown in Table 1 and Blaser *et al.* (2010).

図2.1.2-1 田島・他 (2013) によるプレート間地震の地震モーメントと断層幅の関係

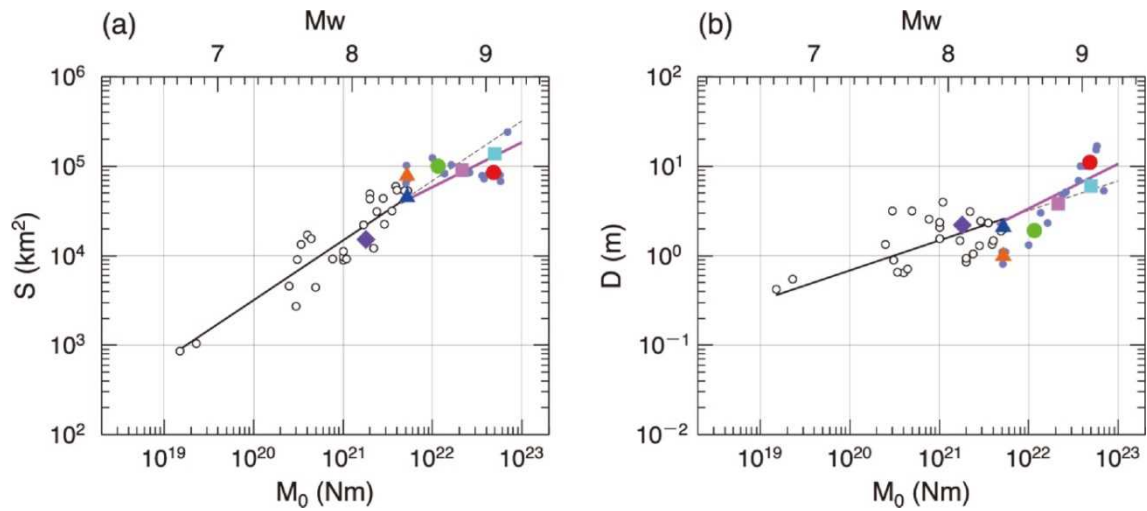


Fig. 2. Scaling relationships for plate-boundary earthquakes. Relationships of (a) S , (b) D , (c) combined area of S_{aL} (solid symbols) and that of S_{aS} (outline symbols), and (e) D_{max} with respect to M_0 . (d) Relation between S_{aL} and S . Large color symbols show averaged results of plural papers in each earthquake; small light violet plots show results of each paper. Thin dashed lines indicate extensions of lines obtained by the previous studies.

図2.1.2-2 田島・他 (2013) によるプレート間地震の地震モーメントと断層破壊面積との関係および地震モーメントと平均すべり量との関係

表2.1.2-1 田島・他 (2013) によるプレート間地震の断層破壊面積(S)と大すべり域の面積(S_{aL})および強震動生成域の面積(S_{aS})との相互関係

Table 3. Ratios related to dimensions of rupture area (S), large slip area (S_{aL}), and strong motion generation area (S_{aS}).

Earthquake	S_{aS}/S_{aL}	S_{aL}/S	S_{aS}/S
2003 Tokachi-oki, Japan	0.36	0.22	0.079
2011 Tohoku, Japan	0.35	0.23	0.079

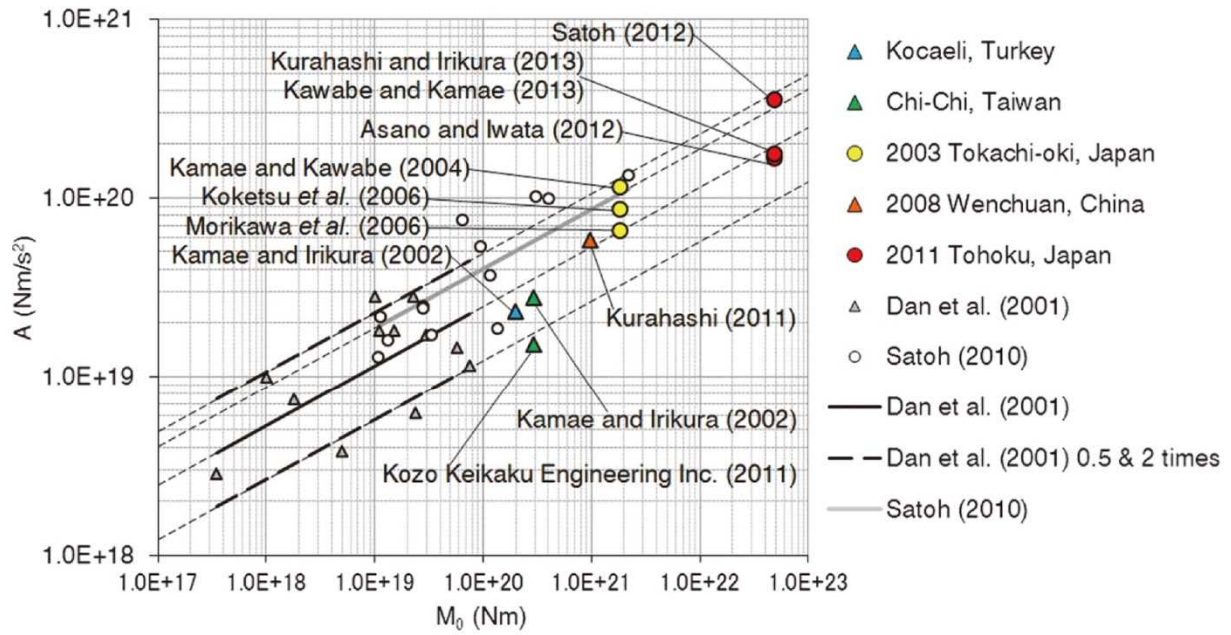


Fig. 3. Relationship between short-period source spectral level A and M_0 for crustal and plate-boundary earthquakes shown in Table 2, Dan *et al.* (2001), and Satoh (2010). Thin dashed lines indicate extensions of lines obtained by the previous studies.

図2.1.2-3 田島・他 (2013) によるプレート間地震の地震モーメントと短周期レベルとの関係

(2) Skarlatoudis *et al.* (2016)

Skarlatoudis *et al.* (2016) は、図2.1.2-4に示す世界のプレート間地震 (モーメントマグニチュード6.75–9.1) の断層パラメータの相似則を検討している。

断層パラメータは、断層長さ L と幅 W と平均すべり量 U が比例する自己相似則を満たすとして、各断層パラメータと地震モーメントとの関係を求めている。図2.1.2-5には、地震モーメントと断層面積との関係および地震モーメントとアスペリティ総面積の関係を示す。図2.1.2-6には、地震モーメントと平均すべり量との関係および地震モーメントと最大すべり量との関係を示す。

一方、Tagima *et al.* (2013) は、地震モーメントが大きいと断層幅が一定となることを示しているため、その検討も行っている。結果を図2.1.2-7に示す。自己相似則を仮定した実線よりも地震モーメントが大きいために断層幅が200kmで一定となる線の方がデータとの残差はやや小さい。したがって、地震モーメントが大きいために断層幅は一定になると考えられるが、その値は沈み込み帯によって変化する可能性があるとして述べている。

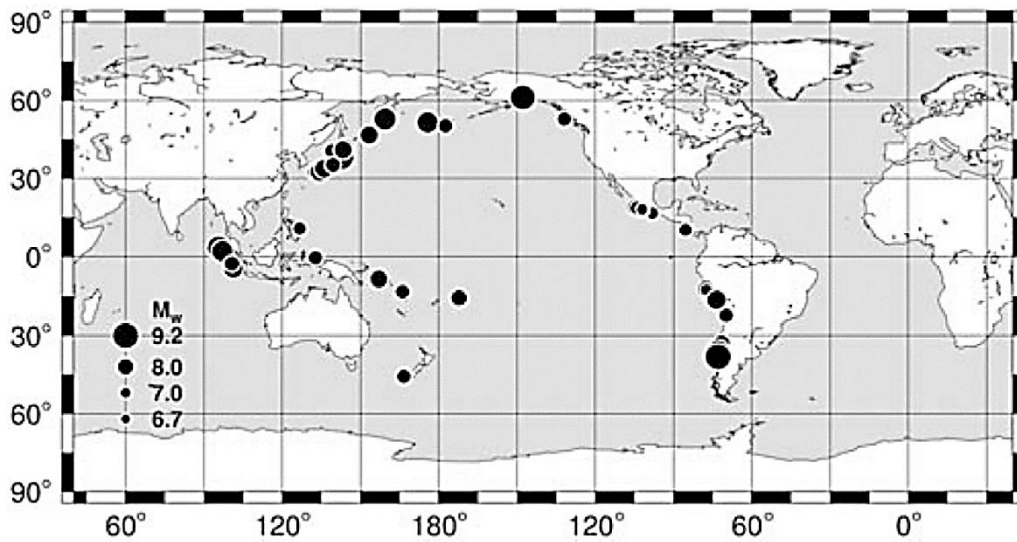


Figure 1. Locations of the earthquakes listed in Table 1.

図2.1.2-4 Skarlatoudis *et al.* (2016) が断層パラメータの相似則の検討に用いた世界のプレート間地震の震央

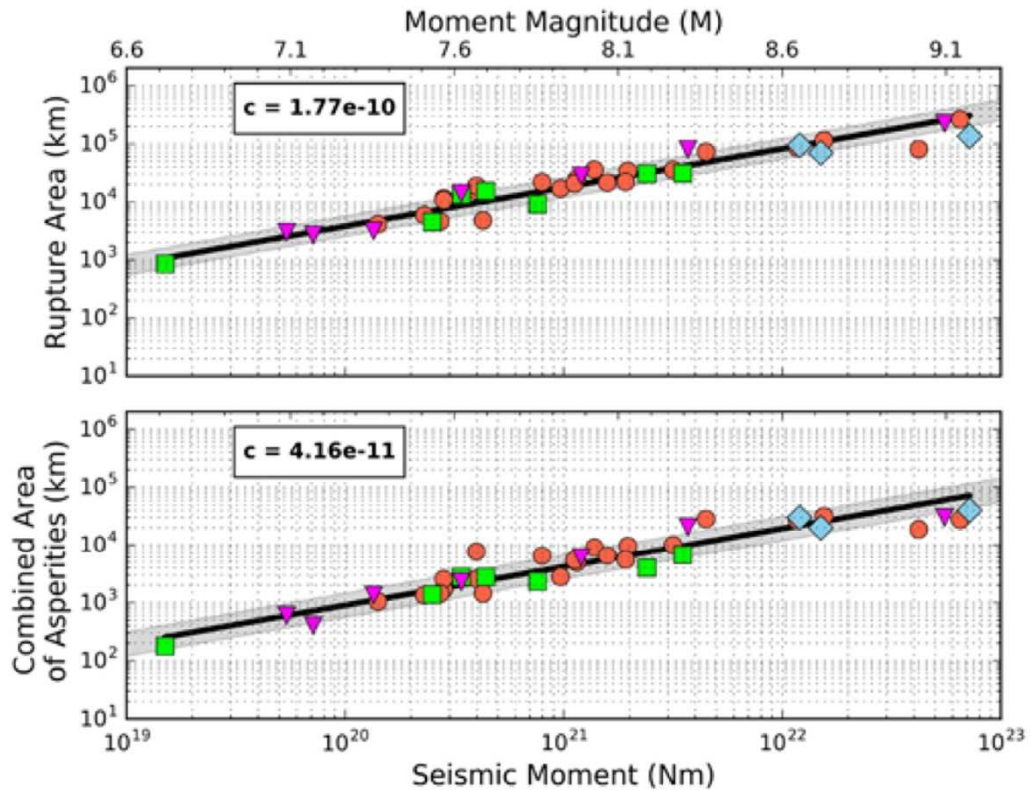


Figure 2. Scaling of the rupture area and the combined area of asperities area with seismic moment, plotted together with data from various studies: (Sea2002, [Somerville *et al.*, 2002](#); Mea2013, [Murotani *et al.*, 2013](#); and Mea2008, [Murotani *et al.*, 2008](#)). The shaded area indicates the ± 1 standard deviation limits. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.1.2-5 Skarlatoudis *et al.* (2016) が断層パラメータの自己相似則を仮定して求めた世界のプレート間地震の地震モーメントと断層面積との関係および地震モーメントとアスペリティ総面積の関係

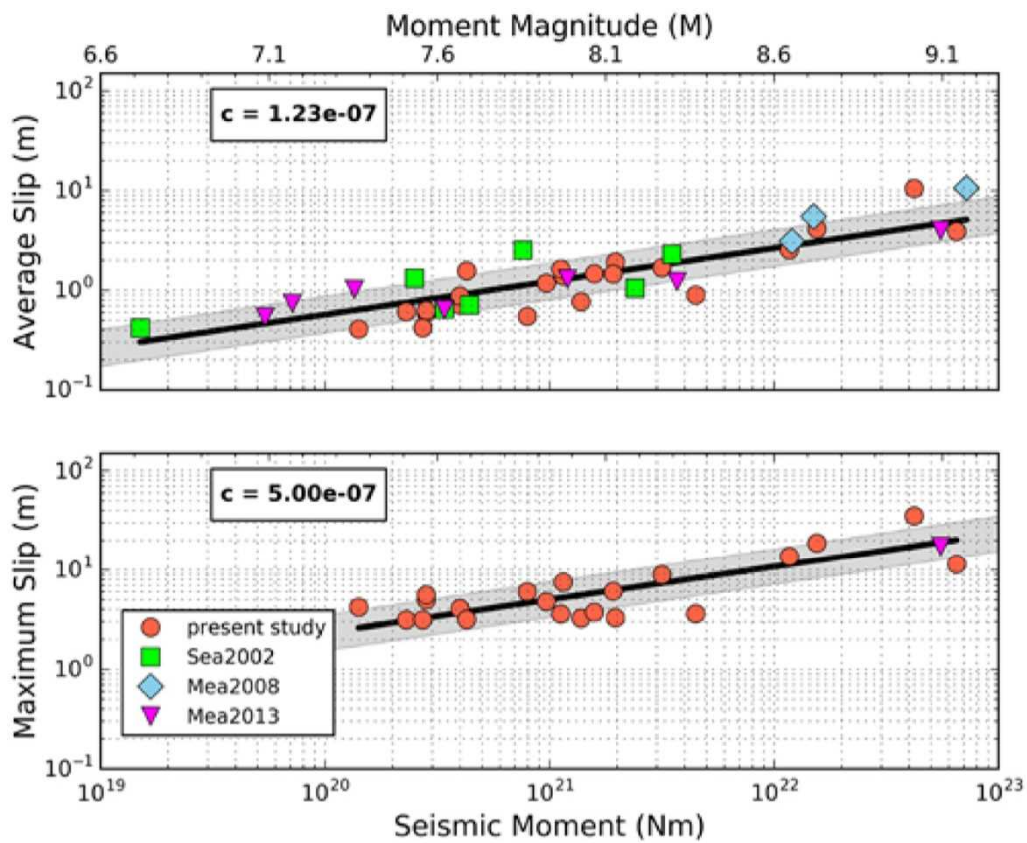


Figure 3. Scaling of average and maximum slip with seismic moment, plotted together with data from various studies; symbols are the same as in Figure 2. The shaded area indicates the ± 1 standard deviation limits. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.1.2-6 Skarlatoudis *et al.* (2016) が断層パラメータの自己相似則を仮定して求めた世界のプレート間地震の地震モーメントと平均すべり量との関係および地震モーメントと最大すべり量との関係

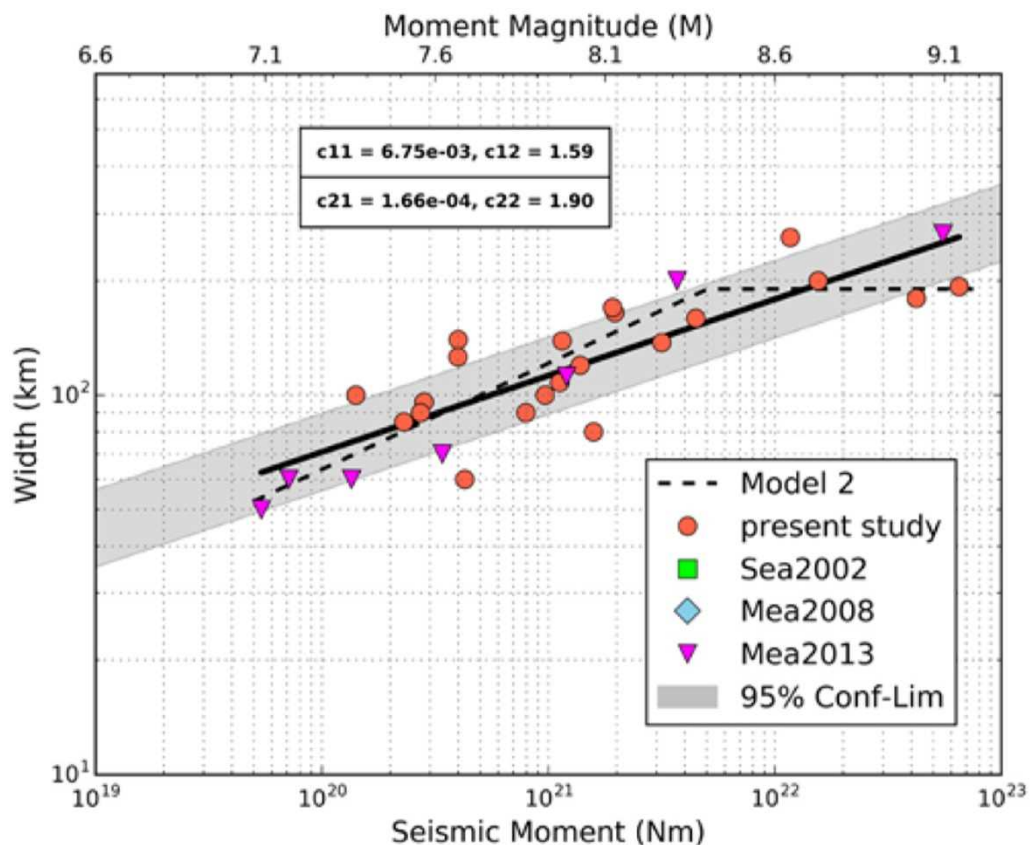


Figure 9. Scaling relation of fault width with respect to seismic moment. Symbols are the same as in Figure 2. The dashed line corresponds to the bilinear model used in the regressions (model number 2 in figure legend). The shaded area indicates the ± 1 standard deviation limits of the linear model. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図2.1.2-7 Skarlatoudis *et al.* (2016) が求めた世界のプレート間地震の地震モーメントと断層幅との関係

(3) 仲野・他 (2015)

仲野・他 (2015) は、1996年8月から2011年12月までの間に、K-NET 観測点 (972点)、KiK-net 観測点 (601点)、JMA 観測点 (532点) のいずれかの地点で観測された地震波形の加速度フーリエスペクトルを用いて、地震モーメントと短周期レベルとの関係、地震モーメントと Brune (1970) の応力降下量との関係、震源深さと Brune (1970) の応力降下量との関係を調べた。

分析に際し、地震を下の3つに分類している。

Type B (プレート間地震)

Type I (プレート内地震)

Type C (地殻内地震)

地震モーメント $M_0 \geq 1.0E+24$ (dyne-cm) のデータに対して求めた回帰式は、下のとおりである。

$$A = \begin{cases} 1.98 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} & \text{(Type B: プレート間地震)} \\ 2.15 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} & \text{(Type I: プレート内地震)} \\ 5.44 \times 10^{16} \times M_0^{1/3} & \text{(Type C: 地殻内地震)} \end{cases}$$

*単位は dyne-cm ($=10^{-7}N \cdot m$)

図 2.1.2-8 は、気象庁マグニチュード M_{JMA} の範囲ごとに整理した Brune の応力降下量と地震モーメントとの関係である。図中の各段は気象庁マグニチュード M_{JMA} の大きさを示しており、上段は $M_{JMA} \geq 4.5$ 、中段は $M_{JMA} \geq 5.0$ 、下段は $M_{JMA} \geq 5.5$ である。 $M_{JMA} \geq 4.5$ の全地震を見るとあまり規模依存性があるようには見えないが、比較的大きな $M_{JMA} \geq 5.5$ の地震だけを見ると海溝型地震、地殻内地震を問わず地震規模依存性があるように見える。これは地震規模依存性を示す一つの証拠のように思えるが、既往研究で指摘されているように、その分布を見ると規模依存性があるというよりもある規模以上の地震では大きな応力降下量の地震しか生じない傾向があるように見える。

一方、図 2.1.2-9 は、Brune (1970) の応力降下量と震源深さの関係である (地殻内地震を ■、プレート間地震を ▲、プレート内地震を ● であらわす)。図より、地殻内地震は標準偏差が小さいが、海溝型地震は大きいこと、深さ依存は全地震タイプで深さ別に平均をとれば徐々に増加する傾向があることがわかる。この図は、一部の地殻内地震 (○で囲んだ3地震はいずれも海域の地震) を除くと、地殻内地震の低い平均応力降下量と海溝型地震の

高い平均応力降下量はその震源深さの影響として説明できることを示していると述べている。

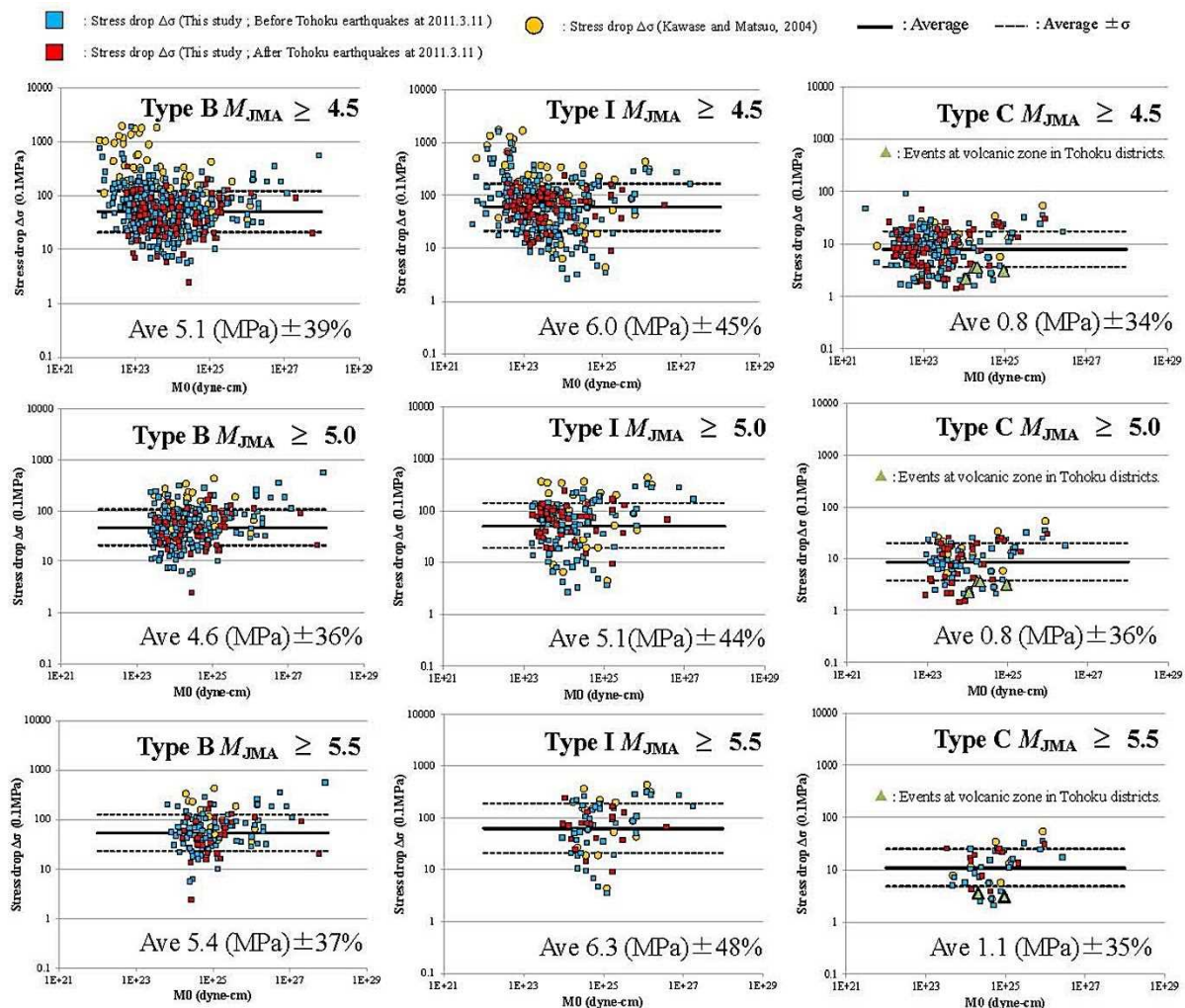


図9 Bruneの応力降下量¹⁾

図 2.1.2-8 仲野・他 (2015) による地震モーメントと Brune の応力降下量との関係

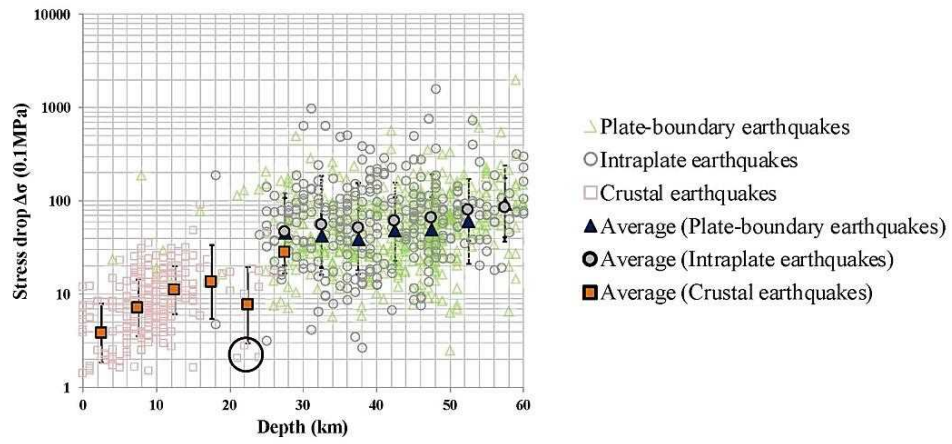


図 13 応力降下量と震源深さの関係

図 2.1.2-9 仲野・他 (2015) による震源深さと Brune (1970) の応力降下量との関係
(大きな○は海域の3つの地殻内地震)

2.1.3 プレート間地震の断層パラメータの調査

本項では、国内外のプレート間地震の断層パラメータ、特に断層長さ、断層幅、断層面積および短周期レベルの特徴について調べるために、下記の項目を調査した。調査の対象とした地震は現時点で下記の項目が入手できる地震を中心とした。

- ・ 震源位置
- ・ モーメントマグニチュード
- ・ 地震モーメント
- ・ 断層長さ
- ・ 断層幅
- ・ 断層面積
- ・ 短周期レベル
- ・ S波速度

調査結果を表 2.1.3-1 および表 2.1.3-2 に示す。

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果

赤字：作図で使用した値

地震番号	地域(プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード M _w (M ₀ から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベル (SE: Spectral Inversion)	短周期レベル (SMGA: Strong Motion Generation Area)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				A (N・m/s ²)	A (N・m/s ²)														
1	太平洋	文久の地震	1861/10/21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M7.6 ・短周期波源域(Fig19(c)点線内○)の読み取り数26(○1つを10km×10kmとすると2600km ²)	
2	太平洋	三陸沖	1896/6/15	39.5	144.0	*	*	2.62E+21	*	*	*	*	*	*	*	*	宇津(1994)	・M _w =8.2 ・M ₀ は余震の総数から算定する式を用いた	
3	太平洋	宮城県沖	1897/2/20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M7.9 ・短周期波源域(Fig14(c)点線内○)の読み取り数21(○1つを10km×10kmとすると2100km ²)	
4	太平洋	宮城県沖	1897/8/5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M7.9 ・短周期波源域(Fig15(d)点線内○)の読み取り数44(○1つを10km×10kmとすると4400km ²)	
5	太平洋	宮城県沖	1898/4/23	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M7.2 ・短周期波源域(Fig17(b)点線内○)の読み取り数16(○1つを10km×10kmとすると1600km ²)	
6	太平洋	三陸沖	1933/3/2	*	*	*	8.4	4.30E+21	*	*	18500	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.3	
7	太平洋	宮城県沖	1933/6/19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Umino et al. (2006)	M=7.1	
8	太平洋	宮城県沖	1936/11/3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	武村・神田 (2006)	・神田・武村(2005)の震度インバージョン結果から短周期波域(短周期地震波エネルギーの50%以上が発生した領域)を推定 ・最適M7.9 ・短周期波域(Fig.8(a)点線内○)の読み取り数25(○印1つを10km×10kmとすると2500km ²)	
9	太平洋	宮城県沖	1937/7/27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M8.5 ・短周期波源域(Fig13(c)点線内○)の読み取り数19(○1つを10km×10kmとすると1900km ²)	
10	太平洋	塩屋崎沖 (福島県沖)	1938/5/23	36.6	141.3	0	7.5	2.50E+20	*	*	3540	*	9.9E+19 (背景領域 含む)	*	37	687 (312, 167, 208)	池田・他 (2008)	・植竹・他(2006)の波形インバージョン結果を特性化している ・平均すべり量が全体平均すべり量の1.25倍となる領域をアスペリティとしている ・アスペリティの面積は「全体(アスペリティ1, 2, 3)」で表示する ・EGFで観測地点の計算震度が5か41になるようにΔσ _a (=37MPa)を推定 ・背景領域を含む各領域のパラメータと要素地震のパラメータとの比からAを算定している ・背景領域のΔσ _b 値(=31MPa)が再現できない	
11	太平洋	塩屋崎沖 (福島県沖)	1938/11/5 17.43	36.9	141.9	43	7.6	3.70E+20	*	*	5100	*	8.1E+19 (背景領域 含む)	*	22	1380 (900, 480)	池田・他 (2008)	・植竹・他(2006)の波形インバージョン結果を特性化している ・平均すべり量が全体平均すべり量の1.25倍となる領域をアスペリティとしている ・アスペリティの面積は「全体(アスペリティ1, 2)」で表示する ・EGFで観測地点の計算震度が5か41になるようにΔσ _a (=22MPa)を推定 ・背景領域を含む各領域のパラメータと要素地震のパラメータとの比からAを算定している	

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード M _w (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レ ベル (SI: Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レ ベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティ の応力降 下量 Δσ _n (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯 度 [N]	経 度 [E]	深 さ [km]													
12	太平洋	十勝沖	1952/3/4	*	*	*	8.1	1.70E+21	*	*	19000	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.3	
13	太平洋	十勝沖	1968/5/16	40.7	143.6	0	*	2.80E+21	*	*	15000	*	*	*	*	*	加藤・他 (1999)	・M0はKanamori (1971) ・平均すべり量4.1m(面積とすべり量は断層パラメーターハンドブックを引用)	
同上	同上	同上	1968/5/16	40.7	143.6	0	8.2	2.80E+21	270	130	35100	*	*	*	*	*	武村・他 (2008)	・断層規模は永井他(2001) ・M0-S図のM0は、Kanamori and Anderson (1975)を用いた	
同上	同上	同上	1968/5/16	*	*	*	*	2.80E+21	*	*	15000	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8	
同上	同上	同上	1968/5/16	*	*	*	*	3.50E+21	*	*	6800	*	*	*	*	5600	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.30	
14	太平洋	北海道東方沖	1969/8/12	42.7	147.6	20	*	1.50E+21	*	*	*	*	*	*	*	*	森川・笹谷 (2000)	・Table 1 ・深さとM0はKikuchi and Fukao(1987)、ΔσはAbe(1973)による。	
15	Pacific plate	Nemuro-Oki	1973/6/16	*	*	*	7.8	6.70E+20	*	*	6000	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =7.7	
16	太平洋	宮城県沖	1978/6/12	38.2	142.2	40	*	3.37E+20	*	*	*	*	*	*	*	*	加藤・他 (1999)	・M0はハーバード大学のCMT解	
17	太平洋	福島県沖	1982/7/23	36.2	142.0	30	7.0	3.92E+19	*	*	*	6.15E+19	*	*	*	*	加藤・他 (1998)	・Aは加速度観測スペクトルから推定	
18	太平洋	明治三陸沖	1986/6/15	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Lay et al. (2011)	M~8.5: thrust fault:	
19	太平洋	北海道南西沖	1993/11/12 →日にち確認	*	*	*	*	3.40E+20	200	70	14000	*	*	*	*	2300	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.62	
同上	同上	同上	1993/07/12	*	*	*	7.6	3.40E+20	200	70	14000	*	2.14E+19	*	5.1	*	Mendoza et al(1993), Seno(2014)	L. W. Δσ, Δσ asp→ Seno(2014)	
20	太平洋	三陸はるか沖	1994/12/28	*	*	*	*	4.40E+20	*	*	2800	*	*	*	*	2800	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.70	
同上	同上	同上	1994/12/28	*	*	*	7.7	4.00E+20	110	35	3850	*	9.83E+19	*	43.5	*	佐藤(2010), Seno(2014)	L. W. Δσ, Δσ asp→ Seno(2014)	
同上	同上	同上	1994/12/28	*	*	*	*	3.99E+20	*	140	15400	*	*	*	*	2600	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.67	
同上	同上	同上	1994/12/28	40.4	143.7	0.0	*	*	110	140	15400	*	*	*	*	*	武村・他 (2008)	・断層規模は永井他(2001)	
21	太平洋	宮城県沖	2003/5/26	38.8	141.7	72.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	神田・武村 (2005)	・震度インバージョンで最適Mと短周期波源域(エネルギー値が平均の10倍以上を示す区域)を推定 ・最適M7.1 ・短周期波源域(Fig7色付き○)の読み取り数32(○1つを10km×10kmとすると3200km ²)	
22	Tokachi-Oki, Japan	-	2003/9/25	*	*	*	8.1	1.92E+21	130	170	22100	*	*	*	*	5600	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.12	

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニ チュード M _w (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レ ベル (SE Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レ ベル (SMGA Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _σ (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯 度 [N]	経 度 [E]	深 さ [km]													
23	太平洋	十勝沖	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	*	*	*	*	8.57E+19	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・釜江・川辺 (2004)のEGF フォワードモデリング SMGA 総面積1392km ² SMGAモー メント3.51E+20Nm	
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	*	*	*	*	1.15E+20	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・楢橋・他 (2006)のEGFフォ ワードモデリング SMGA総 面積1536km ² SMGAモー メント3.95E+20Nm	
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	*	*	*	*	6.50E+19	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・Morikawa et al. (2006)の EGFフォワードモデリング SMGA総面積800km ² SMGAモーメント 2.06E+20Nm	
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	42.33 (基準 点)	145.22 (基準 点)	0 (基準 点)	8.2	2.20E+21	130	100	13000	*	*	*	*	*	中村・他 (2015)	・断層形状と位置は1952年 十勝沖地震の笠原 (1975) モデルを参考 ・地震モーメントはKoketsu et al.(2004)のインバージ ョン結果を使用 ・走向220度、傾斜20度 ・V _r =2.7km/s(中央防災会 議)	
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	2.90E+21	*	94	22400	*	*	*	*	4800	0.14	田島・他 (2013)	・Honda et al. (2004) 遠地 データ使用 平均すべり4.6m アスペリティすべり4.6m W は室谷式の面積を平方根し て算定
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	2.20E+21	*	150	12000	*	*	*	*	1700	0.13	田島・他 (2013)	・Koketsu et al. (2004) 強 震データ使用 平均すべり 3.1m アスペリティすべり 5.5m Wは室谷式の面積を 平方根して算定
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	1.70E+21	*	110	22100	*	*	*	*	4900	0.26	田島・他 (2013)	・Yagi (2004) 強震データと 測地データ使用 平均すべ り1.5m アスペリティすべり 3.4m Wは室谷式の面積を 平方根して算定
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	1.00E+21	*	149	8800	*	*	*	*	3200	0.35	田島・他 (2013)	・Yamanaka and Kikuchi (2003) 強震データと遠地 データ使用 平均すべり2.1m アスペリティすべり3.8m W は室谷式の面積を平方根し て算定
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	*	*	1.00E+21	*	149	8800	*	*	*	*	3200	0.35	田島・他 (2013)	・Yamanaka and Kikuchi (2003) 強震データと遠地 データ使用 平均すべり2.1m アスペリティすべり3.8m W は室谷式の面積を平方根し て算定
同上	同上	同上	2003/9/26 04:50	*	*	45	*	2.20E+21	70	120	8400	1.33E+20	*	*	30.4	*	*	佐藤(2010a), Seno(2014)	L, W, Δσ, Δσ _{asp} → Seno(2014)
24	太平洋	十勝南東沖	2003/9/26 06:08	*	*	21.0	*	1.15E+20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	佐藤(2010a)	表1。
25	太平洋	釧路沖	2004/11/29	42.9	145.3	48.2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Suzuki and Iwata (2007)	Mw=7.0, interplate
26	太平洋	宮城県沖	2005/8/16	*	*	*	7.5	2.00E+20	50	72	3584	*	*	*	*	960	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.47
同上	同上	同上	2005/8/16	38.2	142.3	42.0	*	*	*	*	*	*	*	*	17.6: 34.1	92.16: 5 1.84	*	Suzuki and Iwata (2007)	M(JMA)=7.2, between the subducting pacific plate and the North American plate, interplate, 22°30'N(SMGA) SMGA2]
27	太平洋	宮城県沖	2011/3/9	*	*	23	7.2	7.97E+19	*	*	*	5.97E+19	*	*	*	*	*	佐藤(2012)	表1, スペクトルインバージ ョン。
同上	同上	同上	2011/3/9	38.4	142.8	32.0	*	*	48	36	1740	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.32

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード M _w (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レ ベル (SI: Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レ ベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスベ リテイの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスベ リテイの 面積 S _a (km ²)	アスベ リテイの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
28	太平洋	東北地方太平洋沖	2011/3/11	38.1	142.9	24	9.0	4.22E+22	*	*	*	*	1.71E+20	*	20.4, 21.6, 15.7, 10.5, 23.1	40km× 40km, 50km× 50km, 21km× 21km, 28km× 28km, 30km× 30km	*	川辺・釜江 (2013)	・Mw9.0 ・EGFを用いたフォワードモデリング。周期0.1~10秒を対象とする ・アスベリテイ層にはSMGA1~SMGA5の値を記入 ・SMGAのM0の総和は2.03E+21Nmで、JMAのGMT解(4.22E+22Nm)の約5% ・Vr=2.8km/s ・走向185度、傾斜13度 ・短周期レベル(論文表示なし)はSMGAパラメータから算定
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.74E+20	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・Kurahashi and Irikura (2013)のEGFフォワードモデリング SMGA総面積5628km ² SMGAモーメント1.76E+21Nm
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.67E+20	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・Asano and Iwata (2012)のEGFフォワードモデリング SMGA総面積5042km ² SMGAモーメント1.41E+21Nm
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.51E+20	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・佐藤 (2012)のEGFフォワードモデリング SMGA総面積11479km ² SMGAモーメント9.62E+21Nm
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.74E+20	*	*	*	*	田島・他 (2013)	・川辺・釜江 (2013)のEGFフォワードモデリング SMGA総面積6300km ² SMGAモーメント2.06E+21Nm
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	4.81E+22	*	187	85082	*	2.05E+20	*	*	19167	0.23	田島・他 (2013)	・Hayes (2011), Koketsu et al. (2011), Shao et al. (2011), Yagi and Fukahata (2011), Yokota et al. (2011)の平均値 平均すべり11.0m アスベリテイすべり26.8m 最大すべり41.9m ・Kurahashi and Irikura (2013), Asano and Iwata (2012), 佐藤 (2012), 川辺・釜江 (2013)の平均値 SMGA総面積6730km ² SMGAモーメント2.65E+21Nm
同上	同上	同上	2011/3/11	(38.036, 37.863, 36.892, 36.937)	(141.72 9, 142.168 -, 141.093 54.8)	(48.0, 36.6, 50.9, 54.8)	*	*	*	*	*	*	3.51E+20 (2.03E+20, 2.64E+20, 9.90E+19, 4.95E+19)	*	(39.77, 25.85, 29.10, 20.57)	11475 (2025, 8100, 900, 450)	*	佐藤(2012)	・4つのSMGAモデル。 ・SMGAのパラメータは表2。 ・経緯的グリーン関数法による推定。
同上	同上	同上	2011/3/11	39.0 (基準点)	143.8 (基準点)	5 (基準点)	*	4.00E+22	400	200	400× 200	*	*	*	*	*	*	中村・他 (2015)	・走向200度、傾斜15度 ・Vr=2.5km/s
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	4.90E+22	*	260	143000	*	*	*	*	32000	0.22	田島・他 (2013)	・Hayes (2011) 遠地データ使用 平均すべり6.2m アスベリテイすべり17.2m 最大すべり33.5m
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	3.80E+22	*	150	72000	*	*	*	*	16200	0.23	田島・他 (2013)	・Koketsu et al. (2011) 強震データと遠地データと測地データと津波データ使用 平均すべり10.0m アスベリテイすべり22.5m 最大すべり35.5m
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	5.75E+22	*	180	67500	*	*	*	*	16500	0.24	田島・他 (2013)	・Shao et al. (2011) 遠地データ使用 平均すべり16.8m アスベリテイすべり41.3m 最大すべり59.8m
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	5.70E+22	*	180	79200	*	*	*	*	16800	0.21	田島・他 (2013)	・Yagi and Fukahata (2011) 遠地データ使用 平均すべり15.2m アスベリテイすべり35.1m 最大すべり51.2m
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	4.20E+22	*	180	81000	*	*	*	*	18000	0.22	田島・他 (2013)	・Yokota et al. (2011) 強震データと遠地データと測地データと津波データ使用 平均すべり10.0m アスベリテイすべり24.6m 最大すべり35.3m
同上	同上	同上	2011/3/11	38.3	142.4	24.4	*	*	369	176	45300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=9.04
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	*	*	*	200× 500	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw9.0
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	4.20E+22	*	180	81000	*	*	*	*	18900	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=9.02
同上	同上	同上	2011/3/11	38.3	142.4	24.4	*	4.00E+22	380	200	76000	*	*	*	*	*	*	Lay et al. (2011)	Mw=9.0; Dave=15.9m, Dmax=63m; 傾斜角=10°
同上	同上	同上	2011/3/11	38.3	142.3	30以浅	*	3.90E+22	300	150	*	*	*	*	*	*	*	Ammon et al. (2011)	plate boundary, Mw=9.0, M0はW-phase inversionの結果、moment functionの結果 M0=3.6E+22, L & Wはslip大の範囲より、余震域ではL=500km & W=200km
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	*	3.80E+22	500	200	*	*	*	*	*	*	*	Fuji et al. (2011)津波	interplate earthquake, Mw=9.0, 剛性率=5.0E+10 N/m ² を仮定
同上	同上	同上	2011/3/11	*	*	*	9.0	4.22E+22	500	200	100000	*	*	*	*	*	*	壇・他(2013)	

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニ チュード M _w (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S ₀ (km ²)	短周期レベ ル (SI: Spectral Inversion) A (N·m/s ³)	短周期レベ ル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N·m/s ³)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _n (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯 度 [N]	経 度 [E]	深 さ [km]													
29	太平洋	茨城県沖	2011/3/11	*	*	35	7.8	5.66E+20	8	*	*	6.19E+19	*	*	*	*	*	佐藤(2012)	
30	太平洋	岩手県沖	2011/3/11	*	*	35	7.4	1.40E+20	7	*	*	3.35E+19	*	*	*	*	*	佐藤(2012)	表1. スペクトルインバージョン。
1	フィリピン海	1703年元禄地震	1703	*	*	*	*	*	*	*	*	*	2.57E+20 (SPGAの短周期レベル)	*	*	4.5 × 4.5 6.4 × 6.4 7.4 × 7.4	*	野津(2014)	・震度分布を満足するSPGAモデルを推定 ・M _w =8.2 ・アスペリティの幅にはSPGAのパラメータを記載する ・SPGAの短周期レベルはM _w との経験的關係式から算定
2	フィリピン海	宝永地震	1707/10/28	*	*	*	8.8	1.80E+22	*	*	59700	*	*	*	*	*	*	武村・神田(2007)	・神田・他(2004)の震度インバージョン結果から短周期波域(断層面上の平均的な短周期エネルギーの2倍以上を出した場所)を推定 ・短周期波域(Fig.1下面本線内の○)の読取り数16+43+22+12+48+12 (○印1つを10km×10kmとする)15300km ² ・断層面積と応力降下量は中央防災会議(2002)の値。地震モーメントは円形クラック式を使って断層面積と応力降下量から算定した値
3	フィリピン海	安政東海地震	1854/12/23	*	*	*	8.4	4.55E+21	*	*	23900	*	*	*	*	*	*	武村・神田(2007)	・神田・他(2004)の震度インバージョン結果から短周期波域(断層面上の平均的な短周期エネルギーの2倍以上を出した場所)を推定 ・短周期波域(Fig.1下面本線内の○)の読取り数8+25+10+20 (○印1つを10km×10kmとする)8300km ² ・断層面積と応力降下量は中央防災会議(2002)の値。地震モーメントは円形クラック式を使って断層面積と応力降下量から算定した値
4	フィリピン海	安政南海地震	1854/12/24	*	*	*	8.5	8.34E+21	*	*	35800	*	*	*	*	*	*	武村・神田(2007)	・神田・他(2004)の震度インバージョン結果から短周期波域(断層面上の平均的な短周期エネルギーの2倍以上を出した場所)を推定 ・短周期波域(Fig.1安政中内本線内の○)の読取り数19+18+19+45 (○印1つを10km×10kmとする)10100km ² ・断層面積と応力降下量は中央防災会議(2002)の値。地震モーメントは円形クラック式を使って断層面積と応力降下量から算定した値
5	フィリピン海	関東地震	1923/9/1	*	*	*	7.9	1.00E+21	130	70	9100	*	6.40E+19 (SMGA+青 葉) 6.00E+19(S MGA+青葉)	*	(14.5, 21.8)	1350 (600, 750)	0.148	佐藤(2016)	・2つのSMGAと青葉領域のモデル。 ・SMGAのパラメータはTable1。 (佐藤(2016)より、開成断層)
同上	同上	同上	1923/9/1	*	*	*	*	7.60E+20	*	*	2340	*	*	*	*	*	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.85
同上	同上	同上	1923/9/1	34.92	139.89	*	*	*	93	53	4929	*	*	*	*	*	*	Kuroki et al (2004)	M=7.9; fault parameters by Matsuura and Iwasaki (1983).
同上	同上	同上	1923/9/1	*	*	*	*	8.50E+20	*	*	6900	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M=8.2
同上	同上	同上	1923/9/1	35.4	139.2	14.6	*	1.10E+21	130	70	9100	*	*	*	*	*	*	Kobayashi and Koketsu (2005)	interplate event, M _w =8.0. M0は測地学、遠地震、強震観のインバージョン結果より

表 2.1.3-1 国内のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード M _w (M ₀ から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベ ル (SI: Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レベ ル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リテイの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスペ リテイの 面積 S _a (km ²)	アスペ リテイの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
6	フィリピン 海	昭和東南海地震	1944/12/7	*	*	*	8.2	2.15E+21	*	*	14500	*	*	*	*	*	*	武村・神田 (2007)	・神田・他(2004)の震度インバージョン結果から短周期波域(断層面上の平均的な短周期エネルギーの2倍以上を出した場所)を推定 ・短周期波域(Fig.1右上図太線内の○)の読取り数24+32+19+8 (○印1つを10km×10kmとする8300km ²) ・断層面積と応力降下量は中央防災会議(2002)の値 地震モーメントは円形クラック式を使って断層面積と応力降下量から算定した値
同上	同上	同上	1944/12/7	*	*	*	*	*	120	60	7200	*	*	*	*	*	*	古村・他 (2006)	Table.3, Mw=8.1
同上	同上	同上	1944/12/7	*	*	*	*	*	164, 124	60, 60	17280	*	*	*	*	*	*	日野・都司 (1996)	・地震変動記録と津波の検潮記録から一様すべりモデルを推定 ・Model Bの方が津波記録を再現できているらしい
同上	同上	同上	1944/12/7	*	*	*	*	2.40E+21	*	*	4000	*	*	*	*	4800	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.19
同上	同上	同上	1944/12/7	33.52 34.14	137.25 137.92	*	8.2	2.15E+21	110 80	70 80	14100	*	*	*	*	*	*	Kuroki et al. (2004)	M=7.9: fault parameters by Ishibashi (1981); L(190)-W(74.2)として作図した ・M ₀ -S図のM ₀ は、武村・神田(2007)を用いた
同上	同上	同上	1944/12/7	*	*	*	*	1.50E+21	*	*	9600	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.2
7	フィリピン 海	昭和南海地震	1946/12/21	*	*	*	*	8.34E+21	*	*	35800	*	*	*	*	*	*	武村・神田 (2007)	M ₀ は、Skarlatoudis et al. (2016)を用いた
同上	同上	同上	1946/12/21	*	*	*	8.3	3.90E+21	*	*	52650	*	*	*	*	*	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.33
同上	同上	同上	1946/12/21	*	*	*	*	1.50E+21	*	*	9600	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.2
8		南海地震	1946/12/20	*	*	*	8.5	6.00E+21	270	92	24840	1.05E+20	*		9.2			Seno(2014), 川辺・釜江 (2013)	M _w =8.5
9	フィリピン 海	日向灘	1968/4/1	*	*	*	7.5	2.50E+20	*	*	1377	*	*	*	*	1053	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.53

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果

赤字：作図で使用した値

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード Mw (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベル (St Spectral Inversion) A (N・m/s ³)	短周期レベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ³)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
1	ナスカ	チリ	1960/5/22	*	*	*	*	*	*	200 × 800	*	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw0.3 断層面はKanamori and Ciper (1974)
2	ナスカ	チリ	2010/2/27	*	*	*	*	*	*	200 × 500	*	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw8.8 断層面はHayes (2010) ・メカニズム解はglobalCMT参照
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	2.39.E+22	480	180	86400	*	*	*	*	24600	0.28	田島・他 (2013)	・Hayes (2010) 遠地データ使用 平均すべり4.8m アスペリティすべり9.7m 最大すべり14.6m
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	2.60.E+22	450	187	84150	*	*	*	*	15300	0.18	田島・他 (2013)	・Shao et al. (2010) 遠地データと測地データ使用 平均すべり5.1m アスペリティすべり9.8m 最大すべり12.9m
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	1.61.E+22	570	180	102600	*	*	*	*	22050	0.21	田島・他 (2013)	・Sladen (2010) 遠地データ使用 平均すべり4.7m アスペリティすべり4.7m 最大すべり8.3m
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	2.15.E+22	498	182	90693	*	*	*	*	20246	0.22	田島・他 (2013)	・Hayes (2010), Shao et al. (2010), Sladen (2010)の平均値 平均すべり3.8m アスペリティすべり7.6m 最大すべり11.6m
同上	Maulé, Chile	-	2010/2/27	*	*	*	8.7	1.55.E+22	575	200	115000	*	*	*	*	31875	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.73
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	1.74.E+22	570	*	102600	*	*	*	*	23850	0.23	Skarlatoudis et al. (2016)	Sladen(2010)
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	1.60.E+22	540	*	108000	*	*	*	*	26400	0.24	Skarlatoudis et al. (2016)	Hayes(2010)
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	1.78.E+22	680	*	174148	*	*	*	*	18904	0.11	Skarlatoudis et al. (2016)	Luttrell et al.(2011)
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	2.51.E+22	600	*	112200	*	*	*	*	18360	0.16	Skarlatoudis et al. (2016)	Shao et al. (2010)
同上	同上	同上	2010/2/27	*	*	*	*	1.55.E+22	650	*	130000	*	*	*	*	31875	0.25	Skarlatoudis et al. (2016)	Lorito et al.(2011)
同上	同上	同上	2010/2/27	-36.2	-73.2	25.0	8.8	1.86.E+22	475	249	78300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.85,M0はGMTのデータを用いた
3	-	Peru	1888	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ikuta et al. (2015)	interplate earthquake, M=9.0
4	Peru	Peru	1966/10/17	*	*	*	8.1	2.00.E+21	*	*	11200	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=7.5
5	Peru	Peru	1970/5/31	*	*	*	7.9	1.00.E+21	*	*	9100	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=7.8
6	Peru	-	1974/10/03	*	*	*	8.0	1.20.E+21	250	112	28000	*	*	*	*	6066	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.99
7	Peru	-	1974/11/09	*	*	*	7.1	5.40.E+19	60	50	3000	*	*	*	*	600	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.09
8	ナスカ	ペルー	2001/6/23	*	*	*	8.4	5.22.E+21	255	177	45084	*	*	*	*	10404	0.23	田島・他 (2013)	・Shao and Ji (2001) 遠地データ使用 平均すべり2.1m アスペリティすべり5.2m 最大すべり7.9m
9	Pisco, Peru	-	2007/8/15	*	*	*	8.0	1.12.E+21	192	108	20736	*	*	*	*	5508	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.97
10	Kamchatka	-	1952/11/4	*	*	*	8.7	1.50.E+22	*	*	70000	*	*	*	*	20000	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.72
11	太平洋 (アリューシャン列島)	アンドレアノフ島	1957/3/9	*	*	*	*	*	900	100	900 × 100	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw8.6 断層面はLay et al.(1982)
12	太平洋	アラスカ	1964/3/28	*	*	*	*	*	500	300	150000	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw9.2 断層面はLay et al.(1982)

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード Mw (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レ ベル (S _L Spectral Inversion)	短周期レ ベル (SMGA: Strong Motion Generation Area)	コ ナ ー 振動数	ア ス ベ リ テ ィ の 応 力 降 下 量	ア ス ベ リ テ ィ の 面 積	ア ス ベ リ テ ィ の 面 積 比	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
13	インド・オーストラリア	スマトラ・アンダマン Indian ocean earthquake and tsunami	2004/12/26	*	*	*	9.0	3.95.E+22	420,570	240,160	192000	*	*	*	*	*	*	小山・都筑 (2014)	・Mw9.3 ・全体の断層破壊は1300km (Lay et al.,2005) ・L(990)-W(184)として作図した。M0はGMTのデータを用いた ・メカニズム解はglobalCMT参照
同上	同上	同上	2004/12/26	*	*	*	*	6.85.E+22	1157	208	240640	*	*	*	*	56640	0.24	田島・他 (2013)	・Chlieh et al. (2007) 測地データ使用 平均すべり11.4m 最大すべり17.0m
同上	同上	同上	2004/12/26	*	*	*	*	3.57.E+22	435	180	78300	*	*	*	*	15840	0.20	田島・他 (2013)	・Ji (2004) 遠地データ使用 平均すべり6.9m アスベリティすべり14.0m 最大すべり19.8m
同上	同上	同上	2004/12/26	*	*	*	*	4.95.E+22	708	194	137267	*	*	*	*	29953	0.22	田島・他 (2013)	・Chlieh et al. (2007)と Ji (2004)の平均値 平均すべり12.6m アスベリティすべり12.6m 最大すべり18.4m
同上	同上	同上	2004/12/26	*	*	*	9.1	6.50.E+22	1374	193	265237	*	*	*	*	27571	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=9.14
14	インド・オーストラリア	スマトラ島沖 (インドネシア)	2005/3/28	*	*	*	8.6	1.00.E+22	384	320	122880	*	*	*	*	43680	0.36	田島・他 (2013)	・Konca et al. (2007) 遠地データと測地データ使用 平均すべり1.3m アスベリティすべり4.3m 最大すべり15.2m ・メカニズム解はglobalCMT参照
同上	同上	同上	2005/3/28	*	*	*	*	1.35.E+22	523	156	81600	*	*	*	*	18800	0.23	田島・他 (2013)	・Shao and Ji (2005a) 遠地データ使用 平均すべり3.0m アスベリティすべり7.3m 最大すべり12.5m
同上	同上	同上	2005/3/28	*	*	*	8.6	1.16.E+22	449	223	100135	*	*	*	*	28656	0.29	田島・他 (2013)	・Konca et al. (2007)と Shao and Ji (2005a)の平均値 平均すべり1.9m アスベリティすべり5.6m 最大すべり13.8m
同上	Sumatra	-	2005/3/28	*	*	*	*	1.17.E+22	332	260	86400	*	*	*	*	27200	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.65
同上	同上	同上	2005/3/28	2.0	96.9	28.5	*	*	352	227	72600	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.59
15	インド・オーストラリア	スマトラ島沖 (インドネシア)	2007/9/12	*	*	*	8.4	5.44.E+21	459	160	73370	*	*	*	*	22620	0.31	田島・他 (2013)	・Ji (2007a) 遠地データ使用 平均すべり1.1m アスベリティすべり2.2m 最大すべり3.6m
同上	同上	同上	2007/9/12	*	*	*	*	5.05.E+21	440	145	63800	*	*	*	*	17690	0.28	田島・他 (2013)	・Ji (2007b) 遠地データ使用 平均すべり1.1m アスベリティすべり2.6m 最大すべり4.4m
同上	同上	同上	2007/9/12	*	*	*	*	5.13.E+21	288	352	101376	*	*	*	*	23808	0.23	田島・他 (2013)	・Konca et al. (2008) 遠地データと測地データ使用 平均すべり0.8m アスベリティすべり3.0m 最大すべり9.6m
同上	同上	同上	2007/9/12	*	*	*	*	5.20.E+21	388	201	77999	*	*	*	*	21199	0.27	田島・他 (2013)	・Ji (2007a), Ji (2007b), Konca et al. (2008)の平均値 平均すべり1.0m アスベリティすべり2.6m 最大すべり5.3m
16	Alaska	-	1964/3/27	*	*	*	9.1	5.52.E+22	847	266	225000	*	*	*	*	30000	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=9.09
同上	同上	同上	1964/3/28?	*	*	*	*	8.20.E+22	*	*	130000	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=8.5
17	Aleutian	-	1957/3/9	*	*	*	8.7	1.20.E+22	*	*	93750	*	*	*	*	30000	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.65
18	Aleutian	Rat Islands-1	1965/2/4	*	*	*	8.7	1.25.E+22	*	*	78000	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=7.9
19	Aleutian	Rat Islands-2	1965/3/30	*	*	*	7.6	3.40.E+20	*	*	4000	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=7.5
20	Aleutian	Aleutian	1966/7/4	*	*	*	6.8	2.30.E+19	*	*	420	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	Ms=7.2
21	Aleutian	-	1996/6/10	51.6	-177.6	28.0	7.9	8.05.E+20	78	109	8520	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.86, M0はGMTのデータを用いた
22	Aleutian	-	2003/11/17	51.2	178.7	30.0	7.7	5.29.E+20	108	119	12800	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.73, M0はGMTのデータを用いた

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニ チュード Mw (M0から 求めた)	地震 モーメント M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベル (St Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _n (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
23	Arabian plate	The 1945 Makran earthquake	1945	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Kundu et al. (2014)	Shallow thrust event
24	Arabian, Iranian plate	Iran	1968/8/31	*	*	*	7.3	1.00.E+20	*	*	1600	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =7.3; strike-slip fault
25	Arequipa	-	2001/6/23	*	*	*	8.3	3.70.E+21	400	200	80000	*	*	*	*	20800	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.31
26	Benkulu, Indonesia	-	2007/9/12	*	*	*	8.4	4.47.E+21	457	160	73140	*	*	*	*	28331	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.37
27	Caribea	-	1942	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Rong et al. (2014)	M8.2
28	Cascadia	-	1904/8/26	*	*	*	9.0	3.98.E+22	1100	70	77000	*	*	*	*	*	*	Obana et al. (2014)	Mw=9.0 (more info in Satake et al.(2003) and Wang et al.(2013), Seno(2014)
29	Cascadia	Cape Mendocino	1905/6/14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Obana et al. (2014)	M _s =7.1; low angle thrust-faulting
30	Cascadia subduction zone, Gorda Block	-	1992/4/25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Wong (2005)	M 7.2, Oppenheimer et al., 1993
31	Central Chile	-	1985/3/3	*	*	*	8.1	1.96.E+21	209	165	34425	*	*	*	*	9675	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.13
32	Chile	-	1960/5/22	*	*	*	*	7.20.E+22	*	*	135000	*	*	*	*	40000	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=9.17
同上	Nazca, North American plate	Chile	1960/5/22	*	*	*	9.5	2.00.E+23	*	*	200000	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.3
33	Tocopilla, Chile	-	2007/11/14	*	*	*	7.7	3.98.E+20	150	126	18954	*	*	*	*	7695	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.67
34	Coast of Colima-Michoacan	-	1806/03/25	18.9	-103.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.5
35	Coast of Colima-Michoacan	-	1818/5/31	19.1	-103.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.7
36	Coast of Guerrero	-	1820/5/4	17.2	-99.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.6
37	Coast of Guerrero	-	1845/4/7	16.6	-99.2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.9
38	Coast of Guerrero	-	1889/9/6	17.0	-99.7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.0
39	Coast of Guerrero	-	1890/12/2	16.7	-98.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.2
40	Coast of Guerrero	-	1899/1/24	17.1	-100.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.9
41	Coast of Jalisco-Colima	-	1875/3/9	19.4	-104.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.4
42	Coast of Oaxaca	-	1854/5/5	16.3	-97.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.7
43	Coast of Oaxaca	-	1870/5/11	15.8	-96.7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.9
44	Coast of Oaxaca	-	1872/3/27	15.7	-96.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.4
45	Coast of Oaxaca-Guerrero	-	1894/11/2	16.5	-98.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.4
46	Coast of Oaxaca	-	1897/6/5	16.3	-95.4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.4
47	Costa Rica	-	2012/9/5	*	*	*	7.5	2.54.E+20	150	120	18000	*	*	*	*	3520	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.54
48	East of Sulangan, Philippines	-	2012/8/31	*	*	*	7.6	2.72.E+20	51	90	4608	*	*	*	*	1440	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.56
49	Fiordland, New Zealand	-	2009/7/15	*	*	*	*	2.82.E+20	112	96	10752	*	*	*	*	2560	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.57
同上	同上	-	2009/7/15	-45.8	166.6	12.0	7.8	5.79.E+20	66	40	2640	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.82, M0はGMTのデータを用いた
50	Guam-Japan-Kamchatka	-	1498	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Rong et al. (2014)	M8.3
51	Guerrero	-	1887/5/29	17.2	-99.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.2
52	Jalisco	-	1837/11/22	20.0	-105.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.7
53	Kermadec-Tonga	-	2011/10/21	-29.0	-176.2	45.0	7.4	1.48.E+20	42	46	1920	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.37, M0はGMTのデータを用いた
54	Kuril	The great 1952 Kamchatka earthquake	1952	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Lay et al. (2009)	Mw=9

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード Mw (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベ ル (S: Spectral Inversion) A (N・m・s ²)	短周期レベ ル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m・s ²)	コーナ ー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リテイ の 応力降 下量 Δσ _r (MPa)	アスペ リテイ の面積 S _a (km ²)	アスペ リテイ の面積 比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
55	Kuril	Off-Etorofu EQ	11/6/1958	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Hurukawa (1998)	interplate (thrust) earthquake, Mw=8.3	
56	Kuril	Kuril Islands	10/13/1963	*	*	*	8.5	6.70.E+21	*	*	44000	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =8.2	
57	Kuril	Kuril Islands	8/11/1969	*	*	*	8.2	2.20.E+21	*	*	15300	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M _s =7.8	
58	Kuril	-	12/22/1991	45.5	151.1	25.0	7.6	2.77.E+20	100	84	8400	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.54, M0はGMTのデータを用いた	
59	Kuril	-	6/8/1993	51.2	157.8	46.0	7.5	2.02.E+20	126	99	12500	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.47, M0はGMTのデータを用いた	
60	Kuril	-	12/28/1994	40.5	143.5	26.0	7.7	4.89.E+20	71	71	5070	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.72, M0はGMTのデータを用いた	
61	Kuril	Off-Etorofu EQ	12/3/1995	44.7	149.0	*	*	*	140	90	12600	*	*	*	*	*	Hurukawa (1998)	interplate earthquake, Mw=7.9, 傾斜値30度と仮定	
同上	同上	同上	12/3/1995	44.6	149.3	24.0	7.9	8.24.E+20	91	144	13100	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.86, M0はGMTのデータを用いた	
62	Kuril	-	12/5/1997	54.8	162.0	34.0	7.8	5.32.E+20	141	83	11600	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.75, M0はGMTのデータを用いた	
63	Kuril	-	9/25/2003	41.8	143.9	27.0	8.3	3.05.E+21	96	98	9390	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.24, M0はGMTのデータを用いた	
64	Kuril	-	8/16/2005	38.3	142.0	36.0	7.2	7.64.E+19	36	35	1250	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.18, M0はGMTのデータを用いた	
65	Kuril	-	11/15/2006	46.5	153.4	15.2	*	*	260	86	22400	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.29	
同上	同上	同上	11/15/2006	46.6	153.3	15	*	5.00.E+21	240	100	24000	*	*	*	*	*	Lay et al. (2009)	Mw=8.4 (MwとM0は本検討のP波インバージョンから; likely overestimated); interplate thrust event; mb=6.5; Ms=7.8	
同上	同上	同上	2006/11/15	*	*	*	8.3	3.16.E+21	259	138	35750	*	*	*	*	10000	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.27, M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	11/15/2006	*	*	*	*	2.00.E+21	200, 250	100	45000	*	*	*	*	*	Fujii and Satake (2008)	interplate earthquake, M(JMA)=7.9, Mw=8.1, 断層長さ=5.0E+10 m (2.5E+10 m)	
同上	Kuril	2006 Kuril earthquake	2006/11/16 (157)	*	*	*	*	*	200	*	*	*	*	*	*	*	Lay et al. (2011)	Mw=8.4; thrust fault;	
同上	Kuril Island	同上	2006/11/26 (157)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Andrade and Rajendran (2011)	megathrust earthquake, Mw8.3	
66	-	North Chile	1877	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ikuta et al. (2015)	interplate earthquake, M=8.8	
67	-	Chile EQ	1960	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ikuta et al. (2015)	interplate earthquake, Mw=9.5, ずべり量=46m	
68	-	Chile,Valparaiso	3/3/1985	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Houston and Kanamori (1990)	subduction-zone earthquake, Mw=8.0	
69	Masset, Canada	-	2012/10/28	*	*	*	*	4.27.E+20	80	60	4800	*	*	*	*	1440	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.69	
同上	同上	同上	10/28/2012	52.7	-132.1	15.0	7.8	5.68.E+20	168	44	7430	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.83, M0はGMTのデータを用いた	
70	Mexico	-	1787	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Rong et al. (2014)	M8.4	
71	Mexico (Jalisco)	-	1806/3/25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.5	
72	Mexico (Jalisco)	-	1818/5/31	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.7	
73	Mexico (San Marcos)	-	1820/5/4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.6	
74	Mexico (San Marcos)	-	1845/4/7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.9	
75	Mexico (West Oaxaca)	-	1854/5/5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.7	
76	Mexico (Central Oaxaca)	-	1870/5/11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.4	
77	Mexico (Central Oaxaca)	-	1872/3/27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.4	
78	Mexico (Ometepec)	-	1890/12/2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.5	
79	Mexico (West Oaxaca)	-	1894/11/2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =7.4	

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード [km]	地震 モーメント (論文) M_0 (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベ ル (SI: Spectral Inversion) A (N·m/s ²)	短周期レベ ル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N·m/s ²)	コー ナー 振動数 f_c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	アスペ リティの 面積 S_a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S_a/S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
80	Mexico (East Oaxaca)	-	1897/6/5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	Ms=7.4
81	Mexico (C.Guerrero)	-	1899/12/24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	Ms=7.7
82	Mexico	-	1900/1/20	20.0	-105.0	*	*	*	80	40	3160	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.6; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
83	Mexico	-	1900/5/16	20.0	-105.0	*	*	*	45	22	999	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.1; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
84	Mexico (Jalisco)	-	1900/8/16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	Ms=7.1
85	Mexico	-	1907/4/15	16.6	-99.2	*	7.9	8.91.E+20	151	75	11340	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.9; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比 0.25; logM0=1.5MW+9.1	
86	Mexico	-	1908/3/26	16.7	-99.2	*	*	*	100	50	5010	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.8; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
87	Mexico	-	1908/3/27	17.0	-101.0	*	*	*	50	25	1260	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.2; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
88	Mexico	-	1909/7/30	16.8	-99.9	*	*	*	71	35	2513	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.5; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
89	Mexico	-	1909/7/31	16.6	-99.5	*	*	*	45	22	999	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.1; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
90	Mexico	-	1911/6/7	17.1	-101.1	*	*	*	112	56	6306	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.9; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
91	Mexico	-	1911/12/16	17.0	-100.7	*	*	*	80	40	3160	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.6; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
92	Mexico	-	1928/3/22	15.7	-96.1	*	*	*	71	35	2513	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.5; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
93	Mexico	-	1928/6/17	15.8	-96.9	*	*	*	100	50	5010	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.8; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
94	Mexico (West Oaxaca)	-	1928/8/2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	Ms=7.6	
95	Mexico	-	1928/8/4	16.8	-97.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	S=shallow(≤60km) Ms=7.4	
同上	同上	同上	1928/8/4	16.1	-97.4	*	*	*	63	32	1997	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.4; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
96	Mexico	-	1928/10/9	16.3	-97.3	*	*	*	80	40	3160	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.6; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
97	Mexico	-	1929/8/17	16.3	-99.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M=7.0	
98	Mexico	-	1931/1/15	16.1	-96.6	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	S=shallow(≤60km) Ms=7.8	
99	Mexico	-	1932/6/3	19.8	-105.4	*	8.0	1.26.E+21	222	111	24642	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=8.0; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
100	Mexico	-	1932/6/18	19.0	-104.6	*	7.9	8.91.E+20	71	36	2521	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.9; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
101	Mexico	-	1934/11/30	19.0	-105.3	*	*	*	40	20	796	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.0; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
102	Mexico	-	1937/12/23	16.4	-98.6	*	7.5	2.24.E+20	61	31	1873	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.5; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
103	Mexico	-	1941/4/15	18.9	-102.9	*	*	*	112	56	6306	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.9; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
104	Mexico	-	1943/2/22	17.6	-101.2	*	*	*	89	45	3978	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Ms=7.7; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25;	
105	Mexico	-	1946/5/15	15.5	-96.7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M=7.0	
106	Mexico	-	1950/11/17	16.8	-100.7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M=7.0	
107	Mexico	-	1950/12/14	16.61	-98.8	*	7.3	1.12.E+20	58	29	1694	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.3; L=2W; 剛性率 3.5e11dyne.cm ² ; ポアソン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
108	Mexico	-	1951/12/28	16.9	-98.7	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M=7.0	

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニ チュード M _w (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベ ル (SI: Spectral Inversion)	短周期レベ ル (SMGA: Strong Motion Generation Area)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考	
				緯 度 [N]	経 度 [E]	深 さ [km]														
109	Mexico	-	1957/7/28	16.6	-99.4	*	7.8	6.31.E+20	92	46	4232	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.8; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
110	Mexico	-	1962/5/11	16.9	-100.0	*	7.1	5.62.E+19	40	20	800	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.1; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
111	Mexico	-	1962/5/19	16.9	-99.9	*	7.0	3.98.E+19	35	18	613	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.0; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
112	Mexico	-	1965/8/23	15.6	-96.0	*	7.5	2.24.E+20	109	54	5886	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.5; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
113	Mexico	-	1968/8/2	16.0	-98.0	*	7.3	1.12.E+20	70	35	2450	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.3; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
114	Mexico	-	1970/4/29	14.5	-92.7	*	7.3	1.00.E+20	*	*	15000	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.2, Δσは余震域の過剰推定により、過小評価されている可能性がある。	
115	Mexico	-	1973/1/30	18.4	-103.2	*	7.6	3.00.E+20	90	70	6300	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.5	
同上	同上	同上	1973/1/30	18.3	-103.4	*	*	4.47.E+20	90	45	4050	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.7; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; logM0=1.5MW+9.1	
116	Mexico	-	1978/11/29	15.8	-96.8	*	*	2.75.E+20	90	70	6300	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.8	
同上	同上	同上	1978/11/29	15.8	-97.1	*	7.7	5.27.E+20	84	42	3528	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.8; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25; M0はGMTのデータを用いた	
117	Mexico	-	1979/3/14	17.3	-101.4	*	*	1.75.E+20	70	64	4480	*	*	*	*	*	*	Singh et al. (1981)	M _s =7.6	
同上	Mexico	-	1979/3/14	17.5	101.5	15	*	5.50.E+20	120	120	14400	*	*	*	*	*	*	Mikumo et al. (1998)	Mw7.62; Depth 2km-30km, Dmax=1.2m	
同上	同上	同上	1979/3/14	17.5	101.5	15	*	1.37.E+20	120	120	14400	*	*	*	0.558 (1asp) 0.504 (2asps)	3800	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=7.39; D=0.288m; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1979/3/14	17.5	-101.5	*	*	*	95	48	4513	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.4; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ; ポアン比0.25;	
同上	同上	同上	1979/3/14	*	*	*	7.4	1.50.E+20	95	95	9025	8.14E+18	*	*	1.3	*	*	壇・他(2001), Seno(2014)	L, W, Δσ, Δσasp→ Seno(2014)	
118	Mexico	Playas Azul	1981/10/25	17.8	102.3	14	*	8.50.E+20	60	70	4200	*	*	*	*	*	*	Mikumo et al. (1998)	Mw7.43; Depth 6km-23km, Dmax=3.5m	
同上	同上	同上	1981/10/25	17.7	102.2	15	*	8.49.E+19	60	70	4200	*	*	*	3.049(1asp)	400	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=7.25; D=0.746m; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1981/10/25	17.8	-102.3	*	*	*	48	24	1152	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.2; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ; ポアン比0.25;	
同上	同上	同上	1981/10/25	*	*	*	7.4	1.35.E+20	53	53	2809	5.19E+19	*	*	33.7	*	*	壇・他(2001), Seno(2014)	L, W, Δσ, Δσasp→ Seno(2014) M0はGMTのデータを用いた	
119	Mexico (Ometepec)	-	1982/6/7	*	*	*	*	6.00.E+19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Nishenko and Singh (1987)	M _s =6.9, 7.0	
120	Mexico	Michoacan	1985/9/19	18.1	102.7	17	*	3.90.E+21	180	140	25200	*	*	*	*	80km×55km 45km×60km 30km×60km	*	Mikumo et al. (1998)	Mw8.05; Depth 6km-40km; Dmax=4m M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	1985/9/19	18.2	102.6	17	*	1.15.E+21	180	139	25020	*	*	*	1.577 (1asp) 1.442 (2asps)	3128	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=8.01; D=1.39m; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1985/9/19	17.8	-102.5	*	*	1.10.E+21	180	90	16200	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=8.1; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ² ポアン比0.25 M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	1985/9/19	*	*	*	*	*	180	140	25200	*	*	*	*	*	*	Mikumo et al. (1999)	Mw=8.1; thrust; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1985/9/19	*	*	*	*	1.15.E+21	180	139	25020	*	*	*	*	*	5004	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.97
同上	同上	同上	1985/9/19	*	*	*	*	*	170	80	13600	*	*	*	*	*	*	Houston and Kanamori (1990)	subduction-zone earthquake, Mw=8.0	
同上	同上	同上	1985/9/19	*	*	*	8.1	2.00.E+21	135	90	12150	*	4.2E+19	3.0	*	*	*	壇・他(2001), Seno(2014)		

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード (M _w から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベル (SI Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスベ リティの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスベ リティの 面積 S _a (km ²)	アスベ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考	
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]														
121	Mexico	Michoacan	1985/9/21	17.6	101.8	20	*	9.00.E+20	90	90	8100	*	*	*	*	*	*	Mikumo et al. (1998)	Mw7.66; Depth 12km-26km; Dmax=2m	
同上	同上	同上	1985/9/21	17.6	101.8	20	*	1.53.E+20	90	90	8100	*	*	*	3.284 (1asp)	1250	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=7.42; D=1.028m; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1985/9/21	17.6	-101.8	*	*	*	80	40	3200	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.5; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ⁻² ポアソン比0.25;	
125	Mexico	San Marcos	1989/4/25	16.8	99.1	17.3	6.9	2.40.E+19	60	42	2520	*	*	*	1.066(1 asp)	324	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=6.9; D=1.265m; 傾斜角=10°	
126	-	-	1992/9/2	11.5	-87.6	9.5	7.6	3.40.E+20	300	62	18600	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.61.M0はGMTのデータを用いた	
127	-	-	1995/9/14	16.5	-98.8	*	7.3	1.31.E+20	45	23	1013	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.3 ; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ⁻² ポアソン比0.25 M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	1995(9/14)	*	*	17	*	1.31.E+20	*	*	2813	*	*	*	*	*	*	Funumura and Sing (2002)	interplate, Mw=7.3	
128	Mexico	Manzanillo	1995/10/9	18.86	104.6	16.55	*	9.67.E+20	200	100	20000	*	*	*	2.728 (1asp) 2.258 (2asps) 2.159 (3asps) 1.984 (4asps)	2100	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw7.96; D=1.355m; 傾斜角=14°	
同上	同上	同上	1995/10/9	18.864	-104.6	16.0	8.0	1.15.E+21	263	98	21900	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.89.M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	1995/10/9	19.10	-104.9	*	*	*	175	88	15313	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=8.0; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ⁻² ポアソン比0.25;	
同上	同上	同上	1995/10/9	*	*	17	*	8.30.E+20	200	100	20000	*	*	*	*	*	*	Mendoza and Hartzell (1999)	Mw7.9; Dmax≈4m; thrust fault 傾斜角=14° ; 津波4m.	
同上	同上	同上	1995/10/9	*	*	*	*	8.30.E+20	200	100	20000	*	*	*	*	*	*	Mendoza et al. (2011)	Mw7.9.	
同上	同上	同上	1995/10/9	*	*	*	*	9.67.E+20	170	100	17000	*	*	*	*	*	2800	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.92
129	Mexico	-	1996/2/25	15.8	-98.3	*	7.1	5.51.E+19	68	34	2312	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.1; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ⁻² ポアソン比0.25.M0はGMTのデータを用いた	
130	-	-	2003/1/22	18.7	104.1	20	7.5	2.30.E+20	70	85	5950	*	*	*	2.971 (1asp) 3.046 (2asps)	700	*	Ramirez-Gaytan et al.(2014)	Mw=7.5; D=0.807m; 傾斜角=22°	
同上	同上	同上	2003/1/22	18.8	-104.1	24.0	7.5	2.05.E+20	47	58	2750	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.46.M0はGMTのデータを用いた	
同上	同上	同上	2003/1/22	18.7	-104.2	*	*	*	72	36	2592	*	*	*	*	*	*	Santoyo et al. (2005)	Mw=7.6; L=2W; 剛性率 3.5e11 dyne.cm ⁻² ; ポアソン比0.25;	
同上	同上	同上	2003/1/22	*	*	15	*	2.05.E+20	100	100	10000	*	*	*	*	*	*	Mendoza et al. (2011)	Mw7.5; thrust fault; 傾斜角=12° Yagi et al.(2004)-LxW=70kmx85km.	
同上	同上	同上	2003/1/22	*	*	*	*	2.30.E+20	70	85	5950	*	*	*	*	*	1350	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.51
131	Near coast of Guerrero, Mexico	-	2012/3/3	*	*	*	7.4	1.41.E+20	41	100	4125	*	*	*	*	1050	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.37	
132	Mexico	-	2012/3/20	16.5	-98.2	20.0	7.5	1.98.E+20	30	37	1120	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.42.M0はGMTのデータを用いた	
133	Mexico	-	2012/8/27	12.1	-88.6	11.8	7.3	1.27.E+20	88	62	5440	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.32.M0はGMTのデータを用いた	
134	Mexico	-	2012/9/5	9.82	-85.5	15.0	7.6	3.42.E+20	120	98	9510	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.57.M0はGMTのデータを用いた	
136	Nazca ridge, Peru	-	1996/11/12	*	*	*	8.0	1.38.E+21	300	120	36000	*	*	*	*	9072	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.03	
137	North Anatolian Fault	Turkey	1967/7/22	*	*	*	7.2	8.30.E+19	*	*	1600	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M=7.1	
138	Pagai, Indonesia	-	2007/09/12	*	*	*	7.9	7.94.E+20	243	90	21875	*	*	*	*	6500	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.87	

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード M _w (M ₀ から 求めた)	地震 モーメント (論文) M ₀ (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レベル (SI Spectral Inversion) A (N·m/s ²)	短周期レベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N·m/s ²)	コー ナー 振動数 f _c (Hz)	アスペ リティの 応力降 下量 Δσ _a (MPa)	アスペ リティの 面積 S _a (km ²)	アスペ リティの 面積比 S _a /S	参考文献	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]													
139	Papua	-	2009/1/3	*	*	*	*	2.82E+20	120	96	11520	*	*	*	*	1680	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.57
同上	同上	同上	2009/1/3	-0.51	132.8	17.0	7.7	3.76E+20	68	60	4100	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.65; logM0=1.5MW+9.1
140	Pacific, North American plates	Imperial Valley	1940/5/19	*	*	*	7.1	5.60E+19	*	*	780	*	*	*	*	*	*	Kanamori and Anderson (1975)	M=7.1; strike-slip fault
141	Playa Azul	-	1981/10/25	*	*	*	7.2	7.14E+19	45	60	2700	*	*	*	*	400	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.17
142	Samoa	-	2009/9/29	*	*	*	8.0	1.12E+21	148	49	7243	*	*	*	*	1983	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.97
143	Solomon	-	1995/8/16	-5.79	154.2	30.0	7.7	4.62E+20	119	71	8390	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.70; M0はGMTのデータを用いた
144	Solomon	4:55:36.5 GMT	2000/11/16	-3.98	152.2	33.0	8.0	1.24E+21	120	36	4320	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.07; M0はGMTのデータを用いた
145	Solomon	7:42:44.5 GMT	2000/11/16	-5.23	153.1	30.0	7.8	6.47E+20	93	60	5580	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.76; M0はGMTのデータを用いた
146	Solomon	-	2000/11/17	-5.50	151.8	33.0	7.8	5.64E+20	108	80	8670	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.72; M0はGMTのデータを用いた
147	Solomon	-	2007/4/1	-8.46	157.0	10.0	8.1	1.57E+21	192	113	17600	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.20; M0はGMTのデータを用いた
同上	同上	同上	2007/4/1	*	*	*	*	1.58E+21	270	80	21600	*	*	*	*	6600	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=8.07
148	Solomon	-	2014/4/12	-11.32	162.2	29.3	7.6	3.28E+20	80	62	4970	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.71; M0はGMTのデータを用いた
149	Solomon	-	2014/4/19	-6.72	154.9	30.8	7.5	2.29E+20	44	60	2600	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.47; M0はGMTのデータを用いた
150	Solomon	-	2015/3/29	-4.88	152.6	41.0	7.5	1.89E+20	117	54	5440	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.53; M0はGMTのデータを用いた
151	Solomon	-	2015/5/5	-5.50	151.9	42.0	7.5	1.94E+20	70	78	5430	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.47; M0はGMTのデータを用いた
152	South America	-	1995/7/30	-23.36	-70.3	36.0	8.0	1.21E+21	135	114	15300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.15; M0はGMTのデータを用いた
153	South America	-	1996/2/21	-9.74	-79.7	10.0	7.5	2.23E+20	130	79	10200	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.49; M0はGMTのデータを用いた
154	South America	-	1996/11/12	-15.0	-75.6	21.0	7.7	4.57E+20	140	68	9560	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.70; M0はGMTのデータを用いた
155	South America	-	2001/6/23	-16.3	-73.6	33.0	8.4	4.67E+21	239	188	44900	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.38; M0はGMTのデータを用いた
156	South America	-	2001/7/7	-17.5	-72.1	33.0	7.6	3.20E+20	68	68	4560	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.59; M0はGMTのデータを用いた
157	South America	-	2007/8/15	-13.4	-76.6	39.0	8.0	1.12E+21	138	150	19400	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.17; M0はGMTのデータを用いた
158	South America	-	2007/11/14	-22.3	-69.9	40.0	7.7	4.77E+20	118	79	9250	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.68; M0はGMTのデータを用いた
160	South America	-	2014/4/1	-19.6	-70.9	25.0	8.1	1.90E+21	72	99	5780	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.18; M0はGMTのデータを用いた
161	South America	-	2014/4/3	-20.5	-70.5	32.0	7.7	4.92E+20	100	80	8000	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.78; M0はGMTのデータを用いた
162	South America	-	2016/4/16	0.3	-80.0	20.0	*	*	119	120	14300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.82
163	Sumatra	-	1833	*	*	*	*	*	550	*	*	*	*	*	*	*	*	Rivera et al. (2002)	Mw=8.75
164	Sumatra	-	1861	*	*	*	*	*	300	*	*	*	*	*	*	*	*	Rivera et al. (2002)	Mw=8.5
165	Sumatra	-	1935/12/28	*	*	27±2	7.6	3.30E+20	65	30	1950	*	*	*	*	*	*	Rivera et al. (2002)	Mw=7.7; D=3m; Vp=8.1km/s; Vp/Vs=1.73; 傾斜角=12°
166	Sumatra	-	1984/11/25	*	*	27±2	*	6.50E+19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Rivera et al. (2002)	Mw=7.2; thrust; 傾斜角=12; i=108°; L/W=2.1; Vp=8.1km/s; Vp/Vs=1.73;
167	Sumatra	-	1990/4/18	1.16	122.8	26.0	7.6	3.31E+20	88	87	7660	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.59; M0はGMTのデータを用いた
168	Sumatra	-	1992/12/12	-8.51	121.9	28.0	7.7	5.06E+20	168	54	9050	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.73; M0はGMTのデータを用いた
169	Sumatra	-	1994/6/2	-10.48	112.8	20.0	7.8	5.34E+20	80	108	8620	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.74; M0はGMTのデータを用いた
170	Sumatra	-	1996/1/1	0.72	120.0	16.0	7.9	7.78E+20	71	70	4990	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.82; M0はGMTのデータを用いた
172	Sumatra	-	2006/7/17	-9.25	107.4	12.0	7.7	4.61E+20	180	80	14400	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.70; M0はGMTのデータを用いた

表 2.1.3-2 国外のプレート間地震の断層パラメータの調査結果 (つづき)

地震番号	地域 (プレート)	地震名	発生日 年月日	震源位置			モーメント マグニチュード Mw (M0から 求めた)	地震 モーメント (論文) M0 (Nm)	断層 長さ L (km)	断層 幅 W (km)	断層 面積 S (km ²)	短周期レ ベル (S Spectral Inversion) A (N・m/s ²)	短周期レ ベル (SMGA: Strong Motion Generation Area) A (N・m/s ²)	コ ナ ー 振動数 f _c (Hz)	ア ス ベ リ テ ィ の 応 力 降 下 量 Δσ _a (MPa)	ア ス ベ リ テ ィ の 面 積 S _a (km ²)	ア ス ベ リ テ ィ の 面 積 比 S _a /S	参考文献	備考
				緯 度 [N]	経 度 [E]	深 さ [km]													
173	Sumatra	-	2007/9/12	-4.52	101.4	30.0	8.5	6.71.E+21	200	176	35200	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.44,M0はGMTのデータを用いた
174	Sumatra	-	2007/9/12	-2.62	100.8	35.0	7.9	8.13.E+20	154	49	7490	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.98,M0はGMTのデータを用いた・メカニズム解はglobalCMT参照
175	Sumatra	-	2008/2/20	2.77	96.0	26.0	7.3	1.12.E+20	66	53	3470	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.39,M0はGMTのデータを用いた
176	Sumatra	-	2010/4/6	2.36	97.1	31.0	7.8	6.59.E+20	84	72	6050	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.81,M0はGMTのデータを用いた
177	Sumatra	-	2010/5/9	3.75	96.0	38.0	7.2	9.41.E+19	48	33	1550	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.24,M0はGMTのデータを用いた・メカニズム解はglobalCMT参照
178	Sumatra	-	2010/10/25	-3.46	100.1	15.0	7.8	6.77.E+20	184	123	22500	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.76,M0はGMTのデータを用いた
179	Sumatra	-	2016/3/2	-4.91	94.2	24.0	7.8	5.93.E+20	83	28	2300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.77,M0はGMTのデータを用いた
180	Taiwan	-	1986/11/14	24.0	121.8	15	*	1.12.E+20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Lin and Lee (2008)	Mw=7.3
181	Vanuatu	-	2009/10/7	-13.0	166.5	45.0	5.1	6.32.E+16	60	66	3940	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.60,M0はGMTのデータを用いた
同上	同上	同上	2009/10/7	*	*	*	*	2.82.E+20	*	60	4200	*	*	*	*	*	1680	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.57
182	Vanuatu	-	2010/8/10	-17.5	168.1	25.0	7.3	1.01.E+20	35	40	1400	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.26,M0はGMTのデータを用いた
183	Vanuatu	-	2011/8/20	-18.4	168.1	32.0	7.1	6.31.E+19	25	25	625	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.12,M0はGMTのデータを用いた
184	Vanuatu	-	2013/2/6	-10.7	165.1	28.7	7.9	9.37.E+20	156	88	13700	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.03,M0はGMTのデータを用いた
185	Zhuatanejo	-	1985/9/21	*	*	*	7.4	1.35.E+20	53	60	3150	*	*	*	*	1350	*	Skarlatoudis et al. (2016)	M=7.35
同上	同上	同上	1985/9/21	*	*	*	7.4	1.35.E+20	53	53	2809	3.96E+19	*	*	33.7	*	*	堀・他(2001), Mendoza et al.(1983)	
186	-	Ecuador(1906年Ecuador Colombia)	1906(1/31)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ikuta et al. (2015)	interplate earthquake, M=8.8
187	-	Burma EQ	1912(5/23)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Hurukawa et al. (2012)	plate boundary (the Sagaing Fault), Mw=8
188	-	North Sakhalin EQ	1995/5/27	52.6	142.8	9	7.0	4.20.E+19	30~60	15	450~900	*	*	*	*	*	*	Katsumata et al. (2004)	near an uncertain plate boundary, 震源位置、M0値、Δσはインバージョン結果 / USGS 震源位置 52.534° N, 142.854° E, 深さは33km, strike-slip, dip=79°, Mw=7.0, L(45)-W(15)-S(675)として作図した
189	-	(ニューギニア島沖地震)インドネシアの近く	1996/2/17	-0.95	136.9	20.0	8.2	2.41.E+21	110	95	10400	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=8.14,M0はGMTのデータを用いた
190	-	-	2002/3/5	6.03	124.3	31.0	7.5	1.94.E+20	77	72	5520	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.45,M0はGMTのデータを用いた
191	-	-	2002/9/8	-3.30	143.0	13.0	7.6	2.94.E+20	77	30	2300	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.54,M0はGMTのデータを用いた
192	-	-	2003/8/21	-45.1	167.1	28.0	7.2	7.48.E+19	40	40	1600	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.17,M0はGMTのデータを用いた
193	-	-	2004/11/11	-8.15	124.9	10.5	7.5	2.12.E+20	70	62	4310	*	*	*	*	*	*	Allen and Hayes (2017)	Mw=7.47,M0はGMTのデータを用いた

2.1.4 プレート間地震の断層パラメータの分析

図 2.1.4-1 に表 2.1.3-1 および表 2.1.3-2 に示した国内外のプレート間地震の断層幅 W と断層長さ L との関係を、国内の地震については白丸印で、海外の地震については黒丸印で示す。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関係式である。

図より、国内外のプレート間地震では、断層長さが 300km 程度までは断層長さと断層幅はほぼ比例関係で、断層がさらに長くなると、断層幅は 150km~200km 程度で一定となっていることがわかる。これは、田島・他(2013)による、プレート間地震も内陸地殻内地震と同様に、地震規模に応じて、断層幅が断層長さと比例する第 1 ステージ(自己相似モデル)から断層幅が飽和する第 2 ステージへと遷移する知見とも整合している。

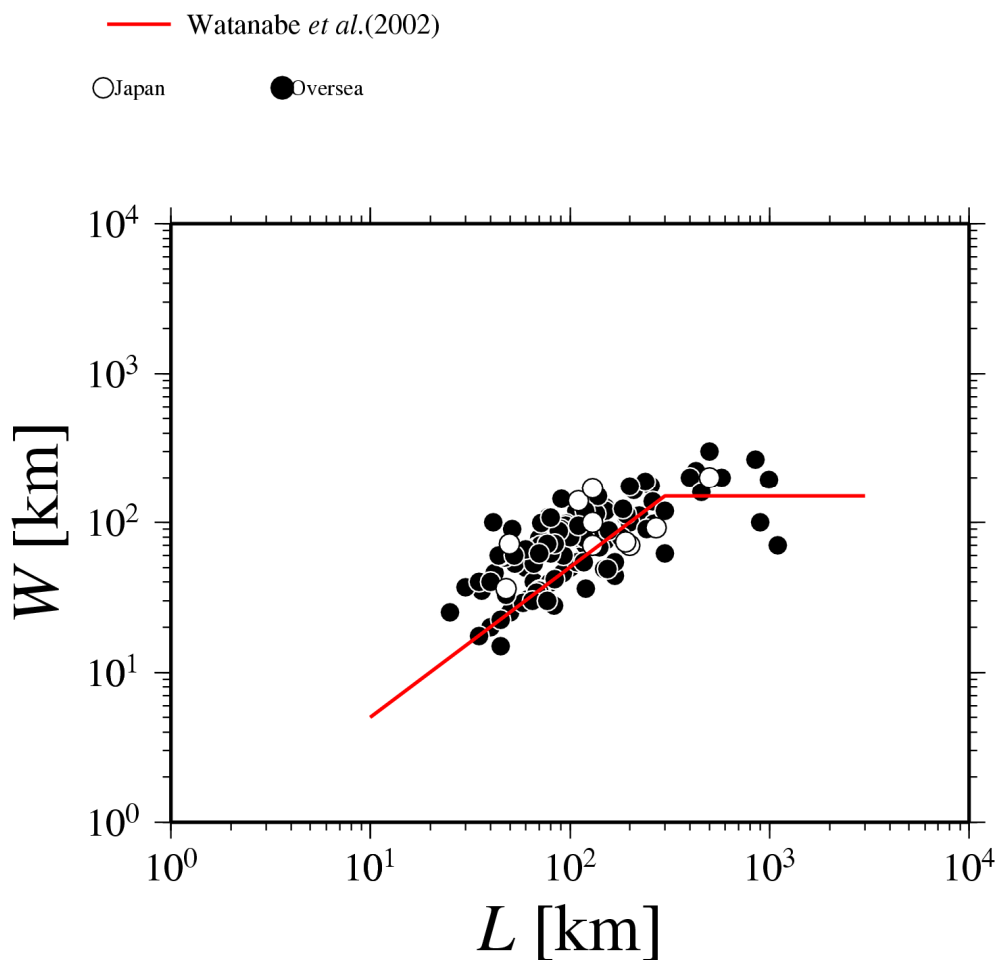


図 2.1.4-1 国内外のプレート間地震の断層幅 W と断層長さ L との関係

図 2.1.4-2 に表 2.1.3-1 および表 2.1.3-2 に示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 と関係を、国内の地震については白丸印で、海外の地震については黒丸印で示す。図中、黒線は(2.1.4-1)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(2.1.4-2)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(式 2.1.4-2)である。参考として、(2.1.4-3)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)式も、青点線で示す。

図より、地震規模が小さいときは、断層面積 S は地震モーメント M_0 の $2/3$ 乗の勾配に比例して大きくなり、平均的に Murotani *et al.* (2008)式よりは若干小さく、宇津(2001)式よりは若干大きいことがわかる。地震規模が $M_w8.4$ 以上になると、断層面積 S は地震モーメント M_0 の $1/2$ 乗の勾配を仮定した田島・他(2013)とより整合することが分かる。

$$S[\text{km}^2] = 1.48 \times 10^{-10} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3} \quad (2.1.4-1)$$

$$S[\text{km}^2] = 5.82 \times 10^{-7} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{1/2} \quad (2.1.4-2)$$

$$S[\text{km}^2] = 8.58 \times 10^{-11} (M_0[\text{N} \cdot \text{m}])^{2/3} \quad (2.1.4-3)$$

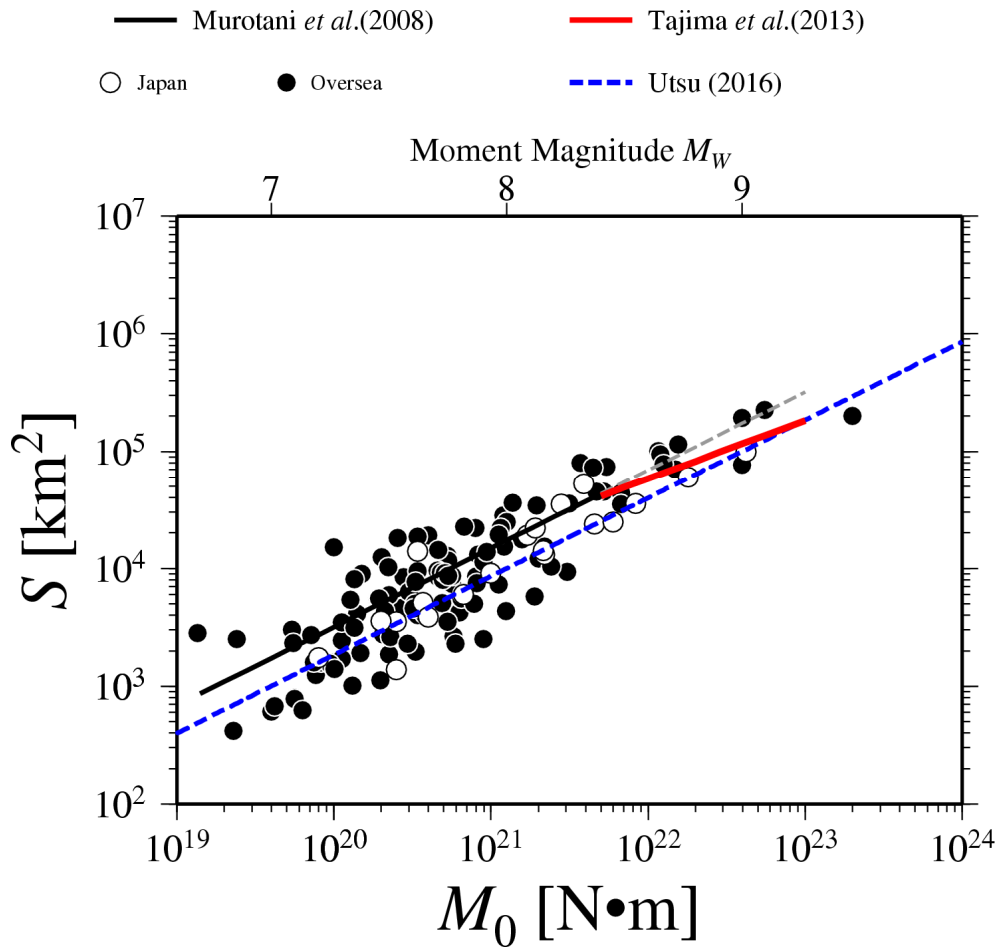


図 2.1.4-2 国内外のプレート間地震の断層面積 S と地震モーメント M_0 との関係

図 2.1.4-3 に表 2.1.3-1 およびに表 2.1.3-2 示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 との関係を、国内の地震については白丸印で、海外の地震については黒丸印で示す。図中、黒線は(2.1.4-4)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。

$$A[\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2] = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0[\text{N}\cdot\text{m}] \times 10^7)^{1/3} \quad (2.1.4-4)$$

図より、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 との関係は、平均的に壇・他(2001)の 1 倍から 2 倍の間であり、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 の経験的關係(佐藤, 2010)と整合的であることが分かった。

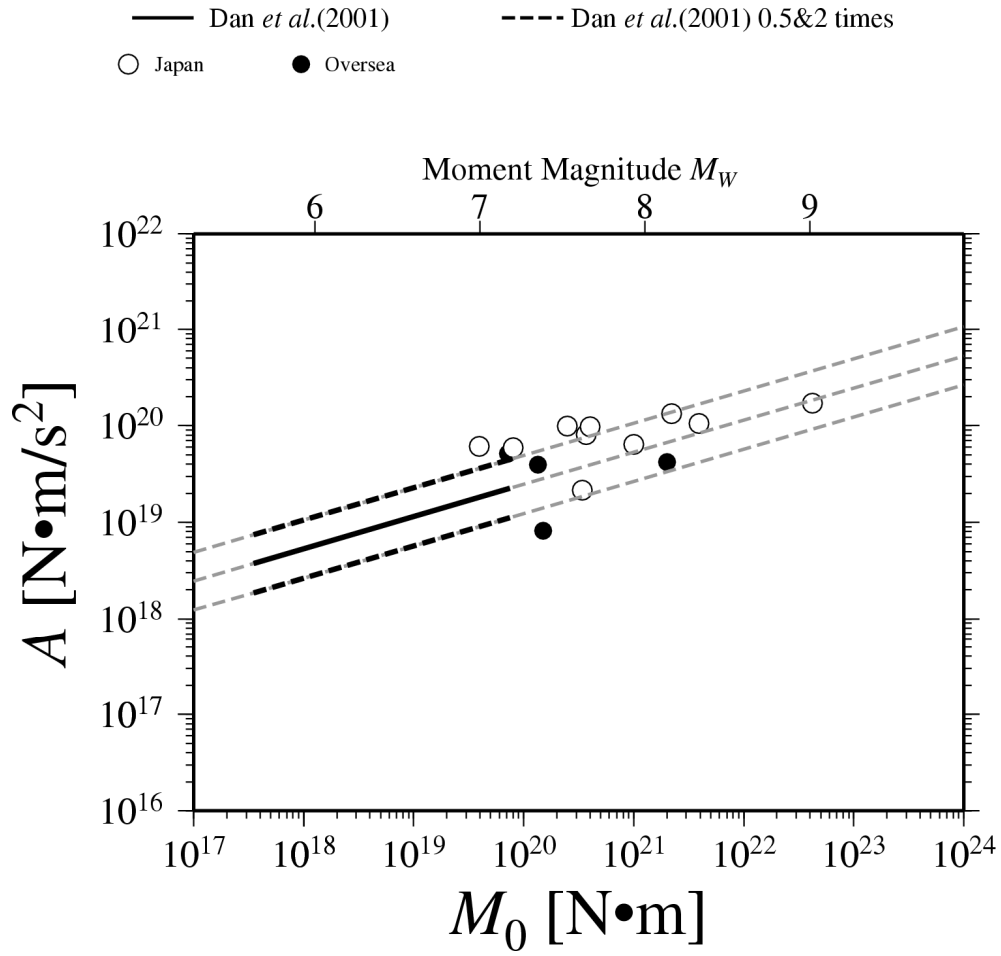


図 2.1.4-3 国内外のプレート間地震の短周期レベル A と地震モーメント M_0 との関係

2.1 節の参考文献

2.1.1

- 1) Atkinson, Gail M. and David 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, Vol. 93, No. 4, pp. 1703-1729.
- 2) Crouse, C. B., Yogesh K. Vyas, and Bruce A. Schell (1988): GROUND MOTIONS FROM SUBDUCTION-ZONE EARTHQUAKES, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 1, pp. 1-25.
- 3) Gregor, Nicholas J., Walter J. Silva, Ivan G. Wong, and Robert R. Youngs (2002): Ground-Motion Attenuation Relationships for Cascadia Subduction Zone Megathrust Earthquakes Based on a Stochastic Finite-Fault Model, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, No. 5, pp. 1923-1932.
- 4) Houston, Heidi and Hiroo Kanamori (1990): COMPARISON OF STRONG-MOTION SPECTRA WITH TELESEISMIC SPECTRA FOR THREE MAGNITUDE 8 SUBDUCTION-ZONE EARTHQUAKES, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80, No. 4, pp. 913-934.
- 5) Lin, Po-Shen and Chyi-Tyi Lee (2008): Ground-Motion Attenuation Relationships for Subduction-Zone Earthquakes in Northeastern Taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 1, pp. 220-240.
- 6) Zhao, John X. and H. Xu (2012): Magnitude-Scaling Rate in Ground-Motion Prediction Equations for Response Spectra from Large Subduction Interface Earthquakes in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 1, pp. 222-235.
- 7) Zhao, John X., Xuan Liang, Fei Jiang, Hao Xing, Min Zhu, Ruibin Hou, Yingbin Zhang, Xiaowen Lan, David A. Rhoades, Kojiro Irikura, Yoshimitsu Fukushima, and Paul G. Somerville (2016): Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Interface Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 4, pp. 1518-1534.

2.1.2

- 8) Skarlatoudis, A., P. G. Somerville, and H. K. Thio (2016): Source-Scaling Relations of Interface Subduction Earthquakes for Strong Ground Motion and Tsunami Simulation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 4, pp. 1652-1662.
- 9) 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.
- 10) 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2015): スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2分離した特性に対する詳細分析, *日本地震工学会論文集*, 第15巻, 第1号, pp. 38-59.

2.1.3

- 11) Allen, Trevor I. and Gavin P. Hayes (2017): Alternative Rupture-Scaling Relationships for Subduction Interface and Other Offshore Environments, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 3, pp. 1240-1253.
- 12) Ammon, Charles J. Thorne Lay, Hiroo Kanamori, and Michael Cleveland (2011): A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 693-696.
- 13) Anderson, John G. and Qingbin Chen (1995): Beginnings of Earthquakes in the Mexican Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 4, pp. 1107-1115.
- 14) Andrade, Vanessa and Kusala Rajendran (2011): Intraplate Response to the Great 2004 Sumatra-Andaman Earthquake: A Study from the Andaman Segment, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 506-514.
- 15) Asano, Youichi, Tatsuhiko Saito, Yoshihiro Ito, Katsuhiko Shiomi, Hitoshi Hirose, Takumi Matsumoto, Shin Aoi, Sadaki Hori, and Shoji Sekiguchi (2011): Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 669-673.

- 16) Astafyeva, Elvira and Kosuke Heki (2009): Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms, *Earth Planets Space*, 61, pp. 939-943.
- 17) Atkinson, Gail M. and Miguel Macias (2009): Predicted Ground Motions for Great Interface Earthquakes in the Cascadia Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 3, pp. 1552-1578.
- 18) Bai, Ling, Ichiro Kawasaki, Tianzhong Zahng, and Yuzo Ishikawa (2006): An improved double-difference earthquake location algorithm using *sP* phases: application to the foreshock and aftershock sequences of the 2004 earthquake offshore of the Kii peninsula, Japan ($M_w=7.5$), *Earth Planets Space*, 58, pp. 823-830.
- 19) Castro, R. R., L. Munguia, and J. N. Brune (1995): Source Spectra and Site Response from *P* and *S* Waves of Local Earthquakes in the Oaxaca, Mexico, Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 3, pp. 923-936.
- 20) Chaves, Esteban J., Laure Duboeuf, Susan Y. Schwartz, Thorne Lay, and Jonas Kintner (2017): Aftershocks of the 2012 M_w 7.6 Nicoya, Costa Rica, Earthquake and Mechanics of the Plate Interface, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 3, pp. 1227-1239.
- 21) Choy, George L. and John Boatwright (1982): BROADBAND ANALYSIS OF THE EXTENDED FORESHOCK SEQUENCE OF THE MIYAGI-OKI EARTHQUAKE OF 12 JUNE 1978, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 6, pp. 2017-2036.
- 22) Delorey, Andrew A., Arthur D. Frankel, Pengcheng Liu, and William J. Stephenson (2014): Modeling the Effects of Source and Path Heterogeneity on Ground Motions of Great Earthquakes on the Cascadia Subduction Zone Using 3D Simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 3, pp. 1430-1446.
- 23) Dewey, James W., George Choy, Bruce Presgrave, Stuart Sipkin, Arthur C. Tarr, Harley Benz, Paul Earle, and David Wald (2007): Seismicity Associated with the Sumatra-Andaman Islands Earthquake of 26 December 2004, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S25-S42.
- 24) Fujii, Yushiro and Kenji Satake (2008): Tsunami Sources of the November 2006 and January 2007 Great Kuril Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 3,

pp. 1559-1571.

- 25) Fujii, Yushiro, Kenji Satake, Shin'ichi Sakai, Masanao Shinohara, and Toshihiko Kanazawa (2011): Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 815-820.
- 26) Furumura, T. and S. K. Singh (2002): Regional Wave Propagation from Mexican Subduction Zone Earthquakes: The Attenuation Functions for Interplate and Inslab Events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 6, pp. 2110-2125.
- 27) Garcia-Soto, A. D. and Miguel A. Jaimes (2017): Ground-Motion Prediction Model for Vertical Response Spectra from Mexican Interplate Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 2, pp. 887-900.
- 28) Geist, Eric L., Vasily V. Titov, Diego Arcas, Fred F. Pollitz, and Susan L. Bilek (2007): Implications of the 26 December 2004 Sumatra–Andaman Earthquake on Tsunami Forecast and Assessment Models for Great Subduction-Zone Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S249-S270.
- 29) Hartzell, Stephen H. and Thomas H. Heaton (1985): TELESEISMIC TIME FUNCTIONS FOR LARGE, SHALLOW SUBDUCTION ZONE EARTHQUAKES, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 965-1004.
- 30) Hirose, Fuyuki, Kazuki Miyaoka, Naoki Hayashimoto, Takayuki Yamazaki, and Masaki Nakamura (2011): Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (*M*_w 9.0) -Seismicity: foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity-, *Earth Planets Space*, 63, pp. 513-518.
- 31) Houston, Heidi and Hiroo Kanamori (1990): COMPARISON OF STRONG-MOTION SPECTRA WITH TELESEISMIC SPECTRA FOR THREE MAGNITUDE 8 SUBDUCTION-ZONE EARTHQUAKES, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 80, No. 4, pp. 913-934.
- 32) Hurukawa, Nobuo (1998): The 1995 Off-Etorofu Earthquake: Joint Relocation of Foreshocks, the Mainshock, and Aftershocks and Implications for the Earthquake Nucleation Process, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 5, pp. 1112-1126.

- 33) Hurukawa, Nobuo, Pa Pa Tun, and Bunichiro Shibazaki (2012): Detailed geometry of the subducting Indian Plate beneath the Burma Plate and subcrustal seismicity in the Burma Plate derived from joint hypocenter relocation, *Earth Planets Space*, 64, pp. 333-343.
- 34) Ikuta, Ryoya, Yuta Mitsui, Yuri Kurokawa and Masataka Ando (2015): Evaluation of strain accumulation in global subduction zones from seismicity data, *Earth, Planets and Space*.
- 35) Ishii, Miaki (2011): High-frequency rupture properties of the Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 609-614.
- 36) Kanamori, Hiroo and Don 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.
- 37) Kato, Naoyuki (2004): A possible effect of an intermediate depth intraslab earthquake on seismic cycles of interplate earthquakes at a subduction zone, *Earth Planets Space*, 56, pp. 553-561.
- 38) Katsumata, Kei, Minoru Kasahara, Masayoshi Ichiyanagi, Masayuki Kikuchi, Rak-Se Sen, Chun-Un Kim, Alexei Ivaschenko, and Ruben Tatevossian (2004): The 27 May 1995 M_S 7.6 Northern Sakhalin Earthquake: An Earthquake on an Uncertain Plate Boundary, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 117-130.
- 39) Kobayashi, Reiji and Kazuki Koketsu (2005): Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data, *Earth Planets Space*, 57, pp. 261-270.
- 40) Koper, Keith D., Alexander R. Hutko, Thorne Lay, Charles J. Ammon, and Hiroo Kanamori (2011): Frequency-dependent rupture process of the 2011 M_W 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models, *Earth Planets Space*, 63, pp. 599-602.
- 41) Kuroki, Hidekuni, Hidemi M. Ito, and Akio Yoshida (2004): Effects of nearby large earthquakes on the occurrence time of the Tokai earthquake -An estimation based on a 3-D simulation of plate subduction-, *Earth Planets Space*, 56, pp. 169-178.

- 42) Lay, Thorne, Charles J. Ammon, Hiroo Kanamori, Lian Xue, and Marina J. Kim (2011): Possible large near-trench slip during the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 687-692.
- 43) Lay, Thorne, Charles J. Ammon, Hiroo Kanamori, Marina J. Kim, and Lian Xue (2011): Outer trench-slope faulting and the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp. 713-718.
- 44) Lin, Po-Shen and Chyi-Tyi Lee (2008): Ground-Motion Attenuation Relationships for Subduction-Zone Earthquakes in Northeastern Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 1, pp. 220-240.
- 45) Lin, Jing-Yi and Wen-Nan Wu (2012): Spatio-temporal distribution of seismic moment release near the source area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planets Space*, 64, pp. 1067-1075.
- 46) Liu, Hsui-Lin and Hiroo Kanamori (1980): DETERMINATION OF SOURCE PARAMETERS OF MID-PLATE EARTHQUAKES FROM THE WAVEFORMS OF BODY WAVES, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 70, No. 6, pp. 1989-2004.
- 47) Mendoza, C. and S. Hartzell (1999): Fault-Slip Distribution of the 1995 Colima-Jalisco, Mexico, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, No. 5, pp. 1338-1344.
- 48) Mendoza, C., S. Castro Torres, and J. M. Gomez Gonzalez (2011): Moment-Constrained Finite-Fault Analysis Using Teleseismic P Waves: Mexico Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 6, pp. 2675-2684.
- 49) Mikumo, Takeshi, Takashi Miyatake, and Miguel A. Santoyo (1998): Dynamic Rupture of Asperities and Stress Change during a Sequence of Large Interplate Earthquakes in the Mexican Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 3, pp. 686-702.
- 50) Mikumo, Takashi, Shri Krishna Singh, and Miguel A. Santoyo (1999): A Possible Stress Interaction between Large Thrust and Normal Faulting Earthquakes in the Mexican Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, No. 6, pp. 1418-1427.

- 51) Nishenko, S. P. and S. K. Singh (1987): CONDITIONAL PROBABILITIES FOR THE RECURRENCE OF LARGE AND GREAT INTERPLATE EARTHQUAKES ALONG THE MEXICAN SUBDUCTION ZONE, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77, No. 6, pp. 2095-2114.
- 52) Obana, Koichiro, Shuichi Kodaira, and Yoshiyuki Kaneda (2009): Seismicity at the Eastern End of the 1944 Tonankai Earthquake Rupture Area, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 1, pp. 110-122.
- 53) Obana, Koichiro, Martin Scherwath, Yojiro Yamamoto, Shuichi Kodaira, Kelin Wang, George Spence, Michael Riedel, and Honn Kao (2015): Earthquake Activity in Northern Cascadia Subduction Zone Off Vancouver Island Revealed by Ocean-Bottom Seismograph Observations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 105, No. 1, pp. 489-495.
- 54) Okamoto, Taro (1994): Location of Shallow Subduction-Zone Earthquakes Inferred from Teleseismic Body Waveforms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 2, pp. 264-268.
- 55) Papadopoulos, T., Max Wyss, and David L. Schmerge (1988): EARTHQUAKE LOCATIONS IN THE WESTERN HELLENIC ARC RELATIVE TO THE PLATE BOUNDARY, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 3, pp. 1222-1231.
- 56) Parameswaran, Revathy M. and Kusala Rajendran (2016): The 2016 M_W 6.7 Imphal Earthquake in the Indo-Burman Range: A Case of Continuing Intraplate Deformation within the Subducted Slab, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 6, pp. 2653-2662.
- 57) Prasad, G. and G. Bock (1991): P-WAVE RESIDUALS AT FIJI FROM DEEP EARTHQUAKES IN THE TONGA SUBDUCTION ZONE, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 81, No. 1, pp. 179-190.
- 58) Ramirez-Gaytan, Alejandro, Jorge Aguirre, Miguel A. Jaimes, and Victor Huerfano (2014): Scaling Relationships of Source Parameters of M_W 6.9-8.1 Earthquakes in the Cocos-Rivera-North American Subduction Zone, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 2, pp. 840-854.

- 59) Rivera, Luis, Kerry Sieh, Don Helmberger, and Danny Natawidjaja (2002): A Comparative Study of the Sumatran Subduction-Zone Earthquakes of 1935 and 1984, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 1721-1736.
- 60) Rodriguez-Perez, Quetzalcoatl (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.
- 61) Rong, Yufang, David D. Jackson, Harold Magistrale, and Chris Goldfinger (2014): Magnitude Limits of Subduction Zone Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 5, pp. 2359-2377.
- 62) Santoyo, Miguel A., Shri K. Singh, Takeshi Mikumo, and Mario Ordaz (2005): Space–Time Clustering of Large Thrust Earthquakes along the Mexican Subduction Zone: An Evidence of Source Stress Interaction, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 5, pp. 1856-1864.
- 63) Sen, Ali Tolga, Simone Cesca, Dietrich Lange, Torsten Dahm, Frederik Tilmann, and Sebastian Heimann (2015): Systematic Changes of Earthquake Rupture with Depth: A Case Study from the 2010 M_W 8.8 Maule, Chile, Earthquake Aftershock Sequence, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 5, pp. 2468-2479.
- 64) Singh, S. K., L. Astiz, and J. Havskov (1981): SEISMIC GAPS AND RECURRENCE PERIODS OF LARGE EARTHQUAKES ALONG THE MEXICAN SUBDUCTION ZONE: A REEXAMINATION, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 3, pp. 827-843.
- 65) Singh, S. K., M. Rodriguez, and L. Esteva (1983): STATISTICS OF SMALL EARTHQUAKES AND FREQUENCY OF OCCURRENCE OF LARGE EARTHQUAKES ALONG THE MEXICAN SUBDUCTION ZONE, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp. 1779-1796.
- 66) Singh, S. K., T. Dominguez, R. Castro, and M. Rodriguez (1984): *P* WAVEFORM OF LARGE, SHALLOW EARTHQUAKES ALONG THE MEXICAN SUBDUCTION ZONE, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 74, No. 6, pp. 2135-2156.

- 67) Singh, S. K. and Gerardo Suarez (1988): REGIONAL VARIATION IN THE NUMBER OF AFTERSHOCKS ($m_b \geq 5$) OF LARGE, SUBDUCTION-ZONE EARTHQUAKES ($M_W \geq 7.0$), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 1, pp. 230-242.
- 68) Singh, S. K. and M. Ordaz (1994): Seismic Energy Release in Mexican Subduction Zone Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 5, pp. 1533-1550.
- 69) Singh, S. K., D. Arroyo, X. Perez-Campos, Q. Rodriguez, A. Iglesias, and M. Ortiz (2016): Fast Identification of Near-Trench Earthquakes along the Mexican Subduction Zone Based on Characteristics of Ground Motion in Mexico City, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 5, pp. 2071-2080.
- 70) Skarlatoudis, A., P. G. Somerville, and H. K. Thio (2016): Source-Scaling Relations of Interface Subduction Earthquakes for Strong Ground Motion and Tsunami Simulation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 4, pp. 1652-1662.
- 71) Suarez, Gerardo and Paola Albini (2009): Evidence for Great Tsunamigenic Earthquakes (M 8.6) along the Mexican Subduction Zone, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2A, pp. 892-896.
- 72) Suzuki, Wataru and Tomotaka Iwata (2007): Source model of the 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquake estimated from broadband strong motions, Earth Planets Space, 59, pp. 1155-1171.
- 73) Suzuki, Kensuke, Ryota Hino, Yoshihiro Ito, Yojiro Yamamoto, Syuichi Suzuki, Hiromi Fujimoto, Masanao Shinohara, Masao Abe, Yoshiharu Kawaharada, Yohei Hasegawa, and Yoshiyuki Kaneda (2012): Seismicity near the hypocenter of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake deduced by using ocean bottom seismographic data, Earth Planets Space, 64, pp. 1125-1135.
- 74) Toda, Shinji, Jian Lin, and Ross S. Stein (2011): Using the 2011 M_W 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure, Earth Planets Space, 63, pp. 725-730.
- 75) Umino, Norihito, Toshio Kono, Tomomi Okada, Junichi Nakajima, Toru Matsuzawa, Naoki Uchida, Akira Hasegawa, Yoshiaki Tamura, and Gen Aoki (2006): Revisiting the three $M \sim 7$ Miyagi-oki earthquakes in the 1930s: possible seismogenic slip on asperities that were

re-ruptured during the 1978 M=7.4 Miyagi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, 58, pp. 1587-1592.

- 76) Wong, Ivan G. (2005): Low Potential for Large Intraslab Earthquakes in the Central Cascadia Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 5, pp. 1880-1902.
- 77) Ye, Lingling, Thorne Lay, and Hiroo Kanamori (2013): Ground Shaking and Seismic Source Spectra for Large Earthquakes around the Megathrust Fault Offshore of Northeastern Honshu, Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2B, pp. 1221-1241.
- 78) Yomogida, Kiyoshi, Kazunori Yoshizawa, Junji Koyama, and Motohiro Tsuzuki (2011): Along-dip segmentation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and comparison with other megathrust earthquakes, *Earth Planets Space*, 63, pp. 697-701.
- 79) Yu, Wen-che (2013): Shallow-Focus Repeating Earthquakes in the Tonga-Kermadec-Vanuatu Subduction Zones, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 1, pp. 463-486.
- 80) Yu, Wen-che and Lianxing Wen (2012): Deep-Focus Repeating Earthquakes in the Tonga-Fiji Subduction Zone, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 102, No. 4, pp. 1829-1849.
- 81) Zobin, Vyacheslav M. (1996): Apparent Stress of Earthquakes within the Shallow Subduction Zone near Kamchatka Peninsula, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 3, pp. 811-820.
- 82) 池田孝・武村雅之・加藤研一 (2002): 強震記録に基づく北海道周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, pp. 67-73.
- 83) 池田孝・武村雅之・加藤研一 (2003): 強震記録に基づく東北地方周辺のやや深発地震の高振動数成分の励起特性, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp. 39-46.
- 84) 池田孝・加藤研一・植竹富一・敦賀隆史 (2008): 1938年塩屋崎沖地震群の震源モデルの特性化と地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第633号, pp. 1951-1958.

- 85) 伊藤佳洋・山田雅行・岡部登・野津厚・永雄毅・高橋宏彰・水谷亮祐 (2015): 1703 年元禄関東地震の震度分布と整合的な SPGA モデルの作成事例, 土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 4, pp. I401-I407.
- 86) 宇津徳治 (1994): 1896 年三陸沖地震の余震活動, 地震, 第 2 輯, 第 47 卷, pp. 89-92.
- 87) 植竹富一 (2016): 茨城県沖・福島県沖の地震の深さが東京湾岸の長周期地震動に与える影響, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第1号, pp. 342-351.
- 88) 加藤研一・武村雅之・八代和彦 (1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp. 123-138.
- 89) 加藤研一・武村雅之・入代和彦 (1999): やや深発地震の短周期地震動の励起強さとその地域性-最大加速度値に基づく検討-, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp. 33-40.
- 90) 笠谷直矢・笈楽磨 (2014): スペクトルインバージョンに基づく宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の震源特性, 地震, 第2輯, 第67巻, pp. 57-79.
- 91) 川辺秀憲・釜江克宏 (2013): 2011年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第2号, pp. 75-87.
- 92) 古村孝志・中村操 (2006): 1944年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動, 物理探査, 第59巻, 第4号, pp. 337-351.
- 93) 小山順二・都筑基博 (2014): 超巨大地震発生前後の顕著な地震活動, 地震, 第2輯, 第66巻, pp. 83-95.
- 94) 神田克久・武村雅之 (2005): 震度データから検証する宮城県沖で発生する被害地震の繰り返し, 地震, 第2輯, 第58巻, pp. 177-198.
- 95) 佐藤智美 (2003): 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 第27回地震工学研究発表会梗概集, p. 75.
- 96) 佐藤智美 (2004a): 宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第1号, pp. 1-4.

- 97) 佐藤智美 (2004b): 強震記録に基づく2003年宮城県沖の地震の大加速度の成因に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第581号, pp. 31-38.
- 98) 佐藤智美 (2006): フィリピン海プレートの海溝型地震による短周期地震動の散乱理論に基づく経時特性モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第601号, pp. 75-82.
- 99) 佐藤智美 (2010a): 日本のスラブ内地震とプレート境界地震の水平・上下動の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第647号, pp.67-76.
- 100) 佐藤智美 (2012): 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル-プレート境界地震の短周期レベルに着目して-, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第675号, pp. 695-704.
- 101) 佐藤智美 (2013): 東北地方のアウトライズ地震、スラブ内地震、プレート境界地震の短周期レベルと f_{max} 及び距離減衰特性, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第689号, pp. 1227-1236.
- 102) 佐藤智美 (2014): 相模トラフ沿いの中規模地震の観測記録に基づく表面波と散乱波を考慮した統計的グリーン関数生成方法, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第705号, pp. 1589-1599.
- 103) 佐藤智美 (2015): 相模トラフ沿いの中規模スラブ内地震記録に基づく表面波と散乱波を考慮した統計的グリーン関数, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号, pp. 116-135.
- 104) 佐藤智美 (2016a): 太平洋プレートの海溝型地震の広帯域震源モデルに基づく微視的断層パラメータの特性, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第724号, pp. 937-947.
- 105) 佐藤智美 (2016b): 経験的グリーン関数法に基づく1855年安政江戸地震の広帯域震源モデルと首都圏及び広域での強震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第727号, pp. 1423-1433.
- 106) 佐藤智美 (2016c): 改良統計的グリーン関数法に基づく1923年関東地震の強震動生成域と強震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第719号, pp. 39-49.
- 107) 佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明 (2012): 長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集,

第12巻, 第4号, pp. 354-373.

- 108) 雑賀敦・大久保慎人 (2013): フィリピン海プレート内で発生した岐阜県美濃東部の地震 ($M=5.6$) の発生メカニズム, 地震, 第2輯, 第66巻, pp. 1-10.
- 109) 高田毅士・大淵正博 (2005): 地震動強さと継続時間の同時確率密度関数を用いた地震動の表現とその応用, 日本建築学会構造系論文集, 第589号, pp. 73-80.
- 110) 武村雅之・神田克久 (2006): 宮城県沖で2005年8月16日に起こった地震 ($M=7.2$) の震度分布の特徴と短周期地震波発生域, 地震, 第2輯, 第59巻, pp. 147-158.
- 111) 武村雅之・神田克久 (2007): 南海トラフ沿いに発生する歴史的巨大地震の短周期地震波発生の特徴, 地震, 第2輯, 第60巻, pp. 57-69.
- 112) 武村雅之・神田克久・水谷浩之 (2008): 1968年十勝沖地震 ($M=7.9$) と1994年三陸はるか沖地震 ($M=7.6$) の震度から推定される短周期地震波発生域, 地震, 第2輯, 第60巻, pp. 139-151.
- 113) 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.
- 114) 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.
- 115) 壇一男・渡辺基史・宮腰淳一 (2003): 既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティの実効応力と断層タイプおよび深さとの経験的關係, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp. 55-62.
- 116) 壇一男・石井やよい・宮腰淳一・高橋広人・護雅史・福和伸夫 (2013): マグニチュード9クラスのプレート境界地震による強震動予測のための断層モデルの設定方法-南海トラフ巨大地震への適用と東海地方における強震動の試算例-, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第692号, pp. 1685-1694.
- 117) 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2014): スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特

性の統計的性質に関する研究 その1 フーリエスペクトル・応答スペクトルから分離した平均特性, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第2号, pp. 67-83.

- 118) 仲野健一・川瀬博・松島信一 (2015): スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2 分離した特性に対する詳細分析, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号, pp. 38-59.
- 119) 中村亮一・植竹富一・引間和人 (2015): 三次元Q構造を考慮した統計的グリーン関数法による強震動評価-プレート境界巨大地震の広域強震動予測-, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第7号, pp. 230-241.
- 120) 日野貴之・都司嘉宜 (1996): プレート境界面を考慮した東南海地震 (1944) の断層モデルと津波の数値シミュレーション, 地震, 第2輯, 第49巻, pp. 27-38.
- 121) 野津厚 (2014): 1703年元禄地震の震度分布と統合的なSPGAモデルの作成事例, 土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 4, pp. I1089-I1095.
- 122) 松澤暢 (2009): プレート境界地震とアスペリティ・モデル, 地震, 第2輯, 第61巻, pp. S347-S355.
- 123) 三浦哲・飯沼卓史・油井智史・佐藤俊也・立花憲司・長谷川昭 (2007): 2005年宮城県沖地震 (M 7.2) に伴った地震時・地震後地殻変動から推定されたプレート境界面上のすべり分布, 地震, 第2輯, 第59巻, pp. 371-379.
- 124) 水藤尚・西村卓也・小林知勝・小沢慎三郎・飛田幹男・今給黎哲郎 (2012): 2011年 (平成23年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および地震後の地殻変動と断層モデル, 地震, 第2輯, 第65巻, pp. 95-121.
- 125) 三宅弘恵・浅野公之・瀨瀬一起・岩田知孝 (2016): 2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた震源モデルの概要, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第4号, pp. 12-21.
- 126) 森川信之・笹谷努 (2000): 1969年と1994年北海道東方沖地震による強震動記録の比較, 地震, 第2輯, 第53巻, pp. 73-77.

2.1.4

- 127) Murotani, S, H. Miyake, and K. Koketsu (2008): Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, pp. 987–991.
- 128) 宇津 (2001): 地震学 (第3版), 共立出版.
- 129) 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.
- 130) 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.
- 131) 佐藤 (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.
- 132) 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.

2.2 巨大地震の観測記録の収集及び解析

2.2.1 2014年チリ Iquique 地震等の地震動解析事例の調査

まず、近年海外で発生した M8 以上のプレート間巨大地震の震源近傍で得られた地震動を解析した研究事例を調査した。ここでは、強震動記録が比較的豊富に得られているチリ沖で発生した、2010年2月27日の Maule 地震 (M_w 8.8), 2014年4月1日の Iquique 地震 (M_w 8.1) および 2015年9月16日の Illapel 地震 (M_w 8.3) の3地震を調査対象とした。3地震の震央位置を図 2.2.1-1 に示す。

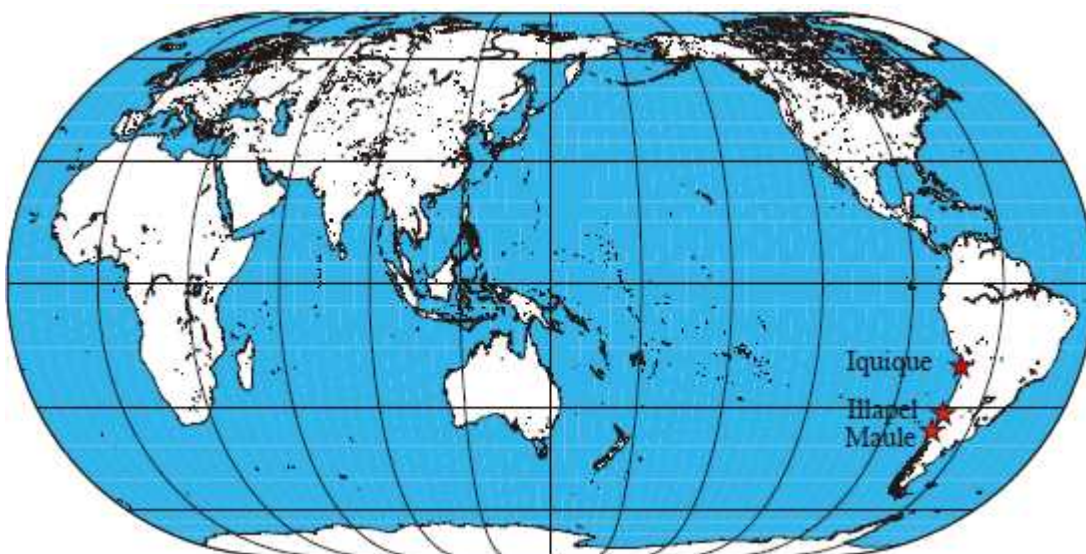


図 2.2.1-1 調査対象の3地震の震央位置.

(1) 2010 年 Maule 地震

■ Boroschek *et al.* (2012)

Boroschek *et al.* (2012) は震源域から 700 km 以内に位置する 31 観測点で得られた強震動記録の特徴について調査した。破壊進行方向 30-50 km 程度にある観測点では、断層走向に直交する成分の地震動が平行する成分に比べて大きいという特徴は見られず、directivity 効果は顕著ではなかった。また、強いサイト特性を示す観測点記録があった。例えば、Concepción 地域ではサイトの固有周期である 1.5-2.0 秒、Viña del Mar 地域では同 0.5-0.9 秒に増幅が集中している。これは速度構造に強いインピーダンス比が存在することを示唆している。一方、Talca 地域では、増幅が比較的広帯域にわたっており、深さとともに地震波速度が緩やかに増加していると考えられる。

さらに、Atkinson and Boore (2003) によるプレート間地震のための線形の地震動予測式 (GMPE) が、この地震の観測地震動を過小評価していることが分かった (図 2.2.1-2)。その原因は Atkinson and Boore (2003) のマグニチュードに関するスケールリングが弱いことにあるかもしれない。また、他の GMPE をチリ沖の他のプレート間地震に当てはめても、同じく過小評価となった。チリ沖のプレート間地震に特有なこの過小評価が系統的なものかどうか、すなわち、チリ沖の沈み込み境界に非常に強い固着が存在するかどうかについてはまだ不明である。

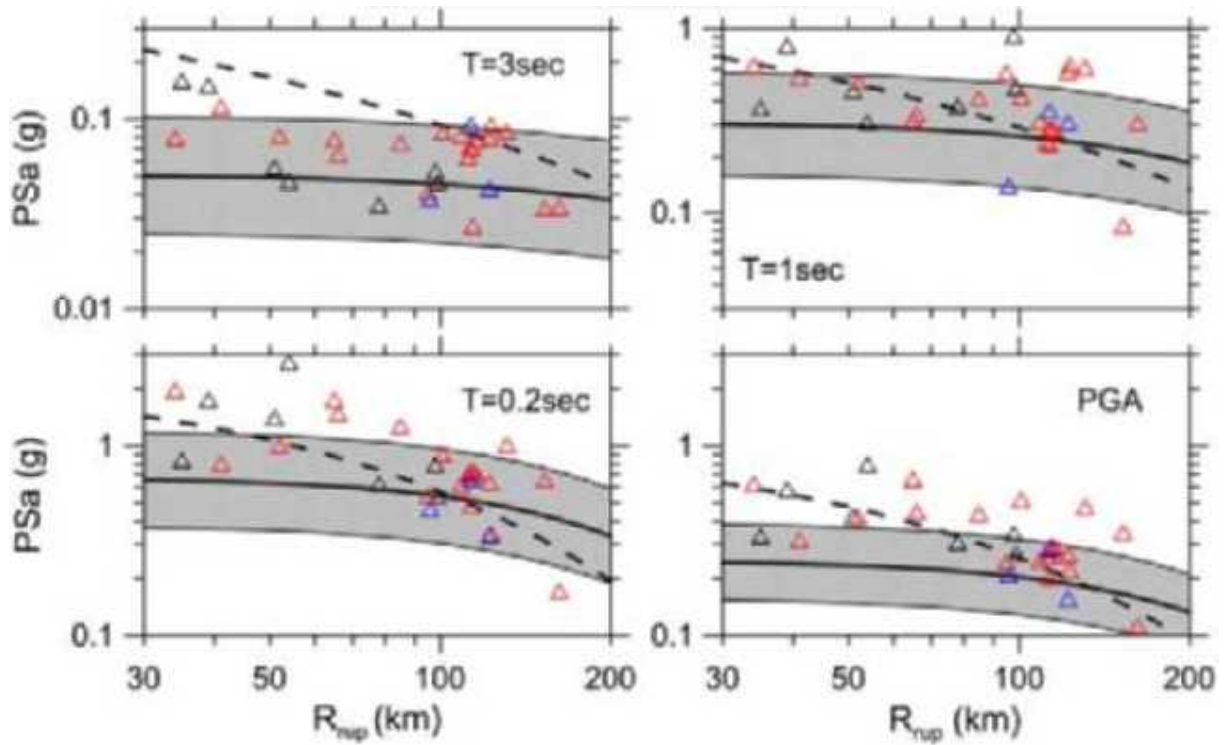


図 2.2.1-2 2010 年 Maule 地震において観測された 3, 1, 0.2 秒の加速度応答(減衰定数 5%)と最大加速度の距離減衰. 実線と灰色領域は Atkinson and Boore (2003) の距離減衰式による平均と標準偏差, 点線は Zhao *et al.* (2006) の距離減衰式の平均を表す. 青三角は岩盤サイト, 赤三角は風化した岩盤・硬質土サイト, 黒三角は軟弱地盤サイトのプロットである.

■Ruiz *et al.* (2012)

Ruiz *et al.* (2012) はハイレート GPS と強震動記録を解析し、この地震の中および高周波数成分の放射について調べた。このうち、強震動記録を使った解析では、破壊開始点の北側に 2 個のアスペリティを同定できた。両アスペリティはそれぞれ、波形に見られる継続時間の短い (10-15 秒) パルスに寄与している。この付近で発生した 1985 年 Valparaíso 地震 (M_w 7.9) と今回の地震の強震動記録を比較したところ、両者のスペクトルの特徴や継続時間が非常に良く似ていることが分かった (図 2.2.1-3)。つまり、低周波数領域で見れば今回の地震の規模は $M_w=8.8$ と大きいですが、生成される強震動は一回り小さい M8 の地震と同程度である。同様な観測事実は 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.1) でも報告されている。

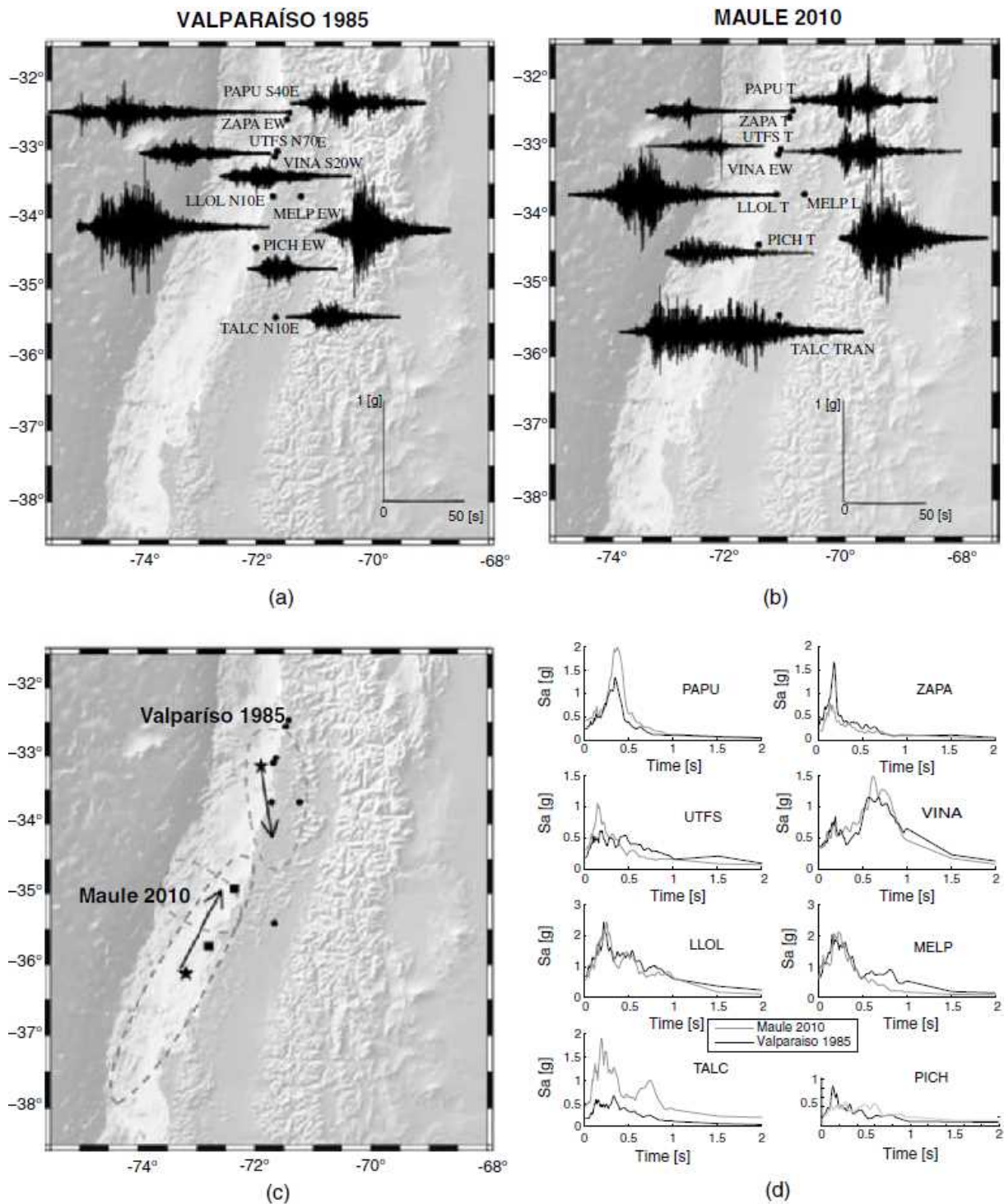


図 2.2.1-3 (a) 1985 年 Valparaíso 地震と (b) 2010 年 Maule 地震で観測された加速度波形の比較. (c) 両地震の破壊伝播の模式図. 星は両地震の破壊開始点, 四角は 2010 年 Maule 地震のアスペリティの位置を表す. (d) 両地震の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の比較.

■ Skarlatoudis *et al.* (2015)

Skarlatoudis *et al.* (2015) は、ハイブリッド合成法 (Somerville *et al.*, 1991; Somerville, 1993; Graves and Pitarka, 2004, 2010) を用いて、21 観測点で得られた強震動記録に対して広帯域 (0.25-10 Hz) 地震動シミュレーションを行い、観測とシミュレーションの goodness of fit (GOF) を調べた。シミュレーションでは、津波および測地データから推定された断層すべり (Lorito *et al.*, 2011) をベースにしたモデルを使用し、3 秒より長周期側では決定論的手法を、3 秒より短周期側では半統計的手法で地震動を計算した。

j 番目観測点の周期 T_i 秒での加速度応答スペクトル振幅値の観測 $O_j(T_i)$ と合成 $S_j(T_i)$

$$r_j(T_i) = \ln \left[\frac{O_j(T_i)}{S_j(T_i)} \right] \quad (2.2.1-1)$$

とすると、バイアスは、

$$B(T_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1, N} r_j(T_i) \quad (2.2.1-2)$$

標準偏差は、

$$\sigma(T_i) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1, N} [r_j(T_i) - B(T_i)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.1-3)$$

で表される。図 2.2.1-4 に GOF を示す。上から水平動・南北・東西成分に対応する。実線はバイアス、薄い灰色は標準偏差、濃い灰色はバイアスの 90% 信頼区間である。

全帯域にわたるバイアスは 1.2 未満と、観測に対する再現性は高いが、周期 0.5 秒付近では系統的な過小評価も見られる。この過小評価は 2001 年ペルー Arequipa 地震 (M_w 8.4) および 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.1) のシミュレーションでも確認されており、3 秒より短周期側のシミュレーションに使われている、余震記録から作成した経験的な震源時間関数 (Cohee *et al.*, 1991; Somerville *et al.*, 1991) のスペクトル形状に起因すると考えられる。

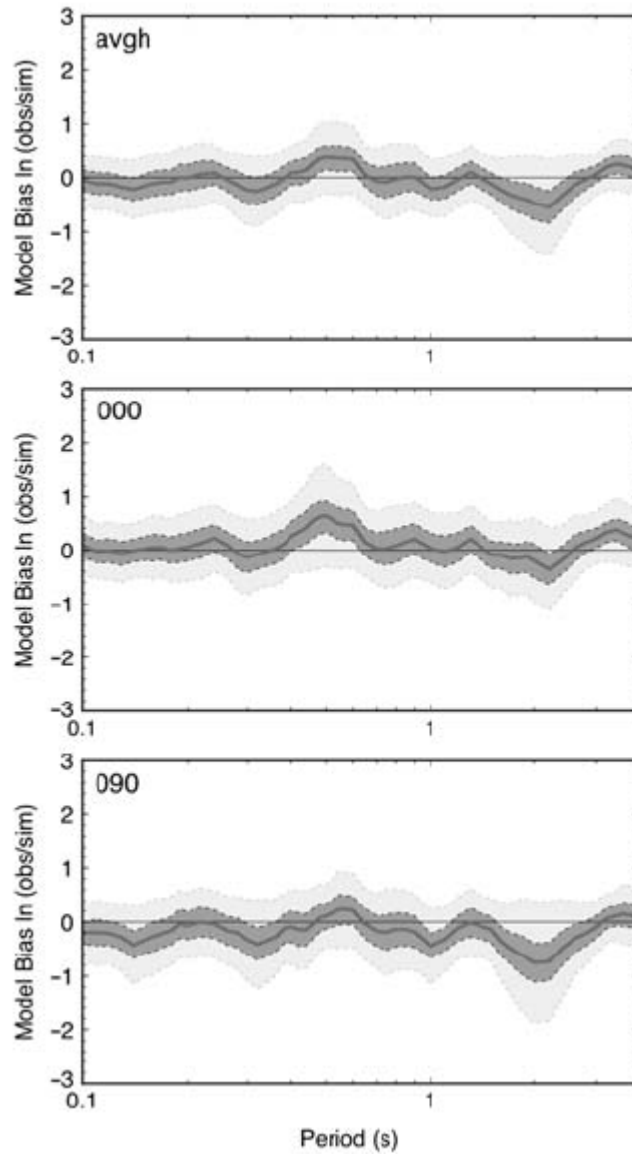


図 2.2.1-4 Skarlatoudis *et al.* (2015) による GOF 評価. 上から水平動・南北・東西成分に対応する. 実線はバイアス, 薄い灰色は標準偏差, 濃い灰色はバイアスの 90%信頼区間を表す.

■ Frankel (2017)

ハイブリッド合成法および複合的な震源モデルを用いて、8 観測点で得られた強震動記録に対して広帯域 (0.25-10 Hz) 地震動シミュレーションを行った。複合的な震源モデルは、(1) 震源域深部に位置し、高い応力降下、高いすべり速度、約 2 秒のライズタイムを持つ M_w 7.9-8.2 の複数のアスペリティ、(2) 大きい相関長、比較的遅いすべり速度、約 10 秒の長いライズタイムを持つ背景領域すべりである。1 Hz より低周波数側ではモデル (1) と (2) の両方を用いて決定論的手法で、1 Hz より高周波数側ではモデル (1) のみを用いて統計的手法で地震動を計算した。

水平 2 成分の加速度応答スペクトルを用いてシミュレーション結果を評価した。 i 番目観測点での振幅値の観測を obs_i 、合成を $pred_i$ とすると、バイアスは、

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln obs_i - \ln pred_i) \quad (2.2.1-4)$$

二乗平均平方根は、

$$rms\ residual = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{j=1}^n (\ln obs_j - \ln pred_j - bias)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.1-5)$$

で表される。バイアス (図 2.2.1-5) から、1.0 Hz より高周波数側の振幅を説明するには 20-35 MPa を持つアスペリティが必要であると推定された。

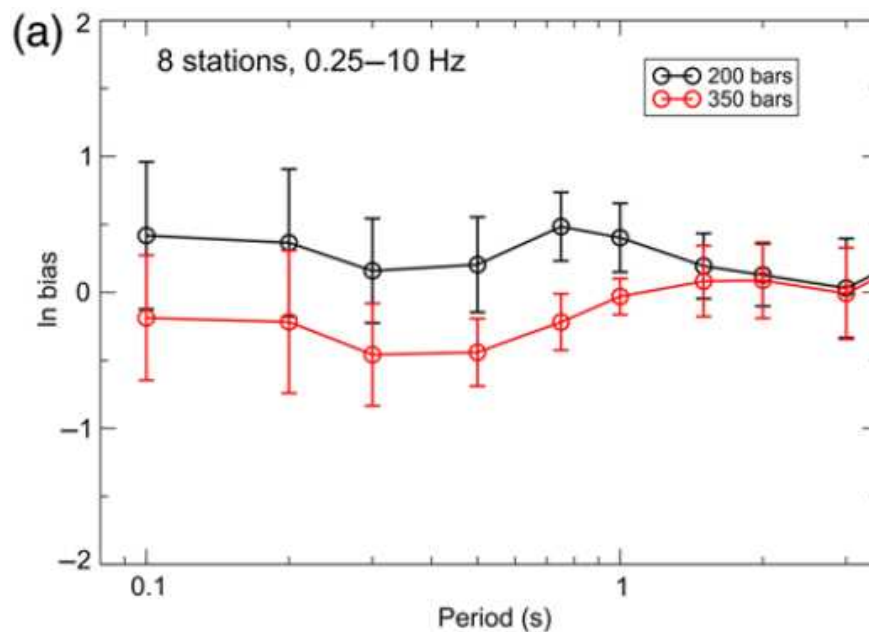


図 2.2.1-5 Frankel (2017) による GOF 評価。丸はバイアス，エラーバーは二乗平均平方根を表す。

(2) 2014 年 Iquique 地震

■ Schurr *et al.* (2014)

Schurr *et al.* (2014) は 0.01-0.1 Hz の強震・遠地波形および測地データを用いて震源破壊の時空間的すべりを推定した。得られたすべり変位分布を図 2.2.1-6 に示す。彼らの結果では、破壊開始点のやや南側にもっとも大きいすべりが求まっており、最大すべり量はおよそ 4 m である。

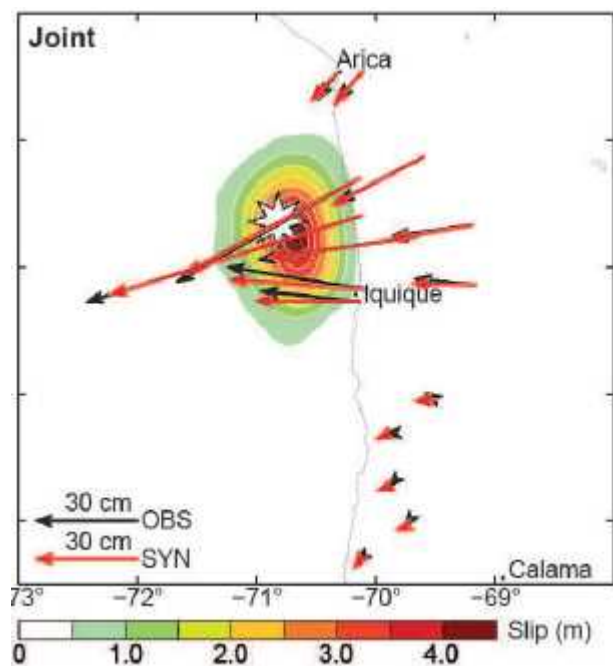


図 2.2.1-6 Schurr *et al.* (2014) による 2014 年 Iquique 地震のすべり変位分布。

■ Duputel *et al.* (2015)

Duputel *et al.* (2015) は強震波形 (0.01-0.2 Hz)・津波波形成・測地データを用いて震源破壊の時空間的すべりを推定した。得られたすべり変位分布を図 2.2.1-7 に示す。彼らのすべり分布のパターンは Schurr *et al.* (2014) と類似しているが、最大すべり量は 10 m 以上にも及ぶ。解放された地震モーメントは 1.6×10^{21} Nm (M_w 8.1) である。

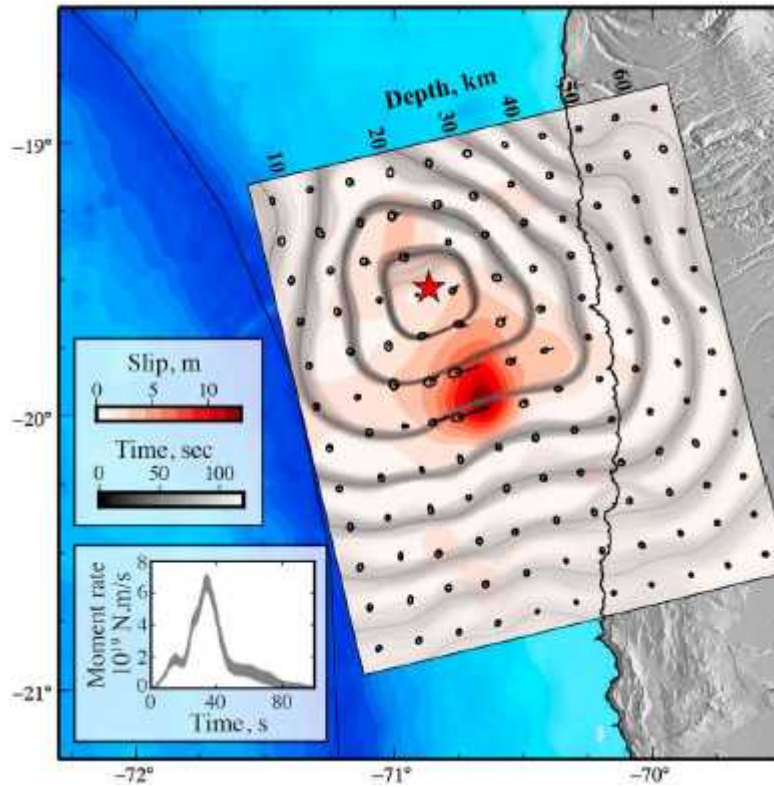


図 2.2.1-7 Duputel *et al.* (2015) による 2014 年 Iquique 地震のすべり変位分布。

■ Liu *et al.* (2015)

Liu *et al.* (2015) は強震 (0.01-0.25 Hz)・遠地 (0.002-0.5 Hz) 波形および測地データを用いて震源破壊の時空間的すべりを推定した。得られたすべり変位分布を図 2.2.1-8 に示す。彼らの結果では、破壊開始点のやや南側にもっとも大きいすべりが求まっているほか、海溝軸付近にもすべりの一部が及んでいることが示唆された。最大すべり量は 6.6 m, 断層全体の平均すべり量は 2.0 m, 解放された地震モーメントは 1.72×10^{21} Nm (M_w 8.1) である。

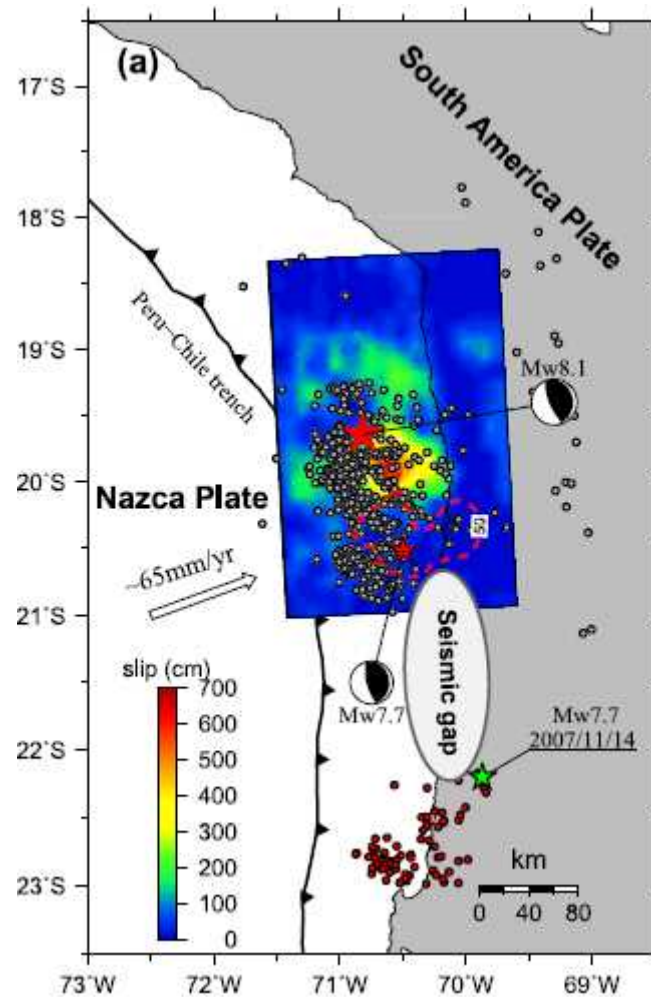


図 2.2.1-8 Liu *et al.* (2015) による 2014 年 Iquique 地震のすべり変位分布。

■ Meng *et al.* (2015)

Meng *et al.* (2015) は 1-10 Hz の強震波形の S 波エネルギーエンベロープを用いて、顕著なフェーズを一つ特定した. 彼らはこのフェーズを作っている強震動生成点 (SMGP) の位置 (西経 70.4°, 南緯 19.8°付近) および時刻 (破壊開始から約 30 秒後) をグリッドサーチにより決定した (図 2.2.1-9). また, 彼らは, 強震動に寄与するような高周波破壊は, 海溝に沿った方向での重力異常 (trench-parallel gravity anomaly) が局所的に高い場所で起きていると指摘した.

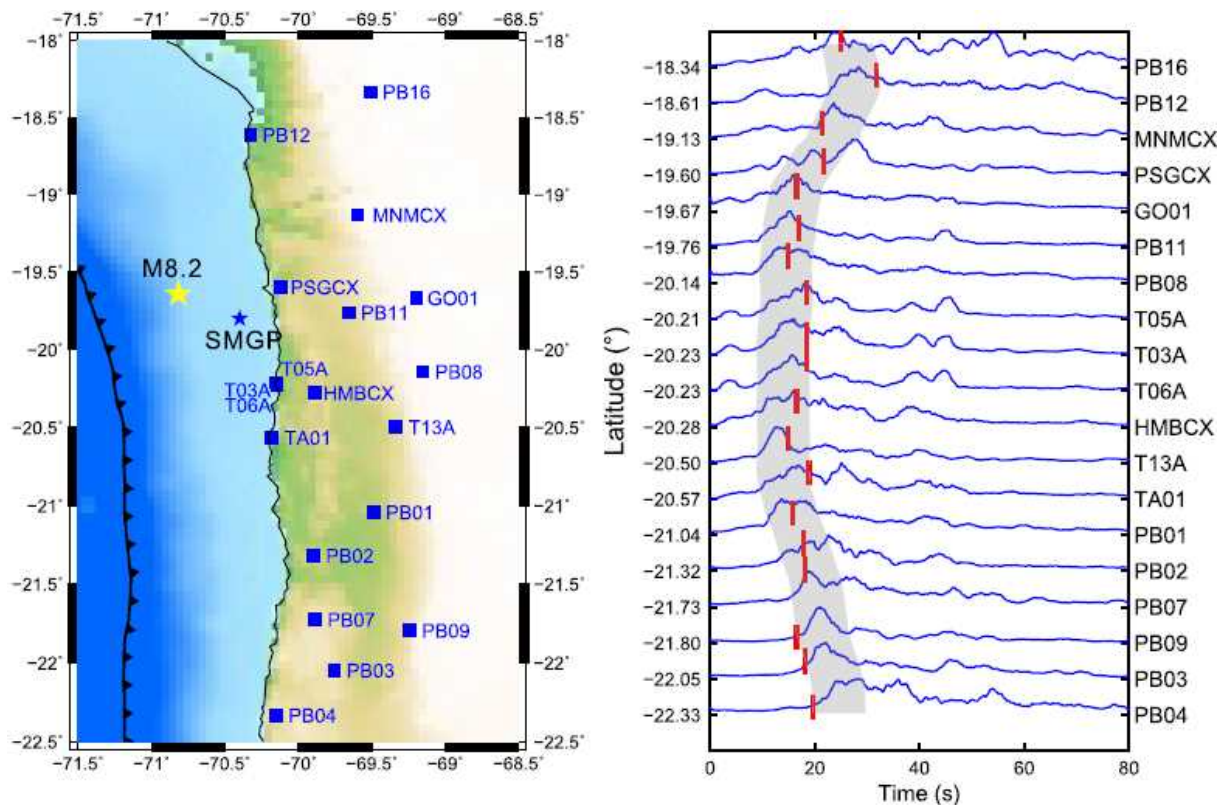


図 2.2.1-9 (左) Meng *et al.* (2015) によって決定された強震動生成点の位置 (青色星). 黄色星は破壊開始点を表す. (右) 1-10 Hz の速度波形 EW 成分のエネルギーエンベロープ.

■ Suzuki *et al.* (2016)

Suzuki *et al.* (2016) は 0.02-0.125 Hz の強震波形を用いて震源破壊の時空間的すべりを推定した。結果のすべり変位分布を図 2.2.1-10 に示す。彼らの結果でも, Schurr *et al.* (2014), Duputel *et al.* (2015), Liu *et al.* (2015) と同様, 破壊開始点の南側にもっとも大きいすべりが求まっている (Area 1)。このほか, 破壊開始点南側の深部 (Area 2) および破壊開始点付近 (Area 3) にもやや大きなすべりが見られる。得られた最大すべり量は 9.7 m, 地震モーメントは 2.43×10^{21} Nm (M_w 8.2) である。さらに, 彼らは強震波形の高周波数成分 (5-10 Hz) を用いたバックプロジェクション解析も行っている。その結果, 高周波の破壊は低周波と異なり, 断層深部 (Area 2) へ進展していくことが分かった (図 2.2.1-11)。これは, この地震における地震波放射の顕著な深さ依存性を示している。

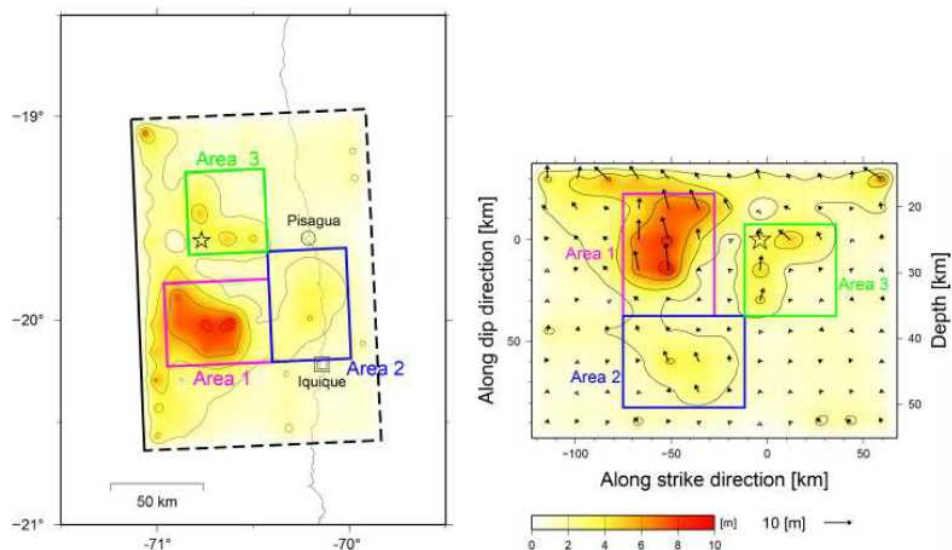


図 2.2.1-10 Suzuki *et al.* (2016) による 2014 年 Iquique 地震のすべり変位分布。



図 2.2.1-11 Suzuki *et al.* (2016) による, 高周波放射が最大となる破壊開始から 30-35 秒での地震波放射の比較。色は高周波数成分, 黒コンターは低周波数成分 (震源インバージョン) の結果を表す。

(3) 2015 年 Illapel 地震

■ Melgar *et al.* (2016)

Melgar *et al.* (2016) は強震波形 (0.02-0.5 Hz)・津波波形・測地データを用いて震源破壊の時空間的すべりを推定し、破壊開始点の北側において2個の大すべり域が求めた(図 2.2.1-12)。両大すべり域はともに約 10 m の最大すべり量を持ち、片方は深さ 15 km、もう片方は深さ 30 km 付近に位置する。また、バックプロジェクション解析を用いて両大すべり域を詳細に調べたところ、両者は分離しており、それぞれの性質も大きく異なることが分かった。浅いほうのすべりは高周波放射がほとんどなく、大きな津波を生成する。一方、深いほうのすべりは高周波エネルギーを多く含み、大きな強震動をもたらす。

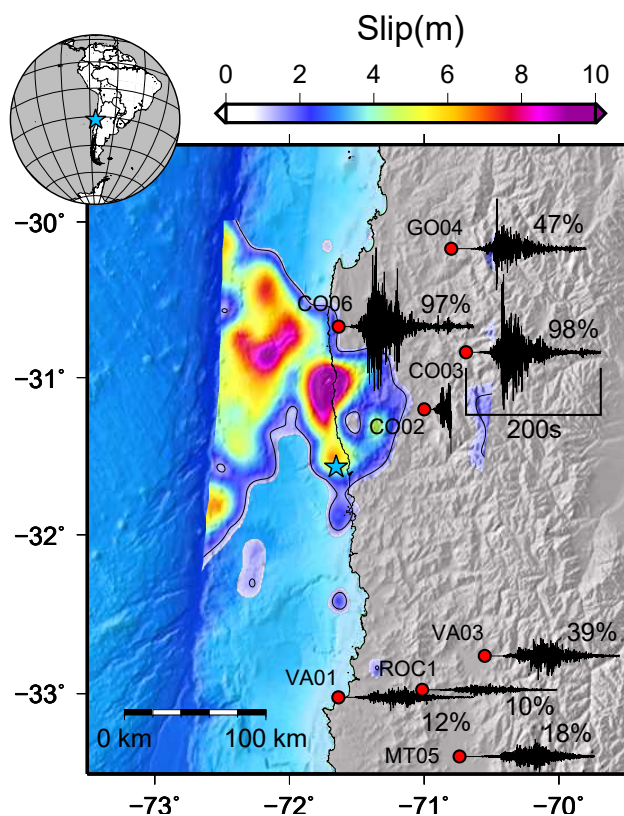


図 2.2.1-12 Melgar *et al.* (2016) による 2015 年 Illapel 地震のすべり変位分布。波形は破壊開始時刻から 200 秒間の加速度波形 NS 成分である。

■ Tilmann *et al.* (2016)

Tilmann *et al.* (2016) は強震 (0.01-0.05 Hz)・遠地 (0.01-0.1 Hz) 波形および測地データを用いて震源破壊の時空間的すべりを推定した。結果のすべり変位分布を図 2.2.1-13 に示す。破壊開始点北側の浅部にもっとも大きいすべりが求まっており、そのすべり量は 4.8 m である。

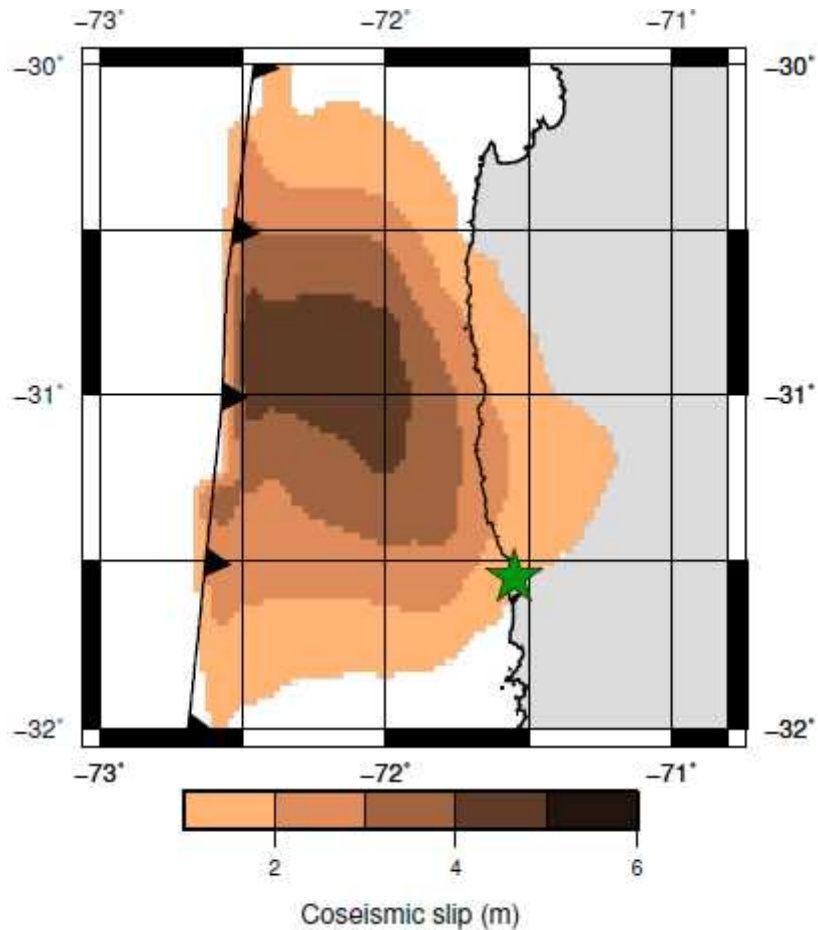


図 2.2.1-13 Tilmann *et al.* (2016) による 2015 年 Illapel 地震のすべり変位分布。

2.2.2 2014年チリ Iquique 地震等の地震観測記録の収集及び波形処理

(1) 2014年Iquique地震における観測記録の収集及び波形処理

2014年Iquique地震の際に、図2.2.2-1に示す強震観測点で観測記録が得られている。図に本震の震央位置もプロットしている。これらの観測記録をチリ大学のウェブサイト (<http://evtdb.csn.uchile.cl/>) より収集して、加速度波形を積分することによって速度波形に変換した。また、加速度波形を用いて、フーリエスペクトル、速度応答スペクトルを計算した。波形処理により得られた加速度波形、速度波形、速度応答スペクトル及びフーリエスペクトルを図 2.2.2-2～図 2.2.2-26に示す。

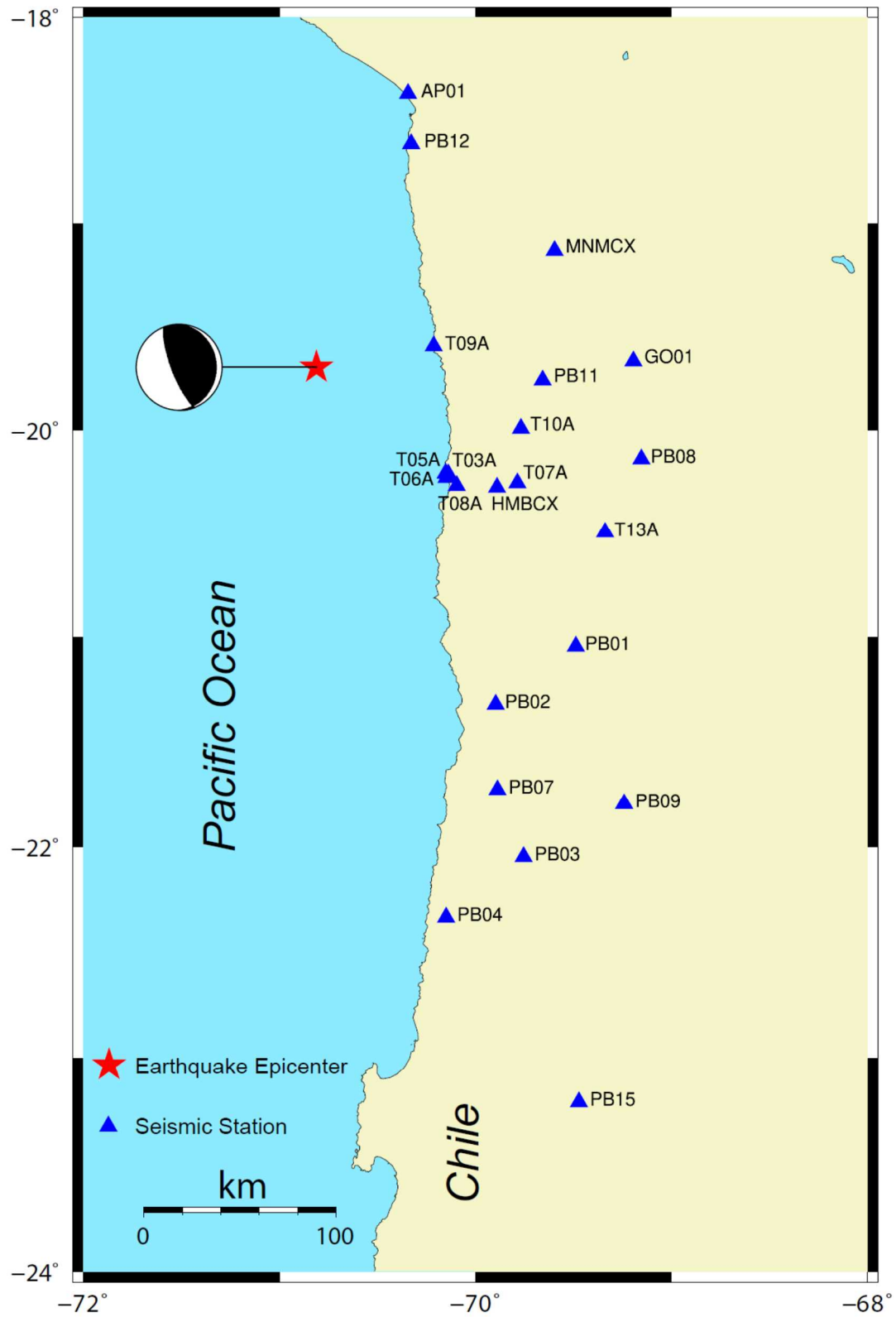


図 2.2.2-1 2014年Iquique地震の震央位置と観測記録の得られている観測点分布

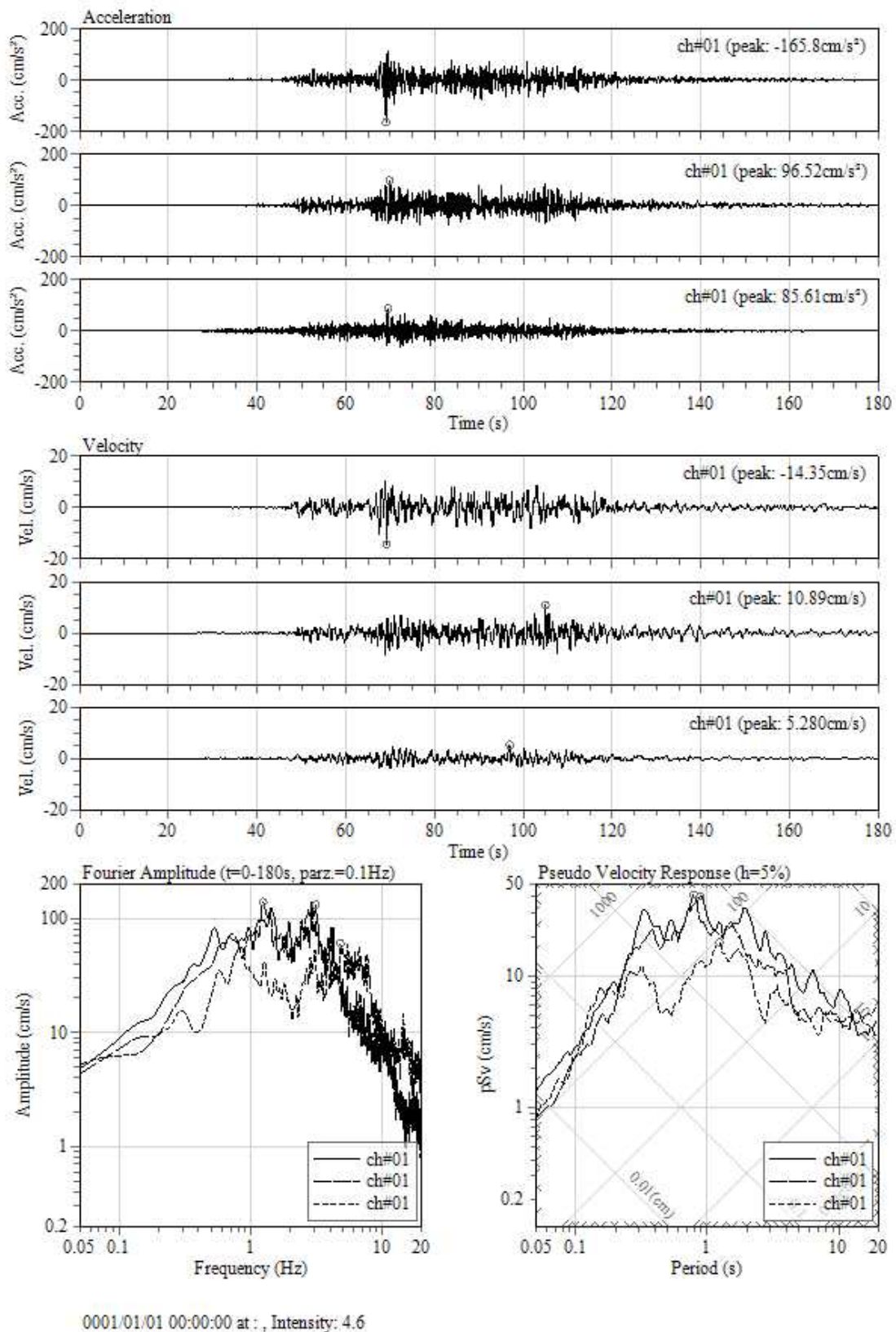


図 2.2.2-2 観測点 AP01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

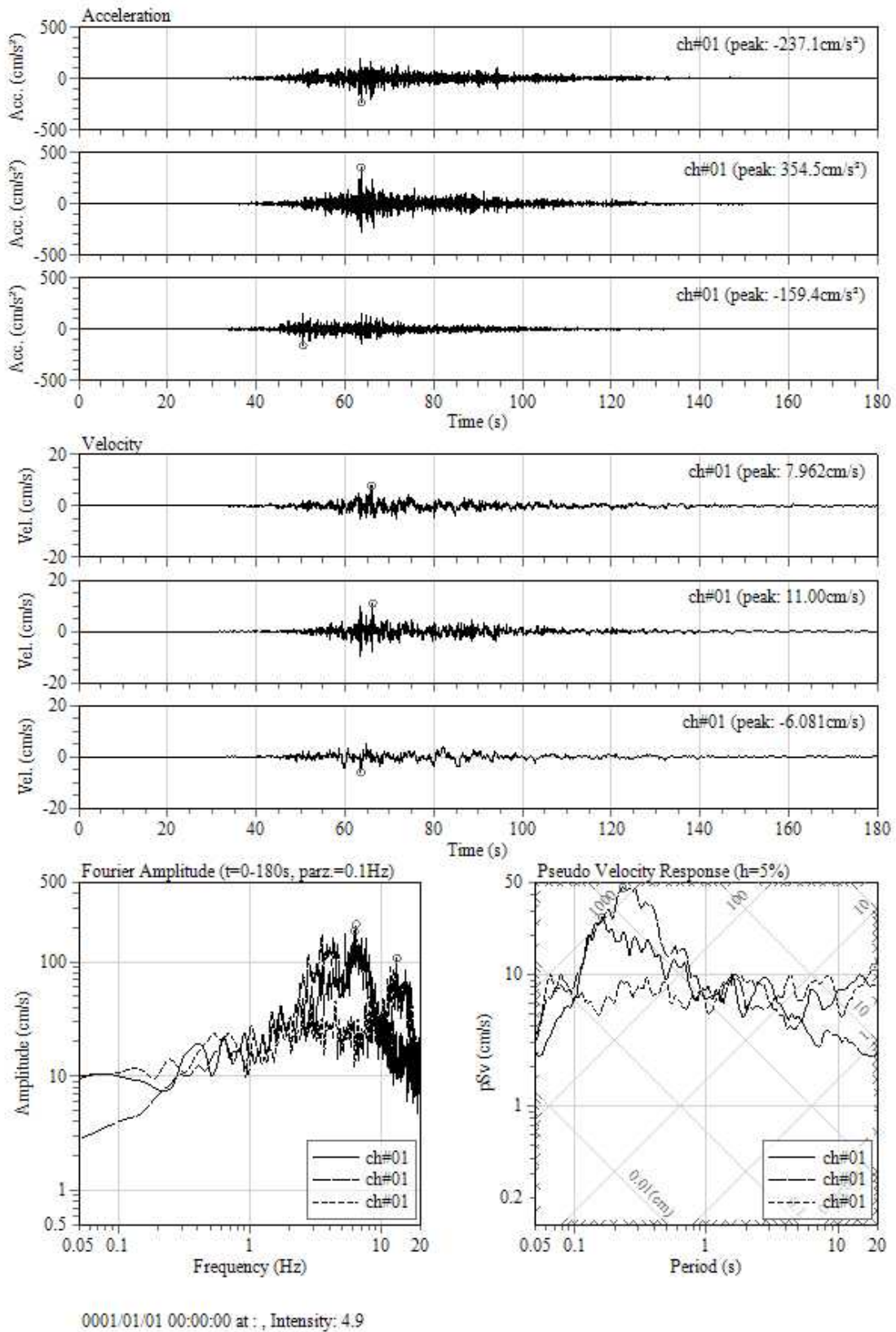
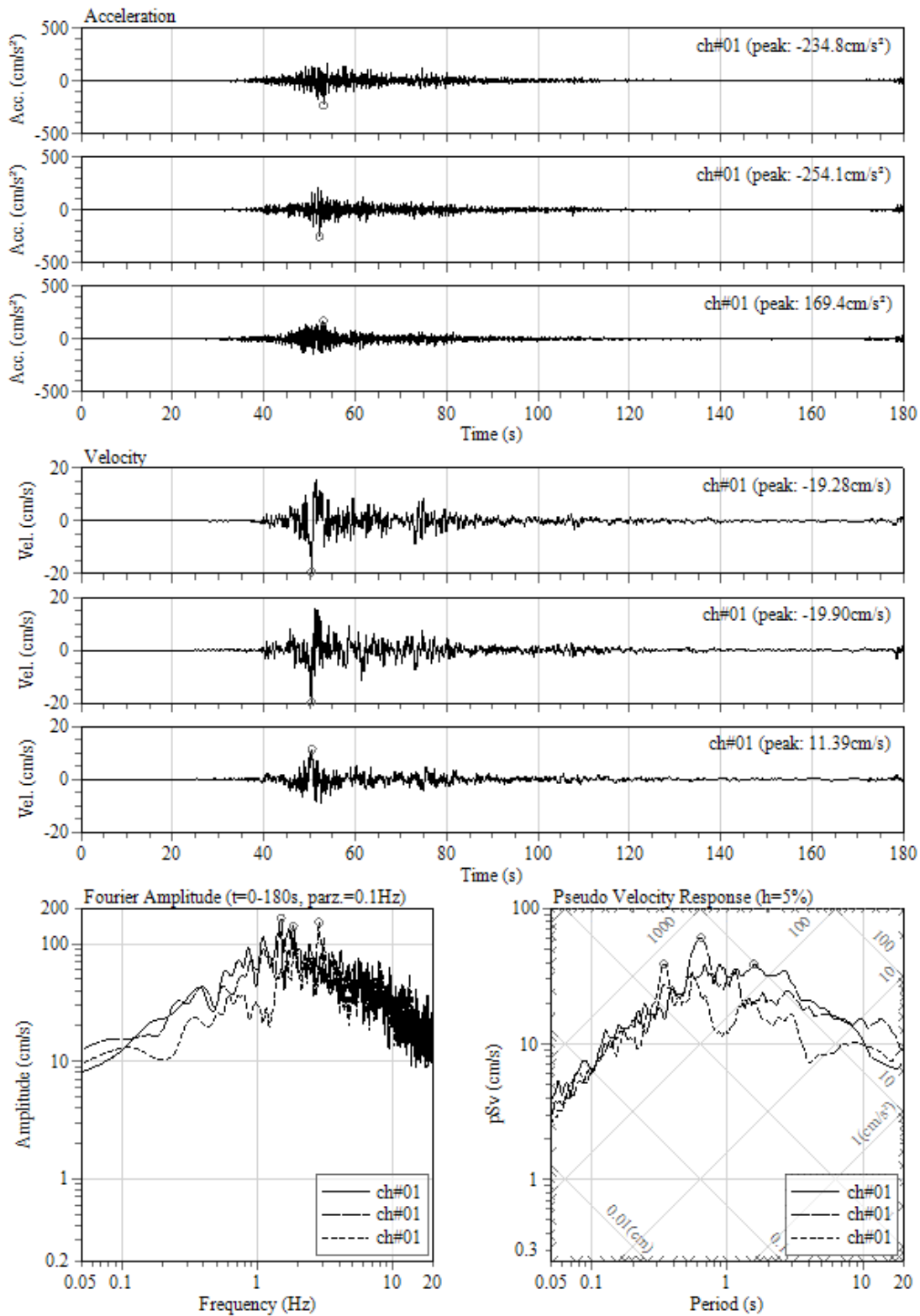
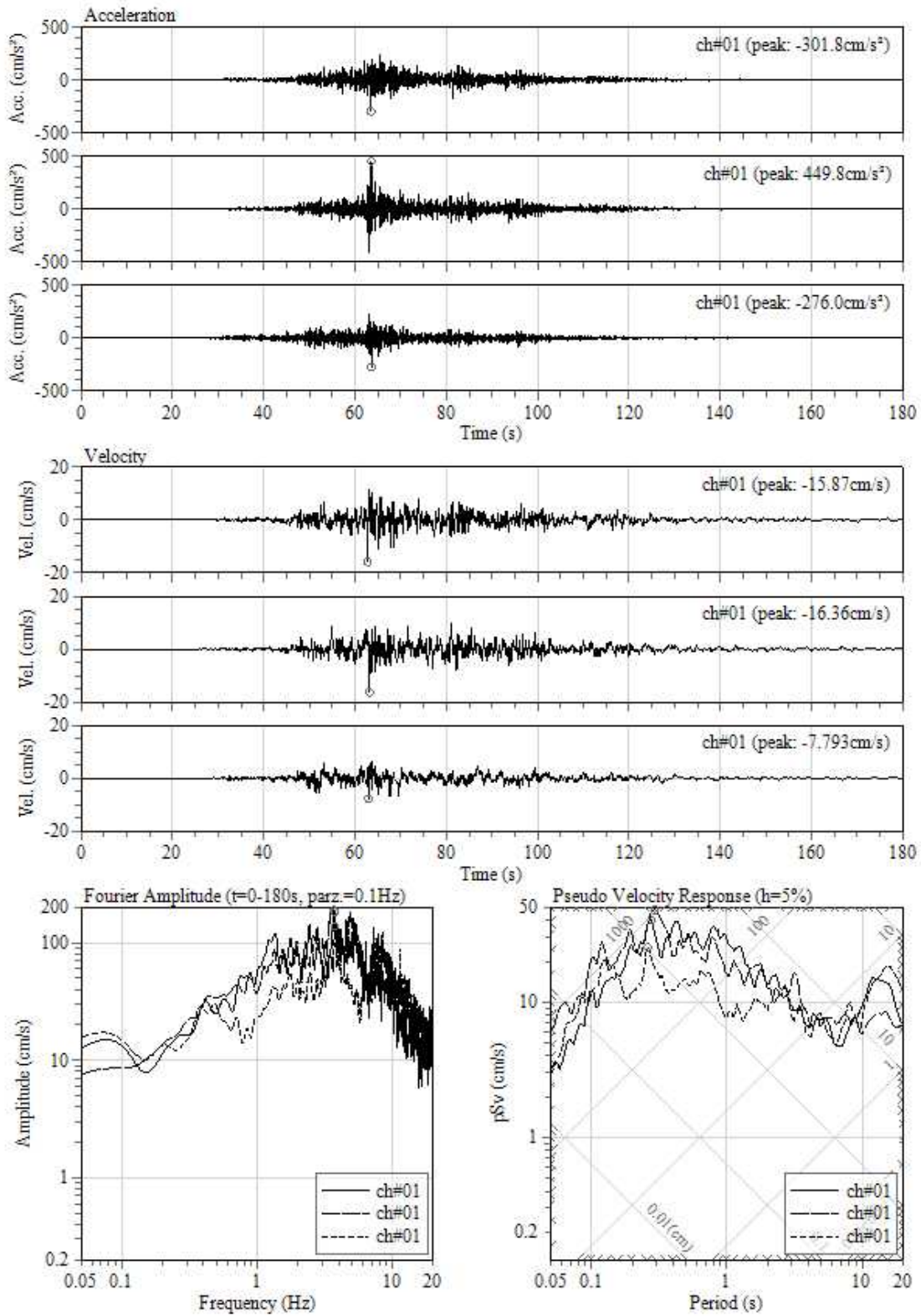


図 2.2.2-3 観測点 GO01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



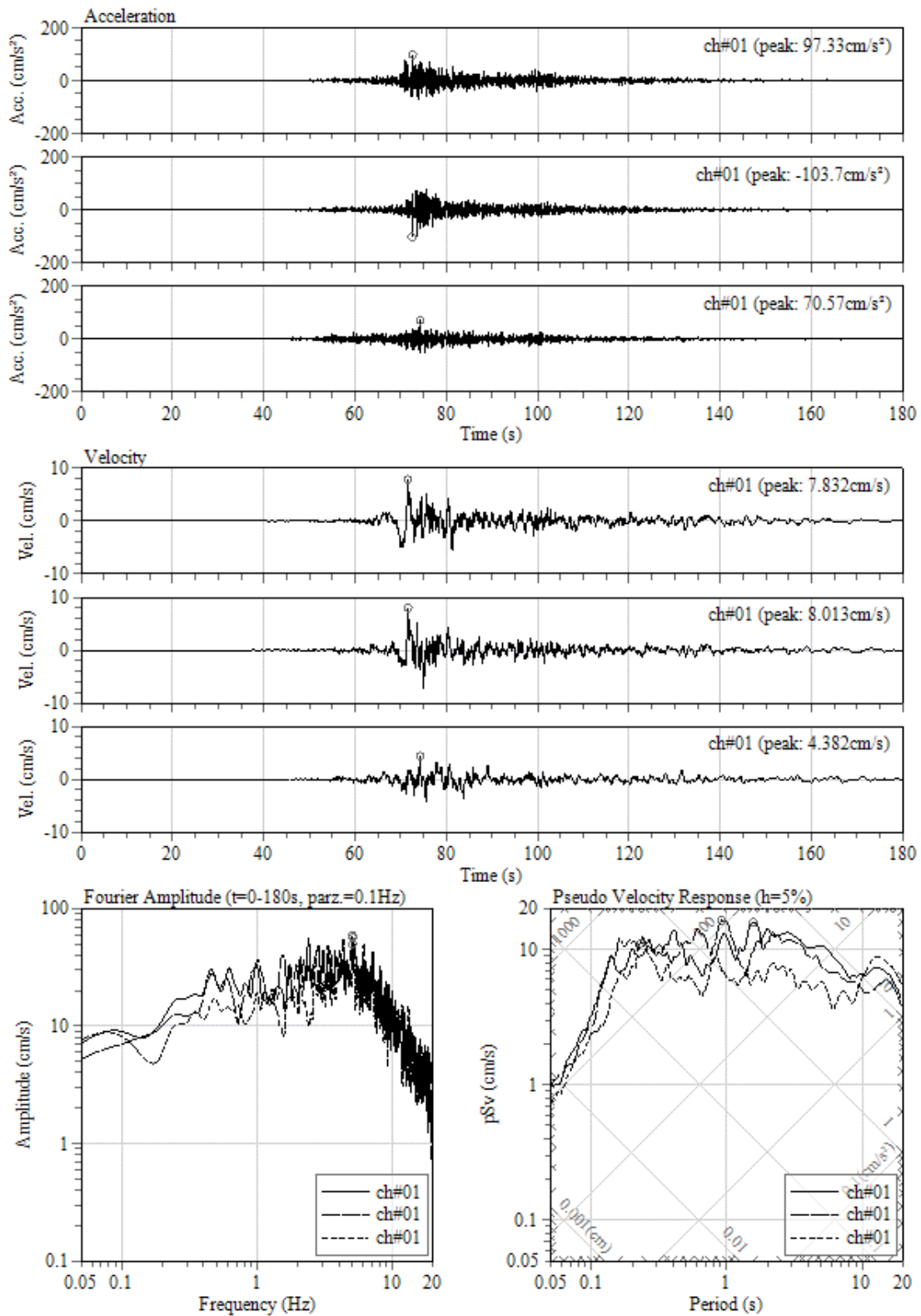
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.9

図 2.2.2-4 観測点 HMBCX における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



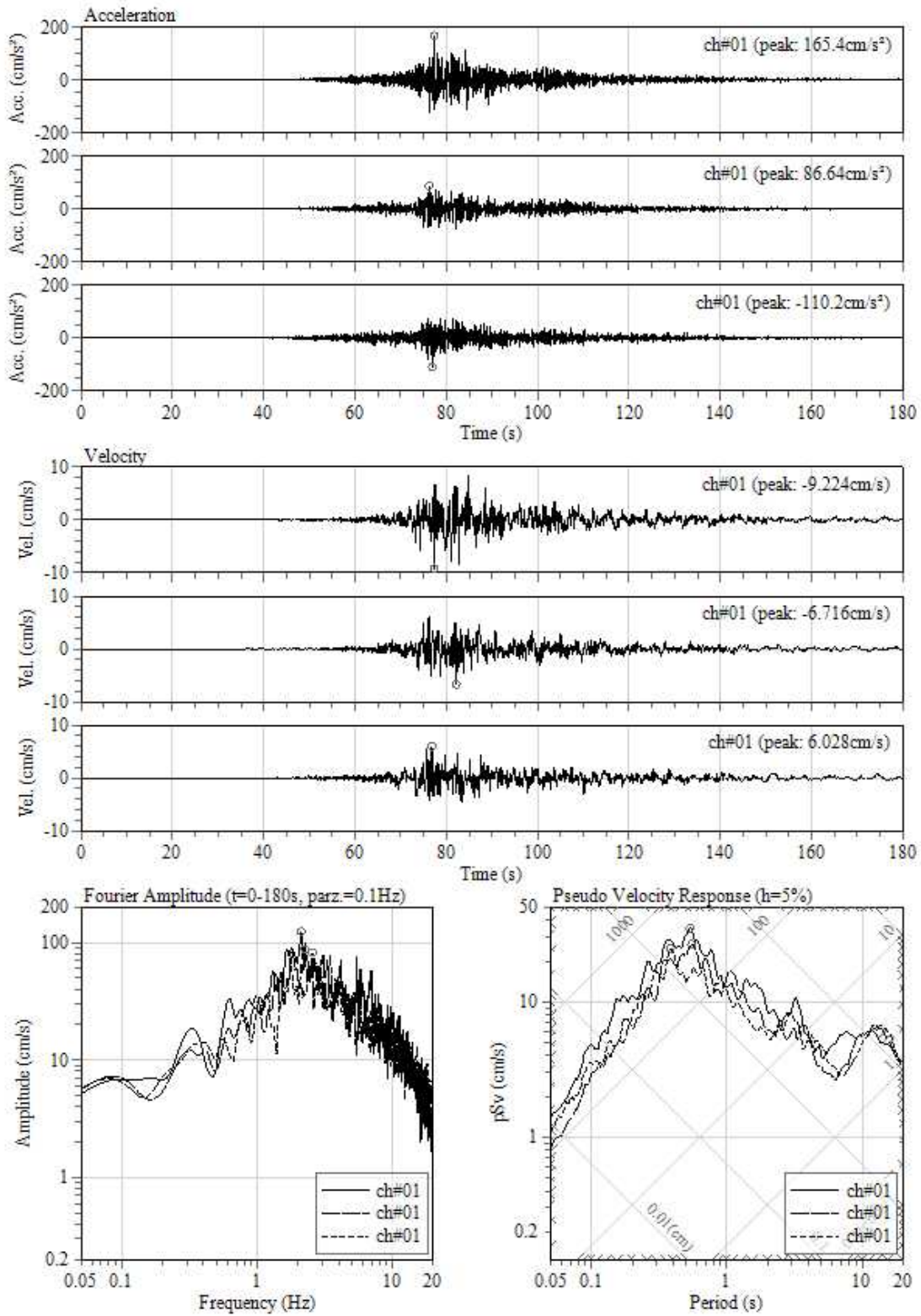
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.1

図 2.2.2-5 観測点 MNMCX における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



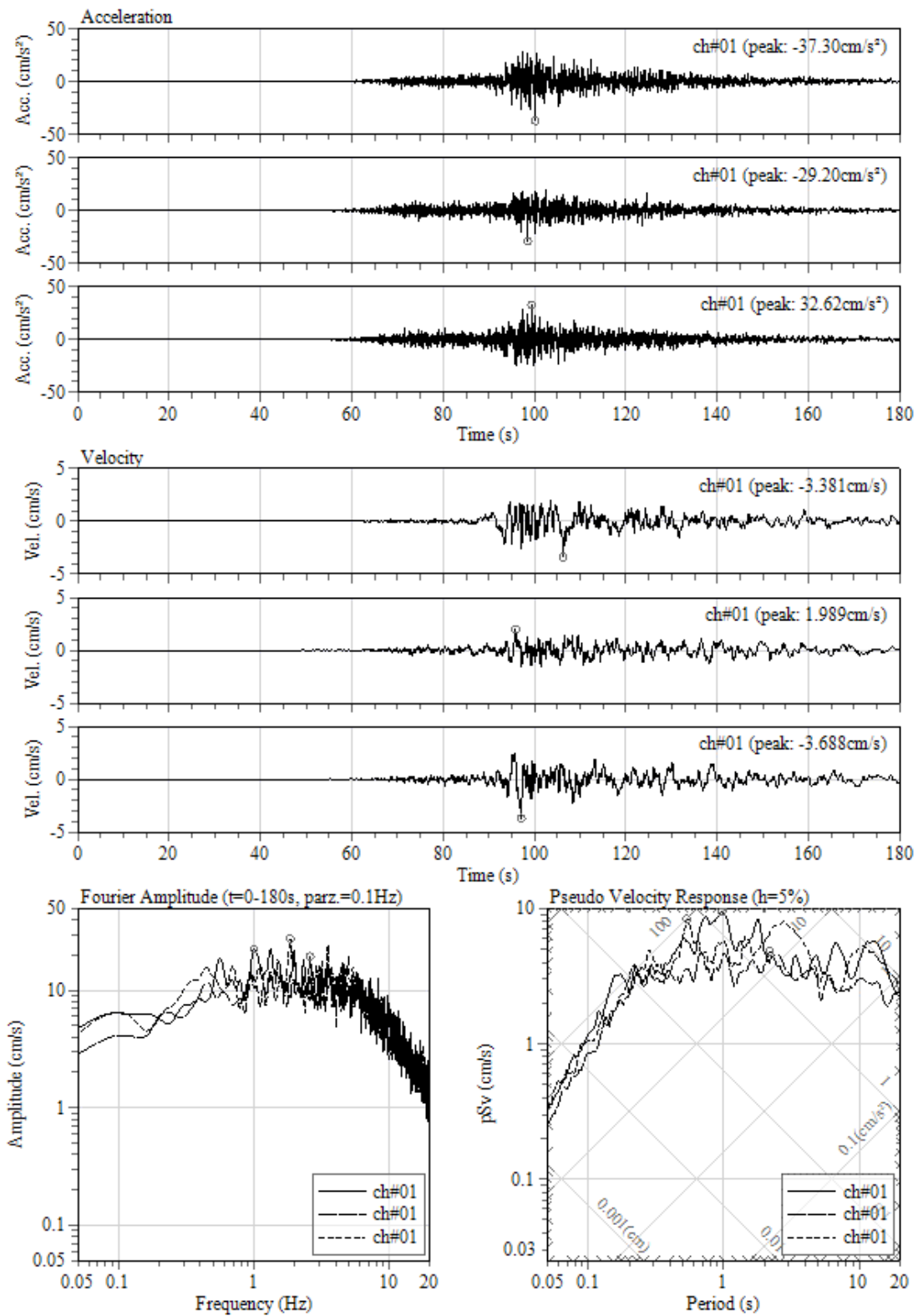
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.1

図 2.2.2-6 観測点 PB01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



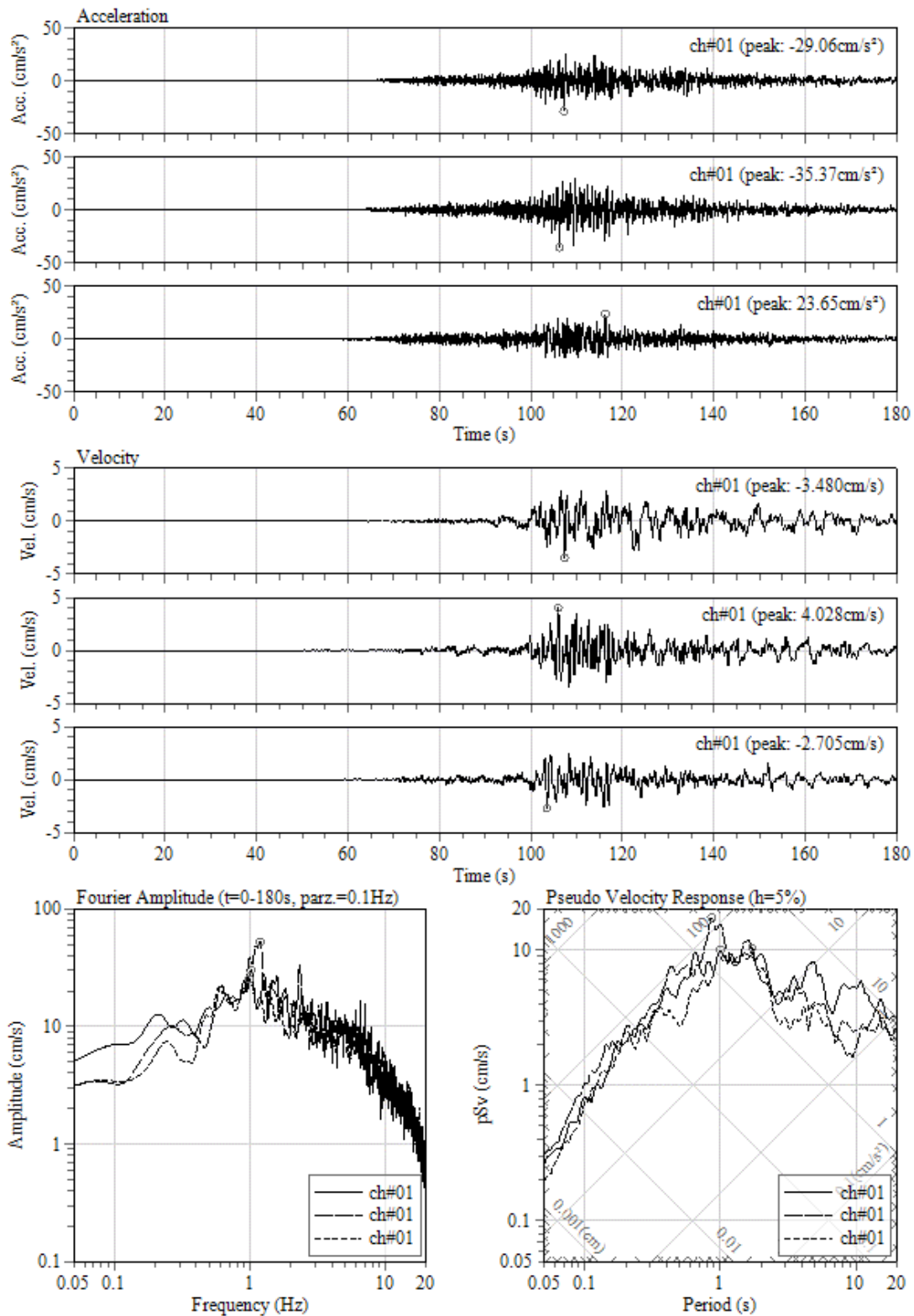
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.5

図 2.2.2-7 観測点 PB02 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



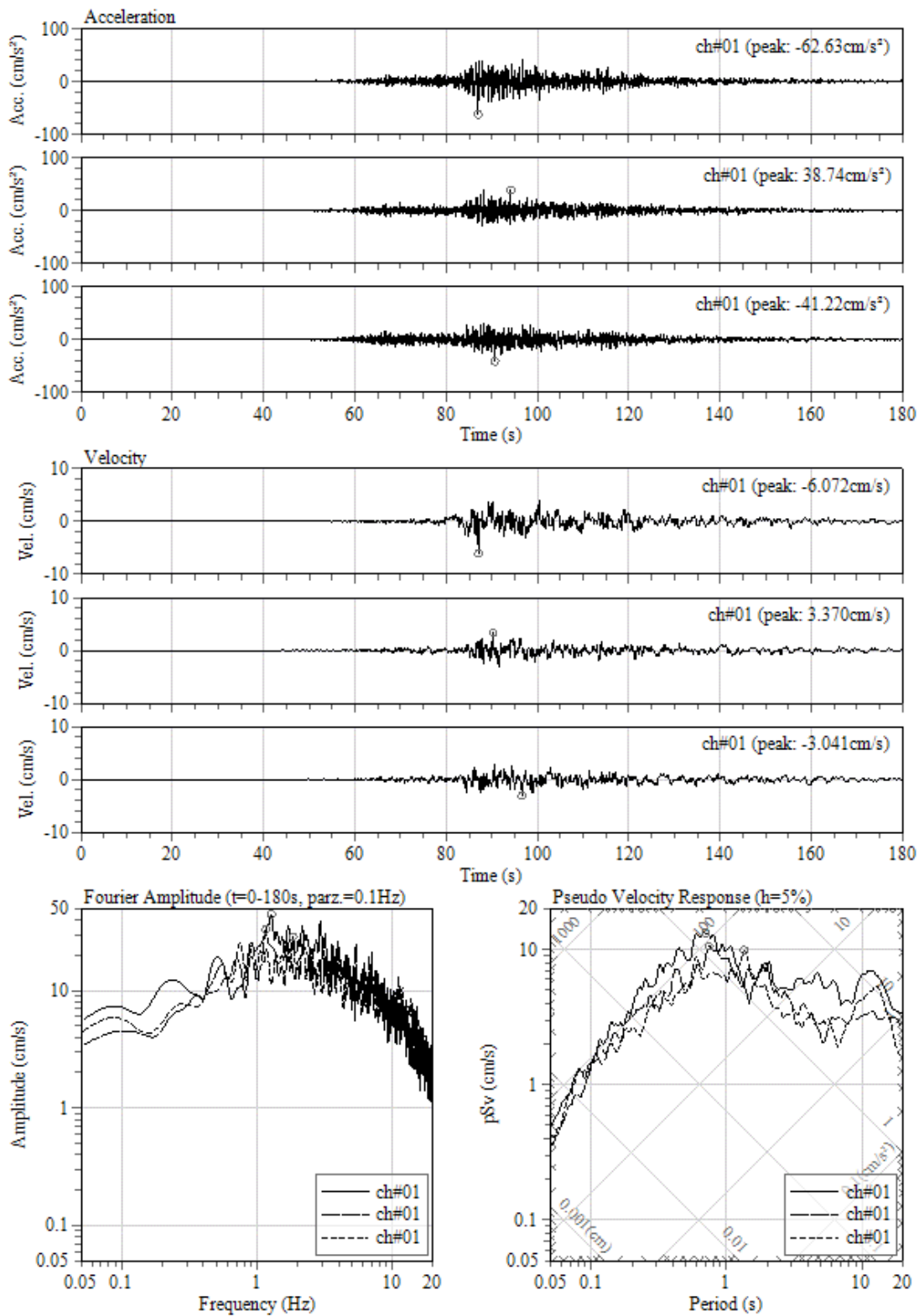
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.5

図 2.2.2-8 観測点 PB03 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



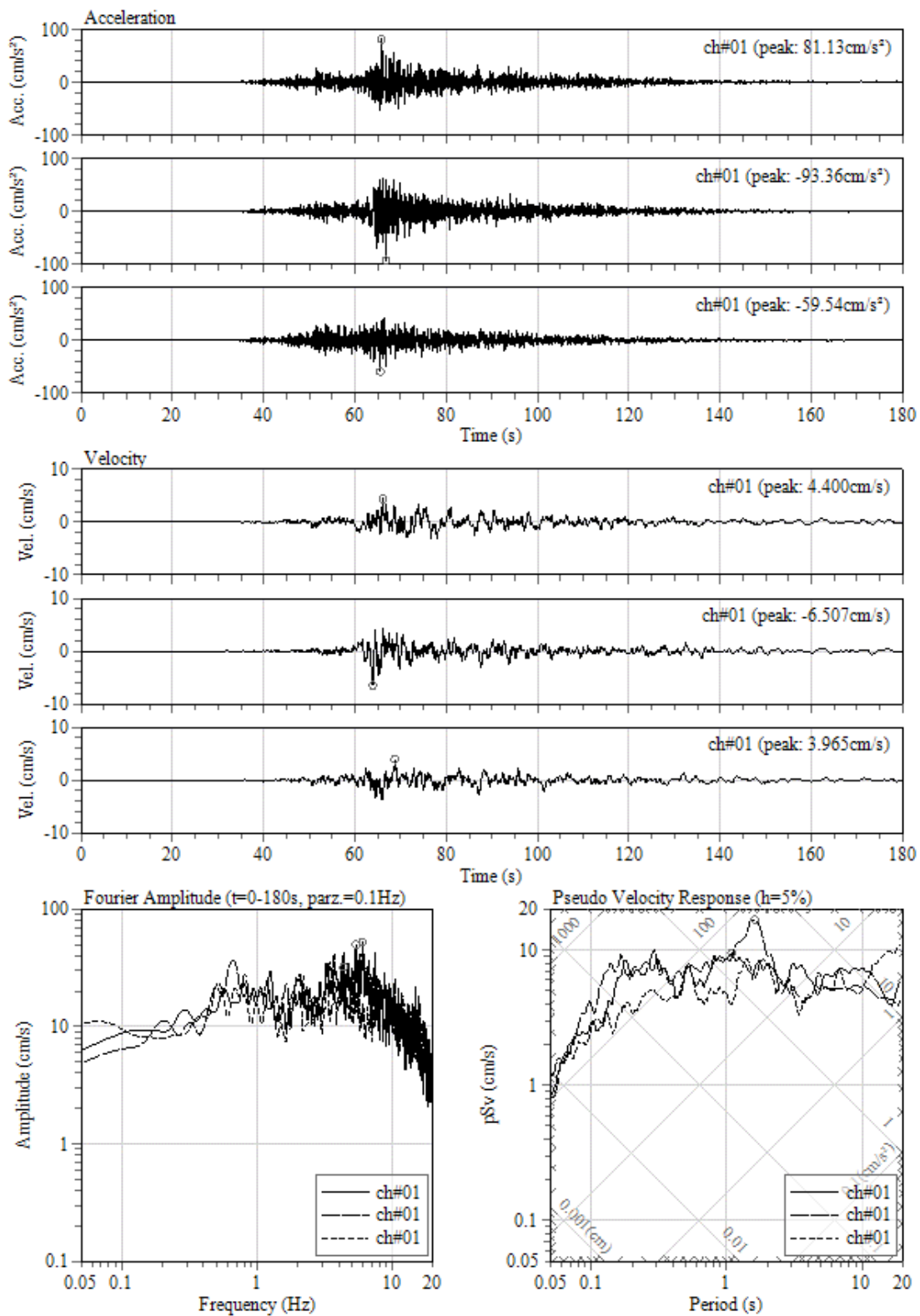
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.6

図 2.2.2-9 観測点 PB04 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



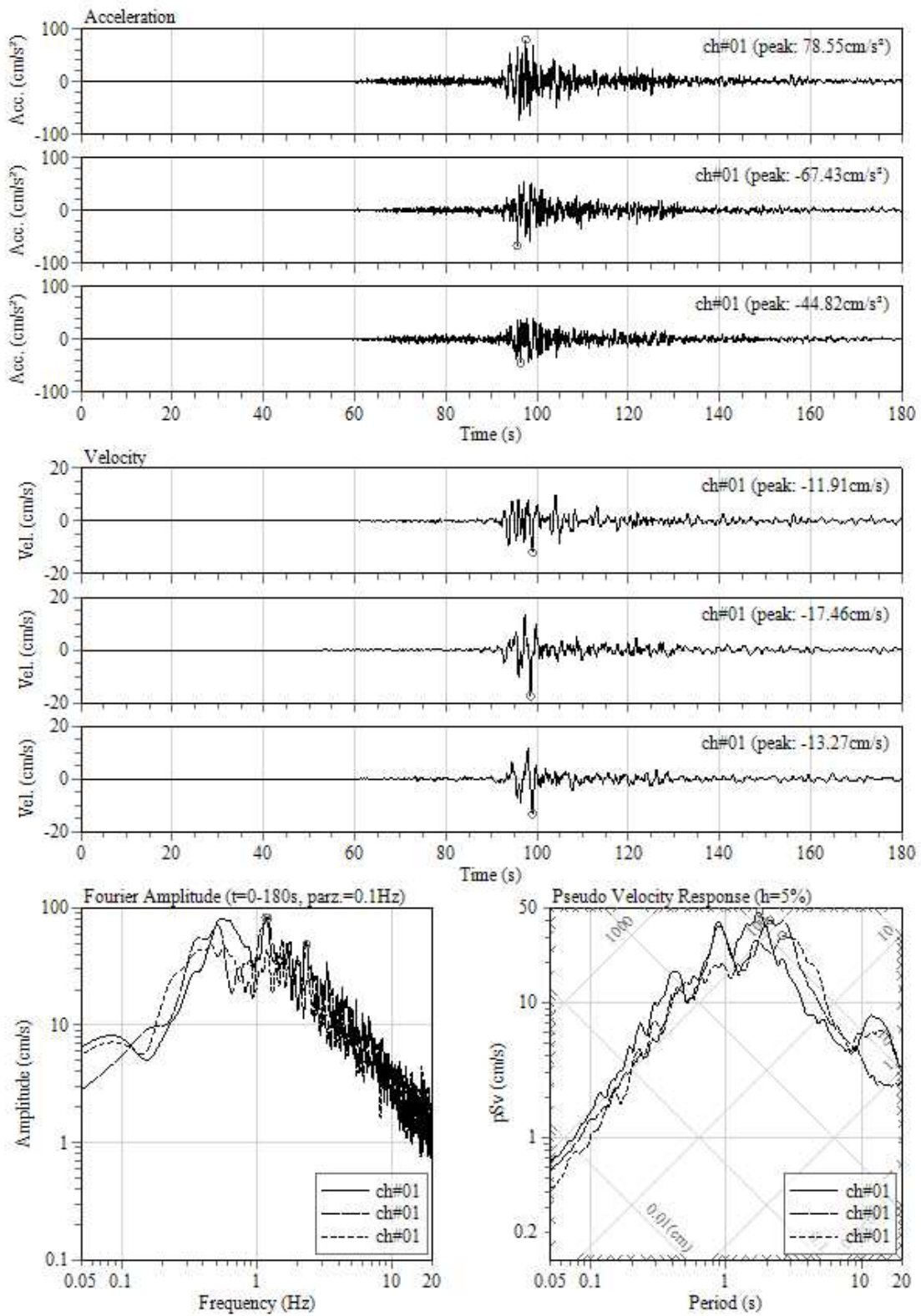
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.8

図 2.2.2-10 観測点 PB07 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



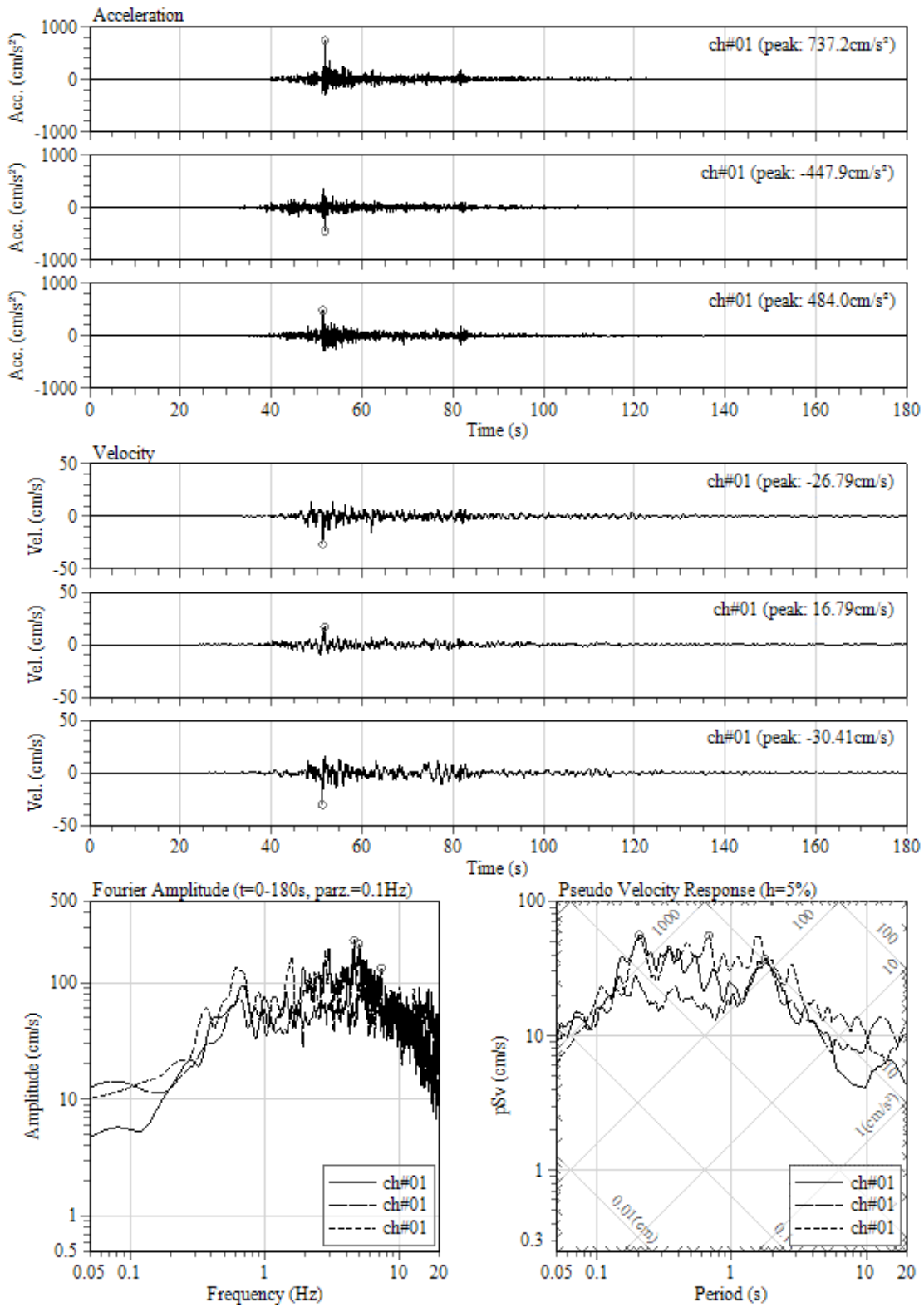
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.9

図 2.2.2-11 観測点 PB08 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



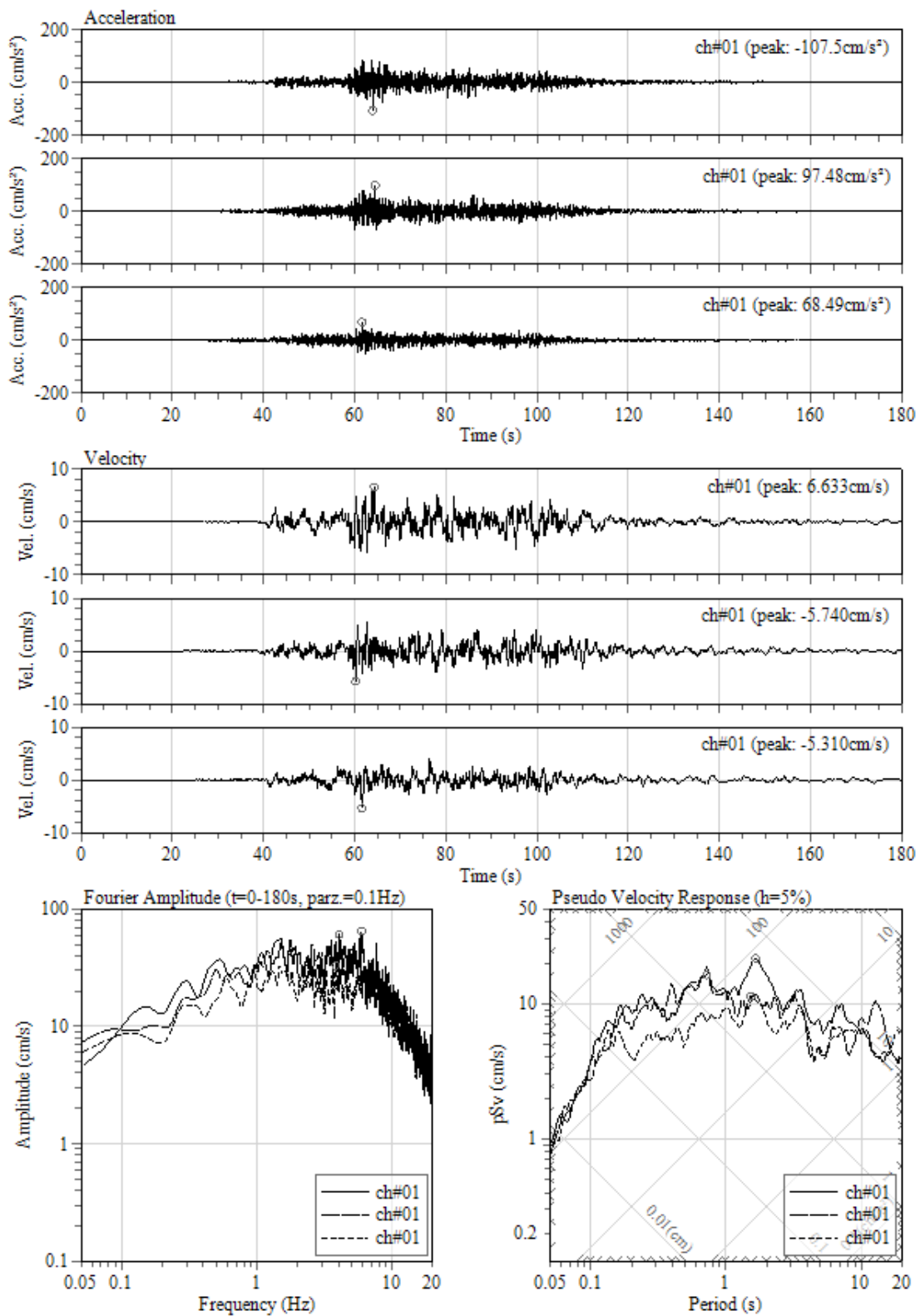
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.6

図 2.2.2-12 観測点 PB09 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



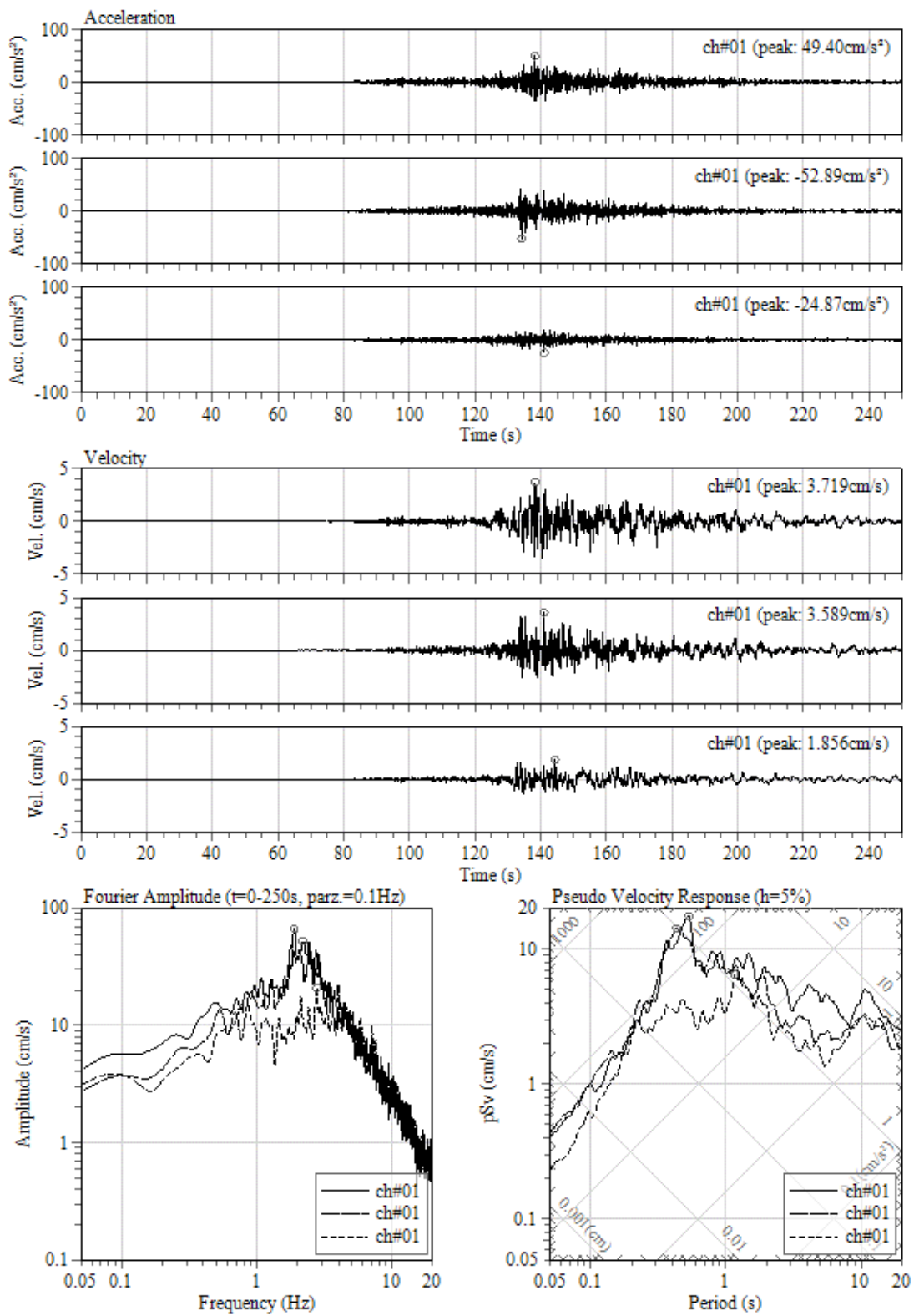
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.3

図 2.2.2-13 観測点 PB11 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



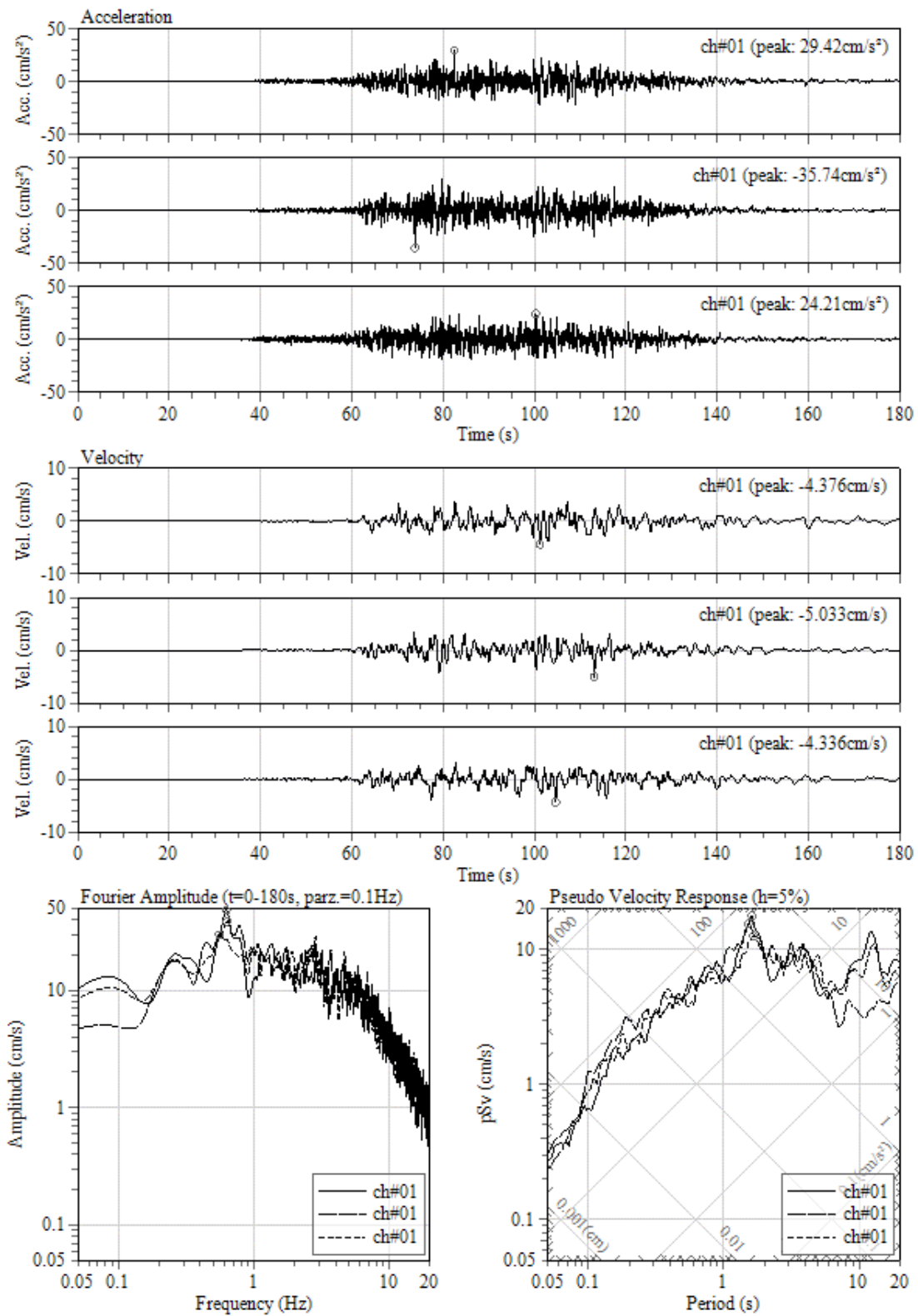
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.2

図 2.2.2-14 観測点 PB12 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



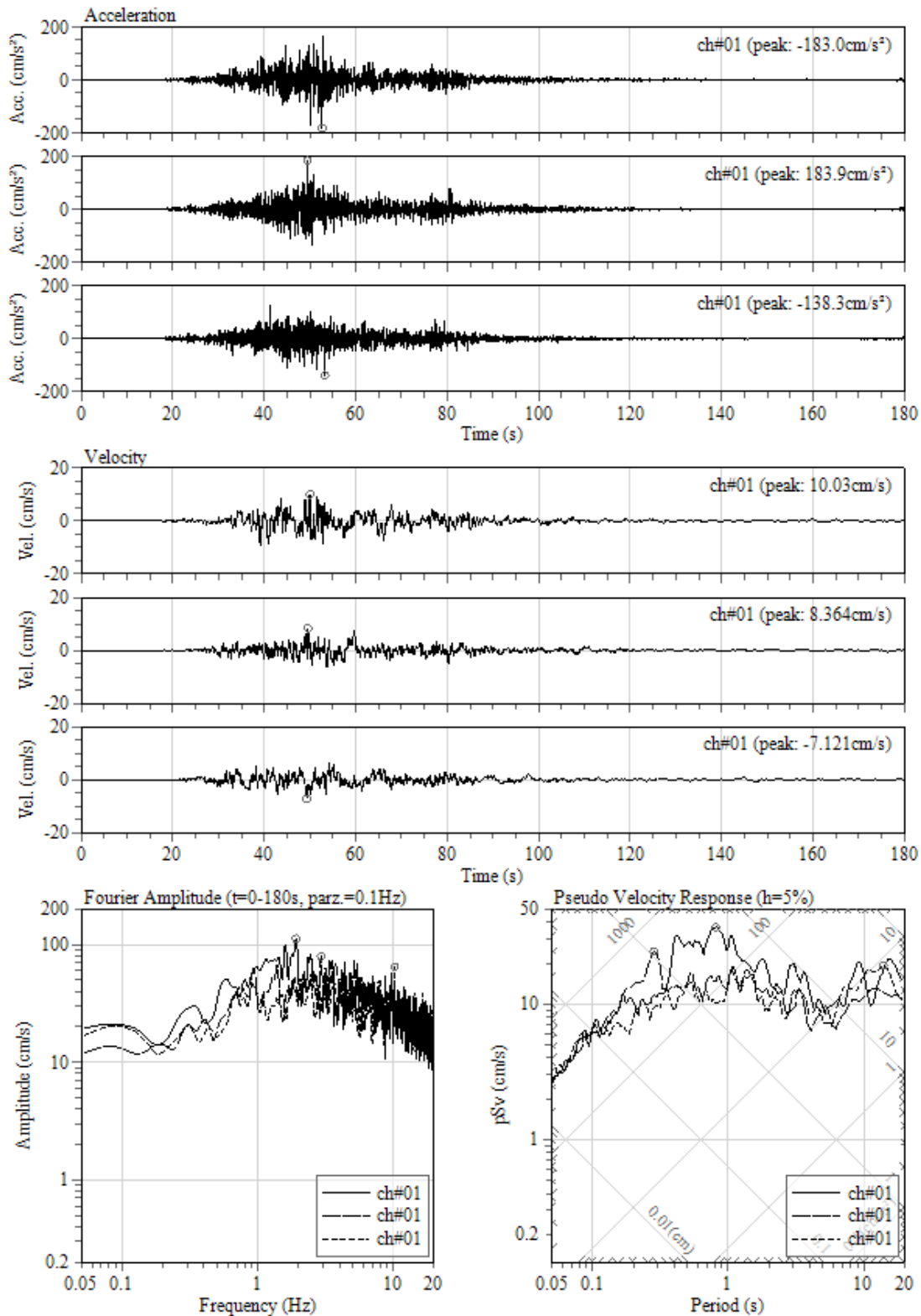
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.8

図 2.2.2-15 観測点 PB15 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



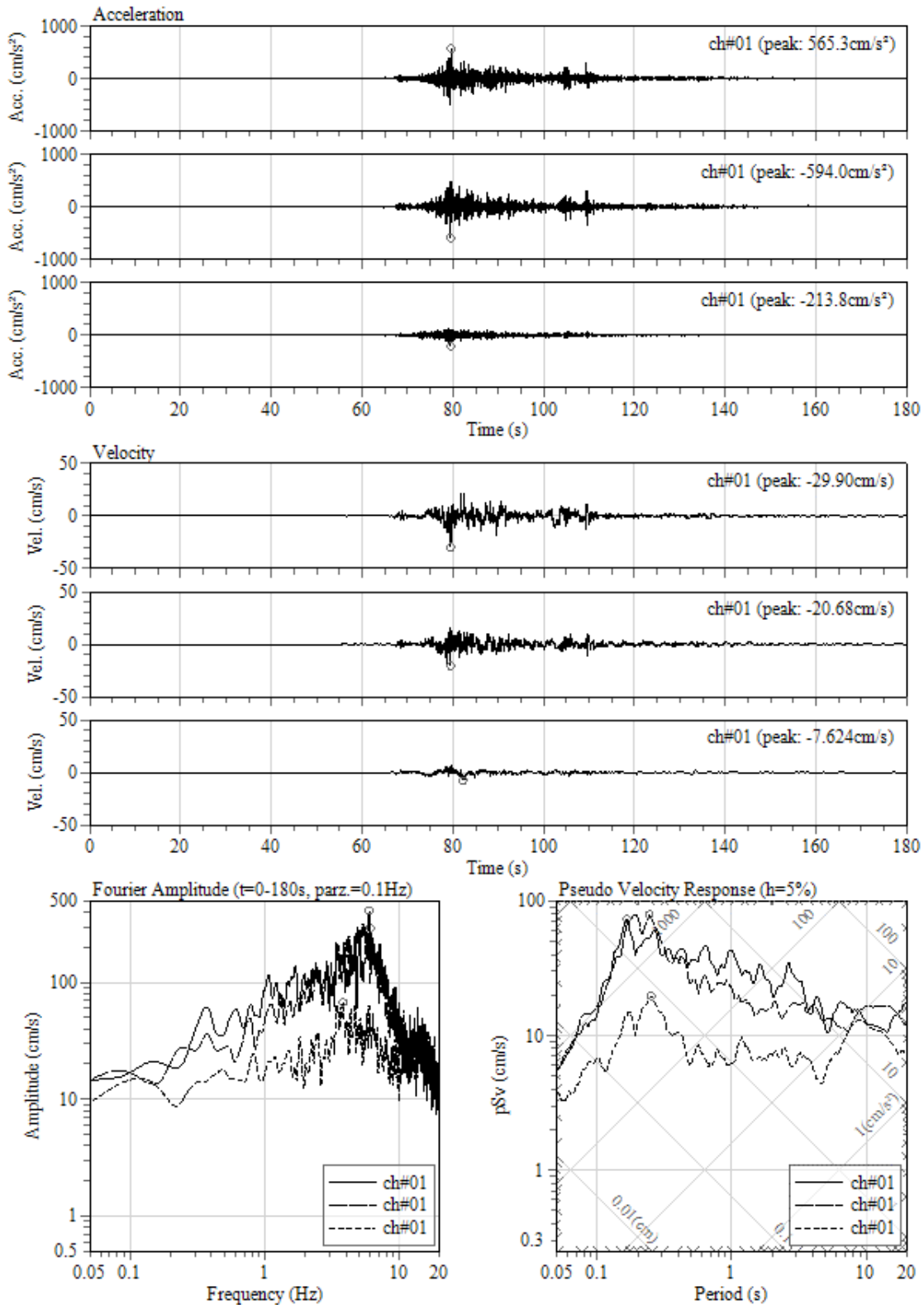
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.5

図 2.2.2-16 観測点 PB16 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



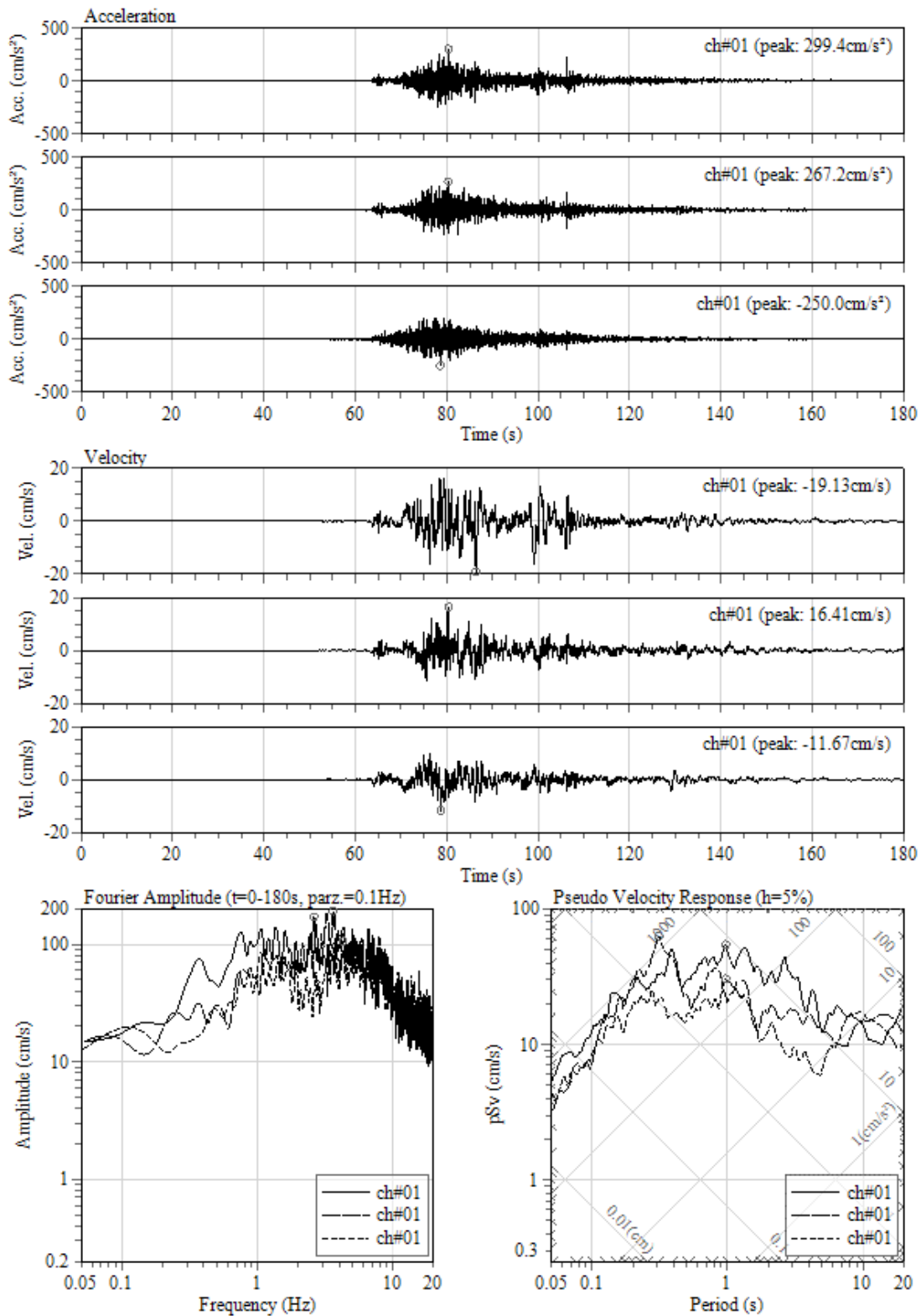
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.6

図 2.2.2-17 観測点 PSGCX における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



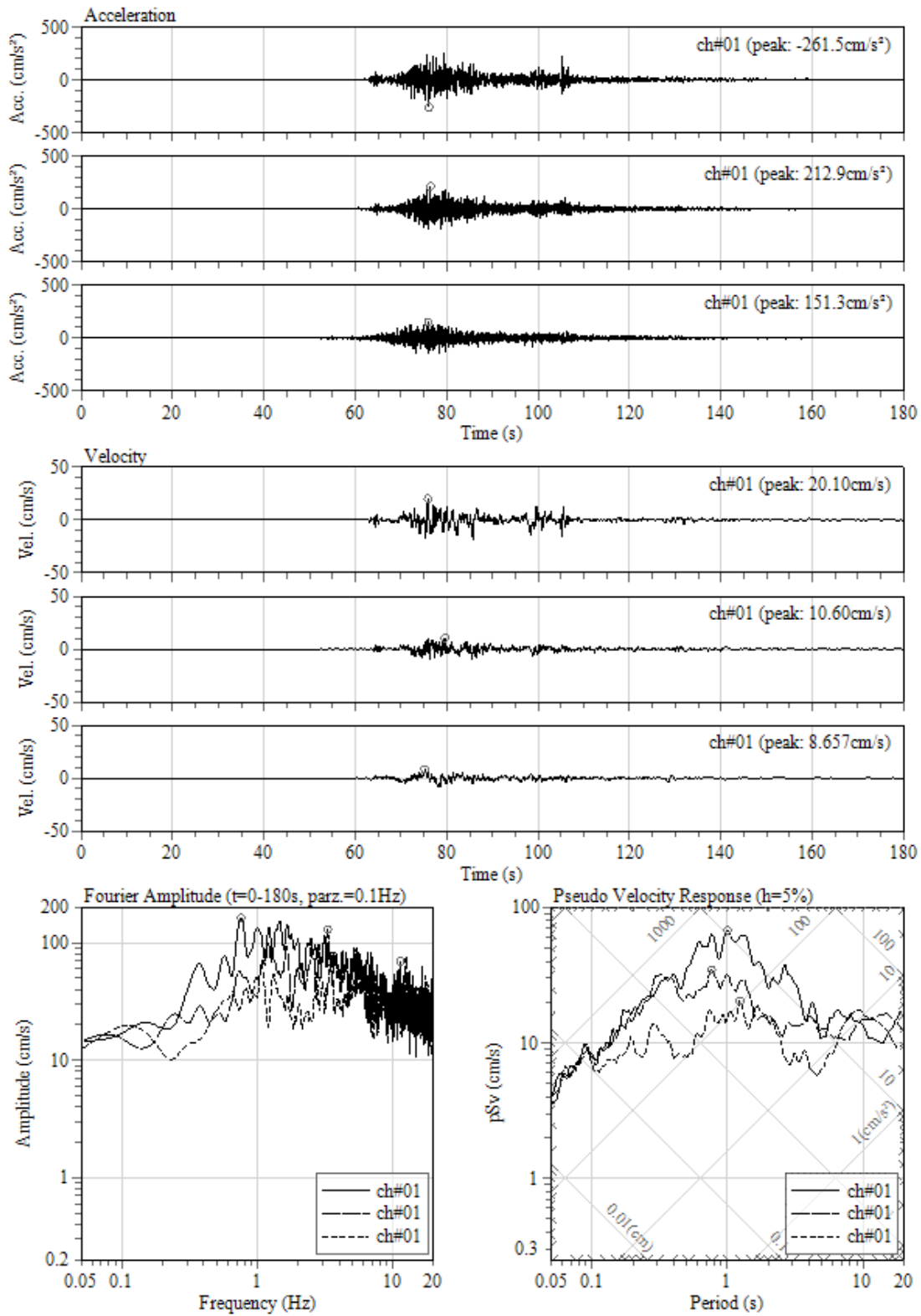
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.4

図 2.2.2-18 観測点 T03A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



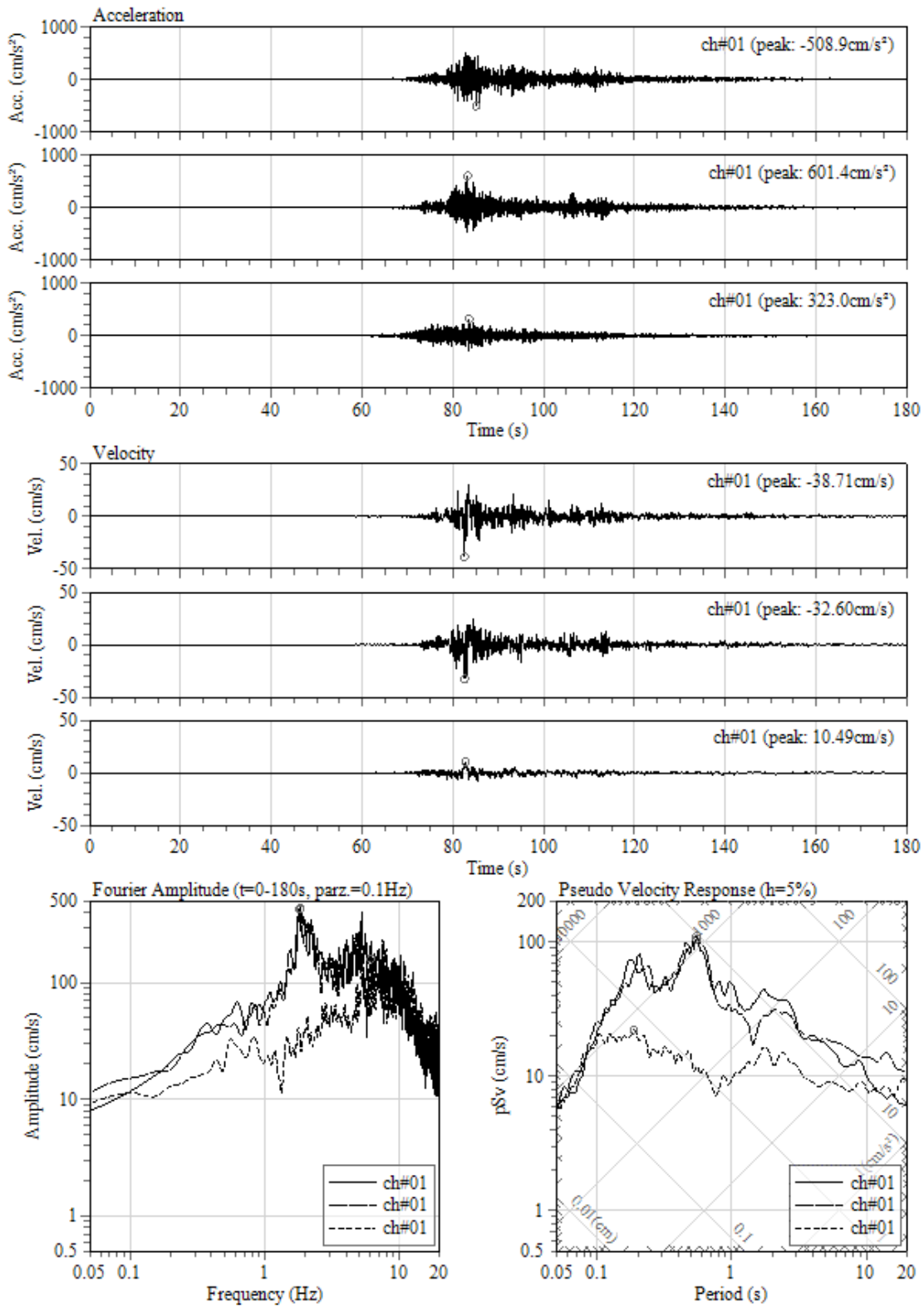
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.1

図 2.2.2-19 観測点 T05A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



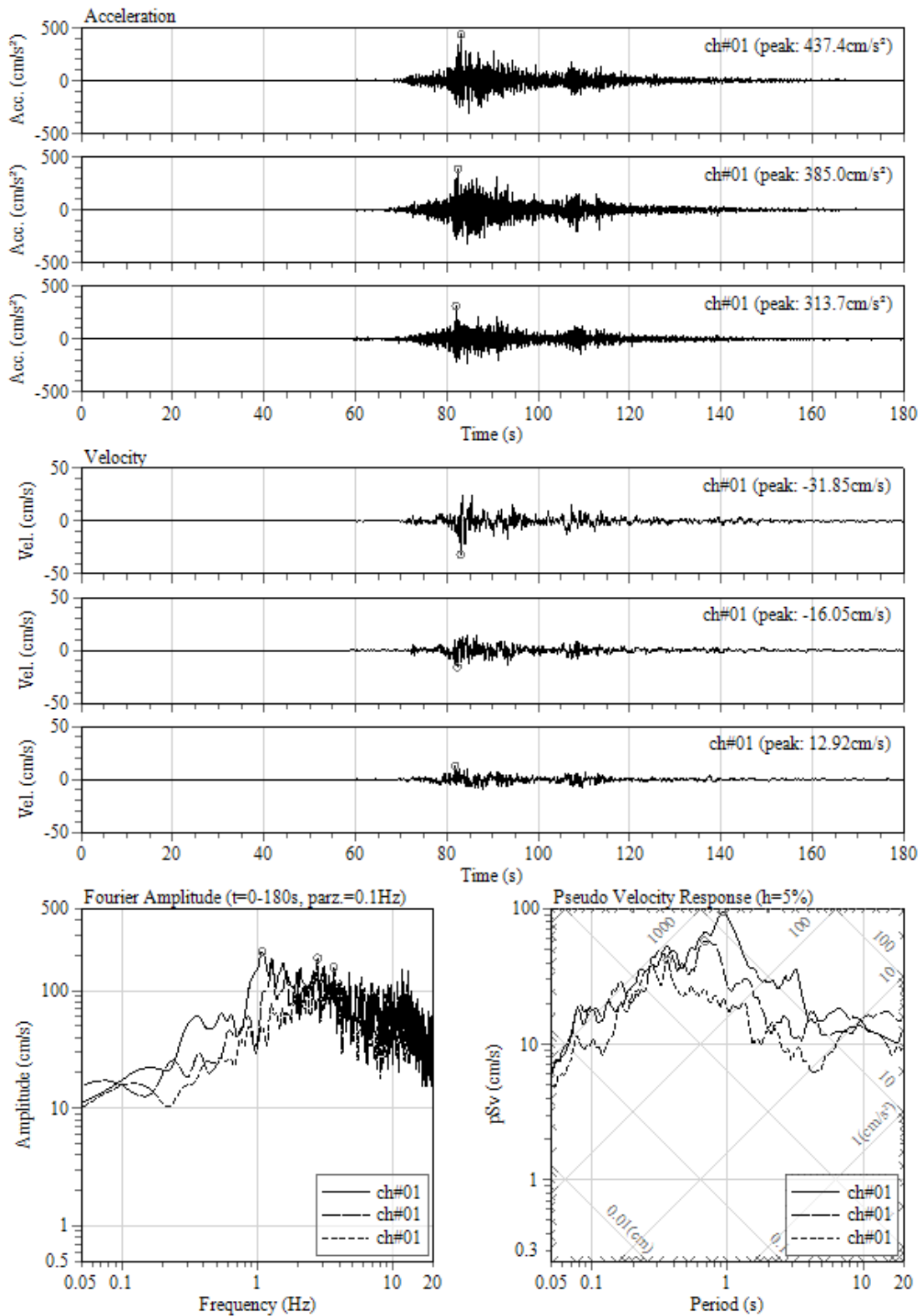
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.0

図 2.2.2-20 観測点 T06A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



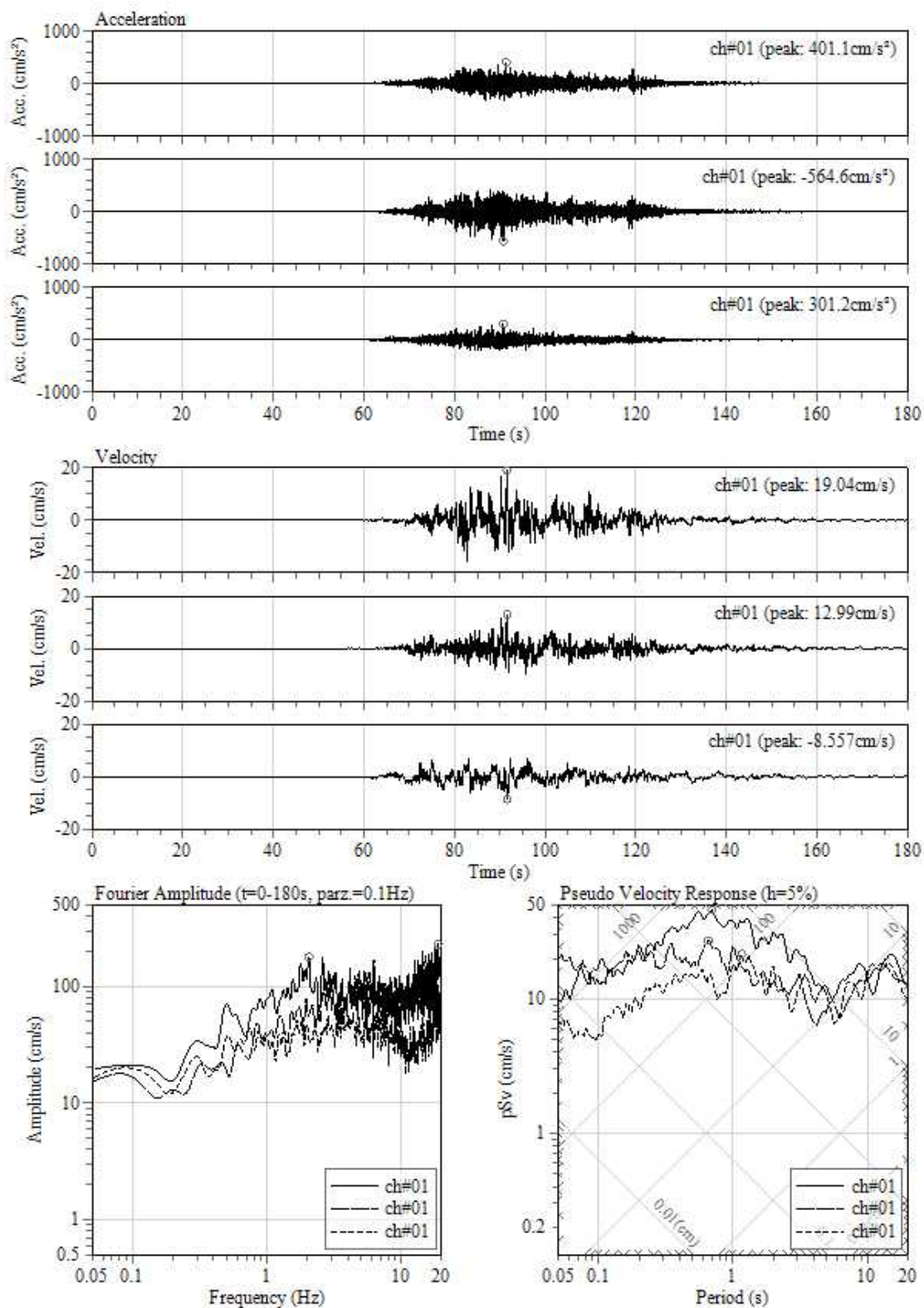
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.7

図 2.2.2-21 観測点 T07A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



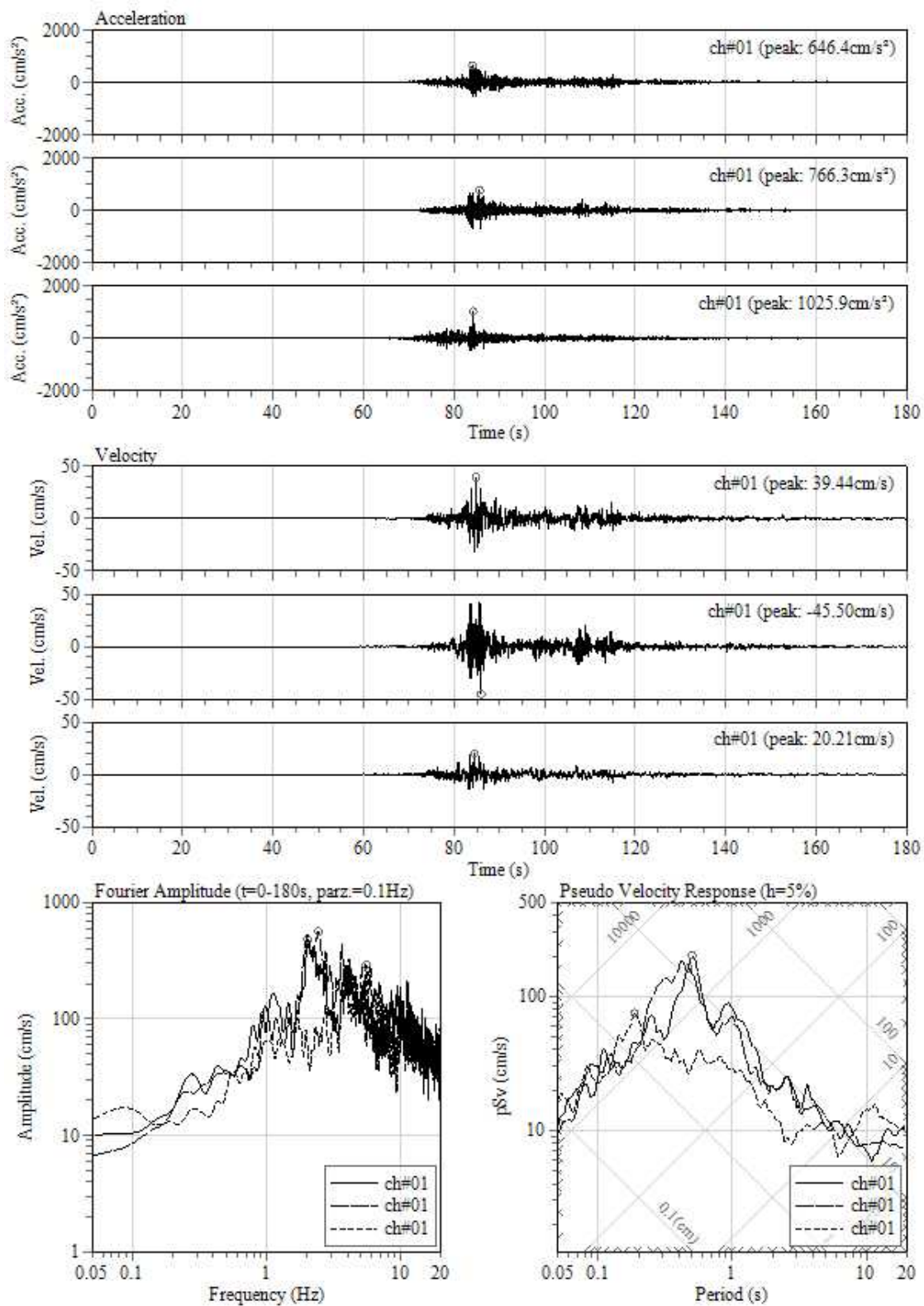
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.3

図 2.2.2-22 観測点 T08A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



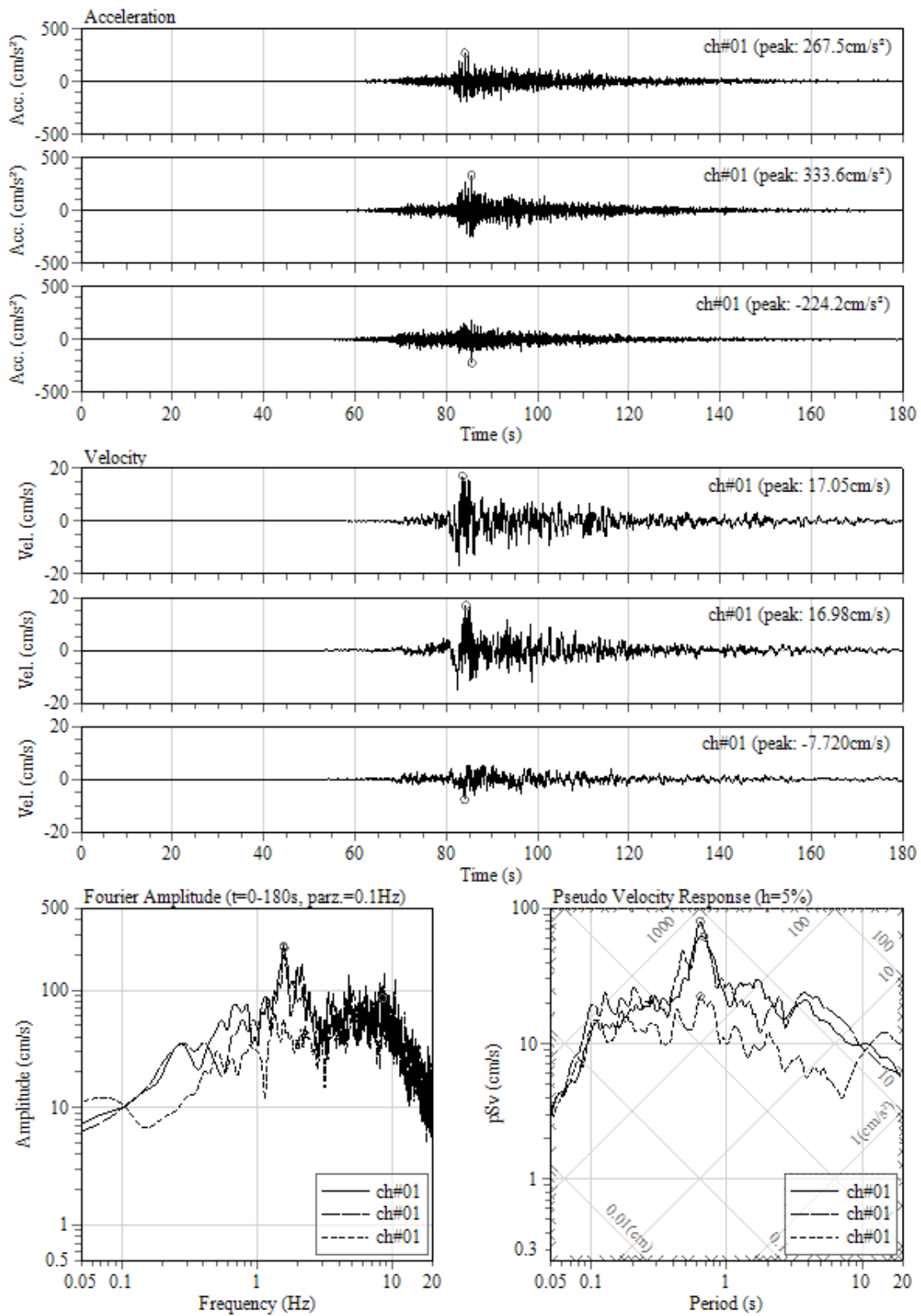
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.0

図 2.2.2-23 観測点 T09A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 6.0

図 2.2.2-24 観測点 T10A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.1

図 2.2.2-25 観測点 T13A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

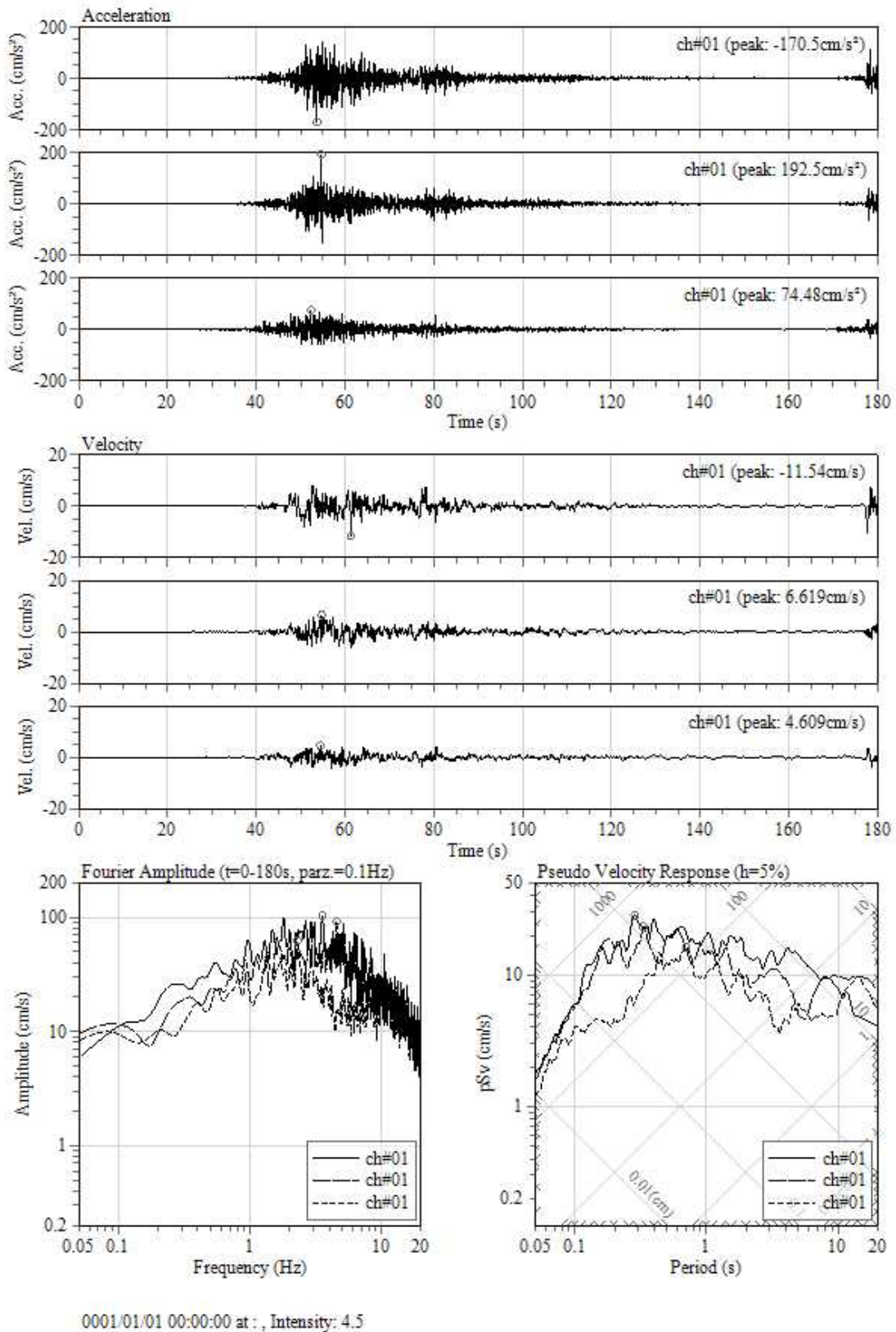


図 2.2.2-26 観測点 TA01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

(2) 2015年Illapel地震における観測記録

2015年Illapel地震の際に、図 2.2.2-27に示す強震観測点で観測記録が得られている。同図には本震の震央位置もプロットしている。これらの観測点で得られた観測記録をチリ大学のウェブサイト (<http://evtdb.csn.uchile.cl/>) より収集して、加速度波形を積分することによって速度波形に変換した。また、加速度波形を用いて、フーリエスペクトル、速度応答スペクトルを計算した。波形処理により得られた加速度波形、速度波形、速度応答スペクトル及びフーリエスペクトルを図 2.2.2-28～図 2.2.2-71に示す。

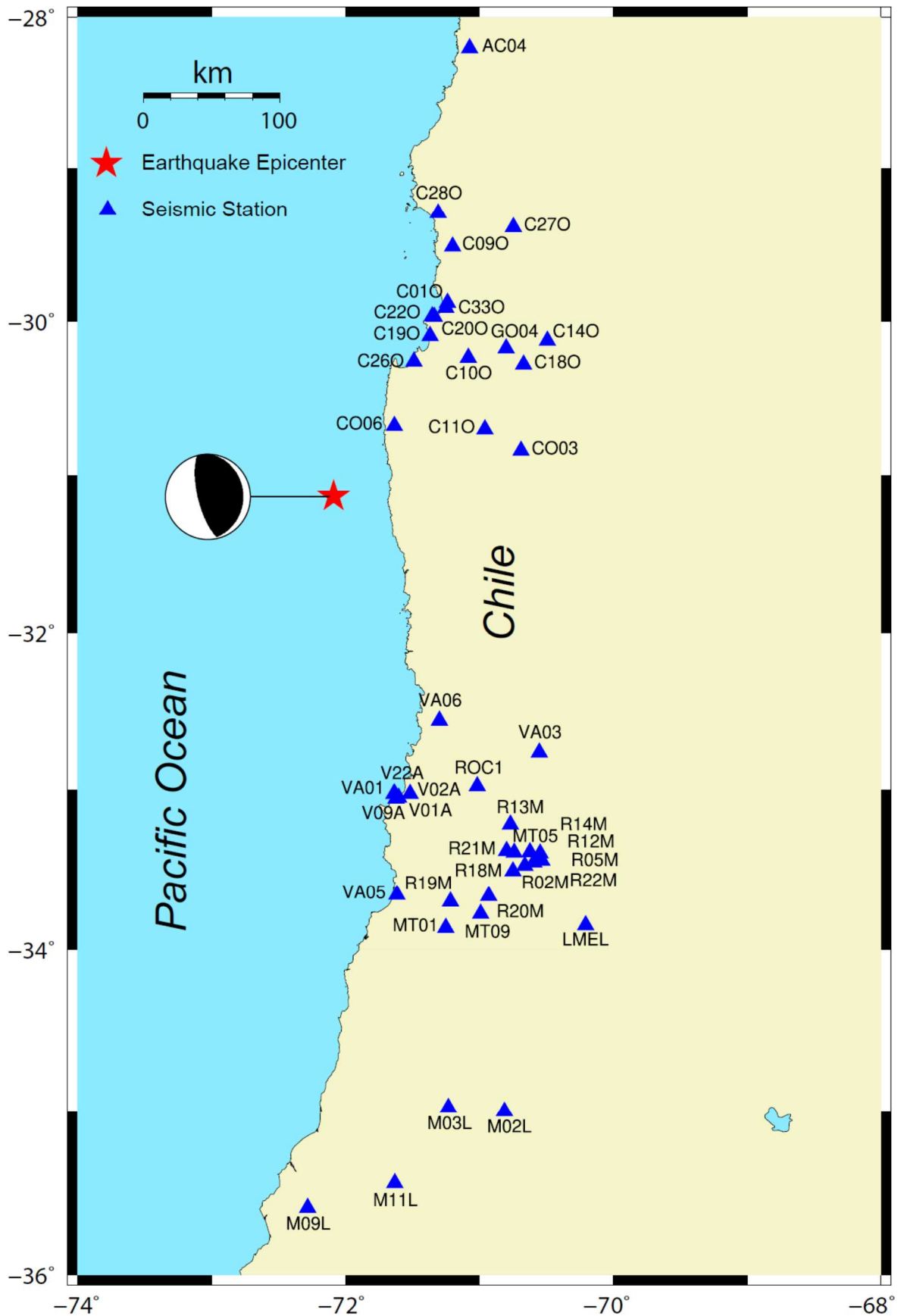
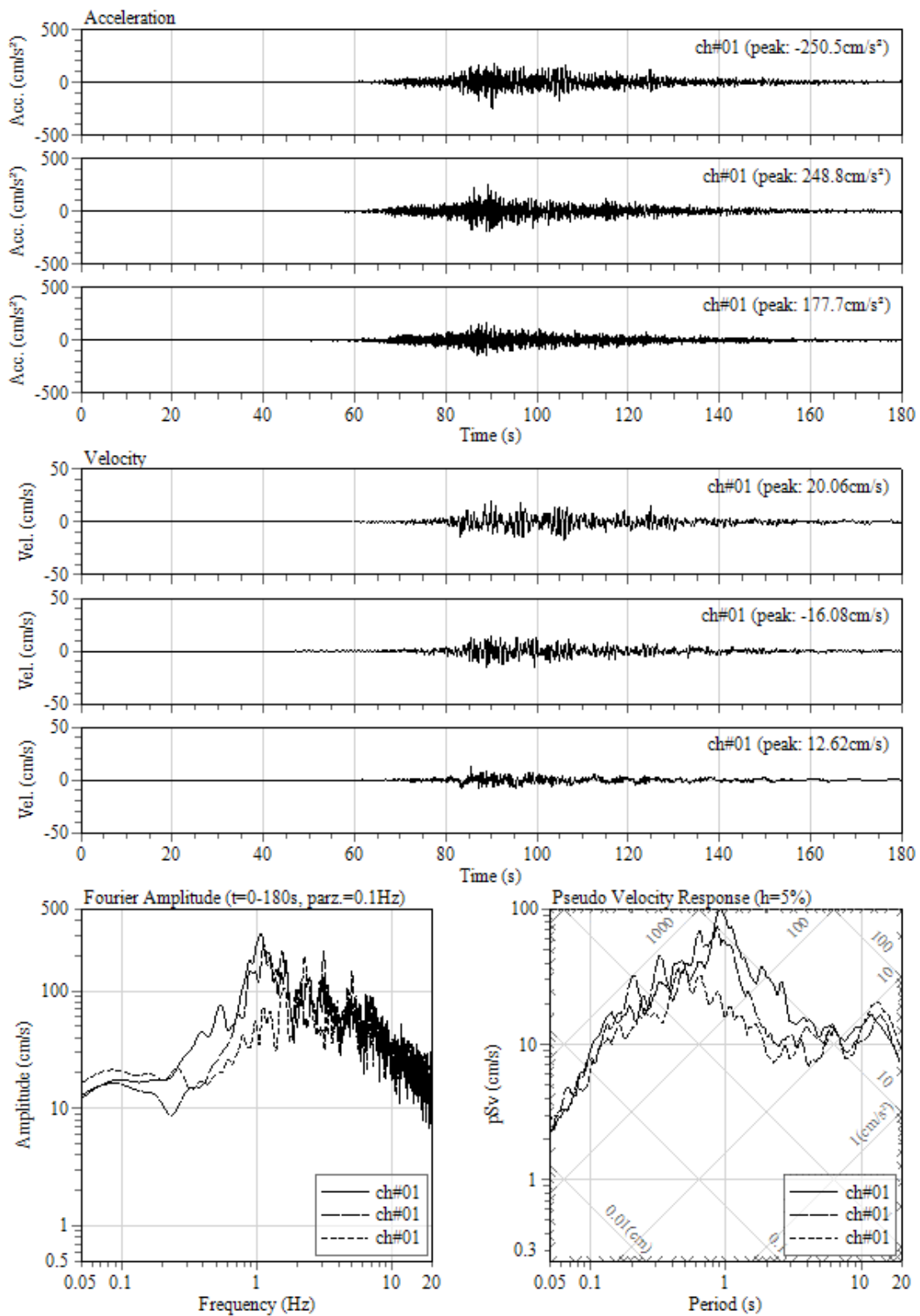
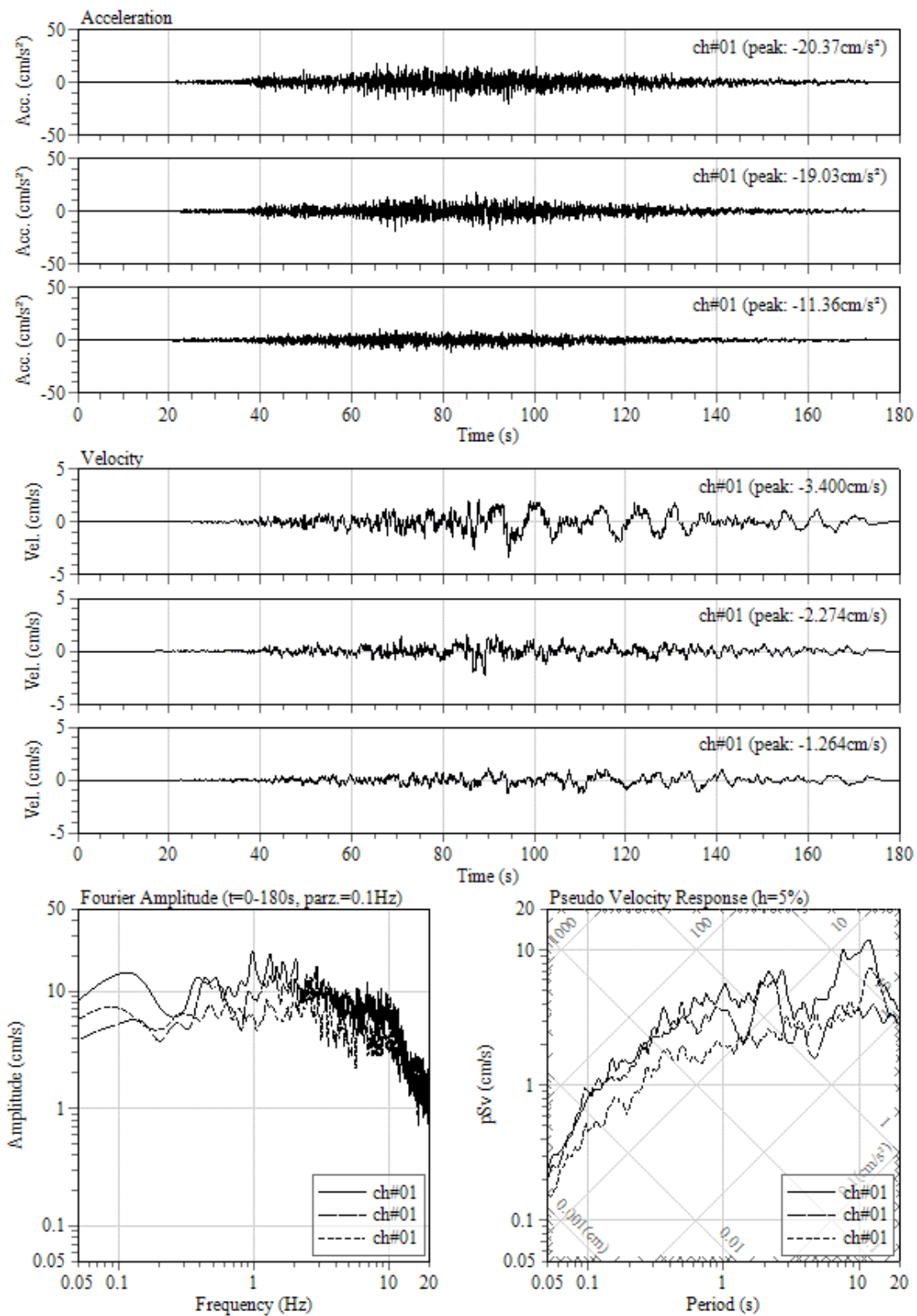


図 2.2.2-27 2015年Illapel地震の震央位置と観測記録の得られている観測点分布
2.2.2-29



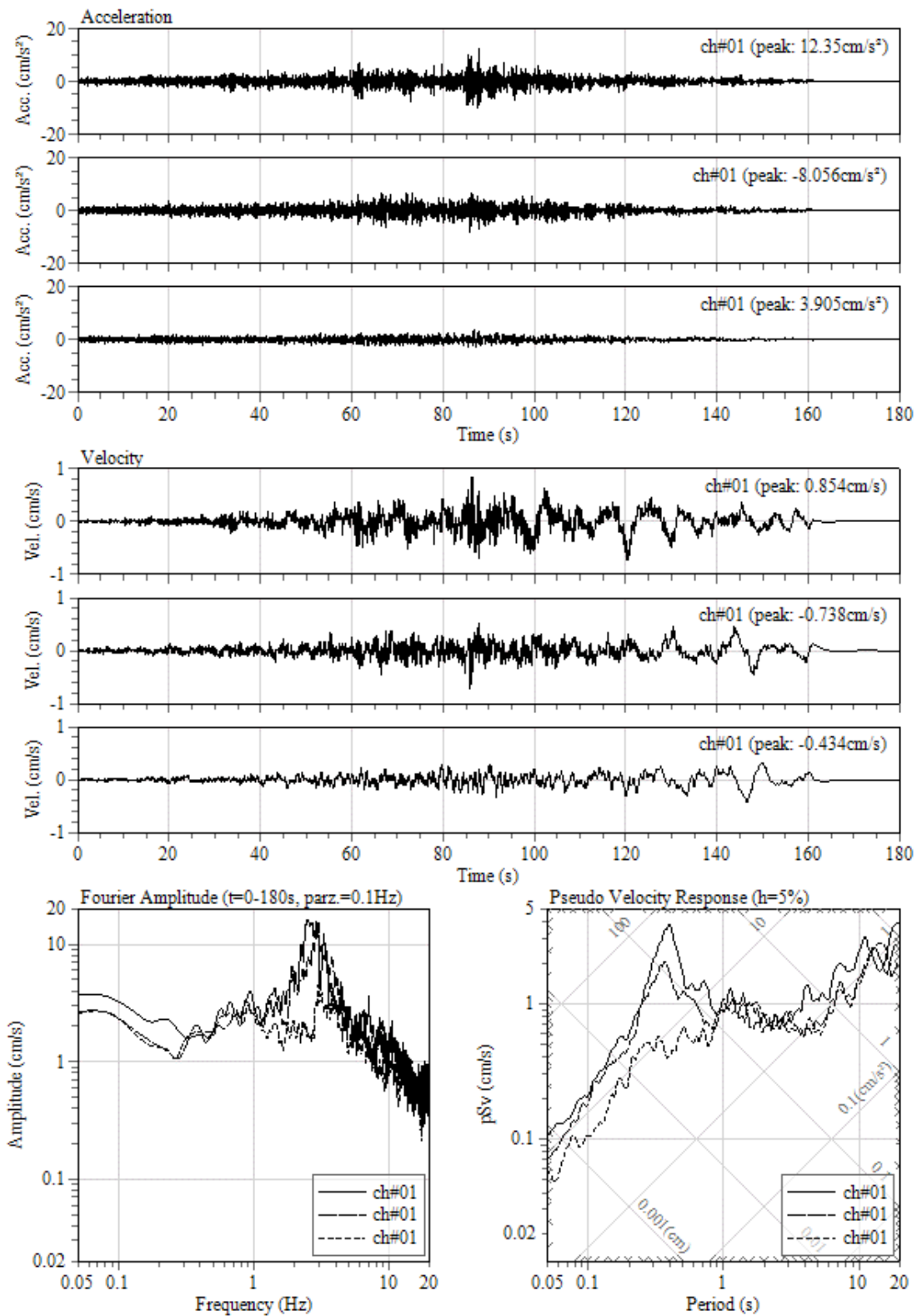
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.2

図 2.2.2-28 観測点 C200 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



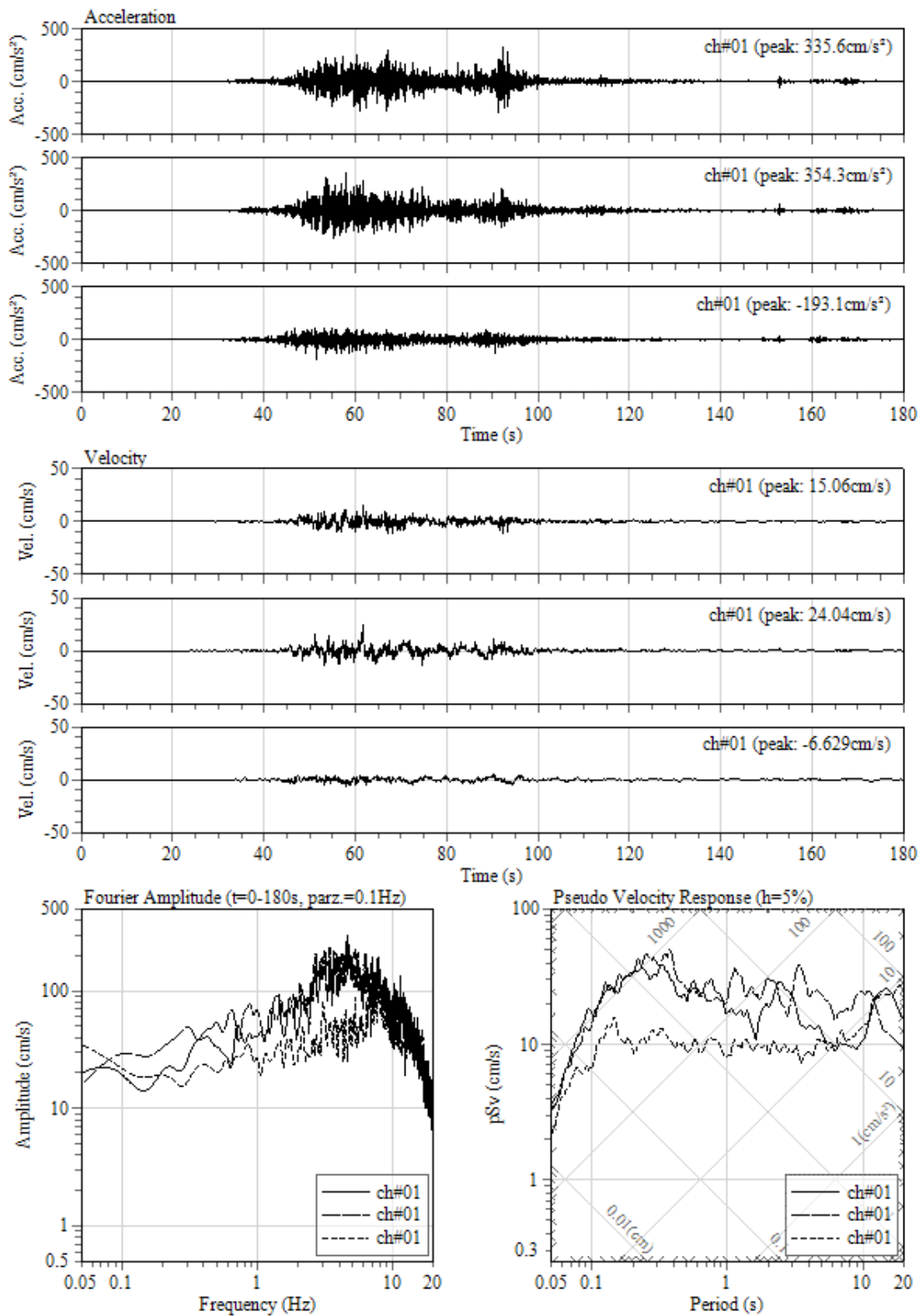
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.0

図 2.2.2-29 観測点 V22A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



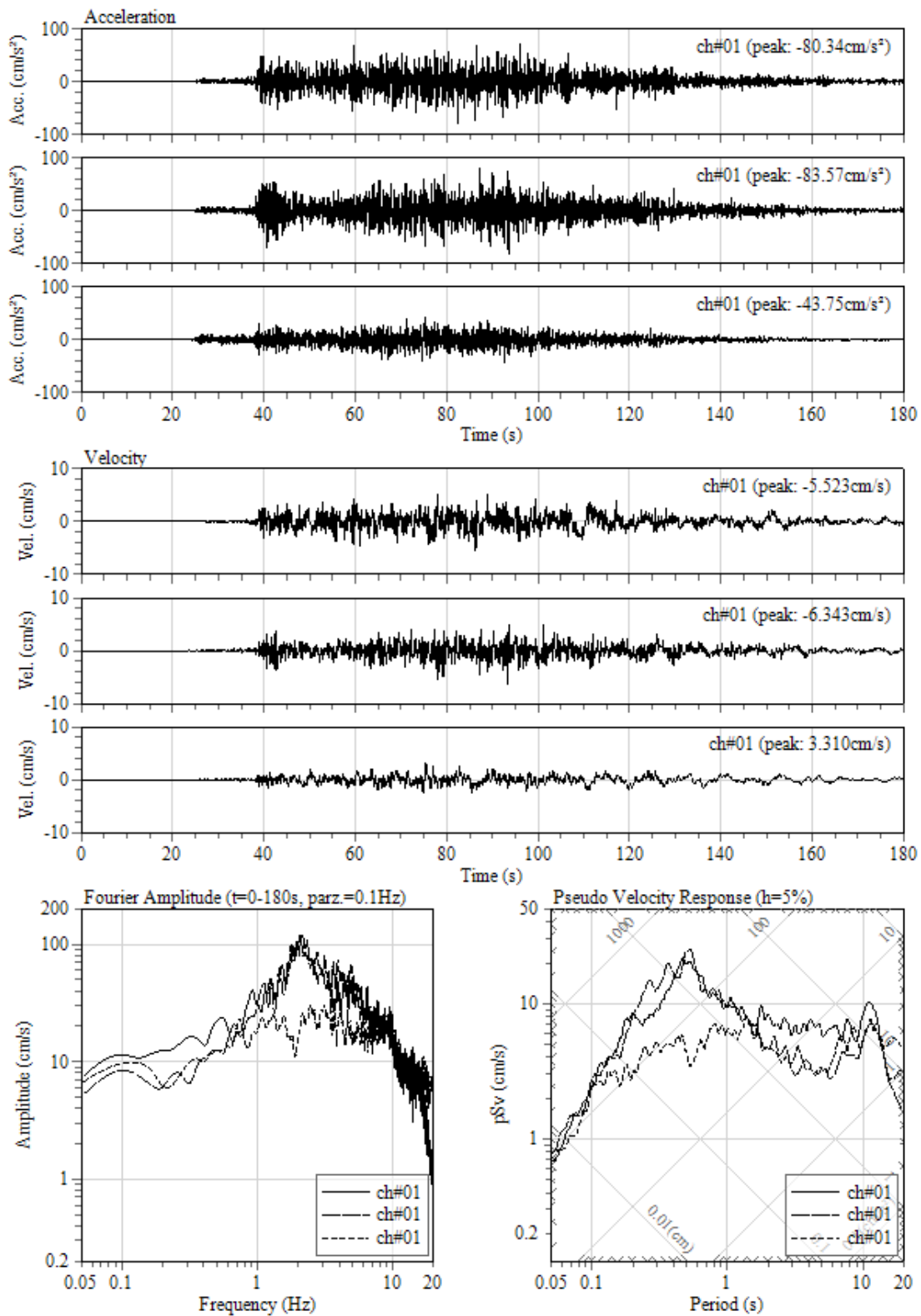
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 2.4

図 2.2.2-30 観測点 M09L における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



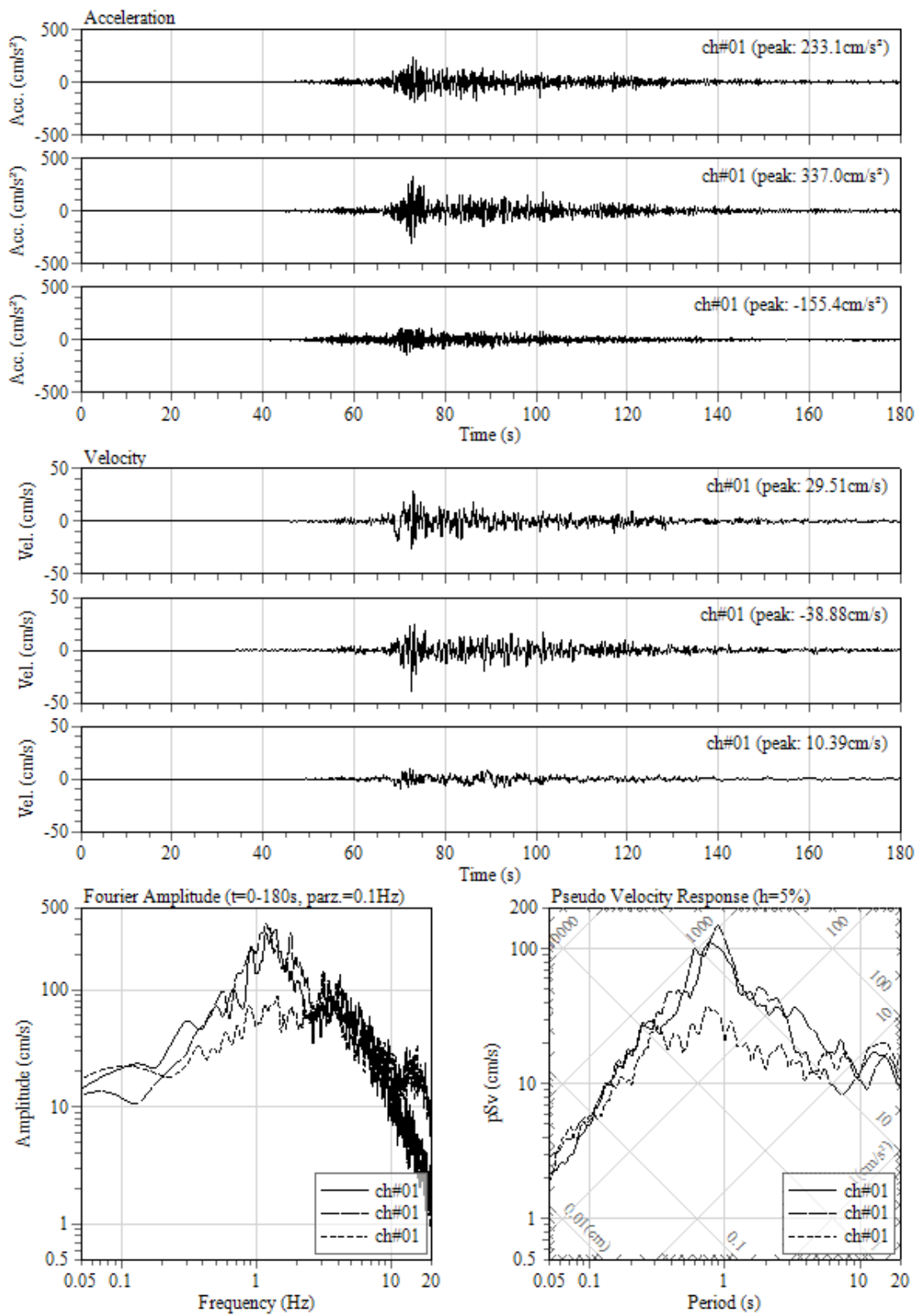
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.1

図 2.2.2-31 観測点 CO06 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



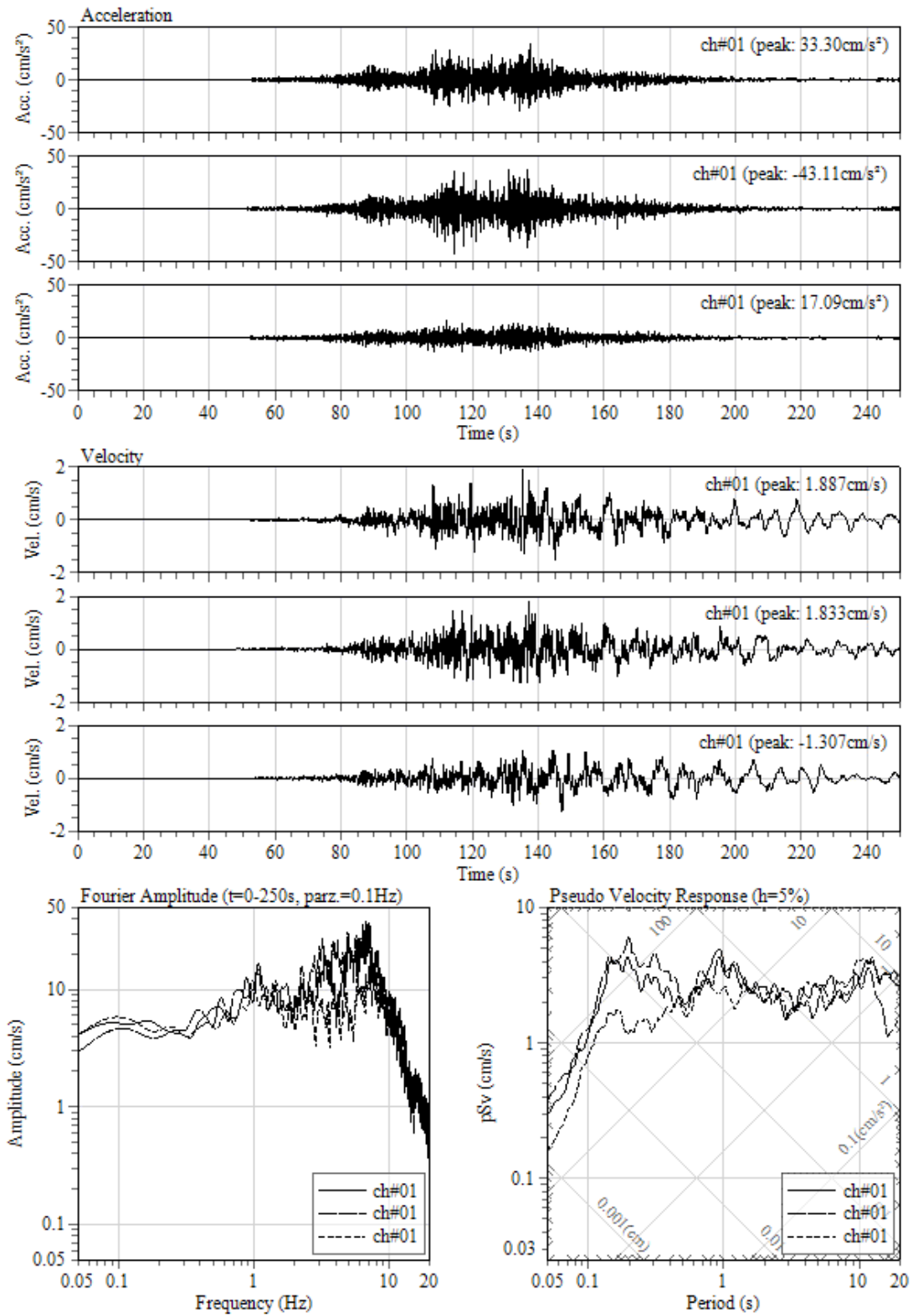
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.2

図 2.2.2-32 観測点 VA06 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



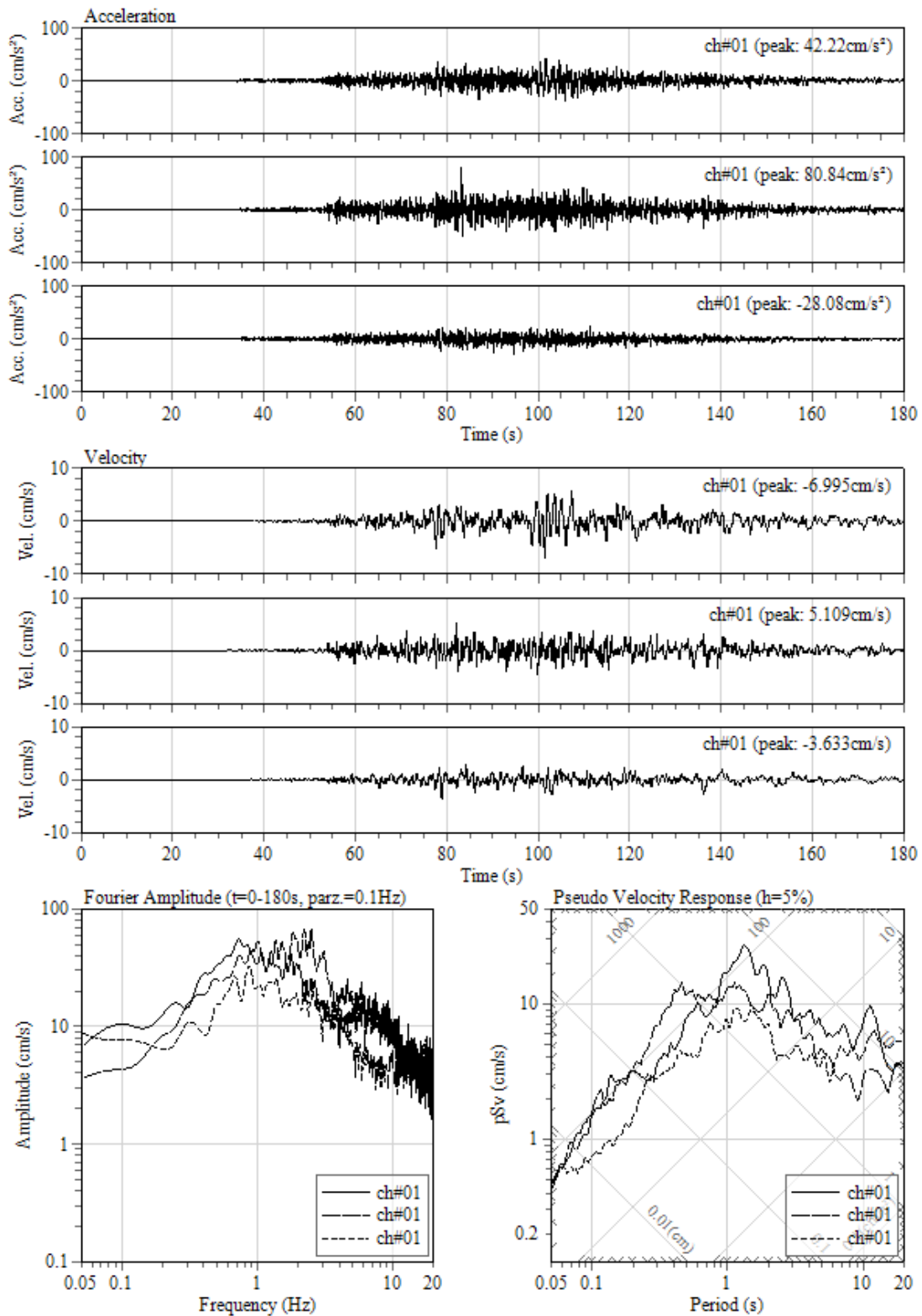
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.7

図 2.2.2-33 観測点 GO04 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



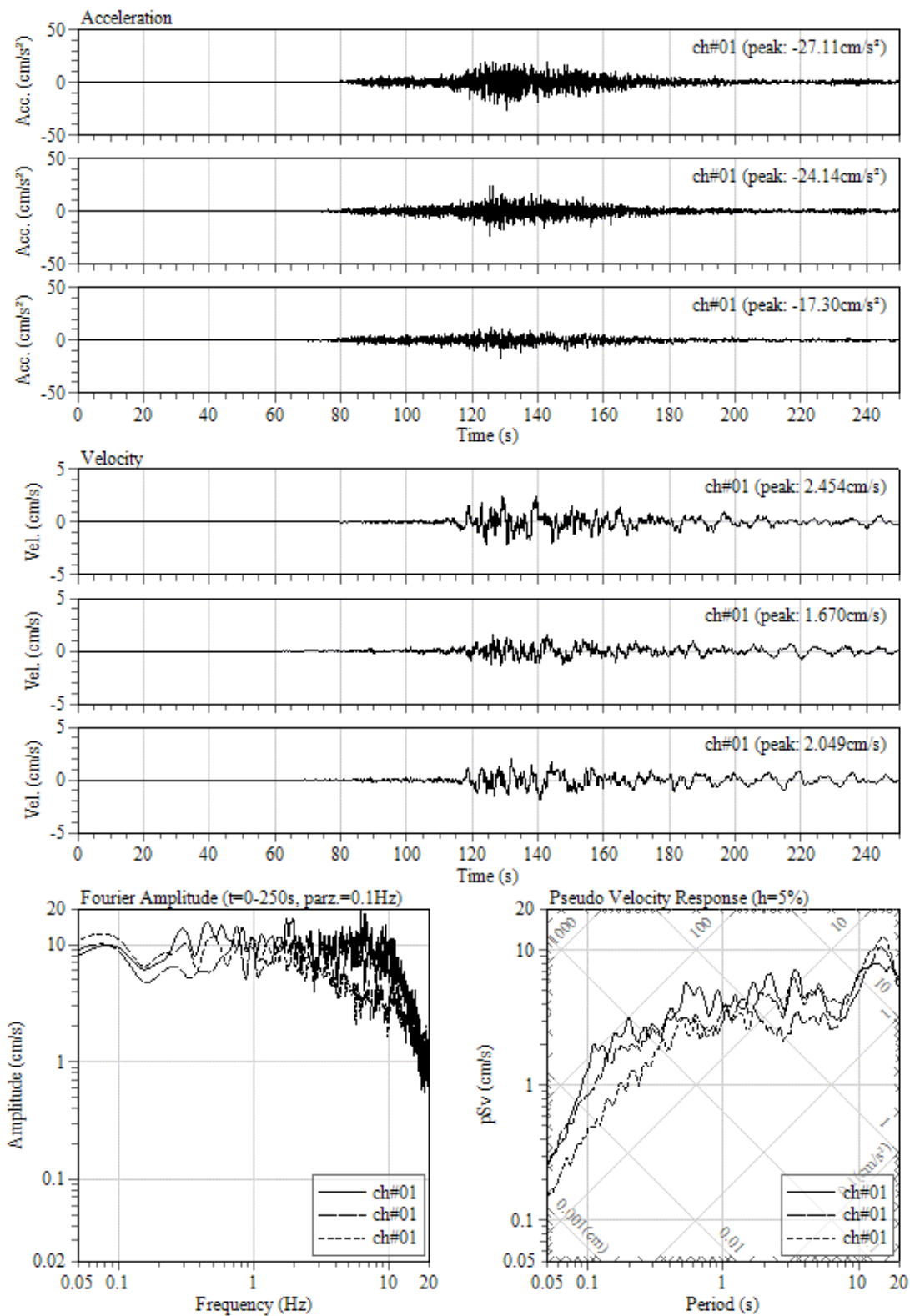
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.2

図 2.2.2-34 観測点 LMEL における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



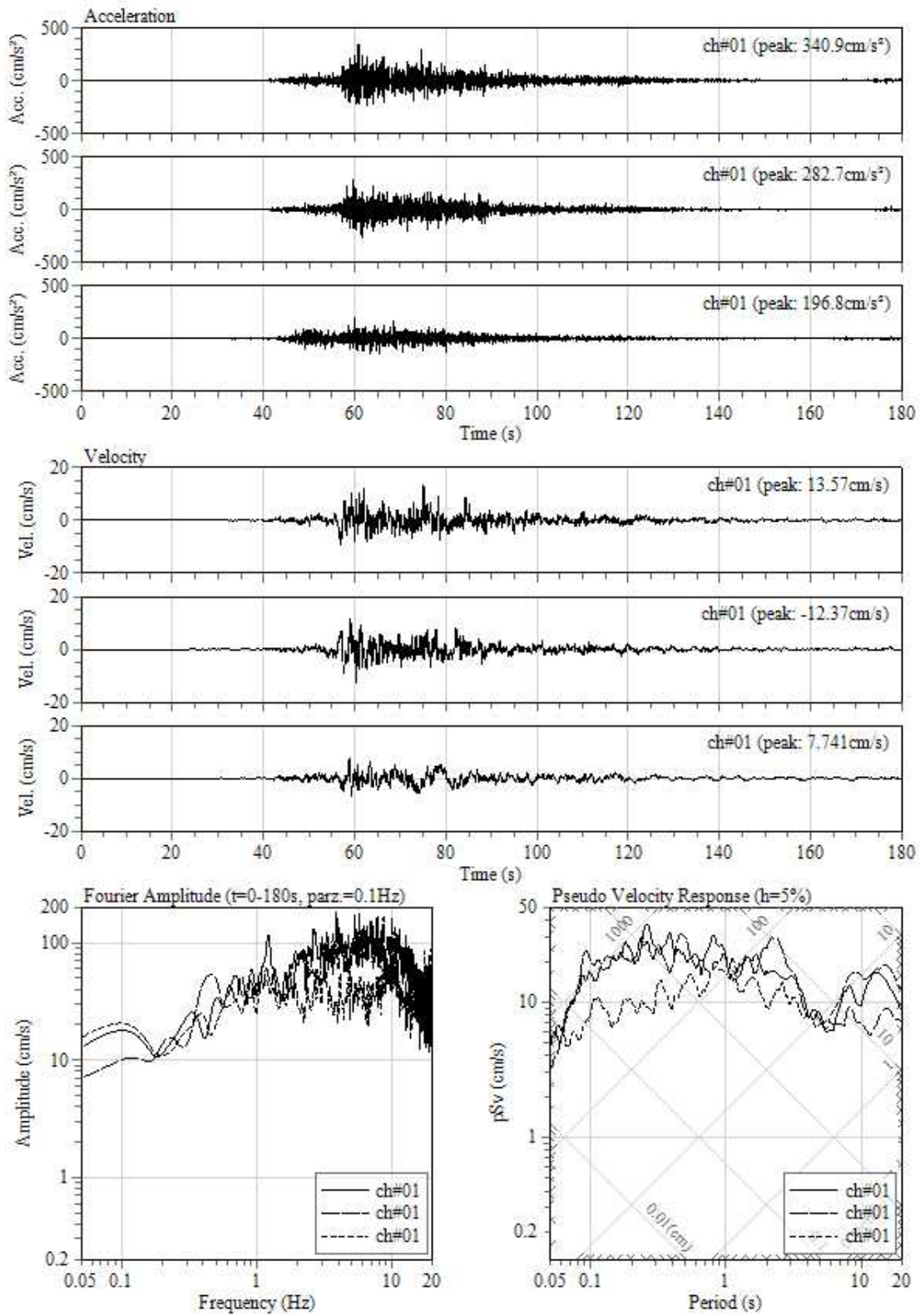
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.0

図 2.2.2-35 観測点 ROC1 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



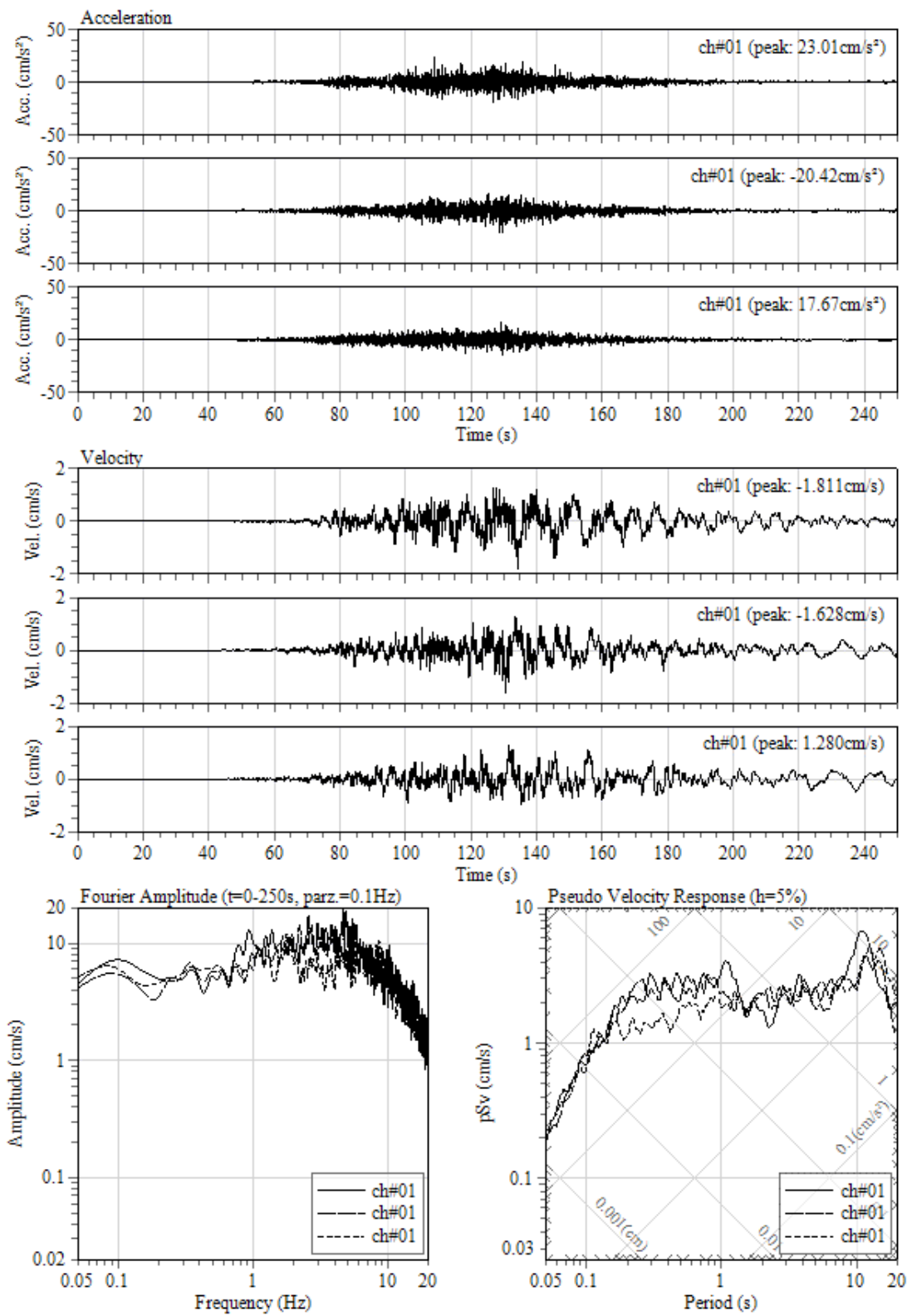
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.1

図 2.2.2-36 観測点 AC04 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.9

図 2.2.2-37 観測点 CO03 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 2.8

図 2.2.2-38 観測点 MT01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

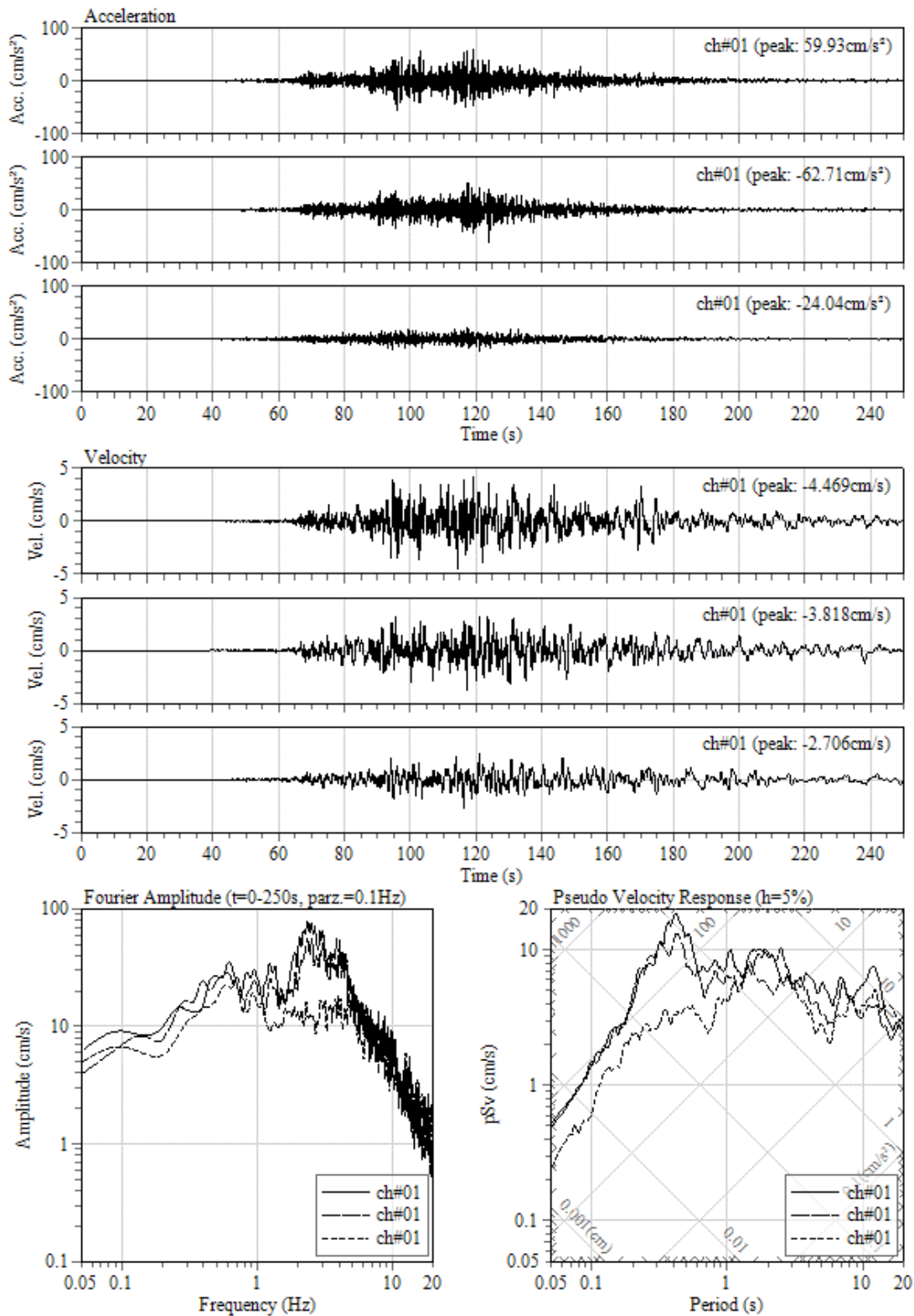
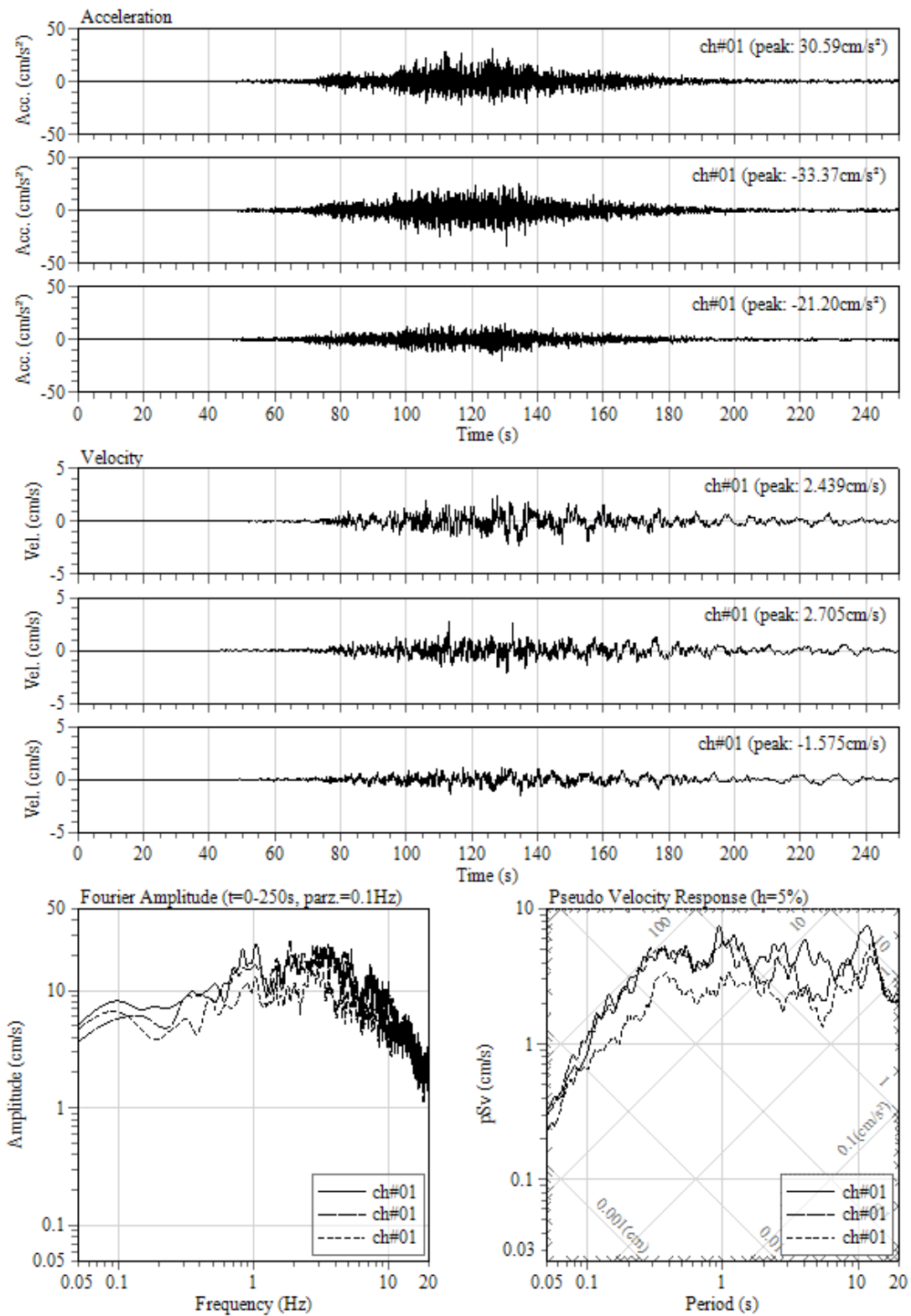
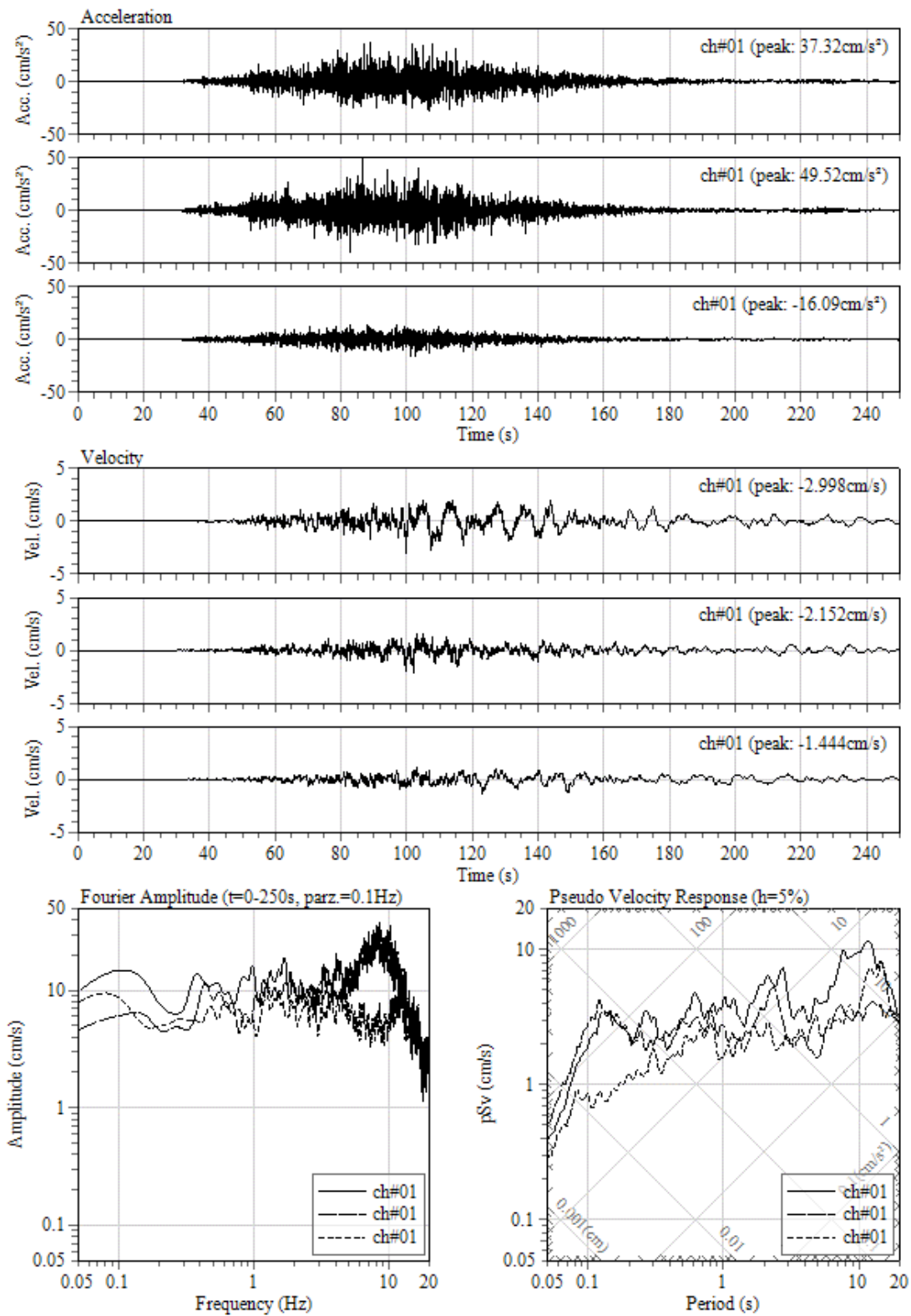


図 2.2.2-39 観測点 MT05 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



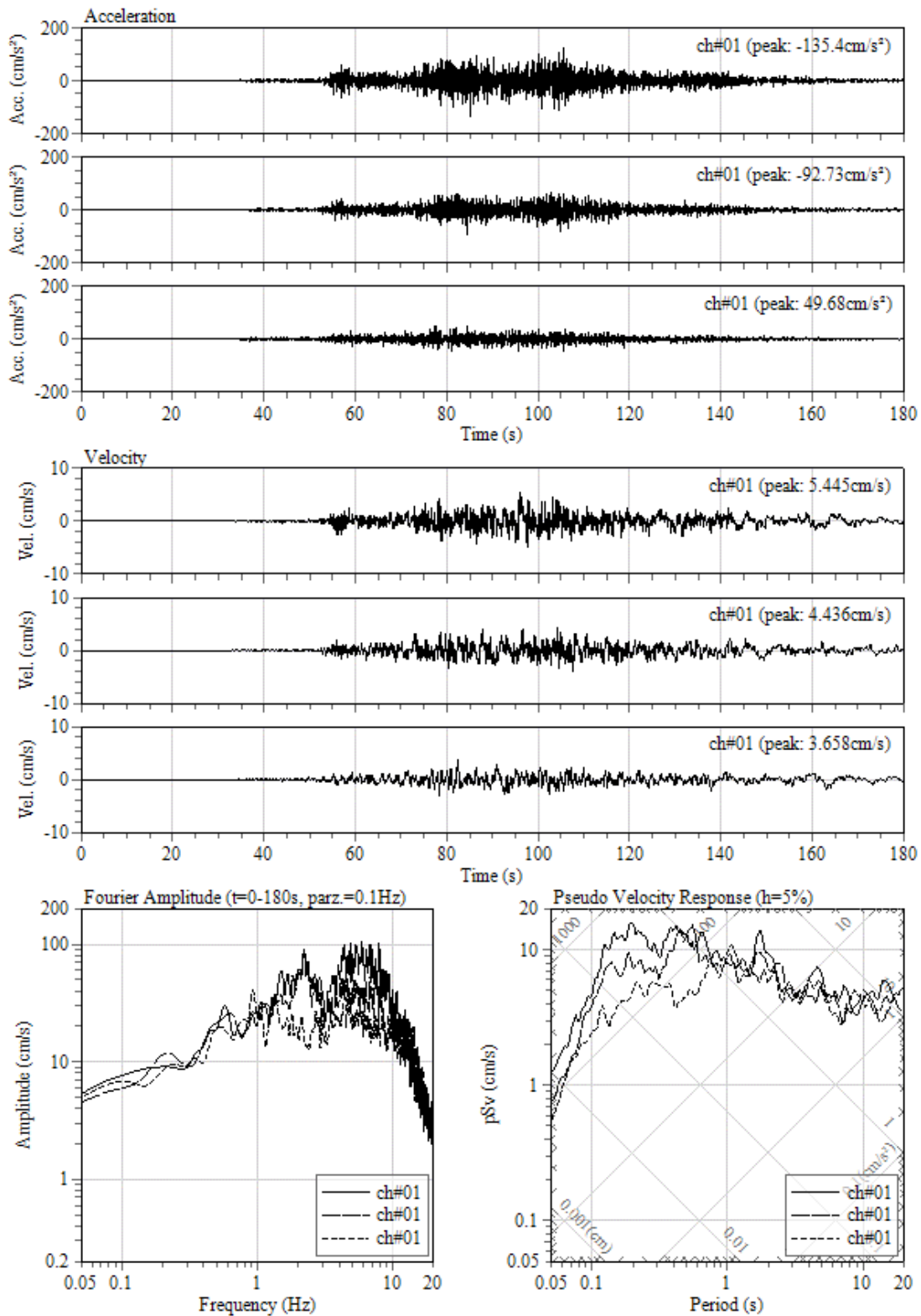
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.2

図 2.2.2-40 観測点 MT09 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



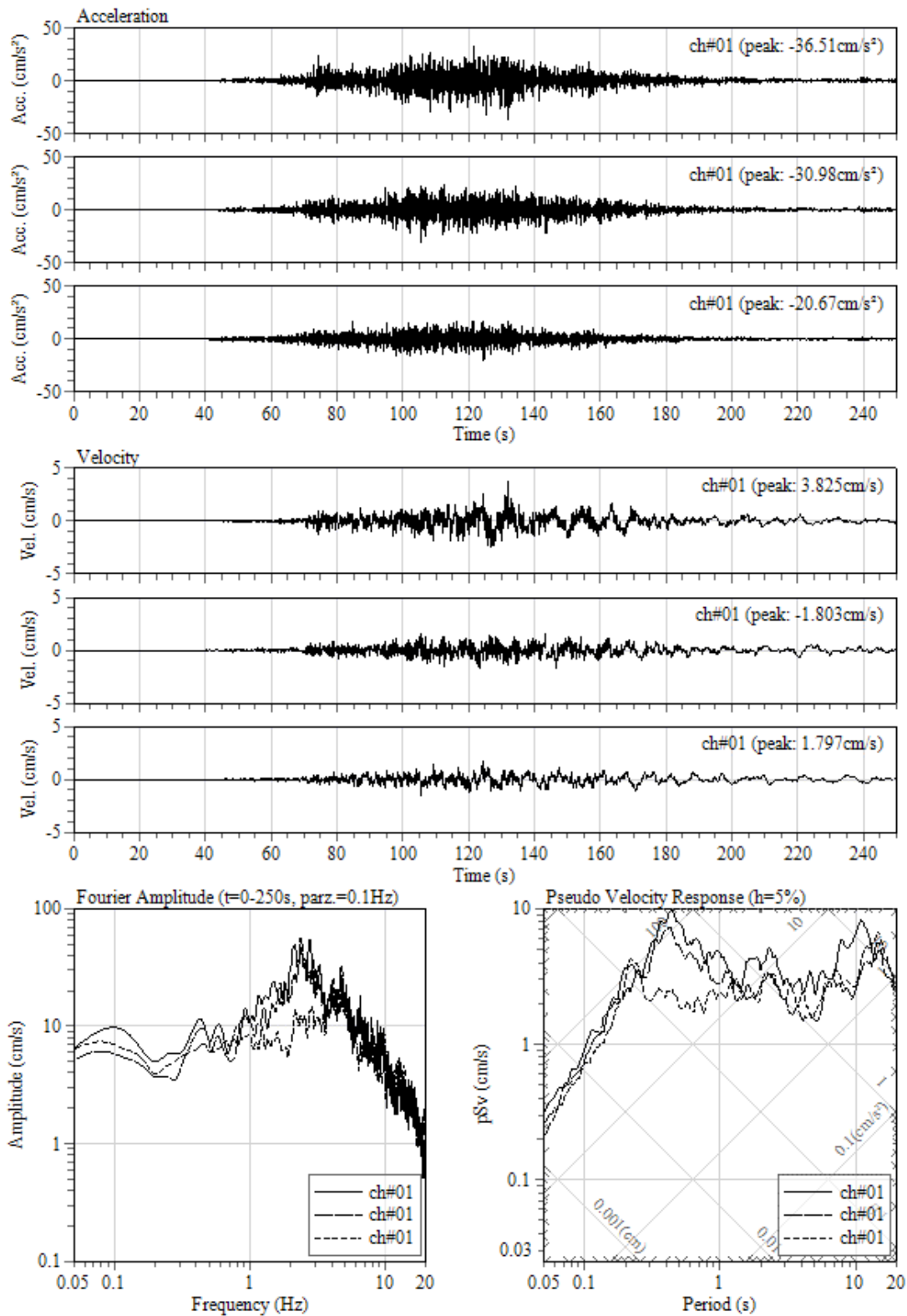
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.1

図 2.2.2-41 観測点 VA01 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



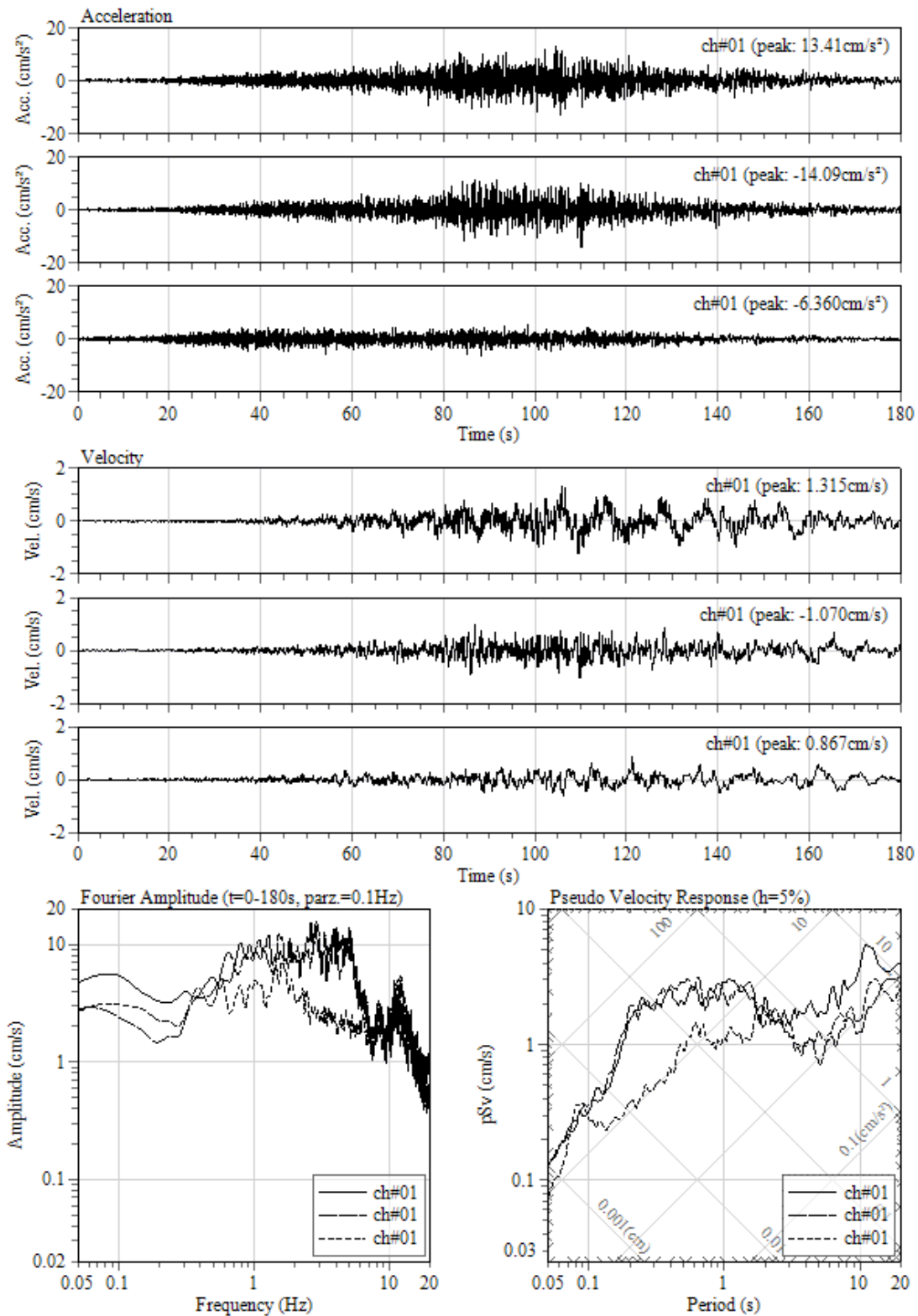
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.2

図 2.2.2-42 観測点 VA03 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



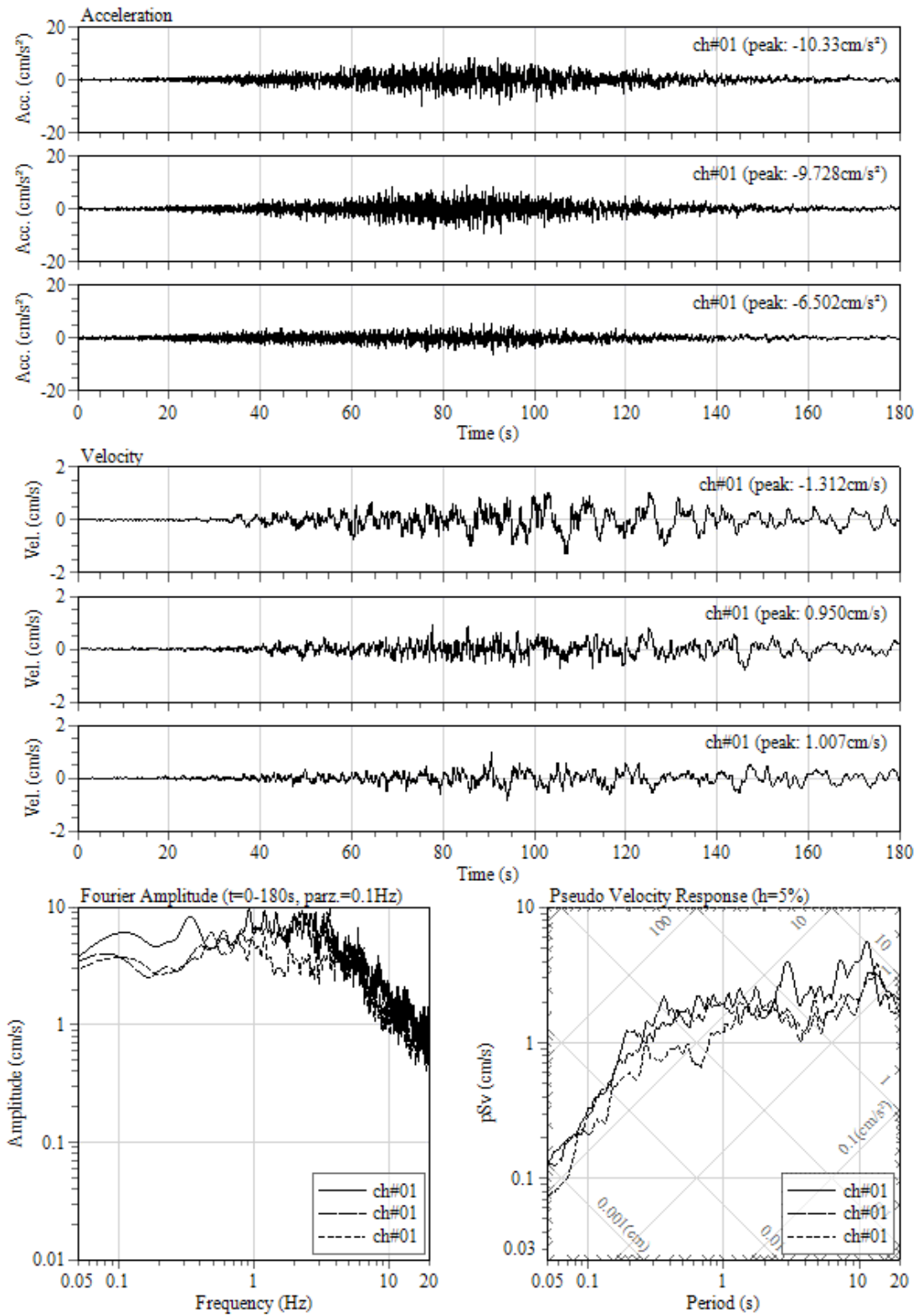
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.3

図 2.2.2-43 観測点 VA05 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



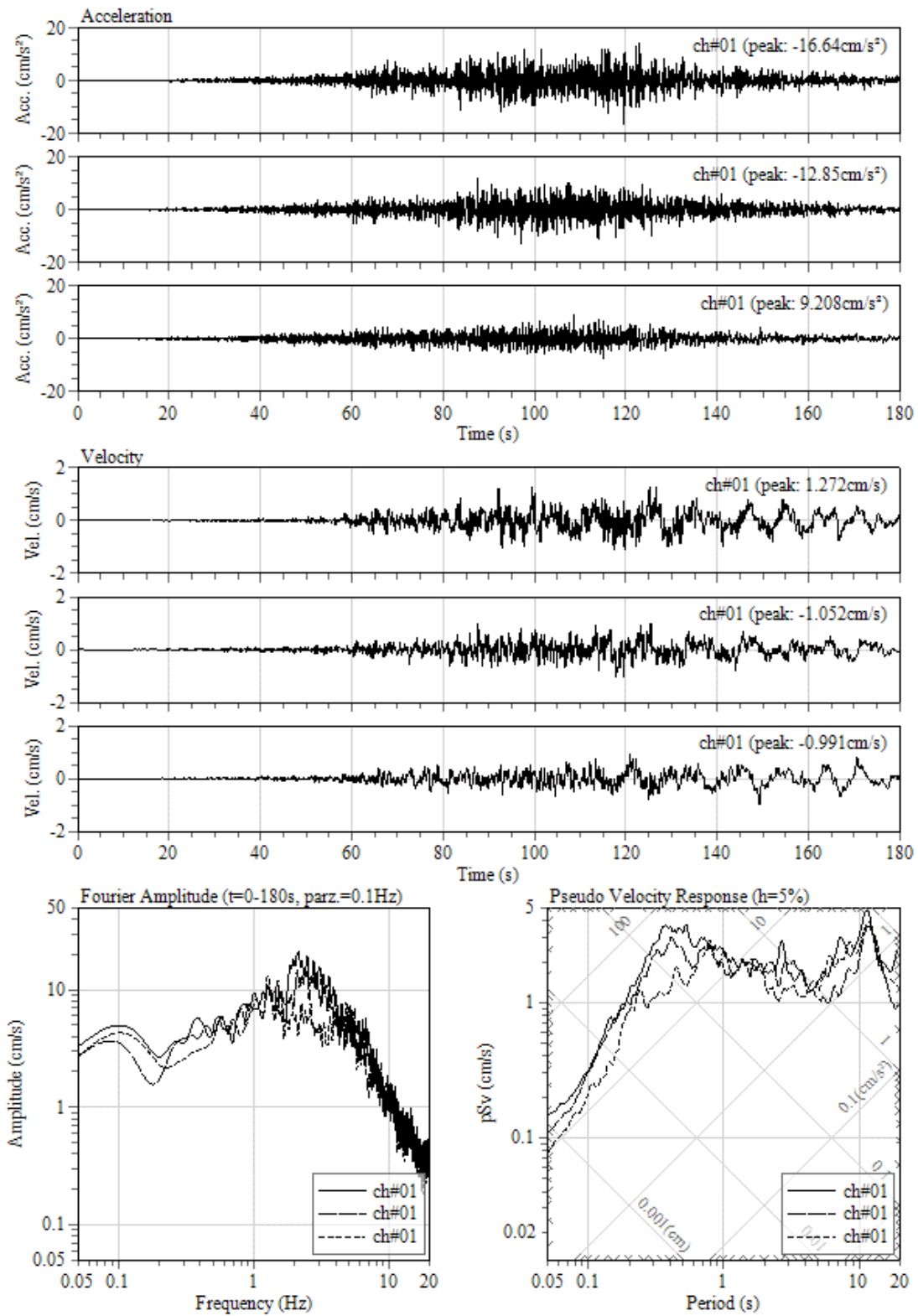
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 2.6

図 2.2.2-44 観測点 M11L における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



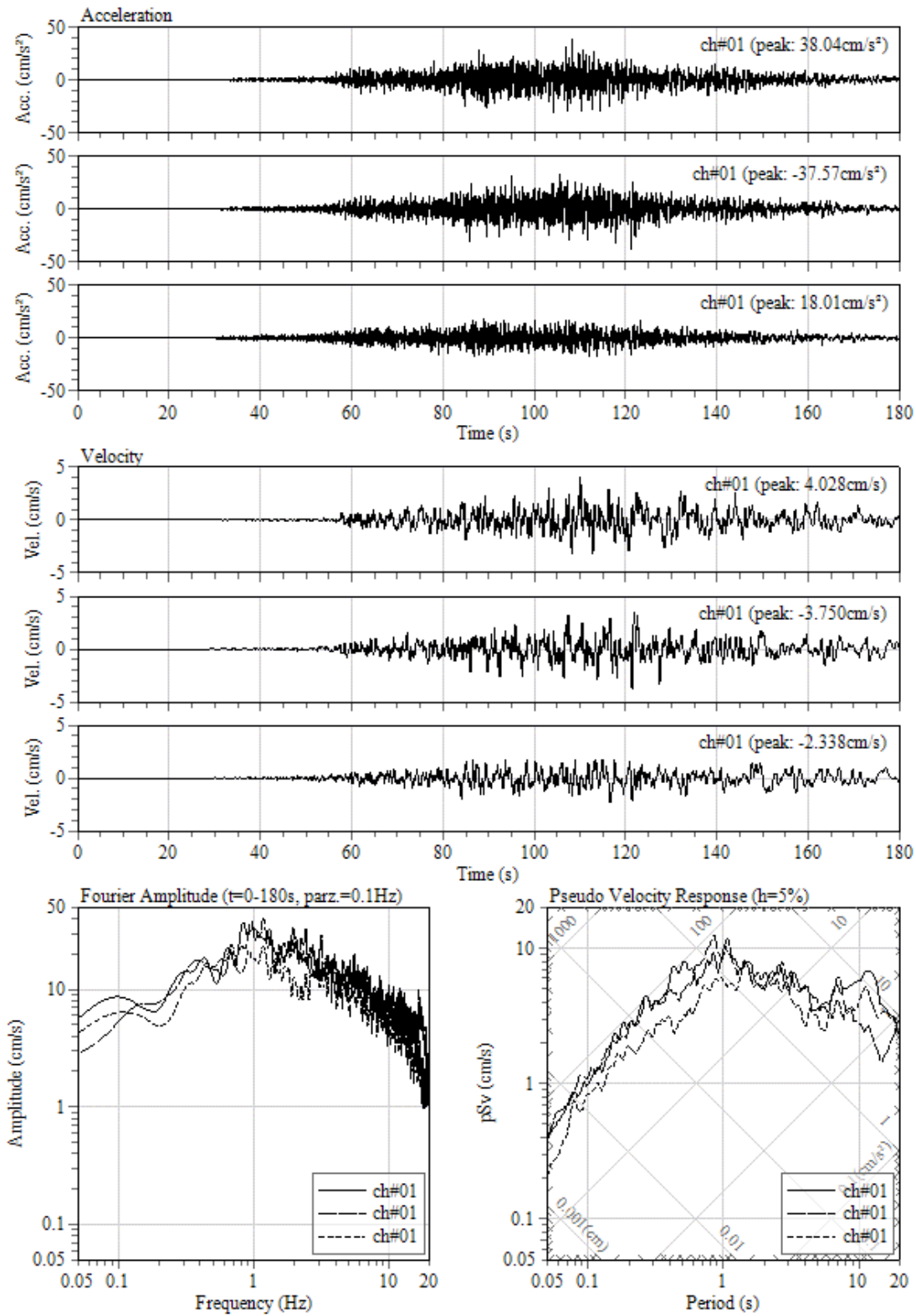
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 2.4

図 2.2.2-45 観測点 M03L における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



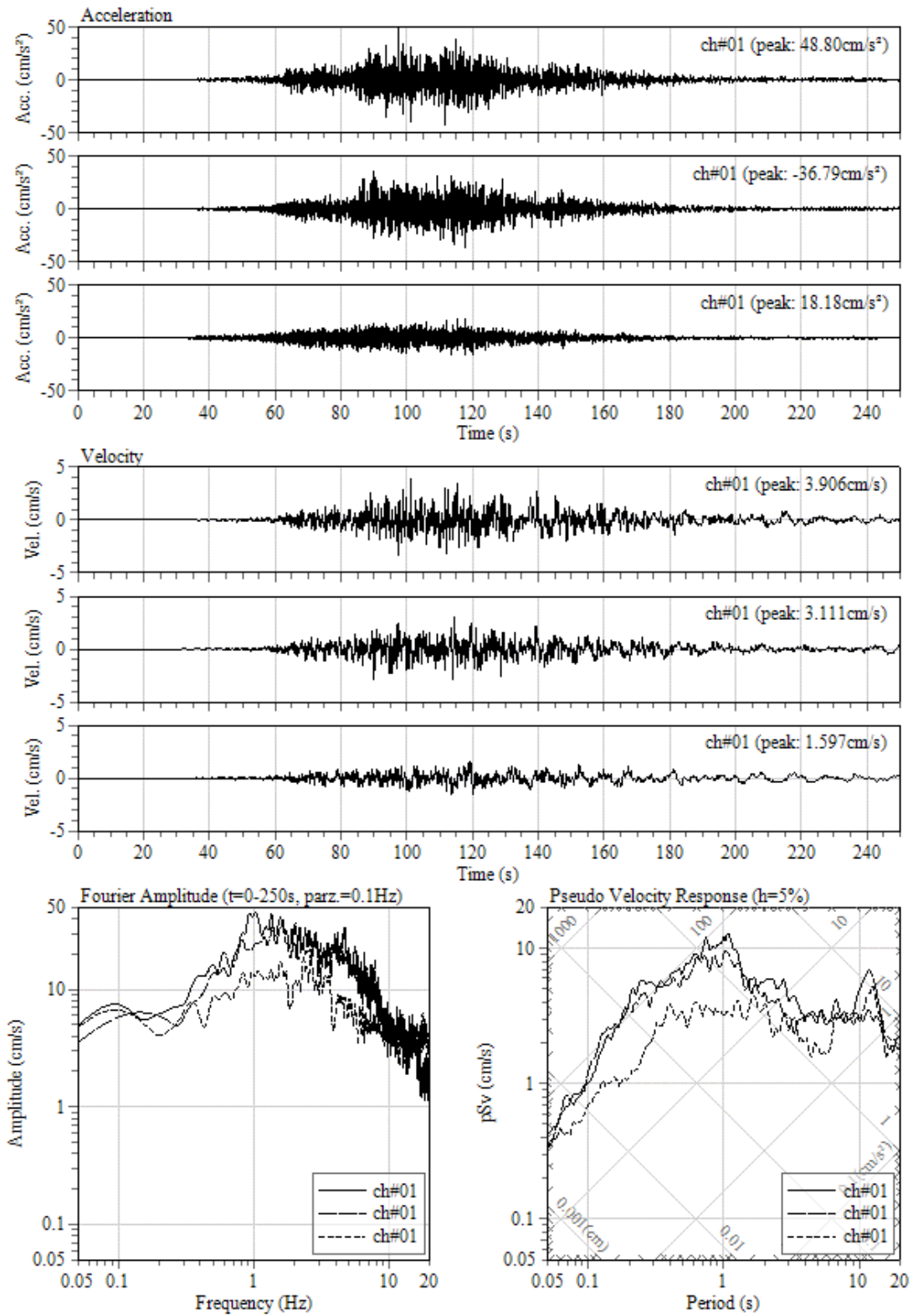
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 2.7

図 2.2.2-46 観測点 M02L における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



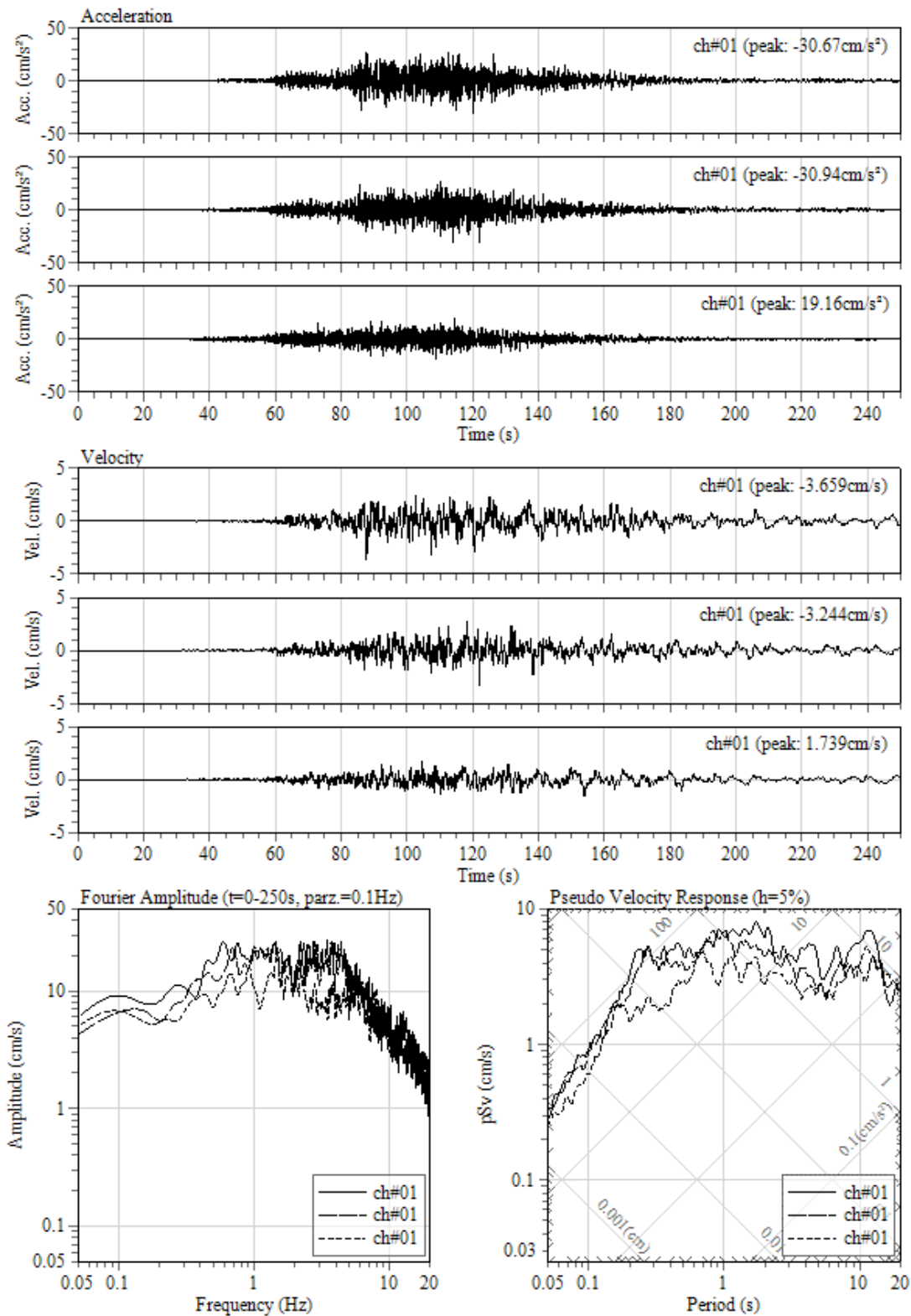
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.5

図 2.2.2-47 観測点 R22M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



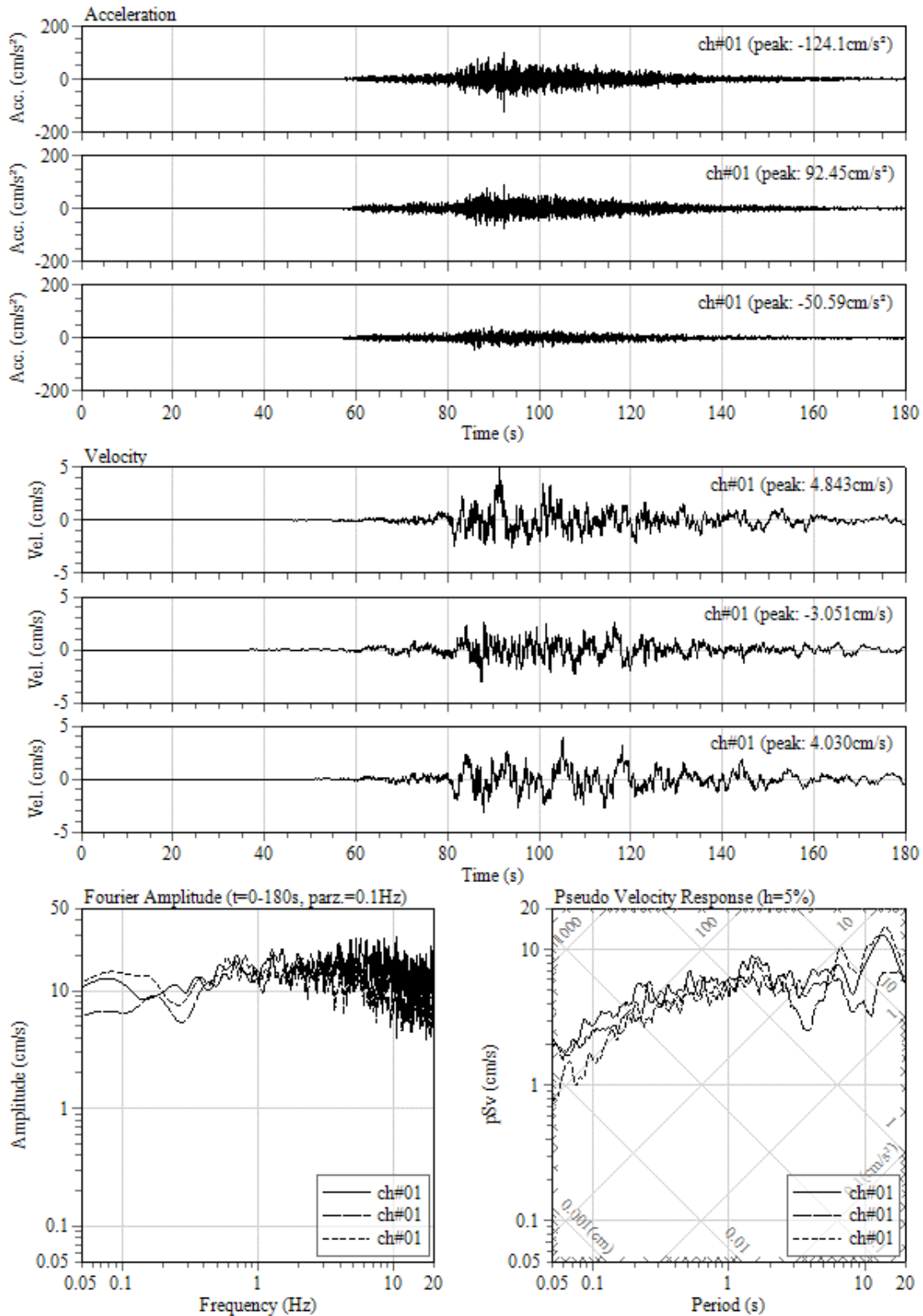
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.6

図 2.2.2-48 観測点 R20M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



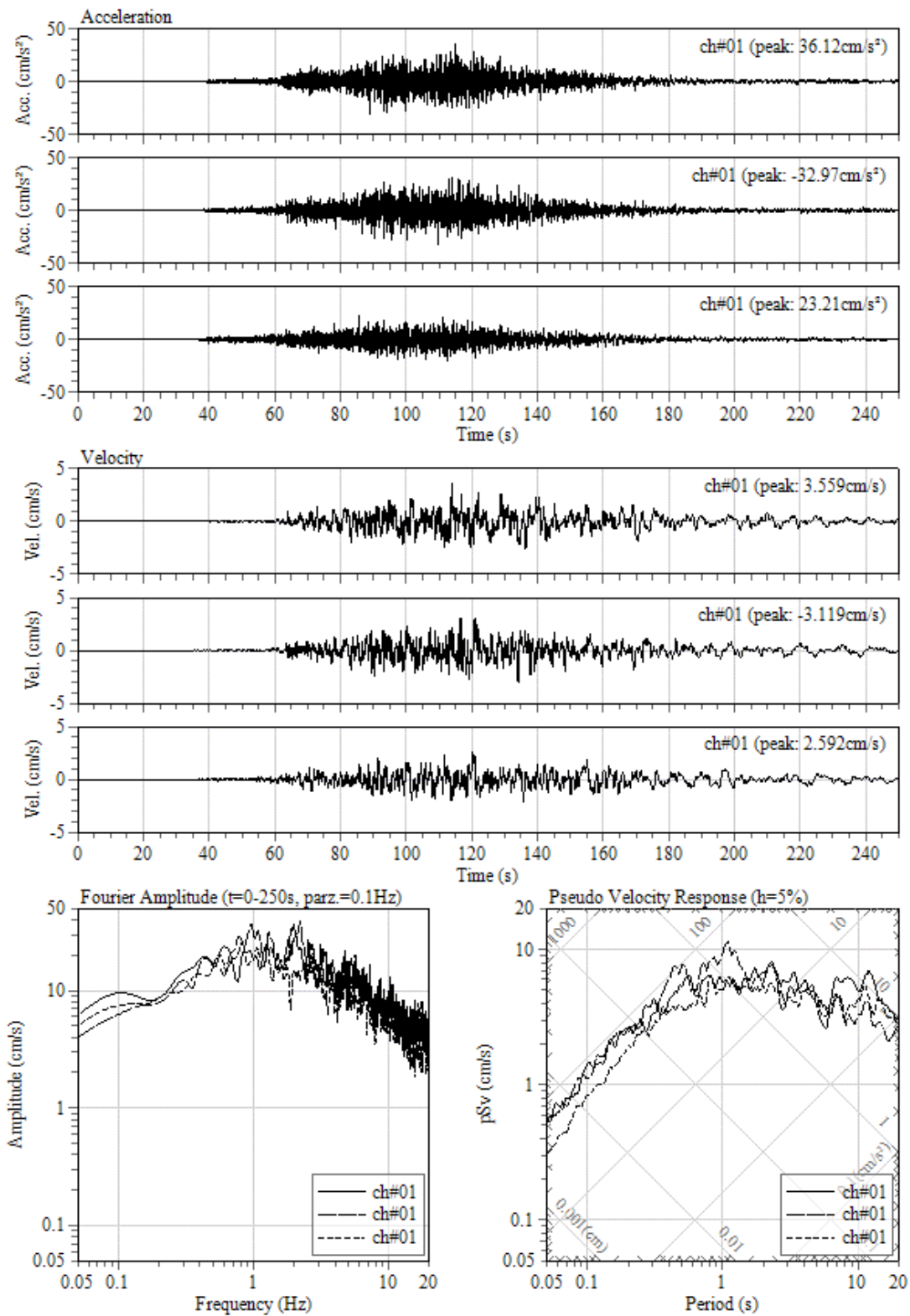
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.3

図 2.2.2-49 観測点 R02M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



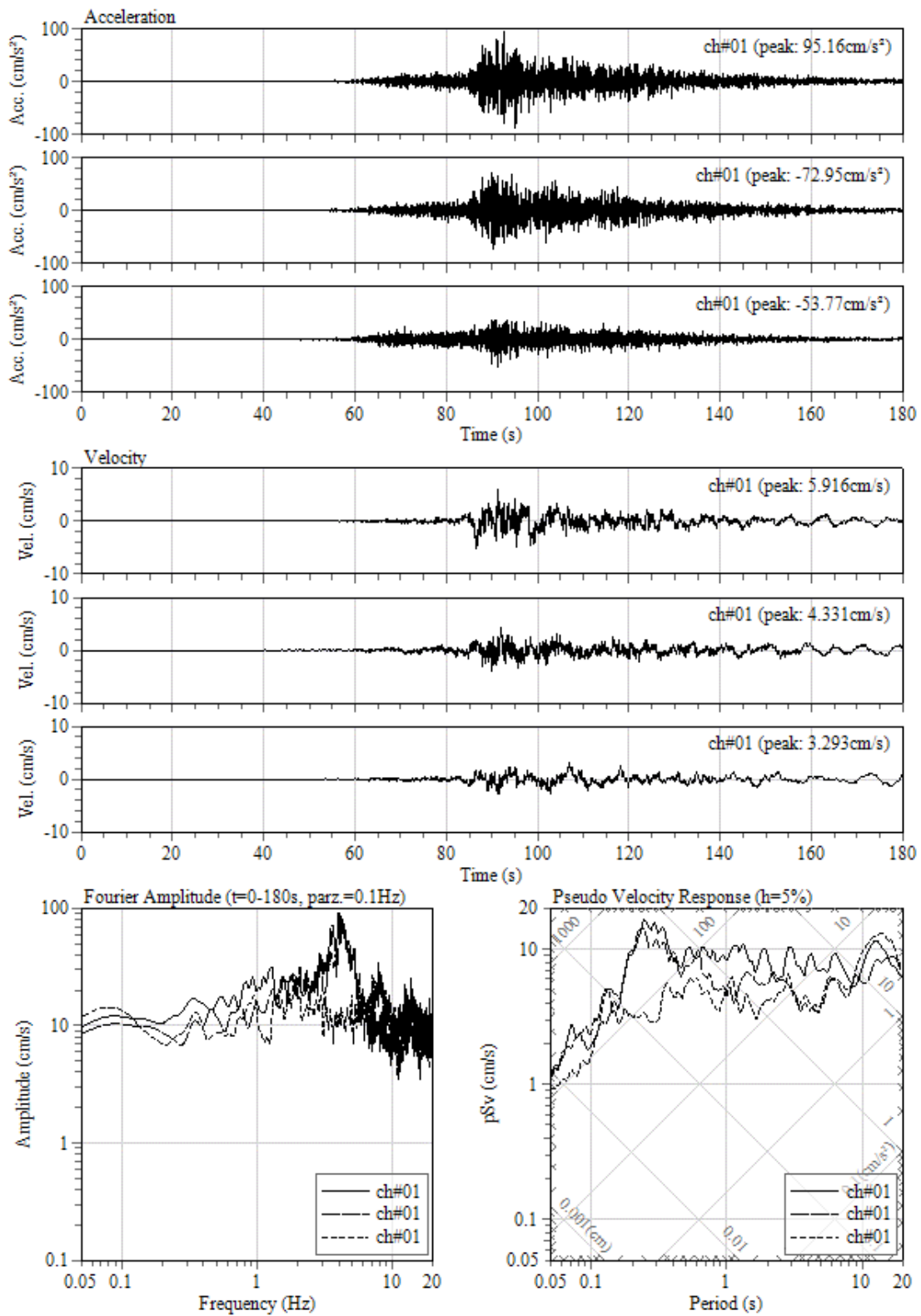
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.5

図 2.2.2-50 観測点 C270 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



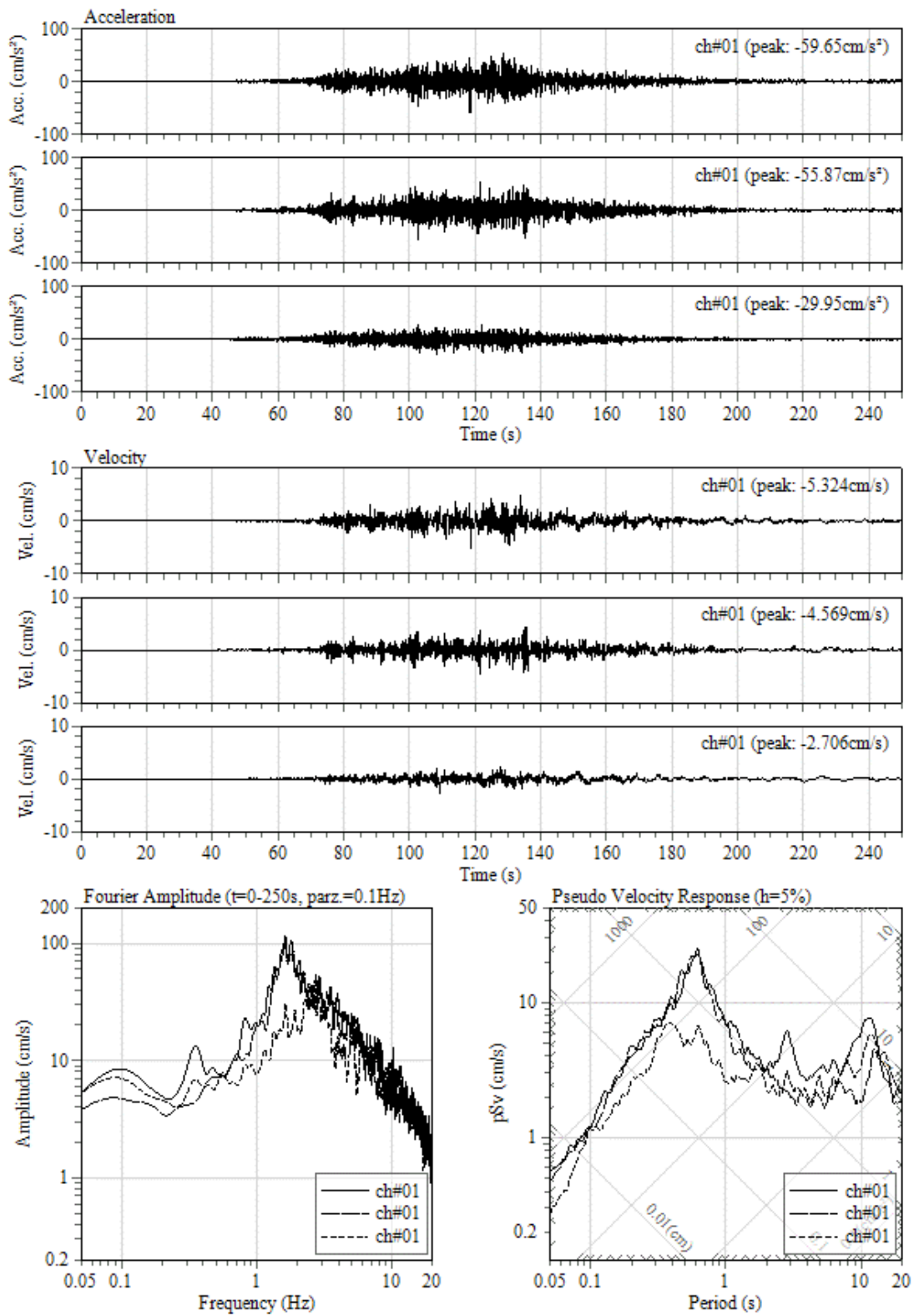
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.4

図 2.2.2-51 観測点 R14M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



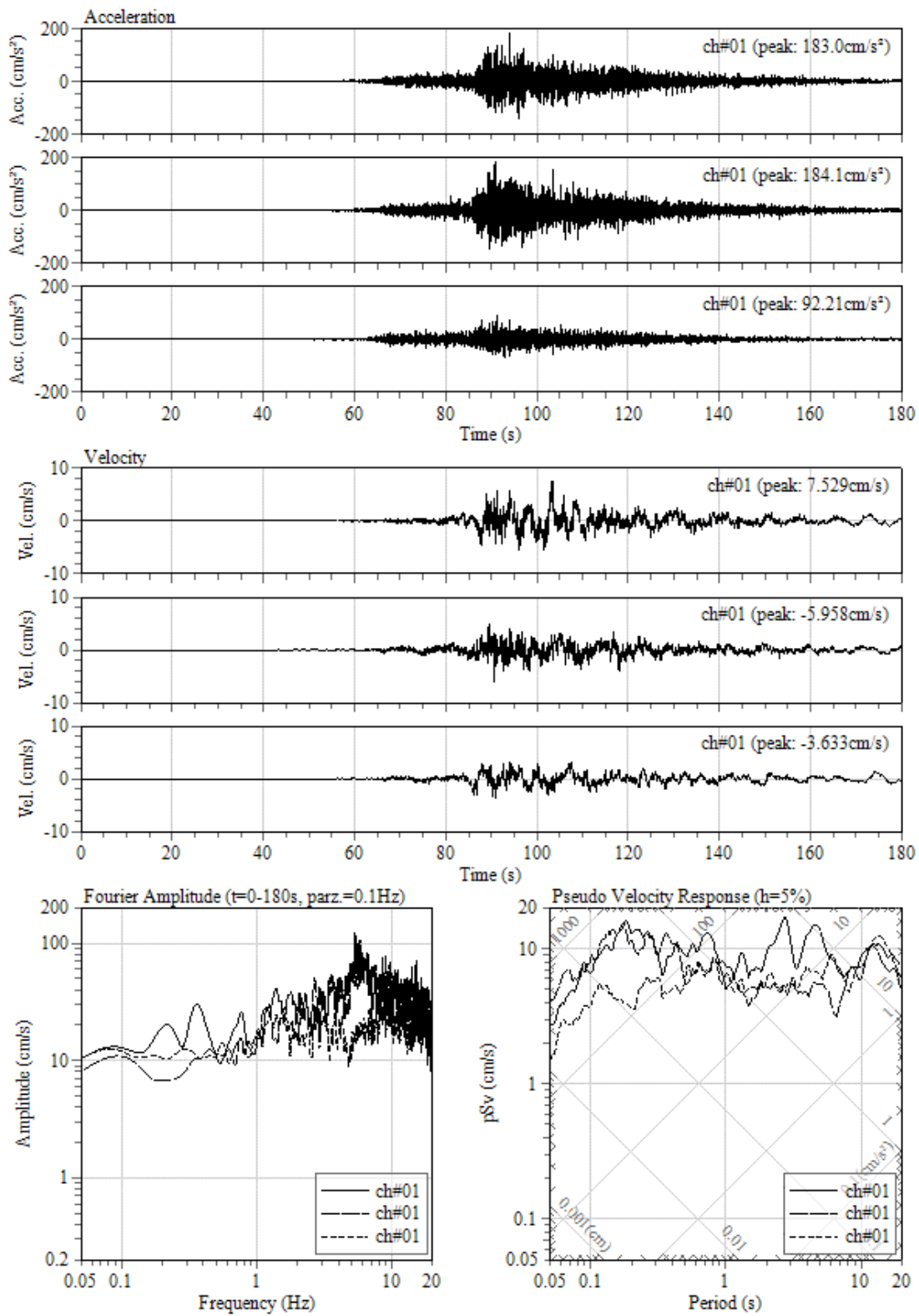
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.1

図 2.2.2-52 観測点 C280 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.0

図 2.2.2-53 観測点 R19M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.3

図 2.2.2-54 観測点 C090 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

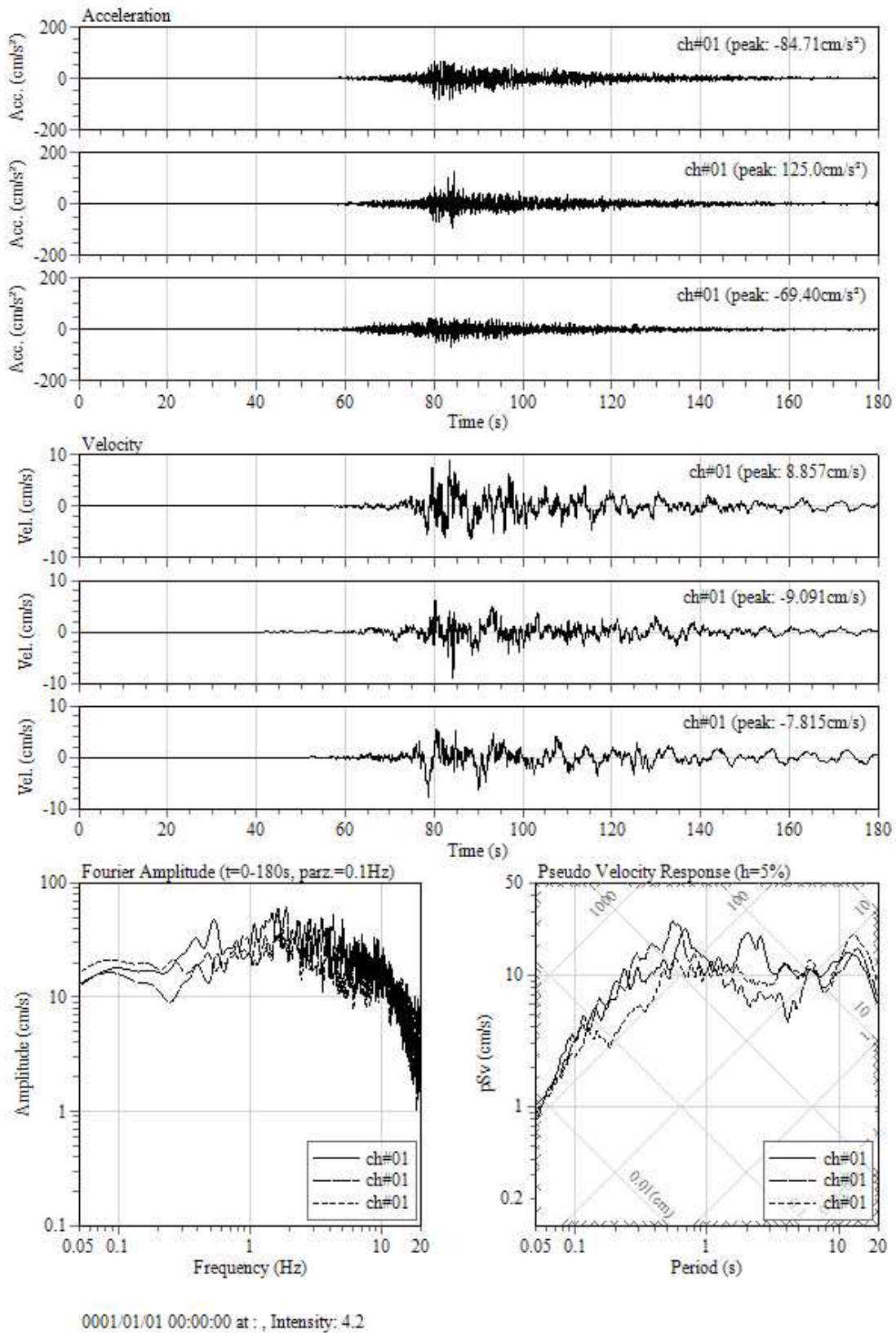
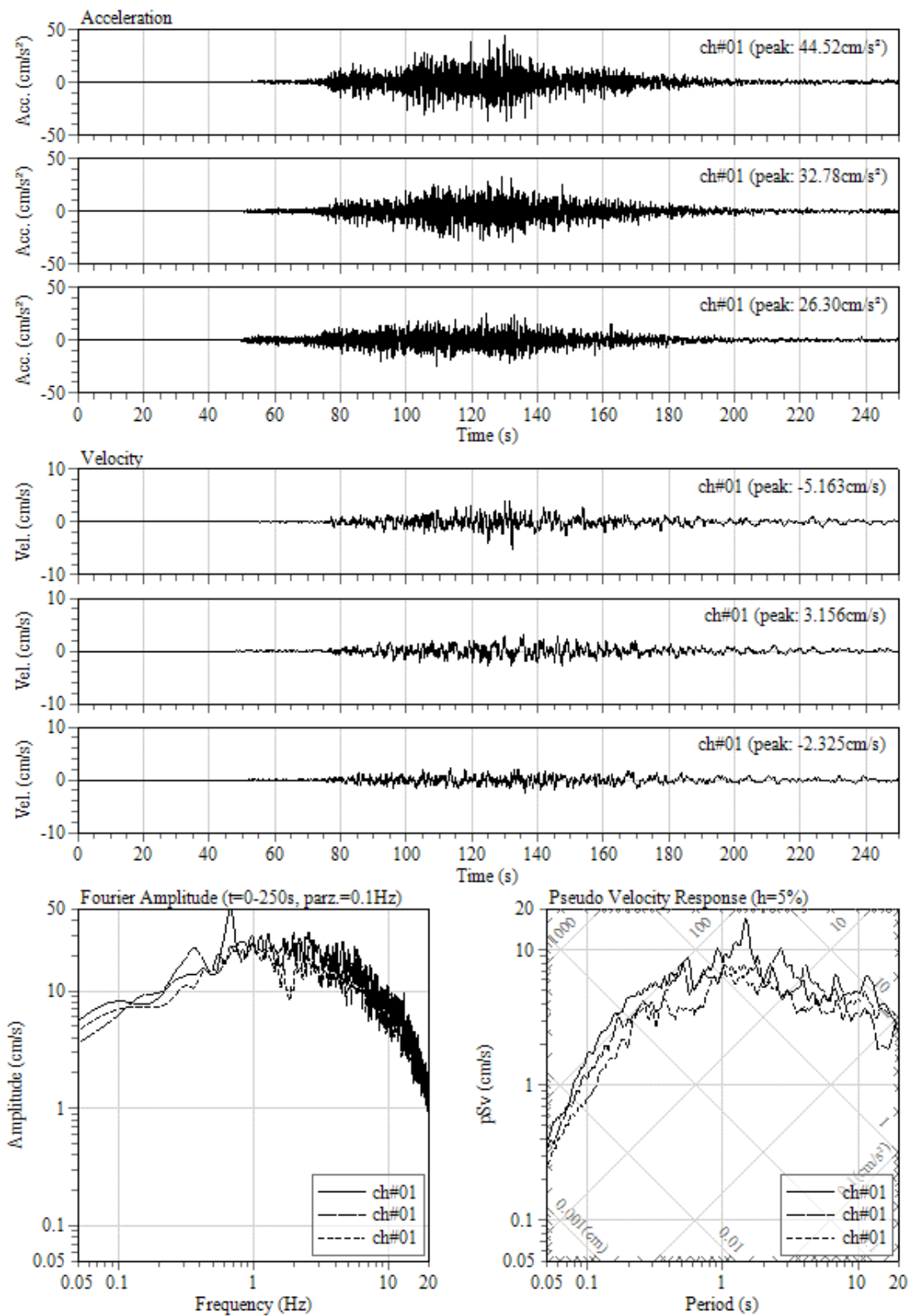


図 2.2.2-55 観測点 C220 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.6

図 2.2.2-56 観測点 R05M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

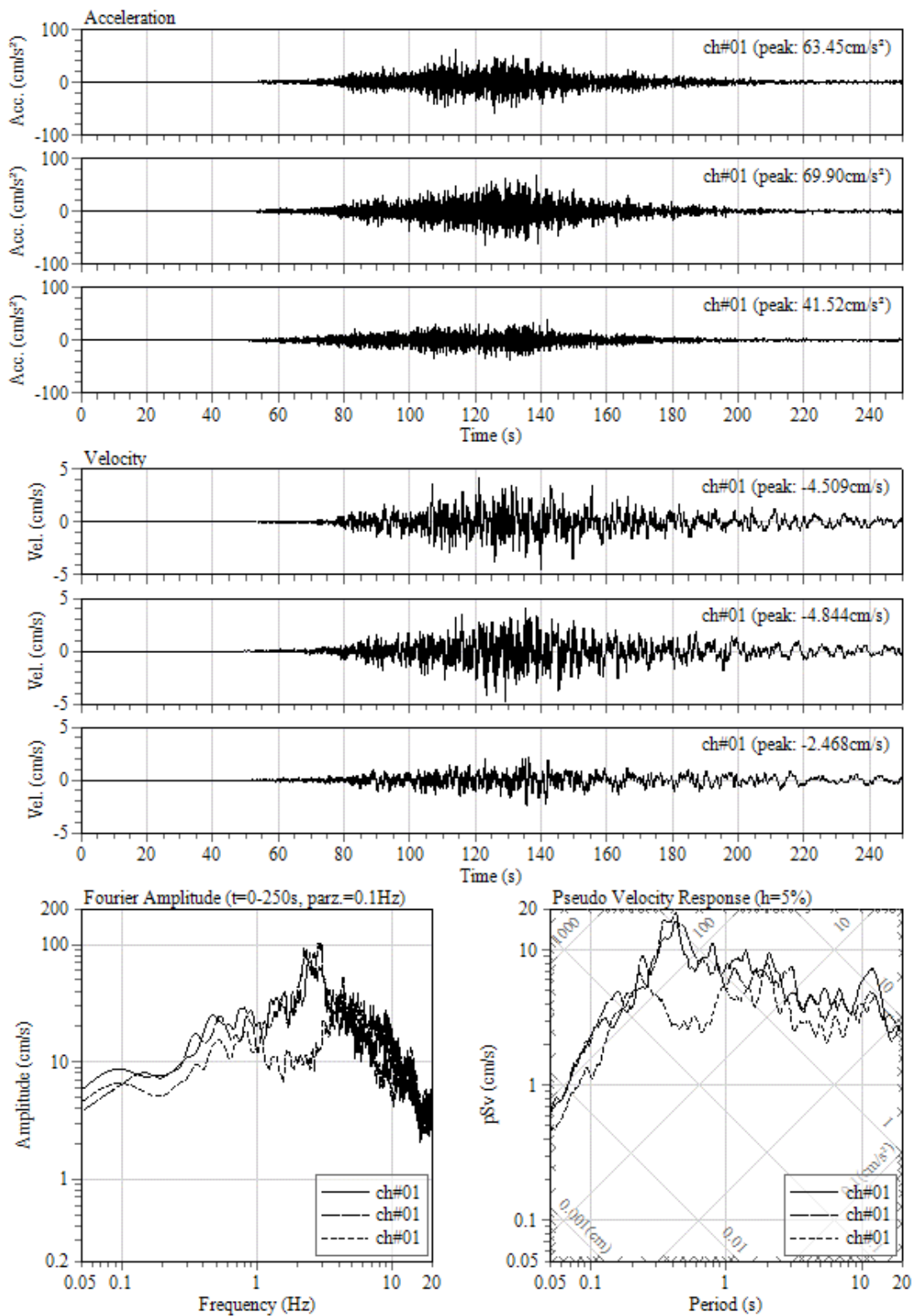
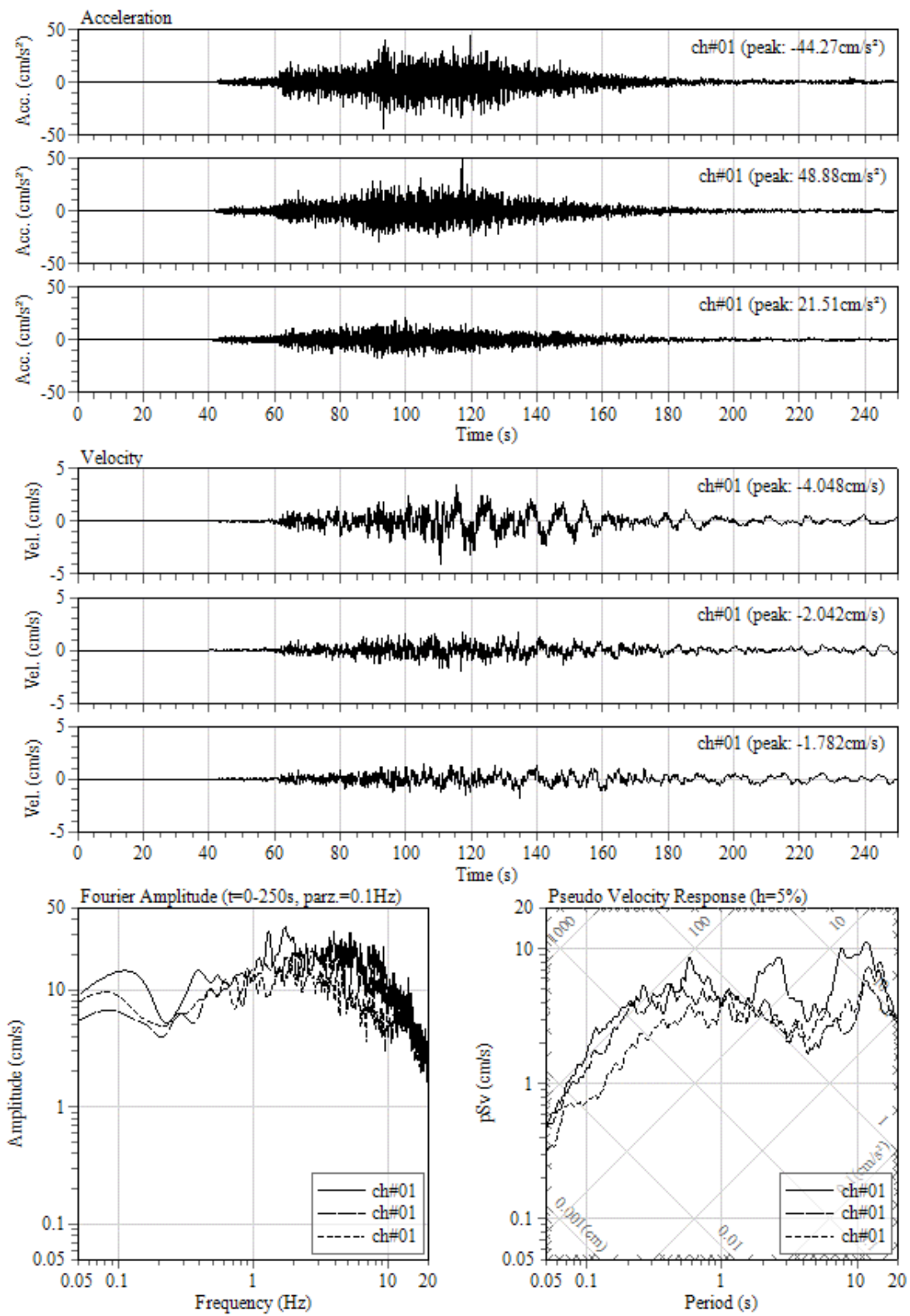
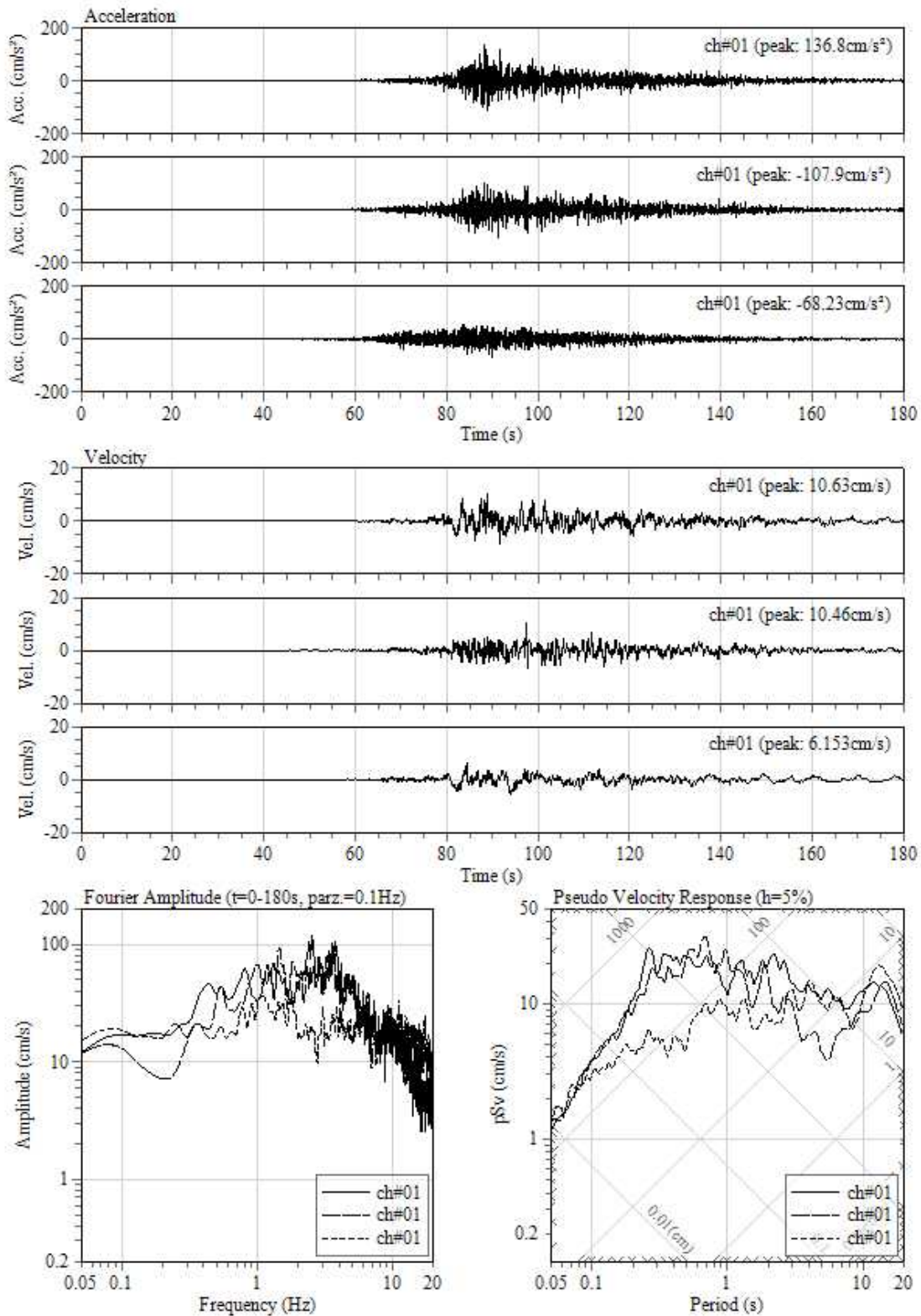


図 2.2.2-57 観測点 R18M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



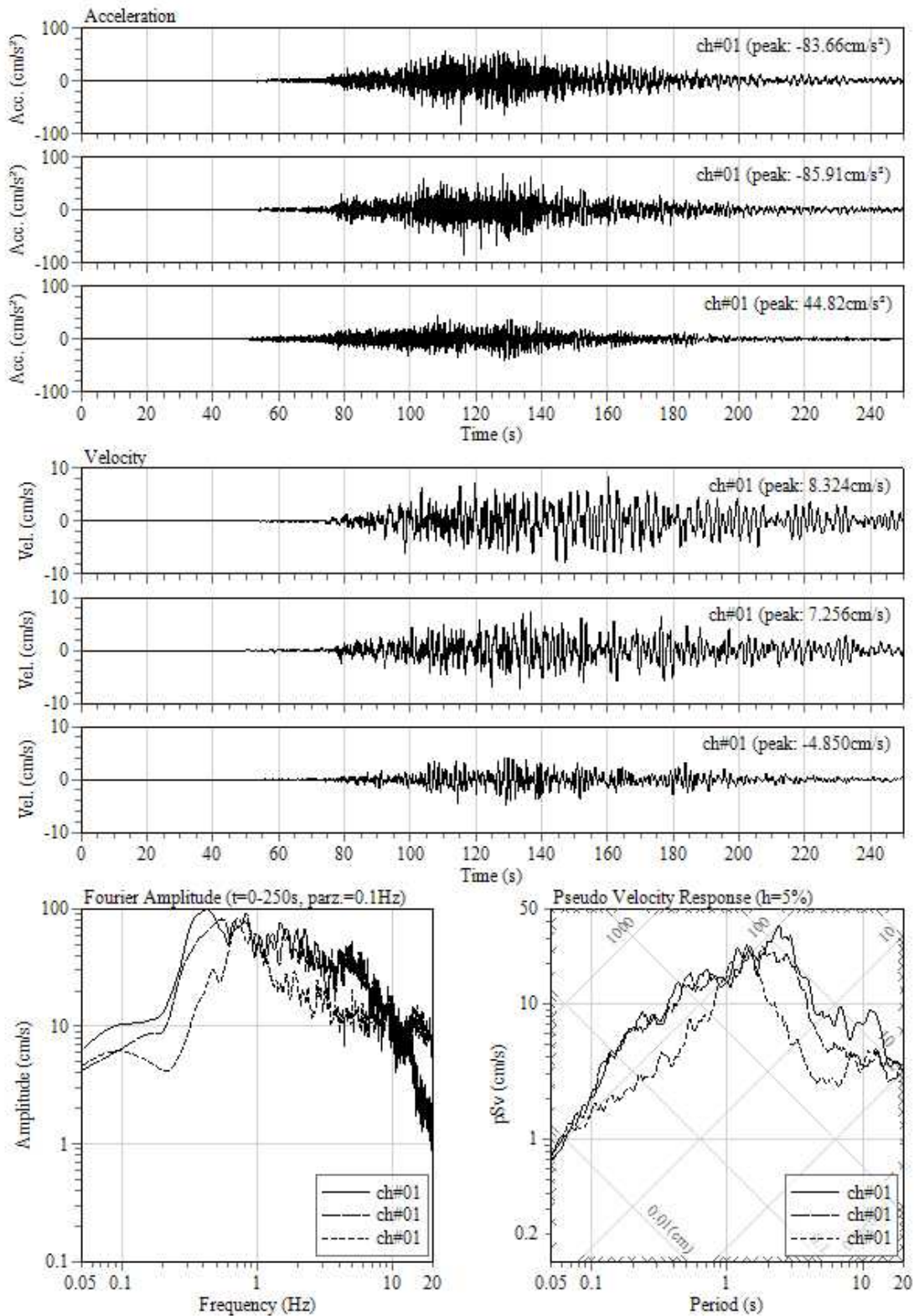
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.4

図 2.2.2-58 観測点 V01A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



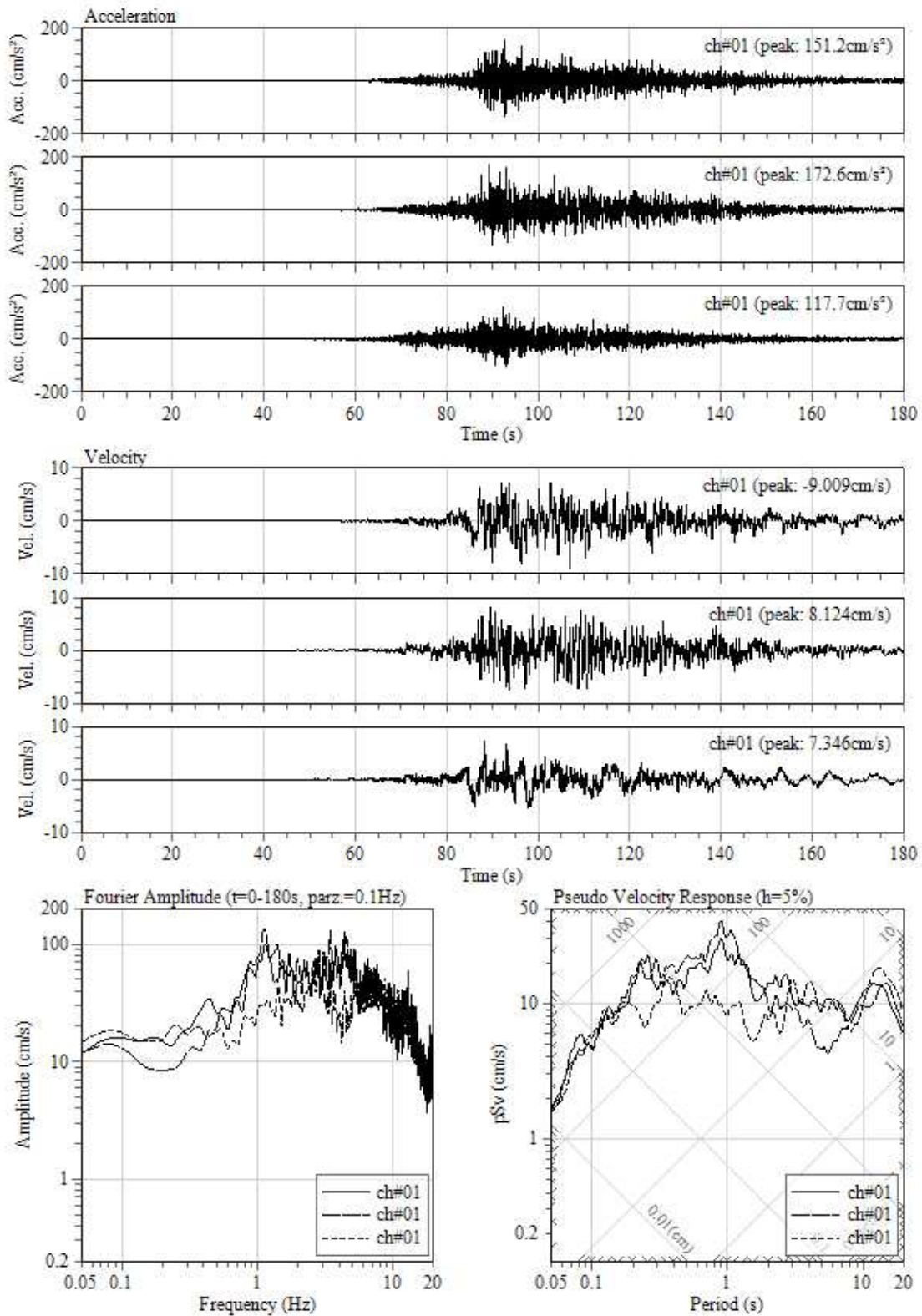
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.5

図 2.2.2-59 観測点 C330 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



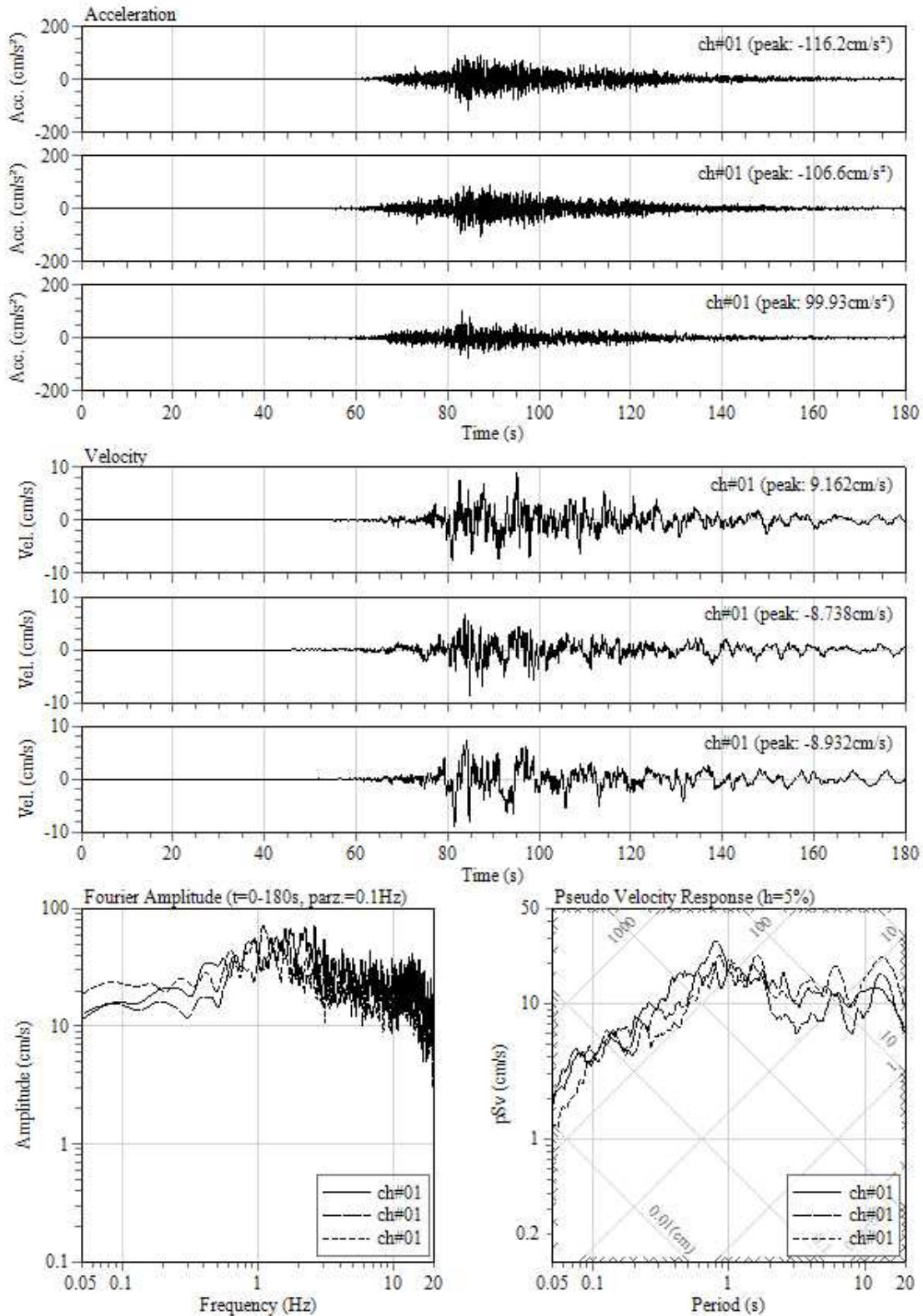
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.2

図 2.2.2-60 観測点 R21M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



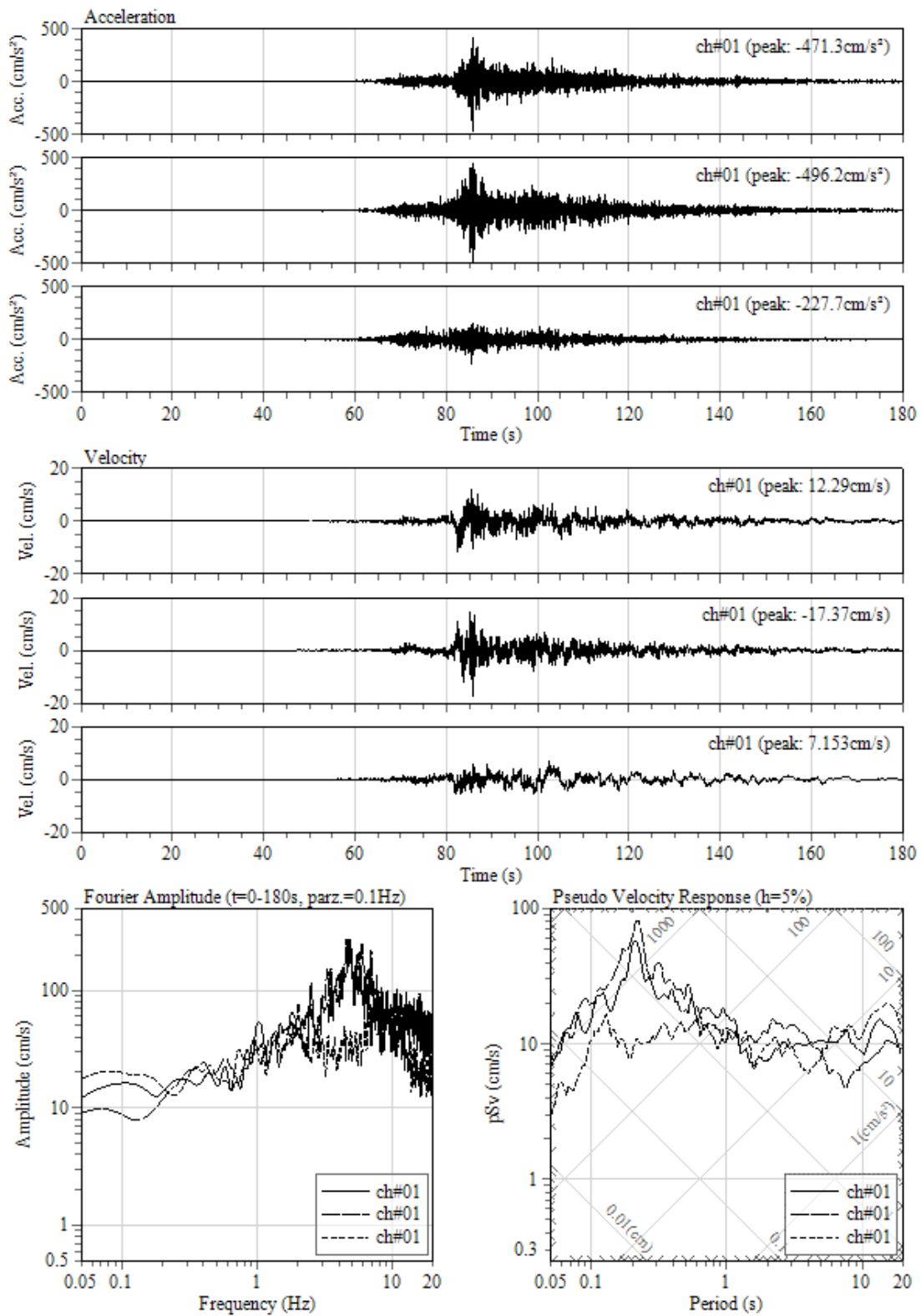
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.5

図 2.2.2-61 観測点 C010 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



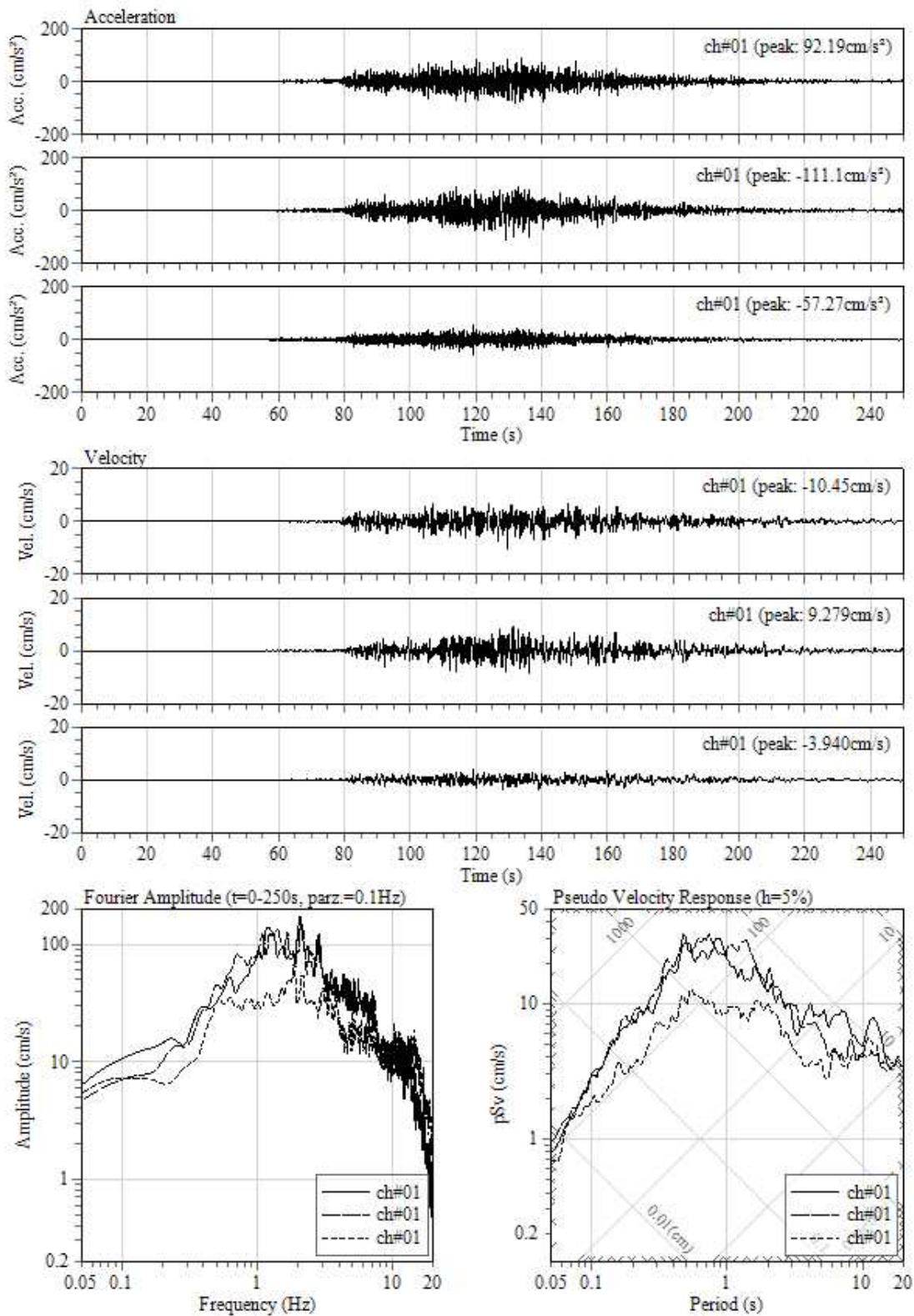
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.3

図 2.2.2-62 観測点 C190 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



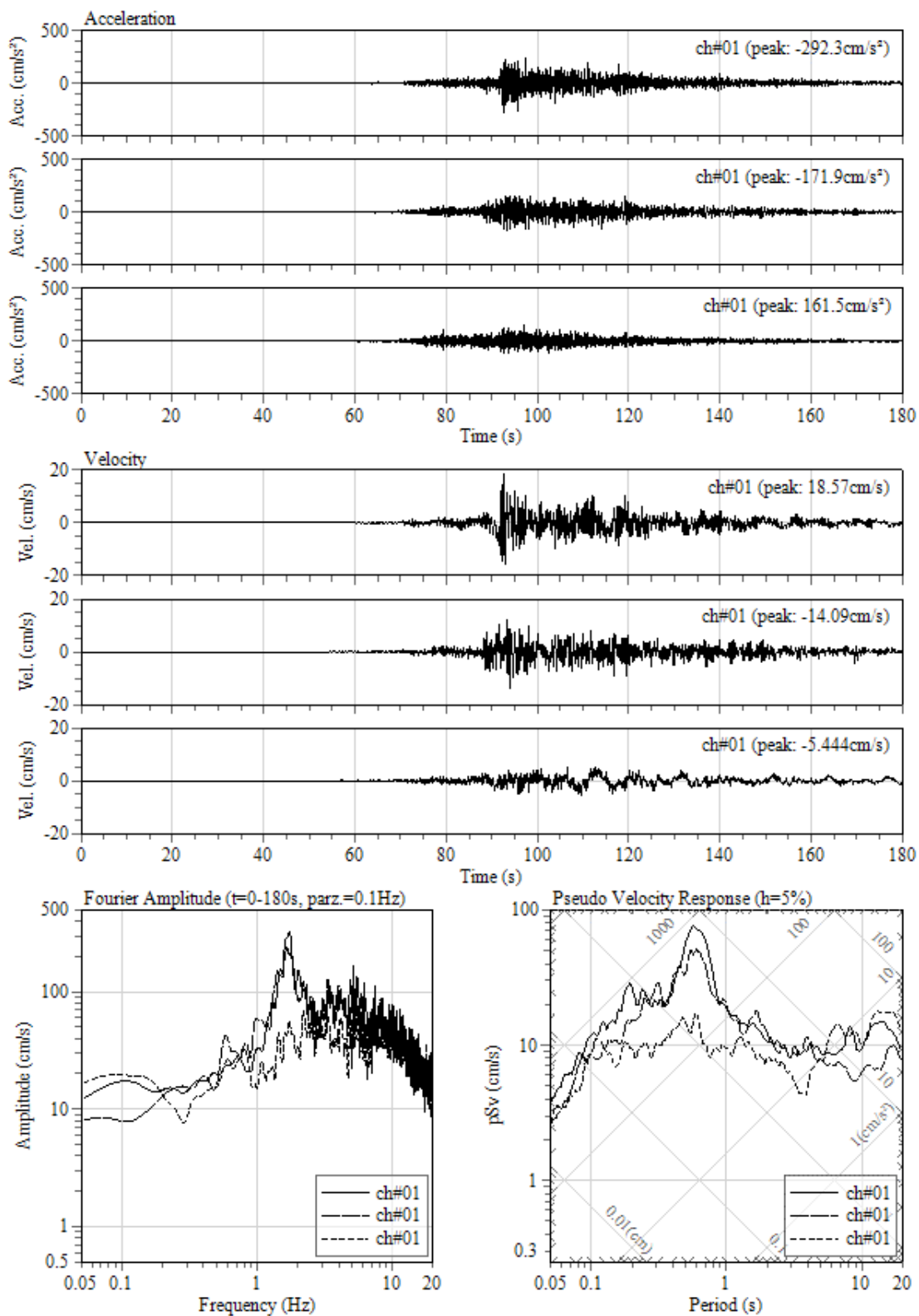
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.2

図 2.2.2-63 観測点 C180 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



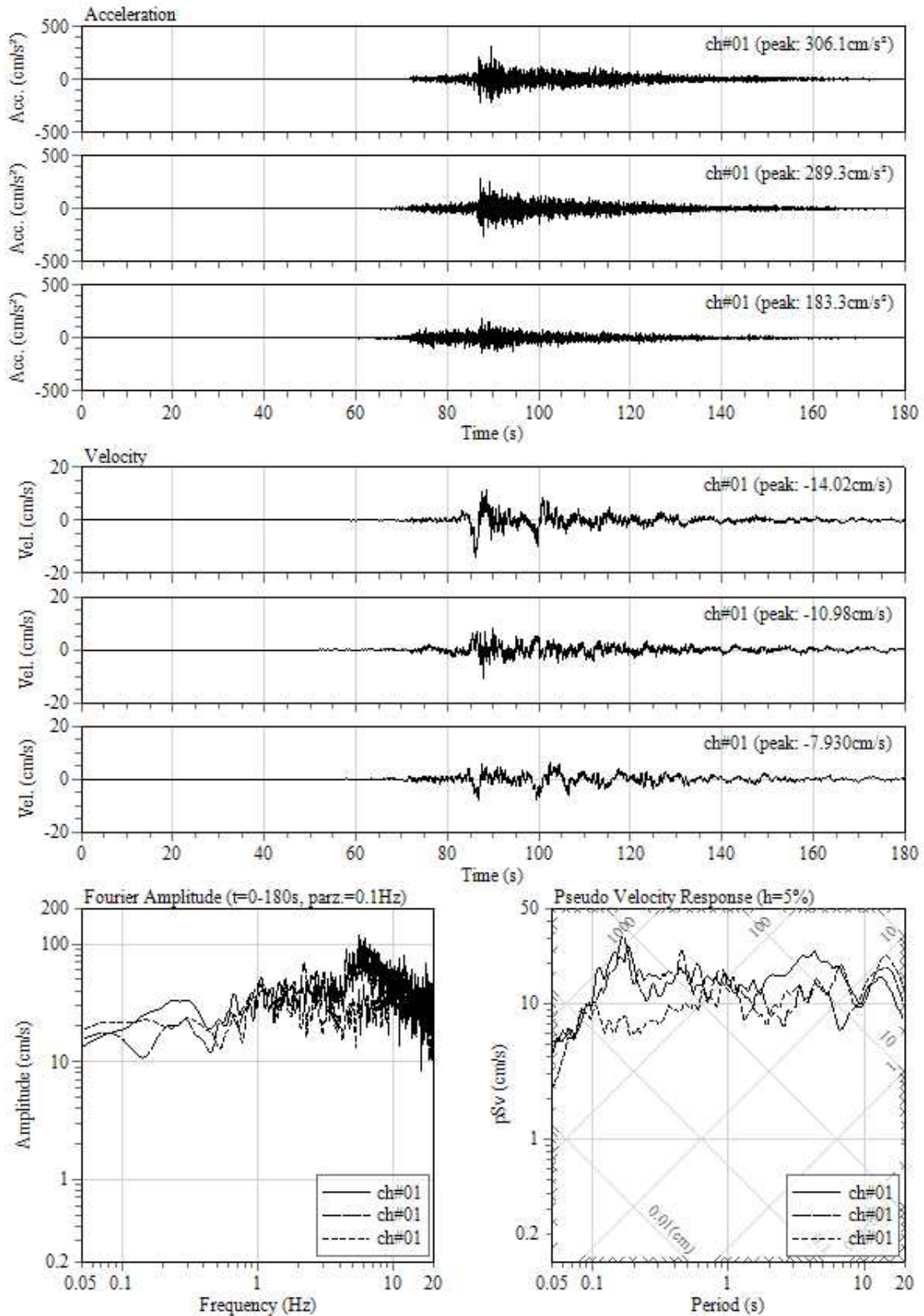
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.5

図 2.2.2-64 観測点 R13M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.0

図 2.2.2-65 観測点 C140 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.6

図 2.2.2-66 観測点 C100 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

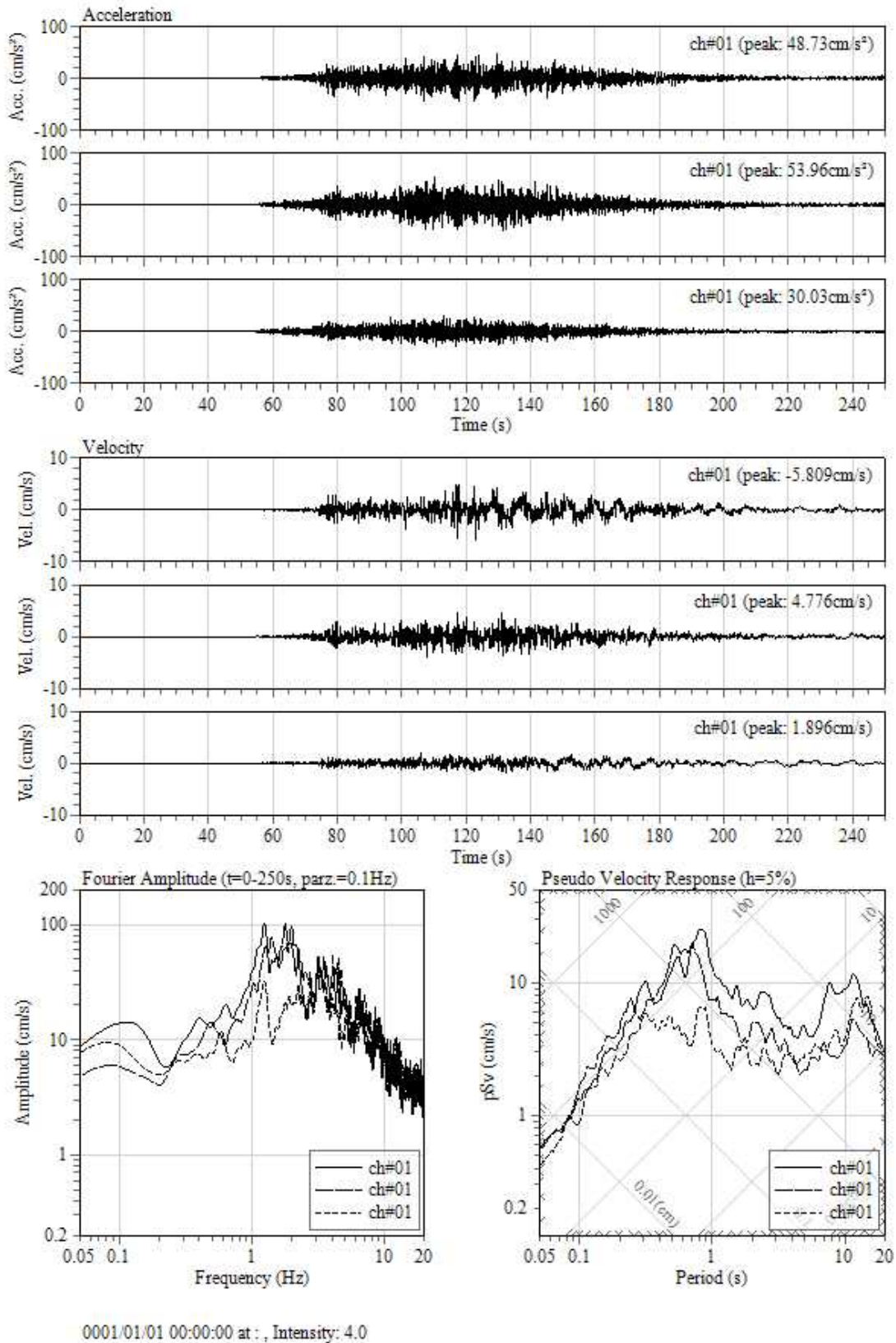
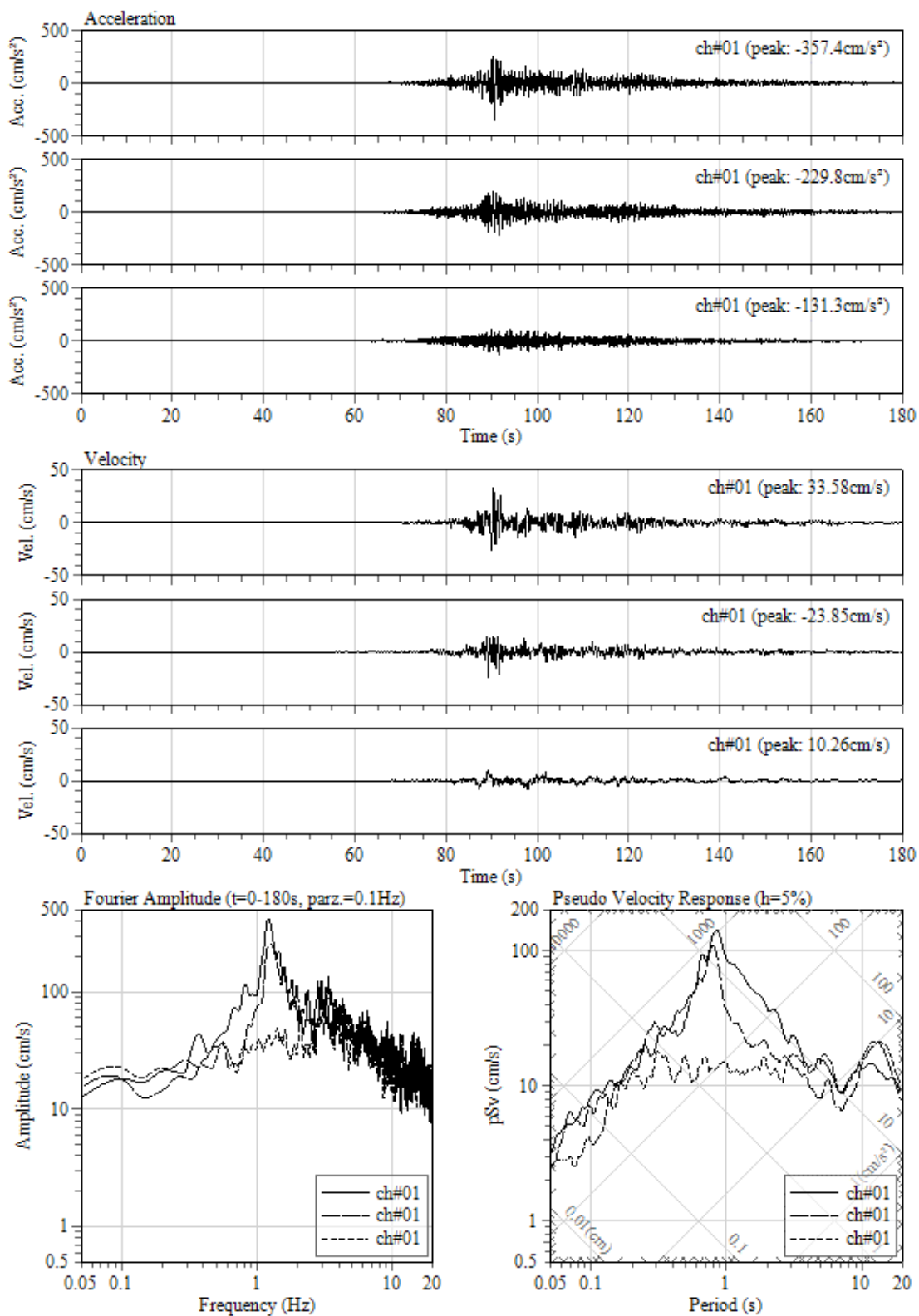
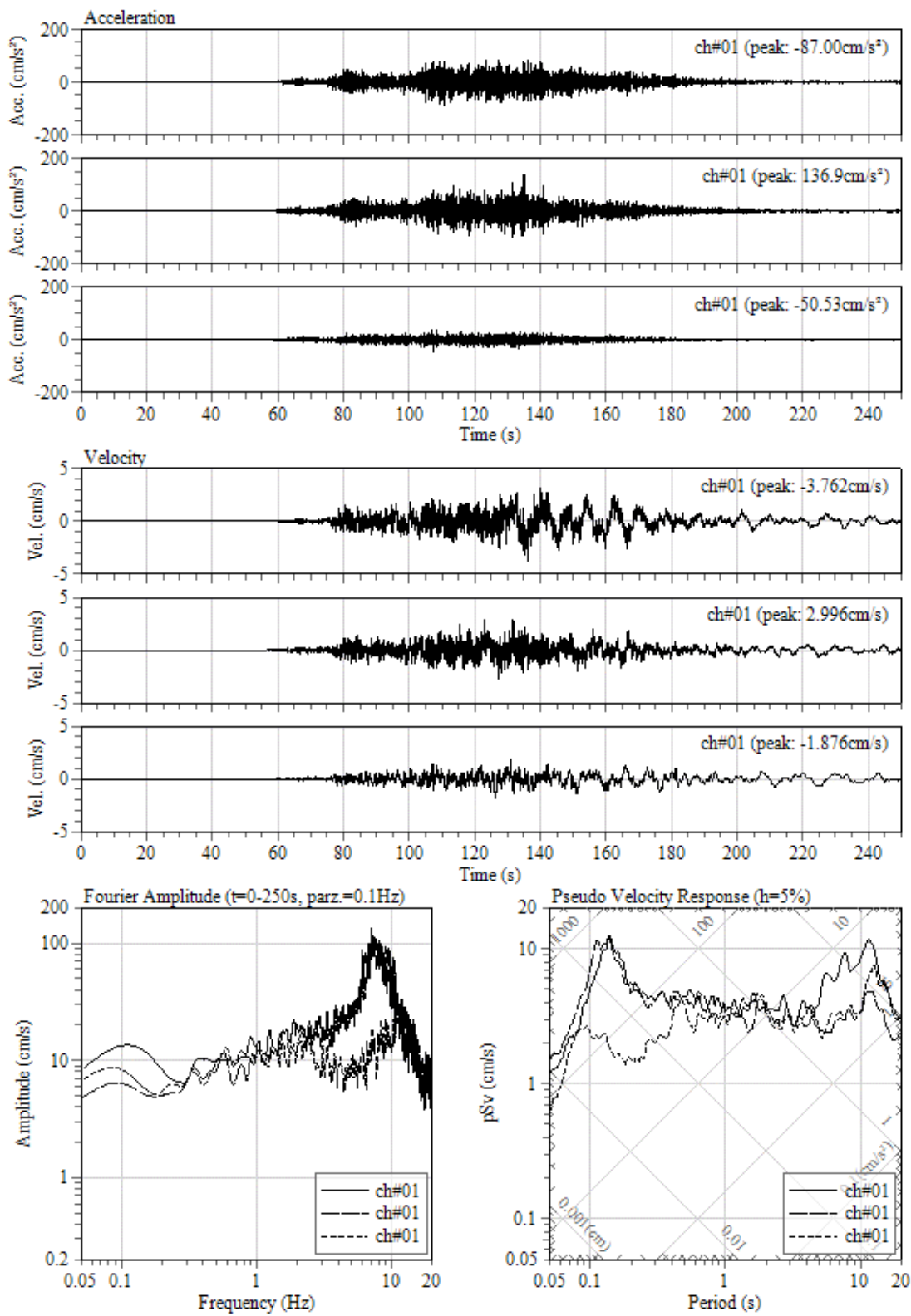


図 2.2.2-67 観測点 V09A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



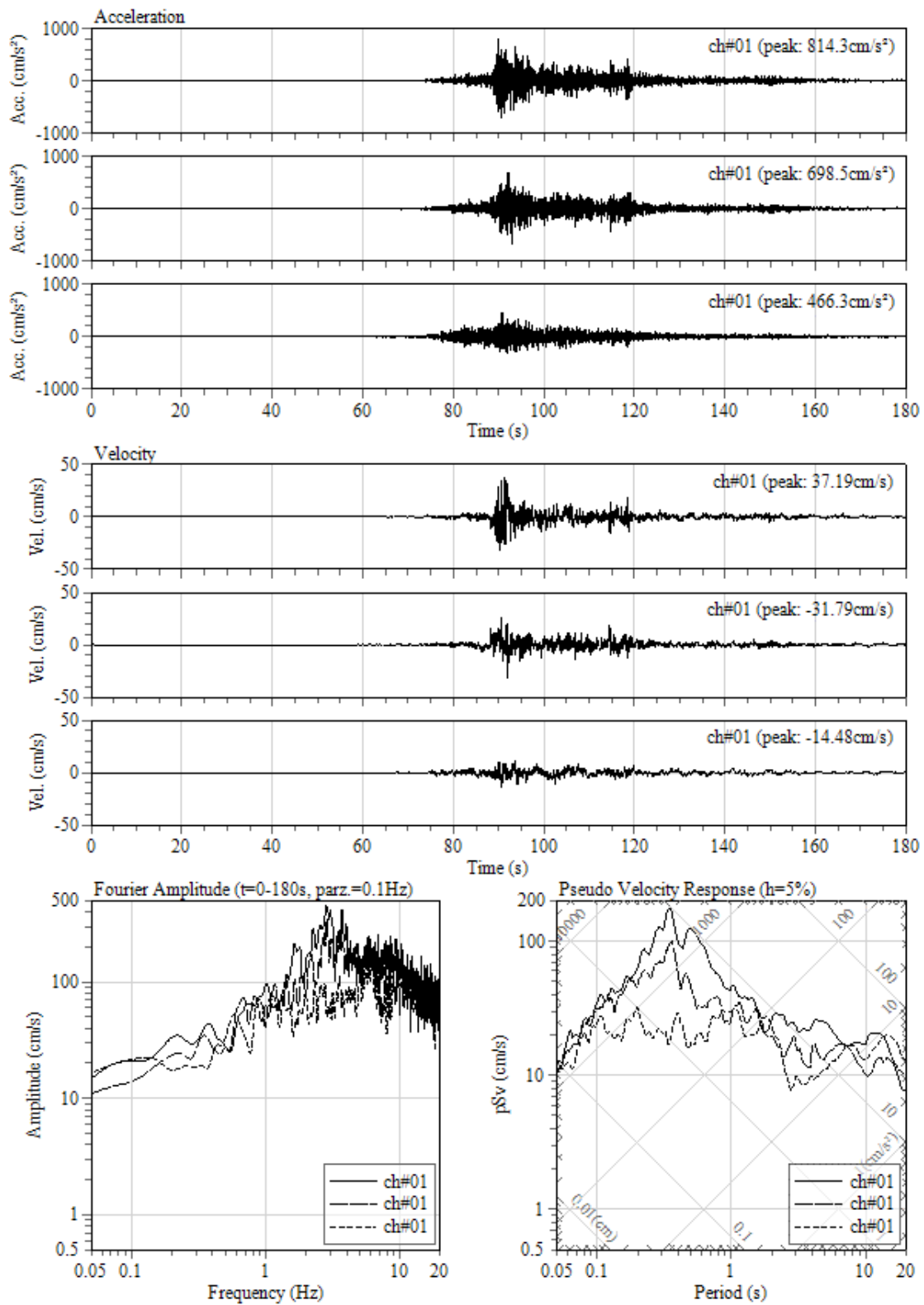
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.5

図 2.2.2-68 観測点 C260 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



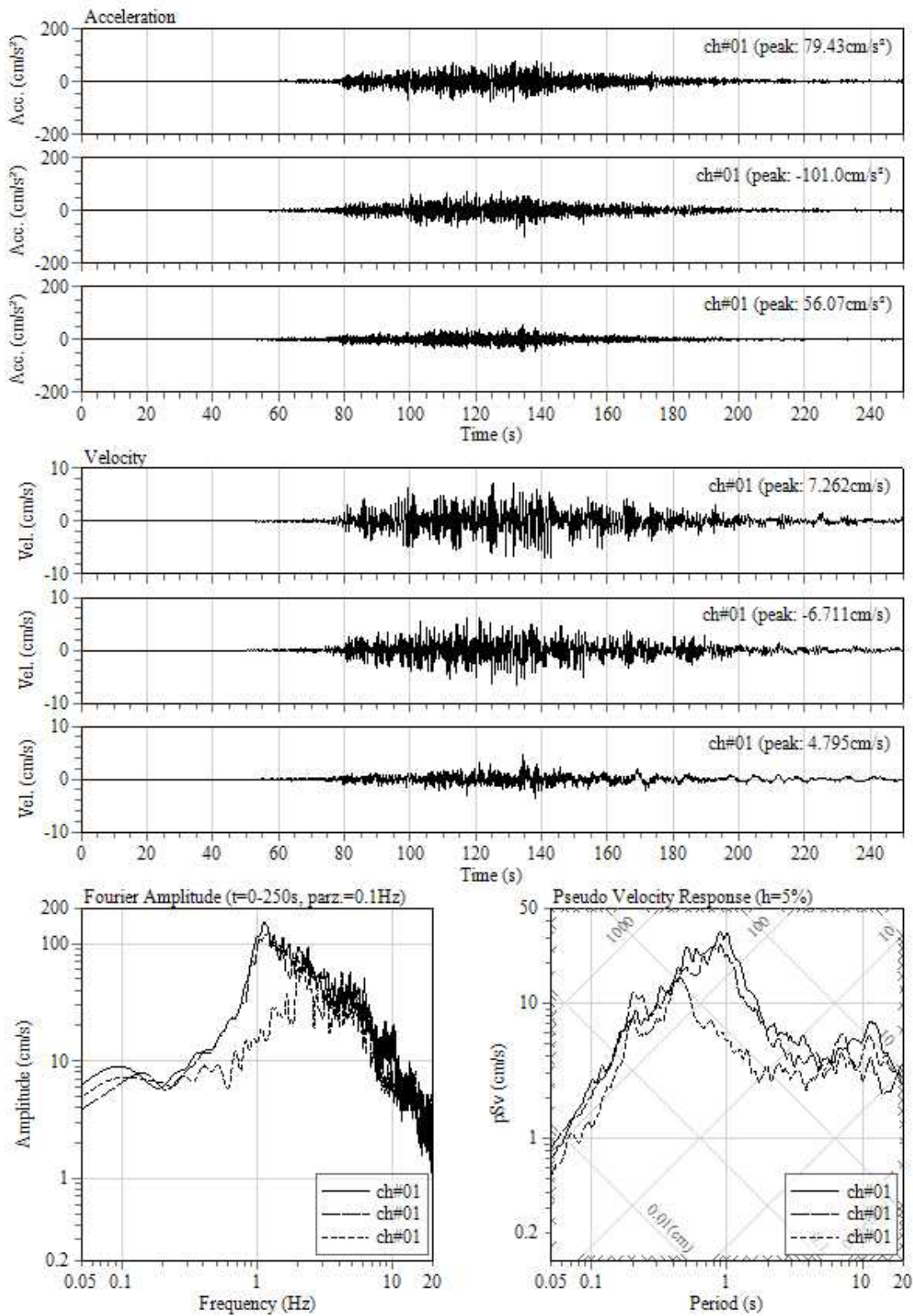
0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.8

図 2.2.2-69 観測点 V02A における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 5.8

図 2.2.2-70 観測点 C110 における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 4.4

図 2.2.2-71 観測点 R12M における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

(3) 2010年Maule地震における観測記録

2010年Maule地震の際に、図 2.2.2-72に示す強震観測点で観測記録が得られている。同図には本震の震央位置もプロットしている。これらの観測点で得られた観測記録をチリ大学のウェブサイト (<http://terremotos.ing.uchile.cl/>) より収集して、加速度波形を積分することによって速度波形に変換した。また、加速度波形を用いて、フーリエスペクトル、速度応答スペクトルを計算した。波形処理により得られた加速度波形、速度波形、速度応答スペクトル及びフーリエスペクトルを図 2.2.2-73～図 2.2.2-93に示す。

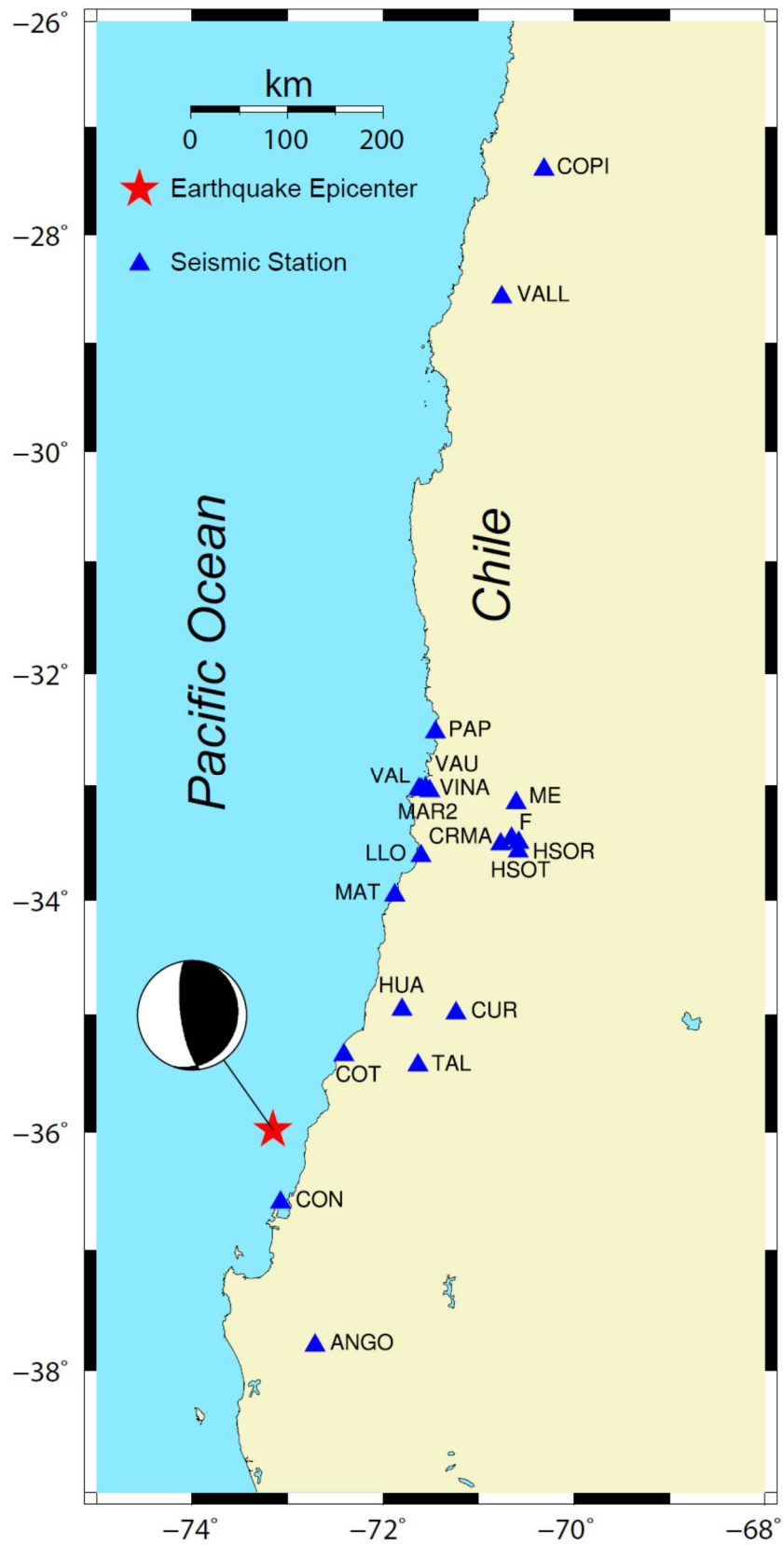


図 2.2.2-72 2010年Maule地震の震央位置と観測記録の得られている観測点分布

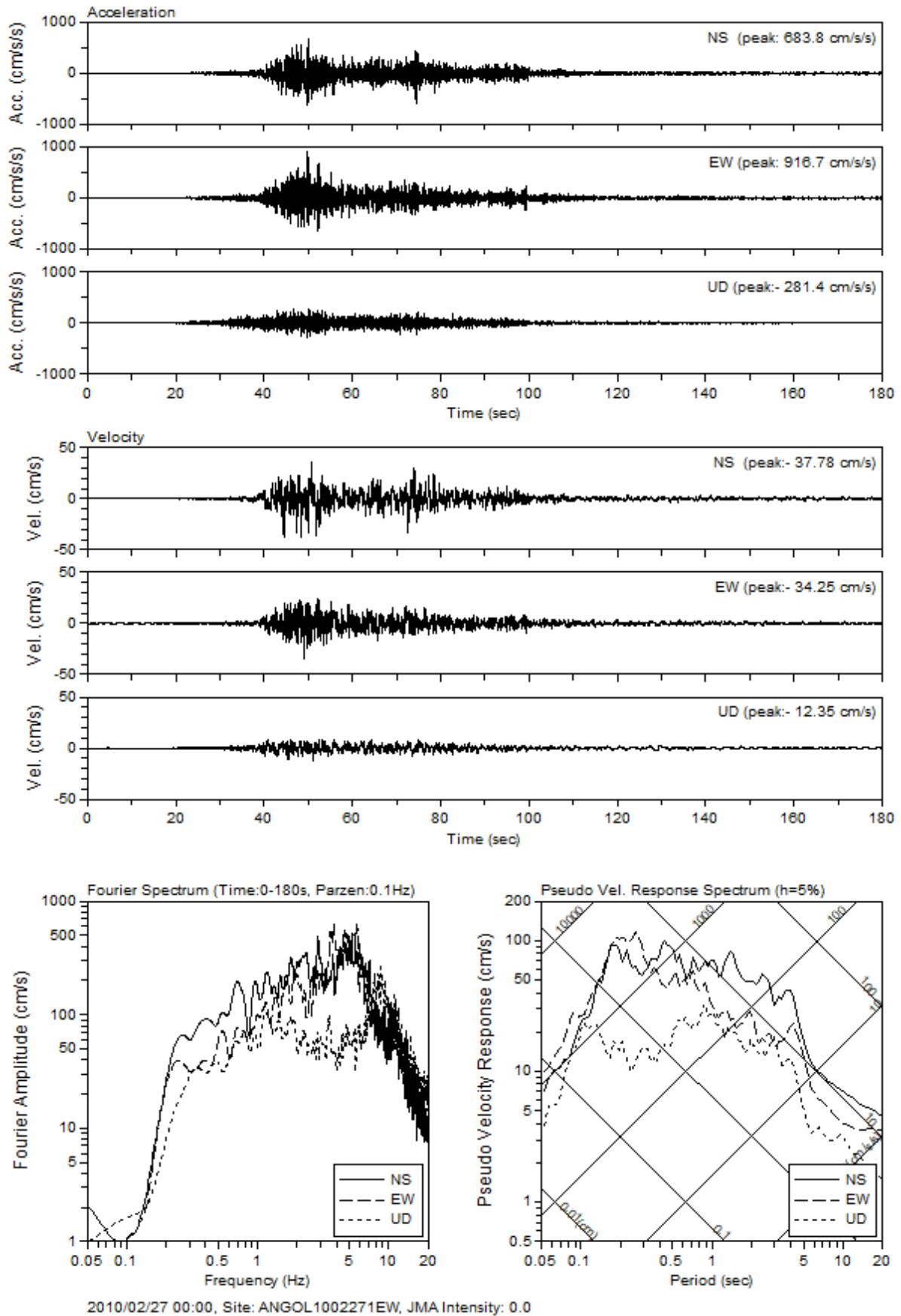


図 2.2.2-73 観測点 Angol における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-76

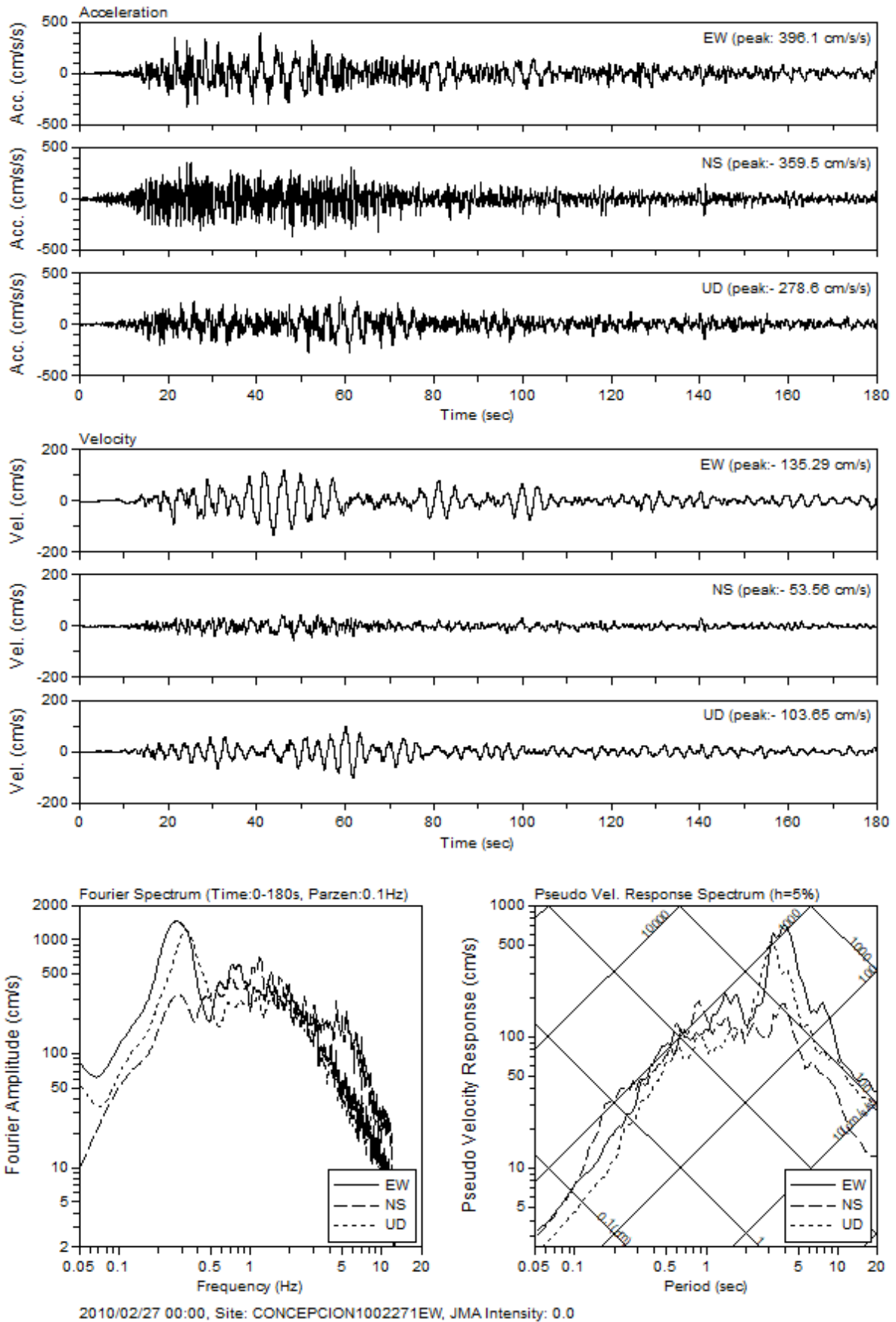


図 2.2.2-74 観測点 Concepcion における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-77

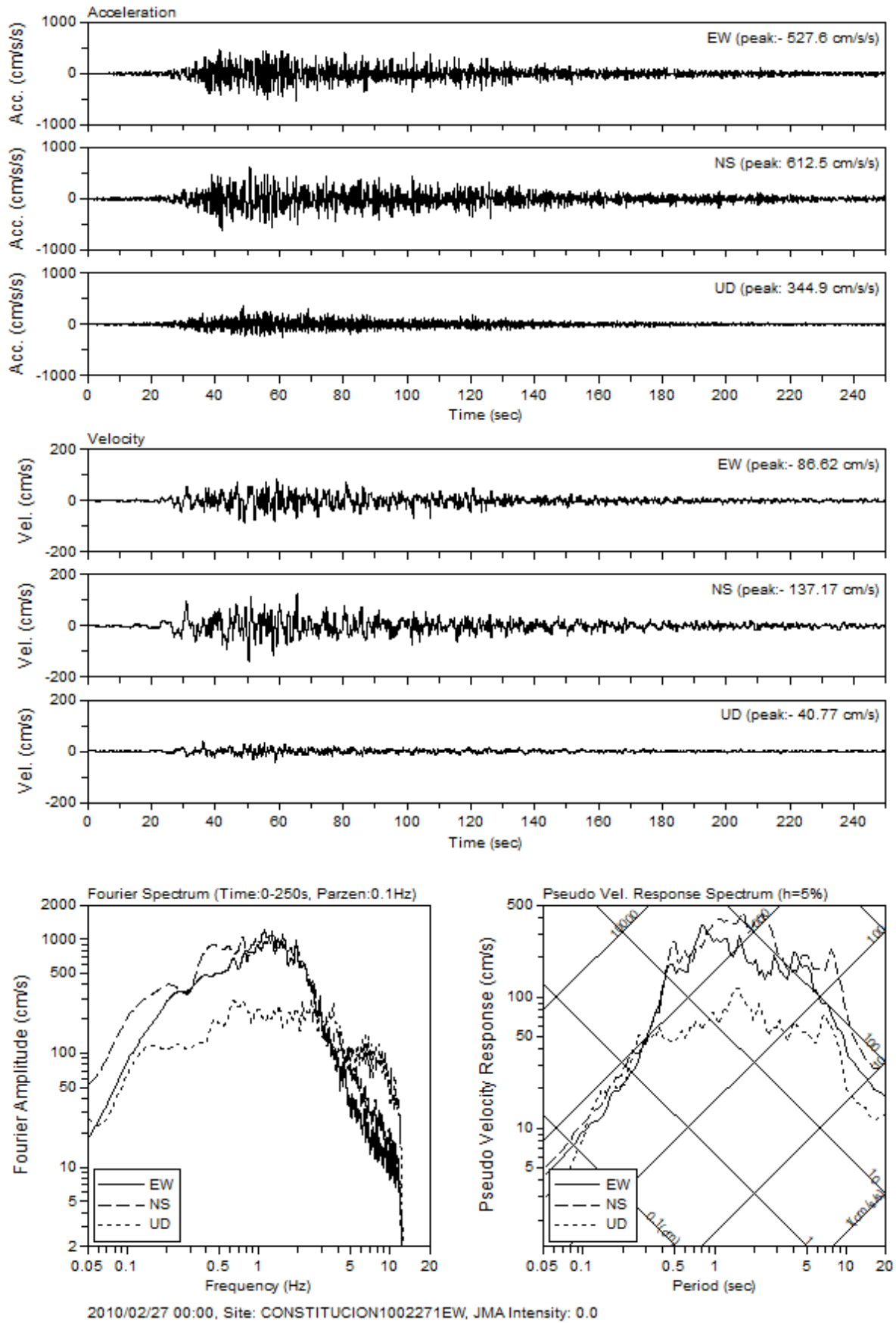


図 2.2.2-75 観測点 Constitution における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-78

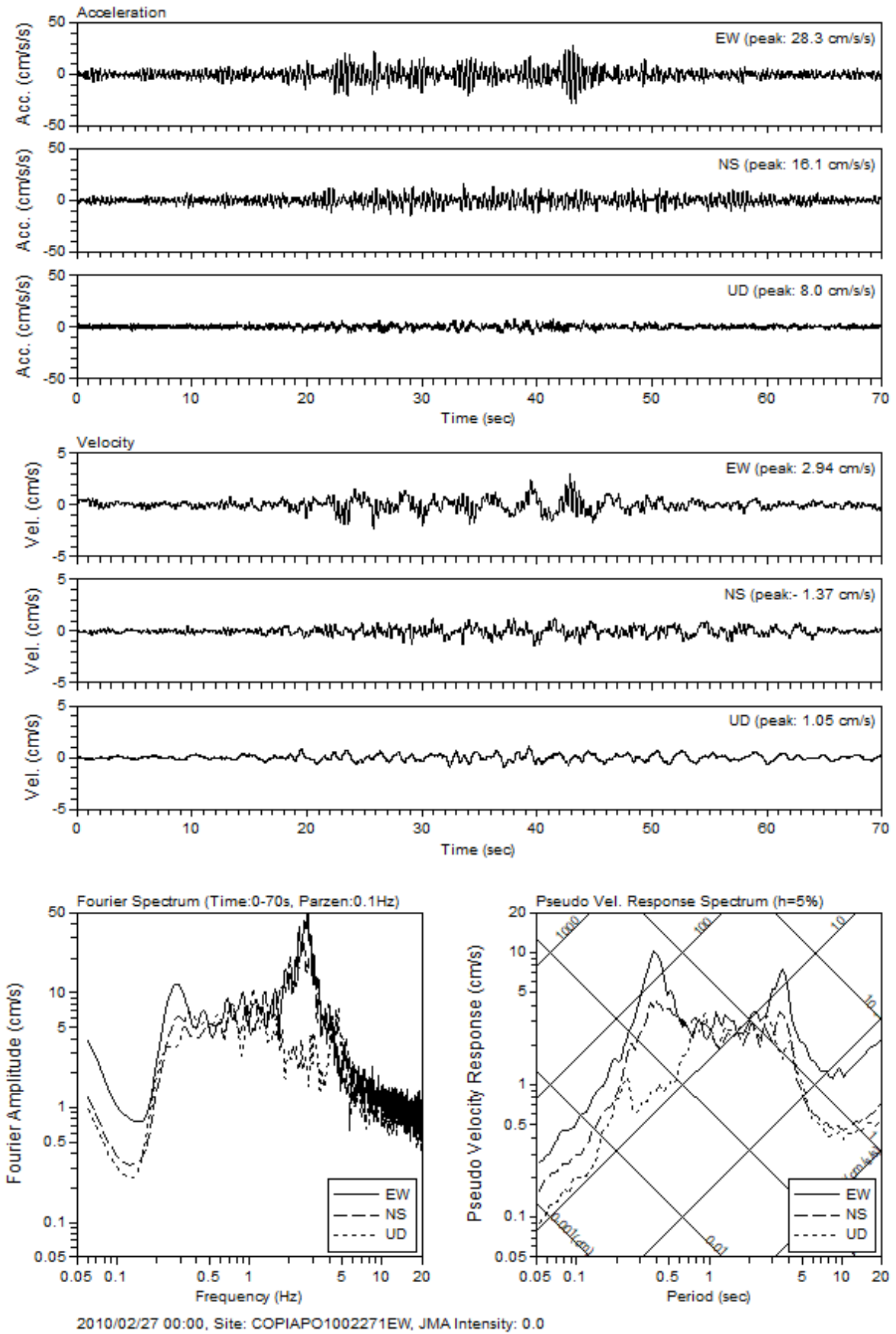


図 2.2.2-76 観測点 Capiapo における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-79

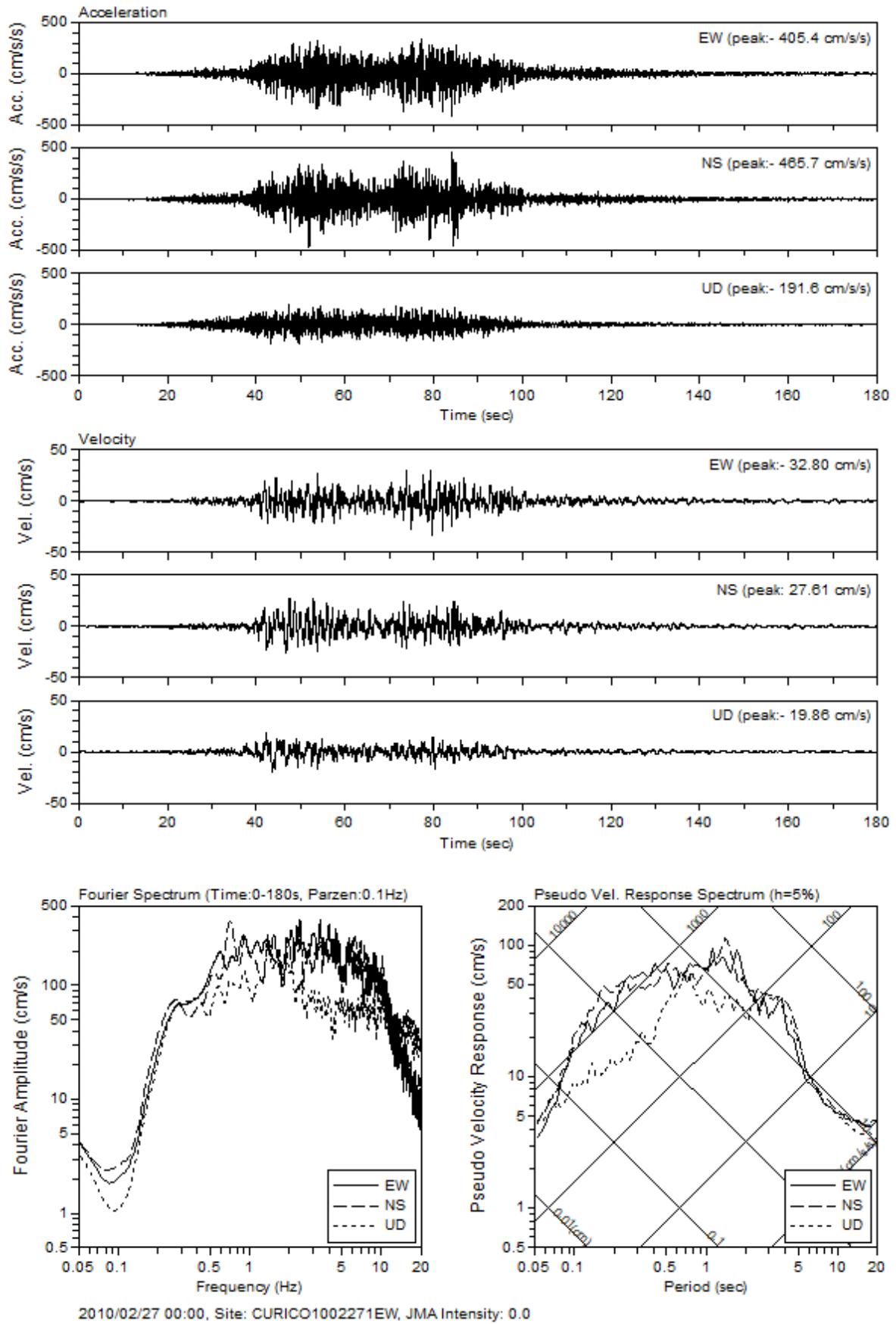


図 2.2.2-77 観測点 Curico における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-80

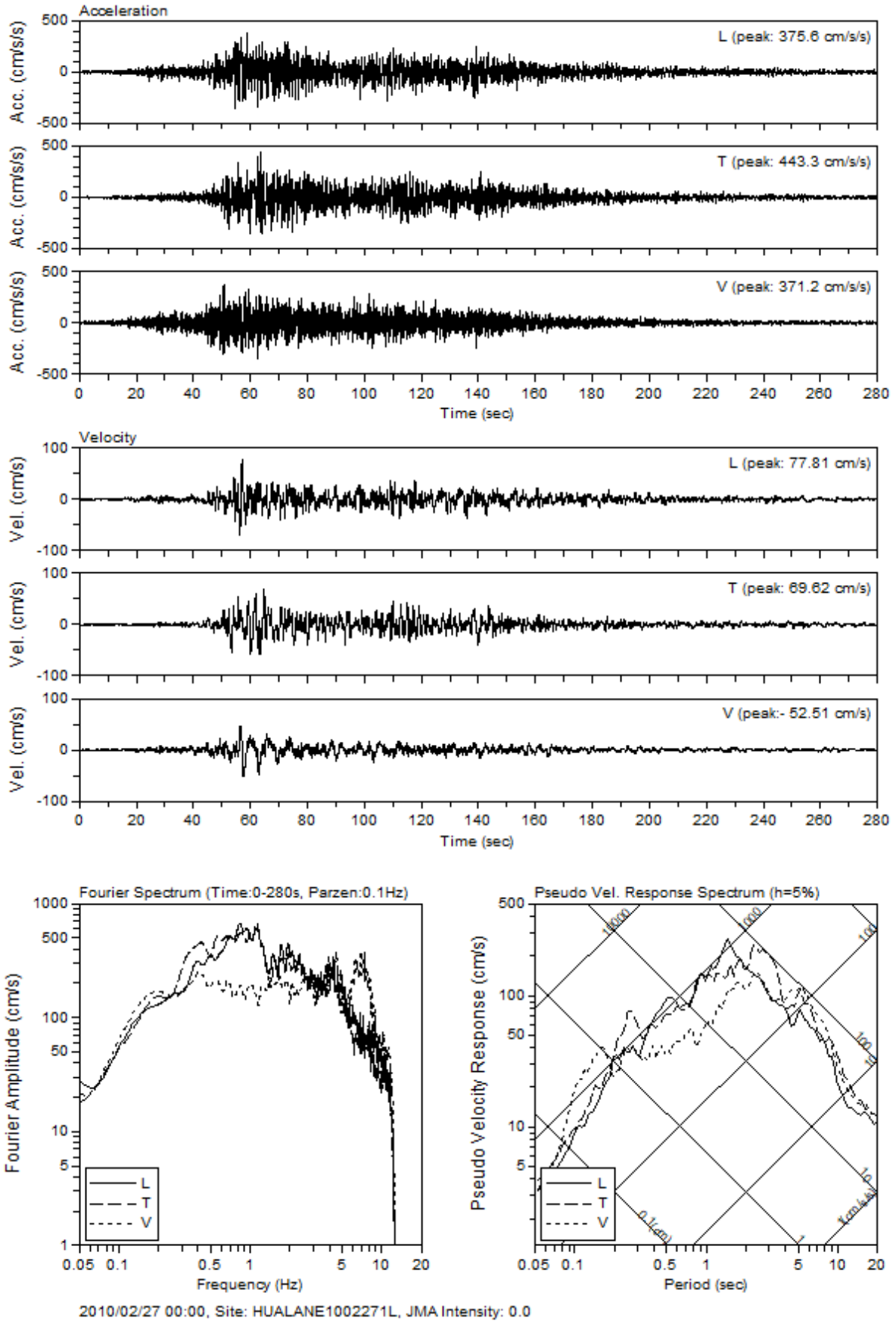


図 2.2.2-78 観測点 Hualane における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-81

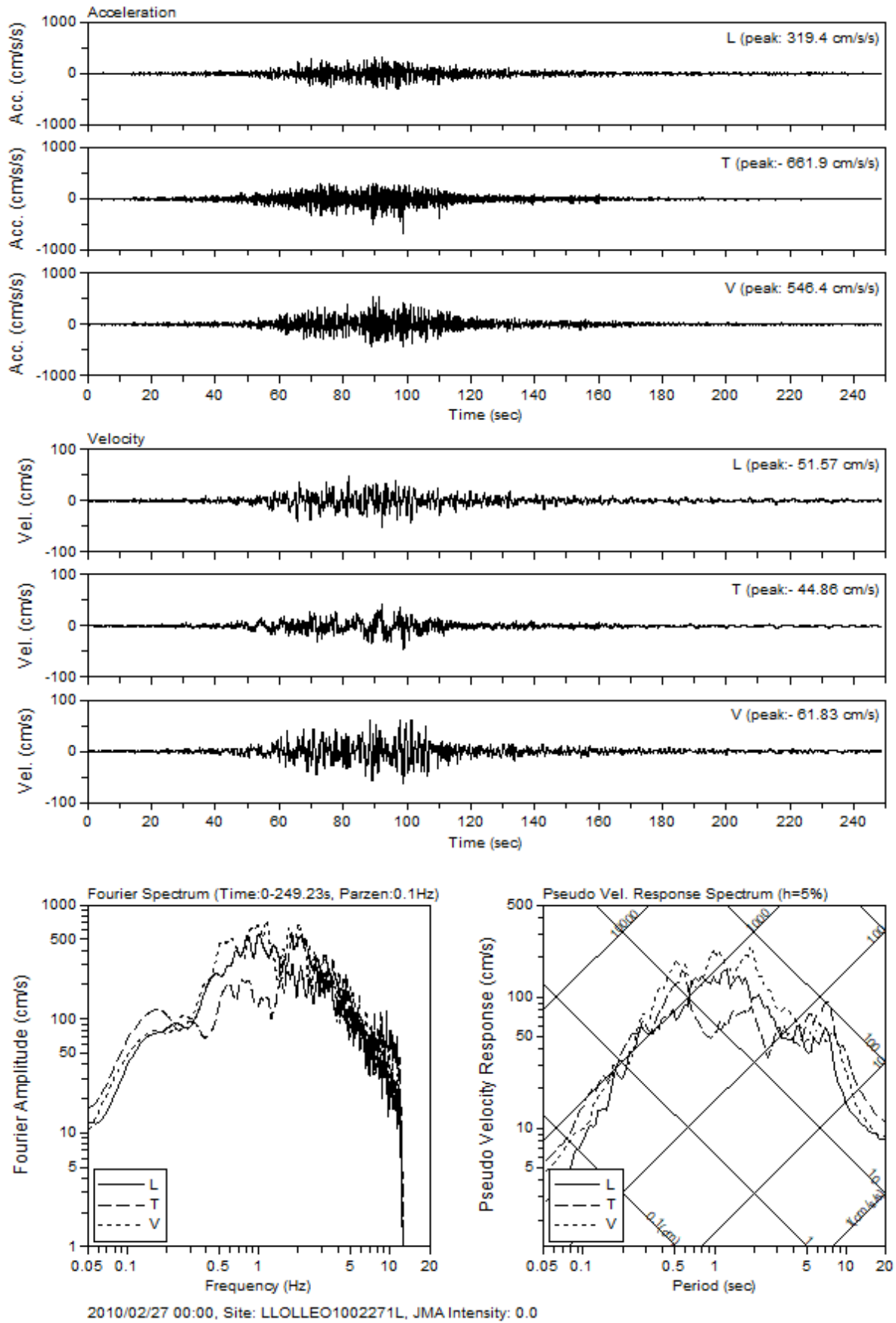


図 2.2.2-79 観測点 L1olleo における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-82

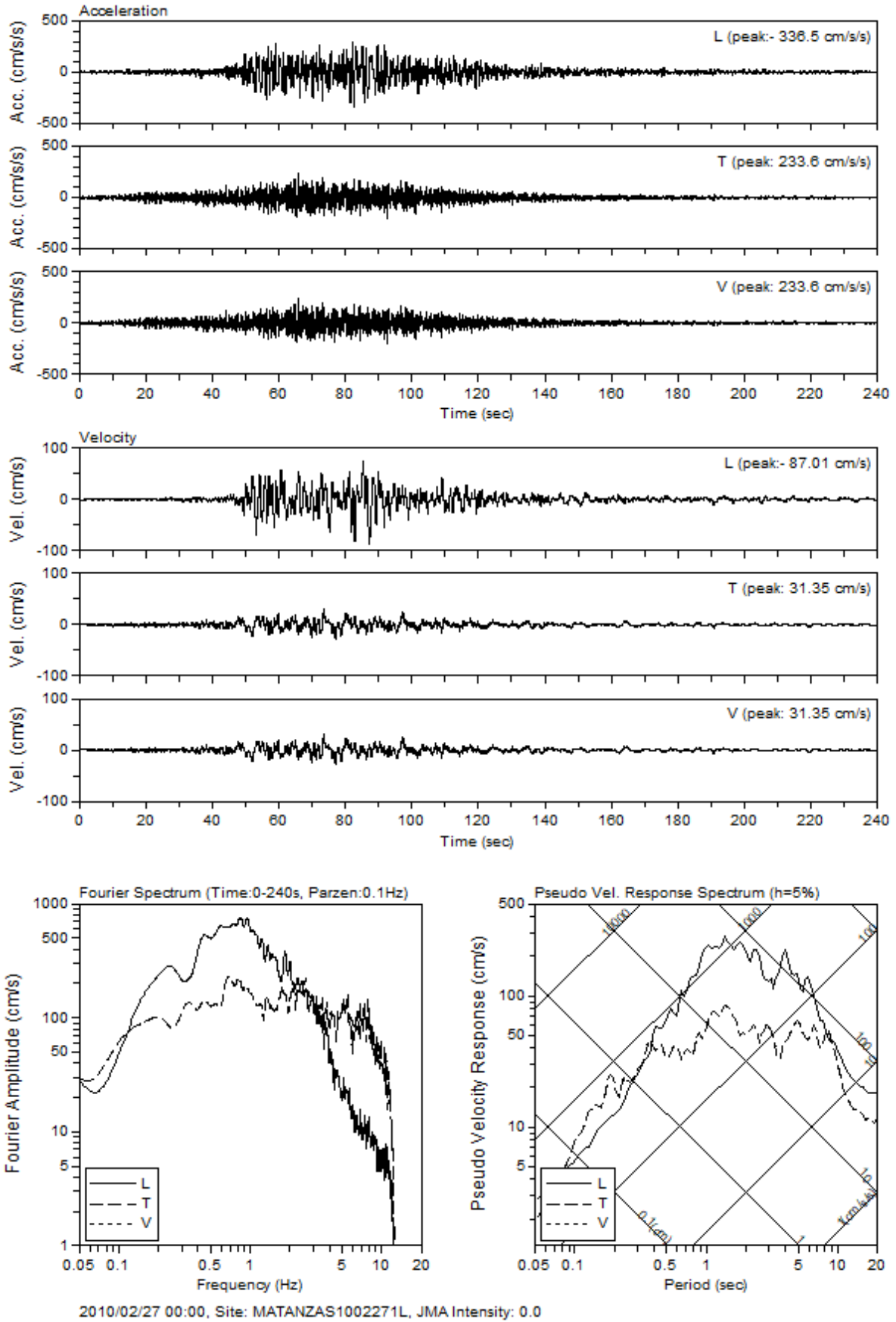


図 2.2.2-80 観測点 Matanzas における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-83

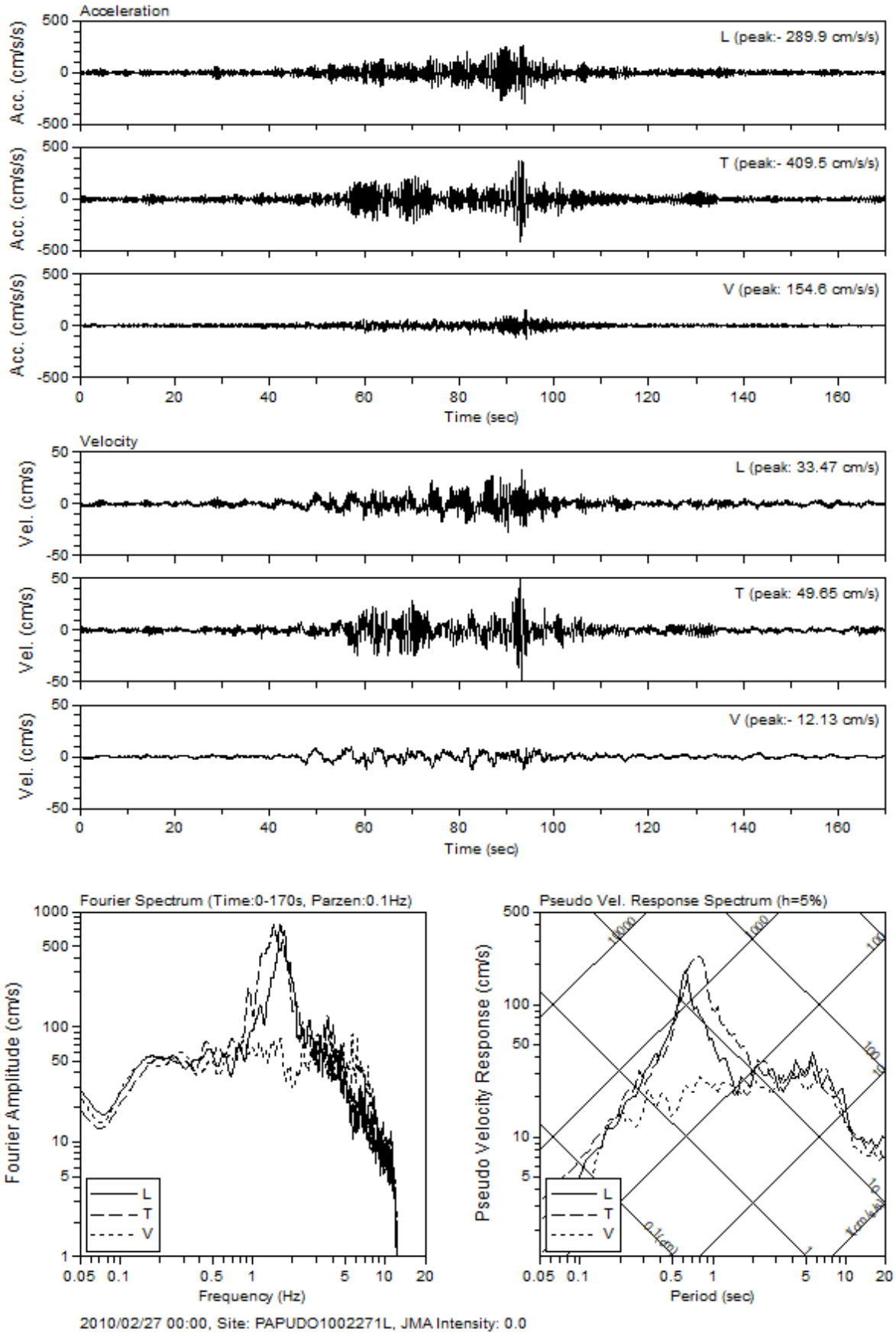


図 2.2.2-81 観測点 Papudo における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-84

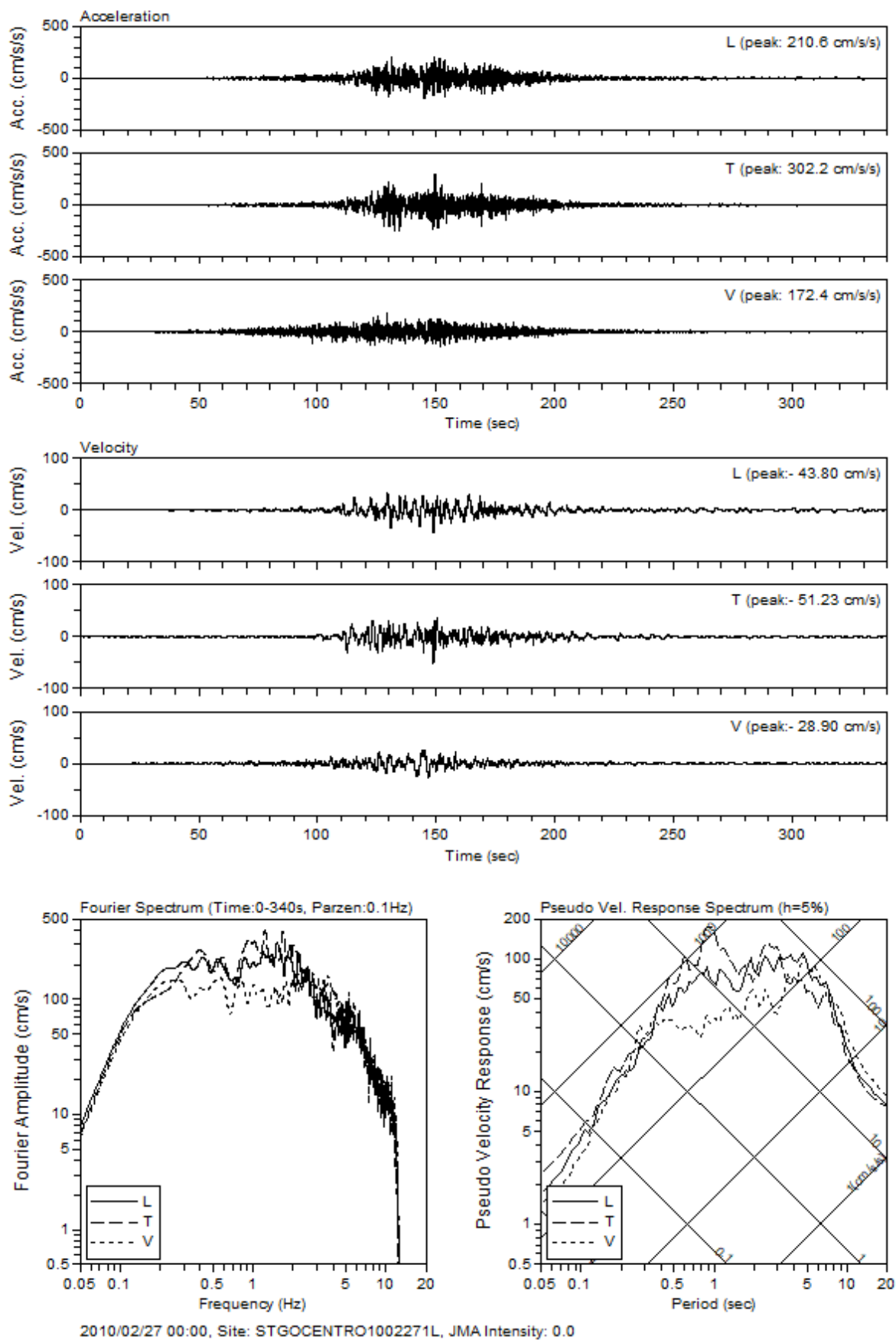


図 2.2.2-82 観測点 Stgocentro における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-85

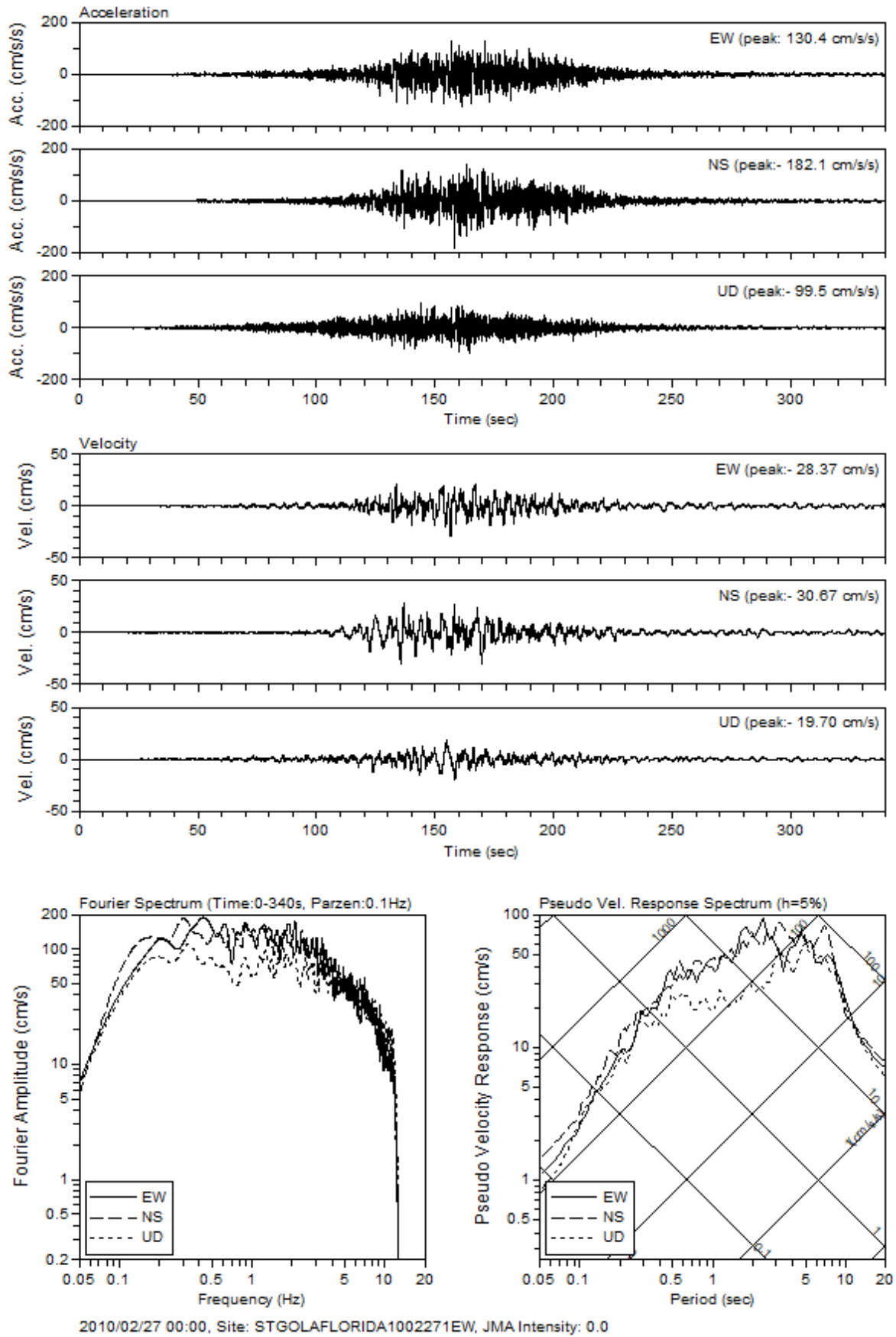


図 2.2.2-83 観測点 Stgolaflorida における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-86

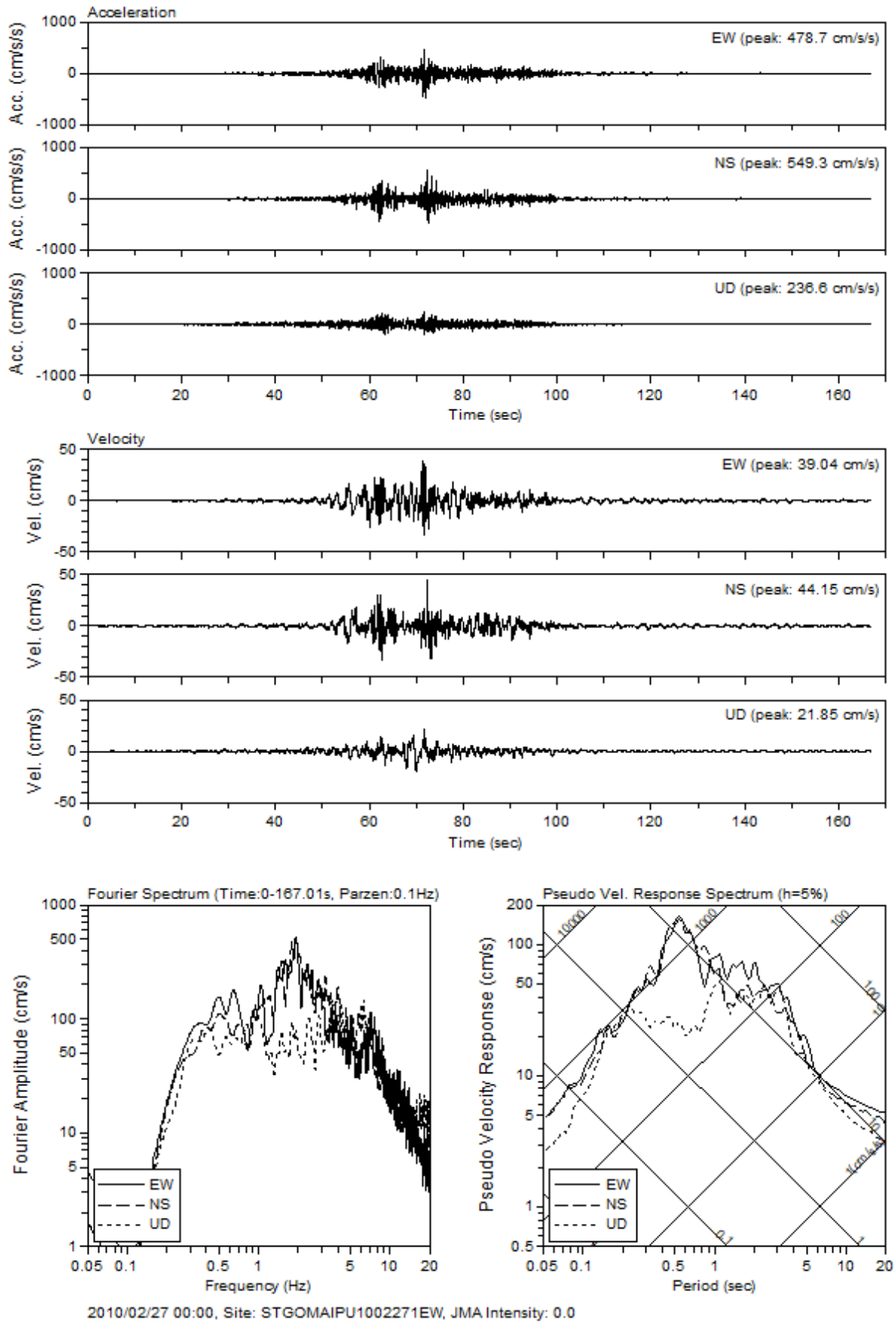


図 2.2.2-84 観測点 Stgomaipu における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-87

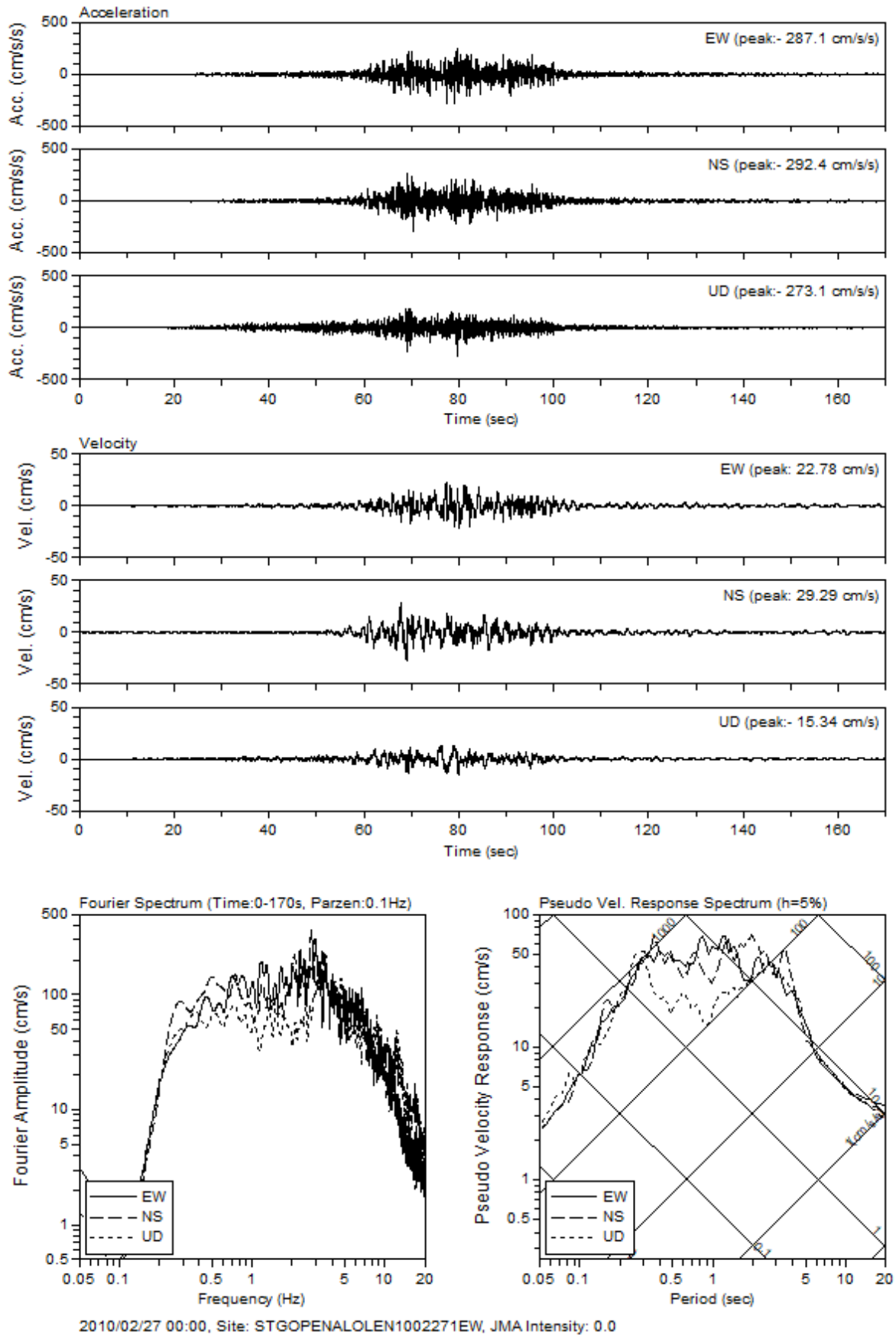


図 2.2.2-85 観測点 Stgopenalolen における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-88

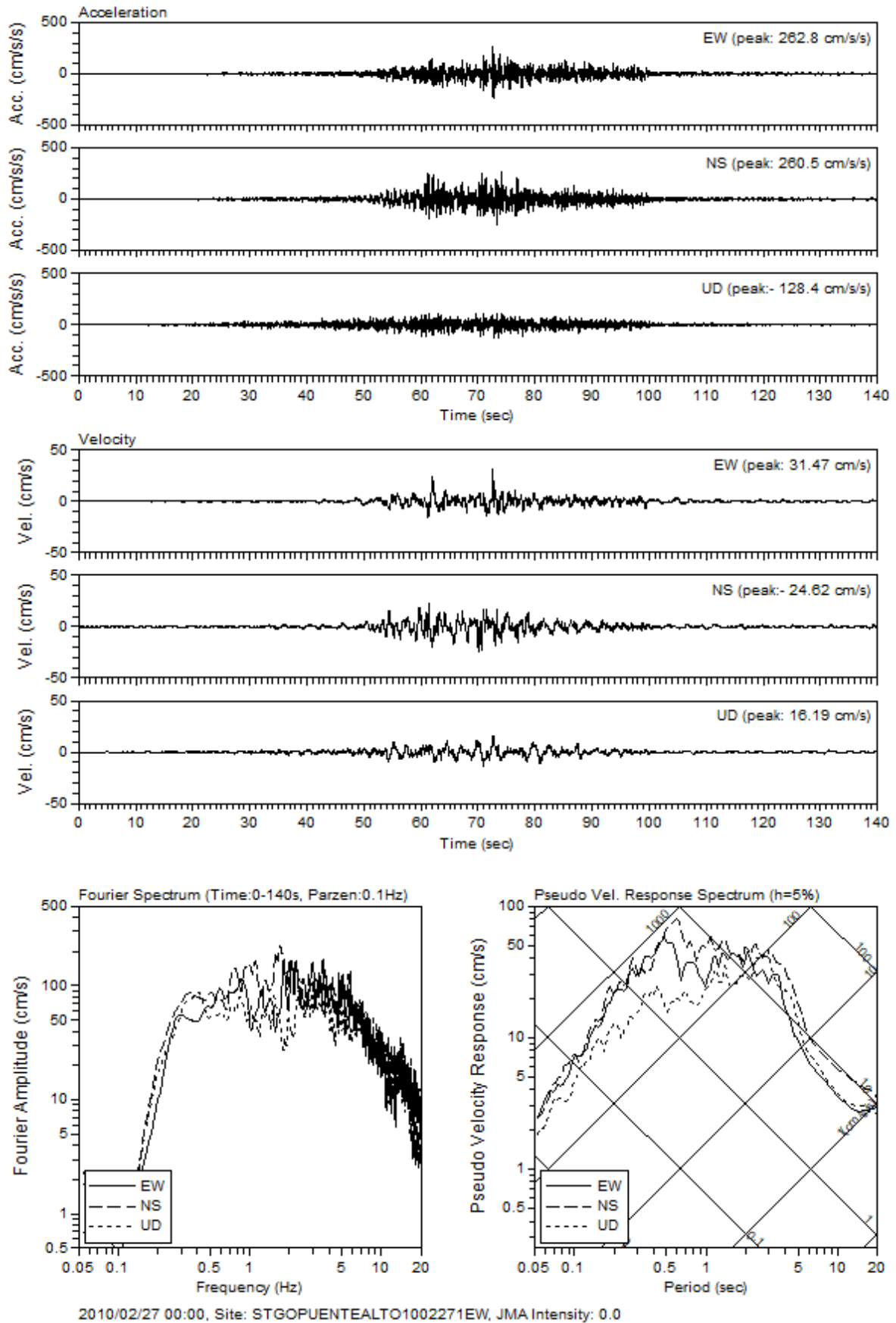


図 2.2.2-86 観測点 Stgopuentealto における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-89

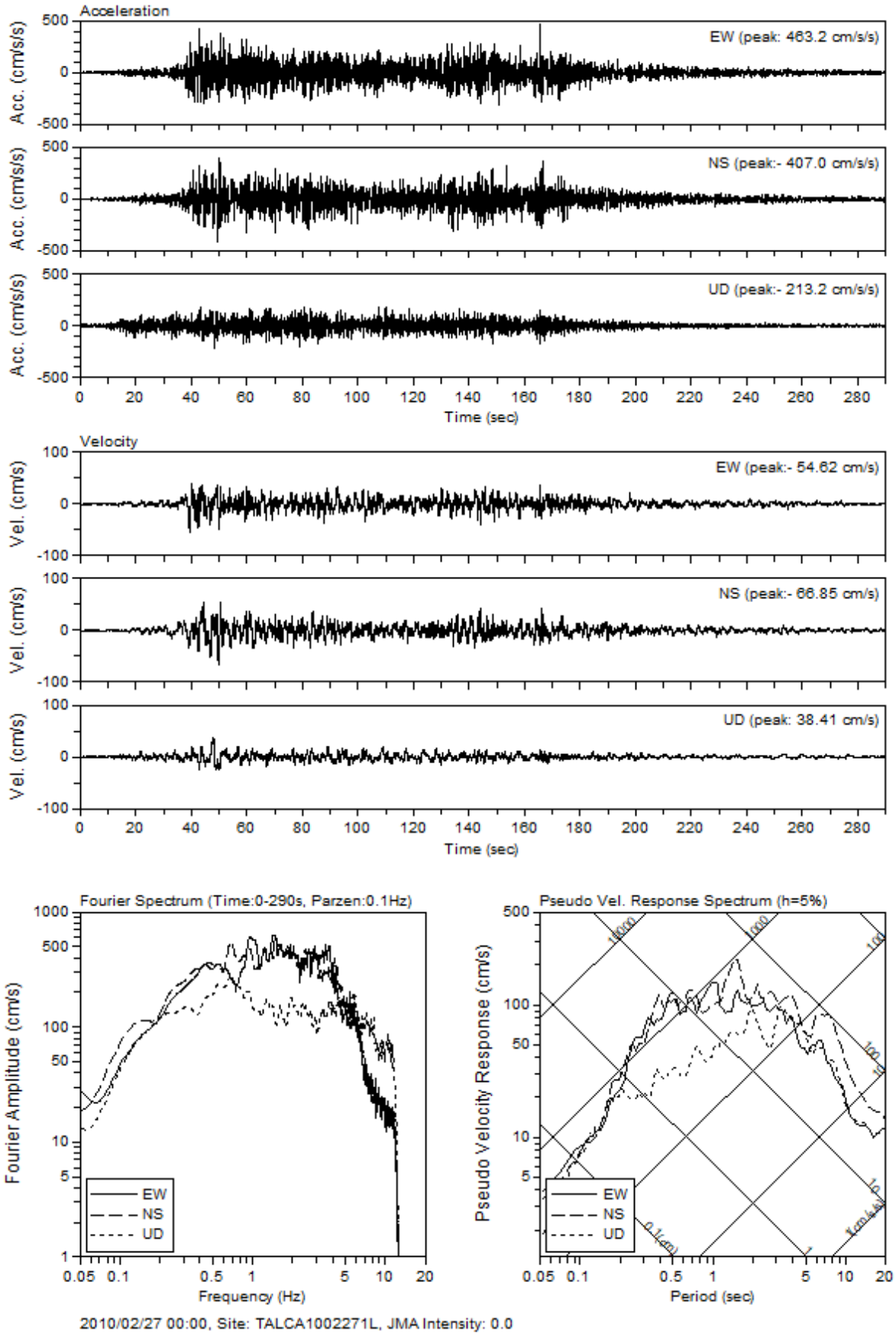


図 2.2.2-87 観測点 Talca における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-90

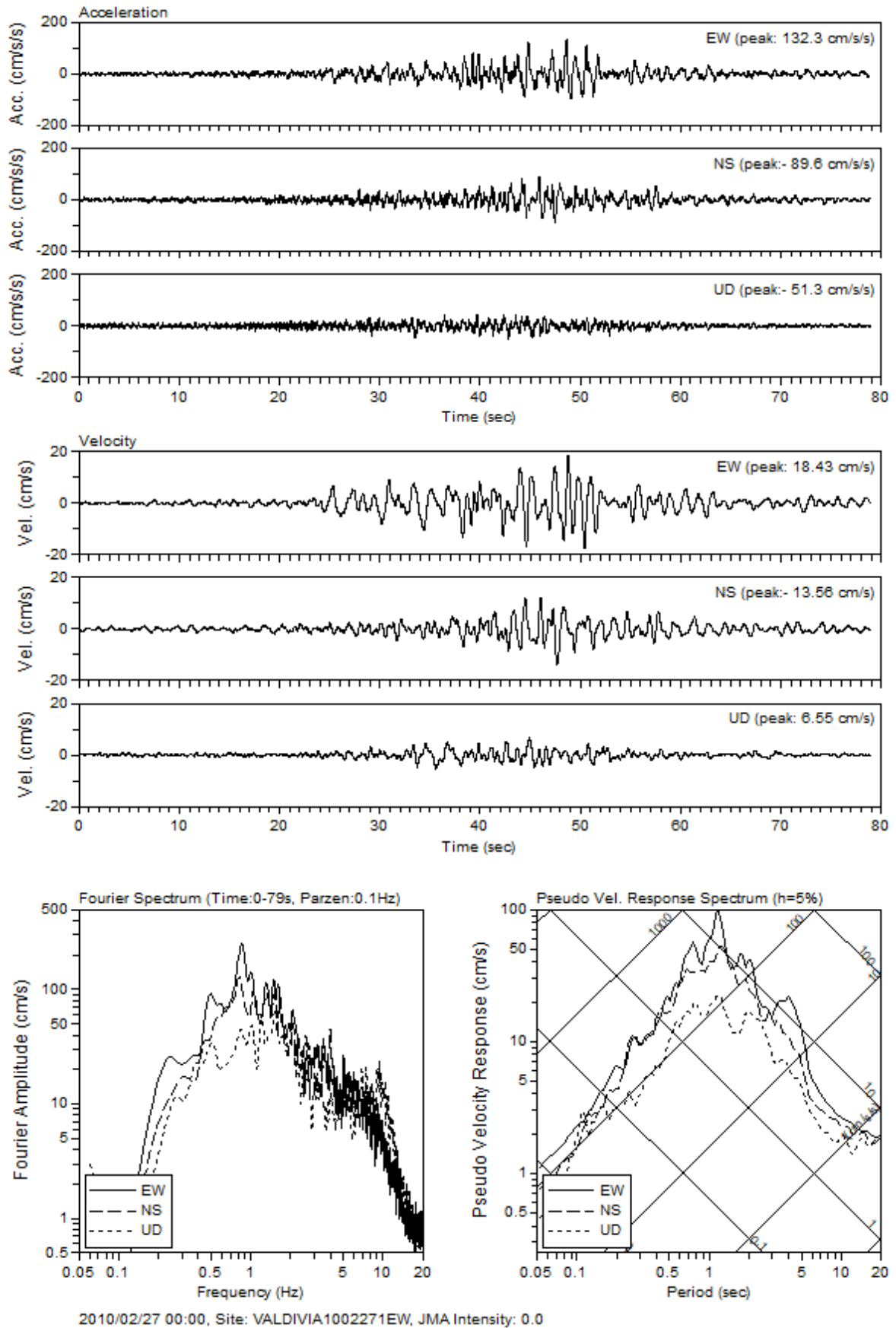


図 2.2.2-88 観測点 Valdivia における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-91

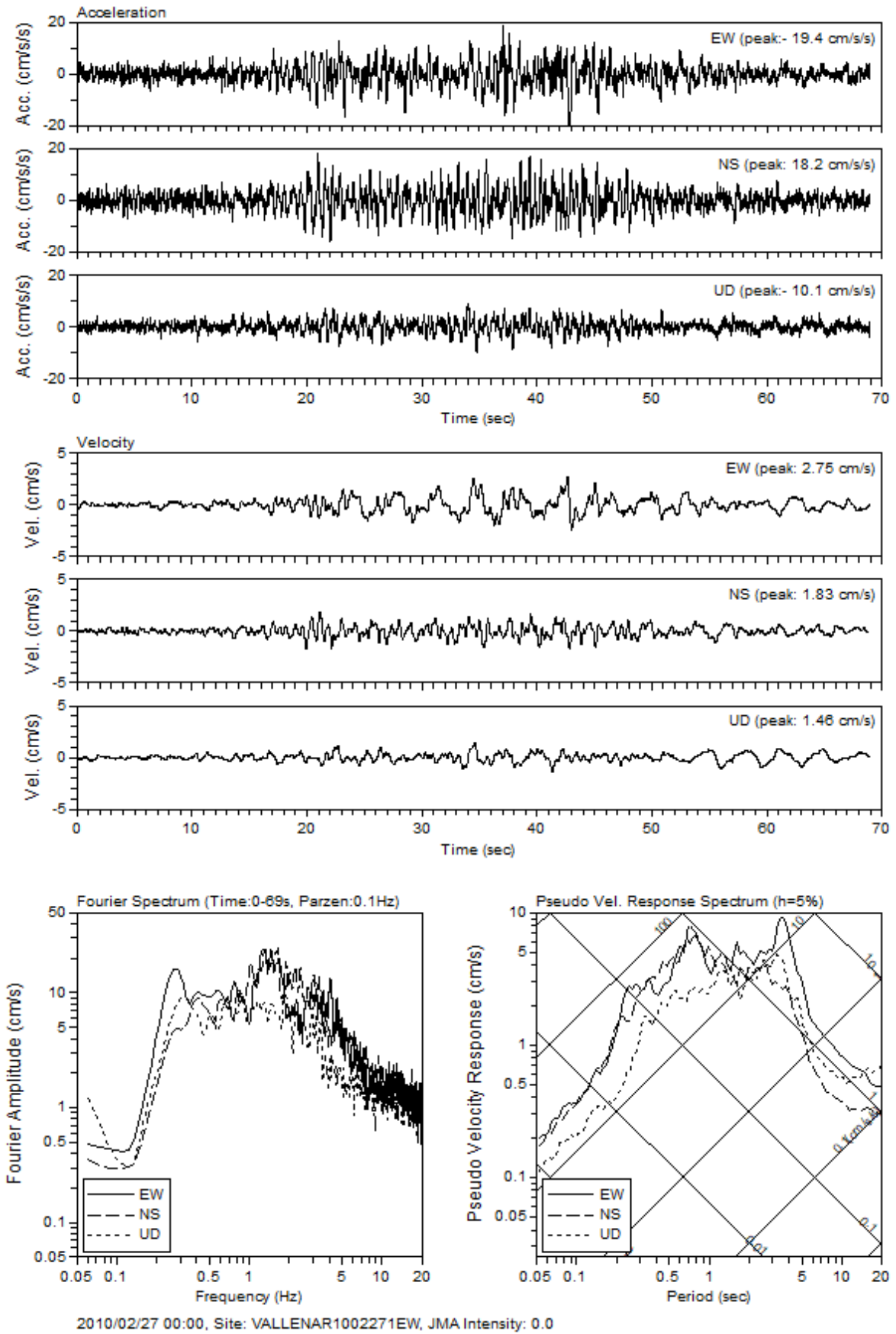


図 2.2.2-89 観測点 Vallenar における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-92

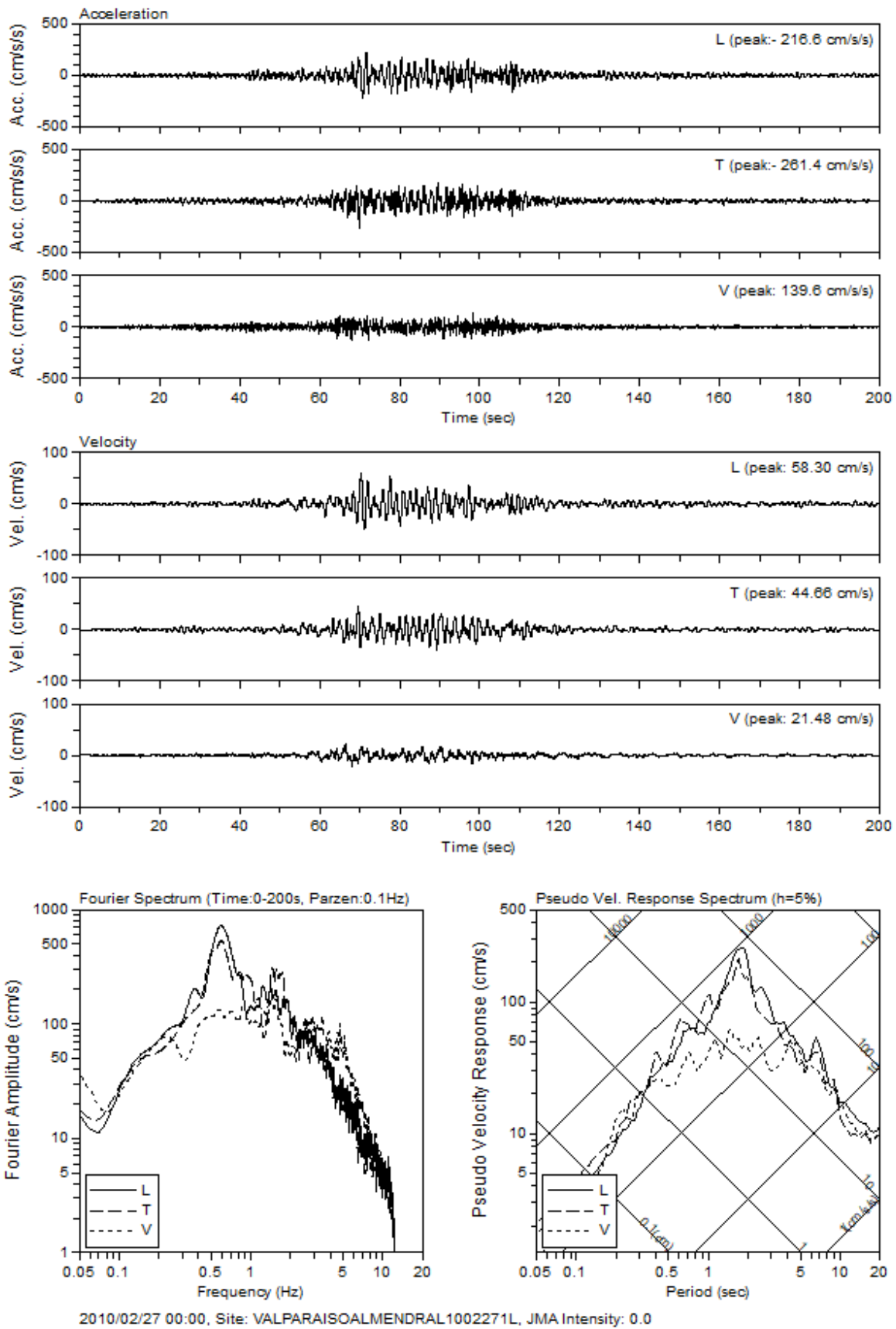


図 2.2.2-90 観測点 Valparaisoalmendral における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル

2.2.2-93

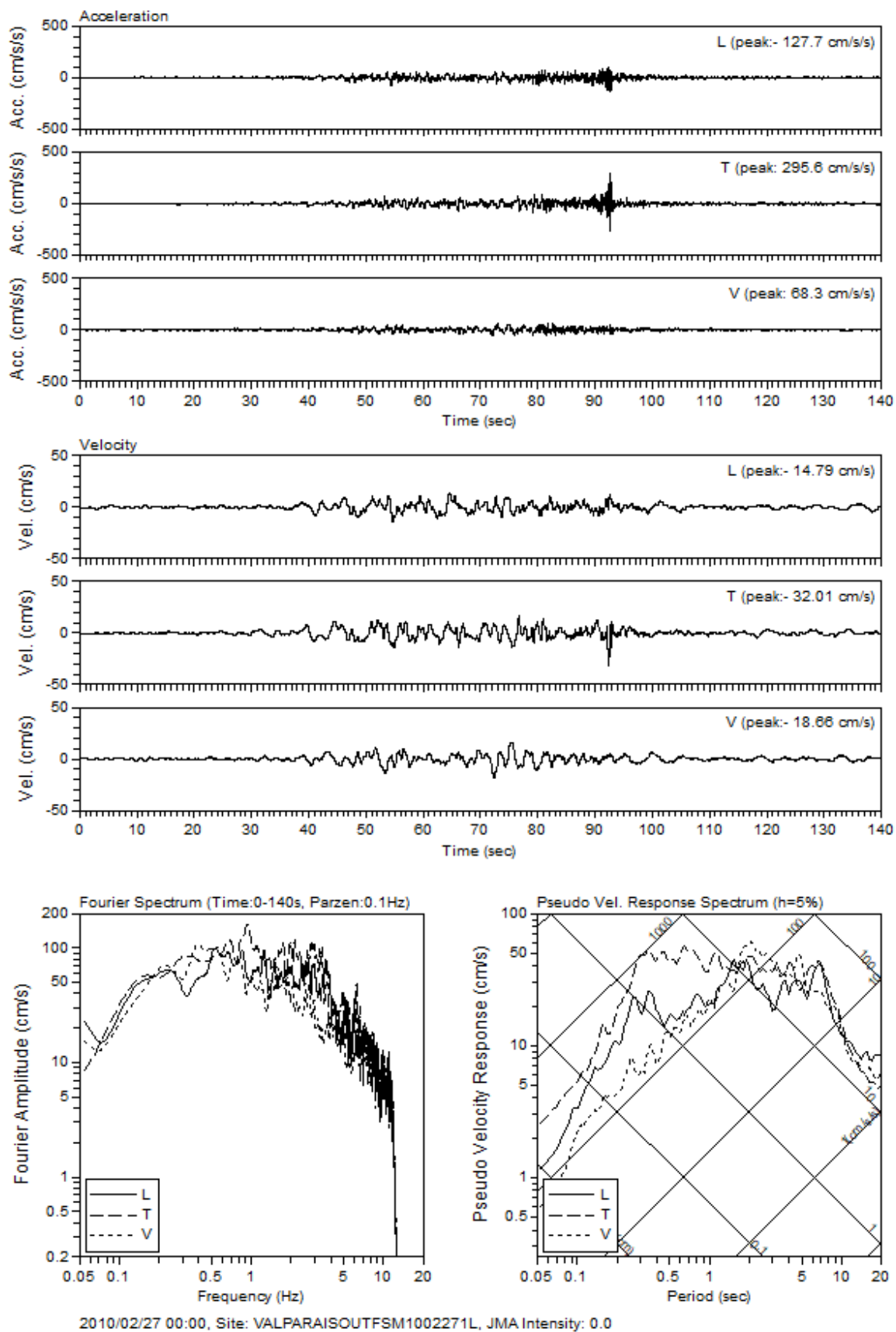


図 2.2.2-91 観測点 Valparaisoutfsm における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクト

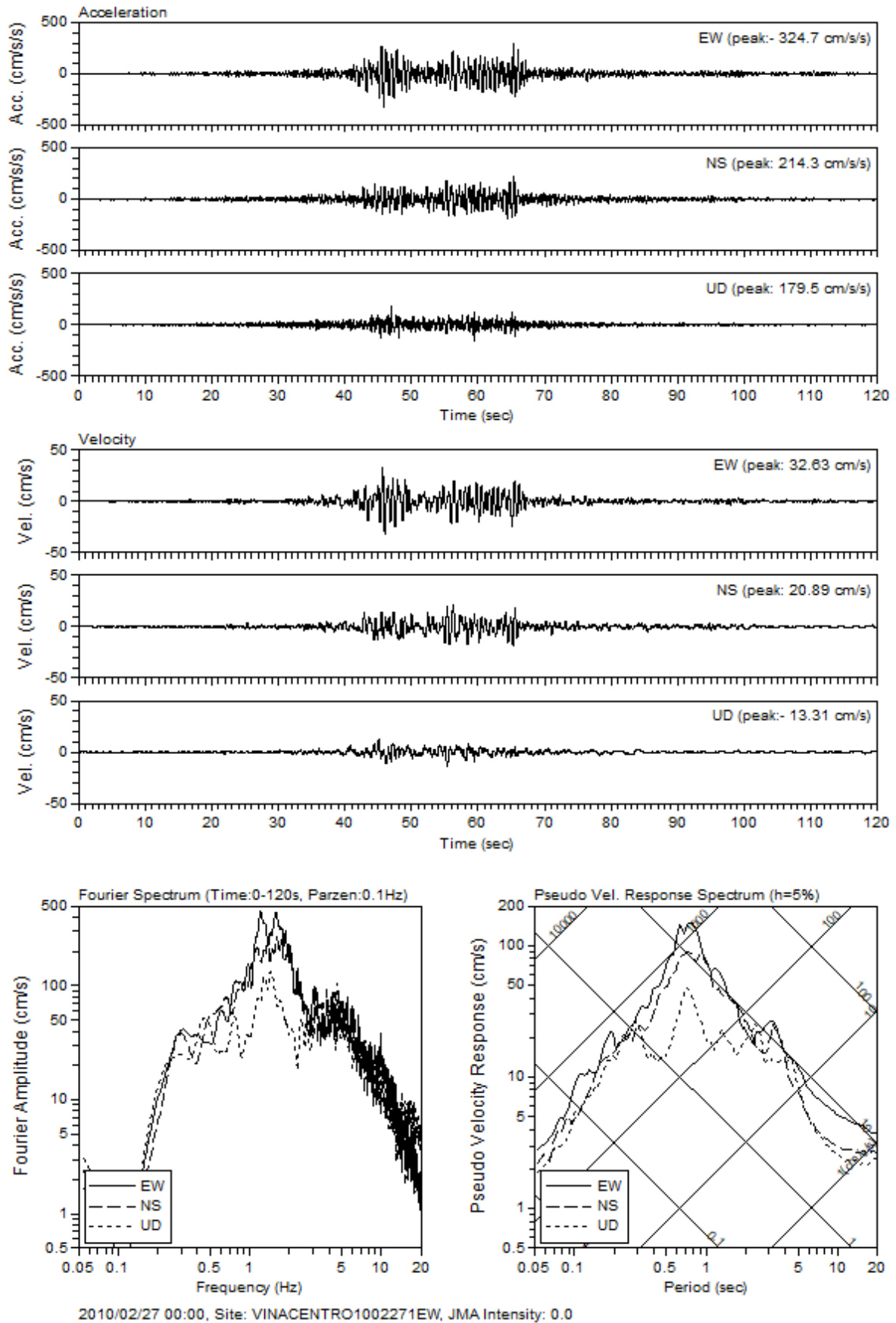


図 2.2.2-92 観測点 Vinacentro における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-95

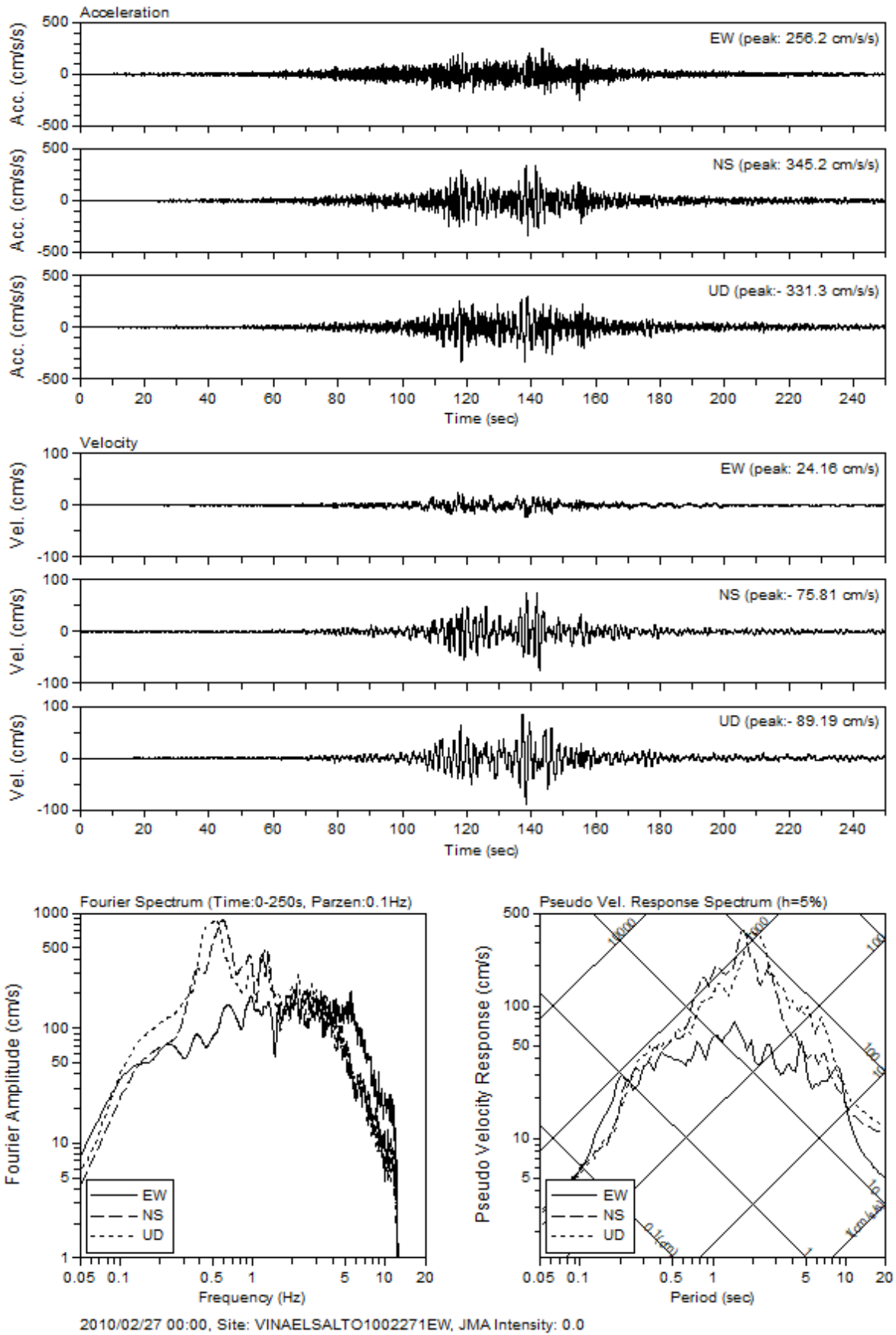


図 2.2.2-93 観測点 Vinaelsalto における加速度、速度波形とフーリエ・速度応答スペクトル
2.2.2-96

2.2.3 2014年チリ Iquique 地震の長周期インバージョン解析

(1) はじめに

2014年チリ Iquique 地震は、2014年4月1日23時46分（世界標準時）に、チリ北部沿岸部 Iquique 市の北西約 90 km の沖合の、南米プレートとそれに沈み込む Nazca プレートの境界で発生したプレート間地震である。Harvard 大学の GCMT (Global Centroid Moment Tensor) 解による M_w は 8.1 である。地震の規模のわりに犠牲者が 6 名と少なかったものの、2500 棟以上の建物に強震動によると考えられる深刻な被害が出た (CNN.co.jp, 2014)。

この地震の特徴として、震源域に比較的近い地域において比較的密な地震観測ネットワークが展開されており、それによって多数の良質な強震動記録が得られている点が挙げられる。これらの観測記録を用いて震源の破壊過程を推定することは、この地震の強震動生成メカニズム、ひいては沈み込み境界型巨大地震の震源特性の検討に大いに資する。

ここではまず、観測記録の長周期成分を用いて、マルチタイムウィンドウ・線形波形インバージョン (Hartzell and Heaton, 1983) により、この地震の震源破壊の時空間的すべりモデルを求めた。同様な手法による震源インバージョンは 2.2.1 で述べたように、Suzuki *et al.* (2016) などによって実施されているが、本研究では実際のプレート境界の三次元形状により即した震源断層面を設定したうえで、より高精度化されたグリーン関数を用いて解析を行った。

(2) 断層モデル化の方法

解析にあたり、アメリカ地質調査所 (USGS) による本震発生後 24 時間以内の余震分布を参考に、strike 方向に 170 km, dip 方向に 140 km の断層面を設定した (図 2.2.3-1a)。この断層面を $10 \times 10 \text{ km}^2$ の小断層に分割し空間的な離散化を行った。各小断層は、Hayes *et al.* (2012) の三次元構造モデル (Slab1.0 ; 図 2.2.3-1a) をもとにプレート境界面に沿うように配置され、その深さは最浅部で約 16 km, 最深部で約 62 km である (図 2.2.3-1b)。なお、この地域の地震発生帯 (seismogenic zone) の上限は深さ 10-15 km 程度、下限は海洋性地殻・大陸性モホ面の交差部の深さ 50 km 付近とされるが (e.g., Oleskevich *et al.*, 1999; Masson *et al.*, 2000; Yuan *et al.*, 2000), 設定した断層面の上端および下端の地震発生帯との対応に関しては、今後の検討課題とする。グリーン関数を計算する際の strike および dip 角は、断層面設定と同様にプレート境界面の三次元形状を考慮し、小断層ごとに異なるも

のを与えた。strike 角は 334-350°の間 (図 2.2.3-1c), dip 角は深さが増すにつれて急激になり, 最浅部の小断層で約 12°, 最深部の小断層で約 24°である (図 2.2.3-1d)。破壊開始点 (図 2.2.3-1 中の黄色星) の経度・緯度は USGS と同様, 西経 70.769°, 南緯 19.610°とした。解析では, 破壊フロントが破壊開始点から同一の破壊伝播速度で断層面上を広がると仮定し, 各小断層においては, 破壊フロントが到達する時刻から 2.5 秒間隔にパルス幅 5 秒の smoothed ramp 関数を 7 個並べることですべり時間関数を表現した。各小断層のすべり角は非負条件 (Lawson and Hanson, 1974) を用いて, $90^\circ \pm 45^\circ$ の範囲内に拘束した。また, 時空間的に隣り合うすべりを平滑化する拘束条件 (e.g., Sekiguchi *et al.*, 2000) も付加した。破壊伝播速度および時空間的平滑化の強さは赤池ベイズ情報量基準 (ABIC; Akaike, 1980) を参考に決定した。

(3) インバージョンの波形データ

Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile (チリ大学地震観測センター; <http://evtdb.csn.uchile.cl/>) より, 破壊開始点から約 300 km 以内にある 17 観測点 (図 2.2.3-1a 中の三角) 51 成分の加速度波形を入手した。これらを一回積分して速度波形に直し, 0.03-0.20 Hz のバンドパスフィルターを施し, 1 Hz にリサンプリングしたものを解析に使用した。使用データの時間長は, 震源域から遠方の観測点 PB03, PB04, PB07 および PB09 で P 波到達時刻から 110 秒間, それ以外の観測点で同 100 秒間である。図 2.2.3-2 に, 17 観測点における生波形と解析に使用した波形を示す。

(4) グリーン関数およびその高精度化

震源インバージョンをより精度良く行うには, 地下構造を適切に反映した速度構造モデルに基づいて計算されるグリーン関数の使用が望ましい。そこで, 本震の震源域で起きた中規模地震の観測波形の時刻歴に対するシミュレーションを行い, 震源インバージョンに使用する一次元水平成層構造モデルを調整した。

初期モデルは Husen *et al.* (1999) による, 16 層からなる一次元 P 波・S 波速度構造モデル (表 2.2.3-1) である。密度 ρ (g/cm³) および Q 値は Brocher (2008) の変換式

$$\rho = 1.6612V_p - 0.4721V_p^2 + 0.0671V_p^3 - 0.0043V_p^4 + 0.000106V_p^5$$

$$Q_s = -16 + 104.13V_s - 25.225V_s^2 + 8.2184V_s^3, \quad Q_p = 2Q_s$$

を用いて与えた。なお, このモデルには S 波速度の遅い (約 2 km/s 以下) 堆積層は含まれ

ていない。このモデルに代表されるように、本研究の対象領域であるチリ北部では、堆積層が全体的に薄く、震源インバージョンが対象とする 0.20 Hz 以下（周期 5 秒以上）の帯域の波形への堆積層の影響は非常に限定的であると考えられる。

構造モデルの調整に用いた中規模地震は、2014 年 3 月 23 日 18 時 20 分（世界標準時）に本震の破壊開始点付近で発生した M_w 6.2 (GCMT) の地震（図 2.2.3-1a 中の緑色星）である。表 2.2.3-2 にこの地震の諸元を示す。チリ大学地震観測センターより入手した 7 観測点（図 2.2.3-1a 中の赤三角）の加速度波形を速度波形（0.05-0.20 Hz ; 4 Hz リサンプリング）に変換し、 P 波到達時刻 5 秒前から 45 秒間切り出したものをデータとした。Pitarka *et al.* (2004) のフィッティング指標 f :

$$f = 2 \frac{\int u(t)_{\text{obs}} u(t)_{\text{syn}} dt}{\int u(t)_{\text{obs}}^2 dt + \int u(t)_{\text{syn}}^2 dt}$$

をもとに、上部地殻に相当する浅部 6 層（表 2.2.3-1 中の灰色部分）の層厚を保持したまま、各層の S 波速度を未知パラメータとして 1.99-3.74 km/s の間で 0.05 km/s 刻みでグリッドサーチにより調整した。ただし、上式での $u(t)_{\text{obs}}$, $u(t)_{\text{syn}}$ はそれぞれ、観測波形と理論波形の時刻歴を表す。 S 波速度に対する P 波速度は初期モデルの V_P/V_S 比を、密度および Q 値は初期モデルと同様に Brocher (2008) を用いて自動的に算出した。理論波形の計算は smoothed ramp 型のすべり時間関数を持つダブルカップル点震源を仮定し、離散化波数法 (Bouchon, 1981) と反射・透過係数行列法 (Kennett and Kerry, 1979) で計算した。

構造調整の結果を図 2.2.3-3 に、各観測点の観測と理論波形の比較を図 2.2.3-4 に示す。図 2.2.3-3 から、第 1 層（T09A のみ第 1 層と第 2 層）は S 波速度の遅いほうに、逆にそれ以外の深部の層は S 波速度の速いほうに調整されるという、全観測点に共通する傾向が読みとれる。また、図 2.2.3-4 から、調整後のモデルによる理論波形は調整前のものに比べて、観測波形に対する再現性が向上している。震源インバージョンのグリーン関数の計算において、この 7 観測点は調整後のモデルを、残り 10 観測点（図 2.2.3-1a 中の黒三角）は初期モデルを使用した。

(5) 震源インバージョンの結果

図 2.2.3-5 の ABIC をもとに、図 2.2.3-6a に示すすべり変位分布を最適解として採用した。なお、ABIC が最小となる平滑化の強さが一意的に決まらなかったため、ここでは ABIC の減少が緩やかになるところを最適と見なした（図 2.2.3-5a）。この最適解による破壊フロ

ントの破壊伝播速度は 3.0 km/s である (図 2.2.3-5b)。また、解放された地震モーメントは 1.7×10^{21} Nm (M_w 8.1) であり、これは GCMT 解 (1.9×10^{21} Nm) や既往研究 (例えば Suzuki *et al.* (2016) は 2.4×10^{21} Nm) と同程度の値である。最大すべり変位は 3.6 m で、破壊開始点の南側に求められた (図 2.2.3-6)。

図 2.2.3-7 に示す各小断層のすべり時間関数に基づき、すべり破壊の時空間発展の 6 秒ごとのスナップショットを図 2.2.3-8 に描く。24-30 秒のスナップショットから、主要なすべり破壊が南側へ、浅い側と深い側に分かれて進展する様子が見てとれる。浅い側へ進展したすべり破壊はその後再び深い方向へ転向し (30-42 秒)、最大すべり変位を作り出している。30-42 秒に見られるような断層傾斜方向を伝播するすべり破壊は、この地震の大きな特徴の一つである。

表 2.2.3-3 にインバージョン結果から抽出された断層パラメータをまとめる。なお、表には、Murotani *et al.* (2008) に倣って平均すべり変位の 1.5 倍以上の小断層を大すべり域と定義した場合と、Somerville *et al.* (1999) の規範に従って矩形の大すべり域を抽出した場合の両方を示している。それぞれの場合での大すべり域を図 2.2.3-9 に示す。両者によって抽出された大すべり域の面積はほぼ同程度であった。断層全体の平均静的応力降下量は 1.5 MPa であるが、これは Murotani *et al.* (2008) がまとめた沈み込み境界型地震の平均的な値 (1.4 MPa) と整合的である。図 2.2.3-10 に、断層面積および Murotani *et al.* (2008) で定義した場合の大すべり域面積・平均すべり変位の地震モーメントとの関係を示すが、いずれのパラメータの値も Murotani *et al.* (2013) や Skarlatoudis *et al.* (2016) による経験的スケールリング則と整合的である。また、図 2.2.3-6a のすべり変位分布から分かるように、比較的大きなすべり破壊は浅部では海溝軸付近、一方、深部ではこの地域の地震発生帯の下限である深さ 50 km 付近 (e.g., Oleskevich *et al.*, 1999; Masson *et al.*, 2000; Yuan *et al.*, 2000) に達している。このことから、この地震は 2-stage scaling model (田島・他, 2013) の 2 段階目の地震であると考えられる。田島・他 (2013) は 2 段階目における断層幅の飽和値を 180-200 km 程度としているが、本研究で設定した断層面 (幅 140 km) および得られたすべり変位分布の結果から、断層幅がより小さい値で飽和している可能性が示唆される。

(6) 考察

まず、本研究と同じく強震動記録の長周期成分を用いて解析を行った Suzuki *et al.* (2016) の結果 (図 2.2.3-6b) と比較する。Suzuki *et al.* (2016) では、破壊開始点南側において断層

面深部のすべり変位（約 3 m）が浅部（8 m 以上）の 1/3 程度にとどまっていたのに対して、本研究では 1/1.25-1/1.5 程度と深部のすべり（2.0-2.5 m 程度）が浅部（約 3 m）に対してより明瞭になっている。本研究の解析が対象とする周波数上限は 0.20 Hz で、Suzuki *et al.* (2016) の 0.125 Hz に比べて高い。より高周波数の波形データを解析に含めることが深部のすべりの明瞭化につながっていると言える。これを裏付けるように、すべり時間関数（図 2.2.3-7）に着目すると、明瞭になった深部の小断層における、すべり速度のピークを作り出している主要パルスの時間幅が浅部に比べて短い傾向にある。つまり、深部のすべりが高周波数の地震動をより強く生成していると考えられる。Lay *et al.* (2012) などによれば、M8 クラス以上の沈み込み境界型巨大地震の多くに、放射される地震波の周波数の深さ依存性が認められ、断層面深部は浅部に比べて高周波数の地震動がより大きなレベルで生成される。この地震においても、同様な深さ依存性が存在する。

次に、Somerville *et al.* (1999) の手順に従って抽出した 3 個の大すべり域（図 2.2.3-9 中の太い四角）の、インバージョン波形（0.03-0.20 Hz）への寄与を調べた（図 2.2.3-11）。破壊開始点南側の深部と浅部にある大すべり域をそれぞれ A1, A2 とし、北側の海溝軸付近に位置する大すべり域を A3 とする。A1 は、震源域に比較的近い観測点（例えば T07A）での波形の最初の部分に見られる、やや短周期のフェーズを説明している。このフェーズは加速度波形の最も大きい振幅を持つ部分（図 2.2.3-12）に対応している。また、A1 の中心位置を Meng *et al.* (2015) が 1-10 Hz の強震動記録を用いて推定した強震動生成点（SMGP；図 2.2.3-11 地図中の灰色星）と比較したところ、strike 方向では両者の位置にずれが見られるものの、dip 方向では良く一致している。A2 はほとんどの観測点に見られる、少し遅れて到達する継続時間の長いフェーズを説明している。このやや遅れて到達するフェーズはパルス幅の長いすべり時間関数を持つ小断層から生成されており（図 2.2.3-7）、加速度波形の大きな振幅への寄与は相対的に小さい（図 2.2.3-12）。一方、A3 の波形への寄与は A1 および A2 に比べると全体的にやや小さい。この地震の場合、解析に使用可能な観測点が破壊開始点の南側に集中し、破壊開始点北側の特に海溝軸寄りでは解の分解能が低い（Liu *et al.*, 2015）。したがって、A3 は解析上の見かけのすべりである可能性があることに留意したい。

(7) 長周期地震動のための特性化震源モデル

ここでは、震源インバージョン結果に基づいて特性化震源モデルを構築し、本項が対象

とする長周期 (0.03-0.20 Hz) 地震動の再現を試みた。なお、波形計算の手法と速度構造モデルはインバージョンの際と同じである。

特性化震源モデルの地震モーメントはインバージョン結果と同じにした。断層面の位置および形状もインバージョンと同じであるが、剛性率はインバージョンと異なり、深さに寄らずに一様とした。断層面は、背景領域と (6) で抽出した 3 個の大すべり域から構成されるとし、それらの断層パラメータを表 2.2.3-4 にまとめる。なお、各小断層のパラメータ抽出にあたり、ライズタイムは付録に示す方法を用いて、破壊伝播速度は、隣接する小断層の破壊開始時刻の差分を取ること (宮腰・他, 2017) でそれぞれ算出した。また、各小断層のすべり時間関数の形は、smoothed ramp 型とした。表 2.2.3-4 から、(6) で議論したように、深部の大すべり域 A1 の平均ライズタイムは浅部の A2 と A3 に比べて確かに短くなっている。

この特性化震源モデルによる速度波形 (図 2.2.3-13 中の各観測点の上から 3 段目の灰色線) をインバージョン結果による理論波形 (図 2.2.3-13 の上から 2 段目の赤色線) と比較する。図 2.2.3-11 で見たように、大すべり域 A1 の波形への寄与が相対的に大きかった観測点 (PB08~PB01) では、特性化震源モデルによる波形の位相や振幅に対する再現性が比較的良好であった。しかしながら、その他の観測点では、再現性がまだ不十分であることが分かった。

そこで、再現性の改善につながる断層パラメータの複雑性または不均質性を調査すべく、各小断層の (a) 破壊伝播速度・破壊開始時刻 (b) すべり時間関数の形状・ライズタイム (c) すべり角 (d) 剛性率・すべり変位の 4 種類のパラメータをそれぞれ、特性化震源モデルの設定からインバージョン結果そのものへ戻し (図 2.2.3-14)、再度波形を計算した。図 2.2.3-13 の上から 4-7 段目にこれら 4 種類の理論波形を示す。図 2.2.3-15 に、インバージョン理論波形に対する各パラメータの複雑さ・不均質を加えた理論波形の速度応答スペクトル (減衰定数 5% ; 3 成分合成値) の比の、全観測点の平均を示す。4 種類の理論波形のうち、破壊伝播速度・破壊開始時刻の複雑さを加えたものが、付与しない特性化震源モデルによる波形再現性が不十分だった観測点の主要フェーズの走時や振幅をもっとも良く説明できた。すべり時間関数の形状・ライズタイムの複雑さを付加しても波形の再現性はやや改善されるものの、短周期側になるに従ってインバージョン理論波形のスペクトル振幅をかなり過大評価してしまっている (図 2.2.3-15 中の青色線)。一方、すべり角および剛性率・すべり変位の不均質を加えた場合、特性化震源モデルそのものによる理論波形やスペ

クトルとの差異は全体的に小さかった。以上のことから、破壊伝播速度・破壊開始時刻の複雑さ、言い換えれば破壊伝播様式の複雑さが地震動を再現するのに重要な影響を及ぼすパラメータであると考えられる。このような破壊伝播様式の複雑性または不均質性の重要性は 2003 年十勝沖地震 (M_w 8.3) に対する検討でも指摘されており (渡辺・他, 2008; Iwaki *et al.*, 2016), 地震動評価においてそれを適切に特性化することが望まれる。

(8) 破壊伝播様式の特性化

(7) において、破壊伝播様式の複雑性の重要性を指摘してきた。ここでは、この地震における破壊伝播様式の複雑性の抽出を試みた。

図 2.2.3-16 に、付録に示す方法で震源インバージョン結果より抽出した破壊到達時刻を示す。(7) で述べたように、大すべり域 A1 の波形への寄与が相対的に大きかった観測点では、特性化震源モデルによる波形再現性が比較的良好であった。これは、A1 内におけるインバージョン結果の破壊伝播方向 (図 2.2.3-16 中の赤色コンター) が特性化震源モデル (図 2.2.3-16 中の緑色コンター) とほぼ同じであることに起因する。一方、大すべり域 A2 の場合、インバージョンから求められた主たる破壊伝播方向は海岸線にほぼ垂直な (西→東) 方向である (図 2.2.3-8 の 24-42 秒; 図 2.2.3-16 中の桃色矢印) のに対して、特性化震源モデルにおけるすべり破壊は海岸線にほぼ平行に (北→南) 伝播しており、両者は大きく食い違っている。特性化震源モデルの波形再現性が良くなかった観測点 (PB08~PB01 以外) では A2 の寄与が大きかったが (図 2.2.3-11, 2.2.3-14), A2 付近で見られる陸域に向かう、断層傾斜方向の破壊伝播およびそれによる directivity 効果が適切にモデル化されなかったことが特性化震源モデルの波形再現性の悪さに直接関係していると考えられる。

そこで、上述した大すべり域 A2 の破壊伝播方向の食い違いを解消すべく試行錯誤した結果、図 2.2.3-17 のように、破壊開始点より背景領域を同心円状に進んだすべり破壊が海溝軸寄りの一番北側に位置する小断層 (図 2.2.3-17 中の青色星) に到達した時刻 (破壊開始から 22.3 秒後) から、A2 のすべり破壊を同小断層より開始させるように、特性化震源モデルの破壊伝播様式を変更した。なお、大すべり域 A1 の破壊伝播様式に関しては、上述のように特性化震源モデルの波形再現性が良好であったため、特性化震源モデルと同じにした。このモデルを改良特性化震源モデルとして、その理論波形を図 2.2.3-18 に示す。計算結果から、特性化震源モデルによる再現 (図 2.2.3-18 の上から 3 段目の灰色線) が困難であった、波形の後半部分に見られる A2 寄与の大振幅 (例えば T09A の 40-60 秒, GO01

の 50-70 秒, PB03 の 60-80 秒など) が, 改良特性化震源モデル (図 2.2.3-18 の上から 4 段目の桃色線) によって説明可能であることを確認した. また, 図 2.2.3-19 に, 改良特性化震源モデルの理論波形による速度応答スペクトル (減衰定数 5%; 3 成分合成値) を示す. スペクトル比の全観測点の平均 (図 2.2.3-19 の一番右下の図) を見ると, インバージョン理論波形のスペクトル振幅に対する説明性は, 特性化震源モデルに破壊伝播様式の複雑さを付与した場合 (図 2.2.3-15 中の緑色線) にはやや及ばないものの, 破壊伝播様式の複雑さを付与しない場合 (図 2.2.3-15 中の灰色線) に周期 10-11 秒で見られた過小評価が大きく改善されているのが分かる.

(9) まとめ

本項では, 強震動記録の長周期成分 (0.03-0.20 Hz) を用いた波形インバージョンにより, 2014 年チリ Iquique 地震の震源破壊の時空間的すべりを推定した. さらに, 推定結果に基づく長周期地震動のための特性化震源モデルを構築し, 波形の再現性について検討した. これらの解析によって得られた知見を以下にまとめる.

1. インバージョン結果から抽出されたこの地震の巨視的断層パラメータの値は, 既往の経験的スケーリング則と整合的である.
2. この地震は, 2-stage scaling model の 2 段階目の地震であると考えられる.
3. この地震に放射地震波の周波数の深さ依存性が認められ, 断層面深部の大すべり域は浅部に比べて高周波数の地震動がより大きなレベルで生成されている.
4. 長周期地震動のための特性化震源モデルにおいて, 破壊伝播様式の複雑さが地震動に重要な影響を及ぼすパラメータである.
5. 海溝軸付近から陸域へ向かう, 断層傾斜方向の破壊伝播およびそれに伴う大すべり域の directivity 効果がこの地震の破壊伝播様式の特徴であり, 長周期地震動の再現にとって, とりわけ振幅の過小評価を防ぐために重要である.

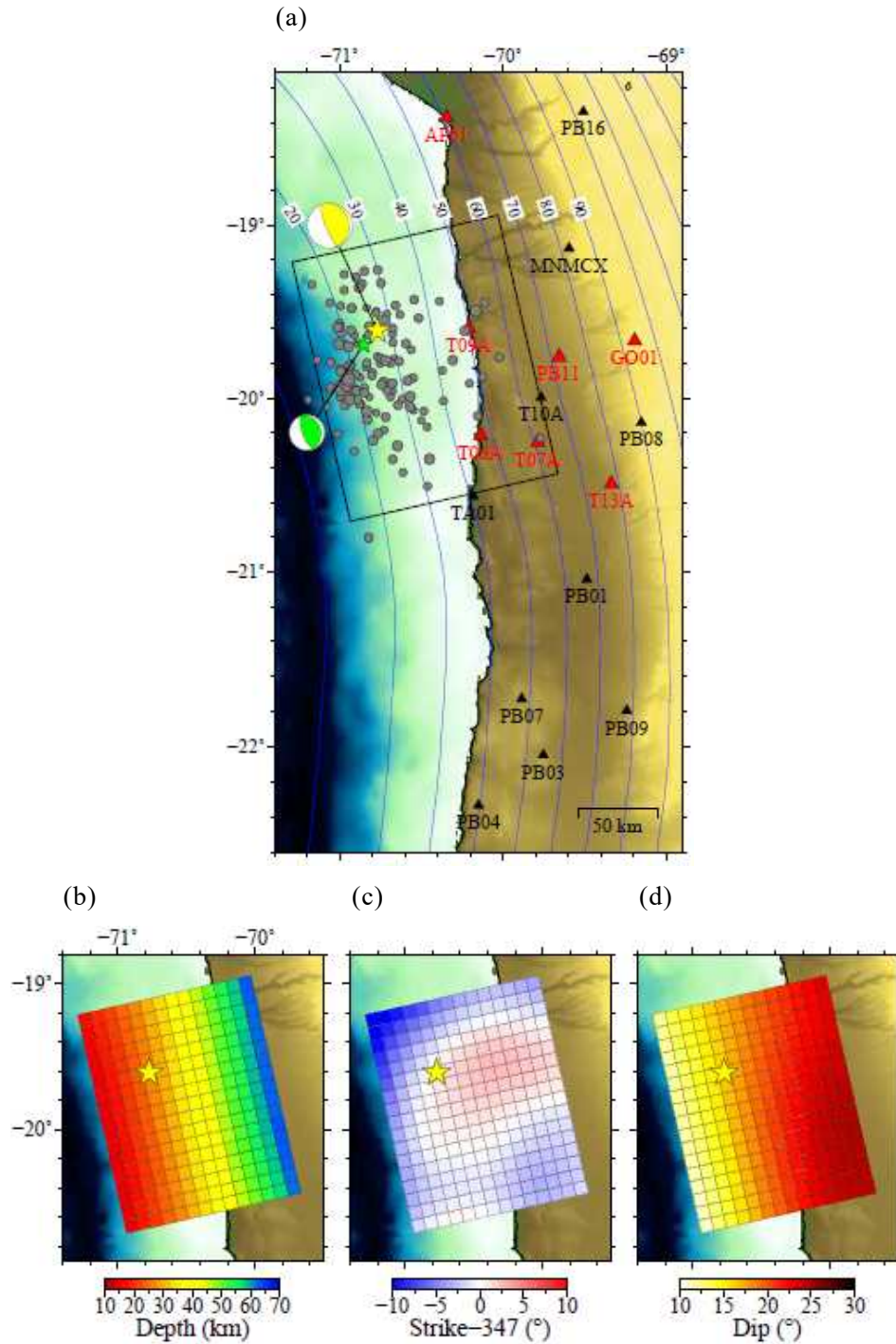


図2.2.3-1 (a) 2014年Iquique地震の震源インバージョンで設定した断層面，および各小断層の (b) 深さ (c) strike角 (d) dip角．黄色星は本震の破壊開始点である．(a) 中のコンターはHayes *et al.* (2012) によるプレート境界の深さ (km) を表し，綠色星は構造モデルの調整に使用した地震の震央，プロットは本震発生後24時間以内の余震の震央であり，黒三角は震源インバージョンの観測点，そのうち赤三角は構造調整を行った観測点である．なお，(b) のstrike角は断層全体の平均角度 (347°) からのずれを図示している．

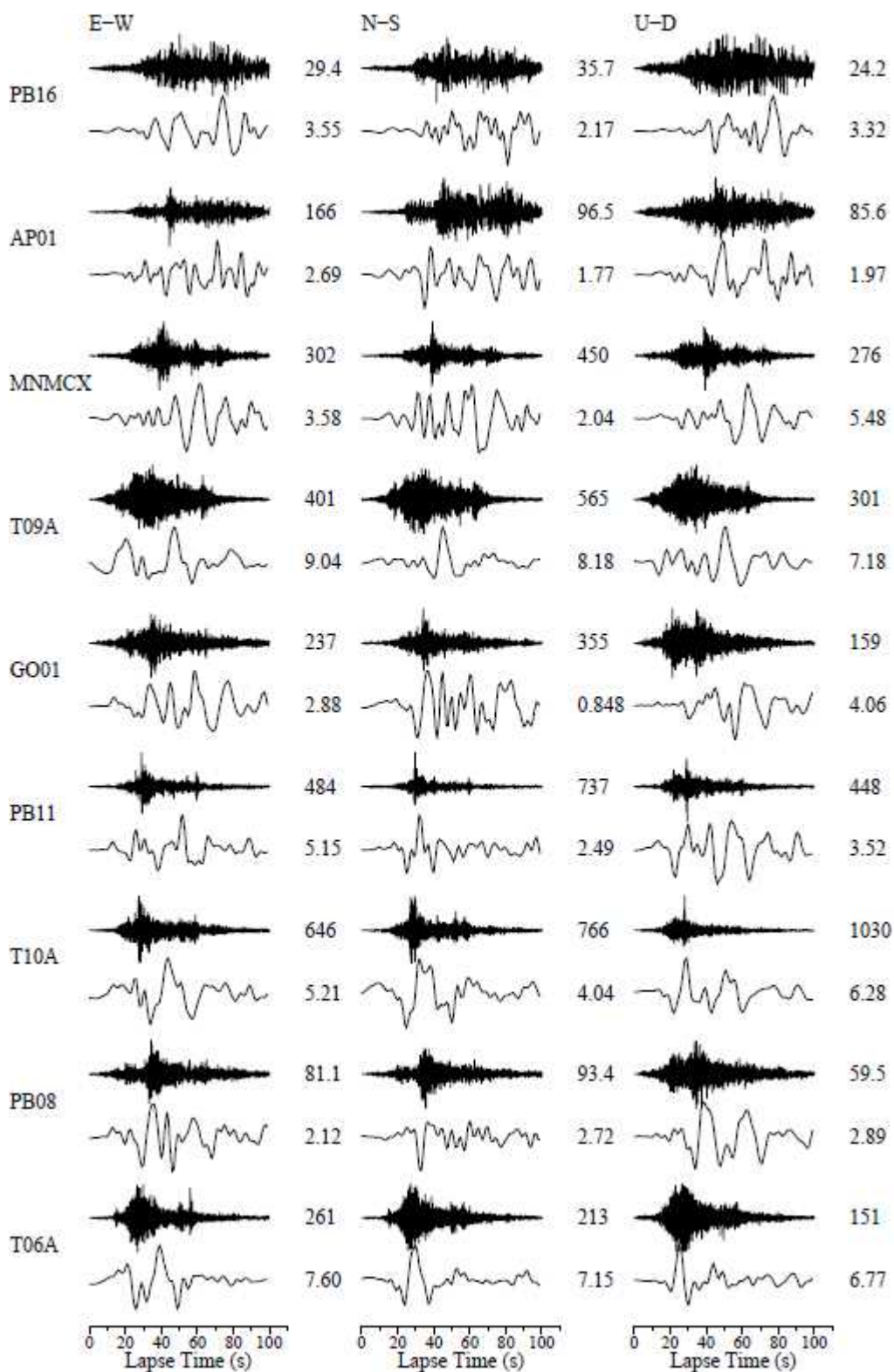


図2.2.3-2 2014年Iquique地震の加速度波形（上段）と震源インバージョンに使用した0.03-0.20 Hzの速度波形（下段）．各波形の右の数字は最大振幅を表し，加速度波形の単位はcm/s/s，速度波形の単位はcm/sである．時刻の0秒は破壊開始時刻である．

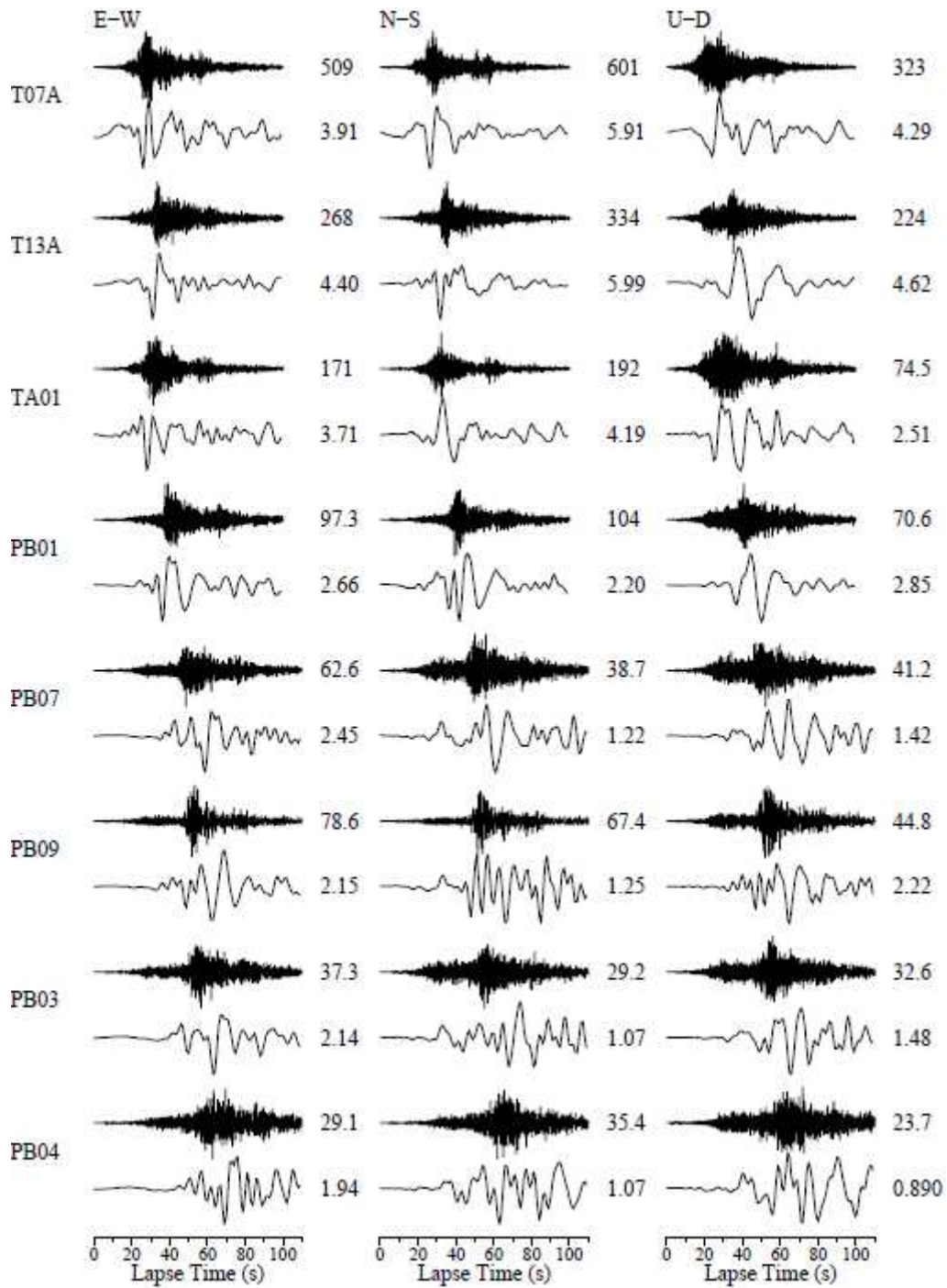


図2.2.3-2 (続き)

表2.2.3-1 構造モデルの調整で使用する初期モデル.

¹ 上面深さ (km)	¹ P波速度 (km/s)	¹ S波速度 (km/s)	¹ V_P/V_S	² 密度 (kg/m ³)	² Q_P	² Q_S
-0.5	5.21	2.99	1.74	2568	580	290
2.5	5.37	3.09	1.74	2595	614	307
4.5	5.55	3.19	1.74	2627	652	326
6.5	5.72	3.29	1.74	2659	692	346
8.5	5.89	3.39	1.74	2693	734	367
10.5	5.98	3.44	1.74	2712	756	378
15.0	6.80	3.75	1.81	2912	906	453
20.0	6.81	3.88	1.76	2915	976	488
25.0	6.95	3.94	1.76	2954	1010	505
30.0	6.98	4.05	1.72	2962	1076	538
35.0	7.11	4.11	1.73	3000	1112	556
40.0	7.41	4.18	1.77	3092	1158	579
45.0	7.69	4.30	1.79	3184	1238	619
50.0	8.05	4.39	1.83	3309	1300	650
60.0	8.48	4.73	1.79	3468	1564	782
70.0	8.48	4.78	1.77	3468	1606	803

1: Husen *et al.* (1999) 2: Brocher (2008)

表2.2.3-2 構造モデルの調整で使用する地震の諸元.

¹ 経度	70.854°W
¹ 緯度	19.690°S
¹ 震源深さ	21.0 km
² strike	N350°E
² dip	21°
² rake	100°
² 地震モーメント	2.89×10^{18} Nm (M_w 6.2)
² すべり時間関数	ライズタイム 6.4 s

1: USGS 2: GCMT

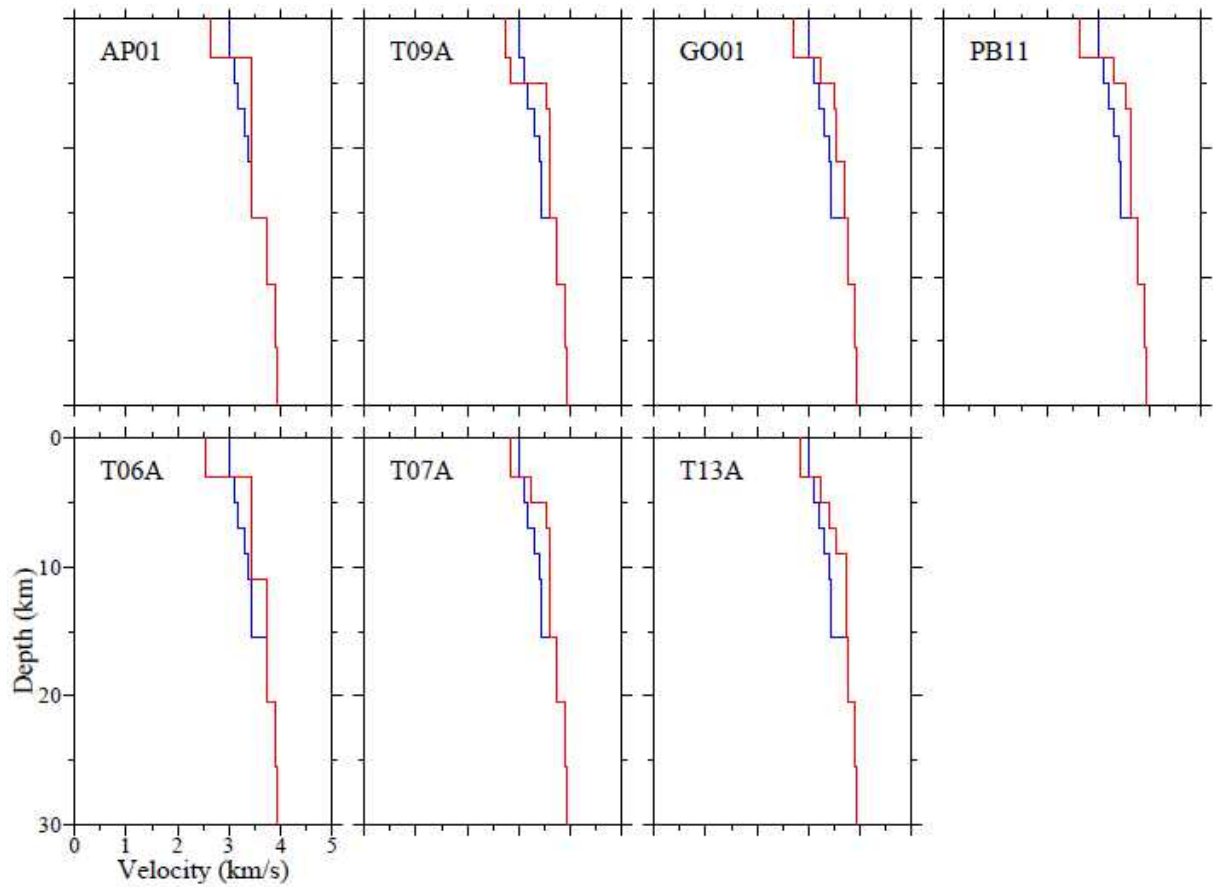


図2.2.3-3 構造モデルの調整結果. 青色は初期モデルの, 赤色は調整後の一次元S波速度構造モデルを表す.

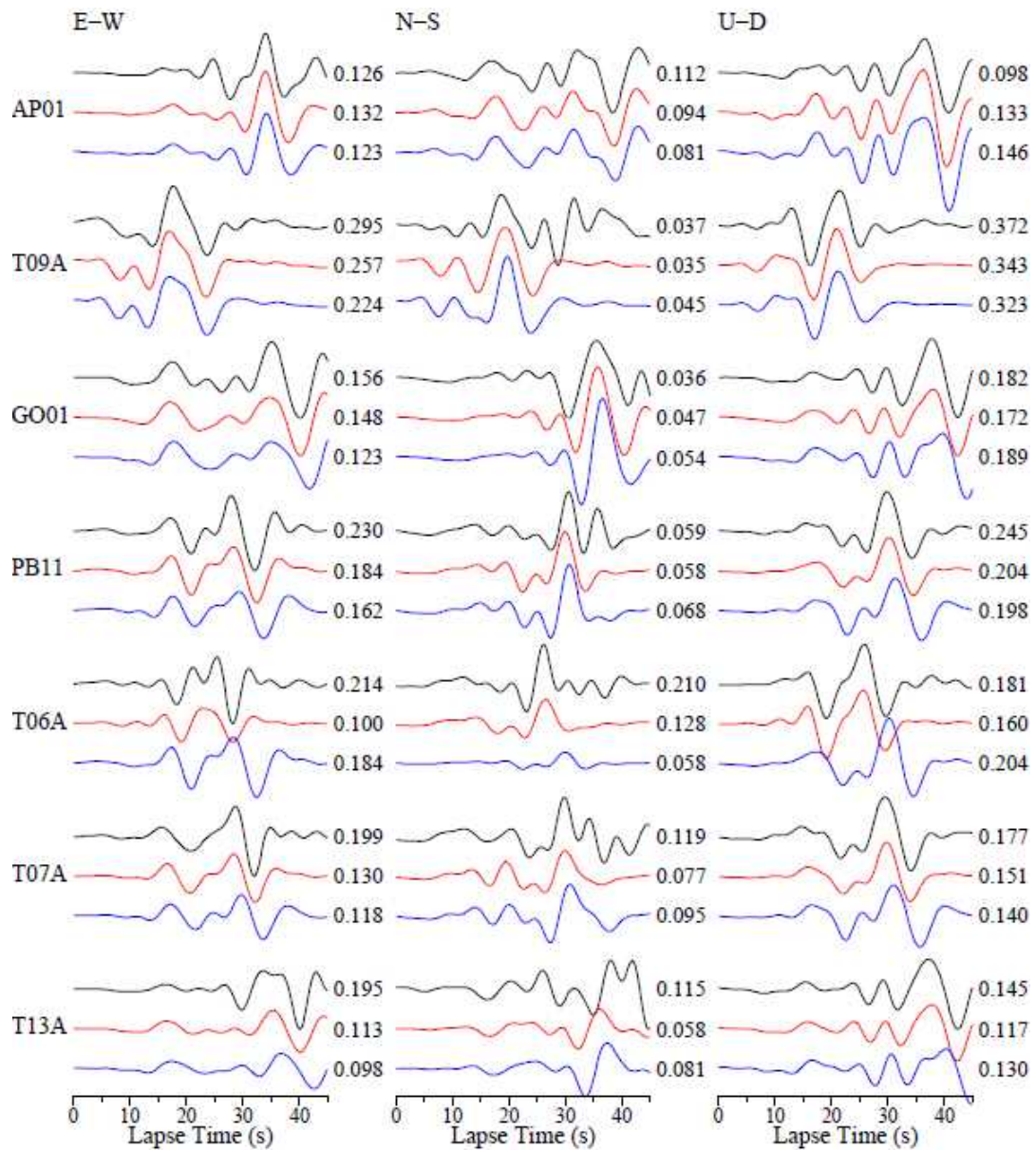


図2.2.3-4 構造モデルの調整を行った観測点での、2014年3月20日の地震 (M_w 6.2) の速度波形 (0.05-0.20 Hz) の比較. 黒色は観測波形, 赤色は調整後モデルによる理論波形, 青色は初期モデルによる理論波形である. 各波形の右の数字は最大振幅を表し, 単位はcm/sである.

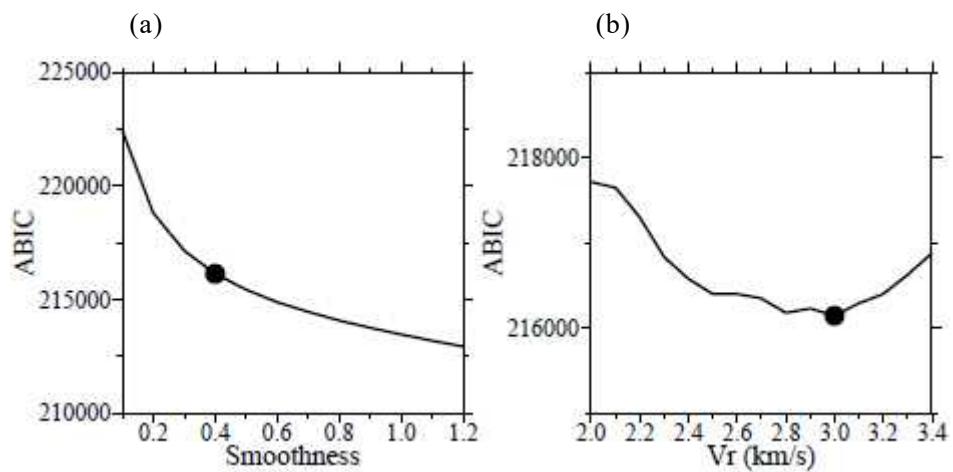


図2.2.3-5 最適決定における (a) 時空間的平滑化の強さおよび (b) 破壊フロントの破壊伝播速度のABICとの関係. 黒丸は最適解を表す.

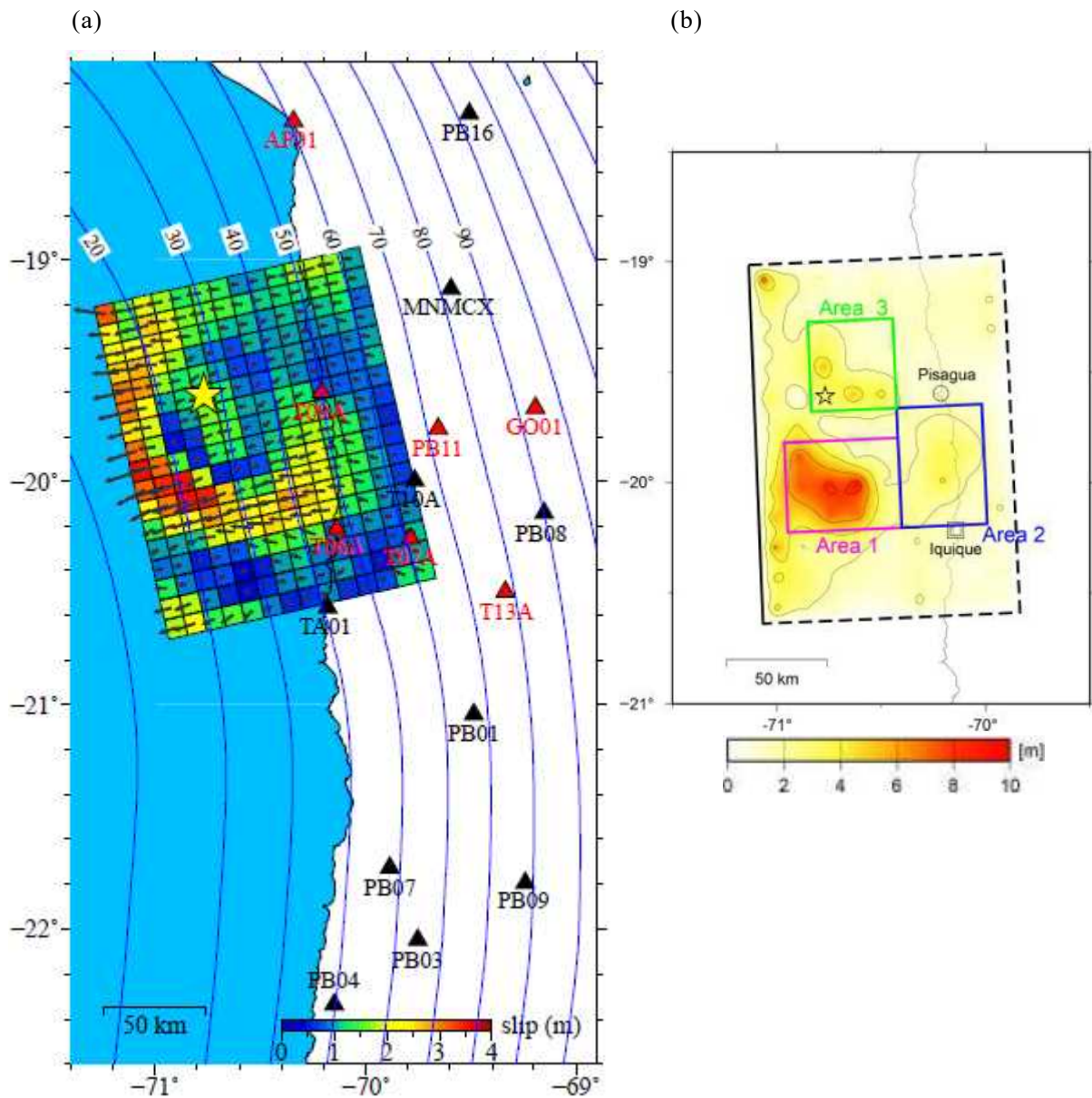


図2.2.3-6 (a) 本研究で推定されたすべり変位の分布. 黄色星は破壊開始点, 三角はインバージョンに使用した観測点, 青コンターはHayes *et al.* (2012) によるプレート境界の深さ (km) を表す. (b) Suzuki *et al.* (2016) によるすべり変位分布.

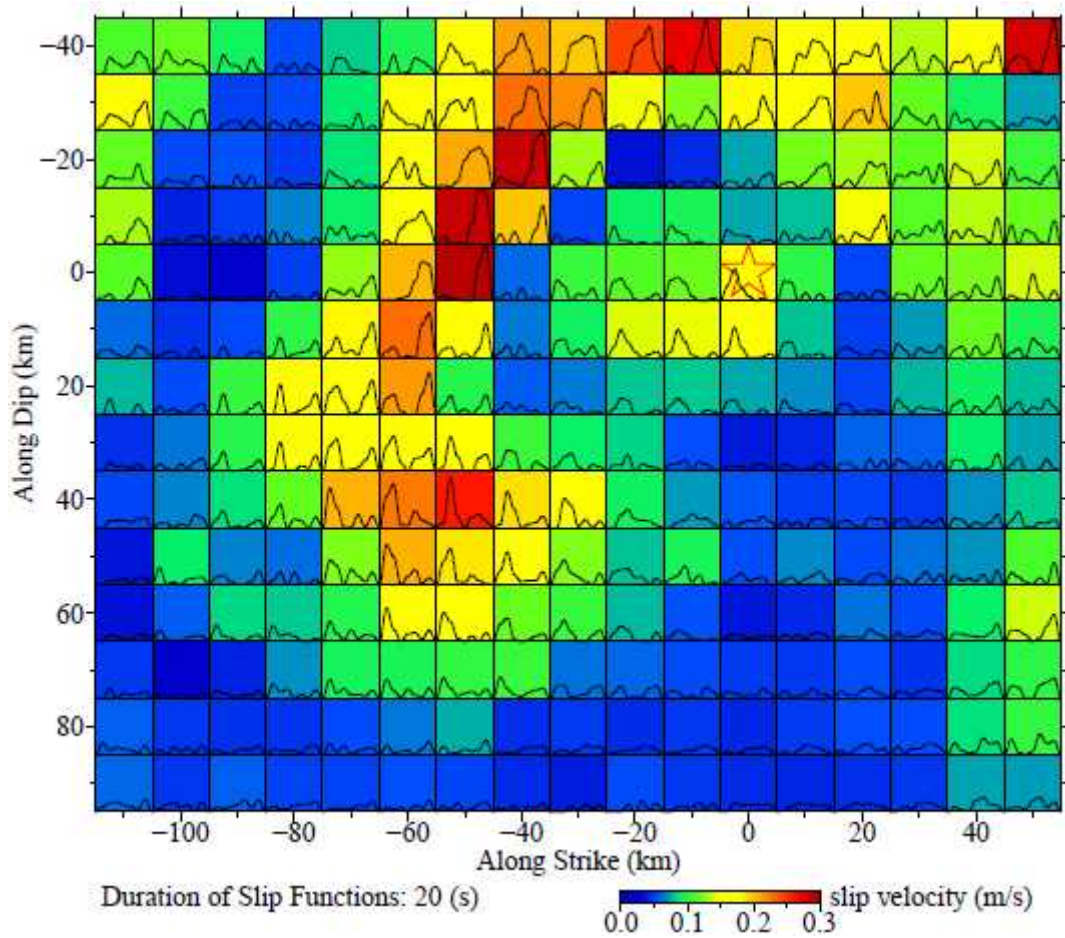


図2.2.3-7 最大すべり速度の分布と各小断層でのすべり時間関数. 赤色星は破壊開始点を表す.

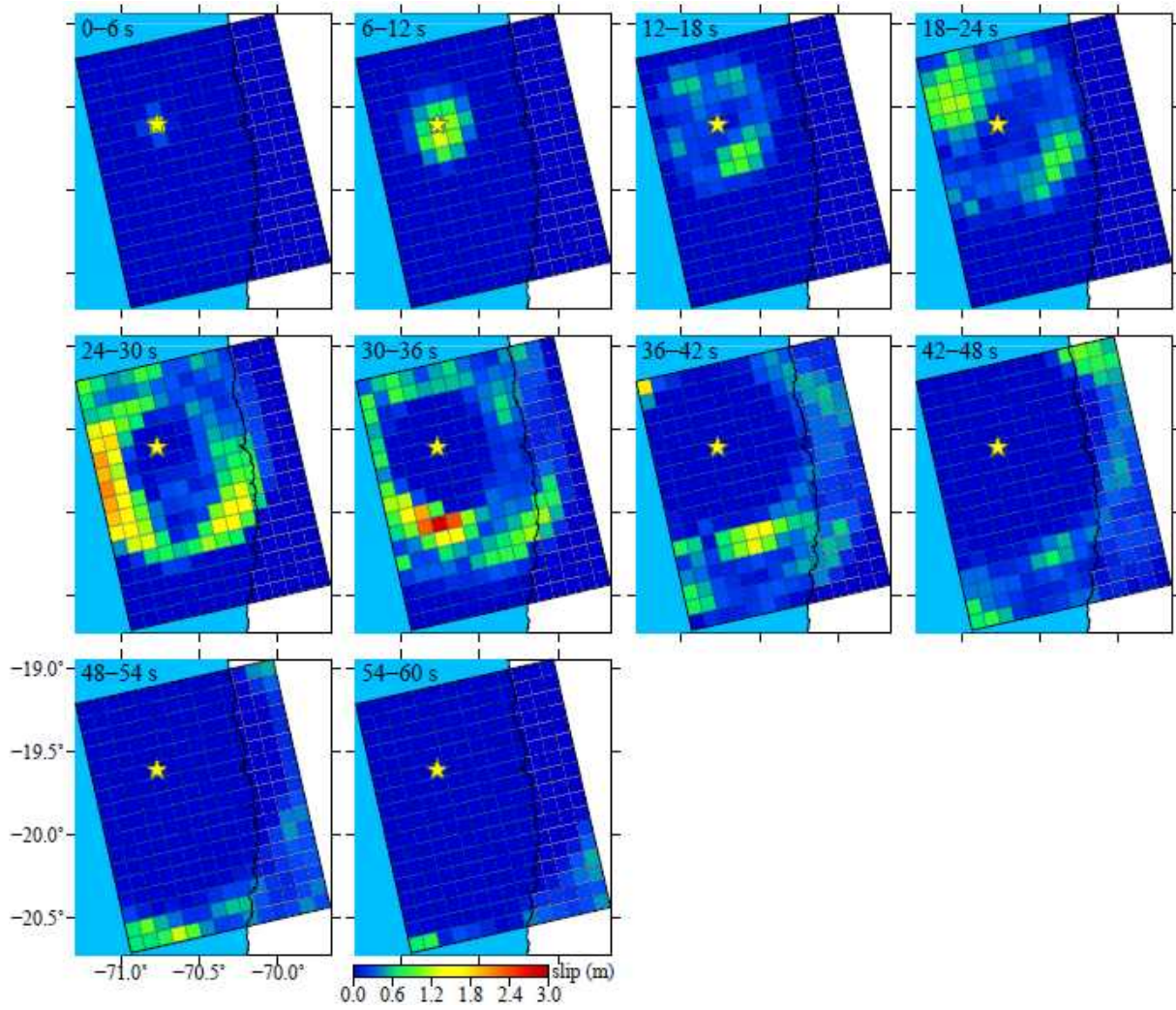


図2.2.3-8 破壊伝播の6秒ごとのスナップショット（すべり変位の増分）.

表2.2.3-3 インバージョン結果から抽出された断層パラメータ

	Murotani <i>et al.</i> (2008)	Somerville <i>et al.</i> (1999)
(1) 地震モーメント	1.65×10 ²¹ Nm	
(2) 断層長さ	170 km	
(3) 断層幅	140 km	
(4) 断層面積	23,800 km ²	
(5) 断層全体の平均すべり変位	1.40 m	
(6) 断層全体の最大すべり変位	3.58 m	
(7) 断層全体の平均静的応力降下量 ¹	1.5 MPa	
(8) 大すべり域の面積	4,000 km ²	4,700 km ²
(8)÷(4)	0.17	0.20
(9) 大すべり域の平均すべり変位	2.67 m	2.33 m
(9)÷(5)	1.91	1.66
(10) 大すべり域の平均静的応力降下量 ¹	5.3 MPa	3.2 MPa

*1. Okada (1992) で計算

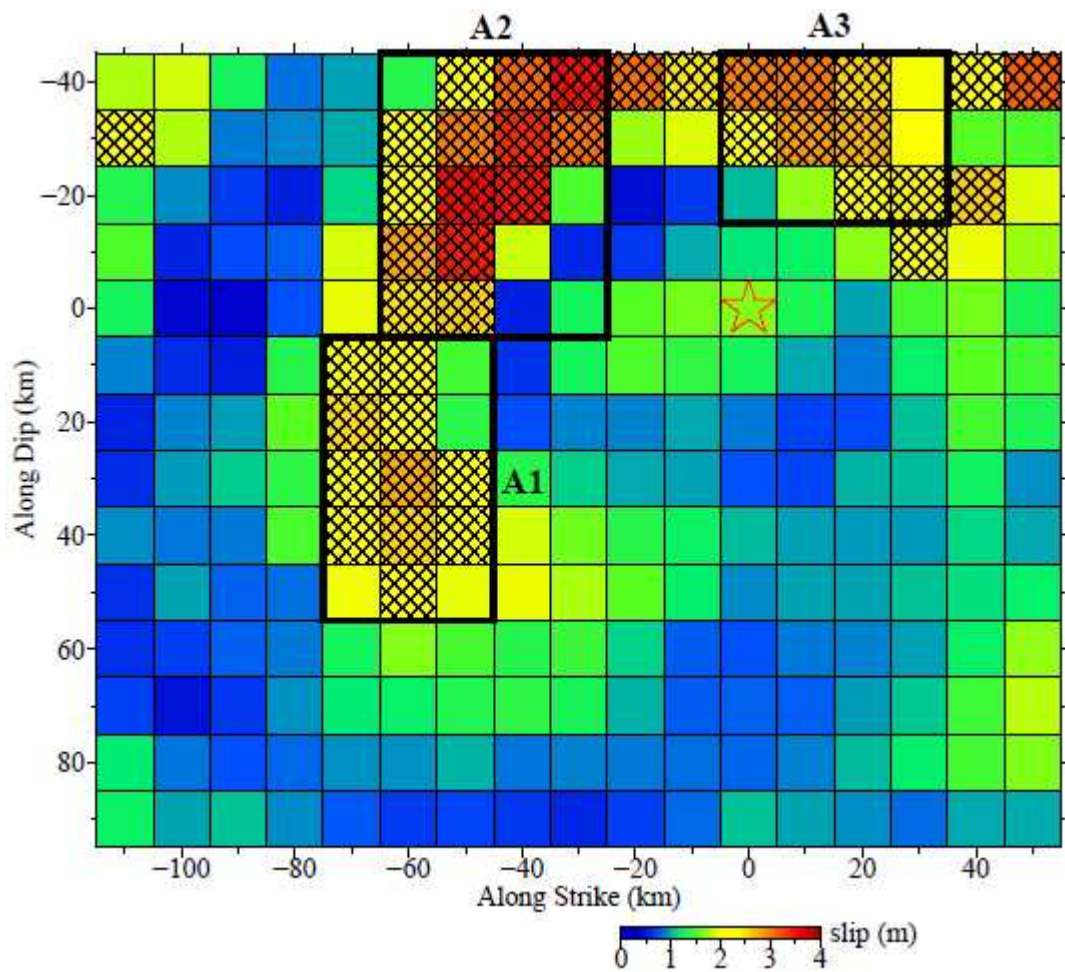


図2.2.3-9 すべり変位分布と大すべり域. 網掛け部はMurotani *et al.* (2008) を, 太い四角 (A1-A3) はSomerville *et al.* (1999) を用いて抽出した大すべり域を表す.

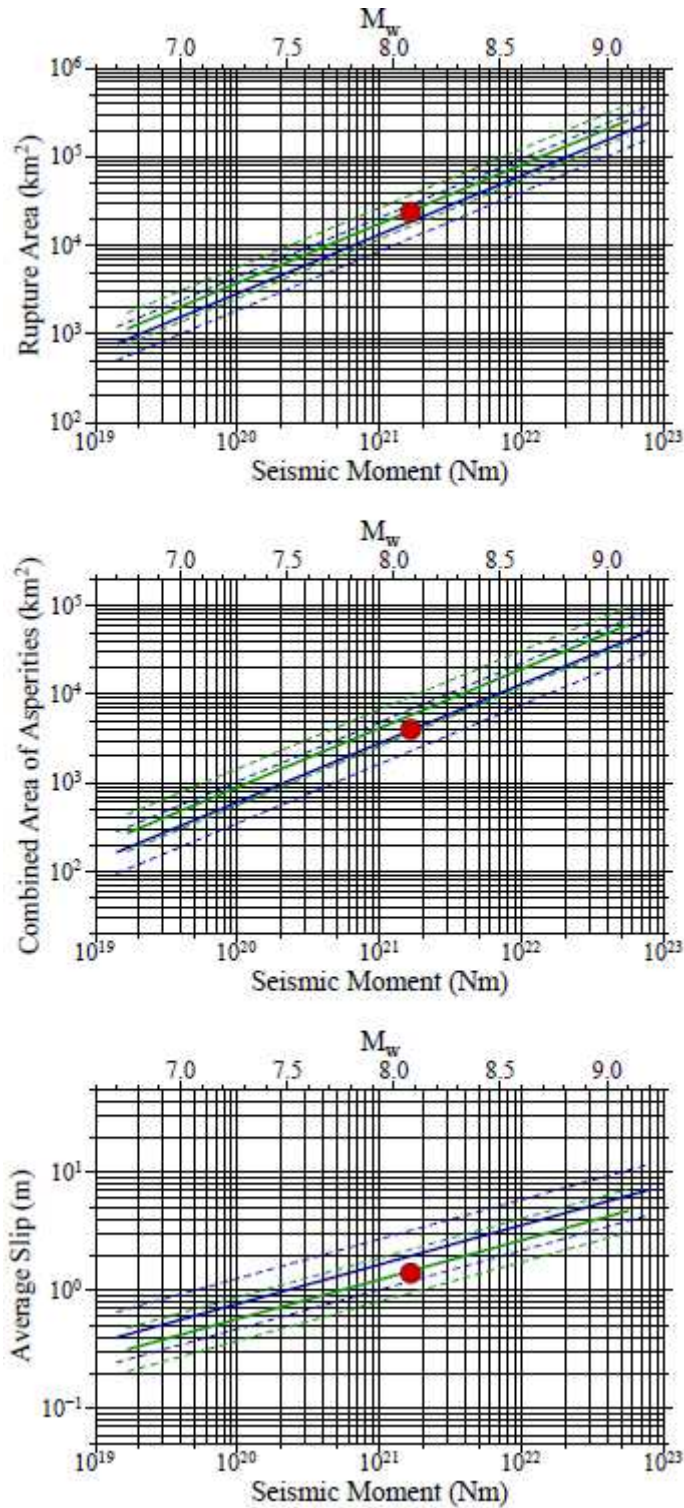


図2.2.3-10 (上) 断層面積 (中) 大すべり域面積 (下) 平均すべり変位の、地震モーメントとの関係。プロットはインバージョンによって得られた値を表す。青実線はMurotani *et al.* (2013) によるスケーリング則で、青破線はその $\pm 1\sigma$ である。緑実線はSkarlatoudis *et al.* (2016) によるスケーリング則で、緑破線はその $\pm 1\sigma$ である。

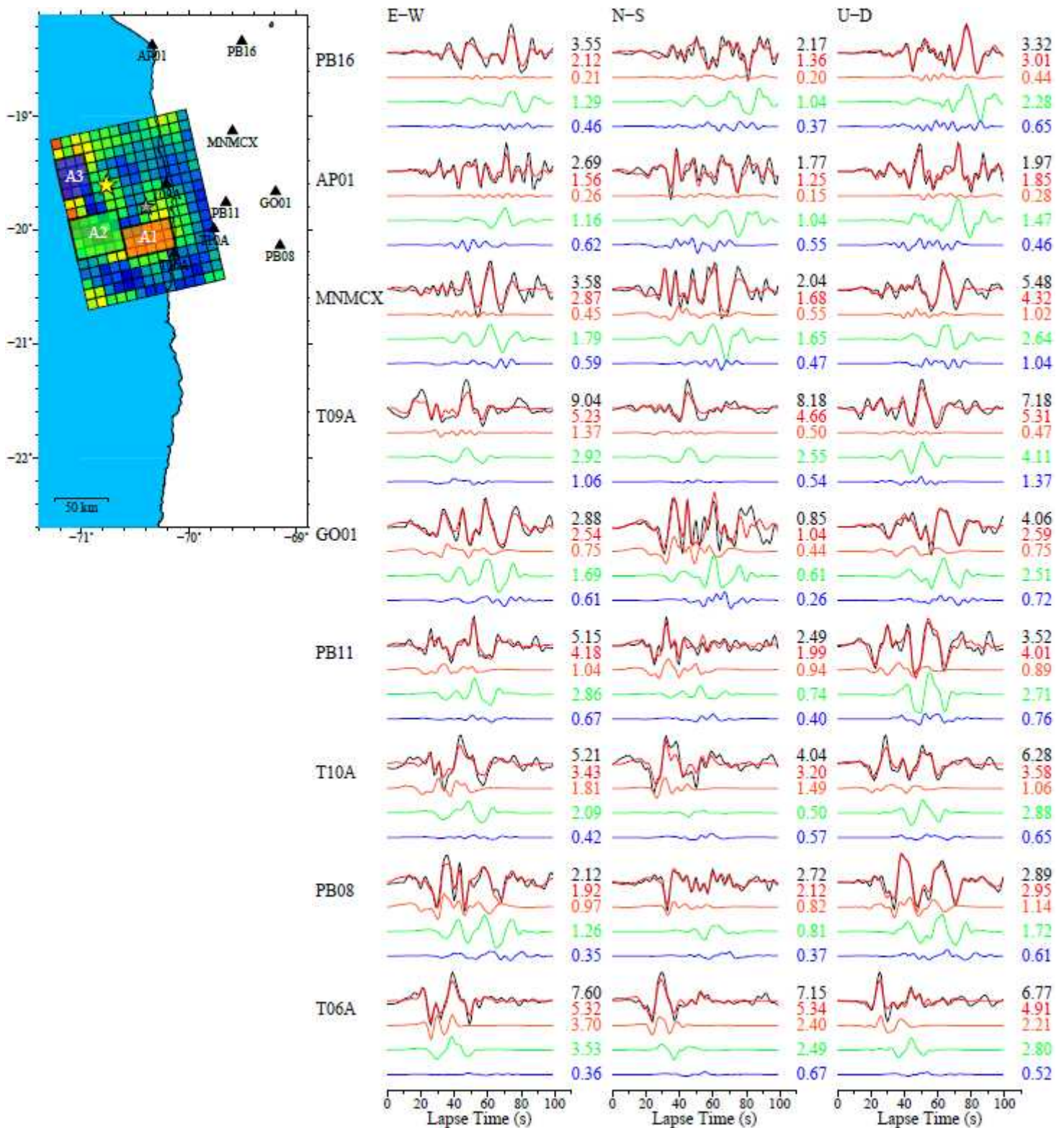


図2.2.3-11 抽出した大すべり域 (A1-A3) による速度波形 (0.03-0.20 Hz) への寄与。黒は観測波形，赤は断層全体のすべりによる理論波形，橙・緑・青はそれぞれ大すべり域A1, A2, A3による理論波形である。波形の右の数字は最大振幅を表し，単位はcm/sである。地図中の黄色星は破壊開始点，灰色星はMeng *et al.* (2015) による強震動生成点を表す。

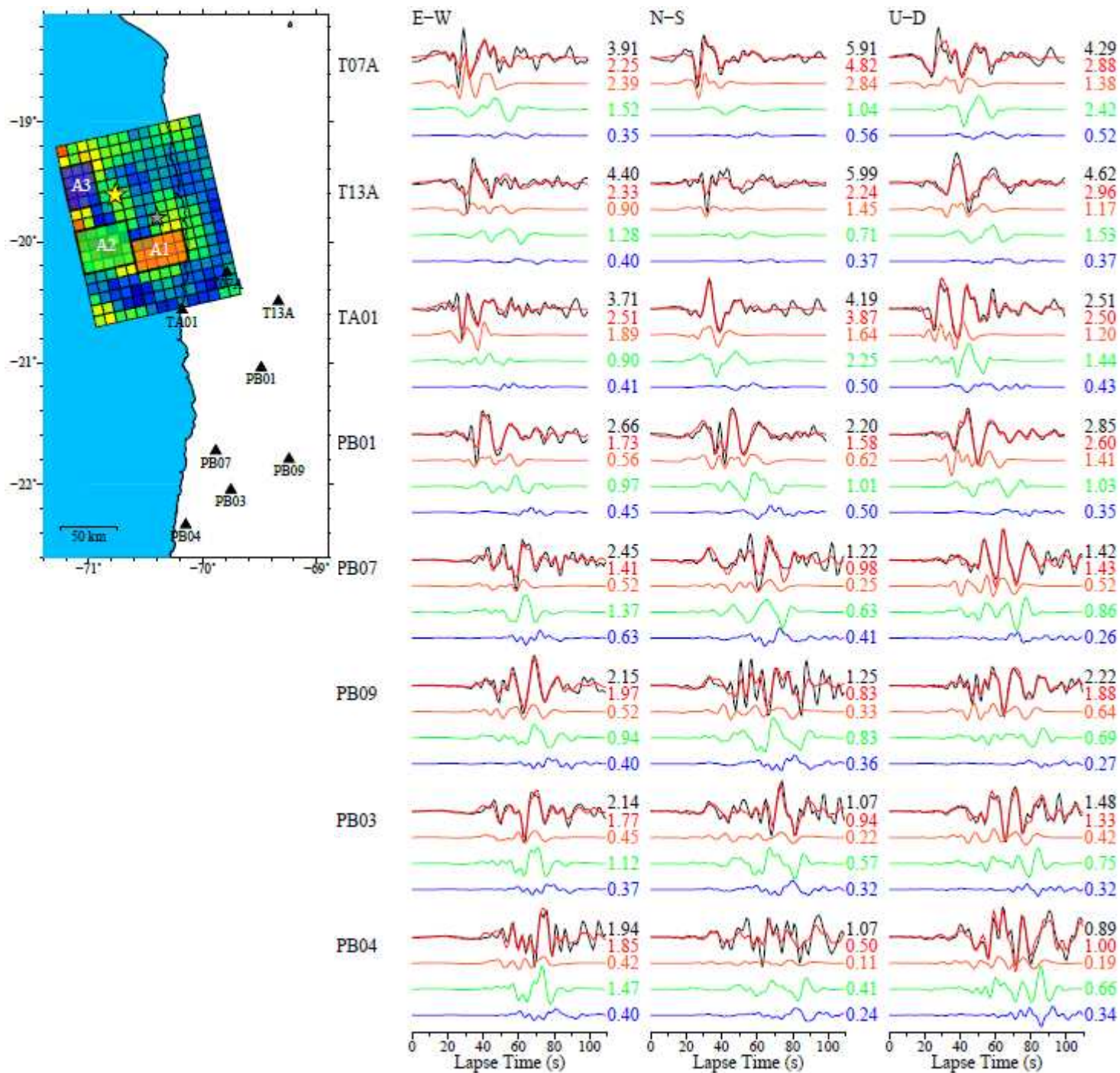


図2.2.3-11 (続き)

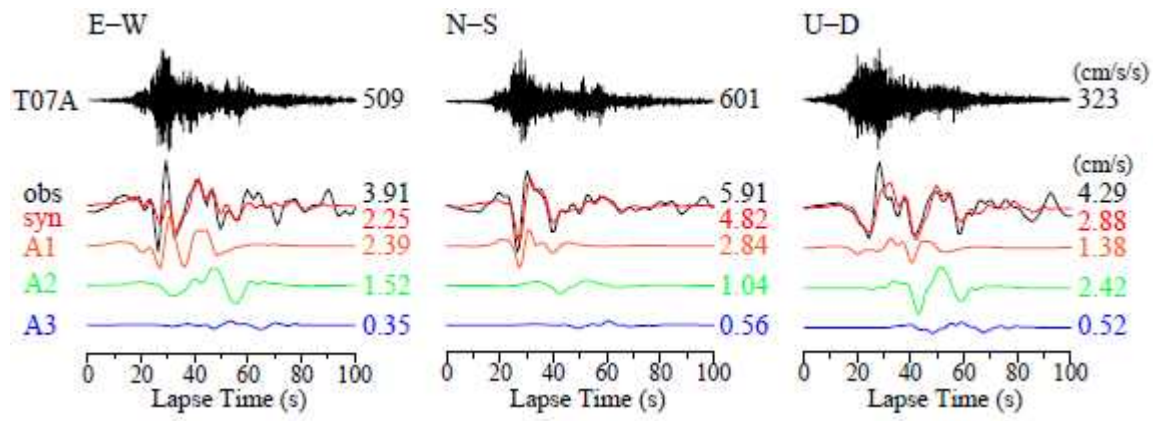


図2.2.3-12 観測点T07Aの波形比較. 最上段は加速度波形, その他は速度波形 (0.03-0.20 Hz) である.

表2.2.3-4 長周期地震動のための特性化震源モデルの断層パラメータ

	A1	A2	A3	背景領域
剛性率 (N/m ²)	5.33×10 ¹⁰			
面積 (km ²)	30×50	40×50	40×30	19100
平均すべり変位 (m)	2.20	2.43	2.34	1.05
平均すべり角 (°)	84	99	86	87
平均ライズタイム (s)	8.1	9.7	10.7	9.3
平均破壊伝播速度 (km/s) / そのV _S 比 (%)	2.61/63	2.67/65	3.11/75	2.53/61

なお、平均ライズタイムは、各小断層のすべり変位を重みとした加重平均で算出した。

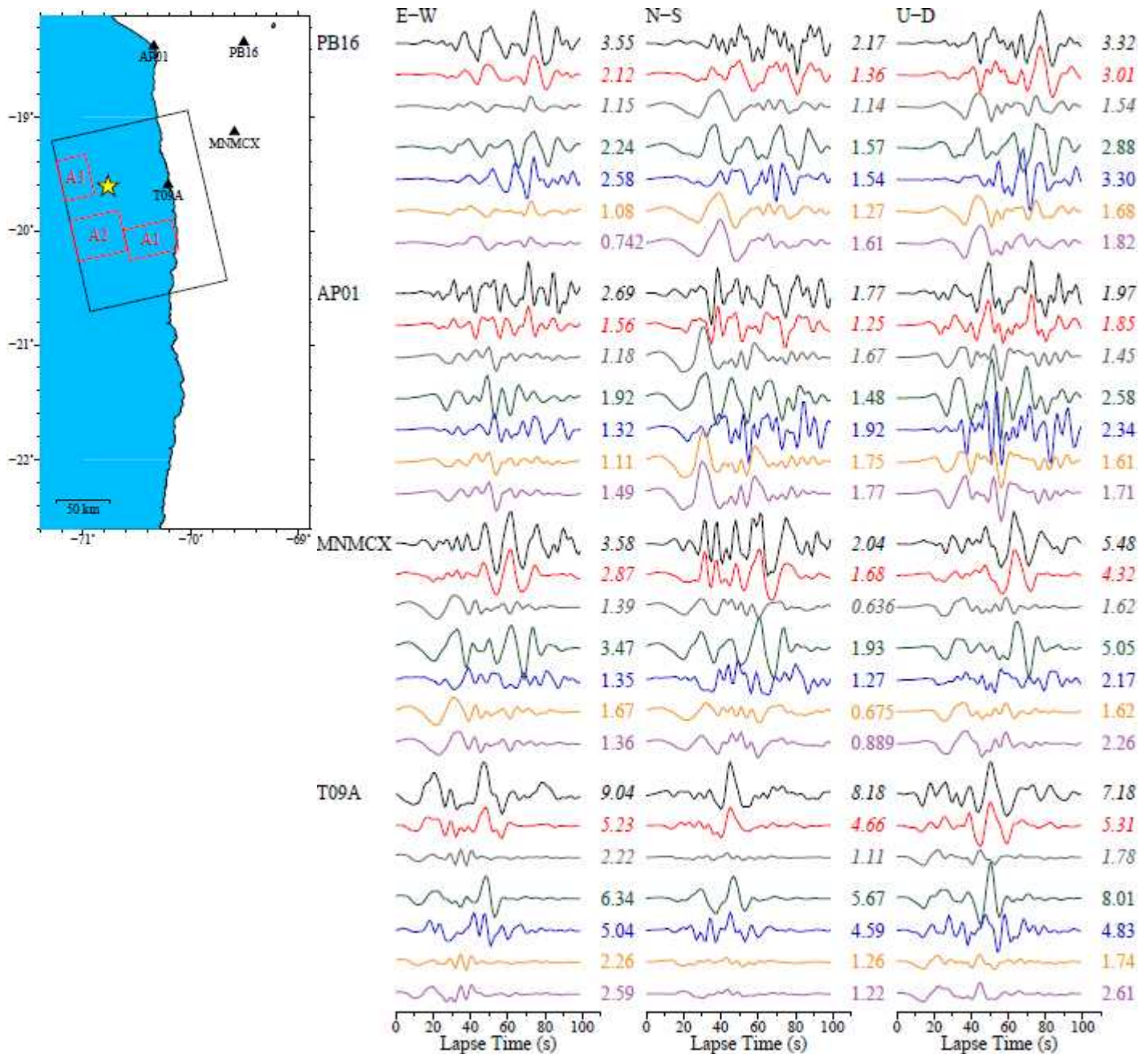


図2.2.3-13 特性化震源モデルの速度波形 (0.03-0.20 Hz). 1段目(黒)は観測波形, 2段目(赤)はインバージョン結果による理論波形, 3段目(灰)は特性化震源モデルによる理論波形, 4段目(緑)は3段目に破壊伝播速度・破壊開始時刻の複雑さを加えた場合の理論波形, 5段目(青)は3段目にすべり時間関数の形状・ライズタイムの複雑さを加えた場合の理論波形, 6段目(橙)は3段目にすべり角の不均質を加えた場合の理論波形, 7段目(紫)は3段目に剛性率・すべり変位の不均質を加えた場合の理論波形である. 波形の右の数字は最大振幅を表し, 単位はcm/sである.

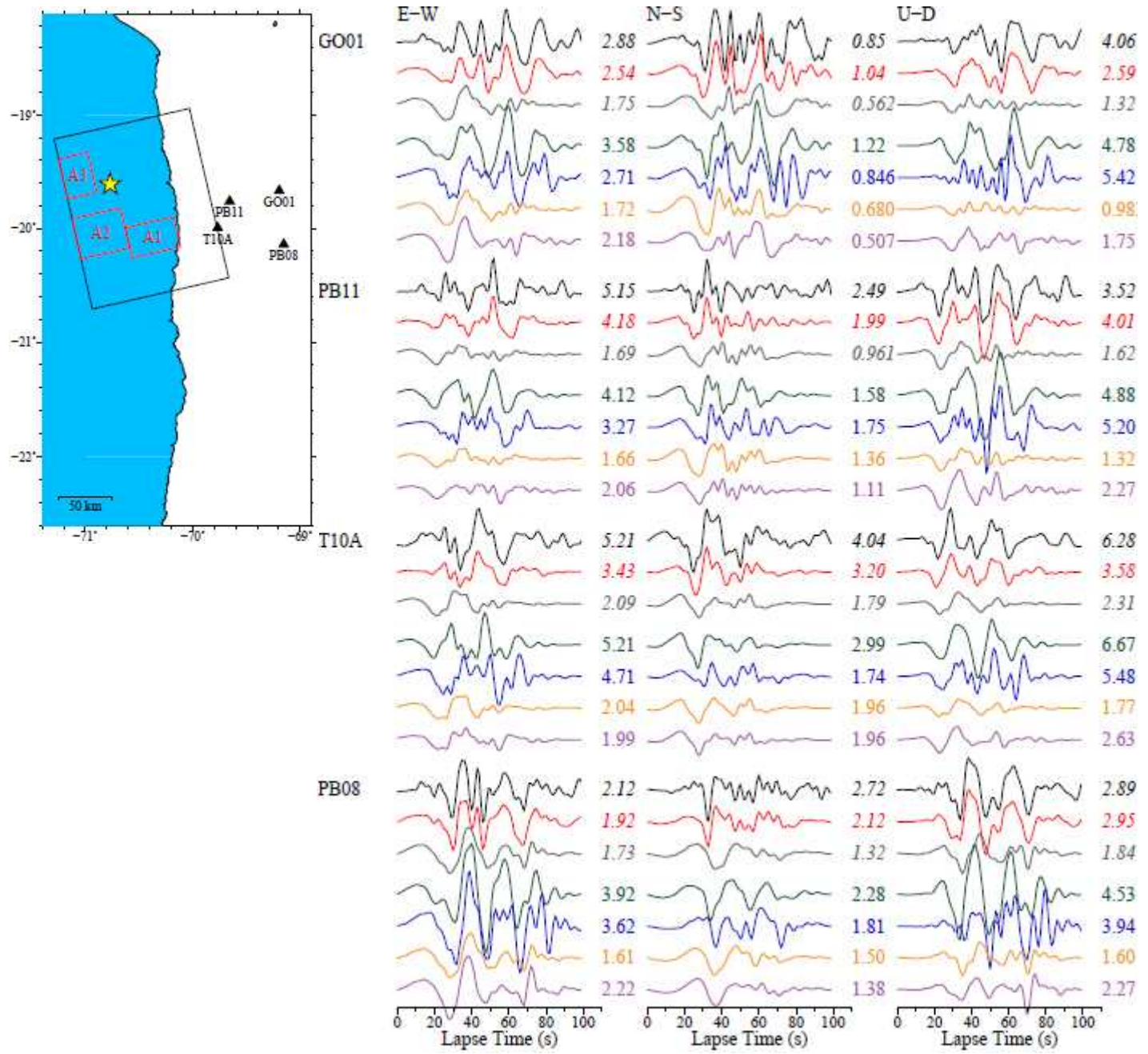


図2.2.3-13 (続き)

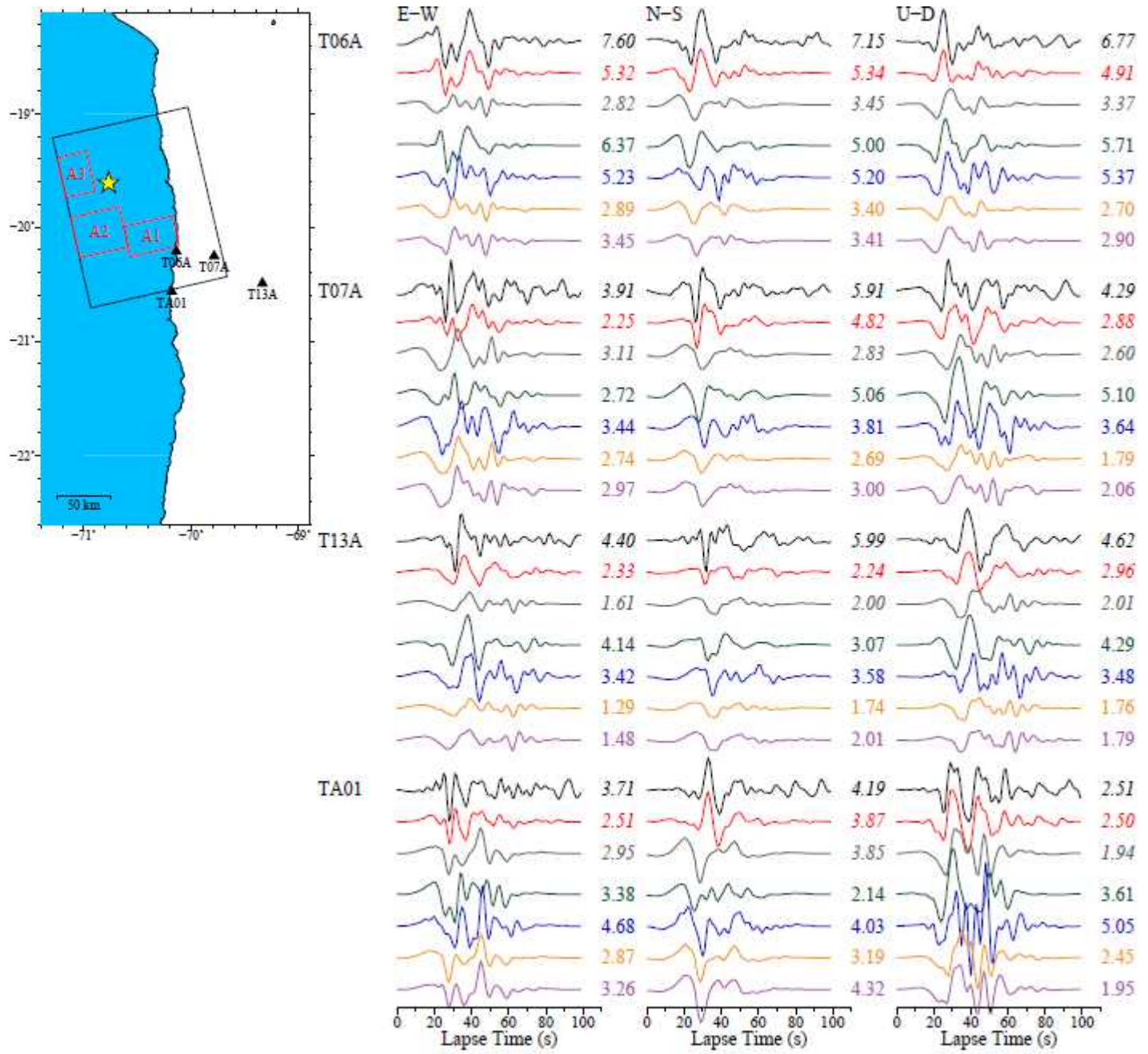


図2.2.3-13 (続き)

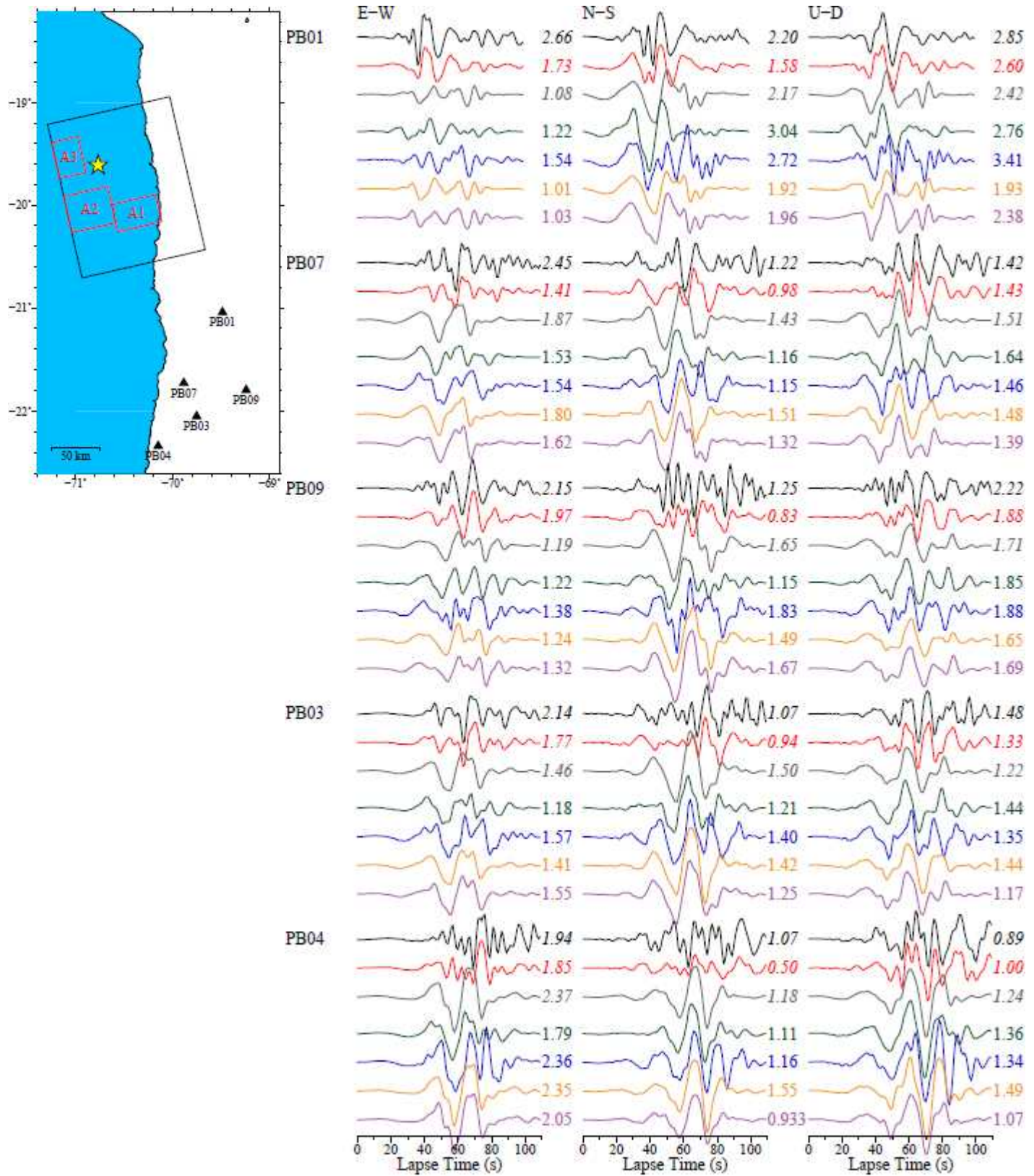


図2.2.3-13 (続き)

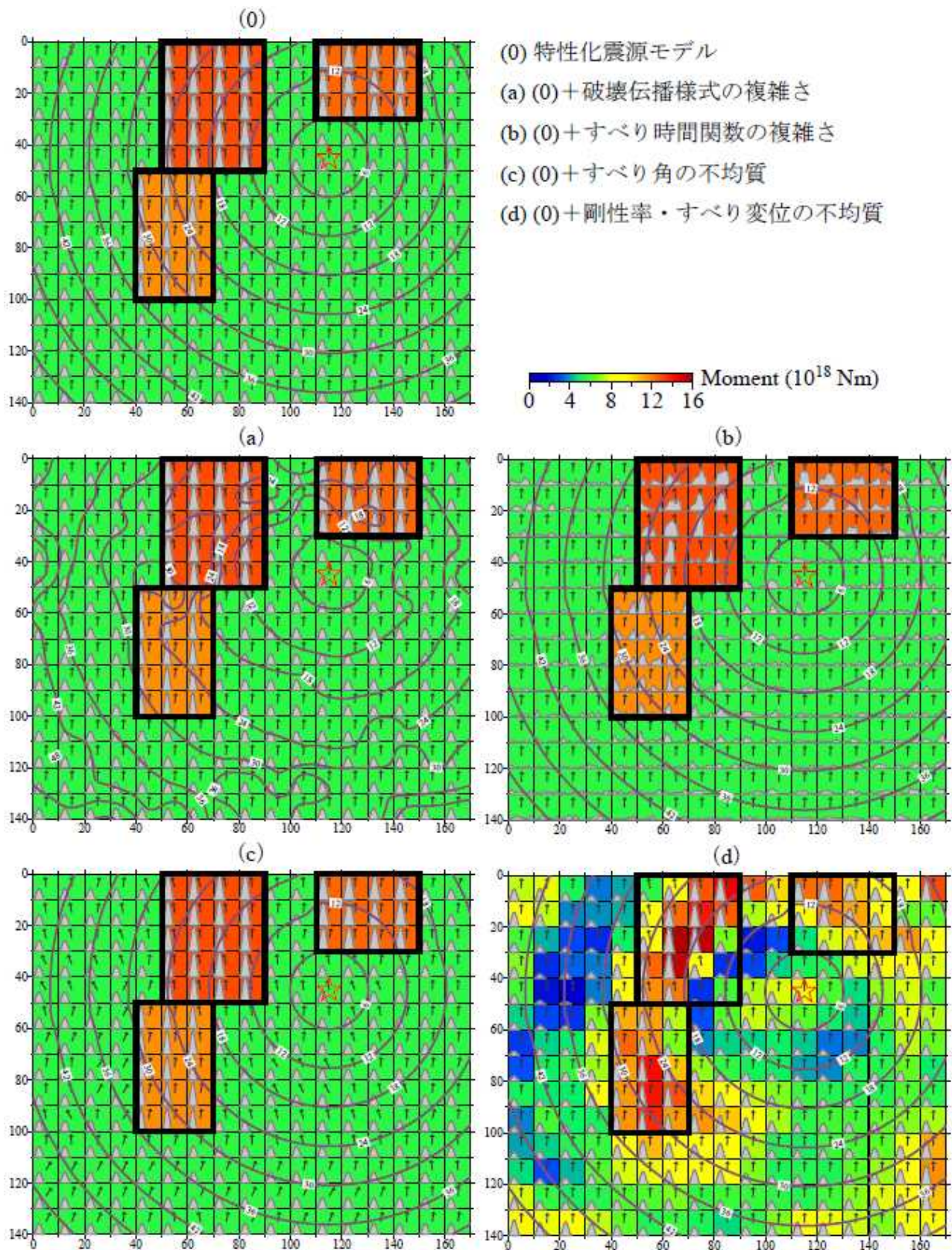


図2.2.3-14 特性化震源モデルおよびそれに4種類のパラメータの複雑さ・不均質を加えた新モデルの模式図。背景色は地震モーメントの大きさ，コンター（6秒ごと）は破壊到達時刻，灰色の塗りつぶしはすべり時間関数，矢印はrake角を表す。

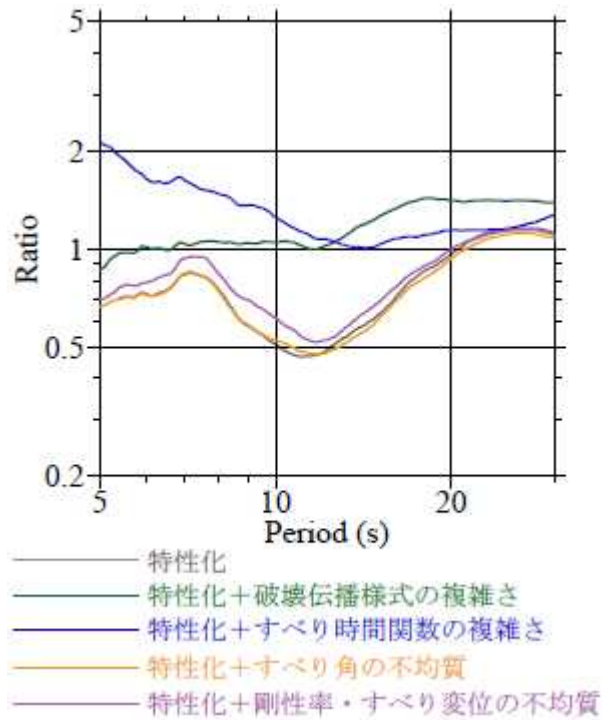


図2.2.3-15 インバージョンの理論波形に対する，各震源モデルによる理論波形の速度応答スペクトル（減衰定数5%；3成分合成値）の比の平均．1より大きい/小さい場合は過大/小評価を意味する．

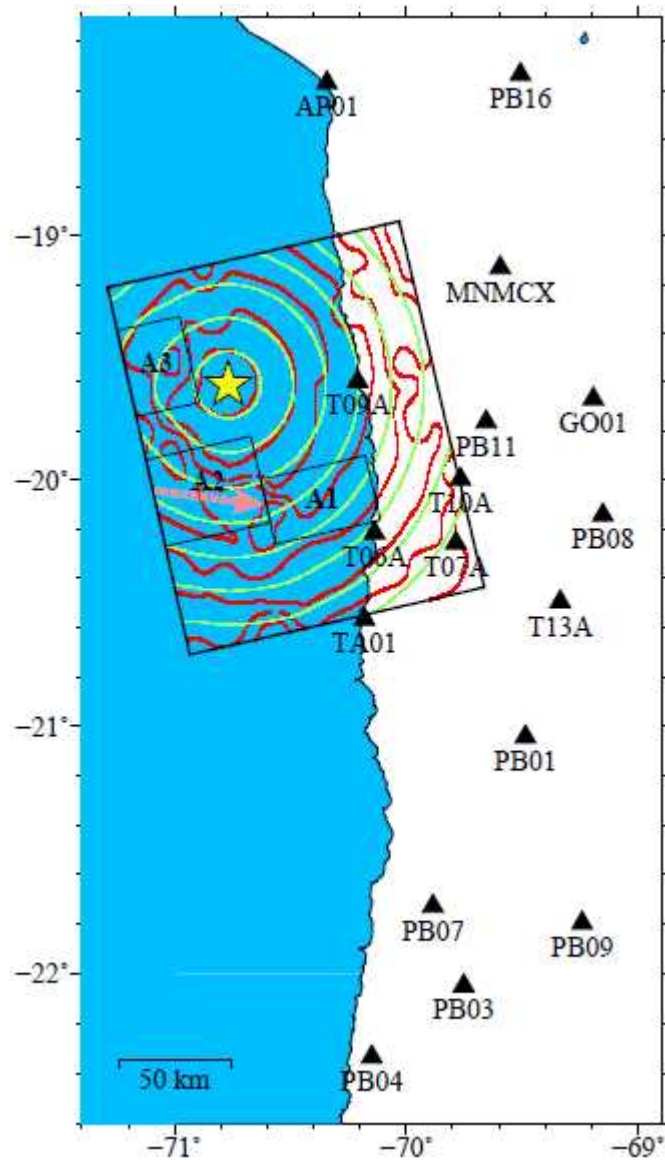


図2.2.3-16 インバージョン結果（赤色コンター）および特性化震源モデル（緑色コンター）の破壊到達時刻の比較．コンターは6秒間隔である．桃色矢印はインバージョン結果の、大すべり域A2付近における主たる破壊伝播方向を表す．

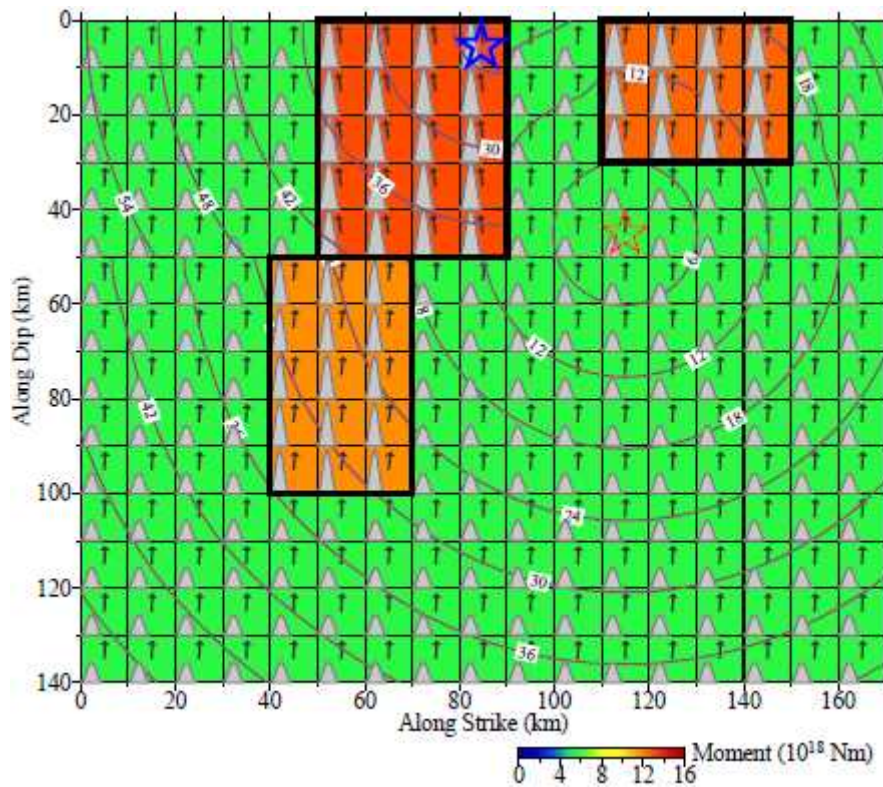


図2.2.3-17 海溝軸側から大すべり域A2を破壊させた，改良特性化震源モデルの模式図．赤色星は断層全体の破壊開始点（震源），青色星の小断層はA2の破壊開始点，コンターは破壊到達時刻を表す．

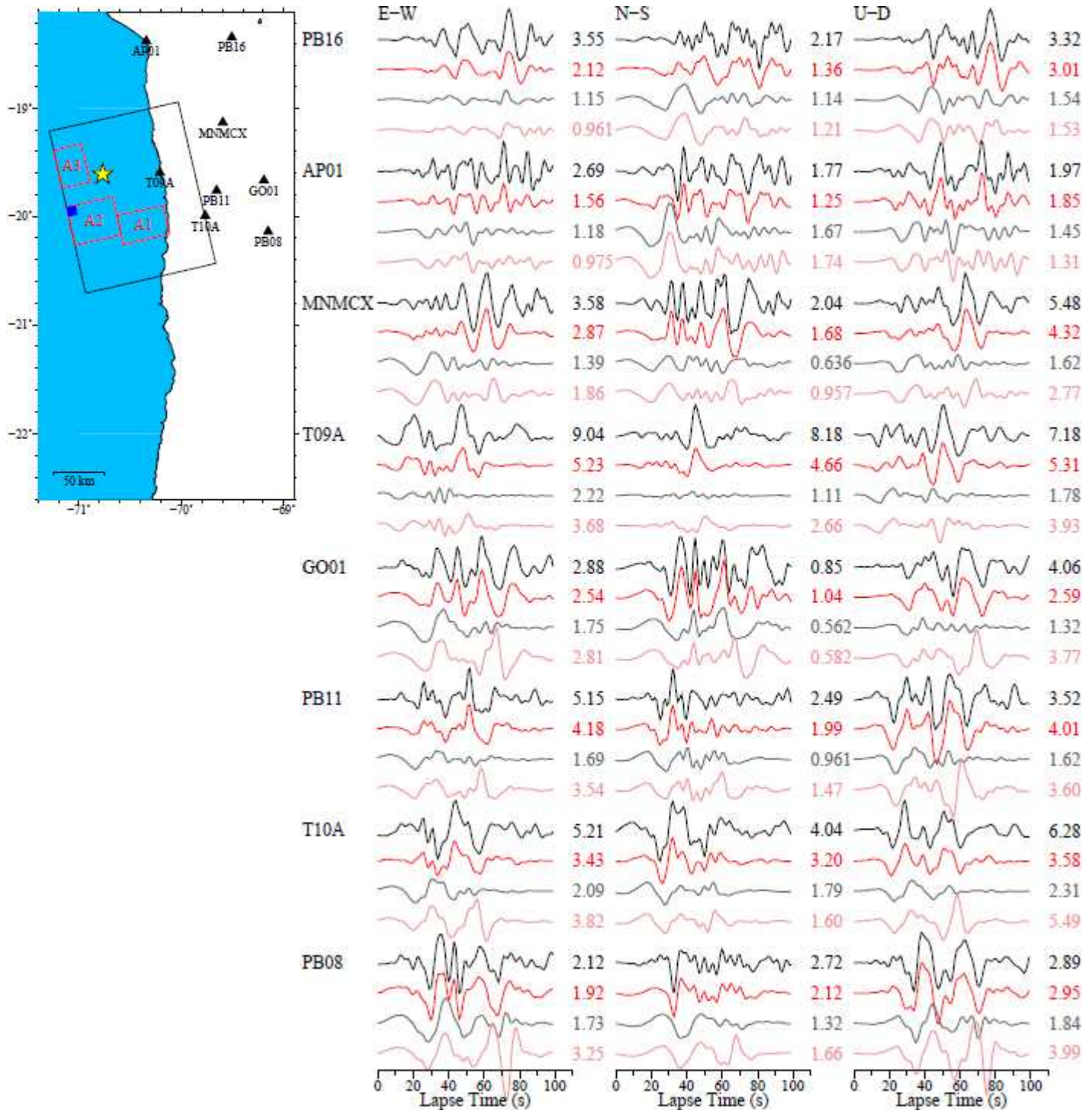


図2.2.3-18 改良特性化震源モデルの速度波形 (0.03-0.20 Hz). 1段目 (黒) は観測波形, 2段目 (赤) はインバージョン結果による理論波形, 3段目 (灰) は特性化震源モデルによる理論波形, 4段目 (桃) は改良特性化震源モデルによる理論波形である. 波形の右の数字は最大振幅を表し, 単位はcm/sである. 地図中の青色小断層は大すべり域A2の破壊開始点を表す.

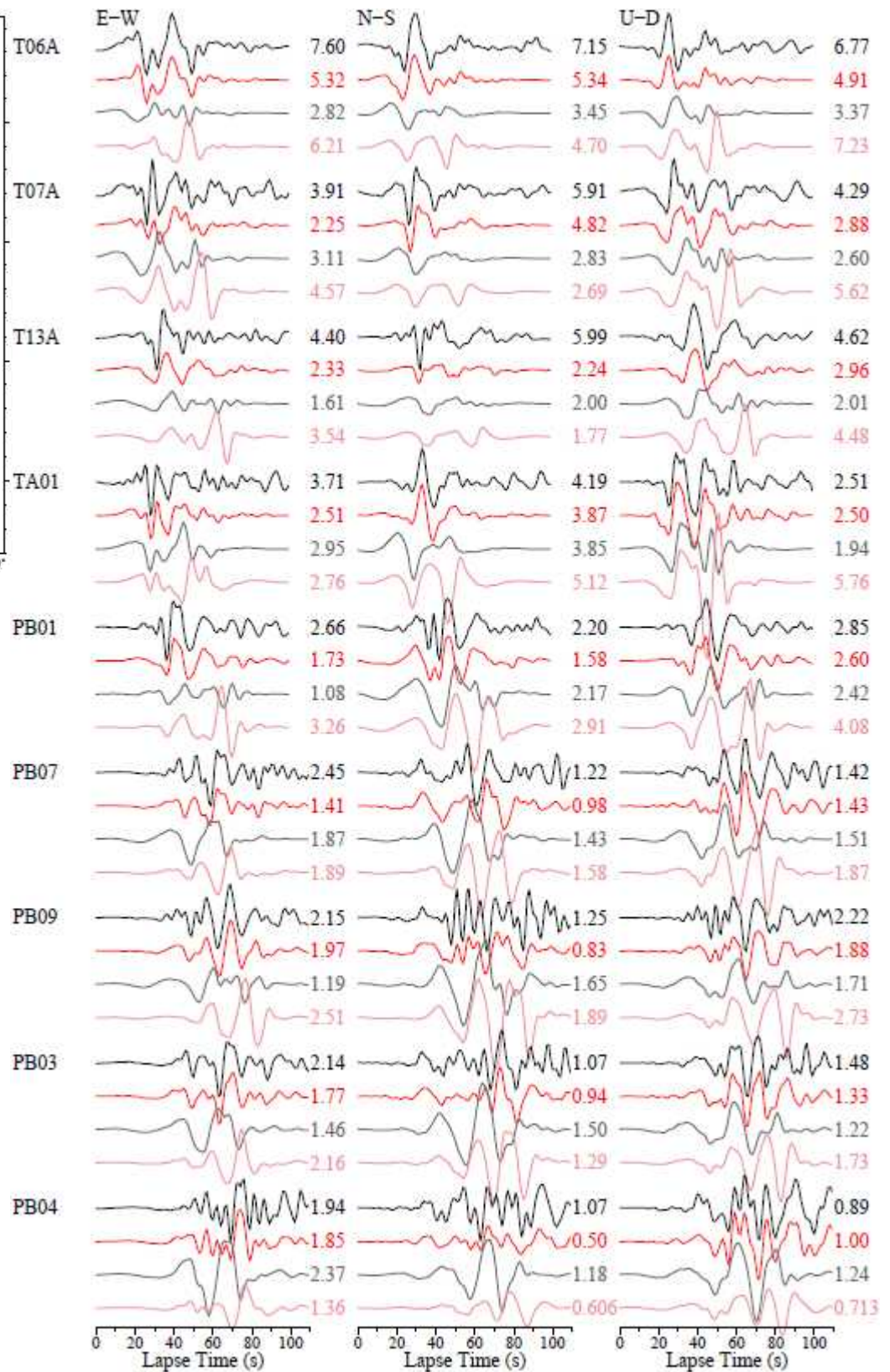
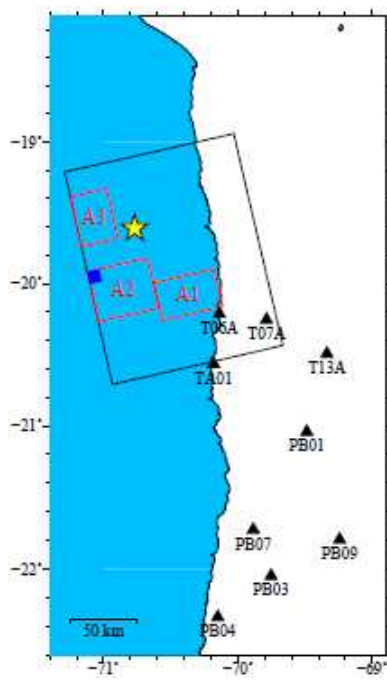


図2.2.3-18 (続き)

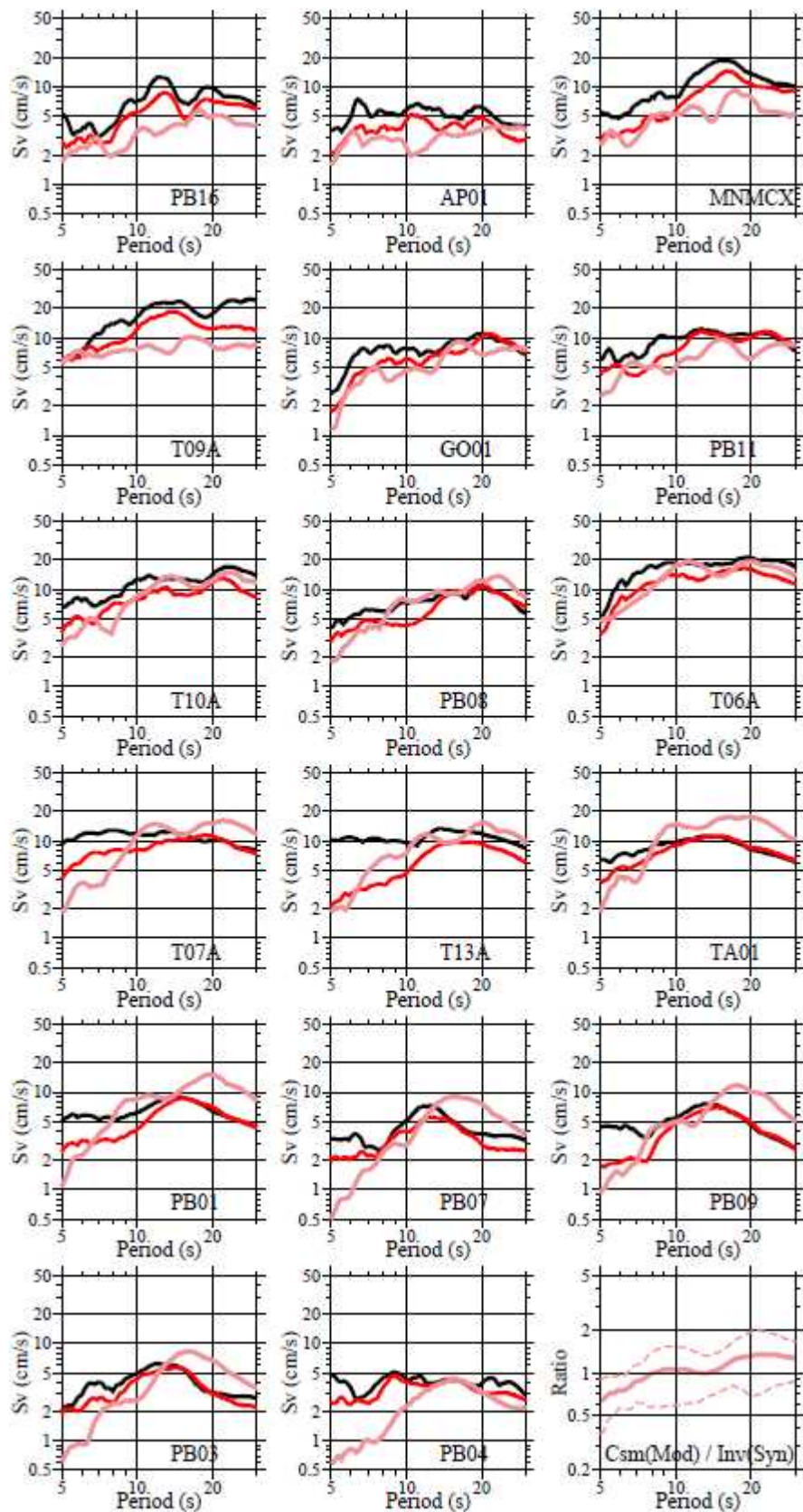


図2.2.3-19 観測波形（黒）・インバージョンの理論波形（赤）・改良特性化震源モデルの理論波形（桃）の速度応答スペクトル（減衰定数5%；3成分合成値）。一番右下の図はインバージョンに対する改良特性化震源モデルの比の、全観測点の平均（実線）と標準偏差（破線）であり、1より大きい/小さい場合は過大/小評価を意味する。

2.2.3項の付録

本研究における、震源インバージョンで得られた各小断層のすべり時間関数から、ライズタイム・破壊開始/終了時刻を抽出する手順を述べる。

- (1) T_{max} 秒からなるすべり時間関数で求まっている複数のピーク（図2.2.3-A1a中の三角）から、総すべり量をタイムウィンドウ数で割った平均値を最初に超えたピークを探し、P（図2.2.3-A1aの赤三角）とする。
- (2) ピークPの一つ前と一つ後ろにあるピークを探し、前者を作るタイムウィンドウの終了時刻を T_a 、後者を作るタイムウィンドウの開始時刻を T_b とする（図2.2.3-A1b）。ただし、ピークPのタイムウィンドウの前後二つ以内にあるタイムウィンドウが作るピークは探索対象から除外する。また、ピークPより前にピークが存在しない場合は $T_a = 0$ 、ピークPより後ろにピークが存在しない場合は $T_b = T_{max}$ とする。
- (3) T_a - T_b の間に開始かつ終了するタイムウィンドウのみを使って、新しいすべり時間関数を作成する（図2.2.3-A1c）。
- (4) (3) で作成した新しいすべり時間関数の総すべり量の2.5%に達する時刻をその小断層における破壊開始時刻 T_s 、同97.5%に達する時刻を破壊終了時刻 T_e 、両者の時間差をライズタイムとする（図2.2.3-A1d）。

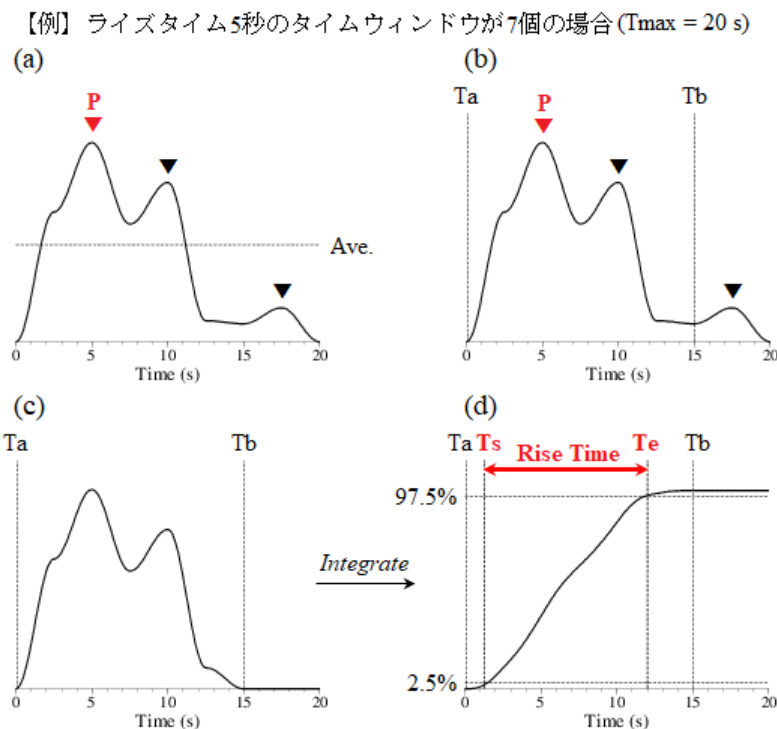


図2.2.3-A1 ライズタイムおよび破壊開始/終了時刻の抽出手順の概念図。

2.2.4 2014年チリ Iquique 地震の特性化震源モデルの設定

(1) 2014年Iquique地震における観測記録と経験的グリーン関数

2014年Iquique地震の際に、図2.2.4-1に示す強震観測点で観測記録が得られている。図に断層モデルもプロットしているが、断層に近い位置に観測記録が得られていることが分かる。これらの観測記録はすでに2.2.2項に示されているように収集、処理されているが、T13A観測点における加速度波形をその一例として図2.2.4-2に示す。

また、Iquique地震を前後にして、2014年3月16日に前震が発生している。図2.2.4-3に2014年3月16日に発生した前震の際に観測記録の得られている観測点の分布を示す。図に○印で囲まれている観測点は断層の両端をカバーできていることで、特性化震源モデルの構築の際にこれらの観測点を評価対象とした。

図2.2.4-4には、2014年3月16日地震の際にT13A観測点で得られた観測記録の加速度・速度波形、速度応答スペクトル及びフーリエスペクトルを示す。これらの図から、この地震の観測記録は広帯域において経験的グリーン関数として用いられることが分かった。本検討では、当該地震による観測記録を経験的グリーン関数として用いることとした。

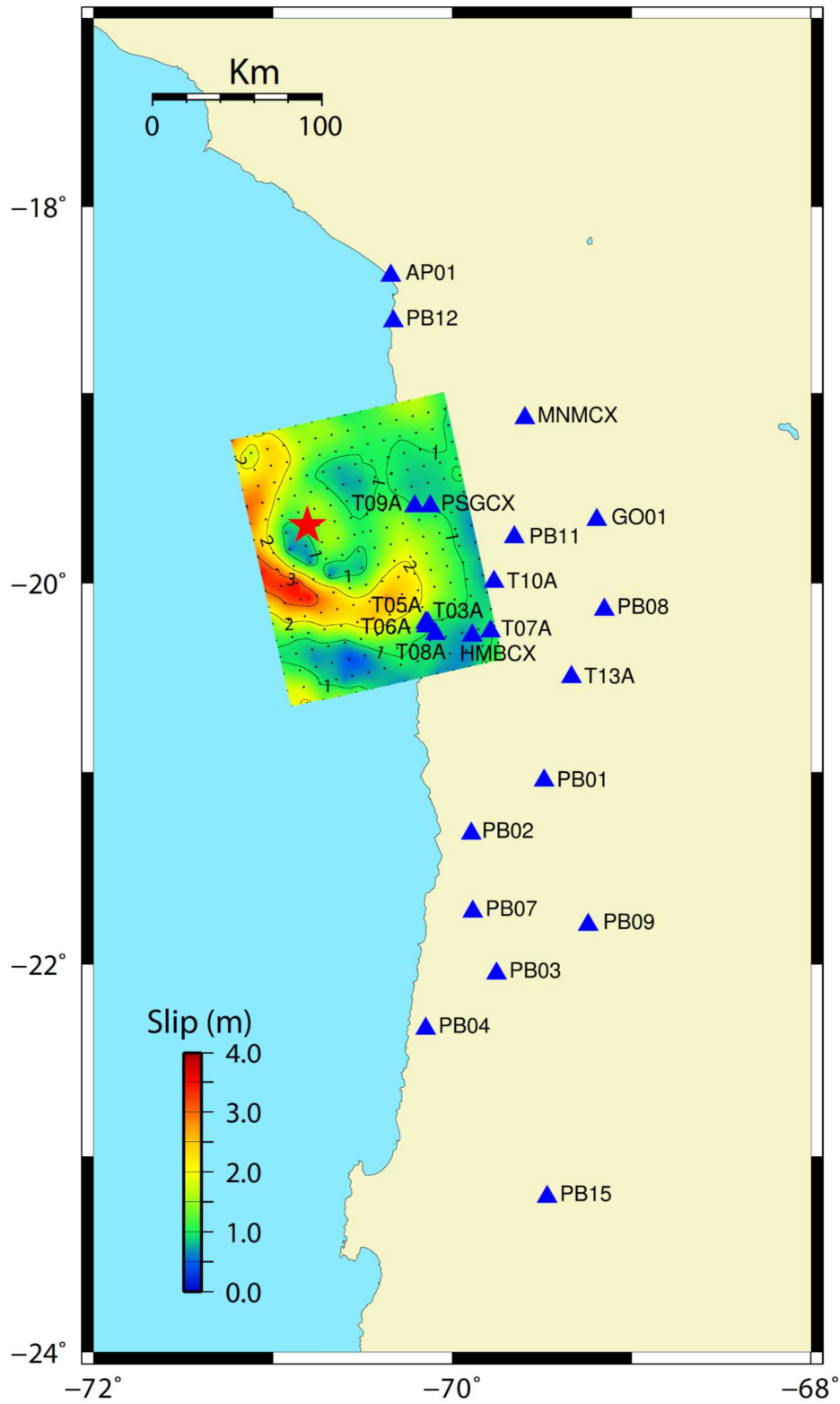


図 2.2.4-1 2014 年 Iquique 地震のおおよその断層位置と観測記録の得られている観測点分布

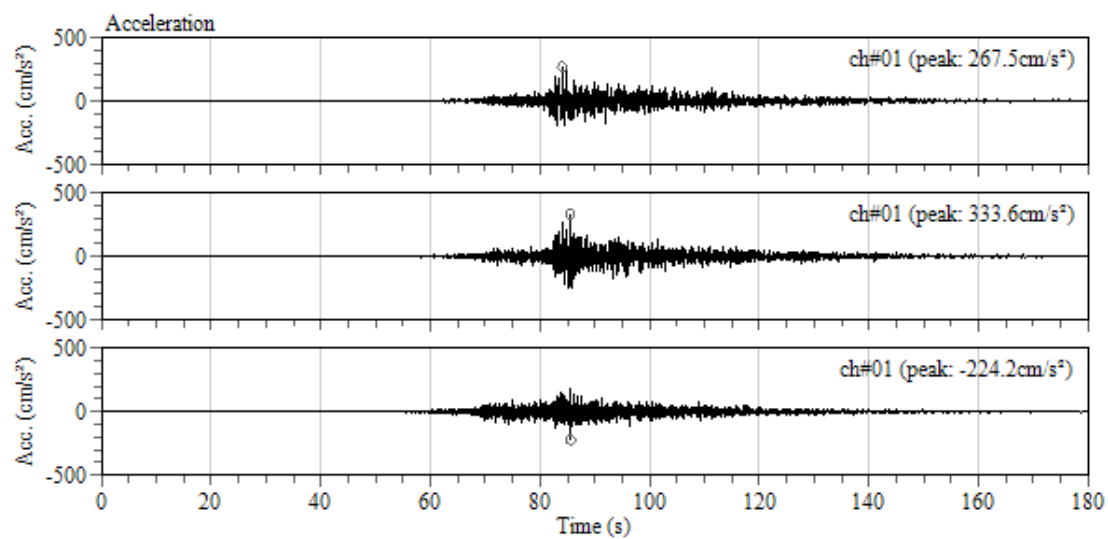


図2.2.4-2 2014年Iquique地震においてT13A観測点における観測記録の加速度波形

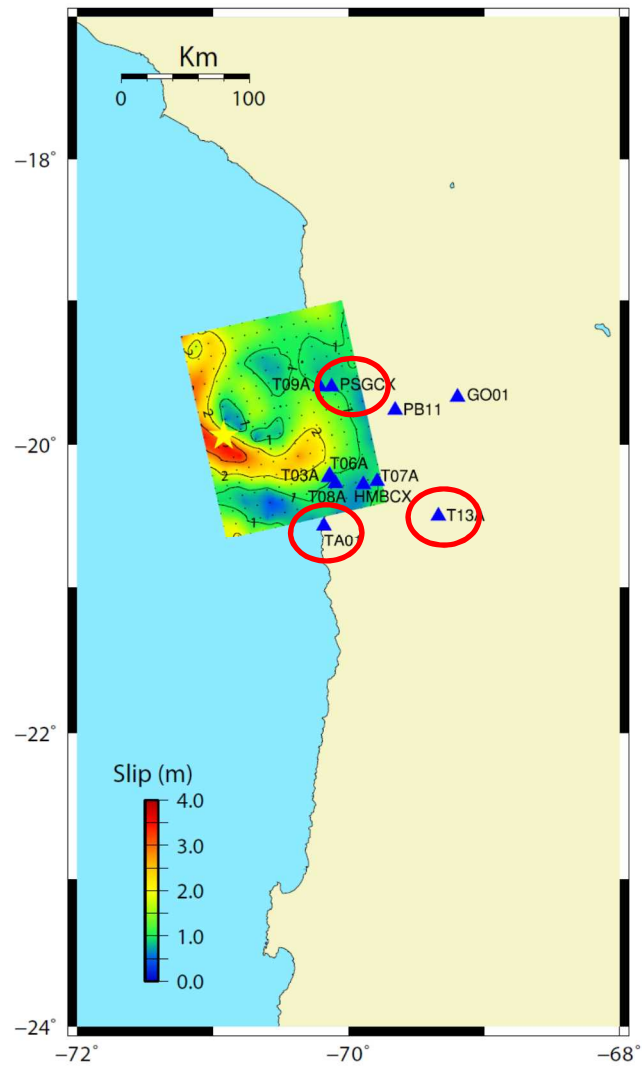
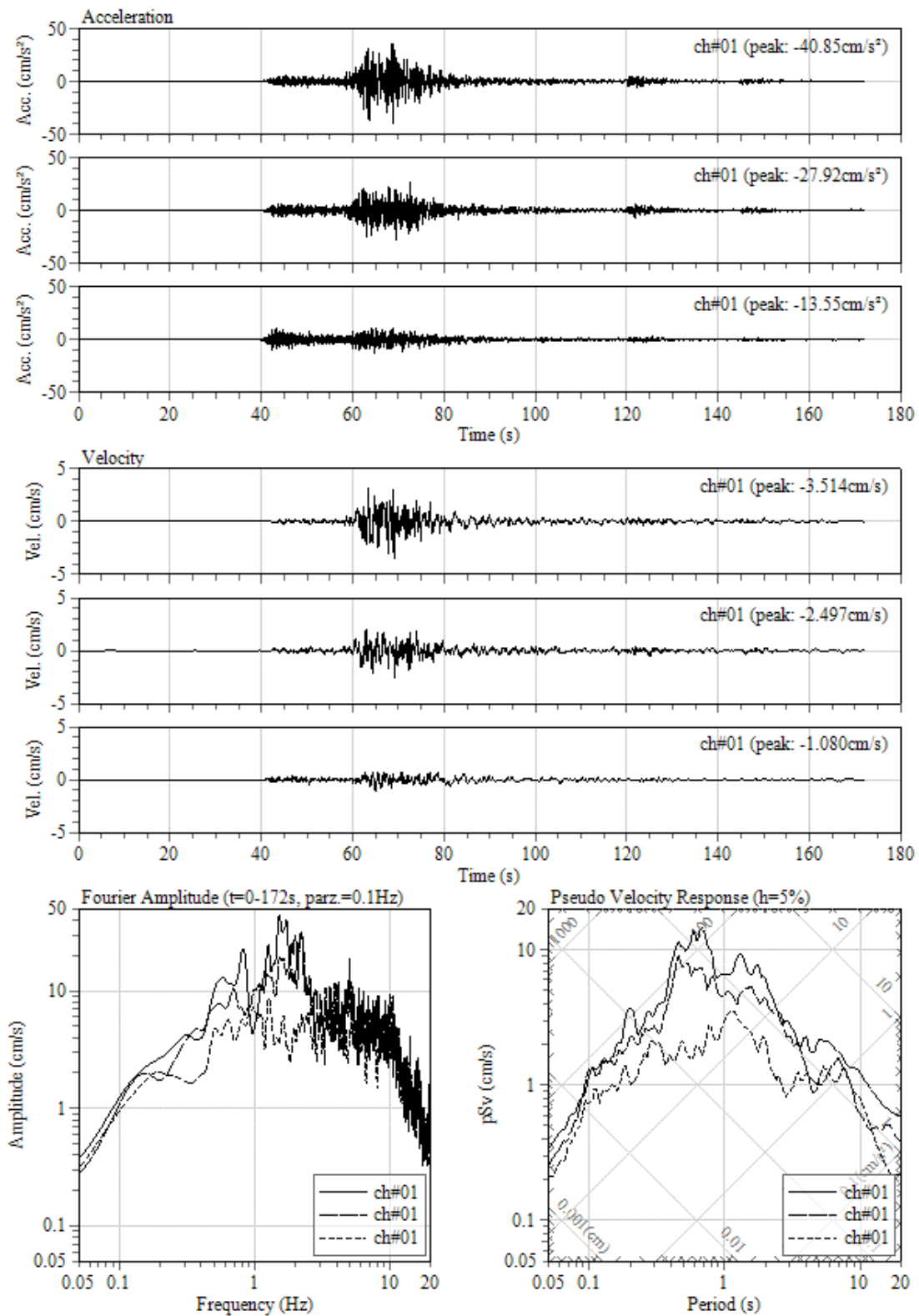


図2.2.4-3 Iquique地震の前震、2014年3月16日に発生した地震の観測点分布図（赤○は強震動計算に用いた観測点を示す）



0001/01/01 00:00:00 at : , Intensity: 3.6

図2.2.4-4 2014年3月16日に発生した地震（Iquique地震の前震）の際にT13A観測点における観測記録の加速度波形

(2) Iquique地震の特性化震源モデルの設定

経験的グリーン関数法により、Iquique地震の特性化震源モデルを推定するには、波形合成のための合成倍率と応力降下量比を決める必要がある。本研究では、Miyake and Irikura (2003)に従い、大地震と要素地震の距離補正を行ったフーリエスペクトル比により、波形合成のための合成倍率と応力降下量比について検討を行った。この方法では、まず、式(2.2.4-1)により、大地震と要素地震の観測記録により、両者のスペクトル比を計算される。次にこのスペクトル比に(2.2.4-2)式をフィッティングさせ、要素地震と大地震のコーナー周波数 f_{ca} と f_{cm} をそれぞれ決め、(2.2.4-3)式、(2.2.4-4)式より合成倍率 N 、応力降下量比をそれぞれ決められる。

$$\frac{S(f)}{s(f)} = \frac{O(f)/\frac{1}{R} \exp(-\pi f R / Q_s(f) V_s)}{o(f)/\frac{1}{r} \exp(-\pi f r / Q_s(f) V_s)} \quad (2.2.4-1)$$

$$SSRF(f) = \frac{M_o}{m} \frac{1 + \left(\frac{f}{f_{ca}}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{cm}}\right)^2} \quad (2.2.4-2)$$

$$N = \frac{f_{ca}}{f_{cm}} \quad (2.2.4-3)$$

$$C = \frac{M_o}{m} \left(\frac{f_{cm}}{f_{ca}}\right)^3 \quad (2.2.4-4)$$

図2.2.2-5には、大地震と小地震共通で12地点で観測記録の得られている観測点について、Iquique地震本震と3月16日前震の観測記録のEW成分のスペクトル比とその平均値をそれぞれ示す。また、この平均値に合うように、理論スペクトル比SSRFを計算し、これが0.5Hz～3Hzの周波数帯域でデータにフィッティングするように、遺伝的アルゴリズムにより大地震と小地震のコーナー周波数をそれぞれ0.13Hzと0.54Hzと求めた。なお、距離補正については、前震について震源距離を用いることにして、本震については断層最短距離を用いた。用いた距離の値を表 2.2.4-1、表 2.2.4-2に示す。また、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行う際の適合度の変化を図2.2.2-6に示している。これらの結果により、応力降下量の比が約2.0、合成倍率は4.2 (4 or 5) と求めた。これらの結果を参考に、特性化震源モデルの初期値を表 2.2.4-3～表 2.2.4-5として設定した。

表 2.2.4-1 スペクトル比の計算に用いた観測点の本震からの断層最短距離

Station	E.D ist	Lat	Lon.
AP01	50	-18.3710	-70.3420
G001	100	-19.6690	-69.1940
HM BCX	49	-20.2780	-69.8880
PB11	62	-19.7610	-69.6560
PSGCX	42	-19.5970	-70.1230
T03A	41	-20.2300	-70.1460
T06A	41	-20.2140	-70.1380
T07A	52	-20.2560	-69.7860
T08A	42	-20.2700	-70.0940
T09A	39	-19.5960	-70.2110
T13A	83	-20.4960	-69.3370
TA01	39	-20.5660	-70.1810

表 2.2.4-2 スペクトル比の計算に用いた観測点の前震からの震源距離

Station	E.D ist	Lon.	Lat
AP01	182	-70.3420	-18.3710
G001	162	-69.1940	-19.6690
HM BCX	91	-69.8880	-20.2780
PB11	112	-69.6560	-19.7610
PSGCX	74	-70.1230	-19.5970
T03A	64	-70.1460	-20.2300
T06A	64	-70.1380	-20.2140
T07A	101	-69.7860	-20.2560
T08A	71	-70.0940	-20.2700
T09A	67	-70.2110	-19.5960
T13A	154	-69.3370	-20.4960
TA01	85	-70.1810	-20.5660

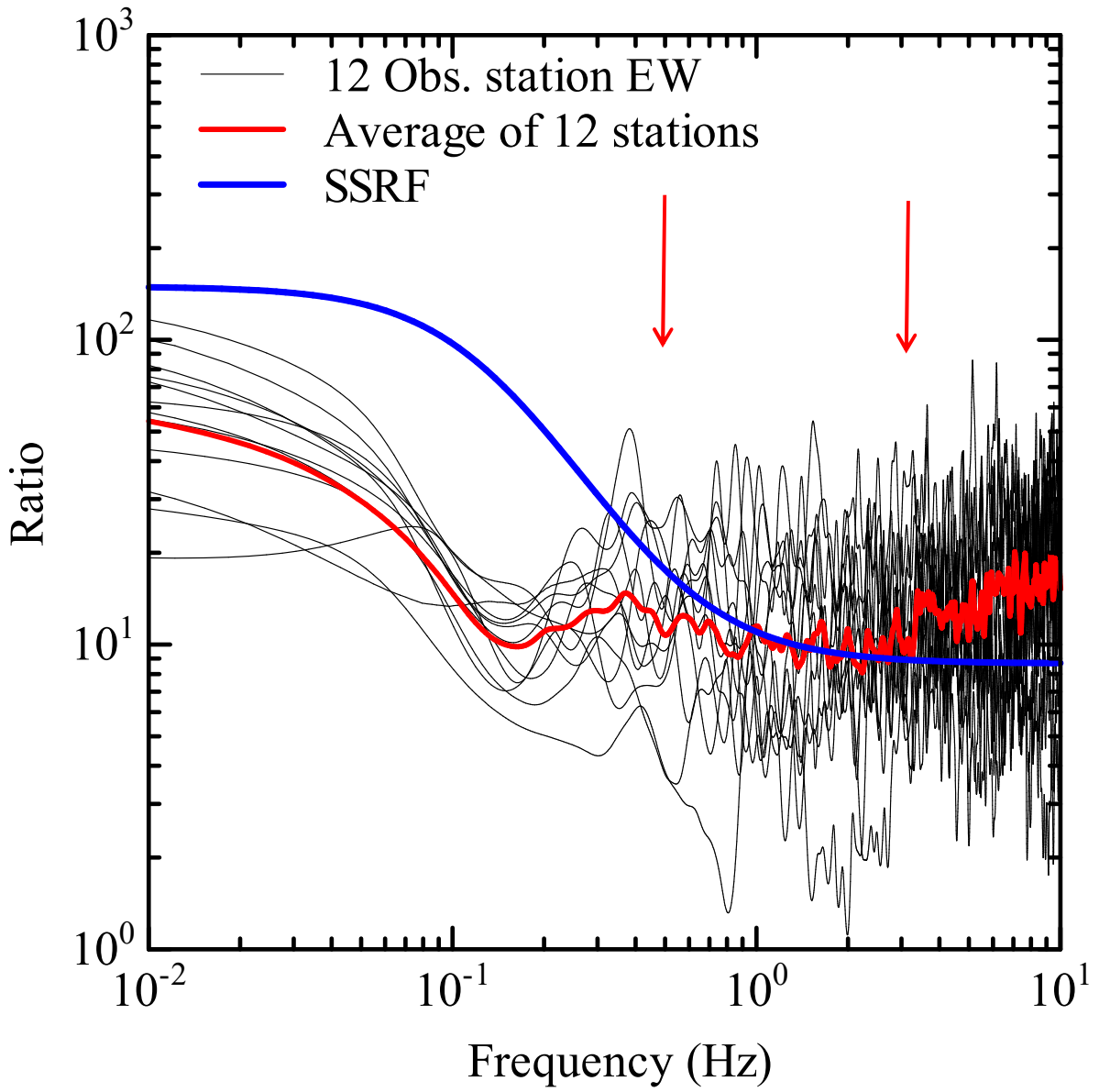


図2.2.4-5 震源スペクトル比とベストフィットのSSRFの比較

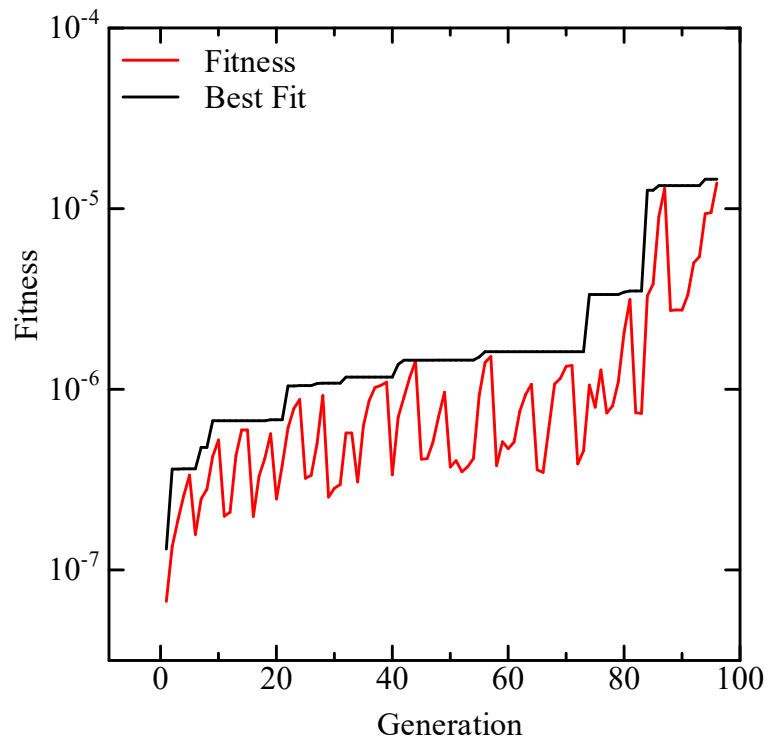


図2.2.4-6 震源スペクトル比にフィッティングしてコーナー周波数推定のためのGA適合度

表 2.2.4-3 推定された C と N の値

大地震のコーナー周波数	f_{cl}	0.13 Hz
前震のコーナー周波数	f_{cs}	0.54 Hz
合成倍率	N	4.2
Cの値	C	2

表 2.2.4-4 本震断層のパラメータ

fault parameters	
M_{Wl}	8.1
M_{0l} (N・m)	1.9E+21
S_l (km ²)	1600 (0.07S)
L_l (km) × W_l (km)	40 × 40
V_s, V_r (km/s)	3.6, 3.0
Q	110* $f^{0.69}$
$\Delta\sigma_l/\Delta\sigma_s$	2
N	4

表 2.2.4-5 前震断層のパラメータ

fault parameters	
M_{Ws}	6.7
M_{0s} (N・m)	1.27e+19
$\Delta\sigma_l/\Delta\sigma_s$	2
S_s (km ²)	-
L_s (km)	-
W_s (km)	-
D_s (m)	-
f_{cs} (Hz)	0.54

2.2.5 2014年チリ Iquique地震の地震動再現解析

2.2.5項で得られた大地震と小地震のスペクトル比と、2.2.3項で推定された断層モデルを参考に、観測波形は比較的にシンプルであることから、1つの強震動生成域SMGAからなる強震動評価のための断層モデルを図2.2.5-1に示すように設定した。この断層モデルに対して、SMGAを4×4×4で分割して、 V_s は3.6km/s、立ち上がり時間は約3秒とした。また、試行錯誤の結果、アスペリティと要素地震の応力降下量の比は2にした。設定したSMGAモデルでT13A、TA01、PGSCXの3つの観測点における計算結果（速度応答スペクトルと波形）をEW,NSについてそれぞれ図2.2.5-2～図2.2.5-7に示す。これらの図から、応答スペクトルに関しては、いずれの場合でも短周期側の計算結果と観測記録が概ね整合することが確認できる。T13AのEW成分では、計算結果が若干大きいのが、これは伝播経路のQ値の影響によるものであると判断される。

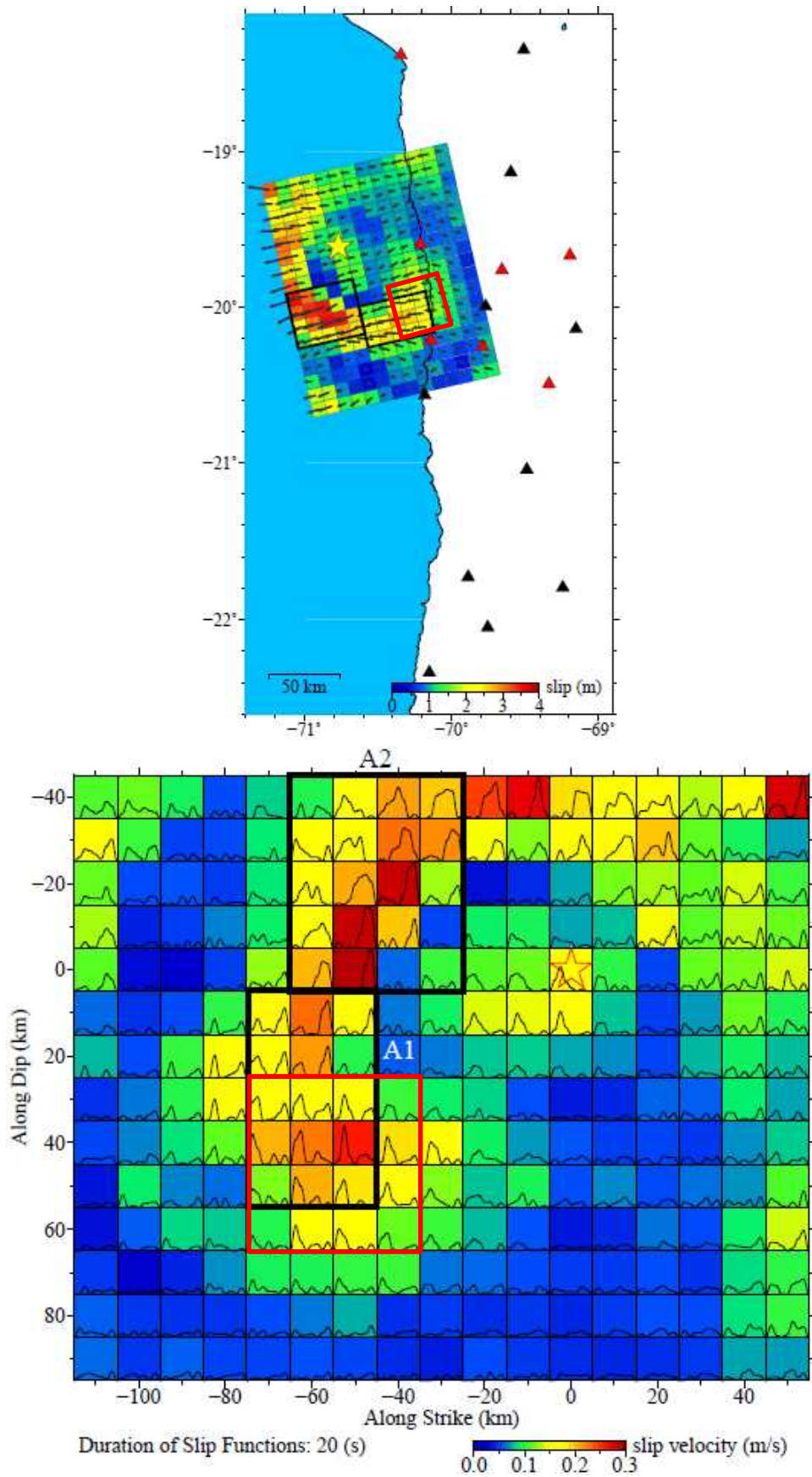


図2.2.5-1 強震動評価のためのアスペリティモデル (2.2.3節の図に加筆)

2.2.5-2

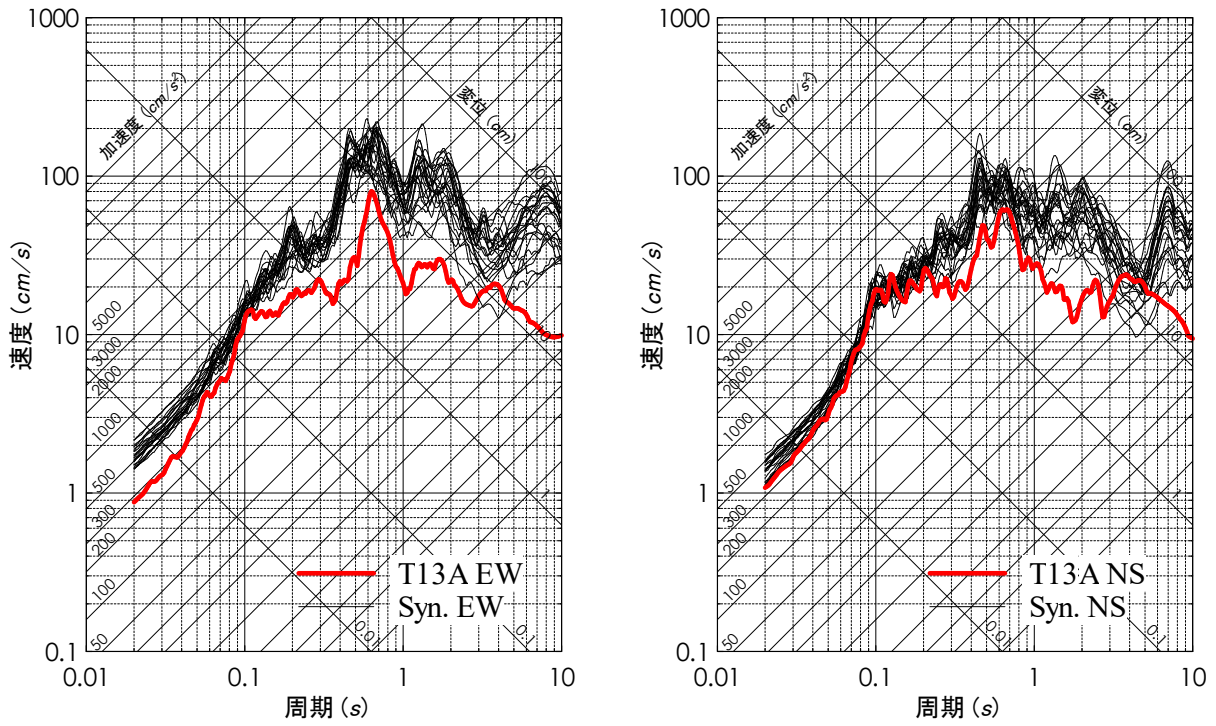


図2.2.5-2 T13A地点における計算結果と観測記録の比較

(EW、NS成分の速度応答スペクトル)

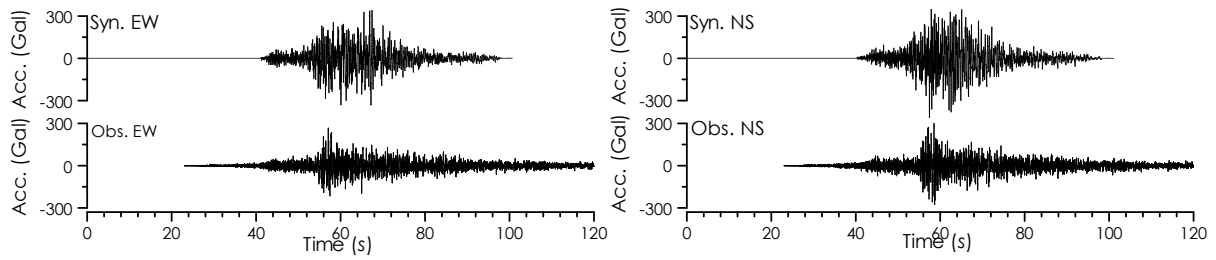


図2.2.5-3 T13A地点における計算結果と観測記録の比較 (EW、NS成分の加速度波形)

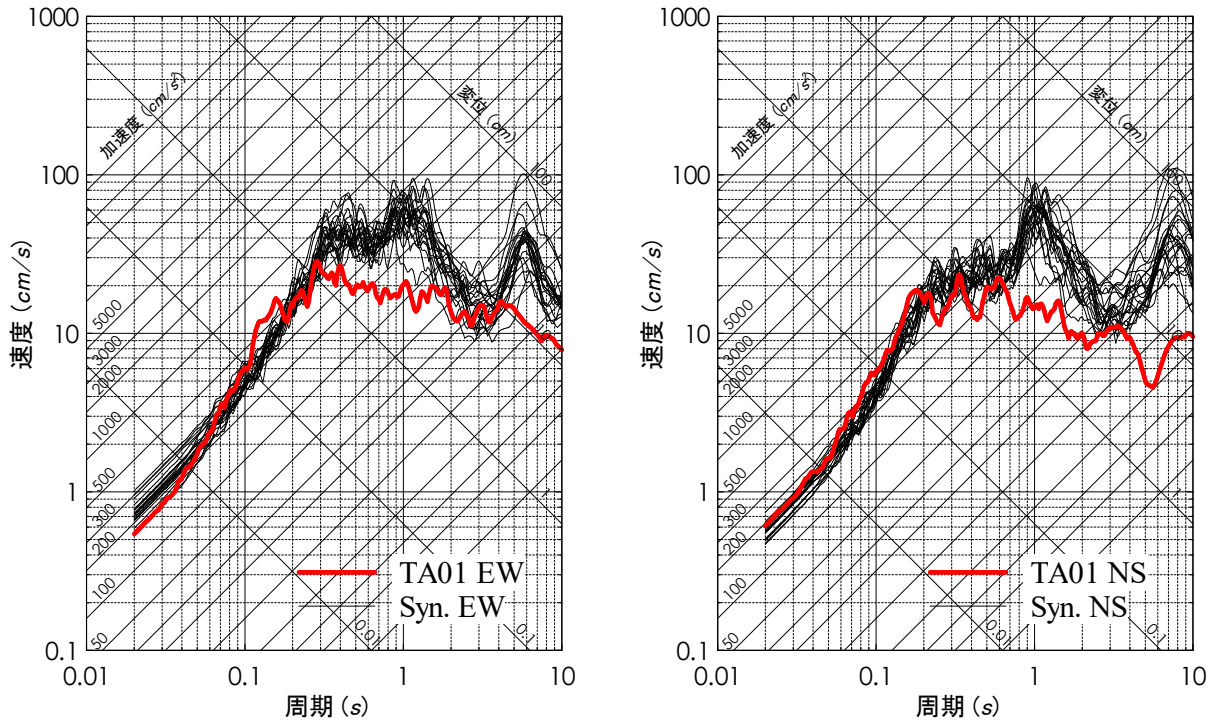


図2.2.5-4 TA01地点における計算結果と観測記録の比較（EW、NS成分の速度応答スペクトル）

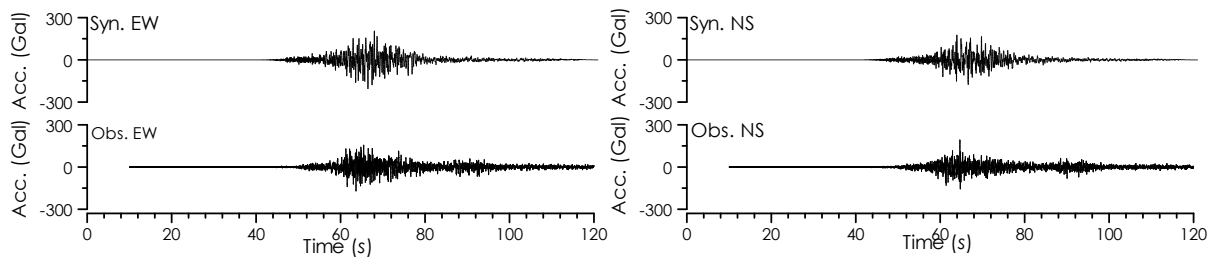


図2.2.5-5 TA01地点における計算結果と観測記録の比較（EW、NS成分の加速度波形）

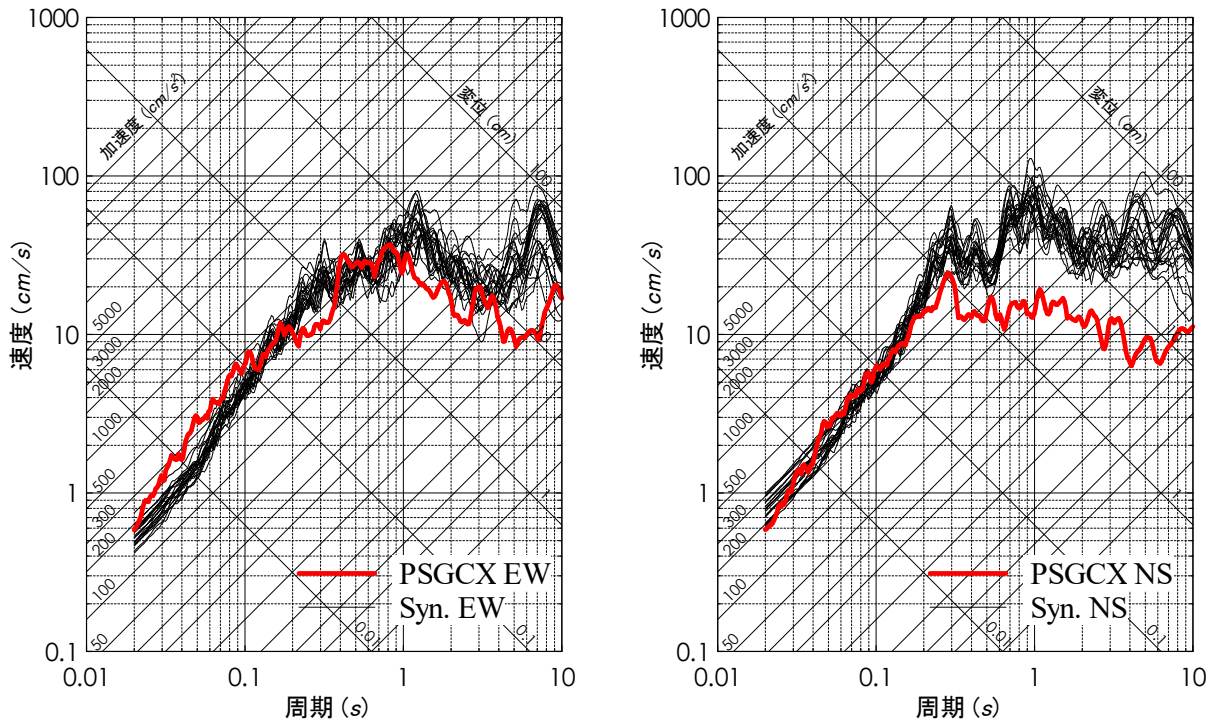


図2.2.5-6 PSGCX地点における計算結果と観測記録の比較

(EW、NS成分の速度応答スペクトル)

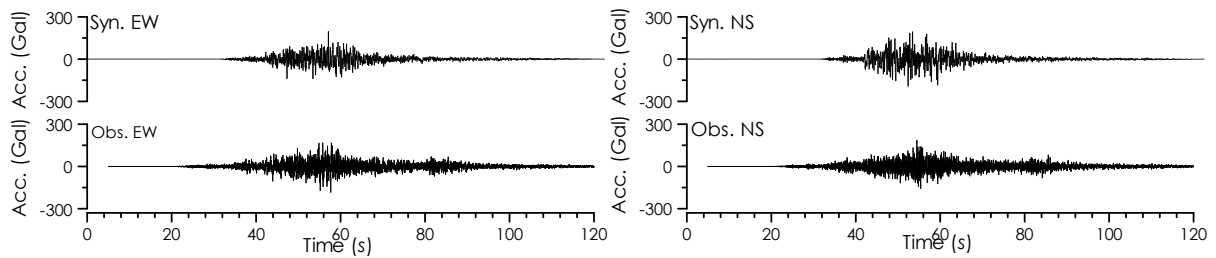


図2.2.5-7 PSGCX地点における計算結果と観測記録の比較 (EW、NS成分の加速度波形)

2.2.6 経験的・統計的グリーン関数法に関する知見の調査

本調査は海溝型巨大地震に対して経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法を適用するときの知見を調査するものである。国内外では、M8以上の巨大地震は発生しているが、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法を適用して巨大地震による地震動の推定を行っているのが、まだかなり限られている。特に国外においては、それほど見当たらない。したがって、本検討では、まず国内の文献に注目して、2011年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデルを推定した佐藤（2012）を取り上げた。

(1) 佐藤（2012）

佐藤（2012）は、「経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル—プレート境界地震の短周期レベルに着目して—」というタイトルの論文である。この論文では、短周期レベルの推定に重点を置いているが、本検討では、2011年東北地方太平洋沖地震の短周期レベルを推定するために、経験的グリーン関数法を適用して特性化震源モデルをまず推定されたことに注目して、経験的グリーン関数法を適用する際の特徴について、下記2点でまとめた。

- ① 図2.2.6-1に示されるように、東北地方太平洋沖地震の断層範囲は非常に広いため、それぞれの強震動生成域による地震動を評価するため、複数の経験的グリーン関数を用いている。
- ② 強震動生成域内の断層破壊伝播速度は強震動生成域により異なる値を用いていることが示されている。図2.2.6-1に示すそれぞれの強震動生成域について、強震動生成域1で3km/s、そのほかは2.0km/sとされている。また、背景領域においても、震源から強震動生成域1への破壊伝播速度は3.7km/sと速く、強震動生成域1の破壊開始点から強震動生成域2の破壊開始点までは1.5km/sと遅い設定となっている。

上記の2点について、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法を巨大地震に適用する際に参考になると考えられる。

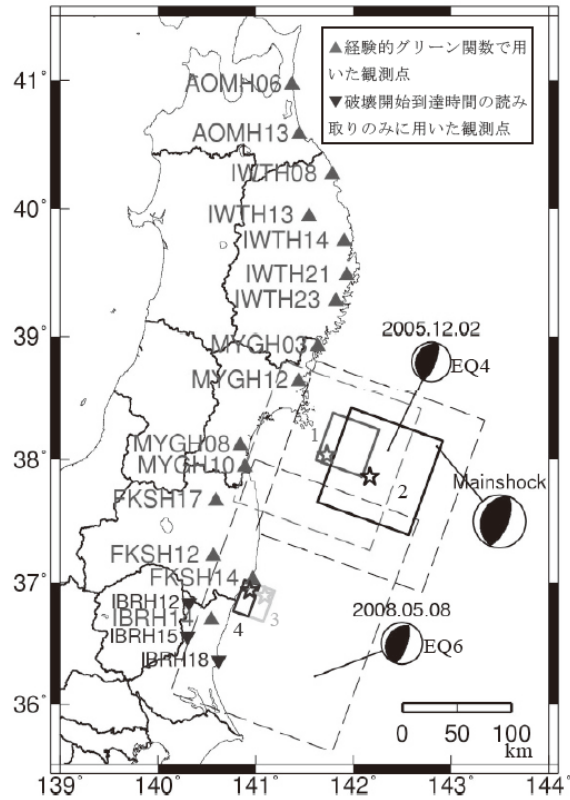


図2.2.6-1 佐藤 (2012)の図1: 経験的グリーン関数法に基づく強震動生成域 (実線の矩形)、その探査範囲 (破線の矩形)、破壊開始点位置 (星印)、およびグリーン関数として用いた地震と本震の震央位置 (気象庁)・メカニズム解 (F-net)、観測点位置 (三角)、1～4の数字は強震動生成域の番号を示す。

2.2節の参考文献

- 1) Akaike, Hirotugu (1980): Likelihood and the Bayes procedure, *Trabajos de Estadística Y de Investigación Operativa*, Vol. 31, No. 1, pp. 143-166.
- 2) Boroschek, Rubén L., Víctor Contreras, Dong Youp Kwak, and Jonathan P. Stewart (2012): Strong ground motion attributes of the 2010 M_w 8.8 Maule, Chile, earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. S1, pp. S19-S38.
- 3) Bouchon, Michel (1981): A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 4, pp. 959-971.
- 4) Brocher, Thomas M. (2008): Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations, *Journal of Seismology*, Vol. 12, No. 2, pp. 217-221.
- 5) Duputel, Zacharie, Junle Jiang, Romain Jolivet, Mark Simons, Luis Rivera, Jean-Paul Ampuero, Bryan Riel, Susan E. Owen, Angelyn W. Moore, Sergey V. Samsonov, Francisco Ortega Culaciati, and Sarah E. Minson (2015): The Iquique earthquake sequence of April 2014: Bayesian modeling accounting for prediction uncertainty, *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 19, pp. 7949-7957.
- 6) Frankel, Arthur (2017): Modeling strong-motion recordings of the 2010 M_w 8.8 Maule, Chile, earthquake with high stress-drop subevents and background slip, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 1, pp. 372-386.
- 7) Hartzell, Stephen H. and Thomas H. Heaton (1983): Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp. 1553-1583.
- 8) Hayes, Gavin P., David J. Wald, and Rebecca L. Johnson (2012): Slab1.0: A three-dimensional

model of global subduction zone geometries, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, No. B1, B01302.

- 9) Husen, Stephan, Edi Kissling, Ernst Flueh, and Günter Asch (1999): Accurate hypocentre determination in the seismogenic zone of the subducting Nazca Plate in northern Chile using a combined on-/offshore network, *Geophysical Journal International*, Vol. 138, No. 3, pp. 687-701.
- 10) Iwaki, Asako, Takahiro Maeda, Nobuyuki Morikawa, Shin Aoi, and Hiroyuki Fujiwara (2016): Kinematic source models for long-period ground motion simulations of megathrust earthquakes: Validation against ground motion data for the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 95.
- 11) Kennett, Brian L. N. and N. J. Kerry (1979): Seismic waves in a stratified half space, *Geophysical Journal International*, Vol. 57, No. 3, pp. 557-583.
- 12) Lawson, Charles L. and Richard J. Hanson (1974): *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, Inc., 337pp.
- 13) Lay, Thorne, Hiroo Kanamori, Charles J. Ammon, Keith D. Koper, Alexander R. Hutko, Lingling Ye, Han Yue, and Teresa M. Rushing (2012): Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, No. B4, B04311.
- 14) Liu, Chengli, Yong Zheng, Rongjiang Wang, and Xiong Xiong (2015): Kinematic rupture process of the 2014 Chile M_w 8.1 earthquake constrained by strong-motion, GPS static offsets and teleseismic data, *Geophysical Journal International*, Vol. 202, No. 2, pp. 1137-1145.
- 15) Masson, Frédéric, Catherine Dorbath, Claude Martinez, and Gabriel Carrier (2000): Local earthquake tomography of the Andes at 20°S: Implications for the structure and building of the

mountain range, *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 13, No. 1-2, pp. 3-19.

- 16) Melgar, Diego, Wenyuan Fan, Sebastian Riquelme, Jianghui Geng, Cunren Liang, Mauricio Fuentes, Gabriel Vargas, Richard M. Allen, Peter M. Shearer, and Eric J. Fielding (2016): Slip segmentation and slow rupture to the trench during the 2015, M_w 8.3 Illapel, Chile earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 3, pp. 961-966.
- 17) Meng, Lingsen, Hui Huang, Roland Bürgmann, Jean P. Ampuero, and Anne Strader (2015): Dual megathrust slip behaviors of the 2014 Iquique earthquake sequence, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 411, pp. 177-187.
- 18) Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura (2003): Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 2531-2545, doi: 10.1785/0120020183.
- 19) Murotani, Satoko, Hiroe Miyake, and Kazuki Koketsu (2008): Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth, Planets and Space*, Vol. 60, No. 9, pp. 987-991.
- 20) Murotani, Satoko, Kenji Satake, and Yushiro Fujii (2013): Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for $M \sim 9$ subduction-zone earthquakes, *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, No. 19, pp. 5070-5074.
- 21) Okada, Yoshimitsu (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 2, pp. 1018-1040.
- 22) Oleskevich, Daniel A., Roy D. Hyndman, and Kelin Wang (1999): The updip and downdip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia, south Alaska, SW Japan, and Chile, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. B7, pp. 14965-14991.

- 23) Pitarka, Arben, Robert Graves, and Paul Somerville (2004): Validation of a 3D velocity model of the Puget Sound region based on modeling ground motion from the 28 February 2001 Nisqually earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, pp. 1670-1689.
- 24) Ruiz, Sergio, Raúl Madariaga, Maximiliano Astroza, G. Rodolfo Saragoni, María Lancieri, Christophe Vigny, and Jaime Campos (2012): Short-period rupture process of the 2010 M_w 8.8 Maule earthquake in Chile, *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. S1, pp. S1-S18.
- 25) Schurr, Bernd, Günter Asch, Sebastian Hainzl, Jonathan Bedford, Andreas Hoechner, Mauro Paulo, Rongjiang Wang, Marcos Moreno, Mitja Bartsch, Yong Zhang, Onno Oncken, Frederik Tilmann, Torsten Dahm, Pia Victor, Sergio Barrientos, and Jean-Pierre Vilotte (2014): Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake, *Nature*, Vol. 512, pp. 299-302.
- 26) Sekiguchi, Haruko, Kojiro Irikura, and Tomotaka Iwata (2000): Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, No. 1, pp. 117-133.
- 27) Skarlatoudis, Andreas A., Paul G. Somerville, and Hong K. Thio (2016): Source-scaling relations of interface subduction earthquakes for strong ground motion and tsunami simulation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 4, pp. 1652-1662.
- 28) Skarlatoudis, Andreas A., Paul G. Somerville, Hong K. Thio, and Jeff R. Bayless (2015): Broadband strong ground motion simulations of large subduction earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 6, pp. 3050-3067.
- 29) Somerville, Paul, Kojiro Irikura, Robert Graves, and Sumio Sawada (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, Vol. 70, No. 1, pp. 59-80.

- 30) Suzuki, Wataru, Nelson Pulido, and Shin Aoi (2016): Rupture process and strong-motion generation of the 2014 Iquique, northern Chile, earthquake, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 10, No. 3, 1640008.
- 31) Tilmann, Frederik, Yong Zhang, Marcos Moreno, Joachim Saul, Felix Eckelmann, Mauro Palo, Zhiguo Deng, Andrey Babeyko, Kejie Chen, Juan C. Baez, Bernd Schurr, Rongjiang Wang, and Torsten Dahm (2016): The 2015 Illapel earthquake, central Chile: A type case for a characteristic earthquake?, *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 2, pp. 574-583.
- 32) Yuan, Xiaohui, Stephan V. Sobolev, Rainer Kind, Onno Oncken, Günter Bock, Günter Asch, Bernd Schurr, Frank Graeber, Alexander Rudloff, Winfried Hanka, Kurt Wylegalla, Rigobert Tibi, Christian Haberland, Andreas Rietbrock, Peter Giese, Peter Wigger, Peter Röwer, George Zandt, Susan Beck, Terry Wallace, Mario Pardo, and Diana Comte (2000): Subduction and collision processes in the central Andes constrained by converted seismic phases, *Nature*, Vol. 408, pp. 958-961.
- 33) CNN.co.jp (2014): チリ地震, 死者6人に 建築基準の徹底で被害を抑制, <https://www.cnn.co.jp/world/35046033.html> (2018年2月28日参照).
- 34) 佐藤智美 (2012): 経験的グリーン関数に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル—プレート境界地震の短周期レベルに着目して—, *日本建築学会構造系論文集*, 第77巻, 第675号, pp. 695-704.
- 35) 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, 第3号, pp. 31-45.
- 36) 宮腰研・田中礼司・古村美津子・松浦律子・高井伸雄 (2017): 特性化震源モデルに基づいた2015年ネパール・ゴルカ地震 (M_w 7.8) の強震動評価, *日本地震学会2017年度秋* 参 2.2-5

季大会， S15-P26.

- 37) 渡辺基史・藤原広行・佐藤俊明・石井透・早川崇 (2008)：断層破壊過程の複雑さが強震動予測結果に及ぼす影響とその支配的パラメータの抽出－2003年十勝沖地震に対する検討－，地震第2輯，第60巻，第2号，pp. 253-265.

2.3 巨大地震の震源特性パラメータの設定手法の調査

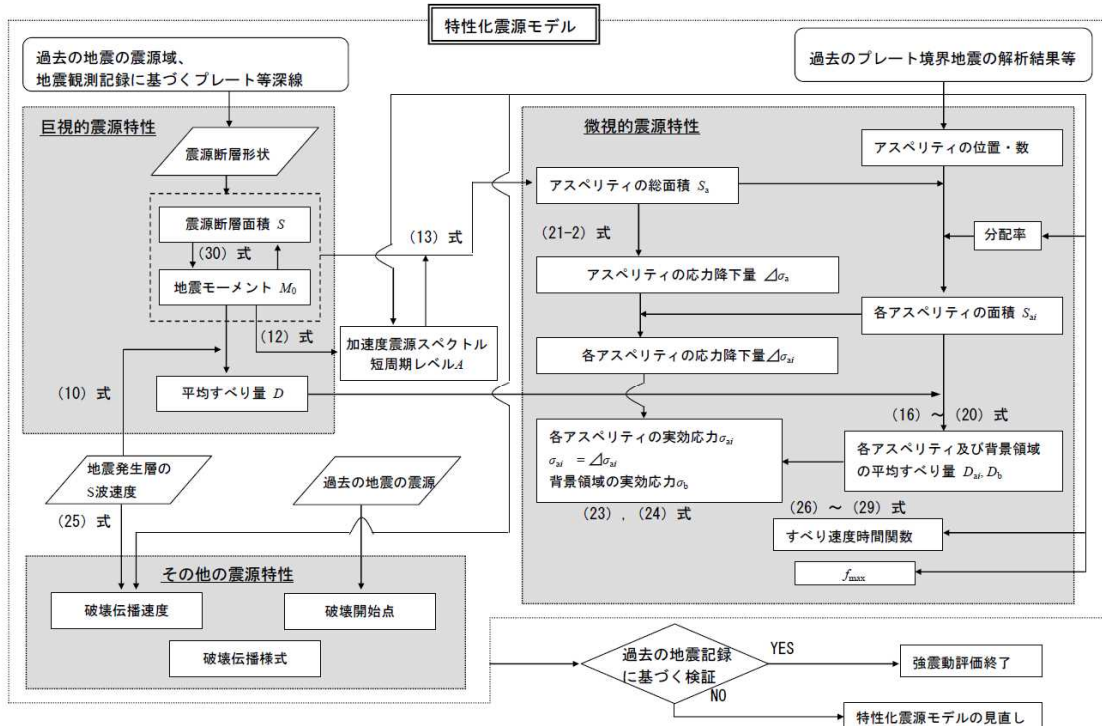
(1) 地震調査研究推進本部 (2005)

プレート間地震は、活断層で発生する地震と比較して、地震の発生間隔が短いために、海域によっては過去に発生した地震の状況を示す情報が残されており、特性化震源モデルの設定にあたって、それらの情報を活用することができる。また、過去の地震関連データを用いて、それぞれの段階で特性化震源モデルの検証を行い、必要があれば震源特性パラメータの見直しを行う。このような特性化震源モデルの見直しの段階では、観測波形等を説明できる震源特性パラメータが求められることより、以下の「レシピ」を拡大解釈する形で検討することもある。この場合、過去の地震関連データ（地震規模、震源域、地震波形記録、震度、被害など）すべてが整合性あるものとはならない可能性もあり、解析の目的に応じて優先順位をつけてデータを採用することが必要となる。

地震調査研究推進本部(2005)によるプレート間地震に対する震源特性パラメータの設定の流れを図 2.3-1 に示す。ただし、地震調査研究推進本部(2005)によるプレート間地震の強震動予測のレシピは、1978 年宮城県沖地震(M_w 7.6)や 2003 年十勝沖地震(M_w 8.1)の地震動評価を踏まえて、(2.3-1)式に示す円形クラック式(Eshelby, 1957)に基づいている。

$$M_0 = 16 / (7 \cdot \pi^{3/2}) \cdot \Delta\sigma \cdot S^{3/2} \quad (2.3-1)$$

これは、田島・他(2013)が指摘している第 1 ステージの地震を対象としたものである。破壊が海底まで達する大地震の場合だと、断層幅の飽和による第 2 ステージに移り、地表で応力が解放されて境界条件が変わることから、断層面の平均応力降下量の評価に円形クラック式をそのまま適用することは不適切である。



付図5 プレート境界地震の震源特性パラメータ設定の流れ

図2.3-1 地震調査研究推進本部(2005)によるプレート間地震に対する震源特性パラメータの設定の流れ

(2) 内閣府 (2012)

内閣府 (2012)は、南海トラフの巨大地震の震源断層モデルを検討するに当たり、南海トラフで発生した過去地震に加えて、世界の海溝型地震の震源断層モデルを調査し、それらの特徴等を整理したうえで、科学的知見に基づき、南海トラフの巨大地震対策を検討する際に想定すべき最大クラスの地震・津波の検討を進めている。知見の整理にあたっては、強震動を評価するための強震断層モデルと、津波高等を評価するための津波断層モデルをそれぞれ区別している。

南海トラフの巨大地震の想定マグニチュードは、震度分布・津波高の推計過程において、精査した結果、最大クラスの地震・津波を想定して、震度分布を推計する強震断層モデルの M_w は9.0、津波を推計する津波断層モデルの M_w は9.1 を確定値としている。

内閣府(2012)による南海トラフの巨大地震における強震断層モデルの断層パラメータの算定手順をまとめたフローを図 2.3-2 に、強震断層モデルのイメージを図 2.3-3 に示す。南海トラフの巨大地震における津波断層モデルの断層パラメータの算定手順をまとめたフローを図 2.3-4 に、津波断層モデルのイメージ（基本方針）を図 2.3-5 に示す。

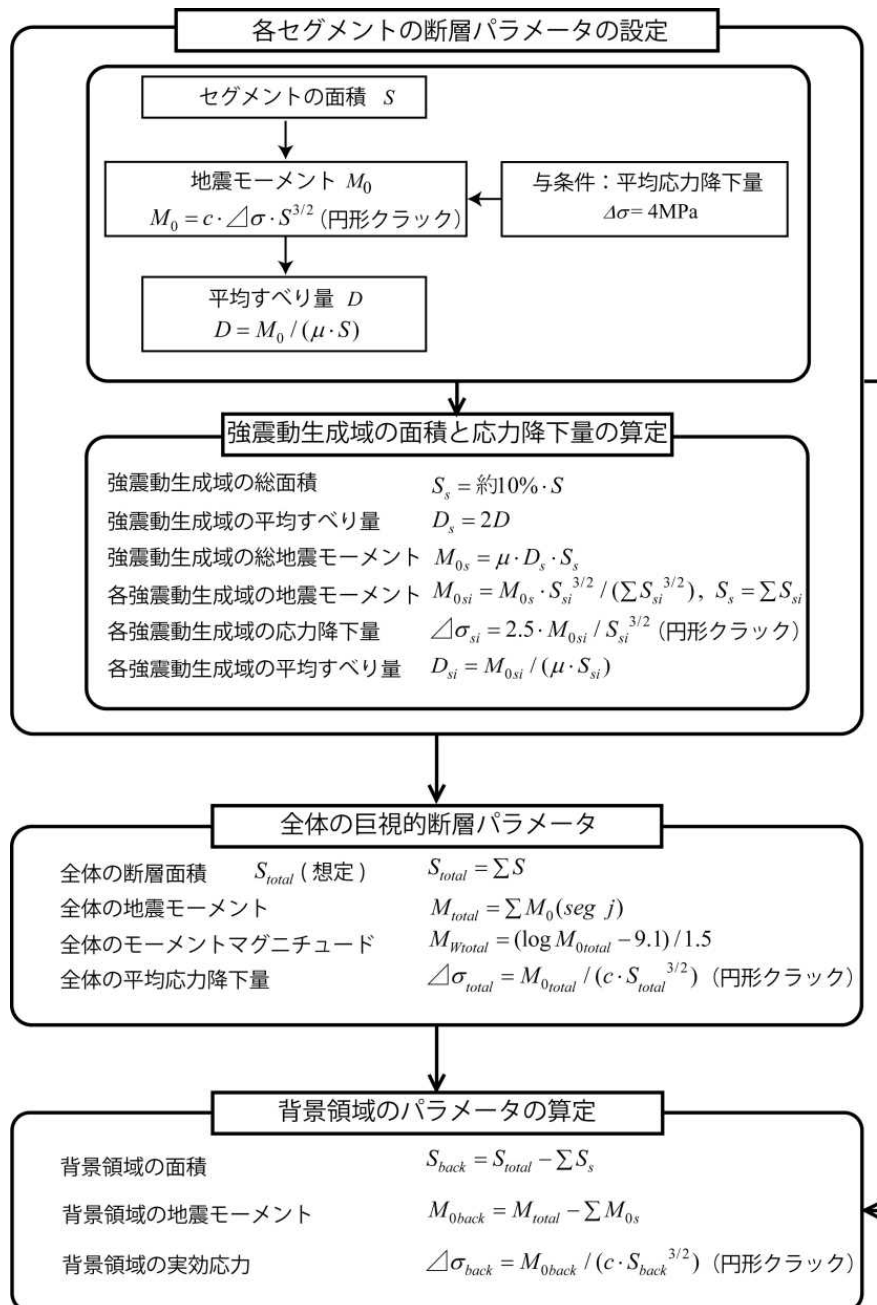


図 2.3-2 内閣府(2012)による強震断層モデルの断層パラメータ算定手順をまとめたフロー

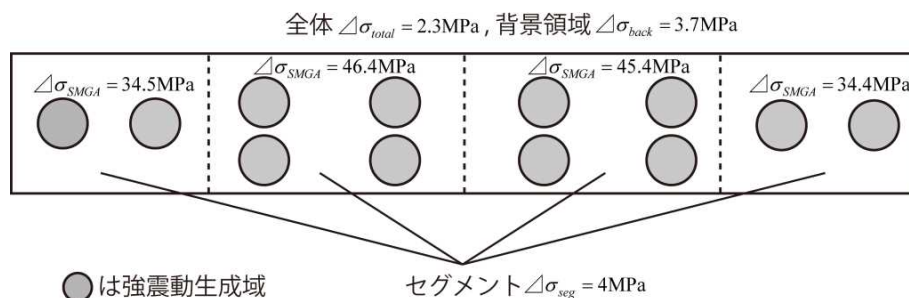


図 2.3-3 内閣府(2012)による強震断層モデルのイメージ図 (基本方針)

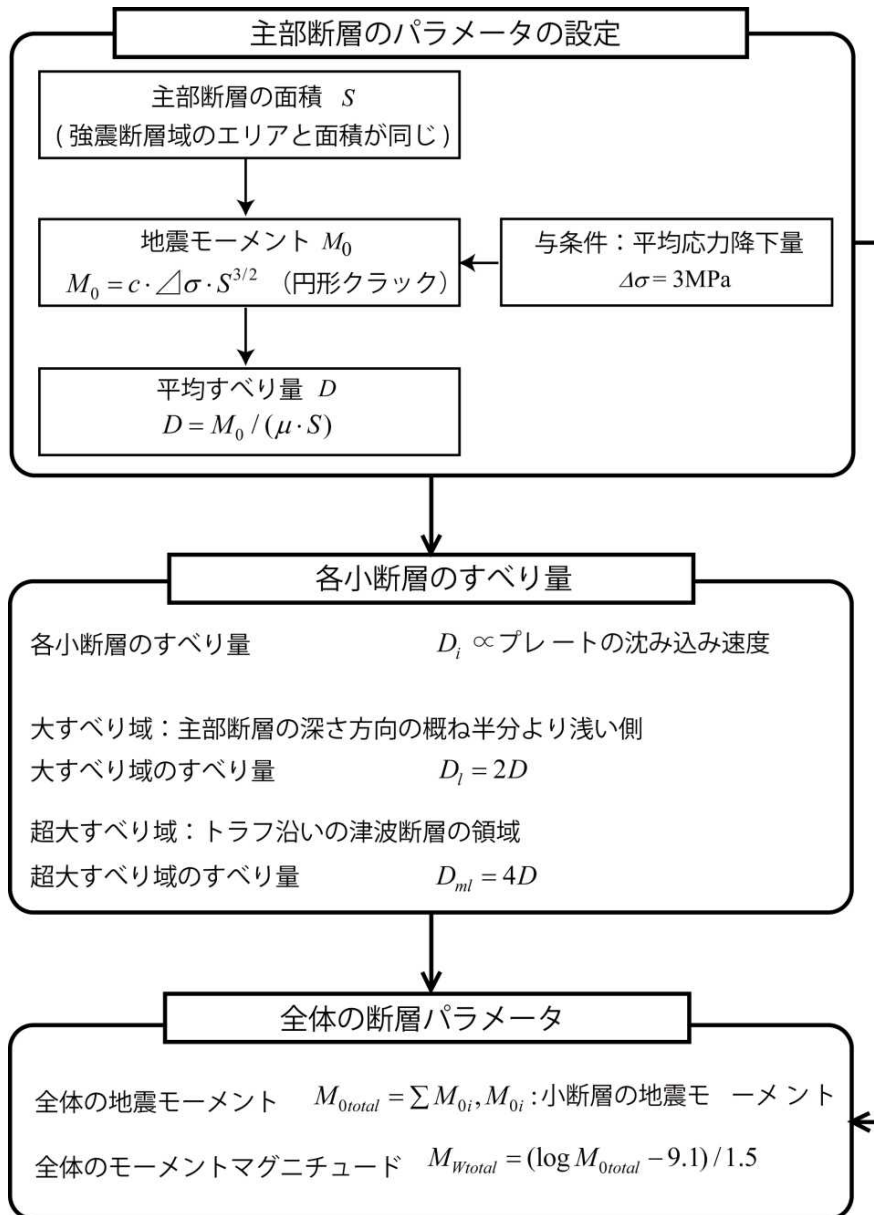


図 2.3-4 内閣府(2012)による津波断層モデルの断層パラメータ算定手順をまとめたフロー

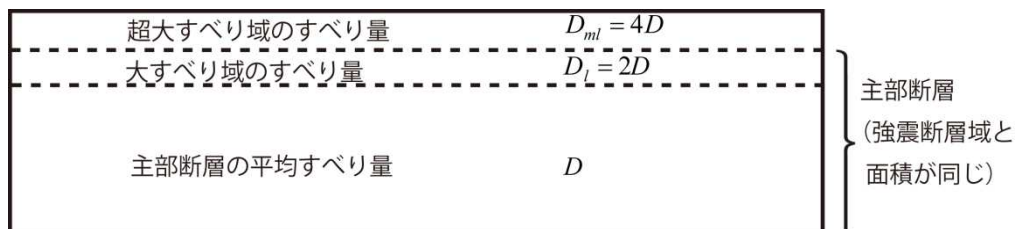


図 2.3-5 内閣府(2012)による津波断層モデルのイメージ図 (基本方針)

(3) 壇・他 (2013)

壇・他 (2013) は、津波も強震動も断層破壊という共通の現象の結果であるという観点で、両者の統一断層モデルを考えた。

具体的には、はじめに、2011年東北地方太平洋沖地震の断層パラメータが従来の強震動予測で用いられている断層パラメータの相似則の延長線上にあることを確認したうえで、強震動と津波の予測のための統一断層モデルとしてのアスペリティモデルを提示した。

ついで、そのモデルに基づいて想定地震の断層パラメータの設定手順(図2.3-6)を提案し、提案したアスペリティモデルに東北地方太平洋沖地震の断層パラメータをあてはめてモデルの妥当性を示した。また、提案した断層パラメータの設定手順を南海トラフの巨大地震に適用し、強震動と津波の予測のための統一断層モデルの設定例を4つ示した。

最後に提示した4つの断層モデルを用いて愛知県や三重県、静岡県で強震動の試算を行い、その結果を1707年宝永地震($M 8.6$)や1854年安政東海地震($M 8.4$)、1944年昭和南海地震($M 7.9$)の震度分布と比較して震源モデルの妥当性に関する考察を加えた。

なお、本論文では、提案した断層パラメータの設定手順の妥当性は、東北地方太平洋沖地震の強震記録や津波記録で直接確認していないため、今後その確認が必要としている。

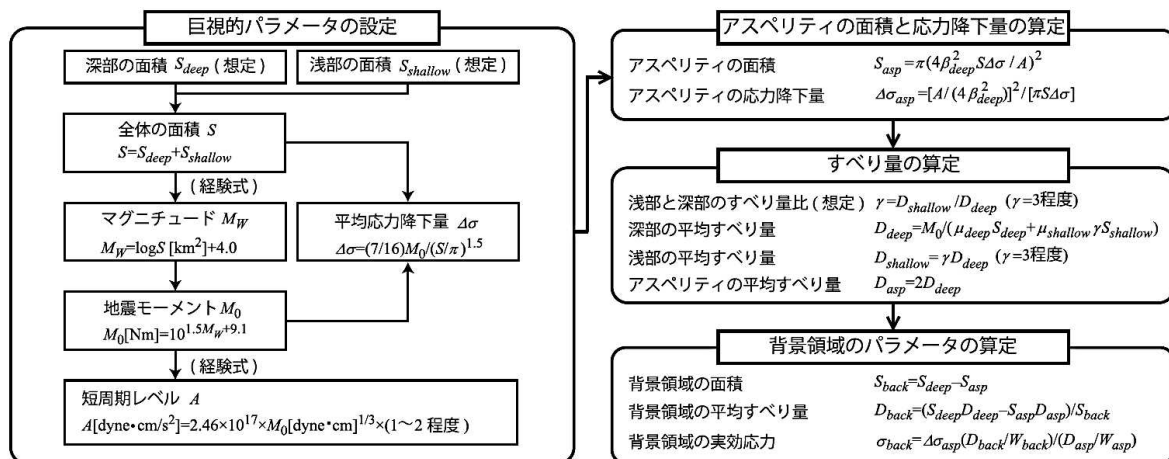


図7 強震動と津波の予測のための統一震源モデルの断層パラメータ算定手順

図2.3-6 壇・他 (2013) による強震動と津波の予測のための統一震源モデルの断層パラメータ算定手順

(4) 杉野・他 (2014)

杉野・他 (2013) は、原子力発電所の確率論的津波ハザード解析手法の高度化に資するよう、将来予測のための津波想定のため、東北地震津波を含む国内外の $M9$ クラス地震の津波波源に関する知見・教訓を整理し、その結果を踏まえてプレート間地震に起因する津波の特性化波源モデルの設定方法を提案した (図 2.3-7)。

特性化波源モデルの設定方法では、津波波源の特性表示を3段階とし、巨視的波源特性、微視的波源特性、破壊伝播特性で表す。巨視的波源特性では、既往最大の地震規模に縛られることなく可能性を十分に考慮した波源領域を対象とし、その領域を区分したセグメントの組合せによって地震規模が設定される。微視的波源特性では、 M_w に応じて3つのクラスを設け、 $M_w 8.2$ 以下の中小規模の波源では均一なすべり分布、 $M_w 8.3\sim 8.8$ の大規模な波源では大すべり域と背景領域の2段階不均一すべり分布、 $M_w 8.9$ 以上の超大規模な波源ではさらに超大すべり域を加えた3段階不均一すべり分布がそれぞれ設定される (図 2.3-8)。これらの領域のすべり量と面積については、超大すべり域は平均すべり量の3倍で全体面積の15%とし、超大すべり域と大すべり域を合わせた領域は平均すべり量の2倍で全体面積の40%とする。破壊伝播特性では、 $M_w 8.3$ 以上の津波波源を対象に、波源領域が広大になるため、同心円状の破壊伝播を仮定する場合と複数セグメントの時間差発生を仮定する場合の2種類の破壊伝播様式を考慮して設定する。

特性化波源モデルを東北地震津波に適用した結果 (図 2.3-9)、東北地震津波の痕跡高を概ね再現でき、同設定方法が有用であることを確認した。

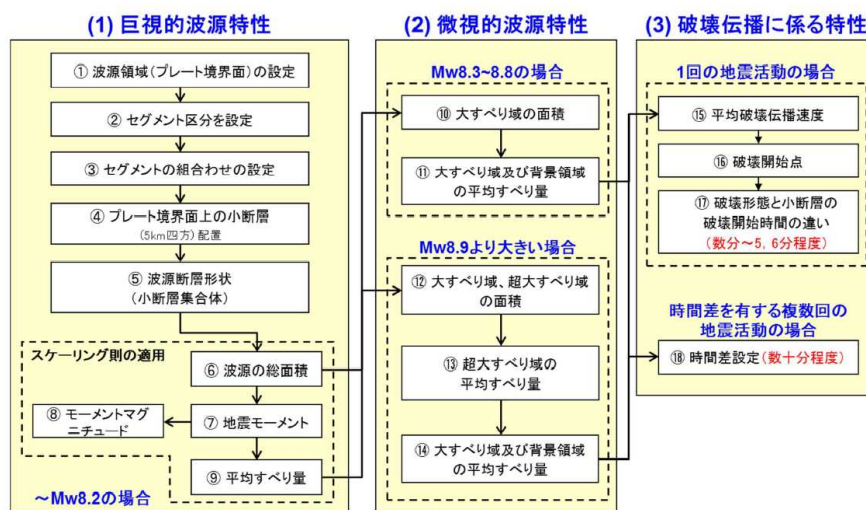


図1 プレート間地震による津波の特性化波源モデルの設定手順

図2.3-7 杉野・他 (2014) によるプレート間地震による津波の特性化波源モデルの設定手順
2.3-7

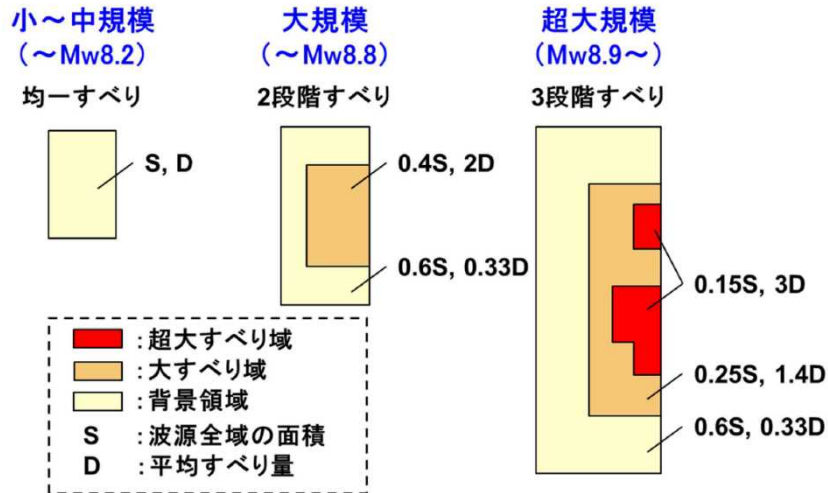


図2 微視的波源特性に係る波源領域内の空間的すべり分布の設定方法

図2.3-8 杉野・他 (2014) による微視的波源特性に係る

波源領域内の空間的すべり分布の設定方法

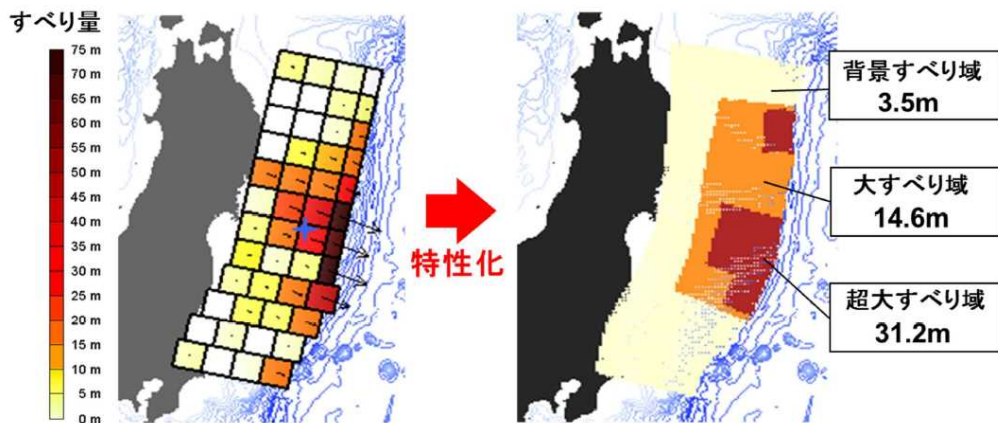


図8 東北地震津波の再現用波源モデル (左) と特性化波源モデル (右)

図2.3-9 杉野・他 (2014) による東北地震津波の

再現用波源モデル (左) と特性化波源モデル (右)

(5) 具・他 (2016, 2017)

具・他 (2016, 2017)では、プレート間地震を断層幅が飽和しない小地震(第1ステージ)と断層幅が飽和する大地震(第2ステージ)に分類し、大地震については、円形クラック式の代わりに動学的断層破壊シミュレーションによる平均動的応力降下量の近似式を用いて、実際の地震データに基づき、平均動的応力降下量とアスペリティの動的応力降下量を算定した。またこれらの値を用いて、プレート間地震における巨視的断層パラメータの相似則を設定した。

次に、第2ステージのプレート間地震の強震動予測のための断層パラメータの設定方法を提案した(図2.3-10)。本方法の特徴は、強震動を生成するアスペリティとその周辺の背景領域、および大すべり域と超大すべり域を考えていることである(図2.3-11)。

最後に、東北地方太平洋沖地震を対象として、断層パラメータを算定し(図2.3-12)、経験的グリーン関数法により強震動の再現計算を行った。その結果、地震記録がほぼ再現でき、提案した断層パラメータの設定方法の妥当性が検証できた。

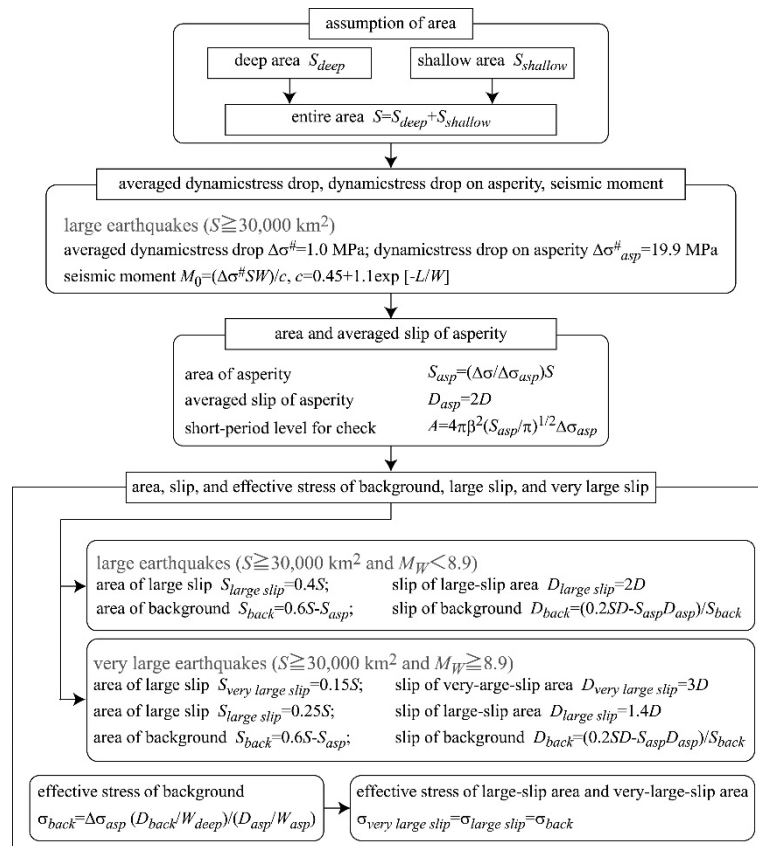


図2.3-10 具・他 (2016) による第2ステージのプレート間地震による強震動予測のための断層パラメータ設定方法

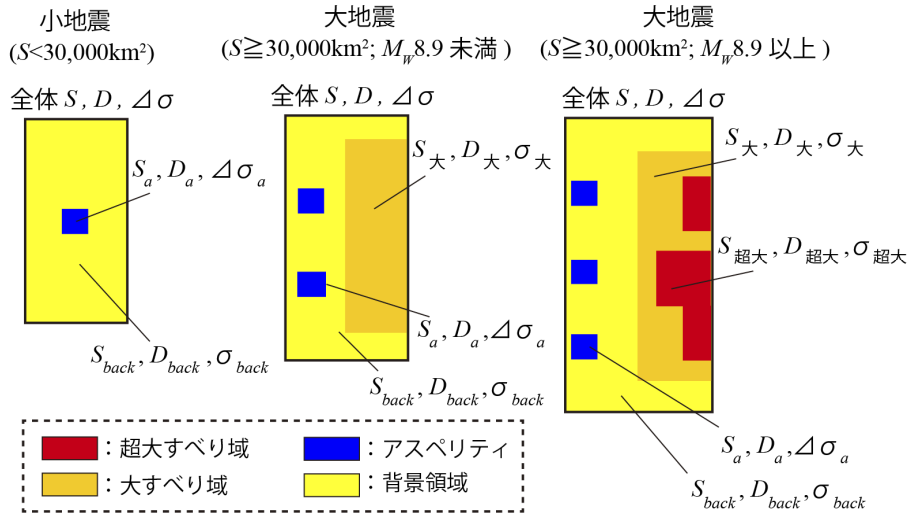


図 2.3-11 具・他 (2016) による強震動と津波の統一モデルのすべり分布(杉野・他 (2014)に加筆)

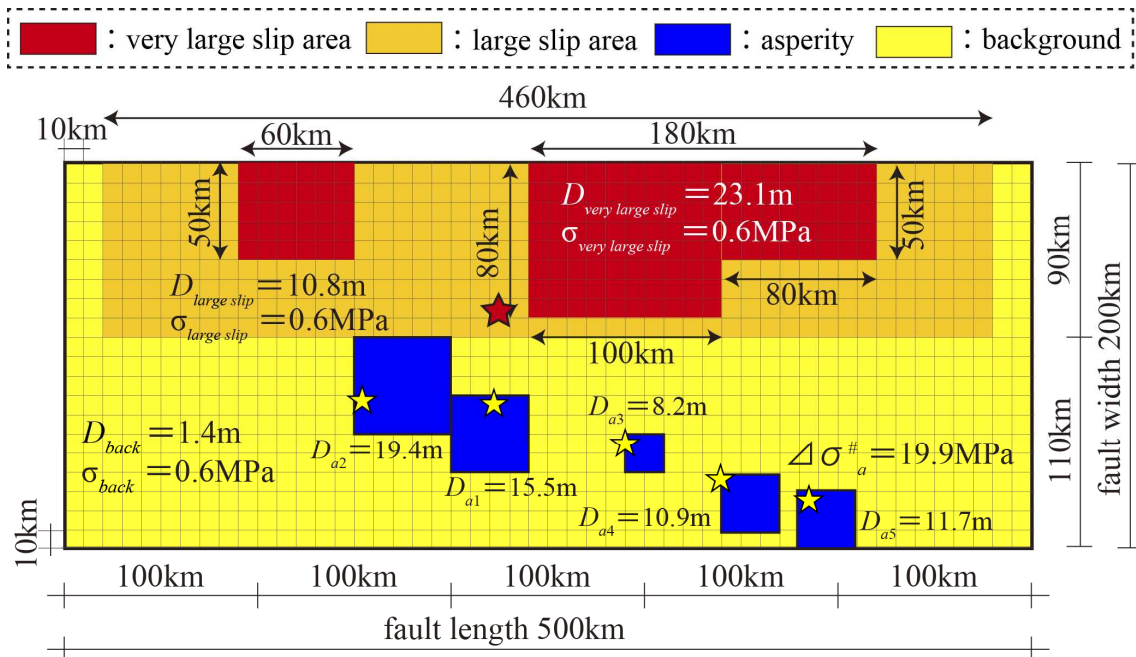


図 2.3-12 具・他 (2017) による東北地方太平洋沖地震の断層モデルの設定例

(6) 地震調査研究推進本部 (2017)

地震調査委員会は、将来発生する地震について地震発生可能性の長期評価を取りまとめており、今後、これらの長期評価に基づいて将来発生する可能性のある津波を評価する予定である。その際、一般的には将来発生する地震の断層のすべり分布等が確実には分からない。このため、不確実性を考慮した上で、単純化したパラメータによる多数の特性化波源断層モデルを設定し、それらに基づいた津波の予測や評価の手法を検討し、「波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）」（以下「津波レシピ」という。）として取りまとめている。

波源断層特性パラメータの設定方法は、想定した地震によって発生する津波に対して特性化波源断層モデルを構築するために具体的に示されたものである。特性化波源断層モデルの検討にあたっては、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）（地震調査委員会，2016）の特性化震源モデルの考え方を参考とした。地震調査研究推進本部(2017)によるプレート間地震（大すべり域と超大すべり域を設定）の波源断層特性パラメータの設定の流れを図2.3-13に示す。

波源断層モデルの微視的波源断層特性に関するパラメータとして、

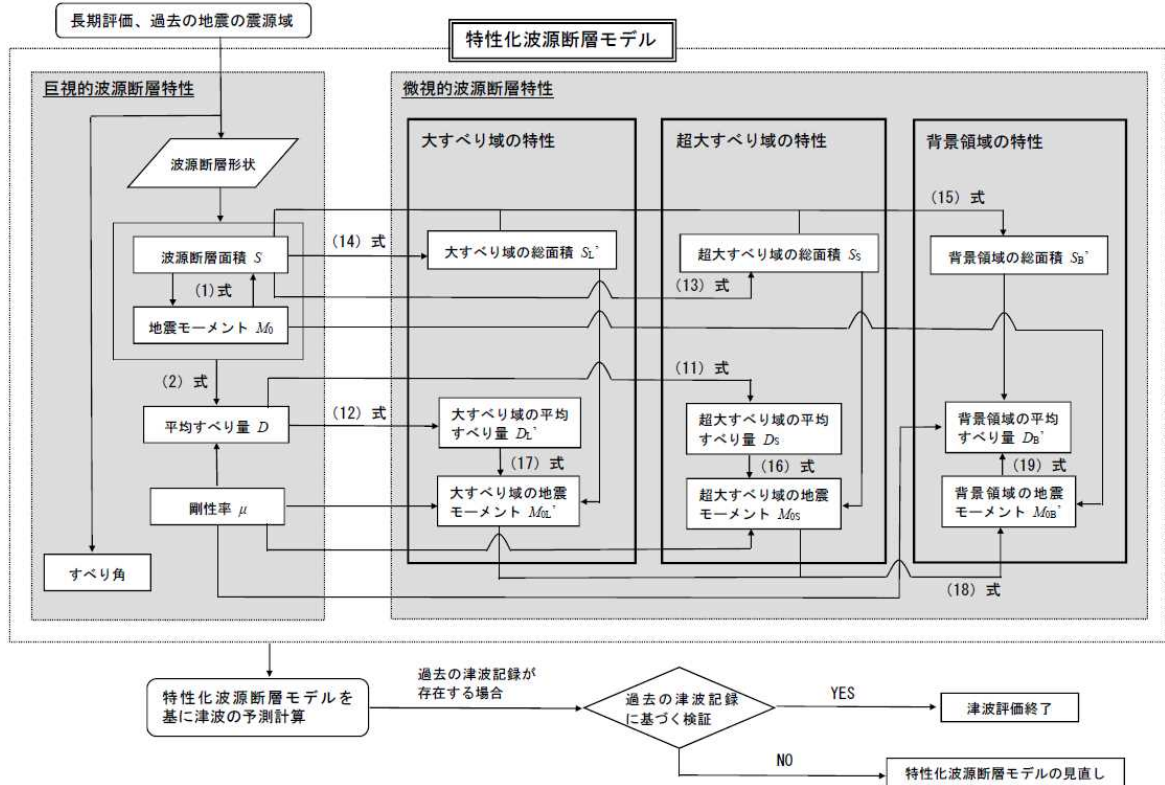
- ・ 大すべり域の位置・個数
- ・ 大すべり域のすべり量と面積

を設定する。大すべり域は不均質なすべり量分布が津波の発生に与える影響を考慮するために設定するもので、背景領域に比べてすべり量の大きな領域として設定する。ここでは、最も単純な場合として、大すべり域、背景領域のすべり量がそれぞれ一様な2段階のすべり量分布を基本とする（図2.3-14、図2.3-15）。

また、断層破壊が海溝軸付近まで到達する場合には、海溝軸付近で非常に大きなすべりが生じて巨大な津波を発生させることがある（例えば、Satake *et al.*, 2013）。このようなすべりが津波の発生に与える影響を考慮する場合には、海溝軸に沿って設定した大すべり域の中に更にすべり量の大きな超大すべり域を設定する（図2.3-16、図2.3-17）。この場合、上記のパラメータに加え、

- ・ 超大すべり域の位置・個数
- ・ 超大すべり域のすべり量と面積

を設定する。ここでは、最も単純な場合として、超大すべり域、大すべり域、背景領域のすべり量がそれぞれ一様な3段階のすべり量分布を基本とする。



付図2 プレート間地震（大すべり域と超大すべり域を設定）の波源断層特性パラメータの設定の流れ

図2.3-13 地震調査研究推進本部(2017)によるプレート間地震（大すべり域と超大すべり域を設定）の波源断層特性パラメータの設定の流れ

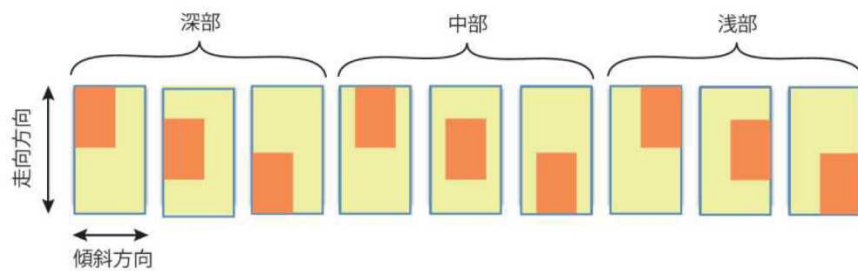


図5 大すべり域の設定例

(橙色が大すべり域、黄色が背景領域を表す)

図2.3-14 地震調査研究推進本部(2017)による大すべり域の設定例

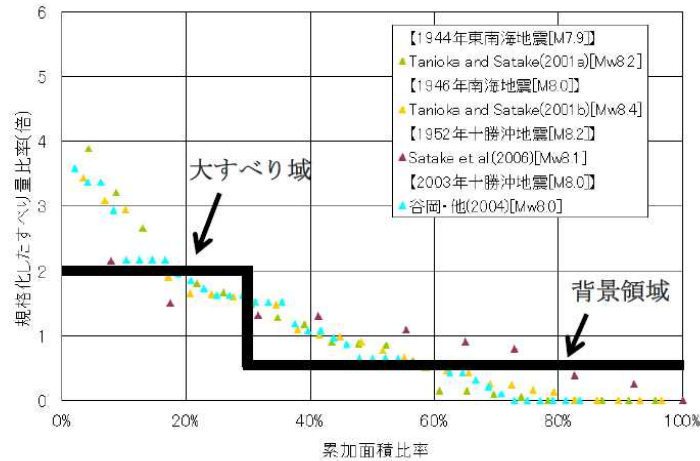


図6 巨大地震における規格化したすべり量比率と累加積分比率の分布

図2.3-15 地震調査研究推進本部(2017)による巨大地震における規格化したすべり量比率と累加積分比率の分布

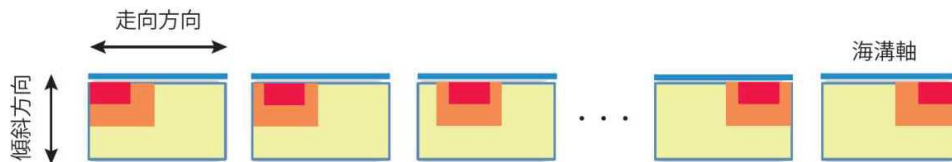


図7 超大すべり域の設定例

図2.3-16 地震調査研究推進本部(2017)による超大すべり域の設定例

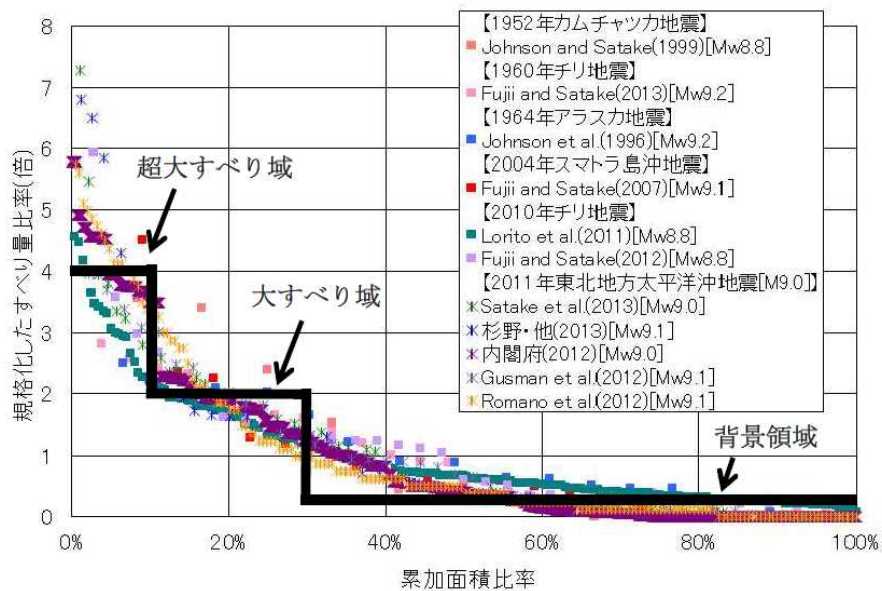


図8 超巨大地震における規格化したすべり量比率と累加積分比率の分布

図2.3-17 地震調査研究推進本部(2017)による超巨大地震における規格化したすべり量比率と累加積分比率の分布

2.3 節の参考文献

- 1) 具典淑・ドルジャパラムサロル・壇一男・入江紀嘉 (2016): 長大低角逆断層を考慮した動力的断層破壊シミュレーションによるプレート境界地震の平均動的応力降下量算定式における応力形状係数の検討 (その 4) 強震動と津波の統一断層モデルの設定方法, B-II, pp. 1133-1134.
- 2) 具典淑・ドルジャパラムサロル・壇一男・入江紀嘉 (2017): 長大低角逆断層を考慮した動力的断層破壊シミュレーションによるプレート境界地震の平均動的応力降下量算定式における応力形状係数の検討 (その 6)強震動と津波の統一断層モデルを用いた強震動シミュレーション, B-II, pp. 197-198.
- 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) 地震調査研究推進本部 (2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ) , http://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami_recipe.pdf.
- 5) 杉野英治・岩渕洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭澤勝三・亀田弘行・今村文彦 (2014): プレート境界地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.14, pp. 1-18.
- 6) 壇一男・石井やよい・宮腰淳一・高橋広人・護雅史・福和伸夫 (2013): マグニチュード 9クラスのプレート境界地震による強震動予測のための断層モデルの設定方法-南海トラフ巨大地震への適用と東海地方における強震動の試算例-, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第692号, pp. 1685-1694.
- 7) 内閣府 (2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) (平成24年8月29日発表), http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html. (2018年2月2日参照)