

平成 28 年度 原子力施設等防災対策等委託費
(海洋プレート内地震の地震動評価の調査) 事業
業務報告書

平成 29 年 3 月

株式会社 大崎総合研究所

平成 28 年度 原子力施設等防災対策等委託費
(海洋プレート内地震の地震動評価の調査) 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	1-5
2. 国内の海洋プレート内地震の震源特性の調査	2. 1-1
2.1 国内のスラブ内地震の地震動特性の調査	2. 1-1
2.2 国内のスラブ内地震の断層パラメータの設定方法の調査	2. 2-1
2.3 国内のスラブ内地震の断層パラメータの調査	2. 3-1
2.4 国内のスラブ内地震の断層パラメータの分析	2. 4-1
2.5 国内のアウトライズ地震(浅い地震)の断層パラメータの調査	2. 5-1
2.6 国内のアウトライズ地震(浅い地震)の断層パラメータの分析	2. 6-1
3. 国外の海洋プレート内地震の震源特性の調査	3. 1-1
3.1 国外のスラブ内地震の地震動特性の調査	3. 1-1
3.2 国外のスラブ内地震のスケーリング則の調査	3. 2-1
3.3 国外のスラブ内地震の断層パラメータの調査	3. 3-1
3.4 国外のスラブ内地震の断層パラメータの分析	3. 4-1
4. 国外の海洋プレート内地震の地震動評価	4. 1-1
4.1 国外のスラブ内地震の地震動解析事例の調査	4. 1-1
4.2 国外のスラブ内地震による地震観測記録の収集および波形処理	4. 2-1
4.3 国外のスラブ内地震の震源モデルの設定	4. 3-1
4.4 国外のスラブ内地震の地震動再現解析	4. 4-1

5. 結 論.....5-1

参考文献（アルファベット順） 参-1

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。原子力規制委員会の新規制基準では、プレート間地震及び海洋プレート内地震に関して、国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構及びテクトニクス的背景の類似性を考慮した上で震源領域の設定を行うことが求められている。

内陸地殻内地震は大規模地震では地表に地震断層が出現するため、活断層を調べることにより想定地震の発生場所や発生規模がある程度推測できる。また、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、過去の地震記録を調べることにより想定地震の発生場所や規模を推測できる。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、津波痕跡の調査や古津波の解析等により、想定地震の発生場所や規模に関する情報が得られる。

しかし、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

本事業では、海洋プレート内地震の地震動評価の精度向上のため、国内外で起きた海洋プレート内地震の地震動特性及び地震動評価について情報収集・整理し、地域的な震源特性を調査することとし、以下3項目の内容を実施する。

- (1) 国内の海洋プレート内地震の震源特性の調査
- (2) 国外の海洋プレート内地震の震源特性の調査
- (3) 国外の海洋プレート内地震の地震動評価

1.3 事業内容及び方法

1.3.1 国内の海洋プレート内地震の震源特性の調査

地震に関する調査研究を一元的に推進するための政府の特別の機関である地震調査研究推進本部では、海洋プレート内地震のうち、沈み込んだ海洋プレート（通称「スラブ」）内地震（以下、「スラブ内地震」と呼ぶ）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、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を更新した（詳細は、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdfを参照）。しかし、研究対象となる大規模なスラブ内地震の発生頻度は多くないため、地域的な特性や沈み込むプレートの特性については明らかにされていない。

本項目は、深さ数十 km 以上のやや深いスラブ内地震（以下、スラブ内地震と呼ぶ）並びに沈み込む海洋プレート内で発生した浅い地震（以下、アウターライズ地震と呼ぶ）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を行う。また、地域性等を着眼した震源特性に係る震源断層パラメータの設定手法を整理し、断層モデルを用いた手法による地震動評価の現状と課題をまとめる。

具体的には、地震調査研究推進本部による海洋プレート内地震の強震動予測レシピのもととなった笹谷(2006)、壇・他(2006)および新井・他(2015)を調査するとともに、アウターライズの地震を含めた国内の海洋プレート内地震の震源特性に基づいた強震動予測に関する知見を整理する。

1.3.2 国外の海洋プレート内地震の震源特性の調査

国内で発生した海洋プレート内地震、特に深さ数十 km 以上のスラブ内地震の研究事例が限られているため、震源特性について、より数多くの地震の調査を含めて地域的な特性や沈み込むプレートの特性を明確する必要がある。

本項目は、国外で発生した海洋プレート内地震の震源特性を調査し、項目（1）で調べた震源断層パラメータの設定手法と比較することを目的とする。

具体的には、海外の研究者と連絡をとりながら、国外のスラブ内地震の断層パラメー

タやスケーリング則などの資料を収集し、アスペリティの力学特性の地域性やプレート
の特性に着目した断層パラメータの整理を行う。

1.3.3 国外の海洋プレート内地震の地震動評価

今まで敷地周辺で発生した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との特徴がある。本項目は、国外で発生した海洋プレート内地震の地震動特性を調査するとともに、断層モデルを用いた手法により地震動再現解析を行い、海洋プレート内地震の地震動評価の精度向上を目的とする。

本項目では、国外で発生した海洋プレート内地震の地震動解析事例を収集するとともに、国内地震との比較により、海洋プレート内地震の地震動特性についてまとめる。また、国外で発生した海洋プレート内地震を対象に、断層モデルを用いた手法により地震動再現解析を実施する。

具体的には、海外の研究者と連絡をとりながら、国外で発生したスラブ内地震の地震動解析事例を収集するとともに、震源特性の地域性を踏まえて、断層モデルを用いた地震動シミュレーションを行う。

1.4 実施体制

本事業を進める上で、適宜、学識経験者からの指導・助言を仰ぐとともに、海外の研究者と連絡を取りながら、助言・示唆を受けるものとする。種々の参考情報は、必要に応じて、本事業に反映する。

2. 国内の海洋プレート内地震の震源特性の調査

2.1 国内のスラブ内地震の地震動特性の調査

国内のスラブ内地震の地震動特性の調査として、距離減衰式に関する文献である司・翠川(1999)、Kanno *et al.* (2006)、Si *et al.* (2013)、Morikawa and Fujiwara (2013)、Zhao *et al.* (2016)を調査した。

(1) 司・翠川(1999)

司・翠川(1999)は、1968年から1997年までに日本で発生した21地震から得られた強震記録(表 2.1-1)を用いて、断層タイプおよび地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式を提案した。

断層最短距離の場合は(2.1-1)式で、等価震源距離の場合は(2.1-2)式で示した回帰モデルを用いる。 b は震源深さ、断層タイプなどを取り入れた係数で(2.1-3)式で示される。

$$\log A = b - \log(X + c) - kX \quad (1) \quad (2.1-1)$$

$$\log A = b - \log X_{eq} - kX_{eq} \quad (2) \quad (2.1-2)$$

$$b = aM_w + hD + \sum d_i S_i + e + \varepsilon \quad (8) \quad (2.1-3)$$

ここに、 A は地震動の最大振幅値、 X は断層最短距離[km]、 X_{eq} は等価震源距離[km]を示す。 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源深さ、 S は断層タイプ、 e は定常項、 ε は標準偏差を示す。 a 、 h 、 d は回帰係数を表す。但し、地震タイプ S はダミー変数で、地殻内地震、プレート間地震およびプレート内地震の3つのカテゴリで与える。

断層最短距離の場合、(2.1-4)式で示される係数 c を導入して、距離が小さいところで地震動の振幅値が飽和するようにしている。ここに c_1 、 c_2 は回帰係数を表す。

$$c = c_1 10^{c_2 M_w} \quad (3) \quad (2.1-4)$$

地盤の影響については、最大加速度の場合は、岩盤上の最大加速度観測値を1.4倍して地盤上の最大加速度値に変換した値と、地盤上で観測された最大加速度を用いて地盤上での最大加速度の距離減衰式を求めることにしている。最大速度の場合は、地盤増幅率 R と表層地盤の深さ30mまでの平均S波速度 AVS_{30} の関係式(2.1-5)を提案している。

$$\log R = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \quad (4) \quad (2.1-5)$$

司・翠川(1999)による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例を図 2.1-1 に示す。図中、Intra-plate がスラブ内地震の例である。

表 2.1-1 司・翠川(1999)のデータベースの地震リスト

Table 1. The list of the earthquakes in the database

NO	Earthquake	Date	M_w	Depth	Number of recordings		Fault Type	Weight	Reference
					Peak acceleration	Peak velocity			
1	Off Tokachi	1968.05.16	8.2	15	10	10	Inter-plate	C	1, 2
2	Off Nemuro Pen.	1973.06.17	7.8	25	6	4	Inter-plate	C	1, 2
3	Near Izu Oshima	1978.01.14	6.6	7	8	12	Crustal	C	1, 3
4	Off Miyagi Pref.	1978.06.12	7.6	37	13	10	Inter-plate	C	1
5	East off Izu Pen.	1980.06.29	6.5	7	19	16	Crustal	B	1, 3
6	Off Urakawa	1982.03.21	6.9	25	19	9	Crustal	C	1, 2
7	Nihonkai-Chubu	1983.05.26	7.8	6	21	17	Inter-plate	C	1
8	Off Hyuganada	1984.08.07	6.9	30	9	8	Intra-plate	C	4,5,6,7
9	Central Iwate Pref.	1987.01.09	6.6	73	10	5	Intra-plate	C	4,8,9
10	Northern Hidaka Mt.	1987.01.14	6.8	120	16	9	Intra-plate	C	4,9,10
11	East off Chiba Pref.	1987.12.17	6.7	30	173	47	Crustal	A	1,3,11
12	Off Kushiro	1993.01.15	7.6	105	51	21	Intra-plate	B	4,11
13	Off Noto Pen.	1993.02.07	6.3	15	21	5	Crustal	C	4,13,14,15,16,17
14	Southwest off Hokkaido	1993.07.12	7.7	10	52	18	Inter-plate	B	4,12,18
15	East off Hokkaido	1994.10.04	8.3	35	41	17	Intra-plate	B	4,18,19,20
16	Far off Sanriku	1994.12.28	7.7	35	83	30	Inter-plate	B	4,22,23,24
17	Hyogo-ken Nanbu	1995.01.17	6.9	10	85	47	Crustal	A	4,25
18	Off Hyuganada	1996.10.19	6.7	25	106	67	Inter-plate	A	4,26
19	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.03.26	6.1	6	121	68	Crustal	A	4,27,28
20	Northwestern Kagoshima Pref.	1997.05.13	6.0	7	121	64	Crustal	A	4,27,29
21	Northern Yamaguchi Pref.	1997.06.25	5.8	10	152	59	Crustal	A	4,27,30

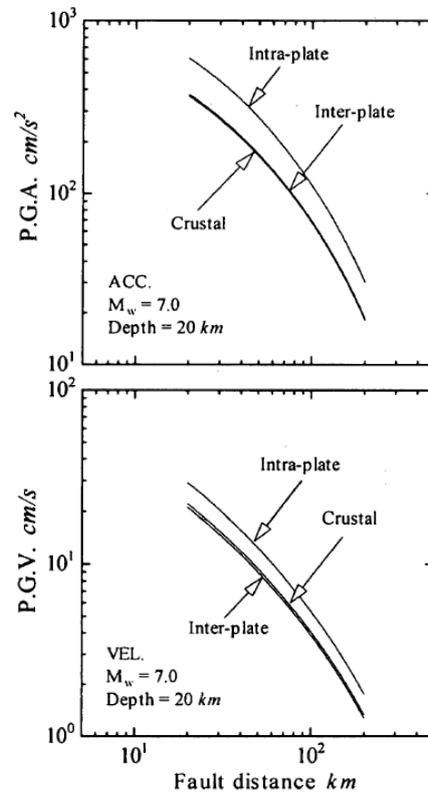


Fig.11. The effects of fault type on peak ground motion

図 2.1-1 司・翠川(1999)による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例

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

Kanno *et al.* (2006)は、1963年から2003年までの日本の地震の強震記録および海外の地震記録(図 2.1-2)を用いて、 $V_s=300\text{m/s}$ 相当の地盤(解析に使用した観測点の平均的地盤)における最大加速度、最大速度および減衰定数 5%の加速度応答スペクトルの距離減衰式を提案した。Kanno *et al.* (2006)の距離減衰式は、地震のモーメントマグニチュード M_w 、断層最短距離 X 、および震源深さ D の 3 つをパラメータとする(式 2.1-6 および式 2.1-7)。

$$\begin{aligned} \log \text{pre} = & a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 \cdot 10^{e_1 M_w}) \\ & + c_1 + \varepsilon_1 \quad (D \leq 30 \text{ km}) \end{aligned} \quad (5) \quad (2.1-6)$$

$$\begin{aligned} \log \text{pre} = & a_2 M_w + b_2 X - \log(X) \\ & + c_2 + \varepsilon_2 \quad (D > 30 \text{ km}), \end{aligned} \quad (6) \quad (2.1-7)$$

ここに、pre は $V_s=300\text{m/s}$ 相当の地盤における地震動の PGA(cm/s^2)、PGV(cm/s)、もしくは減衰定数 5%の加速度応答スペクトルで、 D は震源深さ(km)、 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 は回帰係数で、 ε_1 、 ε_2 は予測誤差である。

地盤増幅度は下記の式(2.1-8)および式(2.1-9)より評価する。ここに、 G は地盤補正係数、 p と q は回帰係数、AVS30 は深さ 30m までの地盤平均 S 波速度(m/s)、 pre_G は地盤の影響を補正した予測値である。

$$G = \log(\text{obs/pre}) = p \log \text{AVS30} + q, \quad (8) \quad (2.1-8)$$

$$\log \text{pre}_G = \log \text{pre} + G. \quad (9) \quad (2.1-9)$$

Kanno *et al.* (2006)による距離減衰式の結果の例を図 2.1-3 に示す。図中、Deep の方がスラブ内地震の例である。

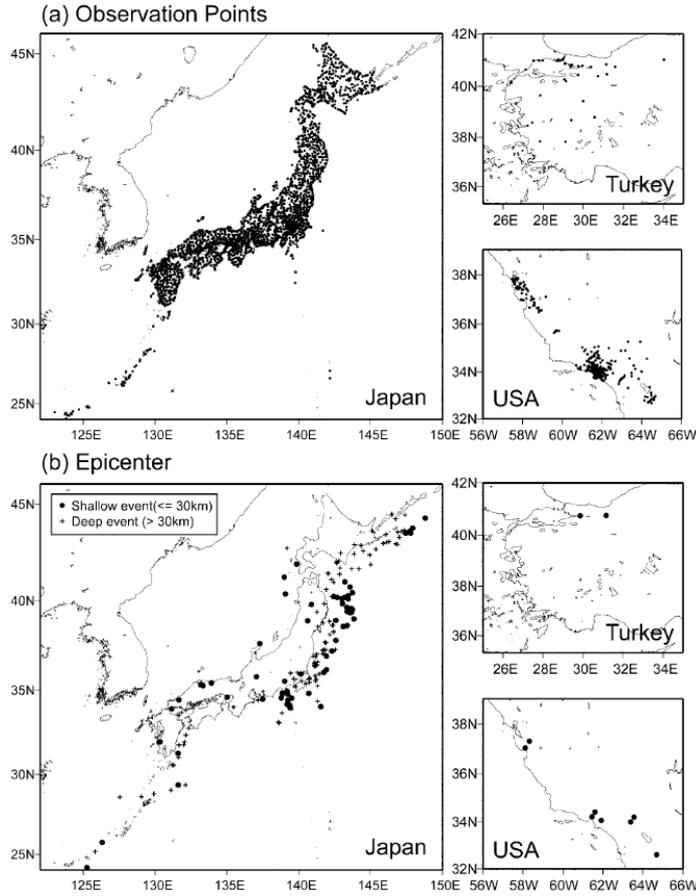


Figure 1. (a) Observation site locations and (b) epicenters of earthquakes used in regression analysis.

図 2.1-2 Kanno *et al.* (2006) の回帰分析で用いた地震の震央位置及び観測点の分布図

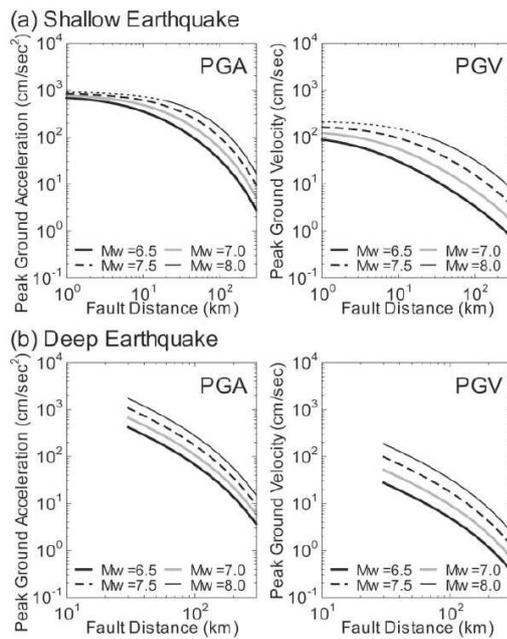


Figure 4. Attenuation curves of PGA and PGV for M_w 6.5, 7.0, 7.5, and 8.0: (a) shallow earthquake; (b) deep earthquake.

図 2.1-3 Kanno *et al.* (2006) による距離減衰式の結果の例

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

Si *et al.* (2013)は、2011年東北地方太平洋沖地震の間に発生した7地震を含む新しいデータベース(表2.1-2)をもとに、14個の内陸地殻内地震、11個のプレート間地震、9個のスラブ内地震で得られた強震記録を用いて、Mw9クラスまで適用可能な加速度応答スペクトルの距離減衰式を提案した。

加速度応答スペクトル SA の回帰モデルを(2.1-10)式に示す。

$$\begin{aligned} \log SA(T) &= b(T) + g(X) - kX + \varepsilon(T) \\ g(X) &= \begin{cases} -\log(X+C); D \leq 30km \\ 0.6\log(1.7D+C) - 1.6\log(X+C); D > 30km \ \& \ X \geq 1.7D \end{cases} \\ C &= 0.0055 \cdot 10^{0.5M_w}, T < 0.3s \\ &= 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w}, T \geq 0.6s \\ k &= 0.003, T < 0.3s \\ &= 0.002, T \geq 0.6s \end{aligned} \tag{1} \quad (2.1-10)$$

ここに、 X は断層最短距離、もしくは等価震源距離、 D は震源深さである。関数 $g(X)$ は減衰率、 C は断層最短距離の場合の振幅値の飽和を表す係数で、 k は非弾性減衰を表している。 T は周期で、範囲は0.01~10秒である。

上式で、 $b(T)$ は震源深さ、断層タイプなどを取り入れた係数で(2.1-11)式で示される。

$$b(T) = \begin{cases} a_1(T)M_w + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_1(T) \\ M \leq 8.3 \text{ or } M \leq 7.5 \text{ if } T \geq 2s \\ a_2(T)M_w + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_2(T) \\ M > 8.3 \text{ or } M > 7.5 \text{ if } T \geq 2s \end{cases} \tag{2} \quad (2.1-11)$$

ここに、 M_w はモーメントマグニチュード、 S は断層タイプを示す変数で、地殻内地震、プレート間地震およびプレート内地震の3つのカテゴリで与える。また、 a_1 、 a_2 、 h 、 d_i 、 ε_1 、 ε_2 は回帰係数を表す。

Si *et al.* (2013)による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例を図2.1-4に示す。図中、Intraplateがスラブ内地震の例である。

表 2.1-2 Si *et al.* (2013) のデータベースの地震リスト

Table 1 Earthquakes used in this study

EQ. No.	EQ. NAME	Initial Date	Time	Mw	Depth	Fault Type	Number of Data
1	Nihon-kai Chubu	1983.05.26	11:59	7.8	6.0	Inter	3
2	Eastern Off Chiba	1987.12.17	11:08	6.7	30.0	Intra	10
3	Off Kushiro	1993.01.15	20:06	7.6	105.0	Intra	8
4	Off Noto-hanto	1993.02.07	22:27	6.3	15.0	Crustal	3
5	Hokkaido-Nansei-Oki	1993.07.12	22:17	7.7	10.0	Inter	4
6	Hokkaido-Toho-Oki	1994.10.04	22:22	8.3	35.0	Intra	5
7	Sanriku-Haruka-Oki	1994.12.28	21:19	7.7	35.0	Inter	11
8	Hyogo-ken Nanbu	1995.01.17	5:46	6.9	10.0	Crustal	34
9	North-Western Kagoshima	1997.03.26	17:31	6.1	6.0	Crustal	3
10	North-Western Kagoshima	1997.05.13	14:38	6.0	7.0	Crustal	3
11	Izu Hanto Toho-Oki	1998.05.03	11:09	5.6	3.0	Crustal	8
12	Western Tottori	2000.10.06	13:30	6.8	11.0	Crustal	50
13	Geiyo	2001.03.24	15:27	6.7	51.0	Intra	40
14	Miyagi-ken Oki	2002.11.03	12:37	6.4	46.0	Inter	21
15	Hyuganada	2002.11.04	13:36	5.6	35.0	Intra	9
16	Miyagi-ken Oki	2003.05.26	18:24	7.0	71.0	Intra	33
17	Northern Miyagi	2003.07.26	7:13	6.1	12.0	Crustal	9
18	Tokachi Oki	2003.09.26	4:50	8.3	35.0	Inter	16
19	Chuetsu	2004.10.23	17:56	6.6	10.0	Crustal	30
20	Kushiro-oki	2004.11.29	3:32	7.0	48.0	Inter	5
21	Western Fukuoka	2005.03.20	10:53	6.6	9.0	Crustal	25
22	Miyagi-ken Oki	2005.08.16	11:46	7.1	42.0	Inter	42
23	Chuetsu-oki	2007.07.16	10:13	6.6	10.0	Crustal	22
24	Ibaraki-oki	2008.05.08	1:45	6.8	51.0	Inter	11
25	Iwate-Miyagi Nairiku	2008.06.14	8:43	6.9	10.0	Crustal	30
26	Northern Iwate	2008.07.24	0:26	6.8	108.0	Intra	24
27	Surugawa	2009.08.11	5:07	6.2	23.0	intra	30
28	Tohoku	2011.03.11	14:46	9.1	25.0	Inter	34
29	Off-Iwate	2011.03.11	15:08	7.4	32.0	Inter	10
30	Off-Ibaraki	2011.03.11	15:15	7.9	38.0	Inter	20
31	Norther Nagano	2011.03.12	3:59	6.3	7.0	Crustal	15
32	Eastern Shizuoka	2011.03.15	22:31	6.0	10.0	Crustal	13
33	Off Miyagi	2011.04.07	23:32	7.1	59.0	Intra	35
34	Hama-dori	2011.04.11	17:16	6.7	10.0	Crustal	20

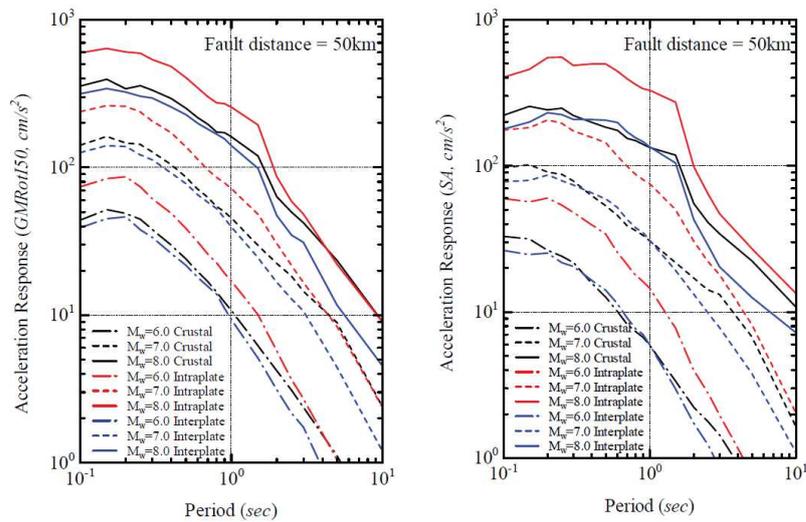


Figure 7 Predicted response spectra based on the results (Left: horizontal component; Right: vertical component)

図 2.1-4 Si *et al.* (2013) による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例

(4) Morikawa and Fujiwara (2013)

Morikawa and Fujiwara (2013)は、Kannno *et al.* (2006)のデータベースに2011年東北地方太平洋沖地震の強震記録を追加して(表 2.1-3)、マグニチュード Mw9 クラスまで適用可能な、最大加速度、最大速度、および加速度応答スペクトル(周期:0.05~10秒)の距離減衰式を提案した。距離減衰式は、3つの地震タイプ(内陸地殻内地震、プレート間地震、スラブ内地震)を対象とし、モーメントマグニチュード M_w と断層最短距離 X をパラメータとする。

Mw8 以上の場合の、地震動の振幅の過大評価を防ぐために、モーメントマグニチュードの2次項を取り入れたモデル1(式 2.1-12 および式 2.1-13)と、モーメントマグニチュードの線形項に振幅の頭打ちを取り入れたモデル2(式 2.1-14 および 2.1-15)の二つのモデルを提案した。

モデル1:

$$\log pre = a_1(Mw'_1 - Mw_1)^2 + b_{1,k}X + c_{1,k} - \log(X + d_1 \cdot 10^{e_1 Mw'_1}) \pm \sigma_1 \quad (3) \quad (2.1-12)$$

$$Mw'_1 = \min(Mw, Mw_{01}) \quad (4) \quad (2.1-13)$$

ここに、 a_1 、 $b_{1,k}$ 、 $c_{1,k}$ 、 d_1 および e_1 は回帰係数、 σ_1 は標準偏差である。 Mw_{01} は頭打ちの際の地震モーメントである。

モデル2:

$$\log pre = a_2 Mw'_2 + b_{2,k}X + c_{2,k} - \log(X + d_2 \cdot 10^{e_2 Mw'_2}) \pm \sigma_2 \quad (5) \quad (2.1-14)$$

$$Mw'_2 = \min(Mw, Mw_{02}) \quad (6) \quad (2.1-15)$$

ここに、 a_2 、 $b_{2,k}$ 、 $c_{2,k}$ 、 d_2 および e_2 は回帰係数、 σ_2 は標準偏差である。

本検討で、 Mw_{01} 、 Mw_1 および Mw_{02} は地震タイプおよび地震動の周期によらない定数と考えると、 $Mw_{01}=8.2$ 、 $Mw_1=16.0$ 、 $Mw_{02}=8.1$ となる。

Morikawa and Fujiwara (2013)による距離減衰式の結果の例を図 2.1-5 に示す。

表 2.1-3 Morikawa and Fujiwara (2013)

により追加された地震リスト

Table 1. Events of fault plane models added to our database. The hypocenter location is after the JMA.

Origin time [JST]	Mw	Lat. [N]	Lon. [E]	Dep. [km]	Type	Ref.
2004/09/05 19:07	7.2	33.03	136.80	38	III	[3]
2004/09/05 23:57	7.4	33.14	137.14	44	III	[3]
2004/09/07 08:29	6.5	33.21	137.29	41	III	[3]
2004/10/23 17:56	6.5	37.29	138.87	13	I	[4]
2004/10/23 18:11	5.7	37.25	138.83	12	I	[4]
2004/10/23 18:34	6.2	37.31	138.93	14	I	[4]
2004/10/27 10:40	5.8	37.29	139.03	12	I	[5]
2004/11/08 11:15	5.5	37.40	139.03	0	I	[5]
2004/11/29 03:32	7.0	42.95	145.28	48	II	[3]
2004/12/06 23:15	6.7	42.85	145.34	46	II	[3]
2005/03/20 10:53	6.5	33.74	130.18	9	I	[6]
2005/08/16 11:46	7.1	38.15	142.28	42	II	[7]
2007/03/25 09:41	6.7	37.22	136.69	11	I	[7]
2007/07/16 10:13	6.6	37.56	138.61	17	I	[8]
2008/05/08 01:02	6.2	36.23	141.95	60	II	[9]
2008/05/08 01:45	6.8	36.23	141.61	51	II	[9]
2008/06/14 08:43	6.9	39.03	140.88	8	I	[10]
2008/07/19 11:39	6.9	37.52	142.26	32	II	[9]
2008/07/24 00:26	6.8	39.73	141.64	108	III	[11]
2008/09/11 09:20	6.8	41.78	144.15	31	II	[9]
2009/08/11 05:07	6.2	34.79	138.50	23	III	[12]
2011/03/09 11:45	7.2	38.33	143.28	8	II	[13]
2011/03/11 14:46	9.0	35.60	141.50	24	II	[14]
2011/03/11 15:08	7.4	39.84	142.78	32	II	[13]
2011/03/11 15:15	7.8	36.11	141.27	43	II	[13]
2011/03/12 03:59	6.2	36.99	138.60	8	I	[13]
2011/03/15 22:31	5.9	35.31	138.71	14	I	[13]
2011/03/19 18:56	5.8	36.78	140.57	5	I	[13]
2011/04/07 23:32	7.1	38.20	141.92	66	III	[13]
2011/04/11 17:16	6.6	36.95	140.67	6	I	[13]
2011/04/12 14:07	5.8	37.05	140.64	15	I	[13]
2011/06/23 06:50	6.6	39.95	142.59	36	II	[13]
2011/07/10 09:57	7.0	38.03	143.51	34	III	[13]
2011/07/23 13:34	6.3	38.87	142.09	47	II	[13]
2011/07/25 03:51	6.2	37.71	141.63	46	II	[13]
2011/07/31 03:53	6.3	36.90	141.22	57	III	[13]
2011/08/01 23:58	5.8	34.71	138.55	23	III	[13]
2011/08/19 14:36	6.3	37.65	141.80	51	III	[13]
2011/09/17 04:26	6.6	40.26	143.09	7	II	[13]
2011/11/24 19:25	6.1	41.75	142.89	43	II	[13]

Type: I = crustal, II = subduction plate-boundary, III = subduction intra-plate Ref: Referred fault model

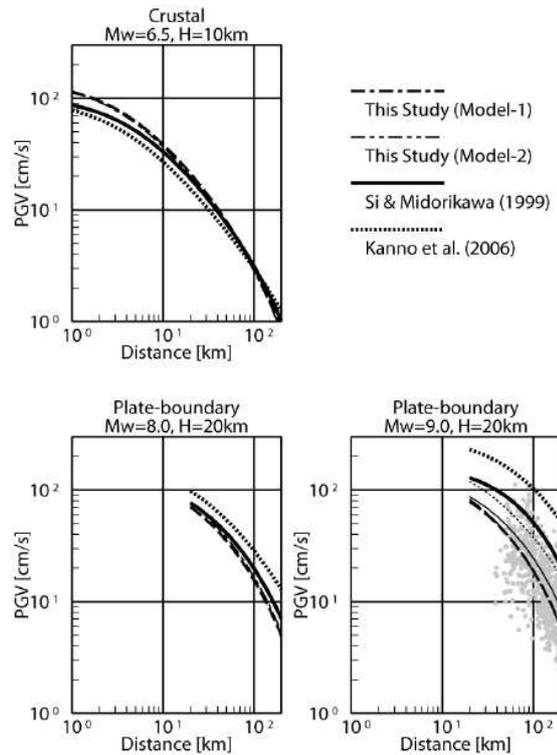


Fig. 10. Comparison of our new GMPE to existing Japanese GMPEs [1, 2] for PGV. H is the assumed focal depth required in the use of Si and Midorikawa's GMPE [1]. Thin lines in the right-lower panel are a case applying $M_w = 8.2$ instead of $M_w = 9.0$ for introducing magnitude saturation. Records observed during the 2011 earthquake are plotted using gray dots in the right-lower panel.

図 2.1-5 Morikawa and Fujiwara (2013)

による距離減衰式の結果の例

(5) Zhao et al. (2016)

Zhao *et al.* (2016)は、1968年から2012年までに日本で起こった136個のスラブ内地震による4710個の強震動記録を用いて加速度応答スペクトルと最大加速度の距離減衰式を提案した。

$y_{i,j}$ を i 番目の地震の j 番目の観測点における5%減衰擬似加速度応答スペクトル(単位は重力加速度 g)、または最大加速度(g)とすると、回帰モデルは下式で表される。

$$\begin{aligned} \log_e(y_{i,j}) = & f_{mSL} + g_{SL} \log_e(r_{i,j}) + g_{SLL} \log_e(x_{i,j} + 200.0) \\ & + e_{SL}x_{i,j} + q_{SLH}x_{i,j} + e_{SL}^v x_{i,j}^v + \gamma_{SL} \\ & + \log_e(A) + \xi_{i,j} + \eta_i, \end{aligned} \quad (2a) \quad (2.1-16)$$

ここに、 f_{mSL} は震源特性、 g_{SL} は幾何減衰率、 g_{SLL} は遠距離における幾何減衰率、 e_{SL} は非線形減衰率、 q_{SLH} は非線形減衰項、 v は火山帯に関する添字、 x は断層面までの最短距離、 g_{SL} は定数、 A は線形と非線形の両方を含む地盤増幅率、 ξ は地震内のばらつき、 η は地震間のばらつきである。震源距離は300kmまでで、周期は0.01~5秒である。 $r_{i,j}$ は(2.1-17)式および(2.1-18)式で与えられる。

$$r_{i,j} = x_{i,j} + \exp(c_1 + c_2 C_m), \quad (3) \quad (2.1-17)$$

$$C_m = \begin{cases} m_i & \text{if } m_i \leq C_{\max} \\ C_{\max} & \text{if } m_i > C_{\max} \end{cases}. \quad (4) \quad (2.1-18)$$

Zhao *et al.* (2016) によるスラブ内地震の距離減衰式の結果の例を図2.1-6に示す。

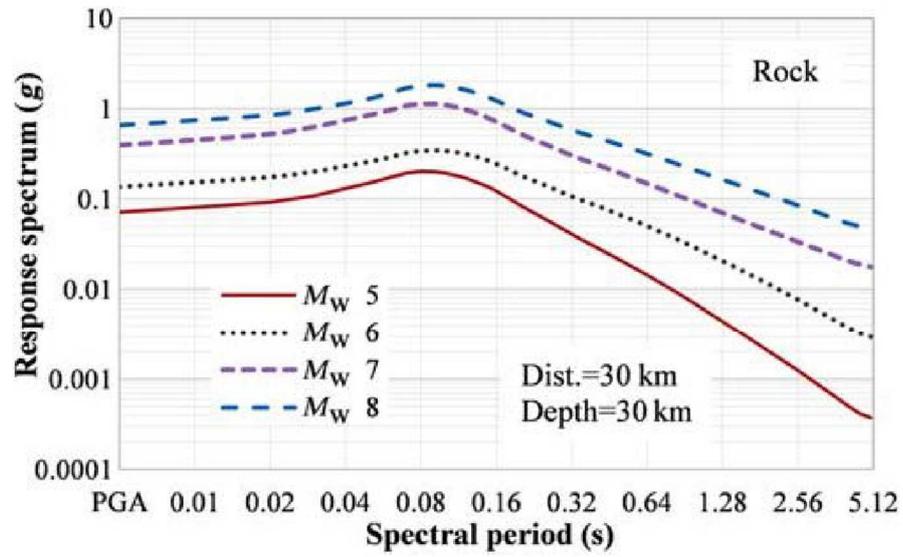


Figure 16. Predicted rock-site spectra for slab events with M_w 5–8 and a depth of 30 km at a source distance of 30 km. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

図 2.1-6 Zhao *et al.* (2016) によるスラブ内地震の距離減衰式の結果の例

2.2 国内のスラブ内地震の断層パラメータの設定方法の調査

国内のスラブ内地震の断層パラメータの設定方法として、地震調査研究推進本部による海洋プレート内地震の強震動予測レシピ(2016)のもととなった、笹谷・他(2006)、壇・他(2006)および新井・他(2015)を調査した。

(1) 笹谷・他(2006)

笹谷・他(2006)は、スラブ内地震の震源特性の検討を踏まえて、スラブ内地震の断層パラメータの設定法を提案している。

Step 1 スラブ内地震の地震モーメント M_0 の設定

Step 2 アスペリティの面積 S_a と地震モーメント M_0 のスケーリング則 (図 2.2-1 および 2.2-1 式) \Rightarrow アスペリティの面積 $S_{asasatani}$ の設定

$$S_{asasatani}[\text{km}^2] \approx 1.25 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{dyne} \cdot \text{cm}])^{2/3} \quad (2.2-1)$$

Step 3 短周期レベル $A_{sasatani}$ と地震モーメント M_0 のスケーリング則 (図 2.2-2 および 2.2-2 式) \Rightarrow 短周期レベル $A_{sasatani}$ の設定

$$A_{sasatani}[\text{dyne} \cdot \text{cm} / \text{s}^2] \approx 9.84 \times 10^{17} \times (M_0[\text{dyne} \cdot \text{cm}])^{1/3} \quad (2.2-2)$$

Step 4 アスペリティの個数 n の推定: ただし、アスペリティの面積 $S_a = \pi \sum (r_n)^2$ (ここに、 r_n は n 番目のアスペリティの半径)

Step 5 短周期レベル A とアスペリティパラメータの関係: 2.2-3 式 $\Rightarrow r_n$ と $\Delta \sigma_n$ の設定 (ここに、 $\Delta \sigma_n$ は n 番目のアスペリティの応力降下量)

$$A = 4\pi\beta^2 \sqrt{\sum (r_n \Delta \sigma_n)^2} \quad (2.2-3)$$

Step 6 地震モーメント M_0 とアスペリティパラメータの関係: 2.2-4 式 $\Rightarrow S (= \pi r_f^2)$ の設定 (ここに、 r_f は断層全体を円形と仮定した場合の半径)

$$M_0 = (16/7)r_f \times \sum (r_n^2 \Delta \sigma_n) \quad (2.2-4)$$

ここに、スラブ内地震におけるアスペリティの面積 $S_{asasatani}$ と地震モーメント M_0 の関係は、Somerville *et al.* (1999)による内陸地殻内地震の 1/4 としている(図 2.2-1)。また、地震モーメント $M_0 = 2 \times 10^{17} \text{Nm}$ 以上のスラブ内地震における短周期レベル $A_{sasatani}$ と地震モーメント M_0 関係は、下式の壇・他(2001)による内陸地殻内地震の短周期レベル A_{dan} の 4 倍としている(図 2.2-2)。

$$A_{dan}[\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2] = 2.46 \times 10^{17} \times (M_0[\text{dyne}\cdot\text{cm}])^{1/3} \quad (2.2-5)$$

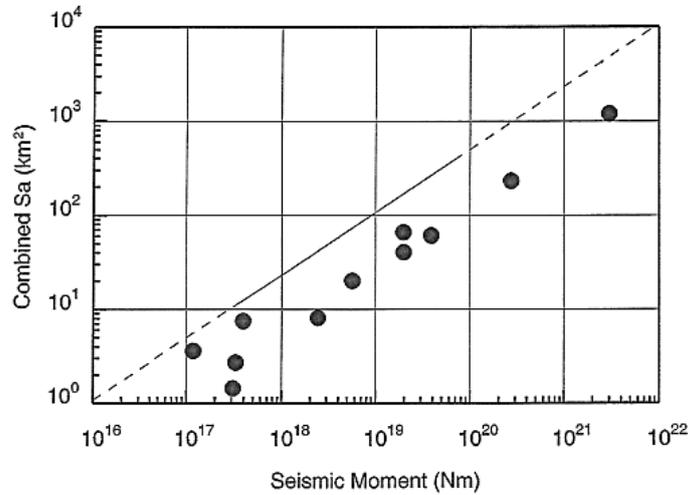


Fig. 4. Empirical relationship between combined asperity area (S_a) and seismic moment (M_0) for eleven intraslab earthquakes. A solid line indicates the relationship for inland crustal earthquakes (after Somerville et al., 1999).

図 2.2-1 笹谷・他 (2006) によるスラブ内地震の
アスペリティの面積 S_a と地震モーメント M_0 との関係

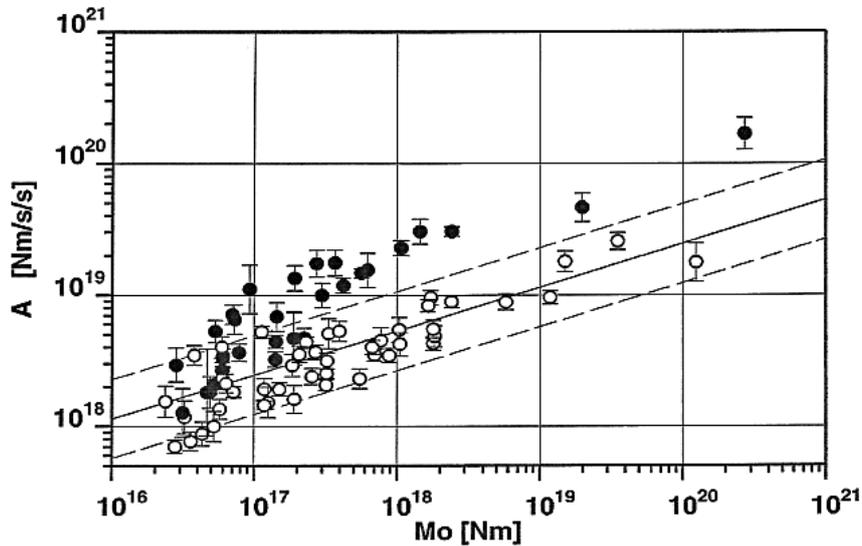


Fig. 7. Empirical relationship between short-period level of S-wave acceleration source spectrum (A) and seismic moment (M_0) for subduction zone earthquakes in the eastern part of Hokkaido (after Maeda and Sasatani, 2006). Solid circles: intraslab earthquakes and open circles: plate-boundary earthquakes. A solid line indicates the relationship for inland crustal earthquakes; dashed lines show the standard deviation (Dan et al., 2001).

図 2.2-2 笹谷・他 (2006) によるスラブ内地震の
短周期レベル A と地震モーメント M_0 との関係

(2) 壇・他(2006)

壇・他(2006)は、アスペリティモデルに立脚したスラブ内地震の特性化震源モデルの設定方法を提案し、2003年宮城県沖地震を対象とした強震動シミュレーションを行い、その結果を観測記録ならびに既往の距離減衰式と比較することにより、設定方法の妥当性を示している。

スラブ内地震の震源モデルの設定において先験的に与える断層パラメータとその他の主な断層パラメータを表 2.2-1 に示す。本論文では、一般的なスラブ内地震の震源特性として、Asano *et al.* (2003) による太平洋プレートとフィリピン海プレートのスラブ内地震の総アスペリティ面積 S_{aasano} と地震モーメント M_0 の関係式 (図 2.2-3 の a) および 2.2-6 式) と、佐藤・他(2004)による宮城県沖のスラブ内地震の短周期レベル A_{satoh} と地震モーメント M_0 の関係式 (図 2.2-3 の b および 2.2-7 式) を採用している。

$$S_{aasano}[\text{km}^2] = 1.71 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{dyne} \cdot \text{cm}])^{2/3} \quad (2.2-6)$$

$$A_{satoh}[\text{dyne} \cdot \text{cm} / \text{s}^2] = 1.13 \times 10^{18} \times (M_0[\text{dyne} \cdot \text{cm}])^{1/3} \quad (2.2-7)$$

表 2.2-1 壇・他 (2006) による、スラブ内地震の震源モデルの設定において
先験的に与える断層パラメータとその他の主な断層パラメータ

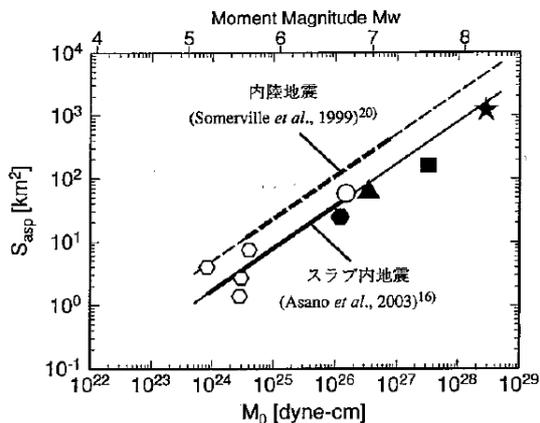
表 1 強震動予測のための震源モデルの設定において先験的に与
える断層パラメータとその他の主な断層パラメータ

対象地震	内陸地震 プレート境界地震	スラブ内地震	
断層 パラメータ (注)	S	◎ $(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16S_{asp}A^2)$	□ $(49\pi^4\beta^4M_0^2)/(16S_{asp}A^2)$
	M_0	○	◎
	$\Delta\sigma$	□ $(7/16)M_0/(S/\pi)^{1.5}$	□ $(4S_{asp}^{1.5}A^3)/(49\pi^{4.5}\beta^6M_0^2)$
	S_{asp}	□ $16\beta^4S^2\Delta\sigma^2/A^2$	○
	$\Delta\sigma_{asp}$	□ $A^2/(16\pi\beta^4S\Delta\sigma)$	□ $A/[4\beta^2(\pi S_{asp})^{0.5}]$
	A	○	○
理論式	$\Delta\sigma=(7/16)M_0/(S/\pi)^{1.5}$ $\Delta\sigma_{asp}=(S/S_{asp})\Delta\sigma$ $A=4\pi\beta^2(S_{asp}/\pi)^{0.5}\Delta\sigma_{asp}$		

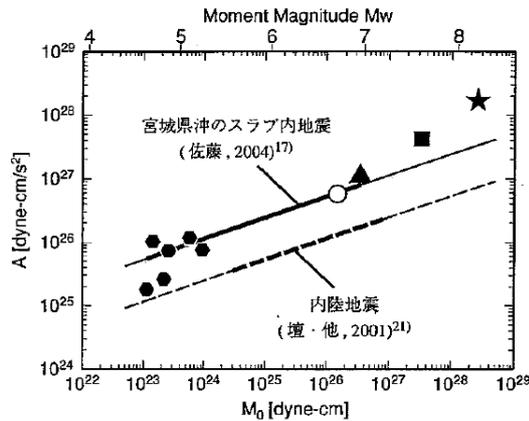
- 注) S : 断層面積
 M_0 : 地震モーメント
 $\Delta\sigma$: 平均応力降下量
 S_{asp} : 総アスペリティ面積
 $\Delta\sigma_{asp}$: アスペリティの応力降下量
 A : 短周期レベル
 β : S 波速度
◎ : 活断層や過去の地震の情報に基づき先験的に想定するもの
○ : 経験式に基づき先験的に想定するもの
□ : 理論式により算定するもの

- ★: 1994年北海道東方沖地震 (笹谷・他, 2003)⁹⁾
- : 1993年釧路沖地震 (笹谷・他, 2003)⁹⁾
- ▲: 2003年宮城県沖地震 (浅野・他, 2004)¹⁸⁾
- : 2001年芸予地震 (Asano et al., 2003)¹⁶⁾
- : 太平洋プレート内の地震 (浅野・他, 2004)¹⁸⁾
- : フィリピン海プレート内の地震 (浅野・他, 2004)¹⁸⁾

- ★: 1994年北海道東方沖地震 (笹谷・他, 2003)⁹⁾
- : 1993年釧路沖地震 (笹谷・他, 2003)⁹⁾
- ▲: 2003年宮城県沖地震 (佐藤, 2004)¹⁷⁾
- : 2001年芸予地震 (佐藤, 2003)¹⁹⁾
- : 中小規模の宮城県沖のスラブ内地震 (佐藤, 2004)¹⁷⁾



(a) 総アスペリティ面積と地震モーメントとの関係



(b) 短周期レベルと地震モーメントとの関係

図 1 スラブ内地震の断層パラメータと相似則および内陸地震の断層パラメータの相似則との比較

図 2.2-3 壇・他 (2006) によるスラブ内地震と内陸地震の断層パラメータの相似則の比較

(3) 新井・他(2015)

新井・他(2015)は、図 2.2-4 に示すような、プレートの違いによる短周期レベルの違いを考慮した断層パラメータ設定方法を提案している。

具体的には、図 2.2-5 に示すように、地震モーメントから短周期レベルを求める際に、太平洋プレートのスラブ内地震の場合は、(2.2-2)式で示した笹谷・他(2006)の経験式によって得られる値の 1.3 倍 (2.2-8 式) とし、フィリピン海プレートのスラブ内地震の場合は笹谷・他(2006)の経験式によって得られる値の 0.5 倍 (2.2-9 式) としている。

$$A[\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2]=1.3\times 9.84\times 10^{17}\times(M_0[\text{dyne}\cdot\text{cm}])^{1/3} \quad (2.2-8)$$

$$A[\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{s}^2]=0.5\times 9.84\times 10^{17}\times(M_0[\text{dyne}\cdot\text{cm}])^{1/3} \quad (2.2-9)$$

短周期レベルが決定した後の断層パラメータ設定方法については、アスペリティ面積比を平均的な値とする方法を採用している。

提案する方法を用いることによって、太平洋プレートのスラブ内地震は短周期レベルが大きめに、フィリピン海プレートのスラブ内地震は短周期レベルが小さめに評価され、過去のデータとも調和的な断層モデルを設定することが可能になったとしている。

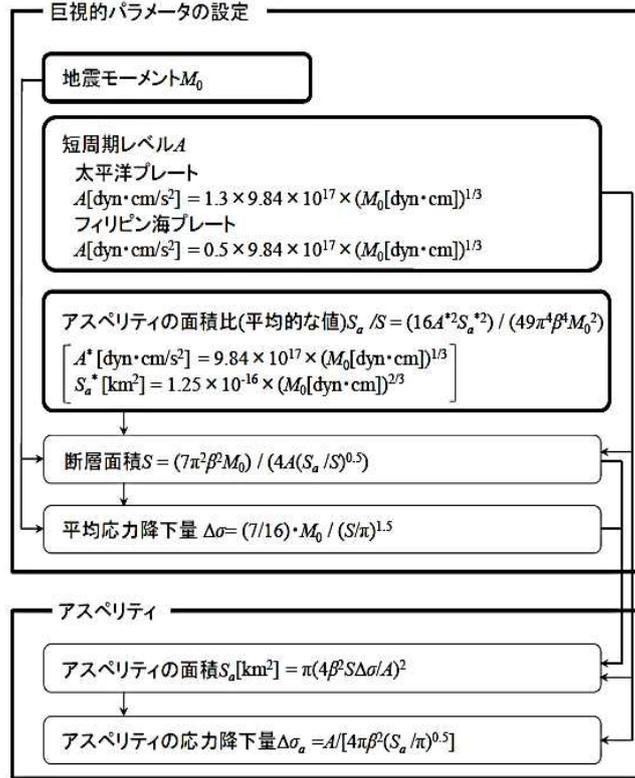


図 16 プレートによる短周期レベルの違いを考慮した
 スラブ内地震の断層パラメータ設定方法のフロー

図 2.2-4 新井・他 (2015) によるスラブ内地震の断層パラメータ設定方法のフロー

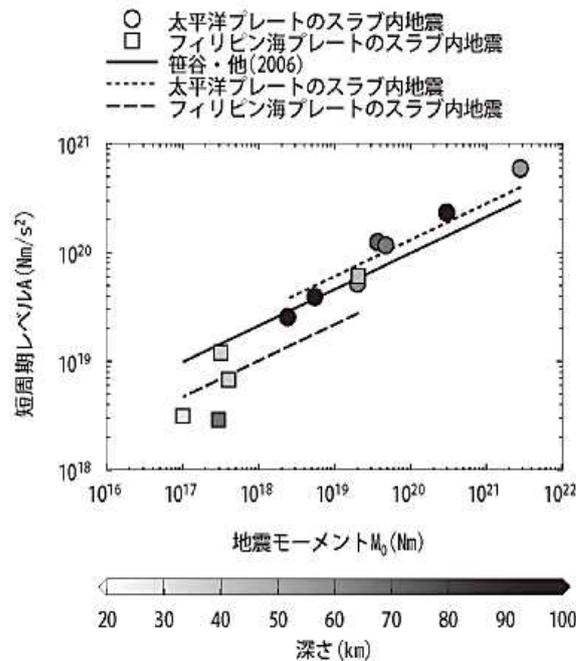


図 1 スラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係

図 2.2-5 新井・他 (2015) によるスラブ内地震の
 短周期レベル A と地震モーメント M_0 との関係

2.3 国内のスラブ内地震の断層パラメータの調査

本節では、国内のスラブ内地震の断層パラメータ、特に短周期レベルおよびアスペリティの面積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
- ・ 短周期レベル
- ・ アスペリティの応力降下量
- ・ アスペリティの面積
- ・ S波速度

調査結果を表 2.3-1 に示す。また、調査したスラブ内地震の震央と震源メカニズム解を図 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 国内のスラブ内地震の断層パラメータの調査結果

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 トマグニ チュード M_w	地震 モーメント M_0 (Nm)	平均 応力 降下量 $\Delta\sigma$ (MPa)	短周期 レベル $A(N \cdot m/s^2)$	ロー ラー 振動数 f_c (Hz)	アスペリ ティの 応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	アスペリテ ィの面積 S_0 (km ²)	参考文献	備考	
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]										
1	太平洋	北海道東方沖	1994/10/4	43.5	147.4	56.0	8.2	2.6E+21 (KK) 3.0E+21 (H)	-	1.7E+21 (MS)	-	SMGA1:82 SMGA2:82 SMGA3:382 SMGA4:300 SMGA5:137 (MS)	SMGA1: 400 SMGA2: 256 SMGA3: 144 SMGA4: 144 SMGA5: 256 total: 1200 (MS)	笹谷・他(2006)	KK:Kkuchi&Kanamori(1995) H:Harvard CMT MS:Morkawa&Sasatani(2004) I2:Ikeda <i>et al.</i> (2004) $\beta=4.6$ M_0-A, M_0-S_0 等の図ではこ ちらをプロットし、 M_0 は上 にある値を用いた。	
			-	-	64.0	8.3	3.50E+21	6.0	-	-	28.7	2640.0	Iwata and Asano (2011)	Shio <i>et al.</i> (2006)		
2	太平洋	釧路沖	1993/1/15	43.0	144.3	95.0	7.7	3.3E+20(T) 2.7E+20(H)	-	4.2E+20 (MS) 2.0E+20 (H)	-	モデルA SMGA1: 109 SMGA2: 381 SMGA3: 163 モデルB SMGA1: 82 SMGA2: 190 SMGA3: 109	モデルA SMGA1: 51.8 SMGA2: 72.0 SMGA3: 34.6 total: 158.6 モデルB SMGA1: 92 SMGA2: 144 SMGA3: 69 total: 305	笹谷・他(2006)	M:S.Morkawa and Sasatani (2004), H:Harvard CMT I1:池田(2002) T:笹谷・他(2006) $\beta=4.6$ M_0-A 等の図ではこ ちらをプロットし、 M_0, A, S_0 は上 にある値を用いた。	
			42.89	144.37	103.0	7.5	2.3.E+20	4.9	-	-	-	-	菊地(2003)	$\beta=4.6$		
			42.92	144.36	100.6	-	-	-	-	-	-	-	-	野津(2003)	-	
			-	-	107.0	7.6	3.3.E+20	42.0	-	-	-	-	-	Takeo <i>et al.</i> (1993)	-	
3	太平洋	宮城県沖	2011/4/7	38.2	141.9	65.9	7.1	4.74E+19	-	-	-	-	-	-	芝・野口(2012)	$\beta=4.46$
			38.3	141.6	49.0	7.1	5.54E+19	17	-	-	-	-	-	山中(2011)	-	
			38.2	141.8	56.1	7.17	7.2.E+19	-	-	-	-	-	-	Ohta <i>et al.</i> (2011)	$\log M_0=1.5M_w+9.1$	
			-	-	66.0	-	-	-	1.10.E+20	-	-	asp1:70.6 asp2:70.6	asp1:10.2*10.2 =104.04 asp2:10.2*10.2 =104.04	原田・釜江(2011)	$A=4\beta^2 \Delta\sigma_s (S_0/\pi)^{1/2}$ $\beta=3.9$ 震源位置 山中(2011)参照	
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	SMGA1:71 SMGA2:71	SMGA1: 10.2*10.2= 104.04 SMGA2:	Harada <i>et al.</i> (2012)	$\beta=3.9$	
			-	-	-	-	-	-	-	8.01E+19	-	SMGA1: 23.7 SMGA2: 70.8 SMGA3: 70.8	SMGA1: 35.6 SMGA2: 80.1 SMGA3: 35.6	染井・宮藤(2012)建築学 会	$\beta=3.82$	
			-	-	66.0	7.1	5.24E+19	-	-	-	-	-	-	-	染井・宮藤(2012)地震学 会	-
4	太平洋	宮城県沖	2003/5/26	38.8	141.7	72.0	7.0	3.49.E+19	-	1.1E+20(S) 1.4+E20(TS)	-	SMGA1: 105 SMGA2: 105 SMGA3: 105 (A2)	SMGA1: 3*3=9 SMGA2: 4*4=16 SMGA3: 6*6=36 total: 61.0(A2)	笹谷・他(2006)	$\beta=3.98$ S:Satoh(2004) TS:笹谷・他(2006) A2: 浅野・他(2004) M_0-A, M_0-S_0 等の図ではこ ちらをプロットし、 A は上 にある値を用いた。	
			-	-	-	7.0	3.80.E+19	-	-	-	-	-	-	引間・他(2003)	-	
			38.9	141.8	52.0	7.0	4.0.E+19	-	-	-	-	-	-	国土地理院(2003)	$\log M_0=1.5M_w+9.1$	
			38.8	141.7	75.0	7.0	3.8E+19	28.0	-	-	-	-	-	山中・菊地(2003)	-	
			38.8	141.7	72.0	7.2	7.6E+19	-	-	-	-	-	-	青井・他(2003)	2枚断層	
			-	-	68.0	7.1	5.62.E+19	-	-	-	-	-	-	-	Okada and Hasegawa(2003)	$\log M_0=1.5M_w+9.1$
			38.8	141.7	70.0	6.9	3.00.E+19	-	-	-	-	-	-	-	八木(2003)	-
5	太平洋	岩手県内陸沿岸北部	2008/7/24	39.739	141.670	115.0	6.9	2.82E+19	2.5	3.51.E+19	-	23.9	96	Iwata and Asano (2011)	$A=4\beta^2 \Delta\sigma_s (S_0/\pi)^{1/2}$ $\beta=3.6$ M_0-A, M_0-S_0 等の図ではこ ちらをプロットした。	
			39.739	141.670	115.0	6.9	2.82E+19	2.4	-	-	24	-	-	Suzuki <i>et al.</i> (2009)	-	
			-	-	-	6.8	1.72E+19	-	8.96E+19	-	-	-	-	-	佐藤(2013)	-

表 2.3-1 国内のスラブ内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	地震 モーメント M_0 (Nm)	平均 応力 降下量 $\Delta\sigma$ (MPa)	短周期 レベル $A(N \cdot m \cdot s^2)$	コー ナー 振動数 f_c (Hz)	アスペリ ティの 応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	アスペリ ティ の面積 S_a (km ²)	参考文献	備考	
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]										
6	太平洋	北海道東方沖	2000/1/28	-	-	59.0	6.8	2.00E+19	-	5.2E+19 (TS)	-	62.4(TS) 261(A1)	56.3 (TS) 24.6(A1)	笹谷・他(2006)	H: Harvard A1: Asano et al.(2003) TS: 笹谷・他(2006) Saは上にある値を用いた。	
7	太平洋	岩手県内陸南部	2001/1/22	-	-	122.0	6.4	5.6E+18(H)	-	3.9E+19 (MF)	-	asp1:87 asp2:116 asp3:116 (MF)	asp1:5.8 asp2:8.6 asp3:5.8 (MF)	笹谷・他(2006)	MF: 森川・藤原(2002) H: Harvard CMT M _r -A, M _s -Sa等の図をブ ロットした。	
				-	-	-	6.4	5.34E+18	-	4.21E+19	-	-	-	-	佐藤(2013)	モデルなし
8	太平洋	釧路支庁中南部	1999/5/13	42.94(11)	143.91(11)	109.0	6.2	2.4E+18(H)	27.2(12)	2.8E+19(TS) 2.3E19(11)	-	asp1:73 asp1:73 (TS)	asp1:3.2 asp1:4.9 (TS)	笹谷・他(2006)	H: Harvard CMT I2: 池田(2002) Aは上にある値を用いた。	
9	太平洋	福島県沖	2011/7/31	-	-	56.0	6.4	4.15E+18	-	3.67E+19	-	-	-	佐藤(2013)	佐藤(2013)のM _w はF-netよ り引用しているが、佐藤 (2013)は6.3、F-netでは6.4な ので、6.4を採用した。	
10	太平洋	福島県沖	2011/8/19	-	-	56.0	6.3	3.19E+18	-	3.05E+19	-	-	-	佐藤(2013)	-	
11	フィリピン海	芸予	2001/3/24	34.12 (YK)	132.7087 (YK)	50 (YK)	6.7 (YK)	1.4E+19 (YK)	-	6.2E+19 (M)	-	asp1:47 asp2:41 (A1)	asp1:33.1 asp2:24.8 (A1)	笹谷・他(2006)	A1: Asano et al. (2003) M: 森川・他(2002), YK: Yagi and Kouchi (2001) M _r -A, M _s -Sa等の図はこちら らをブロットした。	
						46.46 (TS)	6.8 (TS)	2.1E+19 (KH)	-	6.0E+19 (I2)	-	-	-	-	佐藤(2013)	TS: 笹谷・他(2006) KH: Kakehi(2004), I2: 池田・他(2004) 笹谷・他では6.0E+20だが池 田・他より6.0E+19とした。
						46.0	6.8	1.88E+19	3.6	-	-	81.0	24.3	Iwata and Asano (2011)	Kakehi(2004)	
						46.0	7.0	3.36E+19	5.2	-	-	135.0	24.2	-	関口・岩田 (2002)	
						34.1	132.7	46.5	6.8	1.51E+19	-	-	-	-	Asano et al. (2004)	2つのアスペリティ
12	フィリピン海	駿河湾	2009/8/11	-	-	21.6	6.2	2.25E+18	80.6	3.71E+19	0.65	SMGA1: 75.1 SMGA2: 75.1	SMGA1: 3*2-6 SMGA2: 4*3=12 total: 18	佐藤(2010)	-	
						23.0	-	-	-	-	-	-	SMGA1: 3.6*3.6=13 SMGA2: 4.8*4.8=23	浅野・岩田(2010)	注) 2枚の断層面	
				34.8	138.5	23.0	-	-	-	-	-	-	-	野津(2010)	2枚の断層面 3つのアスペリティ	
						6.4	4.8E+18	-	-	-	-	-	-	上野・他(2009)	2枚の断層面	
						34.7	138.5	17.1	-	-	-	-	-	asp1:15 asp2:15	asp1:5.0*5.0=25 asp2:5.0*5.0=25 total: 50.0	川辺・他(2010)
					23.0	-	-	-	-	-	asp1:16.7 asp2:17.6	asp1:16.2 asp2:45.0	倉橋・他(2009)	2枚の断層面		
13	フィリピン海	大分県西部	2006/6/12	-	-	145.0	6.4	4.2E+18	24.9	2.70E+19	-	-	-	池田(2010)	M _w はM ₀ から求めた。	
14	フィリピン海	日向灘	2001/4/25	32.796 (I2)	132.342 (I2)	39.3 (I2)	5.7	4.00E+17	-	6.8E+18(I2)	-	19 (A1)	2.2*3.4 =7.5(A1)	笹谷・他(2006)	H: Harvard CMT A1: Asano et al.(2003) I2: Ikeda et al.(2004)	
15	フィリピン海	和歌山県北部	1999/8/21	-	-	66.0	5.6	3.1E+17 (H)	-	2.9E+18(I2)	-	314 (A1)	1.4 (A1)	笹谷・他(2006)	H: Harvard CMT A1: Asano et al.(2003) I2: Ikeda et al.(2004)	
16	フィリピン海	愛知県東部	1997/3/16	-	-	39.0	5.6	3.3E+17(H)	-	1.2E+19(I2)	-	32(A1)	2.7(A1)	笹谷・他(2006)	H: Harvard CMT A1: Asano et al.(2003) I2: Ikeda et al.(2004)	
17	フィリピン海	静岡県中部	2001/4/3	35.039 (H) 35 (F)	138.095 (H) 138.1 (F)	30.11 (H) 35 (F)	5.4	1.58E+17	-	9.12E+18	-	34	3.2	森川・笹谷(2002), 防災科学技術研究所 (2001)	$\beta = 4.6$ H: Harvard NIED 走向, 傾斜, ずべり角: 311.7, 74.8, 170.2 F: Ffressia 走向, 傾斜, ずべり角: 341.36, -62 2枚の断層面 $\log M_0 = 1.5 M_w + 9.1$	
18	太平洋	宮城県沖	1998/11/24	-	-	83.1	5.1	5.73E+16	-	1.16E+19	-	-	-	佐藤(2004)	$\log M_0 = 1.5 M_w + 9.1$	
19	太平洋	宮城県沖	2003/5/27	-	-	67.5	4.7	1.43E+16	-	1.02E+19	-	-	-	佐藤(2004)	$\log M_0 = 1.5 M_w + 9.1$	

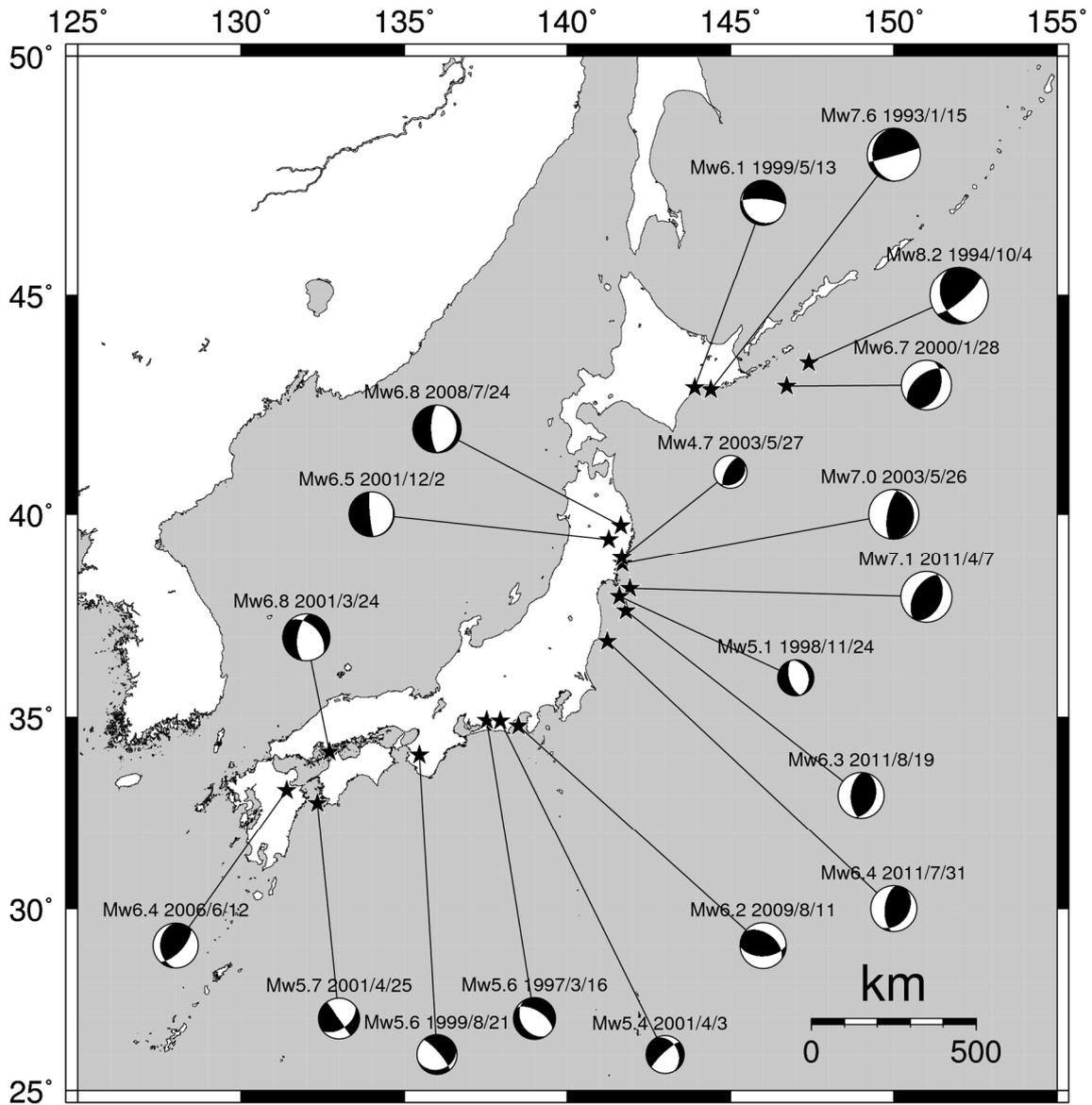


図 2.3-1 調査した国内のスラブ内地震の震源メカニズム解

2.4 国内のスラブ内地震の断層パラメータの分析

図 2.4-1 に表 2.3-1 に示した国内のスラブ内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、太平洋プレート内の地震については白丸印で、フィリピン海プレート内の地震については黒丸印で示す。図中、赤線は(2.4-1)式で表される笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル $A_{sasatani}$ との経験的関係式で点線部分は外挿である。黒線は、(2.4-2)式で表される壇・他(2001)による内陸地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A_{dan} との経験的関係式である。太線は平均値で、細線はその2倍と1/2、点線部分は外挿である。

$$A_{sasatani}[\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2] = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0[\text{N}\cdot\text{m}] \times 10^7)^{1/3} \quad (2.4-1)$$

$$A_{dan}[\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2] = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0[\text{N}\cdot\text{m}] \times 10^7)^{1/3} \quad (2.4-2)$$

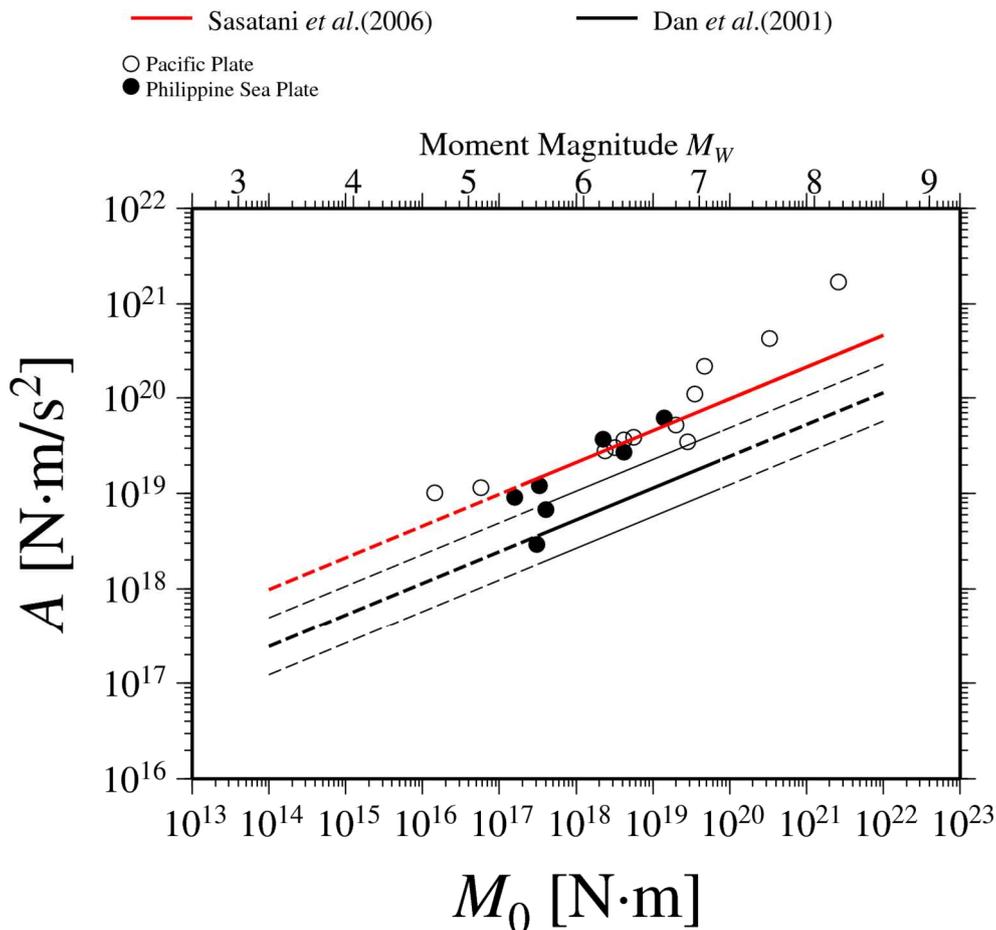


図 2.4-1 国内のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係

図より、太平洋プレート内のスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルとの関係は、笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルとの経験的關係式より、モーメントマグニチュード M_w が 8 前後で大きくなっているが、全体的にはこの経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

一方、フィリピン海プレート内のスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルとの関係は、 M_w が 5.5 程度で笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルとの経験的關係式より小さいが、 M_w が 6.5 程度でこの経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

図 2.4-2 に表 2.3-1 に示した国内のスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 S_a との関係を示す。図中、赤線は(2.4-3)式で表される笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $S_{a_{sasatani}}$ との経験的關係式で、黒線は(2.4-4)式で表される Somerville *et al.* (1999)による内陸地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $S_{a_{somerville}}$ との経験的關係式である。

$$S_{a_{sasatani}}[\text{km}^2] = 1.25 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{N} \cdot \text{m}] \times 10^7)^{2/3} \quad (2.4-3)$$

$$S_{a_{somerville}}[\text{km}^2] = 5.00 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{N} \cdot \text{m}] \times 10^7)^{2/3} \quad (2.4-3)$$

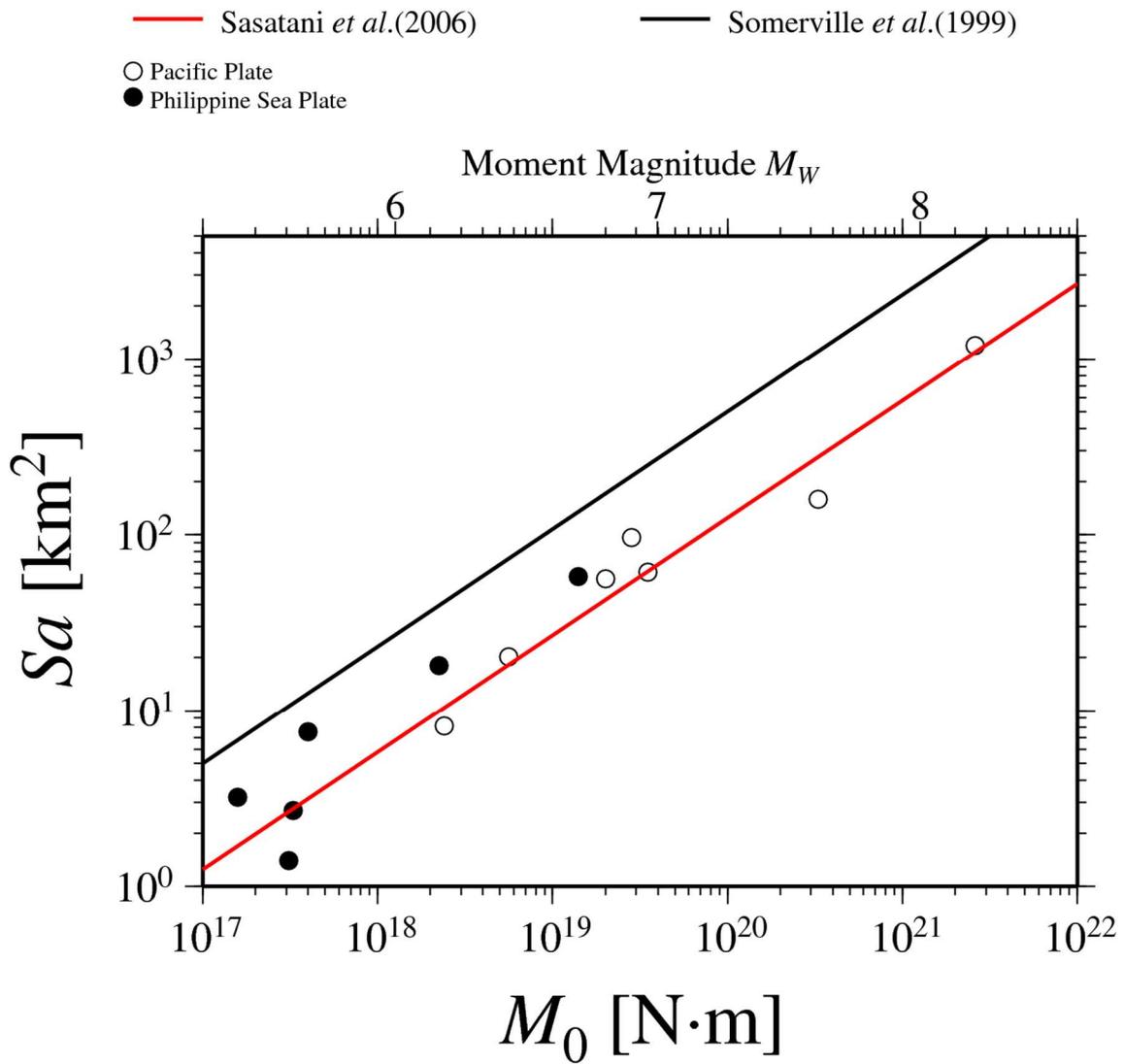


図 2.4-2 国内のスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 S_a との関係

図より、太平洋プレート内のスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との関係もフィリピン海プレート内のスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との関係も、笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

図 2.4-3 に国内のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との関係を示す。ここに、 A は表 2.3-1 に示した各地震の短周期レベルで、 $A_{sasatani}$ は(2.4-1)式で示される笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの経験的關係式による値である。

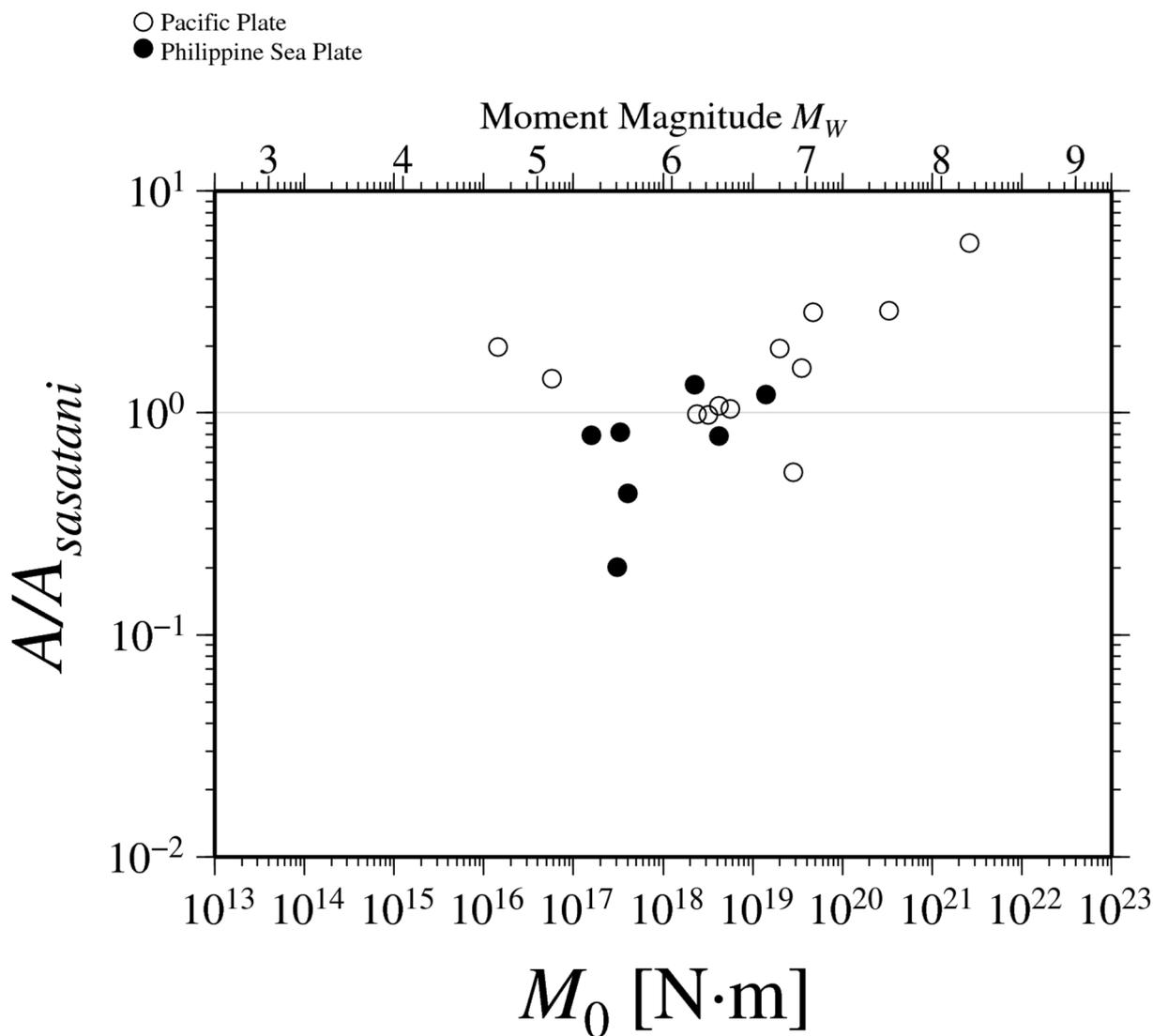


図 2.4-3 国内のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との関係

図より、太平洋プレート内のスラブ内地震の $A/A_{sasatani}$ は、モーメントマグニチュード M_W が 8 前後で 1 より大きくなっているが、全体的には $A/A_{sasatani}=1$ にほぼのっていることがわかる。一方、フィリピン海プレート内のスラブ内地震の $A/A_{sasatani}$ は、 M_W が 5.5 程度で 1 より小さいが、 M_W が 6.5 程度で $A/A_{sasatani}=1$ にほぼのっていることがわかる。

図 2.4-4 に国内のスラブ内地震の震源の深さ D と A/A_{sasatani} との関係を示す。図には、佐藤(2013)による震源深さ D と A/A_{dan} との経験的關係を震源深さ D と A/A_{sasatani} との経験的關係に直した線も示す。

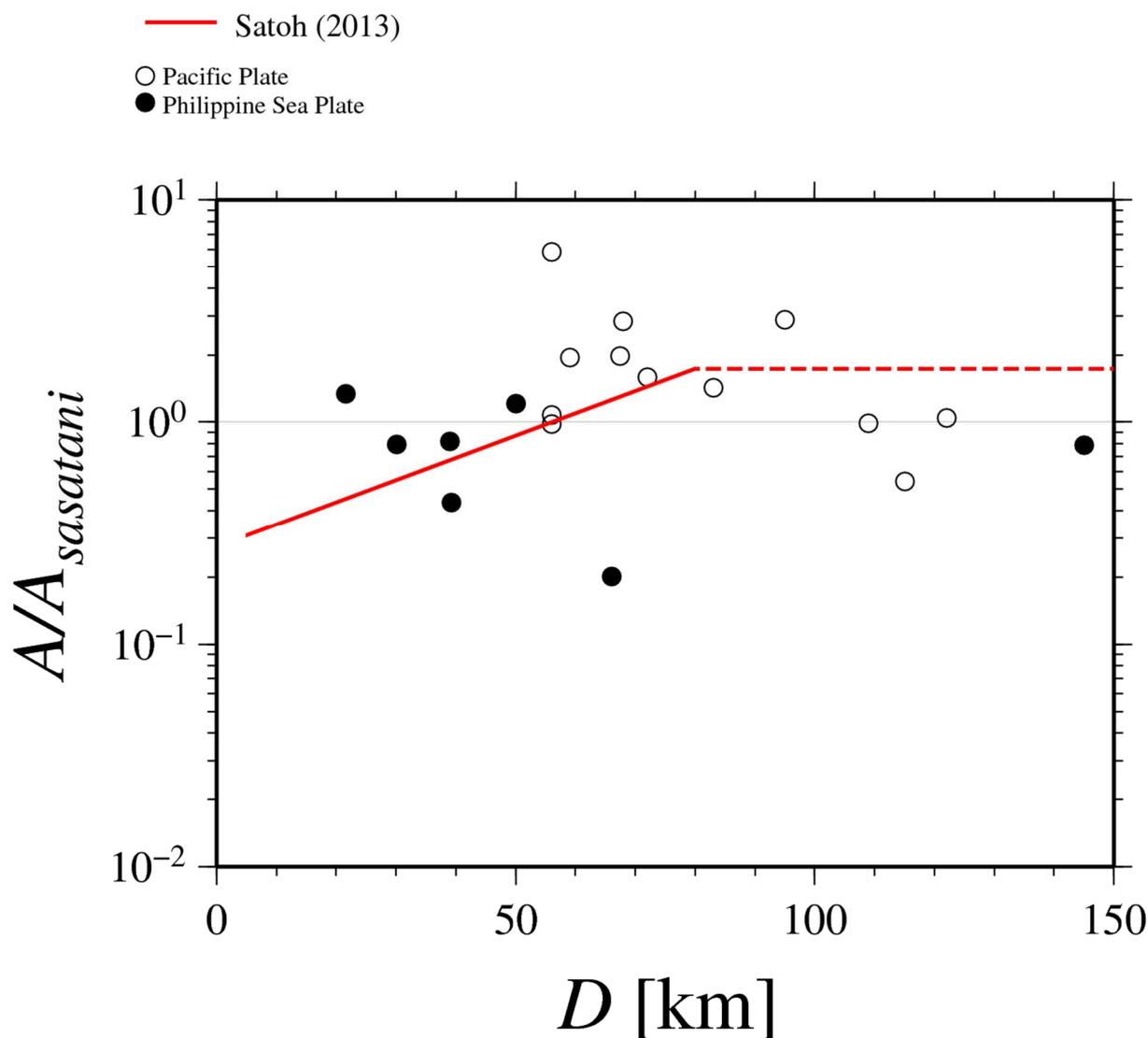


図 2.4-4 国内のスラブ内地震の震源の深さ D と A/A_{sasatani} との関係

図より、深さとともに A/A_{sasatani} が若干大きくなっている傾向が見え、佐藤(2013)による経験的關係とほぼ対応しているが、ばらつきが大きいことがわかる。また、プレート別にみると、 A/A_{sasatani} が深さとともに若干大きくなっているというよりは、浅い地震の多いフィリピン海プレート内のスラブ内地震で A/A_{sasatani} が1程度か1より小さく、深い地震の多い太平洋プレート内のスラブ内地震で1程度か1より大きく見え、プレートの地域性を示唆している。

2.5 国内のアウトサイズ地震（浅い地震）の断層パラメータの調査

本節では、国内のアウトサイズ地震の断層パラメータ、特に短周期レベルおよびアスペリティの面積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
- ・短周期レベル
- ・アスペリティの応力降下量
- ・アスペリティの面積
- ・S波速度

調査結果を表 2.5-1 に示す。また、調査したアウトサイズ内地震の震央と震源メカニズム解を図 2.5-1 に示す。

表 2.5-1 国内のアウトサイズ地震の断層パラメータの調査結果

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	地震モーメント (論文) M_0 (Nm)	地震モーメント (F-net) M_0 (Nm)	短周期レベル A ($N \cdot m/s^2$)	アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	アスペリティの面積 S_a (km^2)	S波速度 β (km/s)	参考文献1	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]									
1	太平洋	三陸沖	2011/3/11	38.27	144.63	21.1	7.6	3.10E+20	2.46E+20	*	*	506.25	*	宮原・他(2013)	
				*	*	20	7.5	2.46E+20		9.37E+19	*	*	4.0	佐藤(2013)	
				*	*	21.1	7.6	3.10E+20		3.82E+20	SMGA1: 248 SMGA2: 198	SMGA1: 86.5 SMGA2: 153.8 total: 240.3	*	Sasatani et al. (2012)	$\beta=4.0$ としてAを求めた。
2		三陸沖	2011/5/5	38.24	144.17	13.9	6.1	1.52E+18	1.09E+18	*	*	*	*	宮原・他(2013)	
				*	*	8	6.0	1.09E+18		6.45E+18	*	*	4.0	佐藤(2013)	
				*	*	14	7.0	4.06E+19	4.06E+19	3.02E+19	*	*	4.0	佐藤(2013)	
3		三陸沖	2005/11/15	*	*	18.0	7.0	3.70E+19		1.93E+20	236.0	51.8	*	Sasatani et al. (2012)	$\beta=4.0$ としてAを求めた。
				38.21	144.75	12.9	7.0	3.70E+19		*	*	*	*	岡崎・他(2011)	
				*	*	8	6.3	3.43E+18	3.43E+18	1.09E+19	*	*	4.0	佐藤(2013)	
4		東北地方沖	2011/3/22	*	*	11	5.9	8.76E+17	8.76E+17	5.90E+18	*	*	4.0	佐藤(2013)	
5		東北地方沖	2011/6/3	*	*	5	6.1	1.50E+18	1.50E+18	5.21E+18	*	*	4.0	佐藤(2013)	
6		東北地方沖	2011/8/17	*	*	8	7.0	3.54E+19	3.54E+19	2.46E+19	*	*	4.0	佐藤(2013)	
7		東北地方沖	2012/3/14	*	*	5	5.8	6.86E+17	6.86E+17	7.59E+18	*	*	4.0	佐藤(2013)	
8		東北地方沖	2012/3/14	*	*	5	5.8	6.86E+17	6.86E+17	7.59E+18	*	*	4.0	佐藤(2013)	

表 2.5-1 国内のアウトターライズ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 グニチュード M_w	地震 モーメント (論文) M_0 (Nm)	地震 モーメント (F-net) M_0 (Nm)	短周期 レベル A ($N \cdot m/s^3$)	アスベリティの 応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)	アスベリティの 面積 S_a (km^2)	S 波速度 β (km/s)	参考文献1	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]									
9		千島列島中部	2007/1/13	46.17	154.8	12	8.1	1.78E+21	1.11E+21	7.41E+20	SMGA1: 98 SMGA2: 107 SMGA3: 103 SMGA4: 125 total: 2052	SMGA1: 18*18 SMGA2: 18*18 SMGA3: 48*18 SMGA4: 30*18 total: 2052	4.6	川端・他(2010)	
				*	*	12.0	8.1	1.78E+21		7.38E+20	SMGA1: 107 SMGA2: 98 SMGA3: 98 SMGA4: 107 SMGA5: 130 SMGA6: 125 total: 1944	SMGA1: 324 SMGA2: 324 SMGA3: 324 SMGA4: 324 SMGA5: 324 SMGA6: 324 total: 1944	*	Sasatani et al. (2012)	$\beta=4.6$ としてAを求めた。
10	フィリピン海	紀伊半島南東沖 (前震)	2004/9/5	33.0	136.8	38.0	7.2	7.54E+19	7.54E+19	7.70E+19	*	*	*	佐藤(2009)	
11		紀伊半島南東沖 (本震)	2004/9/5	33.1	137.1	44.0	7.4	1.69E+20	1.69E+20	8.38E+19	*	*	*	佐藤(2009)	

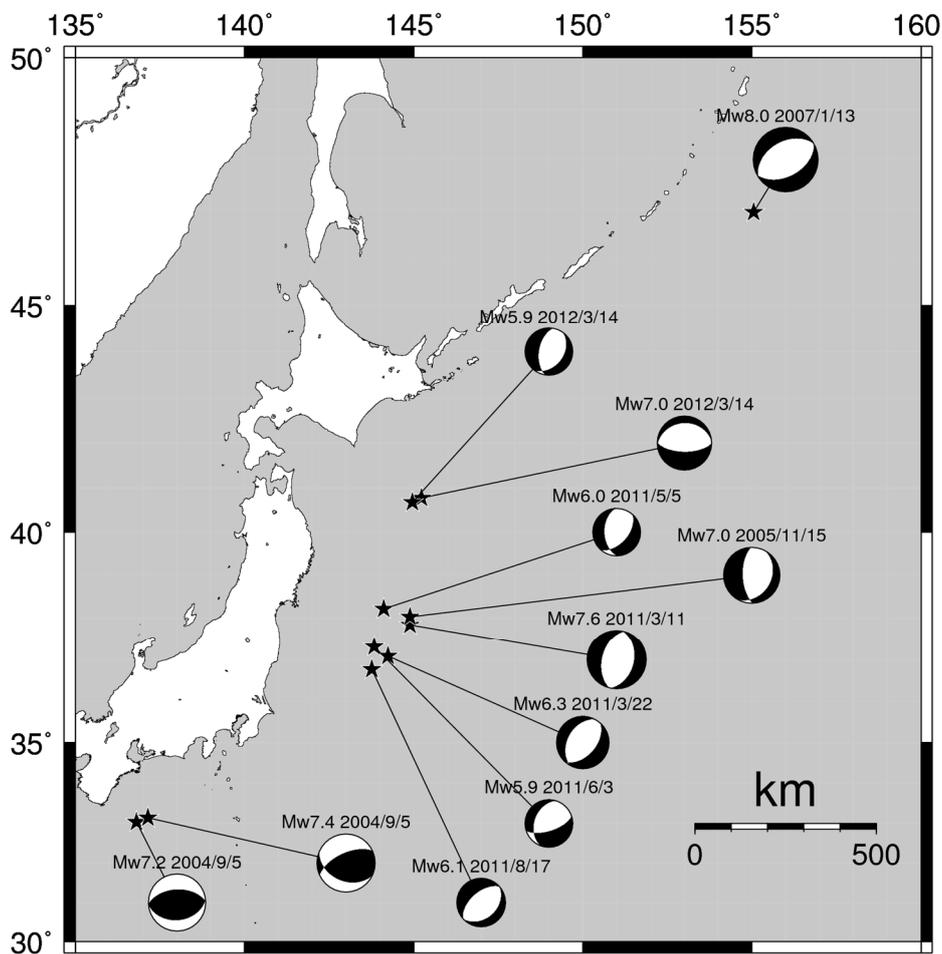


図 2.5-1 調査した国内のアウトターライズ地震の震源メカニズム解

図より、調査したアウトターライズ地震は、太平洋プレート内で起こった正断層の地震とフィリピン海プレート内で起こった逆断層の地震であることがわかる。

2.6 国内のアウトライズ地震（浅い地震）の断層パラメータの分析

図 2.6-1 に表 2.5-1 に示した国内のアウトライズ地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係を示す。図中、白丸印はスペクトルインバージョン (SI: Spectral Inversion) で短周期レベルを求めた太平洋プレート内のアウトライズ地震、星印は強震動生成域 (SMGA: Strong Motion Generation Area) のインバージョン結果から短周期レベルを求めた太平洋プレート内のアウトライズ地震、黒丸印はスペクトルインバージョンで短周期レベルを求めたフィリピン海プレート内のアウトライズ地震である。赤線は (2.4-1) 式で示される笹谷・他 (2006) によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A_{sasatani} との経験的關係式で点線部分は外挿である。黒線は、(2.4-2) 式で示される壇・他 (2001) による内陸地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A_{dan} との経験的關係式である。太線は平均値で、細線はその 2 倍と 1/2、点線部分は外挿である。

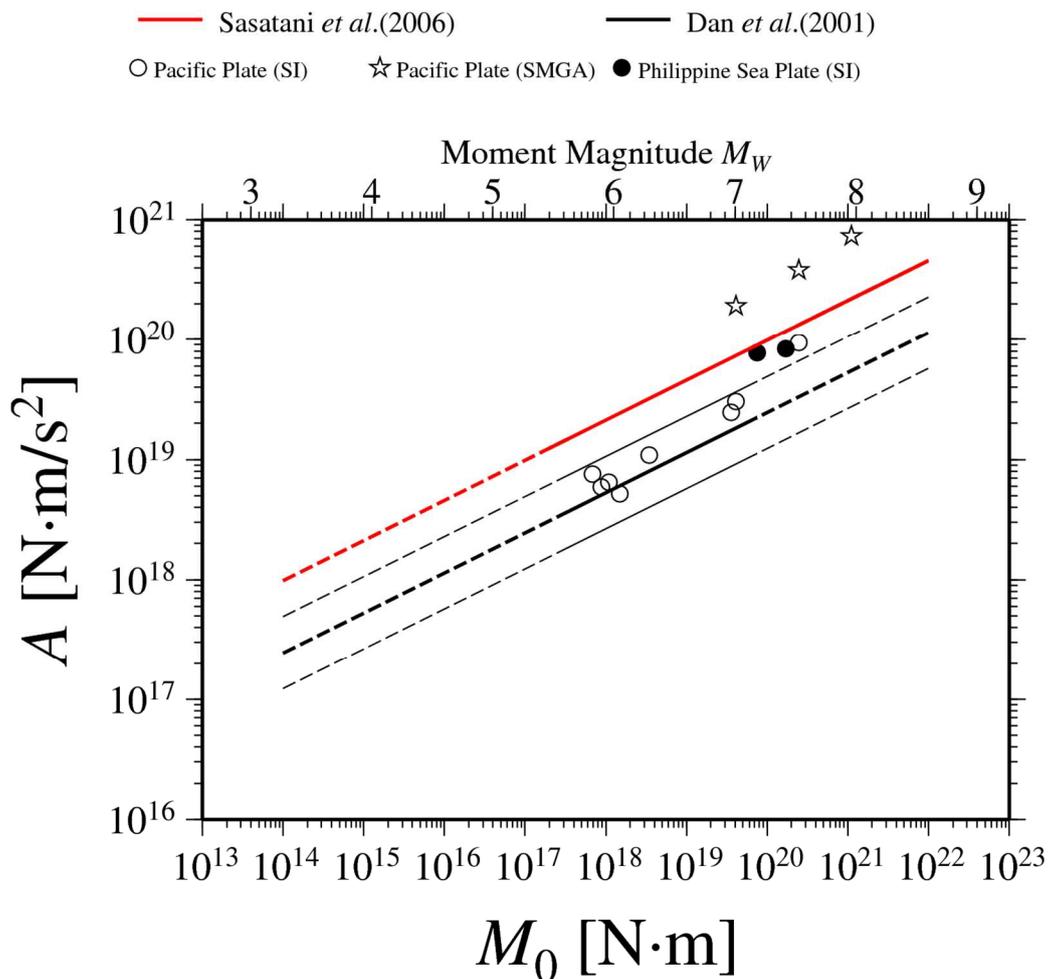


図 2.6-1 国内のアウトライズ地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係

図より、全体的にみると、 M_w が6~7ではアウターライズの地震の短周期レベルは内陸地震の平均的な値 A_{dan} と対応するものの、 M_w が7を超え、8クラスとなると大きくなって、スラブ内地震の平均的な値 $A_{sasatani}$ よりも大きくなるのがわかる。一方、短周期レベルの求め方の違い、すなわち白丸印と黒丸印はスペクトルインバージョンで求めた短周期レベル、星印は強震動生成域から求めた短周期レベルといった違いでみると、同じ M_w 7 クラスで強震動生成域から求めた短周期レベルの方が2~3倍大きいといった系統的な差がみられる。この系統的な差は計算に用いられたQ値の差と考えられ、今後、海底地震計の観測記録を用いたQ値の検討が望まれる。

図2.6-2に表2.5-1に示した国内のアウターライズ地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 Sa との関係を示す。図中、赤線は(2.4-3)式で示される笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $Sa_{sasatani}$ との経験的關係式で、黒線は(2.4-4)式で示される Somerville *et al.* (1999)による内陸地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $Sa_{somerville}$ との経験的關係式である。

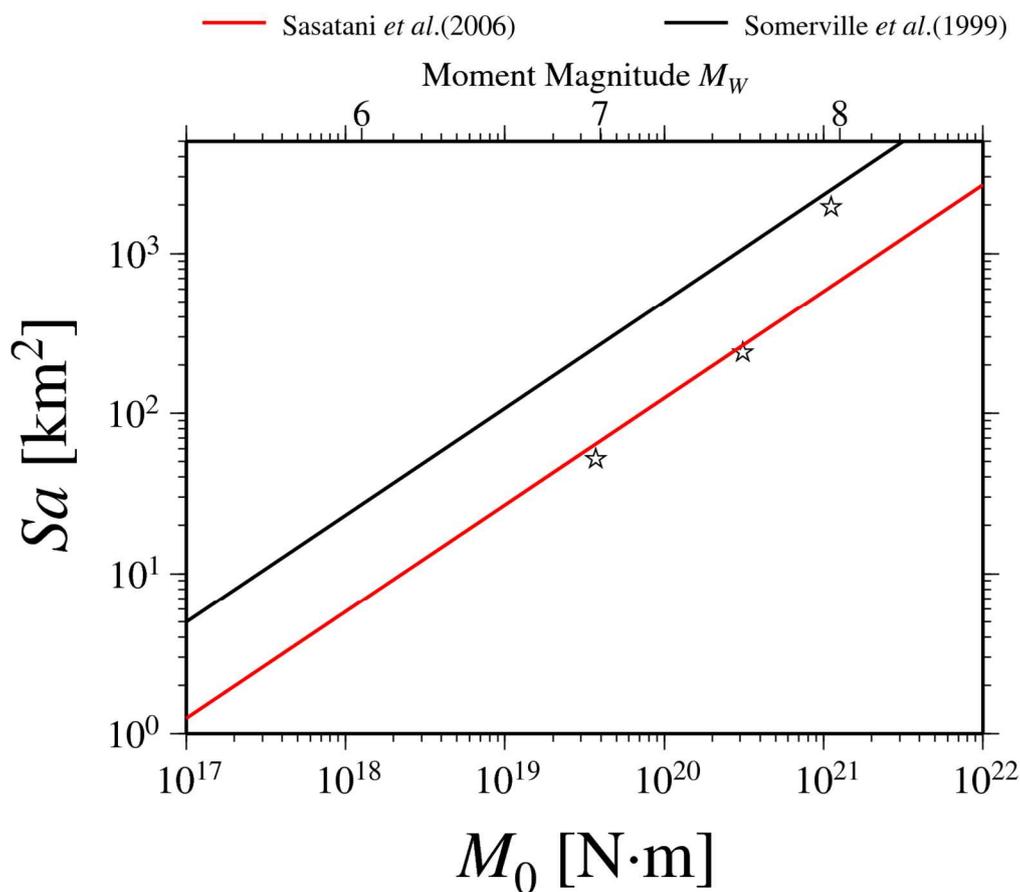


図 2.6-2 国内のアウターライズ地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 Sa との関係

図より、アウターライズ地震の地震モーメントとアスペリティの面積との関係は、数が3つと少ないものの、笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

図 2.6-3 に国内のアウターライズ地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との關係を示す。ここに、 A は表 2.5-1 に示した各地震の短周期レベルで、 $A_{sasatani}$ は(2.4-1)式で示される笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの経験的關係式による値である。

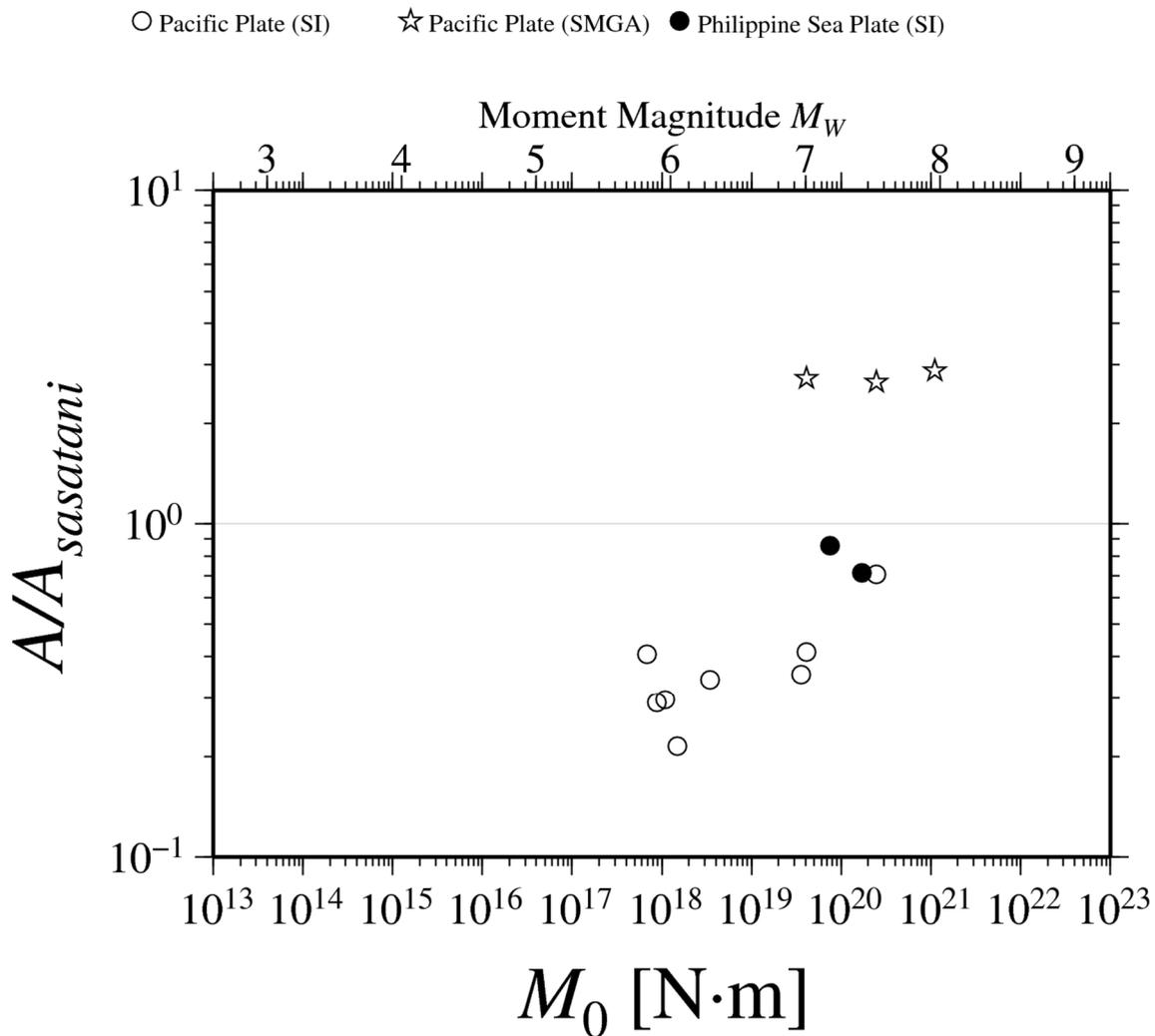


図 2.6-3 国内のアウターライズ地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との關係

図より、全体的にみると、 M_w が 6~7 ではアウターライズの地震の $A/A_{sasatani}$ は 1 より小さいものの、 M_w が 7 を超え、8 クラスとなると 1 より大きくなることがわかる。一方、図 2.6-1 で指摘したことと同じであるが、短周期レベルの求め方の違い、すなわち白丸印と

黒丸印はスペクトルインバージョンで求めた短周期レベル、星印は強震動生成域から求めた短周期レベルといった違いでみると、同じ M_w7 クラスで強震動生成域から求めた短周期レベルの方が2~3倍大きいといった系統的な差がみられる。この系統的な差は計算に用いられた Q 値の差と考えられ、今後、海底地震計の観測記録を用いた Q 値の検討が望まれる。

図 2.6-4 に国内のアウトターライズ地震の震源の深さ D と $A/A_{sasatani}$ との関係を示す。図には、佐藤(2013)による震源深さ D と A/A_{dan} との経験的關係を震源深さ D と $A/A_{sasatani}$ との経験的關係に直した線も示す。

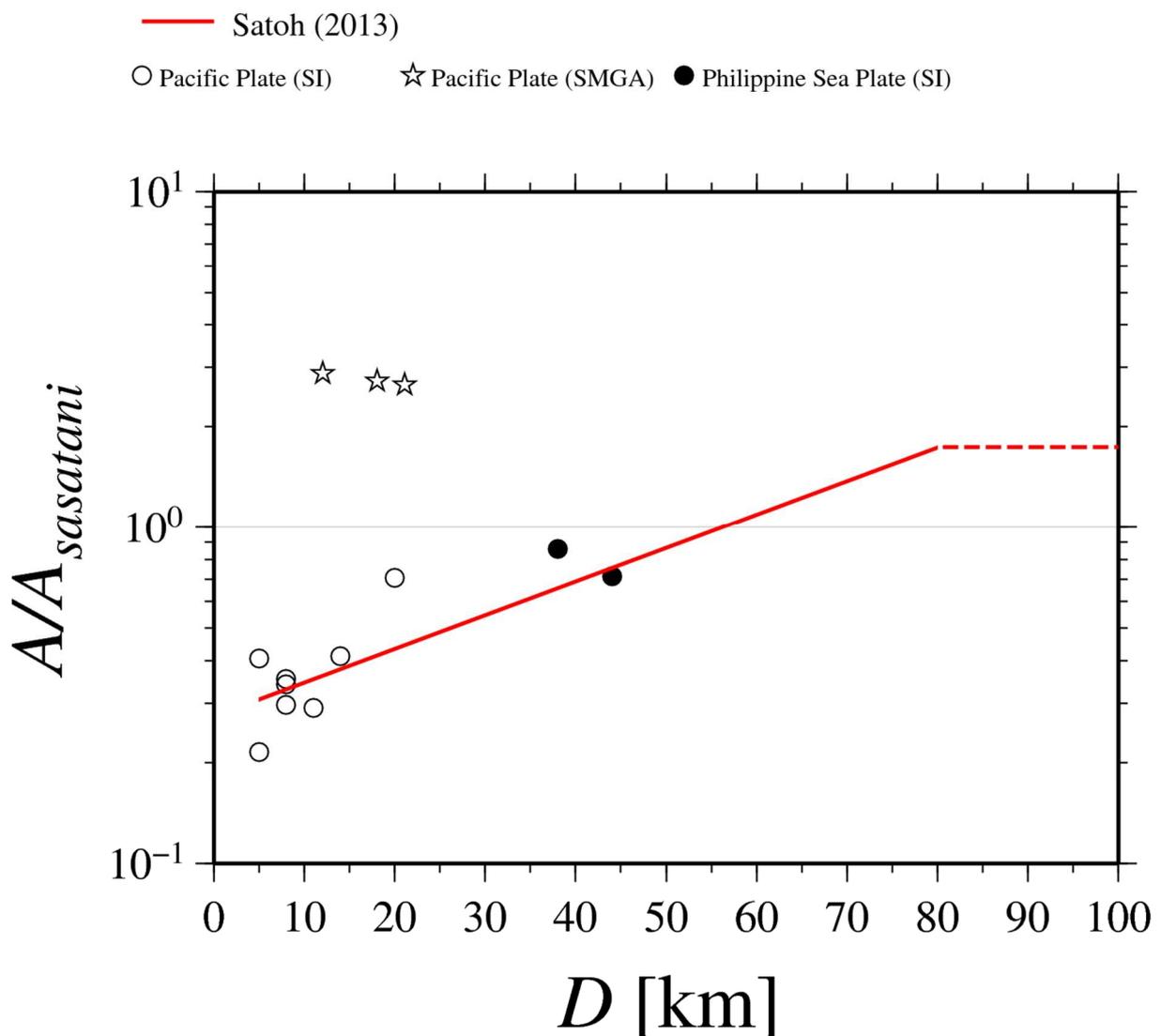


図 2.6-4 国内のアウトターライズ地震の震源の深さ D と $A/A_{sasatani}$ との関係

図より、スペクトルインバージョンによる白丸印と黒丸印は深さとともに $A/A_{sasatani}$ が大きくなっている傾向がはっきりと見え、佐藤(2013)による経験的關係と対応していること

がわかる。しかし、白丸印で示したスペクトルインバージョンによる太平洋プレート内のアウターライズ地震の A/A_{sasatani} と星印で示した強震動生成域から求めた太平洋プレート内のアウターライズ地震の A/A_{sasatani} は、10~20km と同じ程度の深さにも関わらず 10 倍弱異なっており、図 2.6-1 の説明で述べたように、これは短周期レベルを求めたときの Q 値の違いによるものと考えられる。

3. 国外の海洋プレート内地震の震源特性の調査

3.1 国外のスラブ内地震の地震動特性の調査

国外のスラブ内地震の地震動特性の調査として、距離減衰式に関する文献である Atkinson and Boore (2003) を調査した。

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、Cascadia 沈み込み帯で発生したスラブ内地震である 2001 年の Nisqually 地震 (M6.8) と 1999 年の Satsop 地震 (M5.9) のほか、日本 (K-net)、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。

回帰モデルは下式 (3.1-1) で示される。

$$\log Y = fn(\mathbf{M}) + c_3 h + c_4 R - g \log R + c_5 sl S_C + c_6 sl S_D + c_7 sl S_E, \quad (1) \quad (3.1-1)$$

ここに、 Y は最大加速度もしくは減衰定数 5% の加速度応答スペクトル (cm/s)、 M はモーメントマグニチュード (プレート間地震: $M \leq 8.5$ 、スラブ内地震: $M \leq 8.0$)、 $fn(M) = c_1 + c_2 M$ 、 h : 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、 $\Delta = 0.00724 \times 10^{0.507M}$ である。 S_C 、 S_D 、 S_E は地盤種別を表す係数で、 sl は最大加速度の大きさと振動数による係数である。

また、Cascadia と日本において、同じマグニチュード、距離、地震タイプおよび地盤種別において、地震動の振幅に地域性が見られたことから、Cascadia と日本の地域補正係数を提案した。

Atkinson and Boore (2003) による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例を図 3.1-1 (左図: 最大加速度、右図: 加速度応答スペクトル) に示す。図中、in-slab がスラブ地震の例である。

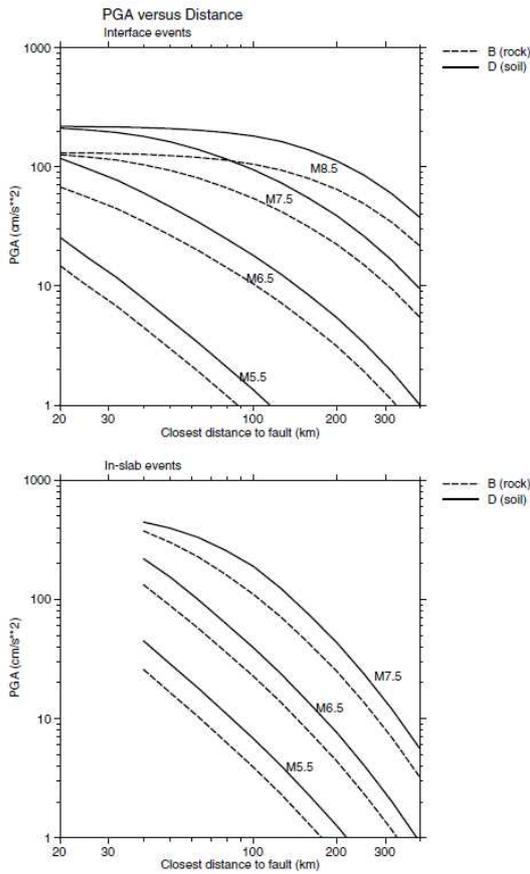


Figure 9. Peak ground acceleration for rock (NEHRP B) and soil (NEHRP D) for interface events (depth = 20 km) of M 5.5, 6.5, 7.5, and 8.5 (top frame) and in-slab events (depth = 50 km) of M 5.5, 6.5, and 7.5. Nonlinear soil response is assumed for records with $PGA_x > 100 \text{ cm/sec}^2$.

a) 最大加速度

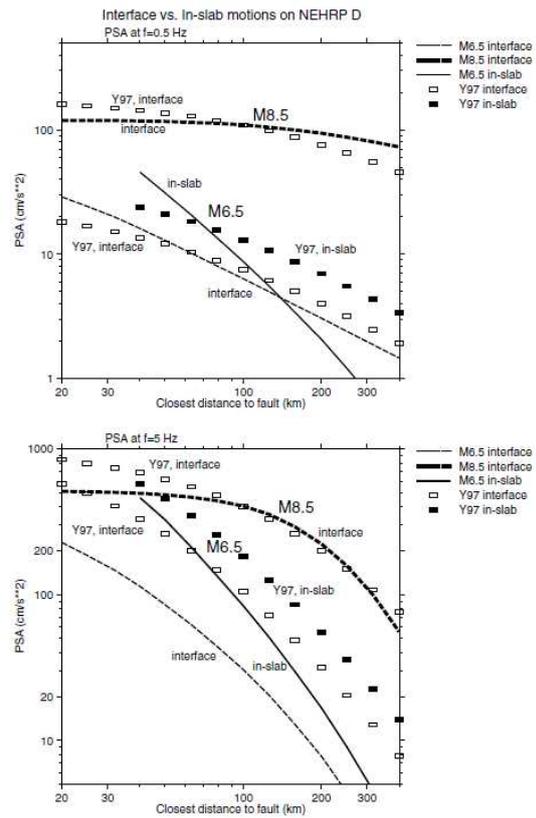


Figure 10. Comparison of response spectra amplitudes at frequencies 0.5 Hz (top frame) and 5 Hz (lower frame), for interface (depth = 20 km) and in-slab (depth = 50 km) events of M 6.5 on NEHRP D soil sites. The corresponding predictions of Youngs *et al.* (1997) for interface (open symbols) and in-slab (filled symbols) events are also shown. Interface ground motions for M 8.5 (NEHRP D) are also shown in comparison to the Youngs *et al.* (1997) predictions.

b) 加速度応答スペクトル

図 3.1-1 Atkinson and Boore (2003)による断層タイプごとの距離減衰式の結果の例

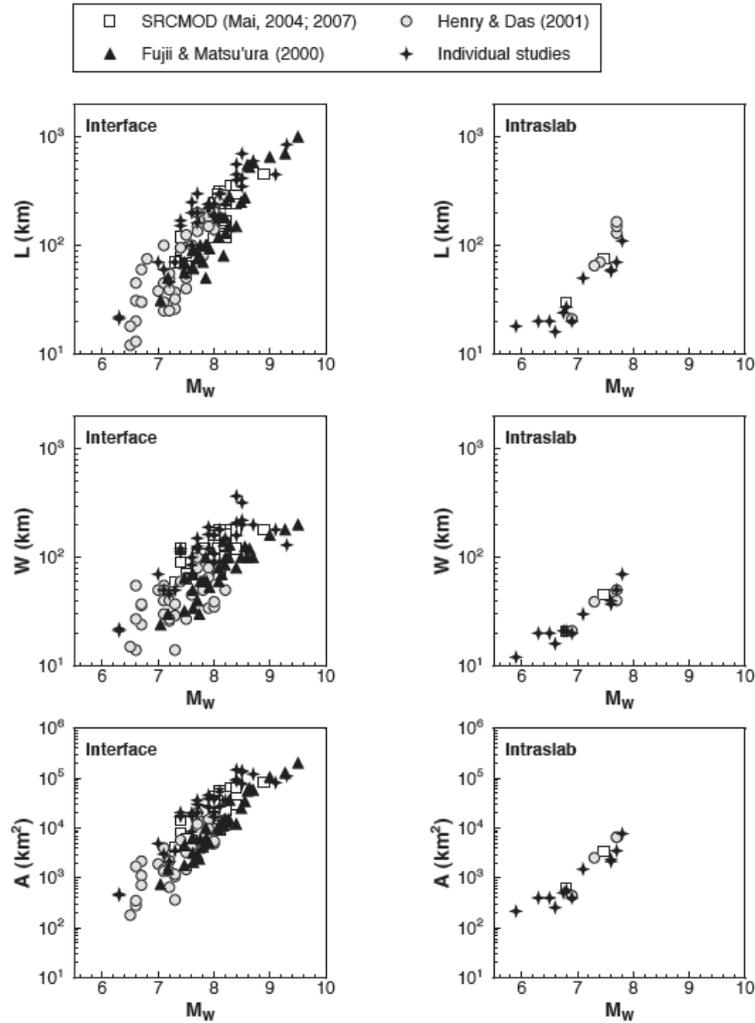
3.2 国外のスラブ内地震のスケーリング則の調査

国外のスラブ内地震のスケーリング則として、Strasser *et al.* (2010)を調査した。

Strasser *et al.* (2010)は、日本のスラブ内地震を含む世界のスラブ内地震を対象に、モーメントマグニチュードと破壊領域の大きさの関係のスケーリング則を調べている。

対象としたスラブ内地震のモーメントマグニチュードと破壊領域の長さ、幅、面積の関係を図 3.2-1(右列)に、回帰分析で得られた関係式の一覧を表 3.2-1 に示す。また、回帰分析の結果とデータセットを合わせた結果を図 3.2-2 に示す。

図 3.2-2 で、黒実線は回帰分析の平均値の結果を、黒点線は±95%の信頼区間を、灰色の実線は自己相似則 ($\log L$ や $\log W$ が $0.5 M_w$ に比例する相似則) を仮定した場合の回帰分析の結果を示している。図より、自己相似則を仮定した場合の灰色の実線は、モーメントマグニチュードと破壊領域の長さの関係、およびモーメントマグニチュードと破壊領域の面積の関係においては、平均値±95%の信頼区間に含まれているが、モーメントマグニチュードと破壊領域の幅の関係では、平均値±95%の信頼区間から外れているとされている。

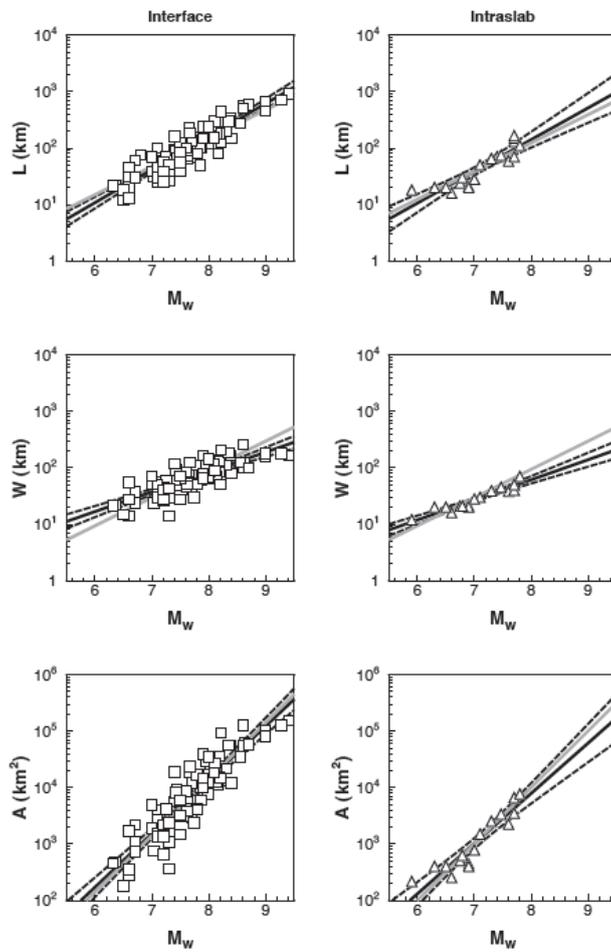


▲ Figure 1. Datasets from which the average values of rupture dimensions and moment magnitude used in the regression analysis were derived.

図 3.2-1 Strasser *et al.* (2010)で対象とした、スラブ内地震（右列）のモーメントマグニチュードと破壊領域の大きさとの関係

表 3.2-1 Strasser *et al.* (2010)で対象とした、スラブ内地震（右列）のモーメントマグニチュードと破壊領域の大きさの回帰分析の結果

	a	s.e. (a)	b	s.e. (b)	σ	R^2	N
$\log_{10}(L) = a + b \times M_w$	-2.350	0.453	0.562	0.064	0.146	0.813	20
$\log_{10}(W) = a + b \times M_w$	-1.058	0.217	0.356	0.031	0.067	0.893	18
$\log_{10}(A) = a + b \times M_w$	-3.225	0.598	0.890	0.085	0.184	0.874	18
$M_w = a + b \times \log_{10}(L)$	4.725	0.274	1.445	0.164	0.234	0.813	20
$M_w = a + b \times \log_{10}(W)$	3.407	0.317	2.511	0.217	0.178	0.893	18
$M_w = a + b \times \log_{10}(A)$	4.054	0.288	0.981	0.093	0.193	0.874	18



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

図 3.2-2 Strasser *et al.* (2010)によるプレート境界地震（左列）とスラブ内地震（右列）のモーメントマグニチュードを説明変数とした破壊領域の大きさの回帰分析の結果

3.3 国外のスラブ内地震の断層パラメータの調査

本節では、国外のスラブ内地震の断層パラメータ、特に短周期レベルおよびアスペリティの面積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
- ・ 短周期レベル
- ・ アスペリティの応力降下量
- ・ アスペリティの面積
- ・ S波速度

調査結果を表 3.3-1 に示す。また、震央位置を図 3.3-1 に示す。これらのスラブ内地震のうち Harvard 大学から震源メカニズム解が発表されている地震の震央と震源メカニズム解を図 3.3-2 に示す。

表 3.3-1 国外のスラブ内地震の断層パラメータの調査結果

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	地震 モーメント (Mwより) M_0 (Nm)	地震 モーメント (論文) M_0 (Nm)	平均 応力 降下量 $\Delta\sigma$ (MPa)	短周期 レベル A ($N \cdot m/s^2$)	コーナー 振動数 f_c (Hz)	アスベリテイ の 応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	アスベリテイ の面積 S_a (km^2)	S 波速度 β (km/s)	参考文献1	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]											
1	S. Mariana	Guam	1993/8/8	12.98	144.80	45	7.7	4.47E+20	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				12.982	144.801	50	7.7		3.5E+20	*	*	*	*	*	*	*	Tanioka et al. (1995)
2	Sumatra	Sumatra	2000/6/4	-4.73	101.94	44	7.8	6.31E+20	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				-4.72	102.09	33	*		1.5E+21	90	*	*	*	*	*	*	Zhou et al. (2002)
3	Vanuatu	Vanuatu	1994/7/13	-16.50	167.35	25	7.1	5.62E+19	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)		
4	N. Chile	Taltal	1965/2/23	-25.67	-70.79	60	7.0	3.98E+19	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				-25.67	-70.79	59	7.0		3.5E+19	*	*	*	*	*	4.5	Malgrange and Madariaga (1983)	
5		Tarapaca	2005/6/13	*	*	108	7.7		3.92E+20	14.9	1.71E+20	*	59.7	400	*	Iwata and Asano (2011)	$\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2\Delta\sigma_s (S_a/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。
				-20.01	-69.24	108	7.8		5.47E+20	15	*	*	*	*	*	Delouis and Legrand (2007)	
6	C. Peru	Peru	1970/5/31	-9.18	-78.82	43	7.9	8.91E+20	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				*	*	*	*		1.0E+21	2.3-3.5	*	*	*	*	*	Abe (1972)	
7	El Salvador	El Salvador	1982/6/19	12.65	-88.97	52	7.3	1.12E+20	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)		
8		El Salvador	2001/1/13	12.97	-89.13	56	7.7	4.47E+20	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				*	*	54	7.7		4.57E+20	5.2	9.83E+19	*	25.3	733	*	Iwata and Asano (2011)	$\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2\Delta\sigma_s (S_a/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。
				*	*	54	7.7	4.47E+20	*	*	*	*	*	*	Vallee et al. (2003)		
9	Mexico	Oaxaca	1931/1/15	16.40	-96.30	40	7.7	4.47E+20	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)		
10	Mexico		2013/6/16	18.108	-99.230	55	5.91		9.1E+17	39.1	2.32E+19	0.803	*	*	4.68	Singh et al. (2014)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
11	Mexico		2000/7/21	18.11	-98.97	50	5.89		8.49E+17	37.7	2.21E+19	0.812	*	*	4.68	Singh et al. (2014)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
12	Mexico		2012/11/15	18.407	-100.373	60.9	6.11		1.83E+18	41.4	3.04E+19	0.649	*	*	4.68	Singh et al. (2014)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
13	Mexico		2009/5/22	18.10	-98.43	46	5.71		4.60E+17	44.7	2.04E+19	1.06	*	*	4.68	Singh et al. (2014)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
14	Mexico		2011/12/11	17.82	-99.94	57	6.48		6.71E+18	60.0	6.00E+19	0.476	*	*	4.68	Singh et al. (2014)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
				17.75	-97.27	75	5.8		6.28E+17	32.4	1.81E+19	0.855	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
				17.75	-97.27	75	5.8		6.31E+17	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)		
16	Mexico		1994/5/23	18.02	-100.57	50	6.2		2.77E+18	32.4	2.97E+19	0.521	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
				18.02	-100.57	50	6.2		2.51E+18	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
17	Mexico		1994/12/10	17.98	-101.52	50	6.4		5.20E+18	49.4	4.85E+19	0.486	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
				17.98	-101.52	50	6.4		5.01E+18	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
18	Mexico		1996/1/1	17.04	-99.51	41	4.1		2.00E+15	17.3	1.76E+18	4.718	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
19	Mexico		1996/7/19	17.24	-100.38	50	4.9		2.81E+16	31.0	6.25E+18	2.373	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	
20	Mexico		1997/1/11	18.34	-102.58	40	7.1	5.62E+19	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				18.34	-102.58	40	7.1		6.06E+19	26.6	7.24E+19	0.174	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	M_0-A の図ではこちらをプロットした。 $A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。
				*	*	35	7.0		4.54E+19	2.7	2.59E+19	*	10.1	320	*	Iwata and Asano (2011)	M_0-S_a の図ではこちらをプロットした。 $\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2\Delta\sigma_s (S_a/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。
				18.06	102.79	35	7.1		4.9E+19	*	*	*	*	300	*	Santoyo et al. (2005)	

表 3.3-1 国外のスラブ内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	地震 モーメント (M_w より)	地震 モーメント (論文)	平均 応力 降下量	短周期 レベル	コーナー 振動数	アスベリテイ の 応力降下量	アスベリテイ の面積	S波速度	参考文献1	備考
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]											
21		Mexico	1997/5/19	17.28	-100.45	44	4.6		9.41E+15	14.3	2.58E+18	2.637	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
22		Mexico	1997/5/22	18.37	-101.82	54	6.5		6.53E+18	22.1	3.07E+19	0.345	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.37	-101.82	54	6.5	7.08E+18	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
23		Mexico	1998/4/20	18.35	-101.19	64	5.9		1.01E+18	20.6	1.57E+19	0.627	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.35	-101.19	64	5.9	8.91E+17	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
24		Mexico	1999/6/15	18.13	-97.54	61	6.9		3.10E+19	73.3	1.15E+20	0.306	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.13	-97.54	61	6.9	2.82E+19	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
25		Mexico	1999/6/21	18.15	-101.70	53	6.3		3.11E+18	30.3	2.95E+19	0.490	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.15	-101.70	53	6.3	3.55E+18	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
26		Oaxaca	1999/9/30	15.70	-96.96	47	7.4		1.58E+20	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	
				16.03	-96.96	47	7.4		1.72E+20	66.0	1.89E+20	0.167	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$M_0 = A$ の図ではこ ちらをプロットした。 $A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				*	*	40	7.5		1.79E+20	1.9	3.80E+19	*	9.8	731	*	Iwata and Asano (2011)	$\beta = 4.5$ として、 $A = 4$ $\pm \beta^2 \Delta \sigma_c (S_w/a)^{1/2}$ よりAを求めた。
				16.00	-97.02	39.7	*		1.8E+20	*	*	*	*	*	*	Hernandez et al. (2001)	
27		Mexico	1999/12/29	18.00	-101.63	50	5.9		8.29E+17	12.8	1.07E+19	0.572	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
28		Mexico	2000/7/21	18.11	-98.97	50	5.9		7.14E+17	25.8	1.63E+19	0.760	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.11	-98.97	50	5.9	8.91E+17	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
29		Mexico	2001/3/5	17.15	-100.11	35	5.3		1.00E+17	15.1	5.91E+18	1.224	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				17.15	-100.11	35	5.3	1.12E+17	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
30		Mexico	2001/3/6	17.14	-100.11	38	5.2		8.30E+16	23.0	7.35E+18	1.498	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				17.14	-100.11	38	5.2	7.94E+16	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
31		Mexico	2002/1/30	18.15	-95.98	118	5.9		9.43E+17	198.1	6.94E+19	1.365	*	*	4.68	Garcia et al. (2004)	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ より Aを求めた。
				18.15	-95.98	118	5.9	8.91E+17	*	*	*	*	*	*	*	Garcia et al. (2005)	
32	Alaska	Kodiak Island	1999/12/6	57.35	-154.35	36	7.0		3.98E+19	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)	

表 3.3-1 国外のスラブ内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	地震 モーメント (Mwより)	地震 モーメント (論文)	平均 応力 降下量	短周期 レベル	コーナ ー振動数	アスベリ テイ の 応力降下量	アスベリ テイ の面積	S波速度	参考文献1	備考	
				緯度 [N]	経度 [E]	深さ [km]												
33	Cascadia	Seattle-Tacoma	1965/4/29	*	*	60	6.6		9.43E+18	5.9	3.96E+19	*	52.1	28	*	Iwata and Asano (2011)	$\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。	
				47.38	-122.31	60	6.6		9.43E+18	*	*	*	*	28	*	Ichinose et al. (2004)		
34		Nisqually	2001/2/28	47.14	-122.53	47	6.8	2.00E+19	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)		
				*	*	56	6.8		1.66E+19	3.7	3.80E+19	*	*	40.4	43	*	Iwata and Asano (2011)	M_0-S_0 の図ではこちらをプロットした。 $\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。
				47.14	-122.71	56	6.8		1.66E+19	*	*	*	*	45	*	Ichinose et al. (2004)		
				*	*	60	6.67		1.11E+19	*	*	*	*	*	Ichinose et al. (2006)			
35		Olympia	1949/4/13	47.17	-122.62	54	7.1	5.62E+19	*	*	*	*	*	*	*	Seno and Yoshida (2004)		
				*	*	60	6.8		1.91E+19	5.9	5.60E+19	*	*	65.0	36	*	Iwata and Asano (2011)	$\beta=4.5$ として、 $A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。
				*	*	60	6.8		1.91E+19	*	*	*	*	36	*	Ichinose et al. (2006)		
				47.13	-122.95	54	*		1.5E+19	*	*	*	*	*	4.5	Baker and Langston (1987)		
36		Satsop	1999/7/3	*	*	40	5.72		4.8E+17	*	*	*	*	*	Ichinose et al. (2006)			
37			2001/6/10	*	*	40	4.69		1.4E+16	*	*	*	*	*	Ichinose et al. (2006)			
38		Mt. Olympus	2003/4/25	*	*	46	4.49		6.8E+15	*	*	*	*	*	Ichinose et al. (2006)			
39	Romania	Vrancea	1977/3/4	45.77	26.76	94	7.4	1.58E+20	*	*	1.40E+20	*	120	65.61	4.5	Oth et al. 2007	$A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。	
40		Vrancea	2002/9/6	45.64	26.43	105	4.1	1.78E+15	*	*	4.84E+18	8.3	*	*	4.5	Oth et al. 2007	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。	
41		Vrancea	2002/11/3	45.74	26.86	90	4.0	1.26E+15	*	*	5.80E+18	10.8	*	*	4.5	Oth et al. 2007	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。	
42		Vrancea	1999/11/8	45.55	26.35	138	4.6	1.00E+16	*	*	6.32E+18	4.0	*	*	4.5	Oth et al. 2007	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。	
43		Vrancea	1999/11/14	45.52	26.27	132	4.6	1.00E+16	*	*	9.48E+18	4.9	*	*	4.5	Oth et al. 2007	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。	
44		Vrancea	2000/4/6	45.75	26.64	143	5.0	3.98E+16	*	*	1.51E+19	3.1	*	*	4.5	Oth et al. 2007	$A = (2\pi f_c)^2 M_0$ よりAを求めた。	
45		Vrancea	1986/8/30	45.52	26.49	132	7.1	5.62E+19	*	*	5.48E+19	0.3	30	161.78	4.5	Oth et al. 2007	$A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。	
46		Vrancea	2004/10/27	45.78	26.73	99	5.8	6.31E+17	*	*	2.17E+19	1.6-1.7	90-120	2.06	4.5	Oth et al. 2007	$A = 4\pi\beta^2 A_{\sigma_0} (S_v/\pi)^{1/2}$ よりAを求めた。	
47	Indo-Burman	Imphal	2016/1/3	*	*	55	6.7	1.41E+19	1.56E+19	*	*	*	*	*	Paramswaran and Rajendran (2016)			

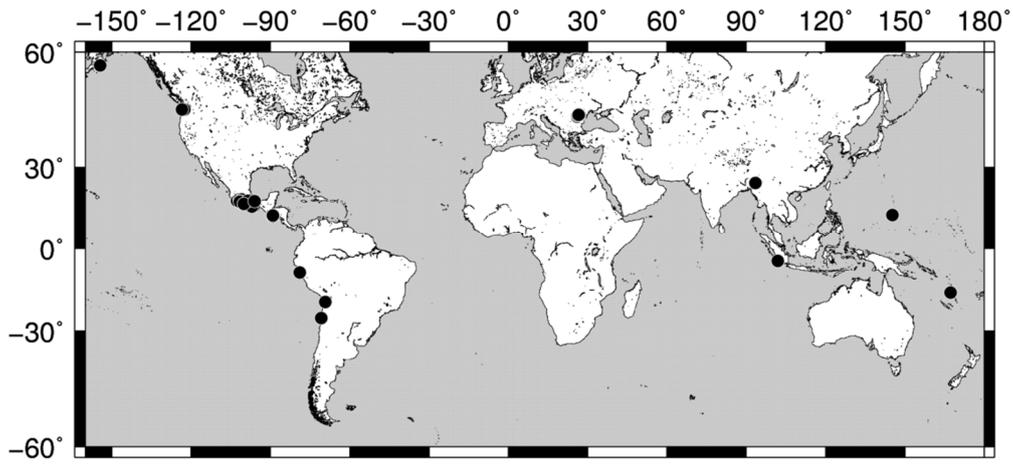


図 3. 3-1 調査した国外のスラブ内地震の震央位置

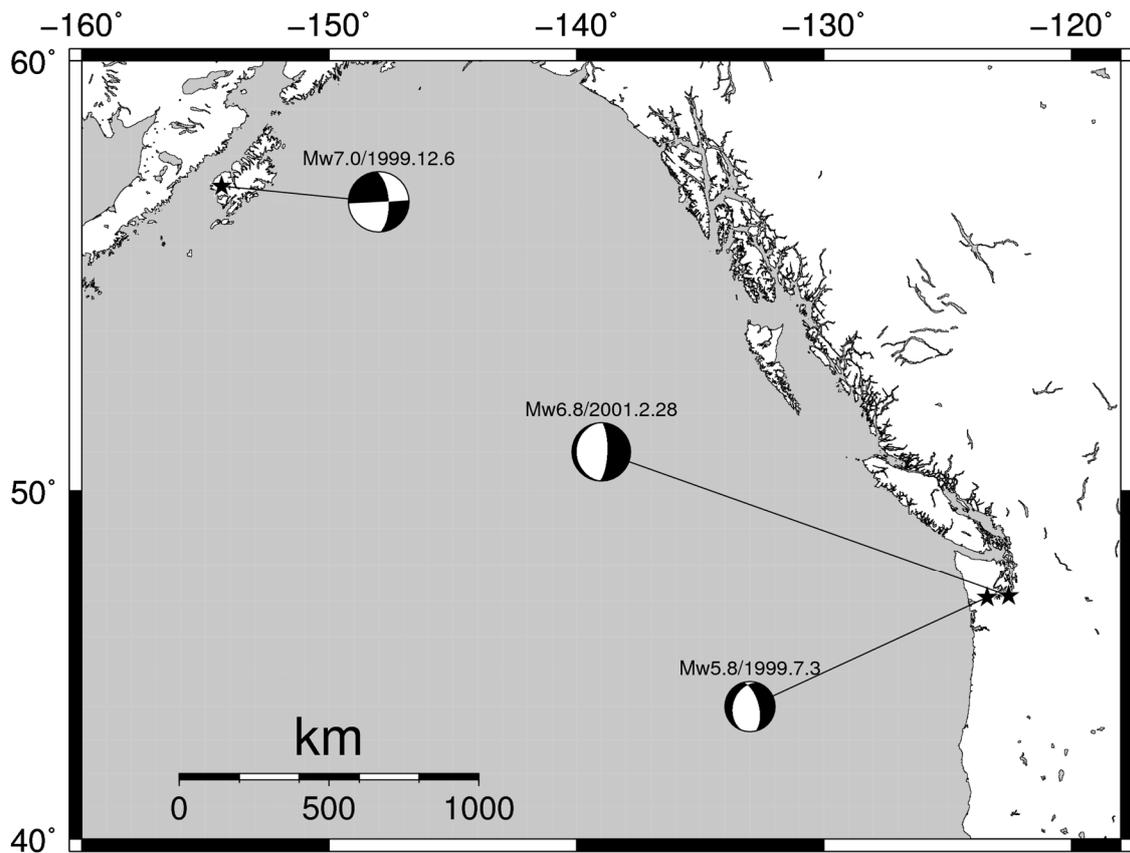


図 3. 3-2 調査した国外のスラブ内地震の震源メカニズム解（その 1: 北米）

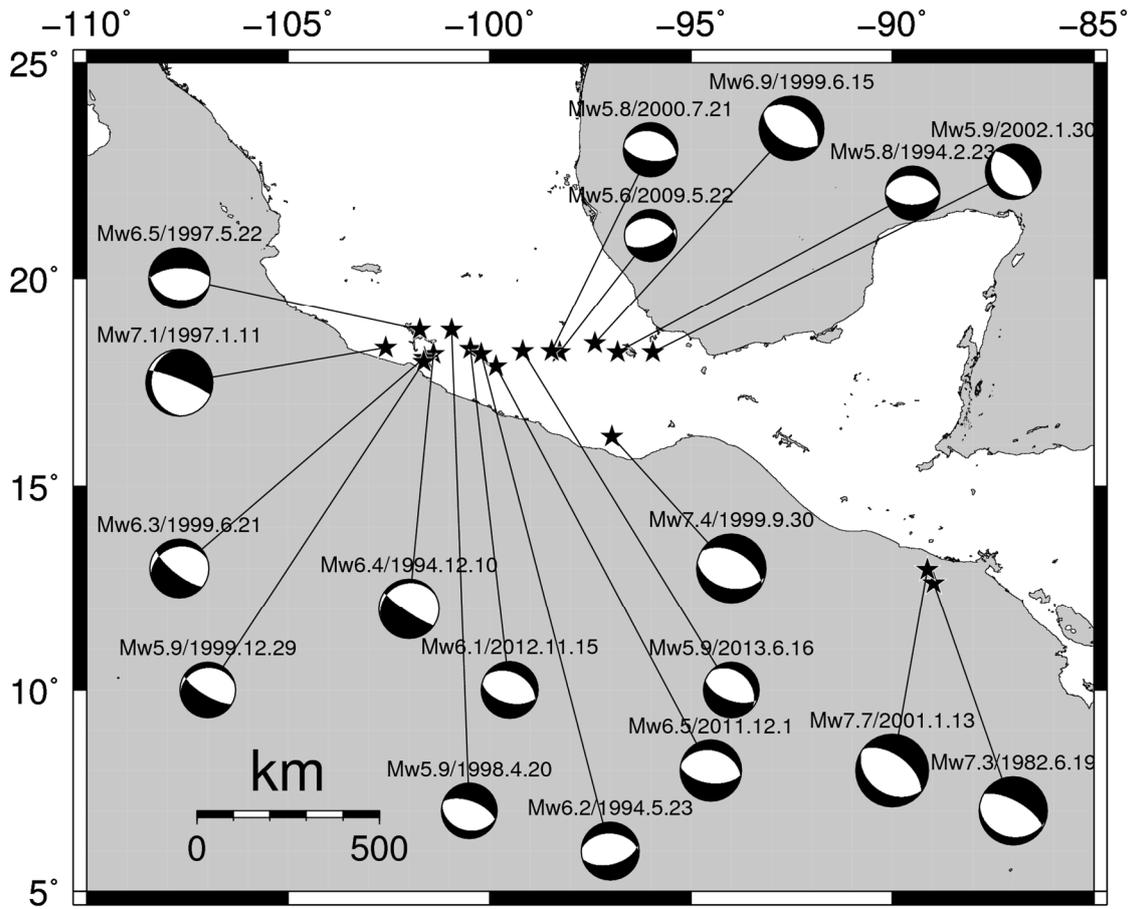


図 3.3-2 調査した国外のスラブ内地震の震源メカニズム解 (その 2: 中米)

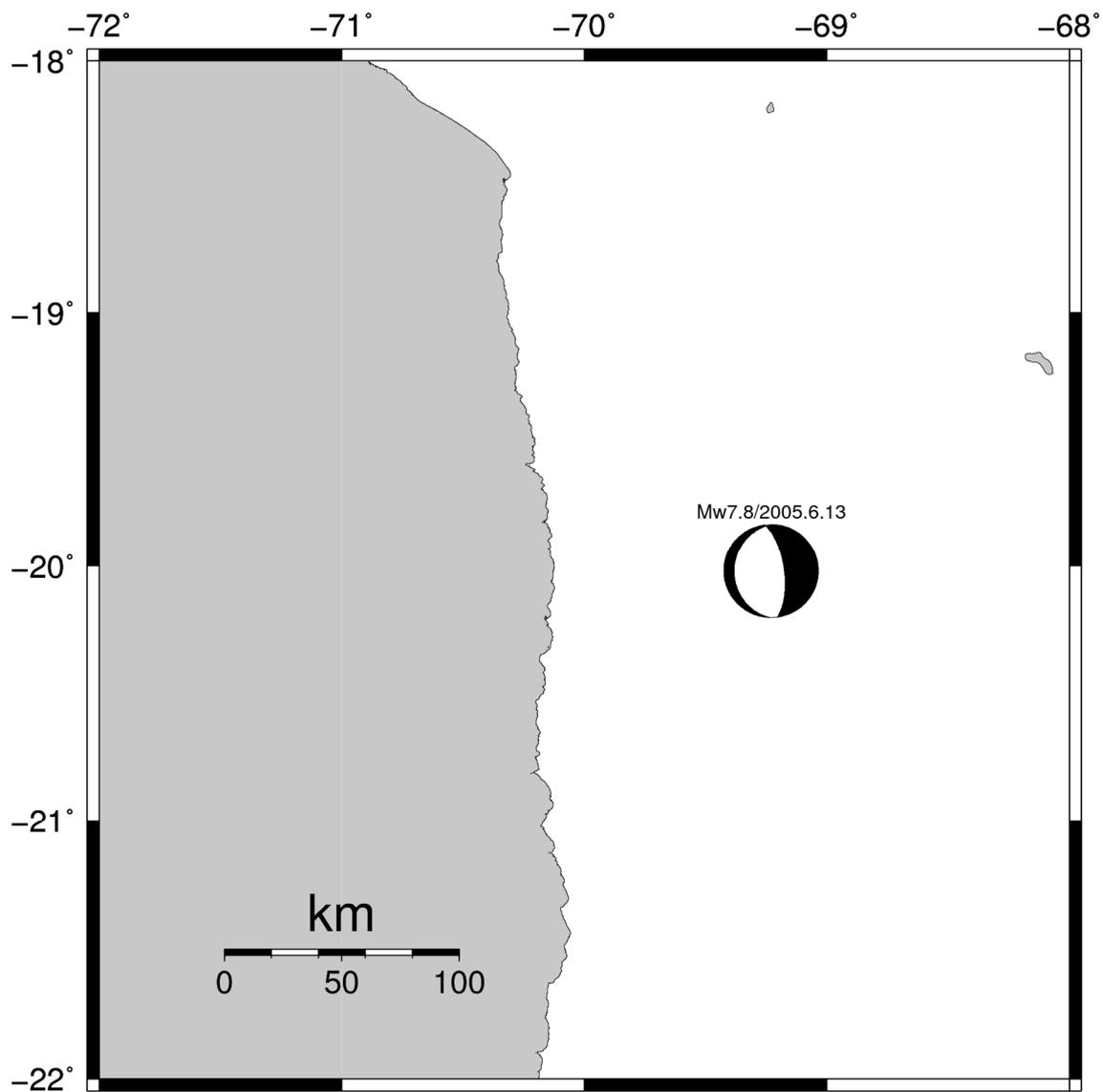


図 3.3-2 調査した国外のスラブ内地震の震源メカニズム解（その 3：南米）

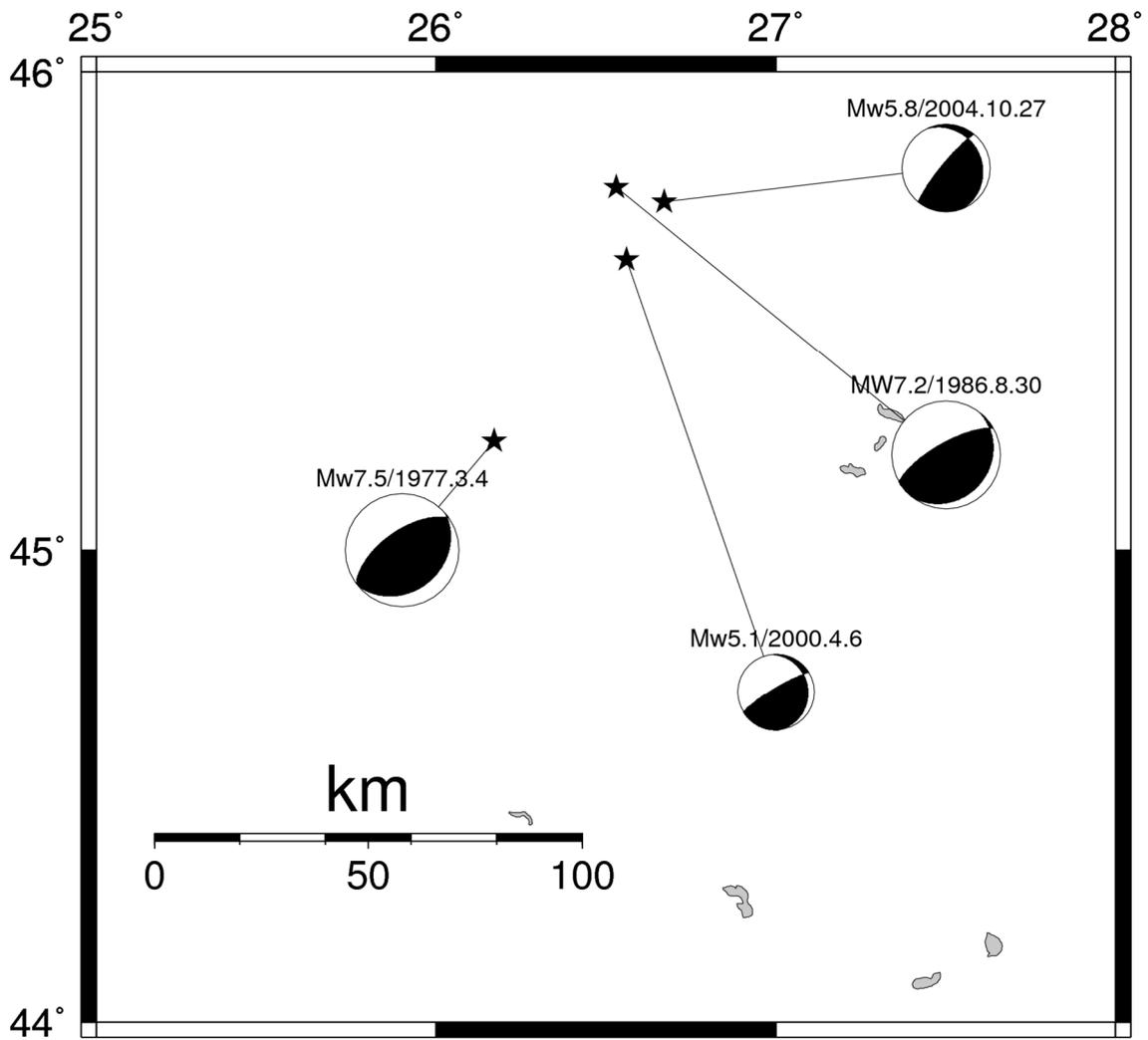


図 3.3-2 調査した国外のスラブ内地震の震源メカニズム解 (その 4: ルーマニア)

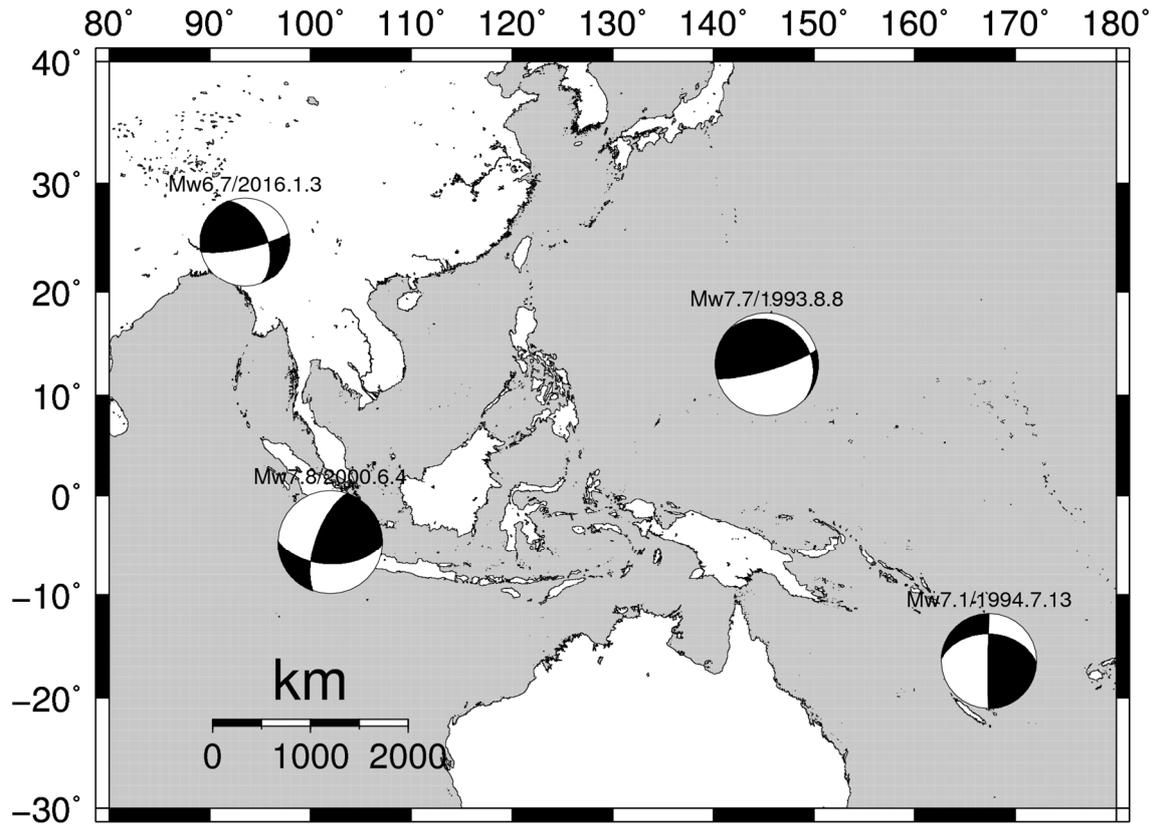


図 3.3-2 調査した国外のスラブ内地震の震源メカニズム解(その 5: アジアとオセアニア)

3.4 国外のスラブ内地震の断層パラメータの分析

図 3.4-1 に表 3.3-1 に示した国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係を示す。図中、赤線は(2.4-1)式で示した笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル $A_{sasatani}$ との経験的關係式で点線部分は外挿である。黒線は、(2.4-2)式で示した壇・他(2001)による内陸地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A_{dan} との経験的關係式である。太線は平均値で、細線はその 2 倍と 1/2、点線部分は外挿である。

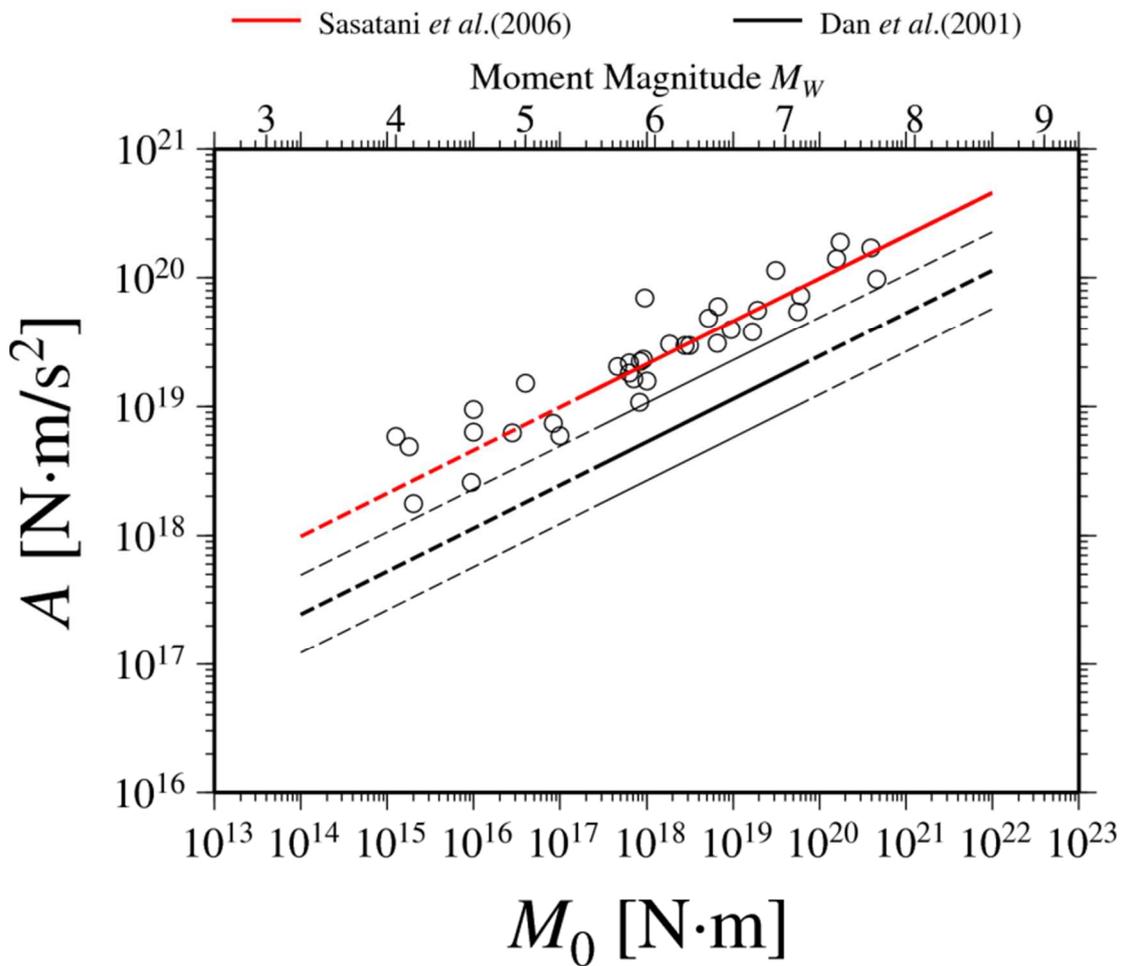


図 3.4-1 国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係 (全体)

図より、国外のスラブ内地震の短周期レベルは、全体的に、笹谷・他(2006)による経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

一方、図 3.4-2 には、図 3.4-1 と同じデータをスラブ別に示したものである。

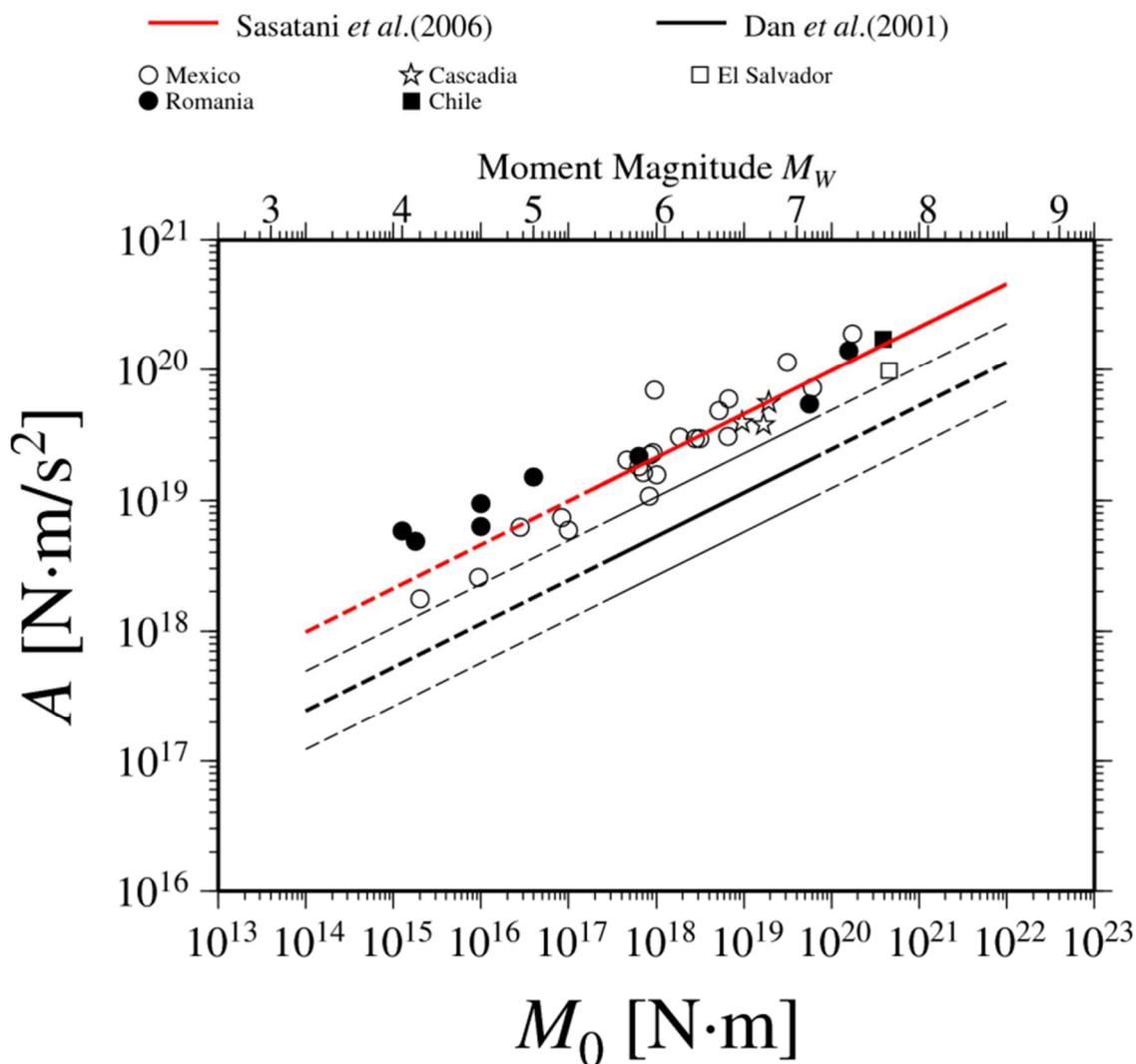


図 3.4-2 国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と短周期レベル A との関係 (スラブ別)

図より、 M_w が 4~5 で、白丸印で示したメキシコのスラブ内地震の短周期レベルが笹谷・他 (2006) による経験的關係式より系統的にやや小さく、黒丸印で示したルーマニアのスラブ内地震の短周期レベルがそれより系統的にやや大きいこと、 M_w が 6~8 ではスラブによらず、いずれのスラブ内地震の短周期レベルも笹谷・他による経験的關係式にほぼのっていることがわかる。

図 3.4-3 に表 3.3-1 に示した国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 S_a との関係を示す。図中、赤線は(2.4-3)式で示した笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $S_{a_{sasatani}}$ との経験的關係式で、黒線は(2.4-4)式で示した Somerville *et al.* (1999)による内陸地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 $S_{a_{somerville}}$ との経験的關係式である。

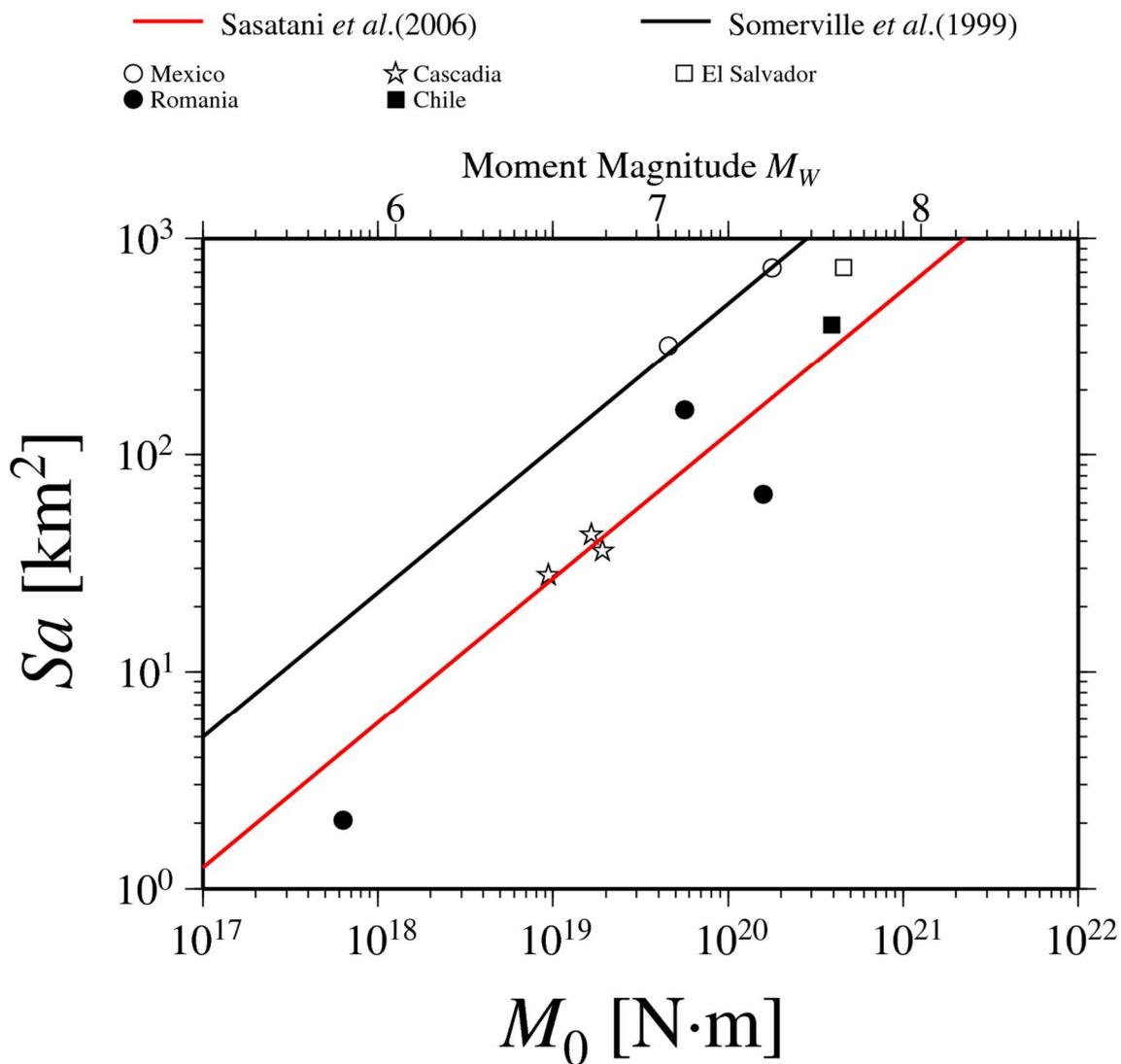


図 3.4-3 国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 とアスペリティの面積 S_a との関係

図より、国外のスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との関係は、笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントとアスペリティの面積との経験的關係式にほぼのっているが、 M_w が 7~8 でばらつきが大きいことがわかる。

図 3.4-4 に国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との関係を示す。ここに、 A は表 3.3-1 に示した各地震の短周期レベルで、 $A_{sasatani}$ は(2.4-1)式で示した笹谷・他(2006)によるスラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの経験的關係式による値である。

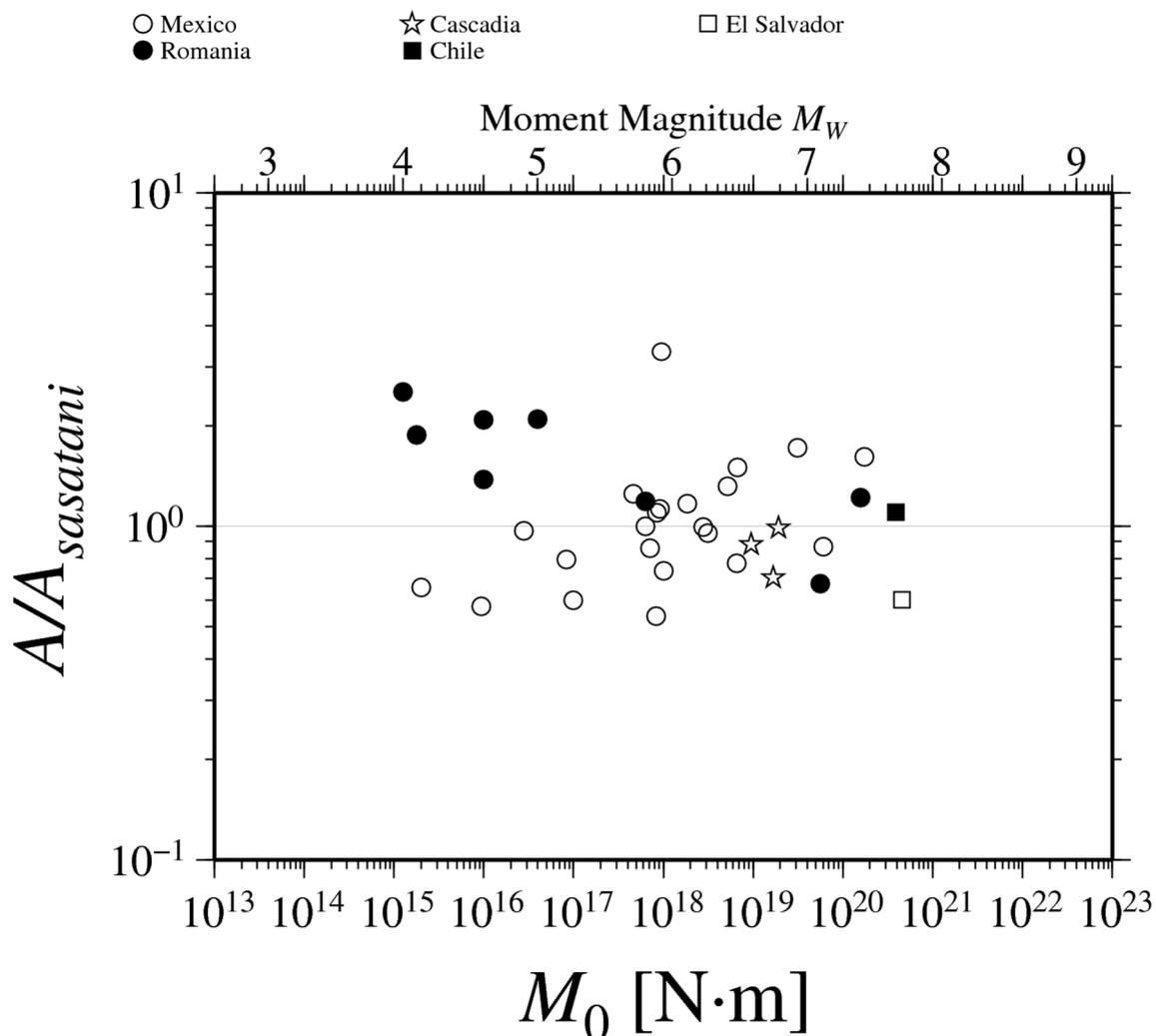


図 3.4-4 国外のスラブ内地震の地震モーメント M_0 と $A/A_{sasatani}$ との関係

図より、図 3.4-1 で述べたように、地震モーメントの大小によらず $A/A_{sasatani}$ はほぼ 1 であることがわかる。また、図 3.4-2 で述べたように、 M_W が 4~5 で、白丸印で示したメキシコのスラブ内地震の短周期レベルが $A/A_{sasatani}=1$ より系統的にやや小さく、黒丸印で示したルーマニアのスラブ内地震の短周期レベルが $A/A_{sasatani}=1$ より系統的にやや大きいこと、 M_W が 6~8 ではスラブによらず、いずれのスラブ内地震の $A/A_{sasatani}$ も 1 前後に分布していることがわかる。

図 3.4-5 に国外のスラブ内地震の震源の深さ D と A/A_{sasatani} との関係を示す。図には、佐藤(2013)による震源深さ D と A/A_{dan} との経験的關係を震源深さ D と A/A_{sasatani} との経験的關係に直した線も示す。

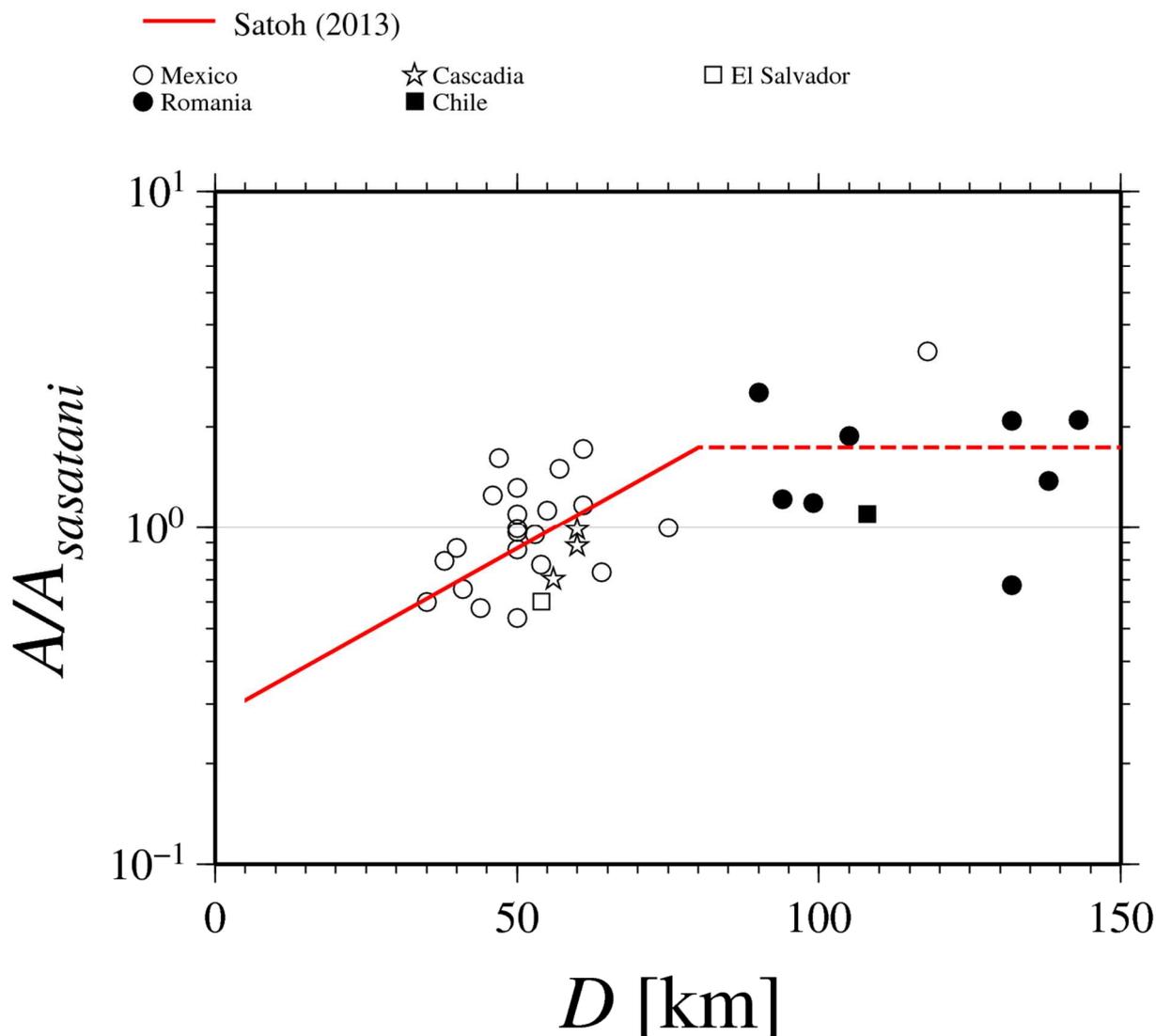


図 3.4-5 国外のスラブ内地震の震源の深さ D と A/A_{sasatani} との関係

図より、深さとともに A/A_{sasatani} が若干大きくなっており、佐藤(2013)による経験的關係とほぼ対応しているが、ばらつきが大きいことがわかる。また、スラブごとに深さがかたまっており、スラブを特定すればスラブ内地震が起こる深さもほぼ特定できることがわかる。

4. 国外の海洋プレート内地震の地震動評価

4.1 国外のスラブ内地震の地震動解析事例の調査

国外のスラブ内地震の地震動解析事例として、Oth *et al.* (2007)およびSingh *et al.* (2014)を調査した。

(1) Oth *et al.* (2007)

Oth *et al.* (2007)は、ルーマニアの Vrancea 地震 (2004 年の M_w 5.8 の地震、1986 年の M_w 7.1 の地震、1977 年の M_w 7.4 の地震) を対象に、入倉 (1986) による経験的グリーン関数法を用いて、震源断層パラメータの推定、および地震動の再現解析を行っている。

対象としたターゲットの地震と要素地震の震央位置を図 4.1-1 と図 4.1-2 に、地震の諸元を表 4.1-1 に示す。ここでは、ターゲットの地震と要素地震の地震記録のスペクトル比より、経験的グリーン関数法による波形合成時に用いる重ね合わせ数 N と要素地震の応力降下量の比 C を推定した後 (表 4.1-2)、破壊伝播速度、断層面の大きさ、ライズタイム、破壊開始点などをパラメータとした感度解析を行っている (表 4.1-3～表 4.1-5)。

感度解析のケースの中で、誤差が最小となった波形合成結果を図 4.1-3～図 4.1-5 に示す。また、感度解析に基づいて推定した、ターゲットの地震の SMGA モデルの震源パラメータを表 4.1-6 に、断層モデルを図 4.1-6 に示す。

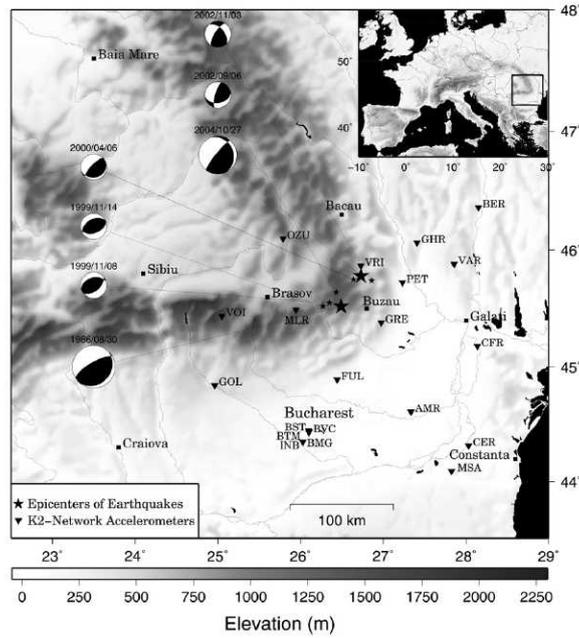


Fig. 1. Topographic map of the Carpathian area. The Vrancea seismic zone is located where the Carpathian arc is bending from NW-SE toward W. The epicenters of the earthquakes utilized in this study are depicted by stars (large stars: October 27th 2004 and August 30th 1986 TARGET-A respectively B events) and the corresponding focal mechanisms are shown. The focal mechanisms of the EGF-events are lined up in columns with respect to their associated main shock. The information for the March 4th 1977 event is depicted in Fig. 10. The K2-accelerometers which provided data from at least one EGF- and the corresponding TARGET-event are marked by inverse triangles and their three letter station code.

図 4.1-1 Oth *et al.* (2007) による対象地震の震央位置および加速度記録の観測点

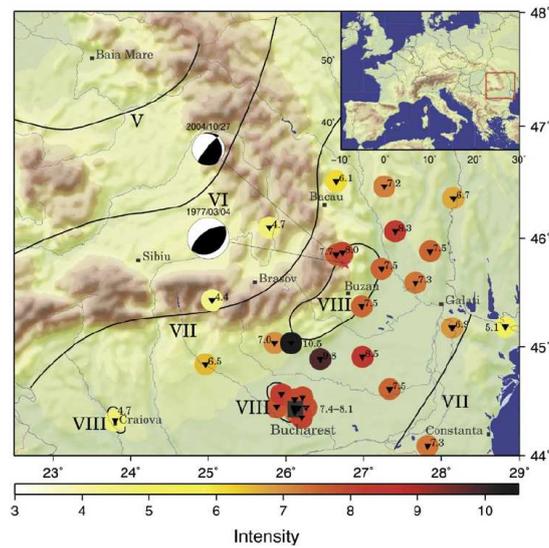


Fig. 10. Comparison of simulated and observed intensities for the March 4th 1977 earthquake. The black lines indicate the observed isoseismals, whereas the colored dots show the simulated intensity values at each station for the lowest misfit model. The simulated intensities are additionally displayed close to each dot. The locations (stars) and focal mechanisms of TARGET-C and EGF-C200410 are included in the map.

図 4.1-2 Oth *et al.* (2007) による 1977 年の M_w 7.4 の地震と
2004 年の要素地震の震央位置および震度の観測点

表 4.1-1 Oth *et al.* (2007) による対象地震の諸元

Table 1

Hypocentral coordinates, moment magnitudes and origin times of the events used in this study

Event ID	Date	Origin time	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	M_w
EGF-A200209	2002/09/06	05:04:02	45.64	26.43	105	4.1
EGF-A200211	2002/11/03	20:30:23	45.74	26.86	90	4.0
EGF-B19991108	1999/11/08	19:22:52	45.55	26.35	138	4.6
EGF-B19991114	1999/11/14	09:05:59	45.52	26.27	132	4.6
EGF-B200004	2000/04/06	00:10:39	45.75	26.64	143	5.0
EGF-C200410	2004/10/27	20:34:36	45.78	26.73	99	5.8
TARGET-A	2004/10/27	20:34:36	45.78	26.73	99	5.8
TARGET-B	1986/08/30	21:28:37	45.52	26.49	132	7.1
TARGET-C	1977/03/04	19:21:54	45.77	26.76	94	7.4

The smaller earthquakes used to generate the synthetics are characterized by the identification code EGF whereas the respective main shock is referenced to as TARGET. The information shown in this table was gathered from the ROMPLUS-catalogue (Onicescu *et al.*, 1999a).

表 4.1-2 Oth *et al.* (2007) において算定された経験的グリーン関数法に用いる数値

Table 2

Parameters M_0/m_0 , $f_{C,T}$, $f_{C,E}$, N and C obtained from the spectral ratio analysis

Event ID	$\frac{M_0}{m_0}$	$f_{C,T}$ (Hz)	$f_{C,E}$ (Hz)	N	C	Number of stations
TARGET-A/EGF-A200209	211	1.7	8.3	5	1.7	12
TARGET-A/EGF-A200211	651	1.6	10.8	7	1.9	10
TARGET-B/EGF- B19991108	8144	0.3	4.0	16	2.0	5
TARGET-B/EGF- B19991114	7134	0.3	4.9	17	1.5	5
TARGET-B/EGF-B200004	914	0.3	3.1	11	0.7	4

表 4.1-3 Oth *et al.* (2007) により得られた最小誤差のケース (M_w 5.8 の地震)

Table 3

Lowest misfit models for 5 consecutive runs of the genetic algorithm for TARGET-A ($M_w=5.8$), inverted using both EGF-A-events

	Run	L (km)	W (km)	τ_R (s)	Position along strike	Position along dip	Misfit
$v_R=0.7 \cdot v_S$	1	0.73	1.08	0.06	0.3	0.5	54.24
	2	0.73	1.08	0.06	0.3	0.4	54.24
	3	0.67	0.73	0.19	0.3	0.6	54.87
	4	0.62	1.08	0.07	0.3	0.4	54.33
	5	0.82	1.36	0.12	0.3	0.6	54.99
$v_R=0.8 \cdot v_S$	1	0.81	1.23	0.15	0.3	0.6	54.14
	2	0.96	1.27	0.13	0.3	0.6	54.09
	3	0.95	1.29	0.13	0.3	0.6	54.09
	4	0.96	1.27	0.14	0.3	0.6	54.13
	5	0.95	1.35	0.14	0.3	0.7	54.20
$v_R=0.9 \cdot v_S$	1	0.95	1.43	0.15	0.3	0.7	53.72
	2	1.16	1.78	0.11	0.3	0.7	53.62
	3	1.16	1.78	0.11	0.3	0.7	53.62
	4	1.04	1.39	0.13	0.3	0.6	53.75
	5	0.96	1.33	0.15	0.3	0.7	53.68

The algorithm was run for 3 different ratios of rupture velocity to shear wave velocity ($v_R=0.7 \cdot v_S$, $v_R=0.8 \cdot v_S$, $v_R=0.9 \cdot v_S$). The position of rupture initiation along strike and dip is given as a normalized value between 0 and 1.

表 4.1-4 Oth *et al.* (2007) により得られた最小誤差のケース (M_w 7.1 の地震)

Table 4
Lowest misfit models for 5 consecutive runs of the genetic algorithm for TARGET-B ($M_w=7.1$), inverted using all three EGF-B-events

	Run	L (km)	W (km)	τ_R (s)	Position along strike	Position along dip	Misfit
$v_R=0.7 \cdot v_S$	1	10.12	13.10	0.36	0.2	1.0	30.06
	2	12.98	12.62	0.26	0.4	1.0	28.75
	3	12.84	12.60	0.26	0.4	1.0	28.74
	4	10.54	13.13	0.26	0.2	1.0	29.07
	5	10.75	13.26	0.26	0.2	1.0	28.96
$v_R=0.8 \cdot v_S$	1	14.31	18.14	0.36	0.3	1.0	29.16
	2	14.87	18.88	0.28	0.3	1.0	28.77
	3	14.69	20.96	0.31	0.3	1.0	29.14
	4	14.34	18.45	0.36	0.3	1.0	29.00
	5	15.02	18.86	0.28	0.3	1.0	28.92
$v_R=0.9 \cdot v_S$	1	6.15	33.74	0.41	0.4	0.7	32.33
	2	5.86	3.98	0.27	0.4	0.2	30.42
	3	6.58	3.70	0.25	0.4	0.1	30.14
	4	5.87	27.43	0.43	0.4	0.9	32.20
	5	5.24	34.61	0.42	0.4	0.7	31.77

The algorithm was run for 3 different ratios of rupture velocity to shear wave velocity ($v_R=0.7 \cdot v_S$, $v_R=0.8 \cdot v_S$, $v_R=0.9 \cdot v_S$). The position of rupture initiation along strike and dip is given as a normalized value between 0 and 1.

表 4.1-5 Oth *et al.* (2007) により得られた最小誤差のケース (M_w 7.4 の地震)

Table 5
Lowest misfit models for 5 consecutive runs of the genetic algorithm for TARGET-C ($M_w=7.4$), inverted using EGF-C200410

Square SMGA	Run	L (km)	W (km)	τ_R (s)	Position along strike	Position along dip	Misfit
$v_R=0.9 \cdot v_S$	1	8.07	8.07	0.97	1 (6)	4 (6)	25.45
	2	8.10	8.10	0.97	1 (6)	4 (6)	25.45
	3	8.13	8.13	0.96	1 (6)	4 (6)	25.45
	4	8.12	8.12	0.96	1 (6)	4 (6)	25.45
	5	8.11	8.11	0.96	1 (6)	4 (6)	25.45
Aspect ratio 1:1.5	Run	L (km)	W (km)	τ_R (s)	Position along strike	Position along dip	Misfit
$v_R=0.9 \cdot v_S$	1	7.88	12.05	0.74	1 (6)	3 (6)	26.35
	2	7.89	12.07	0.74	1 (6)	3 (6)	26.35
	3	7.79	11.91	0.73	1 (6)	3 (6)	26.40
	4	7.60	11.63	0.73	1 (6)	3 (6)	26.35
	5	7.60	11.63	0.73	1 (6)	3 (6)	26.35

The algorithm was run for a 90% ratio of rupture velocity to shear wave velocity ($v_R=0.9 \cdot v_S$). The SMGA was once supposed to be square, once to have an aspect ratio 1:1.5 ($L:W$). The position of the rupture initiation subfault is not expressed as a normalized value in the interval [0,1], but absolutely (the number in parentheses is the scaling factor $N=6$).

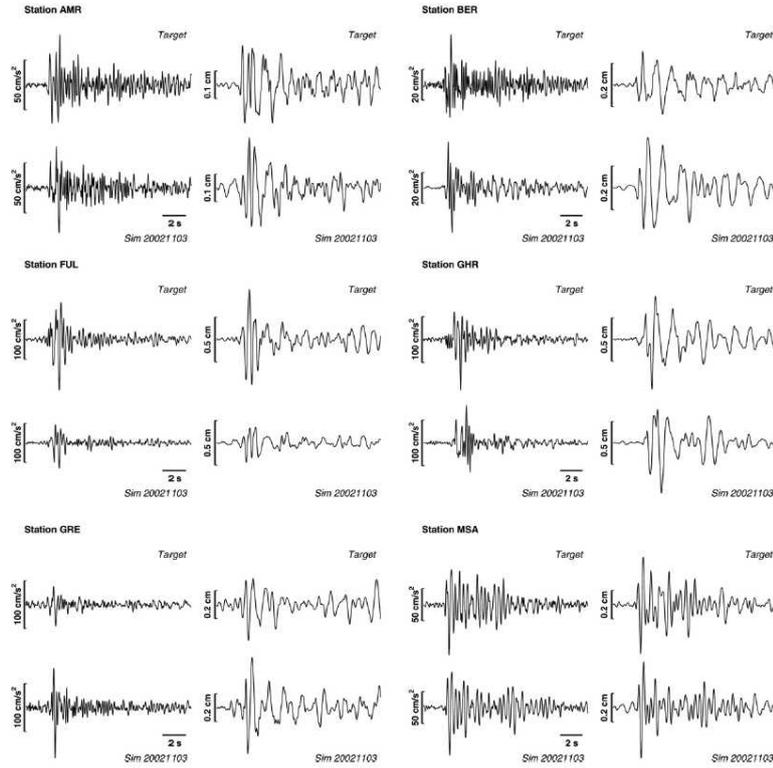


Fig. 8. Example of the outcome for the TARGET-A inversion (several simulated traces using EGF-A200211 shown here) at six locations. For each station, the observed (top) and simulated (bottom) acceleration (left) and displacement (right) 15 s SH-waveforms for the lowest misfit model are displayed. Each set of corresponding observed and simulated traces is scaled to the same maximum value.

図 4.1-3 Oth *et al.* (2007) による観測記録と波形合成結果の比較 (M_w 5.8 の地震)

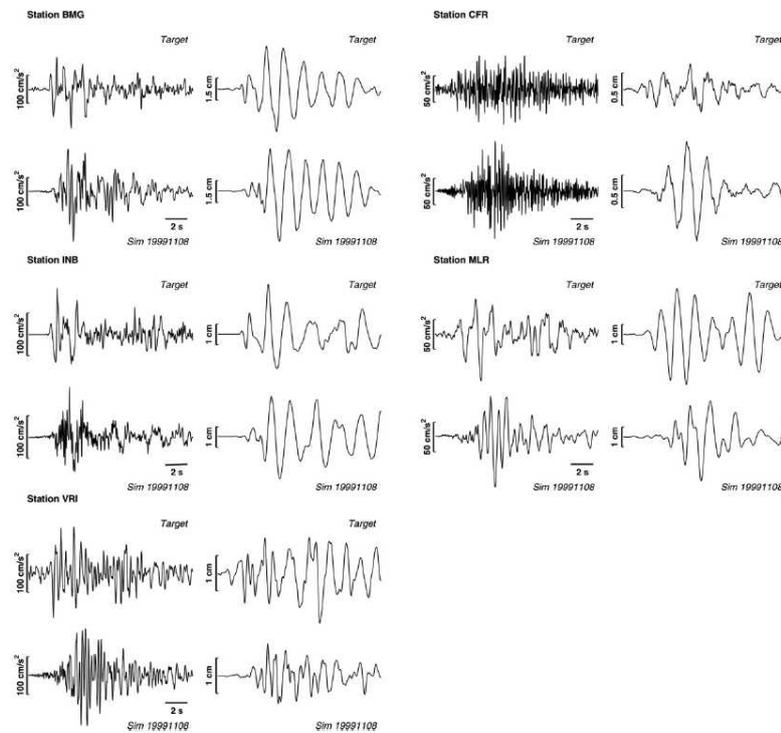


Fig. 9. Example of the outcome for the TARGET-B inversion (simulated traces using EGF-B19991108 shown here) at five locations (same plot as Fig. 8).

図 4.1-4 Oth *et al.* (2007) による観測記録と波形合成結果の比較 (M_w 7.1 の地震)

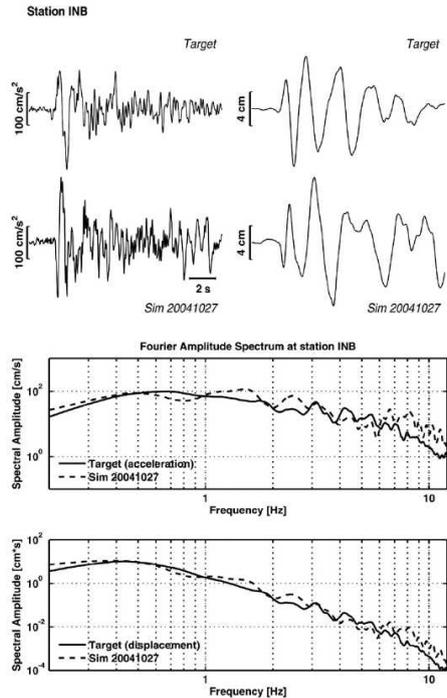


Fig. 11. Upper part: comparison of acceleration (left) and displacement (right) observed and simulated SH-waveforms at station INB (which are almost identical to the EW-component) of the March 1977 (TARGET-C) earthquake. Lower part: comparison of Fourier amplitude spectra.

図 4.1-5 Oth *et al.* (2007) による観測記録と波形合成結果の比較 (M_w 7.4 の地震)

表 4.1-6 Oth *et al.* (2007) による対象地震の SMGA モデルの震源パラメータ

Table 7

Approximate static stress drop, particle velocity and slip estimates for the lowest misfit SMGA models

Event ID	$\Delta\sigma_{\text{SMGA}}$ (bar)	$\langle \dot{U} \rangle$ (m/s)	\bar{D} (m)
TARGET-A (October 2004)	900–1200	3.5–4.5	0.8–1.0
TARGET-B (August 1986)	300	4.0	2.2
TARGET-C (March 1977)	900	3.5	5.0
	1200	3.0	5.5

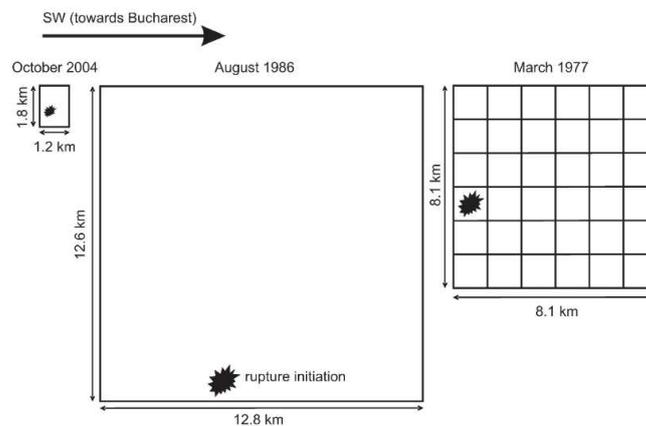


Fig. 12. Sketches of the SMGA lowest misfit models for the three moderate to large Vrancea earthquakes considered in this study. The relative dimensions are scaled correctly. The (approximate) rupture initiation locations are depicted by a star. The March 1977 (square) SMGA is shown with its subevents (as the inversion was performed using one EGF only). Note the very similar size of the SMGA of the October 2004 and the subevent of the March 1977 earthquakes.

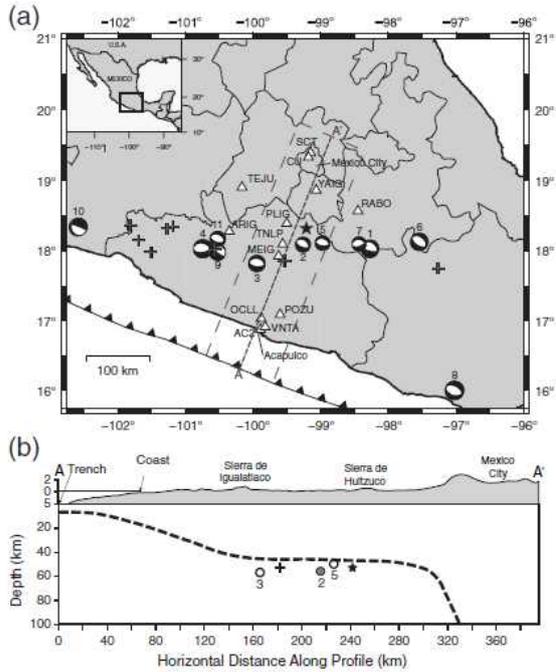
図 4.1-6 Oth *et al.* (2007) による 3 つの対象地震の SMGA モデル

(2) Singh *et al.* (2014)

Singh *et al.* (2014)は、ココスプレートで発生した、2013年6月16日の地震(M_w 5.9)を含めた、複数の地震の強震記録を用いて、変位震源スペクトルおよび加速度震源スペクトルを求め、地震モーメント、コーナー振動数、および平均応力降下量などの断層パラメータを推定している。

対象とした地震の震源分布および観測点の分布図を図 4.1-7 に示す。対象とした地震のうち、2013年6月16日の地震の諸元を表 4.1-7 に、1964年-2013年の間に CU (University City) 地点でもっとも大きい振幅が観測された 10 地震の諸元を表 4.1-8 に示す。また、地震記録より得られた変位震源スペクトルおよび加速度震源スペクトルを図 4.1-8 に示す。

この論文では、2013年6月16日の地震の観測記録と距離減衰式との比較も行っており (図 4.1-9)、CU 観測点以外の記録は、メキシコのスラブ内の地震データに基づいて提案している Garcia *et al.* (2005)による距離減衰式と良く対応していると述べている。なお、CU 観測点では、地盤およびディレクティビティ効果の影響で、最大加速度および最大速度が大きくなっていると述べている。



▲ Figure 1. (a) A tectonic map of Mexico. Focal mechanisms of the intraslab earthquakes listed in Table 2 are shown at their epicenters. The numbers are keyed to event numbers in the table. Event 2, the earthquake of 16 June 2013 (M_w 5.9), and event 11, the earthquake of 15 November 2012 (M_w 6.1), are not listed in Table 2. The plus symbols indicate the locations of the additional intraslab earthquakes that are analyzed in the study. The star indicates the earthquake of 27 October 1991 (M_w 4.6), which is the closest known intraslab earthquake to Mexico City. Triangles with names indicate the stations from which P -wave (S -wave at MEIG) seismograms of the 2013 earthquake were used to determine source directivity. (b) The cross section along A-A, located in (a). As the geometry of the Benioff zone changes along the subduction zone, only events that fall between the two parallel dashed lines in (a) are projected onto the section. The dashed line on the section corresponds with the top of the subducted slab mapped from seismicity (Pacheco and Singh, 2010) and receiver functions and tomography (Pérez-Campos *et al.*, 2008).

図 4.1-7 Singh *et al.* (2014) による対象地震の震源位置および観測点の分布図

表 4.1-7 Singh *et al.* (2014) で対象とした 2013 年 6 月 16 日の地震の諸元

Origin Time (hh:mm:ss.s)	Latitude (° N)	Longitude (° W)	H (km)	M_0 ($N \cdot m$)	M_w	Strike (φ)	Dip (δ)	Rake (λ)	Source
05:19:04.9	18.230	99.130	52	8.0×10^{17}	5.9	313°	35°	-70°	Global CMT
05:18:59.9	18.149	99.204	52	6.6×10^{17}	5.8	296°	23°	-80°	NEIC, USGS
05:19:03.0	18.083	99.251	56	9.3×10^{17}	5.9	328°	31°	-48	SSN*
05:19:02.0	18.100	99.270	50	8.7×10^{17}	5.9	310°	37°	-70°	UNAM, W -phase solution
05:19:02.4	18.108	99.230	55	9.1×10^{17}	5.9	-	-	-	This study [†]

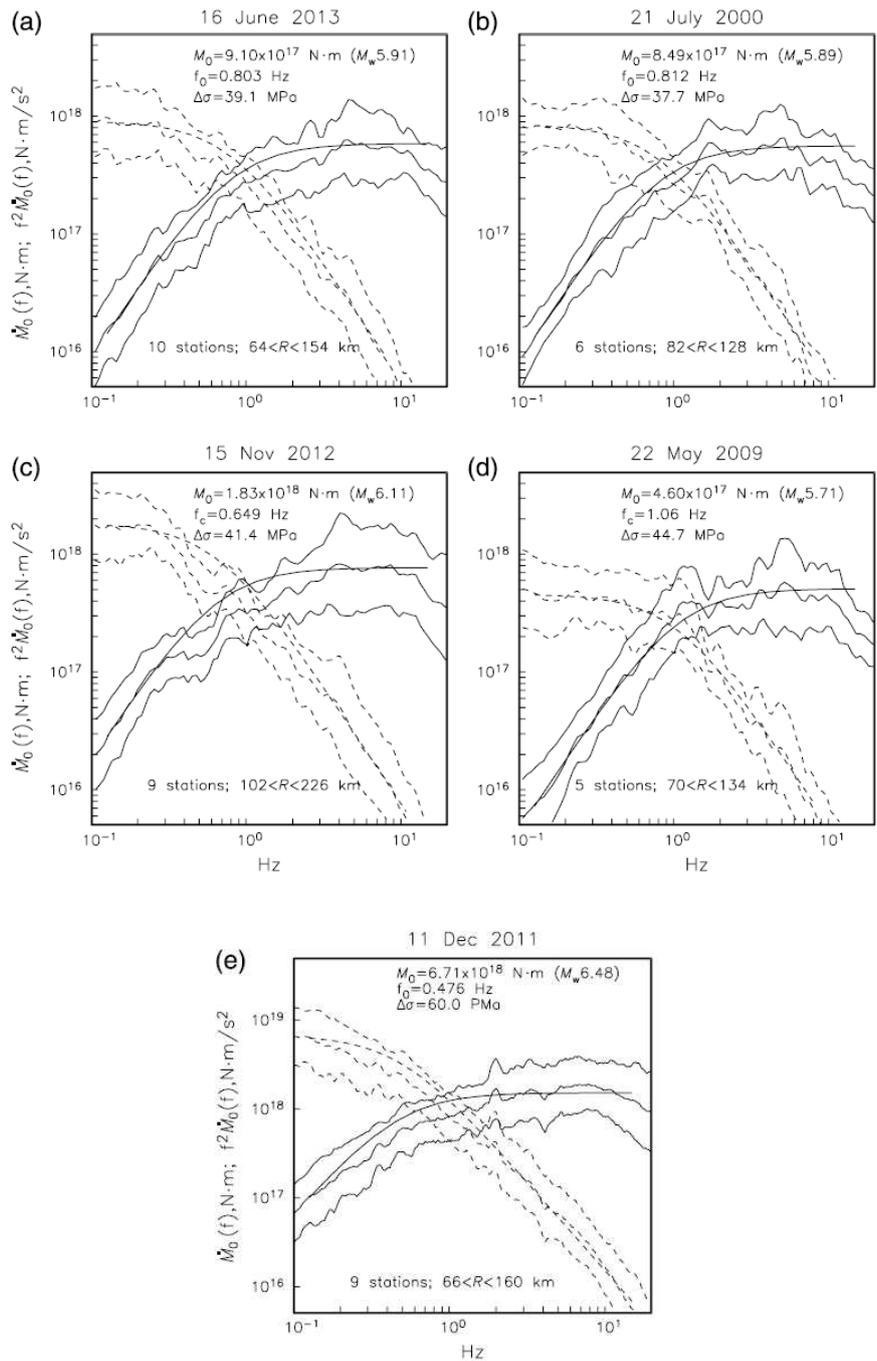
*SSN, Servicio Sismológico Nacional. Location from local and regional P - and S -phase data, and M_0 and focal mechanism from regional moment tensor inversion.
[†]Location from local and regional phase data using broadband and strong-motion recordings and M_0 from S -wave spectra of local recordings.

表 4.1-8 Singh *et al.* (2014) で対象とした、

1964 年-2013 年の間に CU (University City) 地点で観測された 10 地震の諸元

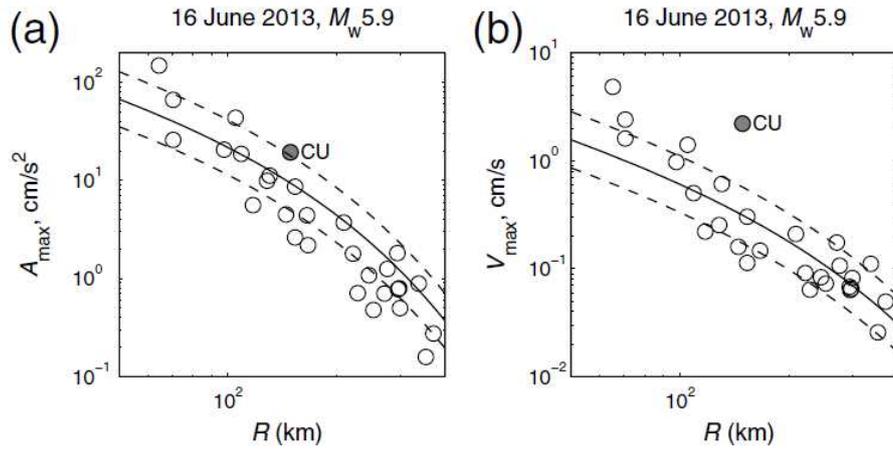
Event Number	Date (yyyy/mm/dd)	Latitude (°)	Longitude (°)	H (km)	m_b	M_w	R (km)	A_{max} (gal) [†]	V_{max} (cm/s) [†]
1	1980/10/24	18.03	-98.27	65	6.3	7.0	184	24.4	3.24
2	2013/06/16	18.09	-99.26	56	5.9	5.9	148	19.5	2.21
3	2011/12/11	17.82	-99.94	57	6.2	6.5	194	19.2	1.40
4	1964/07/06	18.03	-100.74	55	6.5	7.3	221	17.1	1.82
5	2000/07/21	18.11	-98.97	50	5.4	5.8	145	12.8	0.82
6	1999/06/15	18.13	-97.54	60	6.4	6.9	225	11.6	1.84
7	2009/05/22	18.10	-98.43	46	5.8	5.6	160	8.6	0.66
8	1999/09/30	16.00	-97.02	47	6.5	7.4	433	7.8	2.32
9	1994/12/10	17.98	-100.52	50	6.5	6.4	212	5.8	0.91
10	1997/01/11	18.34	-102.58	40	6.5	7.1	378	5.1	1.99

*The intraslab earthquake of 28 August 1973 (M_w 7.0, $R = 311$ km) is not listed because it was not recorded at CU, probably due to instrumental malfunction. The estimated A_{max} is 9.3 gal (Singh *et al.*, 2013). Local earthquakes are excluded.
[†] $A_{max} = [(A_n^2 + A_s^2)/2]^{1/2}$; $V_{max} = [(V_n^2 + V_s^2)/2]^{1/2}$



▲ Figure 2. Average source displacement $\dot{M}_0(f)$ and acceleration $f^2 \dot{M}_0(f)$ spectra (mean and ± 1 standard deviation curves) of five intraslab earthquakes located within 200 km from CU, Mexico City. Superimposed are curves from the ω^2 source model, which fit the spectra (smooth curves). (a) 16 June 2013, M_w 5.9; (b) 21 July 2000, M_w 5.9; (c) 15 November 2012, M_w 6.1; (d) 22 May 2009, M_w 5.7; and (e) 11 December 2011, M_w 6.5. With the exception of the 2011 earthquake, the stress drop of other events is about the same.

図 4.1-8 Singh *et al.* (2014) による対象地震の変位震源スペクトルと
 加速度震源スペクトル



▲ **Figure 4.** (a) A_{\max} versus R plot for 15 June 2013 earthquake. (b) V_{\max} versus R plot. Observed values at CU are marked. Predicted mean \pm one standard deviation curves from the GMPEs of [García *et al.* \(2005\)](#) are shown by curves.

図 4.1-9 Singh *et al.* (2014) による対象地震の観測記録と距離減衰式との比較

4.2 国外のスラブ内地震による地震観測記録の収集および波形処理

国外のスラブ内地震による地震観測記録としては、4.1 節で整理したように、Oth *et al.* (2007)に記載されているルーマニアの地震観測記録と、Singh *et al.* (2014)に記載されているメキシコの地震観測記録があった。

本業務では、Oth 氏に連絡をとり、ルーマニアのスラブ内地震の地震観測記録を入手した。

図 4.2-1 に Oth *et al.* (2007) が研究の対象とした地震の震央位置および観測点の分布を示す。図中、赤星印は、経験的グリーン関数法でターゲットとされた 1986 年の地震 (Target-B 地震)、青星印は経験的グリーン関数として用いられた要素地震 (EGF-B 地震)、緑三角印は観測点 (CFR, MLR, VRI) である。表 4.2-1 に地震動解析用の観測点の緯度と経度を示す。

図 4.2-2 に本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録 (基線補正前) を示す。図 4.2-2 (a) は、1986 年 8 月 30 日に発生した Target-B 地震 (M_w 7.1) の観測記録である。また、図 4.2-2 (b) は、Target-B 地震の観測記録を経験的グリーン関数法で再現するために用いられた 1999 年 11 月 8 日に発生した EGF-B 地震 (M_w 4.6) の観測記録である。図より、基線がずれていることがわかる。

図 4.2-3 には、基線補正後の加速度記録を示す。また、図 4.2-4 には、基線補正後の加速度記録のフーリエスペクトルを示す。図より、低振動数領域と高振動数領域で ω^{-2} モデル (例えば、Brune, 1970) に比べ顕著に大きくなっている記録があり、ノイズが含まれていることがわかる。

本章では、このノイズを除外するために、Oth *et al.* (2007) と同じく、0.4Hz~12Hz のバンドパスフィルターを用いることとした。図 4.2-5 にバンドパスフィルターを、図 4.2-6 にバンドパスフィルター後の加速度記録のフーリエスペクトルを示す。また、図 4.2-7 にバンドパスフィルター後の加速度記録を示す。

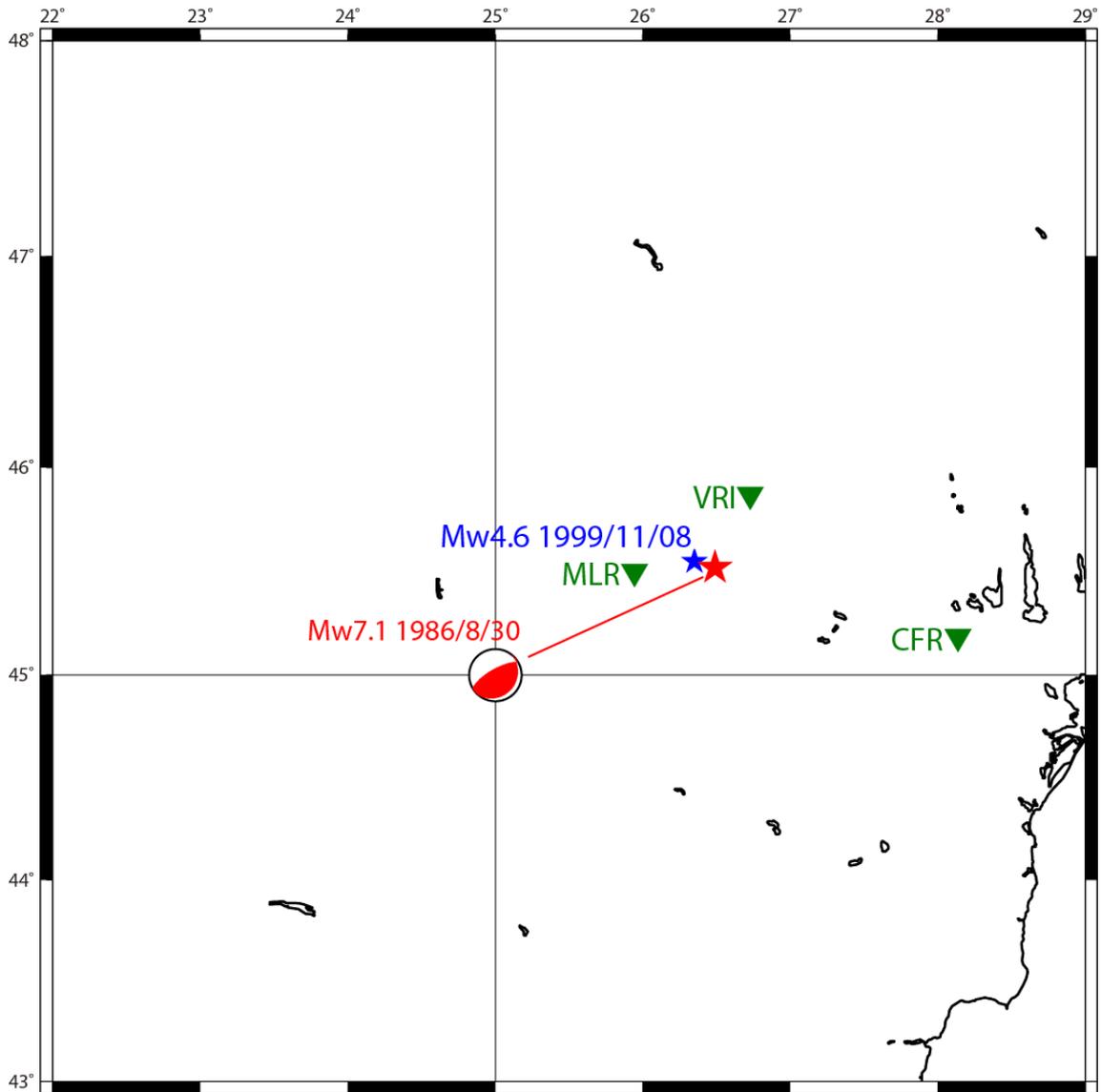
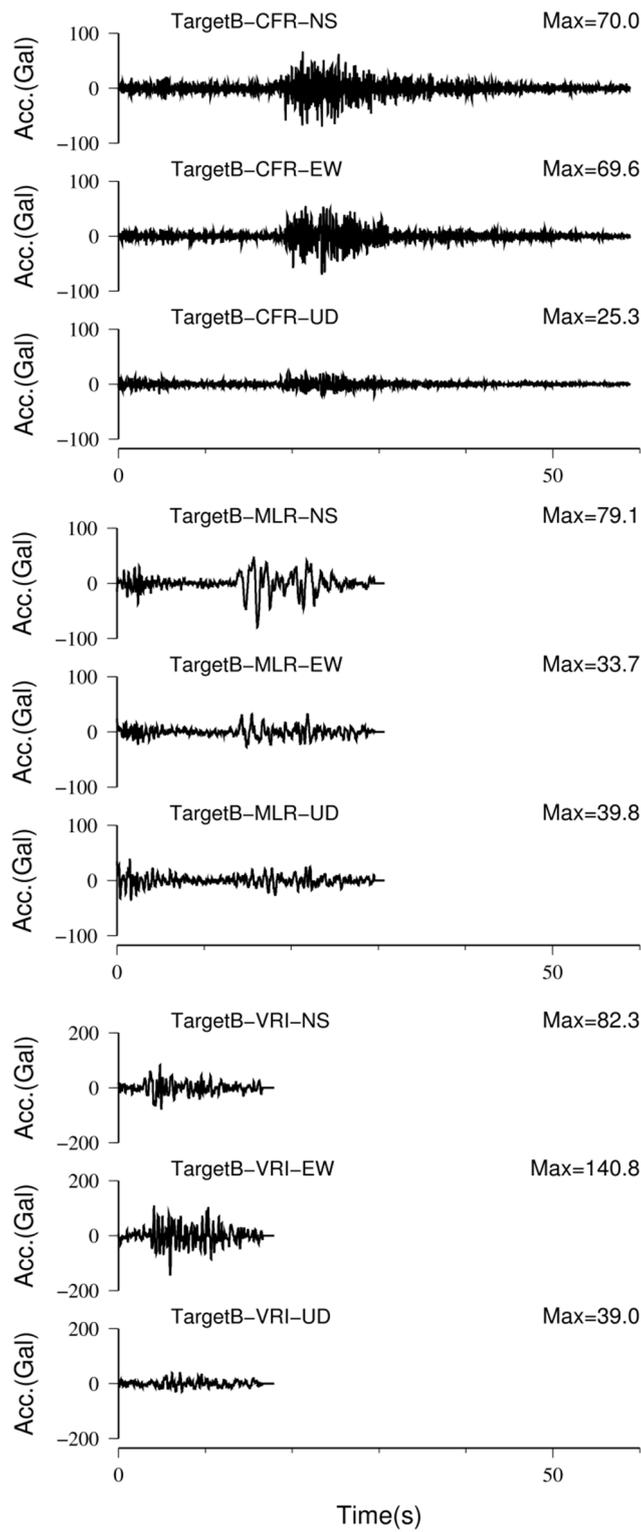


図 4.2-1 対象とした地震の震央位置および観測点の分布図

(★印：ターゲットの地震、★印：要素地震、▼印：観測点)

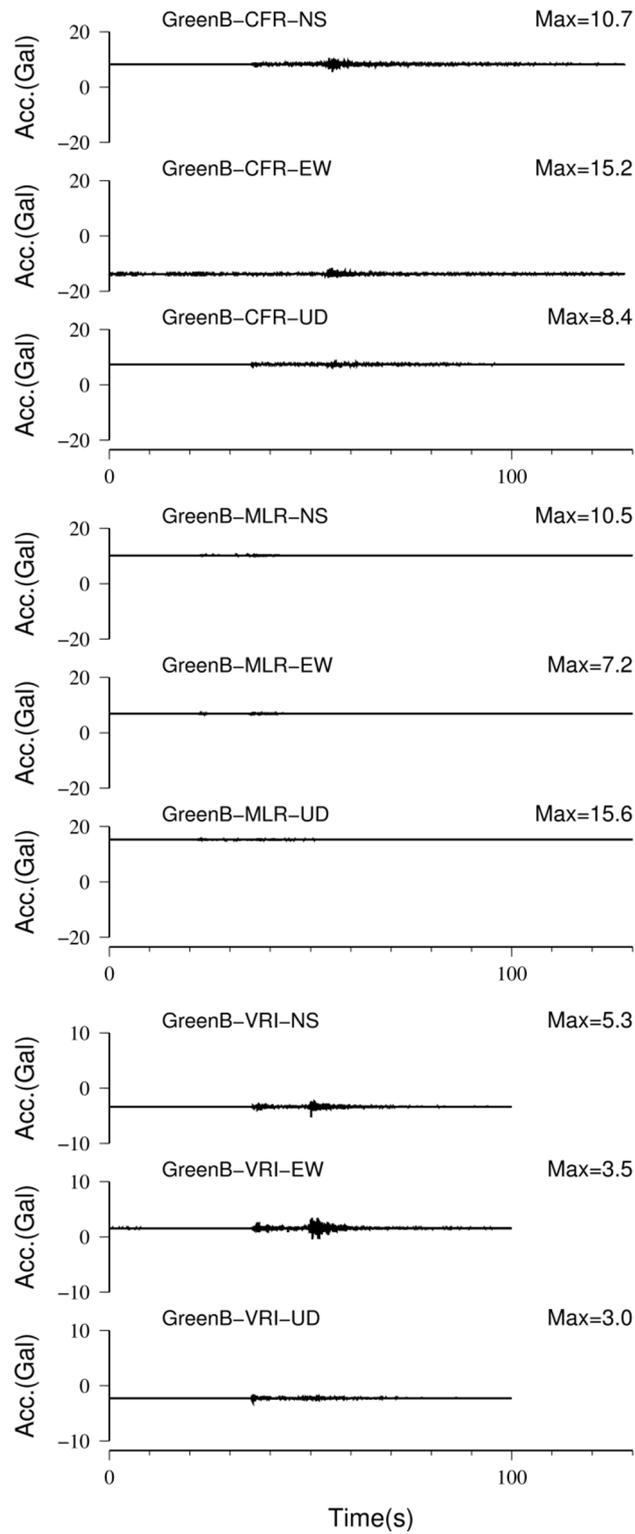
表 4.2-1 地震動解析用の観測点の緯度と経度

観測点	緯度(°)	経度(°)
CFR	東経28.14	北緯45.18
MLR	東経25.94	北緯45.49
VRI	東経26.73	北緯45.87



a) ターゲットとなる 1986 年 8 月 30 日に発生した地震 (M_W 7.1)

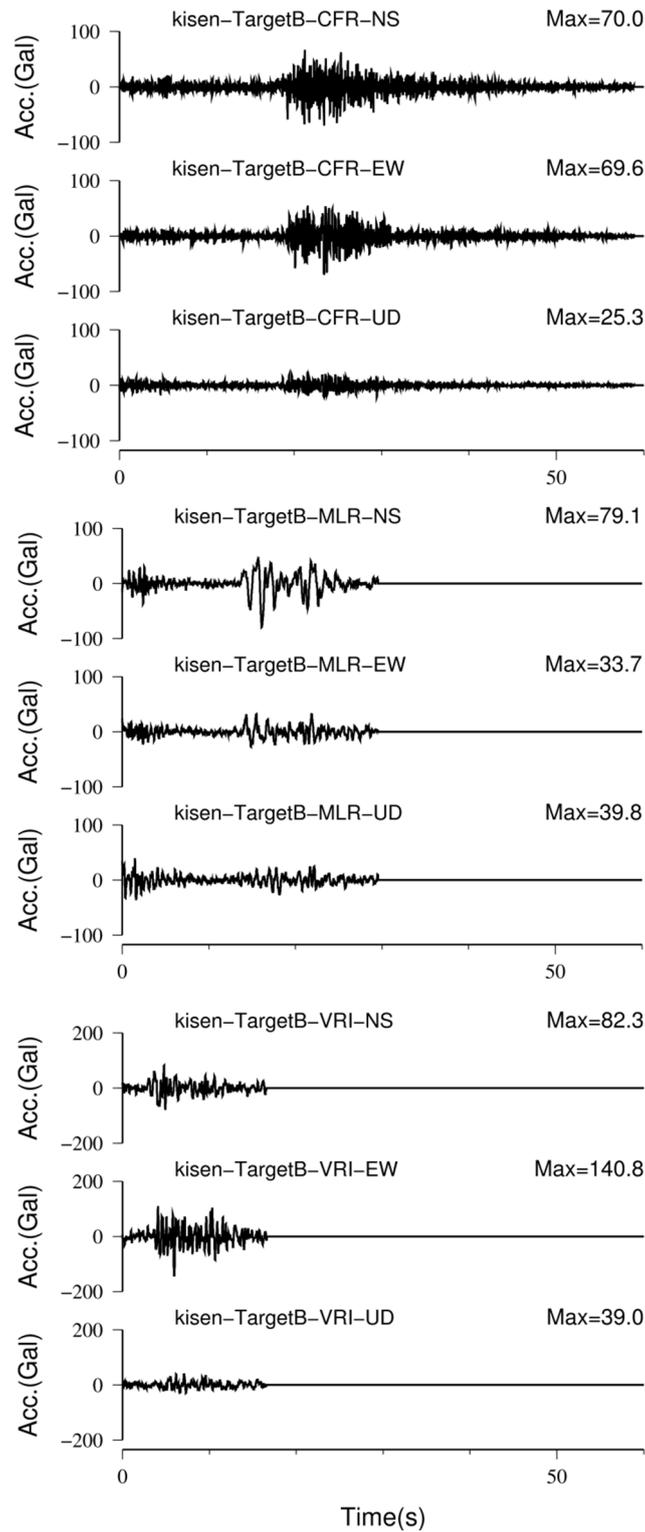
図 4.2-2 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録 (基線補正前)



b) 1999年11月8日に発生した要素地震 (M_W 4.6)

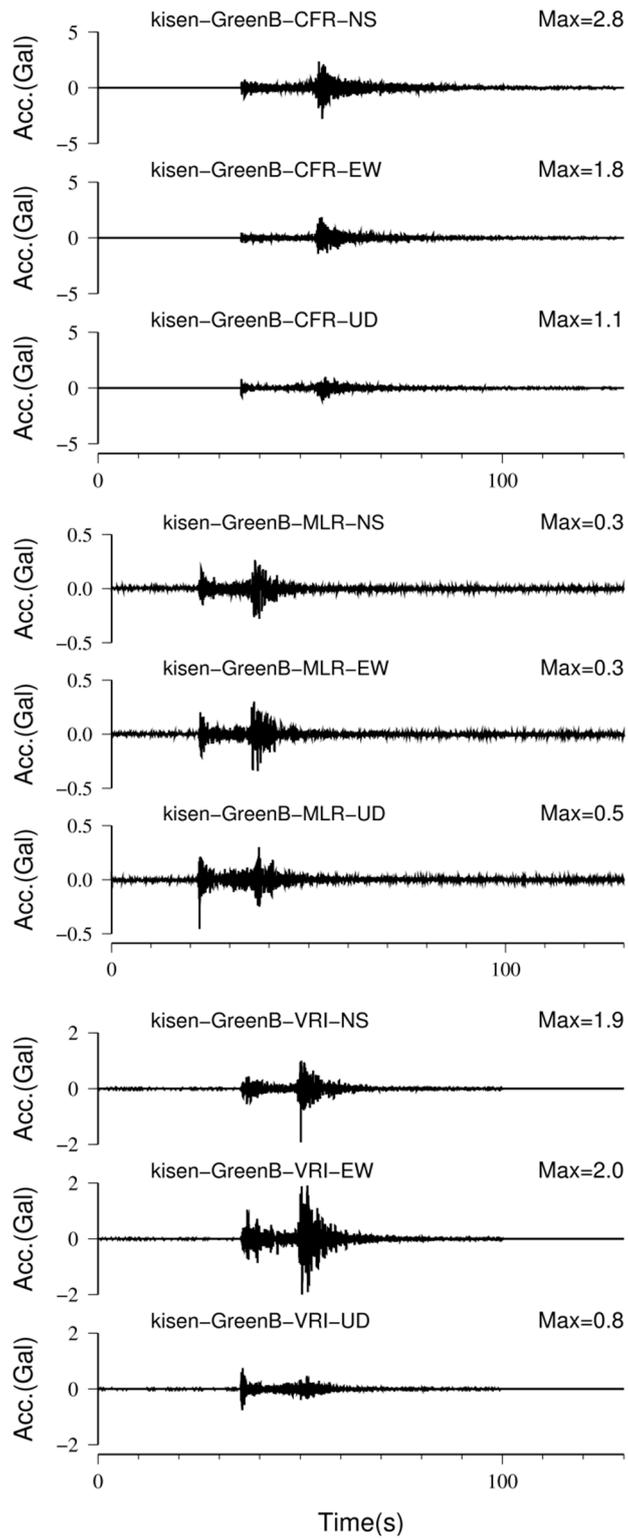
図 4.2-2 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録 (基線補正前)

(つづき)



a) ターゲットとなる 1986 年 8 月 30 日に発生した地震 (M_W 7.1)

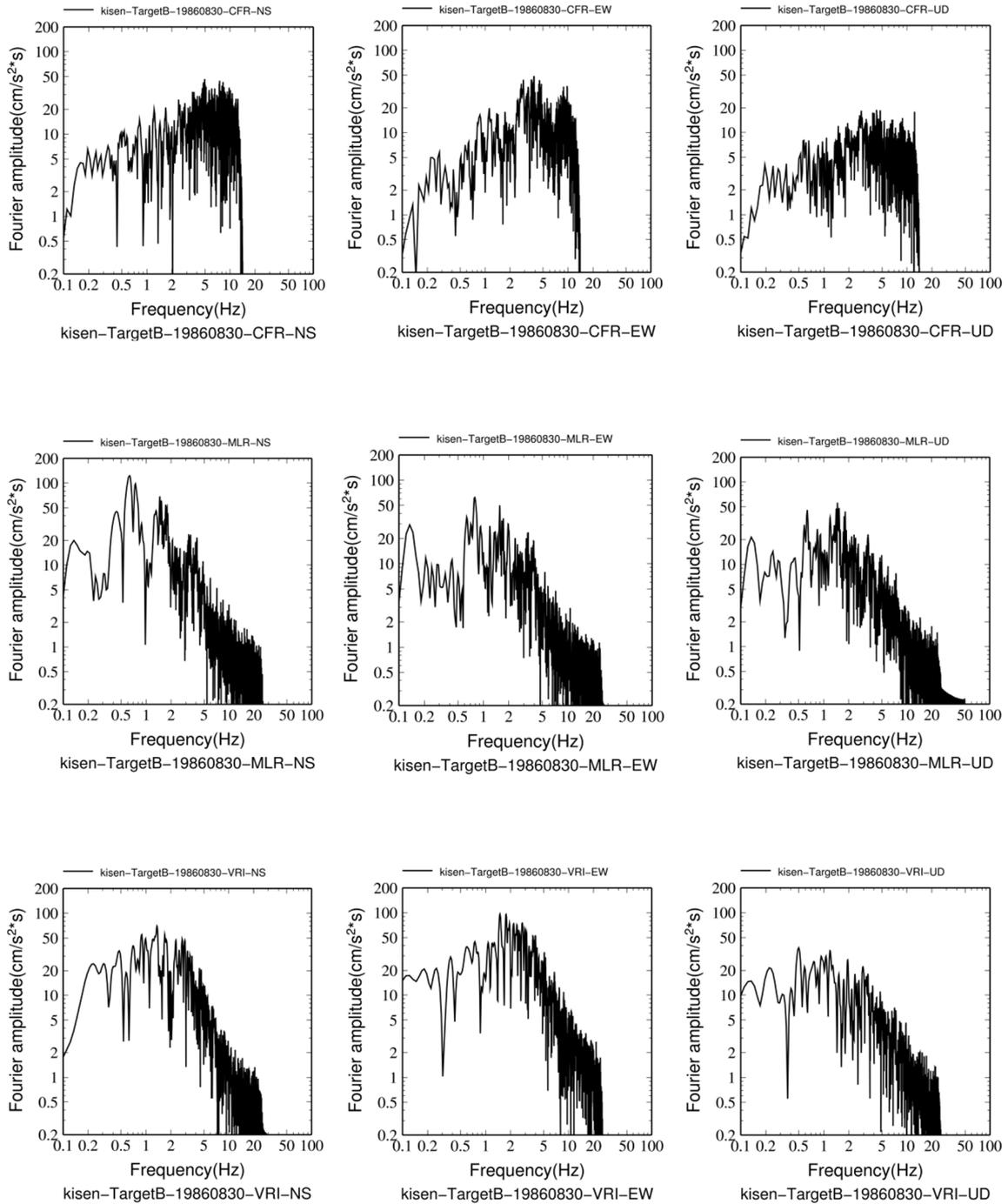
図 4.2-3 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録 (基線補正後)



b) 1999年11月8日に発生した要素地震 (M_w 4.6)

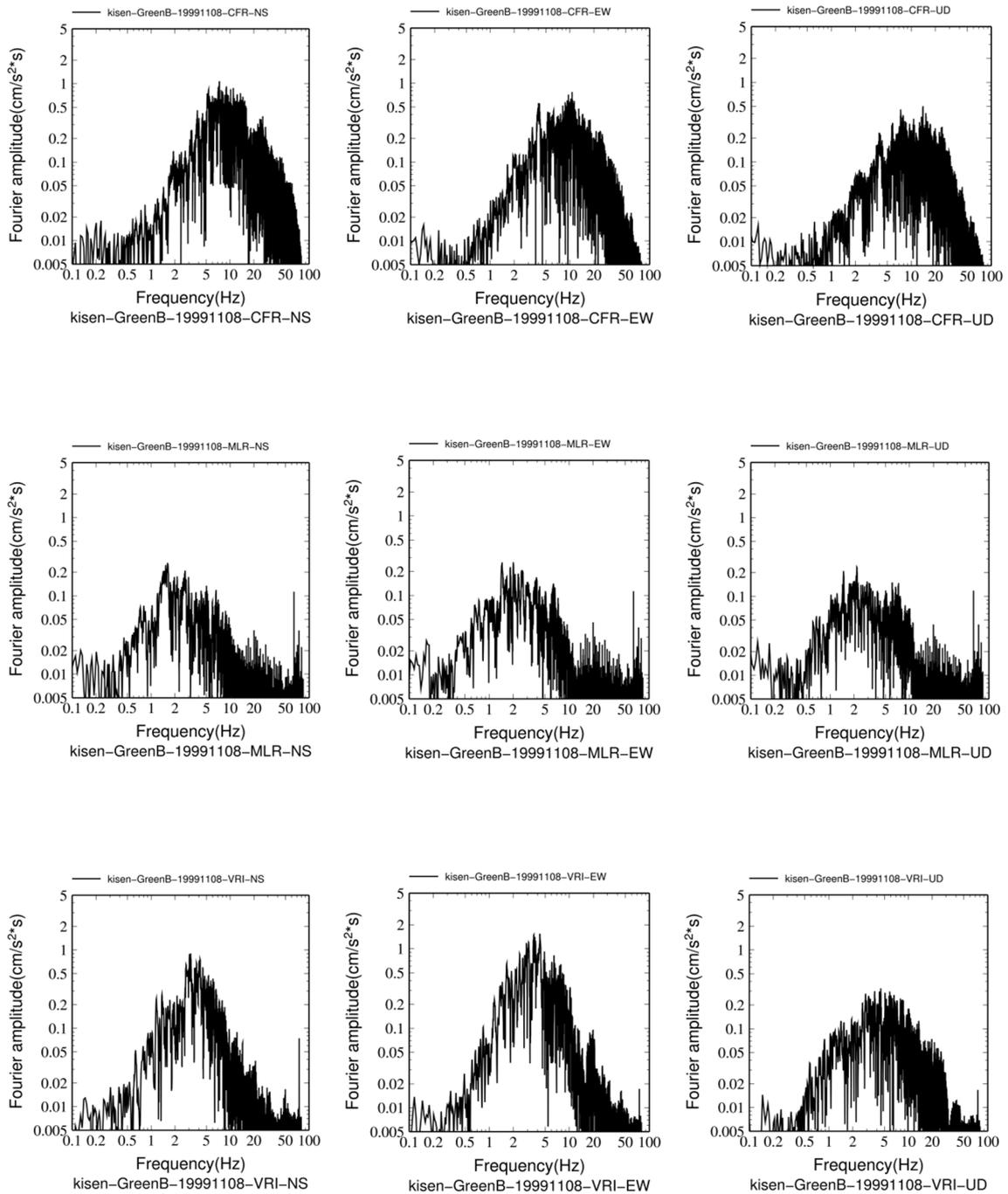
図 4.2-3 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録 (基線補正後)

(つづき)



a) ターゲットとなる 1986 年 8 月 30 日に発生した地震 (M_w 7.1)

図 4.2-4 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録の
フーリエスペクトル (基線補正後)



b) 1999年11月8日に発生した要素地震(M_w 4.6)

図 4.2-4 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録のフーリエスペクトル(基線補正後)(つづき)

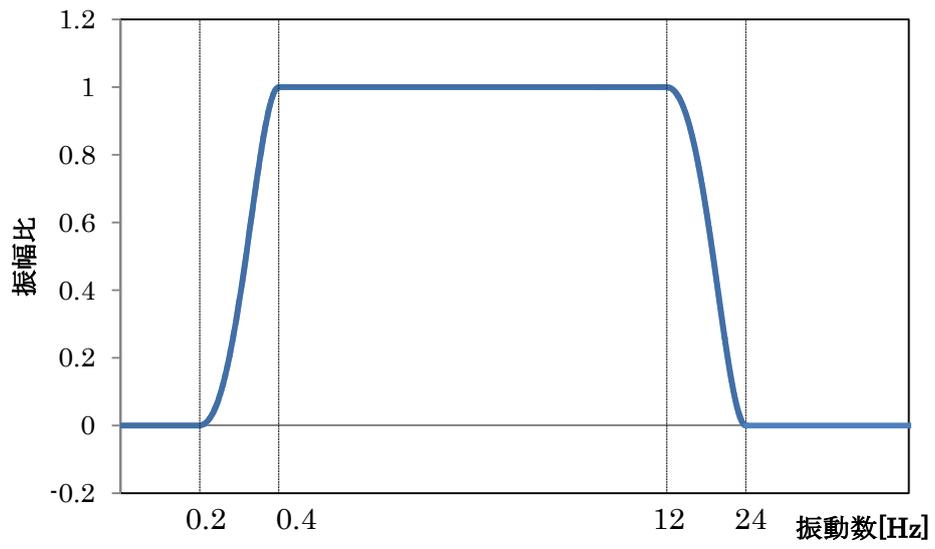
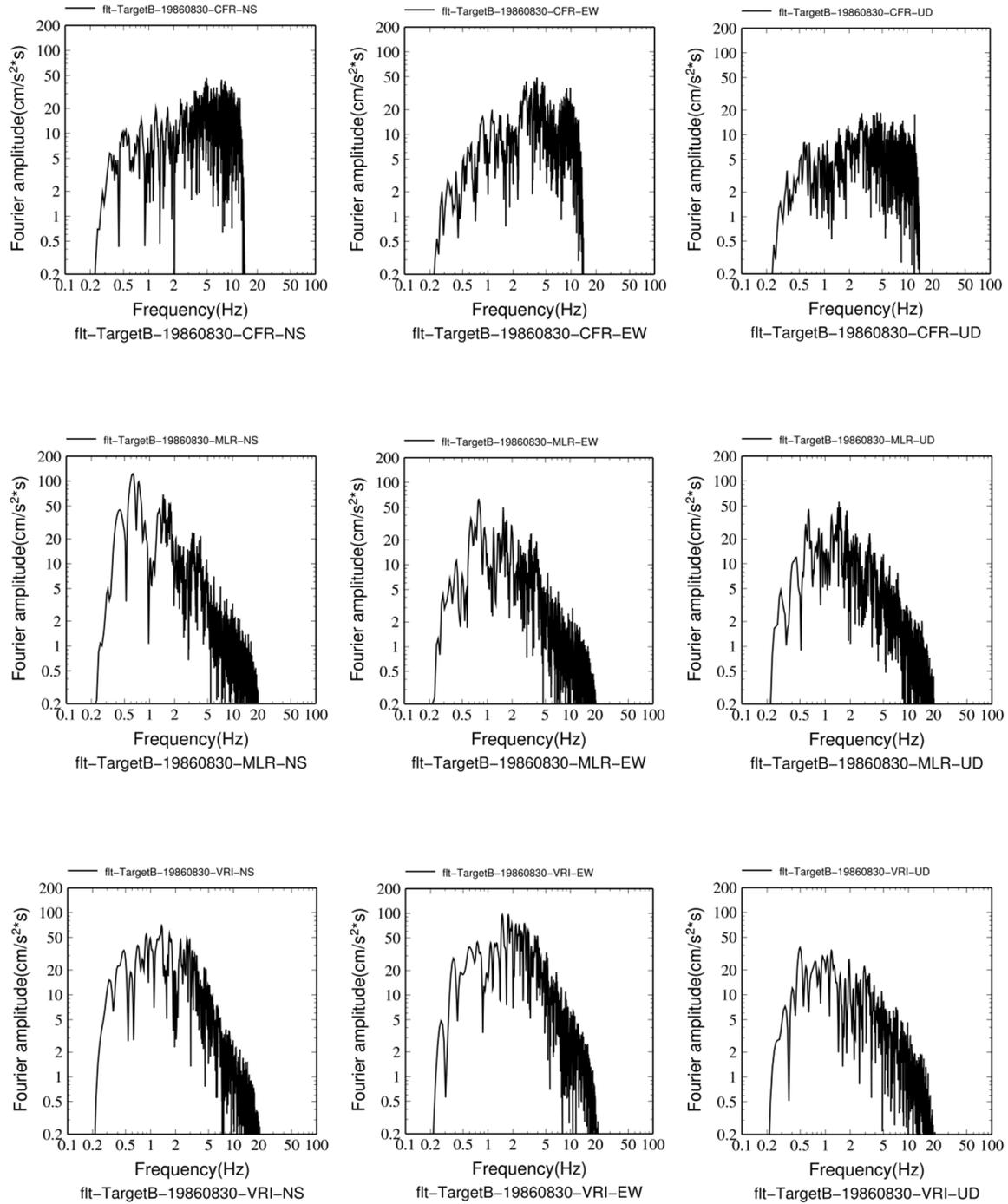
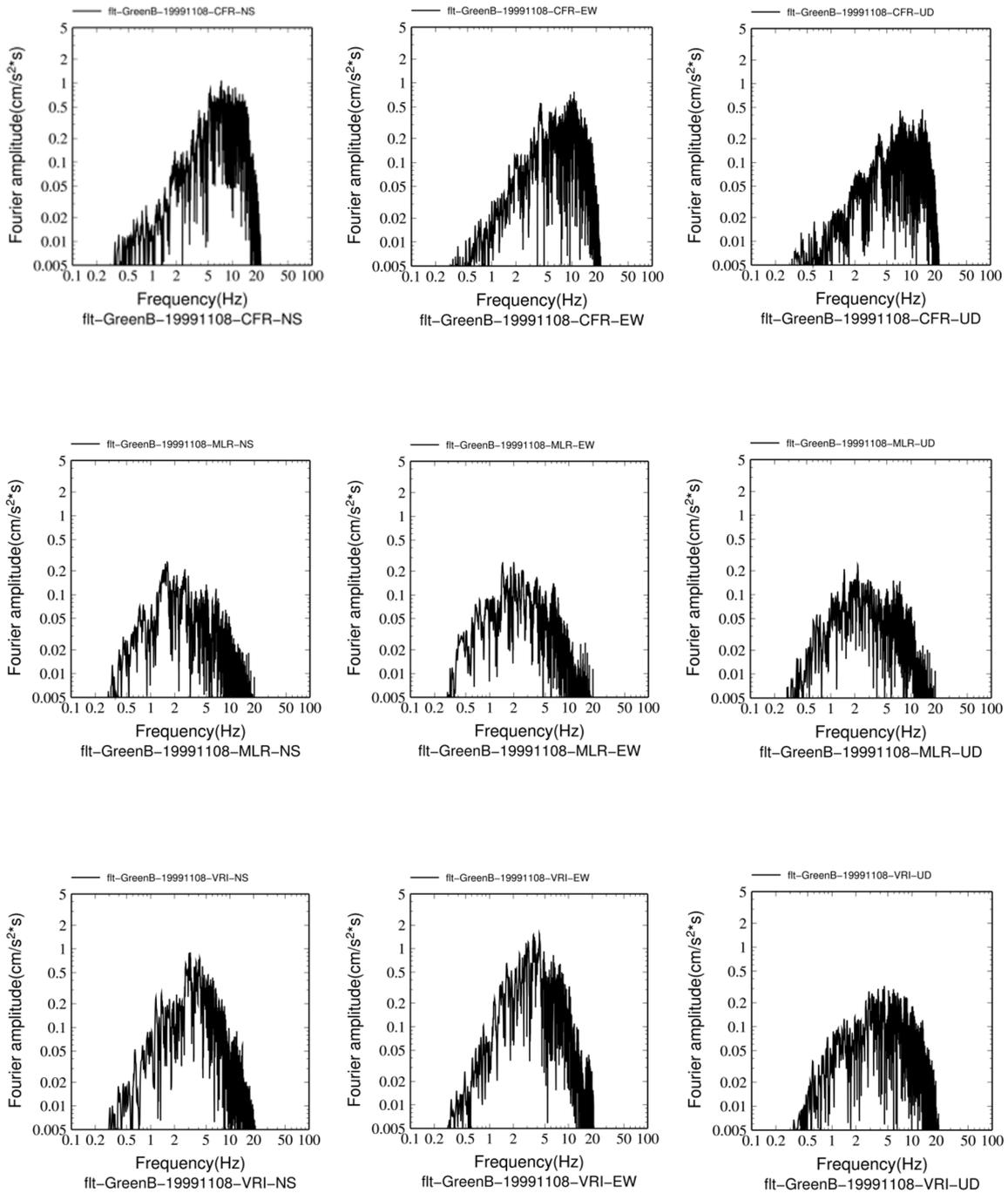


図 4.2-5 バンドパスフィルター



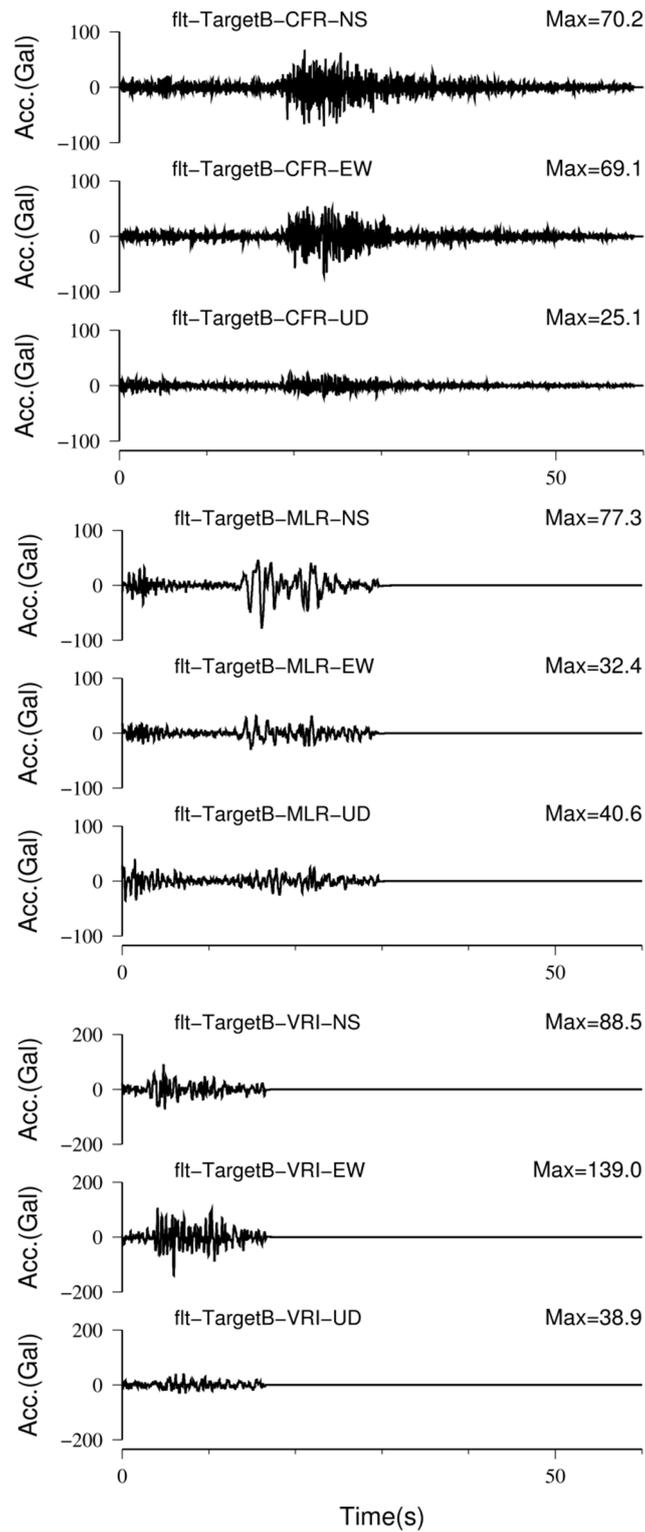
a) ターゲットとなる 1986 年 8 月 30 日に発生した地震 (M_w 7.1)

図 4.2-6 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録のフーリエスペクトル (バンドパスフィルター後 : 0.4Hz~12Hz)



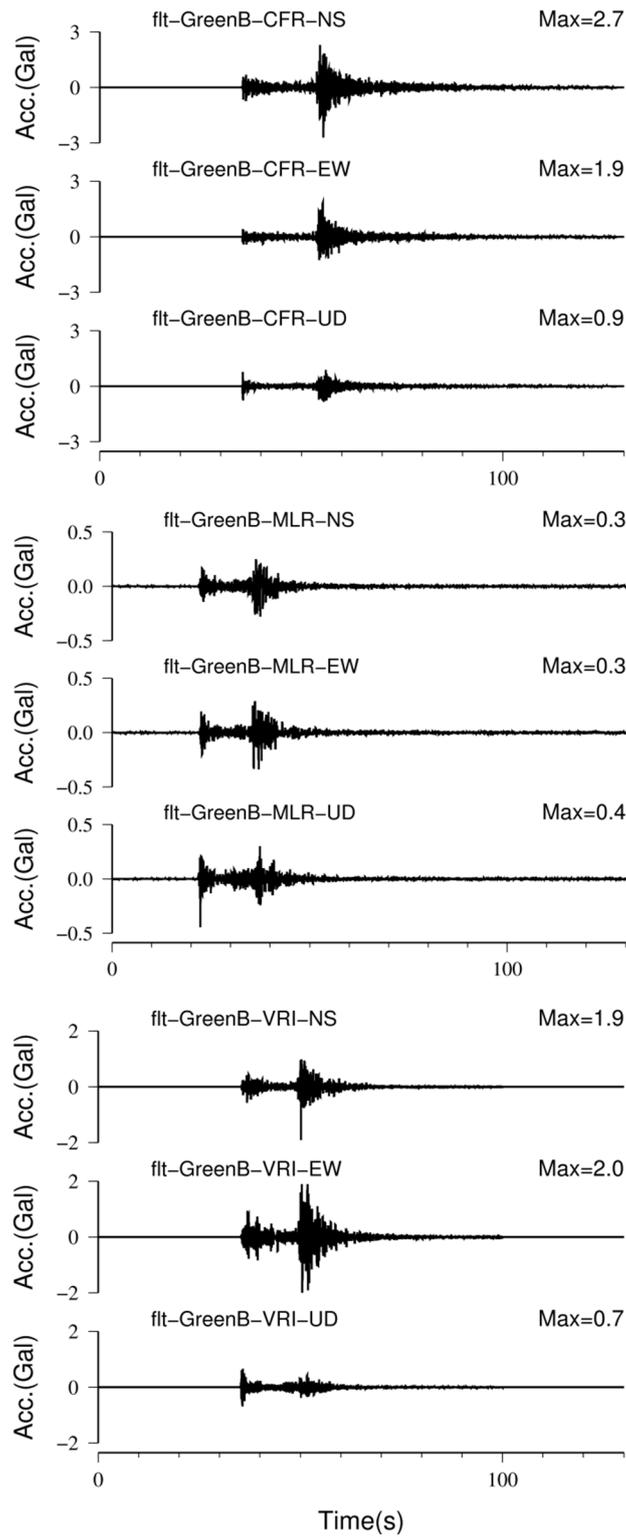
b) 1999年11月8日に発生した要素地震(M_w 4.6)

図 4.2-6 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録のフーリエスペクトル (バンドパスフィルター後: 0.4Hz~12Hz) (つづき)



a) ターゲットとなる 1986 年 8 月 30 日に発生した地震 (M_w 7.1)

図 4.2-7 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録
(バンドパスフィルター後 : 0.4Hz~12Hz)



b) 1999年11月8日に発生した要素地震 (M_w 4.6)

図 4.2-7 本業務で収集したルーマニアのスラブ内地震による加速度記録
(バンドパスフィルター後 : 0.4Hz~12Hz) (つづき)

4.3 国外のスラブ内地震の震源モデルの設定

Oth *et al.* (2007)による、ルーマニアの Vrancea 地震の地震動解析事例を参考に、経験的グリーン関数法を用いた地震動再現解析のための震源モデルを設定した。

(1) 対象地震

地震動再現解析の対象は、1986年の Vrancea 地震 (M_w 7.1、以降、ターゲットの地震と呼ぶ)とし、要素地震として1999年の地震 (M_w 4.6、以降、要素地震と呼ぶ)を用いた。ターゲットの地震の震央位置とメカニズム解、および要素地震の震央位置を図4.3-1に示す。

Oth *et al.* (2007)による、ターゲットの地震 (M_w 7.1) と要素地震 (M_w 4.6) の諸元を表4.3-1に、経験的グリーン関数法で使用された数値を表4.3-2に示す。

(2) 震源モデルおよび断層パラメータ

断層パラメータの設定では、ターゲットの地震のモーメントマグニチュード $M_{wl}=7.1$ 、要素地震のコーナー振動数 $f_{cs}=4.0\text{Hz}$ 、経験的グリーン関数法による波形合成時に用いる重ね合わせ数 $N=16$ 、およびターゲットの地震と要素地震の応力降下量の比 $C=2.0$ の4つのパラメータを与条件として、要素地震とターゲットの地震の断層パラメータを設定した。

まず、Kanamori (1977)による(4.3-1)式より、ターゲットの地震のモーメントマグニチュード M_{wl} から地震モーメント M_{0l} を算出した後、Oth *et al.* (2007)が求めた C と N の値を(4.3-2)式に代入して、要素地震の地震モーメント M_{0s} を決めた。

$$M_{0l}[\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{1.5M_{wl}+9.1} \quad (4.3-1)$$

$$M_{0l} / M_{0s} = CN^3 = 8192 \quad (4.3-2)$$

次に、Brune (1970)の ω^{-2} モデルを仮定した場合の、(4.3-3)式によるコーナー振動数の値と、円形クラックの平均応力降下量を求める(4.3-4)式を用いて、要素地震の断層面積 S_s 、および要素地震の応力降下量 $\Delta\sigma_s$ を算定した。

$$f_{cs} = \beta\sqrt{(7/16)/S_s} = 4.0\text{Hz} \quad (4.3-3)$$

$$\Delta\sigma_s = (7/16)M_{0s} / (S_s / \pi)^{1.5} \quad (4.3-4)$$

要素地震の応力降下量 $\Delta\sigma_s$ が求まったので(4.3-5)式の値よりターゲットの地震の応

力降下量 $\Delta\sigma_l$ が求まる。

$$\Delta\sigma_l / \Delta\sigma_s = C = 2.0 \quad (4.3-5)$$

また、ターゲットの地震の M_{0l} 、応力降下量 $\Delta\sigma_l$ から円形クラックの(4.3-6)式で断層面積 S_l が求まり、 $L_l=W_l$ とすると、(4.3-7)式より L_l と W_l が求まる。

$$\Delta\sigma_l = (7/16)M_{0l} / (S_l / \pi)^{1.5} \quad (4.3-6)$$

$$S_l = L_l \times W_l \quad (4.3-7)$$

ターゲットの地震の平均すべり量 D_l は下記の(4.3-8)式より算定した。ここに、剛性率 μ は、Oth *et al.* (2007)より、 7×10^{10} N/m²とした。

$$M_{0l} = \mu D_l S_l \quad (4.3-8)$$

同様に、(4.3-9)式と(4.3-10)式より、要素地震の断層長さ L_s 、断層幅 W_s 、および平均すべり量 D_s を算定した。ここに、 $L_s=W_s$ とした。

$$S_s = L_s \times W_s \quad (4.3-9)$$

$$M_{0s} = \mu D_s S_s \quad (4.3-10)$$

表 4.3-3 に以上より設定したターゲットの地震の断層パラメータを、表 4.3-4 に要素地震の断層パラメータを示す。また、ターゲットの地震の震源モデルを図 4.3-2 に示す。破壊伝播速度は $V_R=0.72\beta$ 、破壊開始点は断層面の中央とした。

なお、本検討では、ターゲットの地震の震源モデルをクラックモデル（強震動生成域のみ）として解釈して断層パラメータを設定しているが、地震調査研究推進本部によるスラブ内地震の「レシピ」と比較するためには、今後、背景領域も含む、アスペリティモデルとして考えた場合についても検討する必要がある。

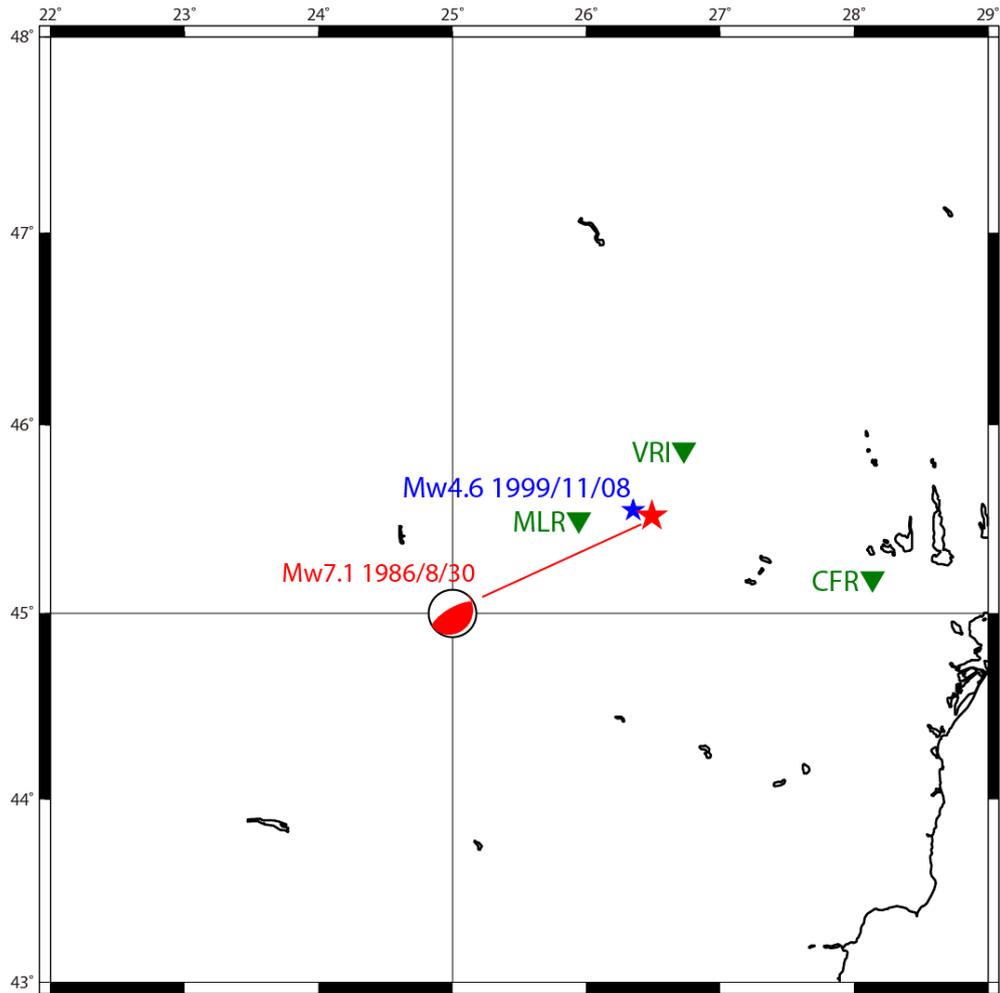


図 4.3-1 対象とした地震の震央位置および観測点の分布図

(赤★印：ターゲットの地震、青★印：要素地震、緑▼印：観測点)

表 4.3-1 Oth *et al.* (2007) による対象地震の諸元(表 4.1-1 の再掲)

Table 1

Hypocentral coordinates, moment magnitudes and origin times of the events used in this study

Event ID	Date	Origin time	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	M_w
EGF-A200209	2002/09/06	05:04:02	45.64	26.43	105	4.1
EGF-A200211	2002/11/03	20:30:23	45.74	26.86	90	4.0
EGF-B19991108	1999/11/08	19:22:52	45.55	26.35	138	4.6
EGF-B19991114	1999/11/14	09:05:59	45.52	26.27	132	4.6
EGF-B200004	2000/04/06	00:10:39	45.75	26.64	143	5.0
EGF-C200410	2004/10/27	20:34:36	45.78	26.73	99	5.8
TARGET-A	2004/10/27	20:34:36	45.78	26.73	99	5.8
TARGET-B	1986/08/30	21:28:37	45.52	26.49	132	7.1
TARGET-C	1977/03/04	19:21:54	45.77	26.76	94	7.4

The smaller earthquakes used to generate the synthetics are characterized by the identification code EGF whereas the respective main shock is referenced to as TARGET. The information shown in this table was gathered from the ROMPLUS-catalogue (Onicescu *et al.*, 1999a).

表 4.3-2 Oth et al. (2007) において経験的グリーン関数法に使用された数値

(表 4.1-2 の再掲)

Event ID	$\frac{M_0}{m_0}$	$f_{C,T}$ (Hz)	$f_{C,E}$ (Hz)	N	C	Number of stations
TARGET-A/EGF-A200209	211	1.7	8.3	5	1.7	12
TARGET-A/EGF-A200211	651	1.6	10.8	7	1.9	10
TARGET-B/EGF-B19991108	8144	0.3	4.0	16	2.0	5
TARGET-B/EGF-B19991114	7134	0.3	4.9	17	1.5	5
TARGET-B/EGF-B200004	914	0.3	3.1	11	0.7	4

表 4.3-3 1986 年の Vrancea 地震(ターゲットの地震)の断層パラメータ

ターゲットの地震の断層パラメータ	設定方法
モーメントマグニチュード M_{wl}	7.1
地震モーメント M_{0l} (N・m)	$M_{0l} [\text{N}\cdot\text{m}] = 10^{(1.5M_{wl} + 9.1)}$
平均応力降下量 $\Delta\sigma_l$ (MPa)	$\Delta\sigma_l = C \Delta\sigma_s$, ここに C は Oth et al. (2007) より 2 とした。
断層面積 S_l (km ²)	$S_l = \pi (7/16 * M_{0l} / \Delta\sigma_l)^{2/3}$
断層長さ L_l (km)	$L_l = W_l = \sqrt{S_l}$
断層幅 W_l (km)	$L_l = W_l = \sqrt{S_l}$
平均すべり量 D_l (m)	$D_l = M_{0l} / (\mu S_l)$, ここに μ は Oth et al. (2007) より 7×10^{10} N/m ² とした。
コーナー振動数 f_{cl} (Hz)	$f_{cl} = \beta \sqrt{7/16 / S_l}$, ここに β は Oth et al. (2007) より 4.5 km/s とした。
走向, 傾斜角, すべり角	39, 19, 70 (240, 72, 97) Global CMT 解

表 4.3-4 1999 年の Vrancea 地震(要素地震)の断層パラメータ

要素地震の断層パラメータ	設定方法
モーメントマグニチュード M_{ws}	$M_{ws} = (\log_{10}(M_{0s} [\text{N}\cdot\text{m}]) - 9.1) / 1.5$
地震モーメント M_{0s} (N・m)	$M_{0s} = M_{0l} / (C \cdot N^3)$
平均応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	$\Delta\sigma_s = (7/16) [(M_{0s} / (S_s / \pi))^{1.5}]$
断層面積 S_s (km ²)	$S_s = (7/16) (\beta / f_{cs})^2$, ここに β は Oth et al. (2007) より 4.5 km/s とした。
断層長さ L_s (km)	$L_s = W_s = \sqrt{S_s}$
断層幅 W_s (km)	$L_s = W_s = \sqrt{S_s}$
平均すべり量 D_s (m)	$D_s = M_{0s} / (\mu S_s)$, ここに μ は Oth et al. (2007) より 7×10^{10} N/m ² とした。
コーナー振動数 f_{cs} (Hz)	Oth et al. (2007) の Table 2

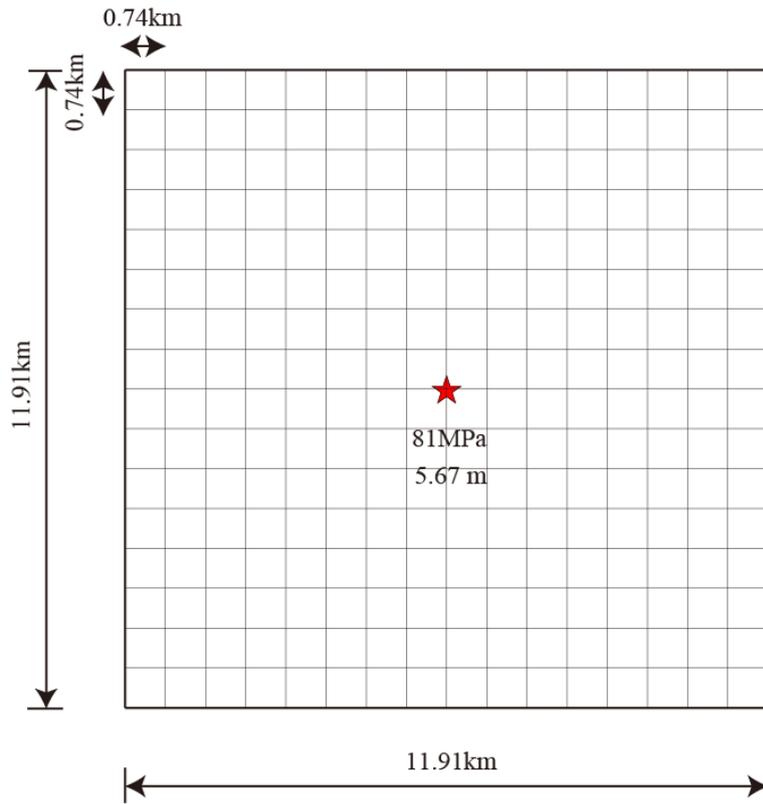


図 4.3-2 1986年のVrancea地震(ターゲットの地震)の震源モデル
(赤★印：破壊開始点)

4.4 国外のスラブ内地震の地震動再現解析

表 4.4-1 に、4.3 節で求めた Target-B 地震 (M_w 7.1) の断層パラメータを経験的グリーン関数法の計算用に整理して示す。また、表 4.4-2 には、表 4.3-1 と表 4.3-4 に示した EGF-B 地震 (M_w 4.5) の断層パラメータを経験的グリーン関数法の計算用に整理して示す。

表 4.4-1 Target-B 地震の断層パラメータ

断層パラメータ	記号	単位	設定方法	設定結果
断層基準点	—	北緯	Target-B地震の震源位置から計算	45° 35′ 36.70″
	—	東経		26° 28′ 55.02″
走向	θ	[度]	表4.3-3の走向+180° (断層原点：北西角)	219
傾斜角	δ	[度]	表4.3-3	19
断層上端深さ	H_U	[km]	Target-B地震の震源位置から計算	130
断層幅	W	[km]	表4.3-3	11.91
断層長さ	L	[km]	表4.3-3	11.91
断層面積	S	[km ²]	$S=L \times W$	141.8
せん断剛性	μ	[N/m ²]	Oth <i>et al.</i> (2007)	7.00E+10
S波速度	β	[km/s]	Oth <i>et al.</i> (2007)	4.5
密度	ρ	[g/cm ³]	$\rho=\mu\beta^2$	3.46
破壊開始点	—	—	—	断層面中央
破壊伝播様式	—	—	—	同心円状
破壊伝播速度	V_r	[km/s]	$V_r=0.72\beta$ (Geller, 1976)	3.24
地震モーメント	M_0	[N・m]	表4.3-3	5.62E+19
モーメントマグニチュード	M_w	—	表4.3-3	7.1
平均すべり量	D	[cm]	表4.3-3	567.0
平均応力降下量	$\Delta\sigma$	[MPa]	表4.3-3	81.0
短周期レベル	A	[N・m/s ²]	$A=4\pi\Delta\sigma(S/\pi)^{1/2}\beta^2$	

表 4.4-2 EGF-B 地震の断層パラメータ

要素地震の断層パラメータ		設定方法
モーメントマグニチュード M_{ws}	4.5	$M_{ws}=(\log_{10}(M_{0s}[\text{N}\cdot\text{m}])-9.1)/1.5$
地震モーメント M_{0s} (N・m)	6.86E+15	$M_{0s}=M_0/(C\cdot N^3)$
平均応力降下量 $\Delta\sigma_s$ (MPa)	41	$\Delta\sigma_s=(7/16)[(M_{0s}/(S_s/\pi))^{1.5}]$
断層面積 S_s (km ²)	0.55	$S_s=(7/16)(\beta/f_c)^2$ 、ここに β は Oth <i>et al.</i> (2007) より 4.5km/s とした。
断層長さ L_s (km)	0.74	$L_s=W_s=\text{sqrt}(S_s)$
断層幅 W_s (km)	0.74	$L_s=W_s=\text{sqrt}(S_s)$
平均すべり量 D_s (m)	0.18	$D_s=M_{0s}/(\mu S_s)$ 、ここに μ は Oth <i>et al.</i> (2007) より 7×10^{10} N/m ² とした。
コーナー振動数 f_{cs} (Hz)	4.0	Oth <i>et al.</i> (2007) の Table 2

図 4.4-1 に Target-B 地震の断層面と EGF-B 地震の震央の位置を示す。図中、星印は破壊開始点で、三角印は観測点である。また、図 4.4-2 には Target-B 地震の断層モデルを示す。

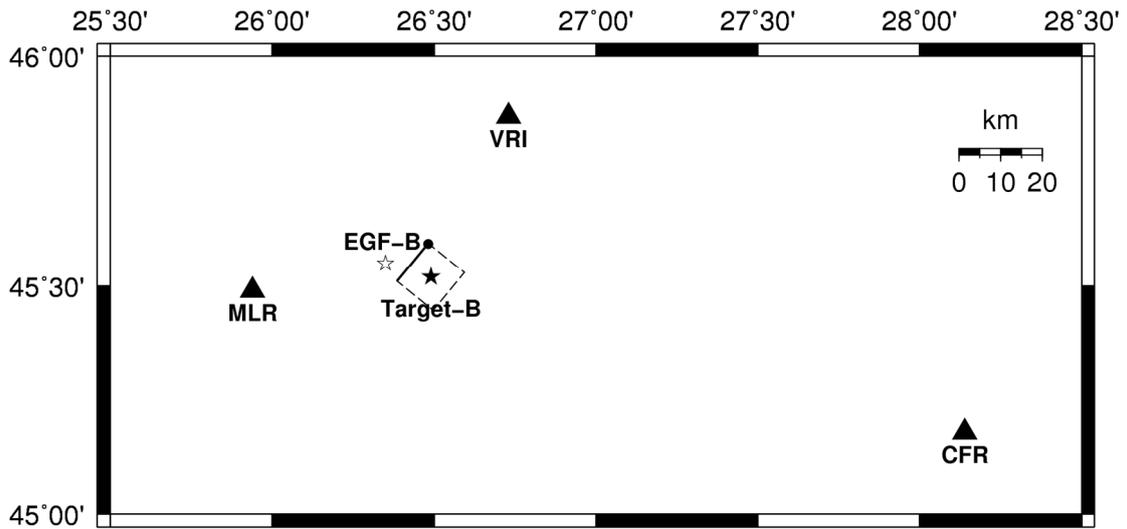


図 4.4-1 Target-B 地震の断層面と EGF-B 地震の震央の位置
 (図中の星印は破壊開始点で、三角印は観測点である。)

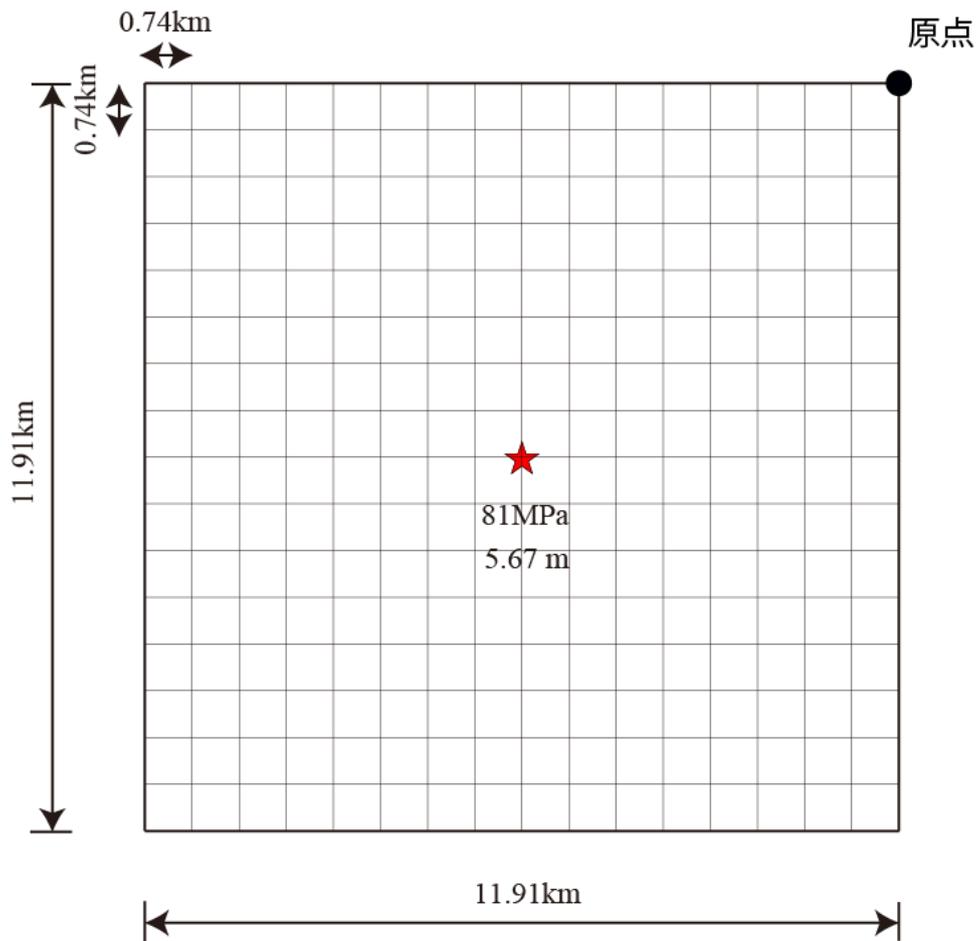


図 4.4-2 Target-B 地震の断層モデル

経験的グリーン関数法として、Dan *et al.* (1989)による方法を用いた。Dan *et al.* (1989)による経験的グリーン関数法の概要を以下に述べる。

Dan *et al.* (1989)による経験的グリーン関数法は、震源スペクトルのモデルのひとつであるBrune (1970)の ω^{-2} モデルに基づく方法であり、その合成式は、大地震の断層長さ、幅、平均すべり量、および実効応力（本業務では応力降下量）と要素地震のそれらとの比率を、

$$\frac{L_l}{L_s} = a, \quad \frac{W_l}{W_s} = b, \quad \frac{D_l}{D_s} = c, \quad \frac{\sigma_l}{\sigma_s} = d \dots\dots\dots (4.4-1)$$

とおくと、

$$u_l(t) = \sum_{p=1}^a \sum_{q=1}^b u_{pq}(t-t_{pq}) \dots\dots\dots (4.4-2)$$

$$u_{pq}(\omega) = F_{pq}(\omega)u_s(\omega) \dots\dots\dots (4.4-3)$$

$$F_{pq}(\omega) = d \left(\frac{1+j\omega/\omega_{cs}}{\sqrt{d/c+j\omega/\omega_{cs}}} \right)^2 \left(\frac{r_s}{r_{pq}} \right) \exp \left[\frac{\omega}{2Q\beta} (r_s - r_{pq}) \right] \dots\dots\dots (4.4-4)$$

$$\omega_{cs} = 2\beta \sqrt{\frac{\pi\lambda_s\sigma_s}{M_{0s}}}, \quad \lambda_s = \sqrt{\frac{L_s W_s}{\pi}}, \quad M_{0s} = \mu L_s W_s D_s \dots\dots\dots (4.4-5)$$

と表される。ここに、

- l : 大地震に関する量であることを示す添字
- s : 要素地震に関する量であることを示す添字
- pq : 大地震の (p,q) 番目の要素断層に関する量であることを示す添字
- L : 断層長さ
- W : 断層幅
- D : 平均すべり量
- σ : 実効応力
- $u(t)$: 地震動
- t_{pq} : 破壊伝播および波動伝播に要する時間
- $u(\omega)$: $u(t)$ のフーリエ変換
- $F_{pq}(\omega)$: スケールファクター
- j : 虚数単位
- r : 震源距離

- Q : Q 値
- β : 媒質の S 波速度
- ω_c : 臨界円振動数
- λ : 面積が等しい円形断層に置換したときの半径
- M_0 : 地震モーメント
- μ : 媒質の剪断剛性率

である。この場合、大地震と要素地震の地震モーメントの比率は、

$$\frac{M_{0l}}{M_{0s}} = \frac{L_l W_l D_l}{L_s W_s D_s} = abc \dots\dots\dots (4.4-6)$$

となる。

スケールファクター $F_{pq}(\omega)$ は、距離補正の項を無視すると、 ω が十分小さいときおよび十分大きいとき、それぞれ下のようになる。

$$F_{pq}(\omega) = c \quad (\omega \rightarrow 0) \dots\dots\dots (4.4-7)$$

$$F_{pq}(\omega) = d \quad (\omega \rightarrow \infty) \dots\dots\dots (4.4-8)$$

すなわち、 ω が十分小さいとき、大地震の平均すべり量と要素地震の平均すべり量との比率 c となり、 ω が十分大きいとき、大地震の実効応力と要素地震の実効応力との比率 d となる。

また、(4.4-2) 式による最終的な合成倍率は、同じく距離補正の項を無視すると、

$$\frac{u_l(\omega)}{u_s(\omega)} = abc \quad (\omega \rightarrow 0) \dots\dots\dots (4.4-9)$$

$$\frac{u_l(\omega)}{u_s(\omega)} = \sqrt{ab} \, d \quad (\omega \rightarrow \infty) \dots\dots\dots (4.4-10)$$

となる。ここに、高振動数領域における振幅はランダム和となることを考慮した。合成倍率は、 ω が十分小さいとき、大地震の地震モーメントと要素地震の地震モーメントとの比率となり、 ω が十分大きいとき、大地震の断層サイズ×実効応力と要素地震の断層サイズ×実効応力との比率となる。

なお、入倉(1986)による経験的グリーン関数法では、大地震と要素地震の応力降下量の比を C とし、面積比を N^2 としており、このとき地震モーメントの比は CN^3 、短周期レベルの比は CN となるので、

$$CN^3 = abc \dots\dots\dots (4.4-11)$$

$$CN = \sqrt{abd} \dots\dots\dots (4.4-12)$$

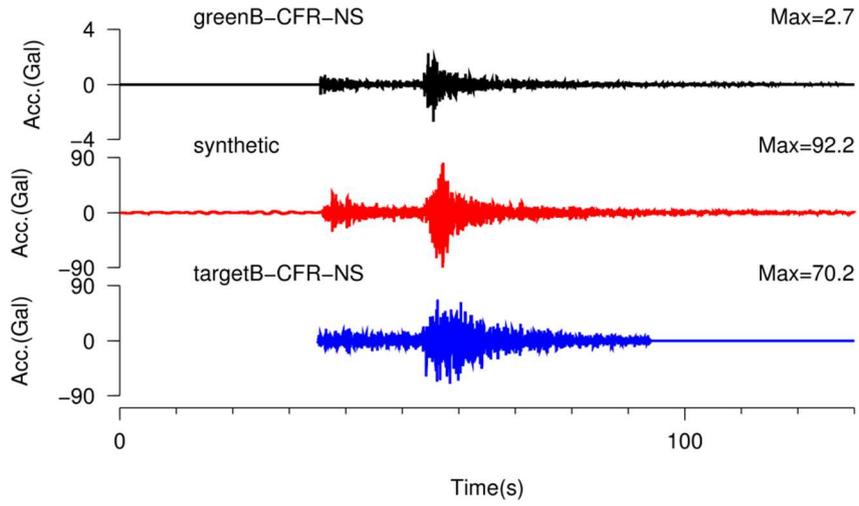
の関係がある。

図 4.4-3 には CFR における NS 成分の計算結果を示す。また、図 4.4-4 と図 4.4-5 にはそれぞれ EW 成分と UD 成分の計算結果を示す。各図とも、(a)は加速度波形で、上から EGF-B 地震の記録、合成結果、Target-B 地震の記録である。図より、最大加速度はほぼ再現できていることがわかる。一方、主要動部分の継続時間はやや過小評価しており、破壊開始位置を断層の中心からずらしたり、破壊伝播速度を遅くして、継続時間を長くする必要がある。

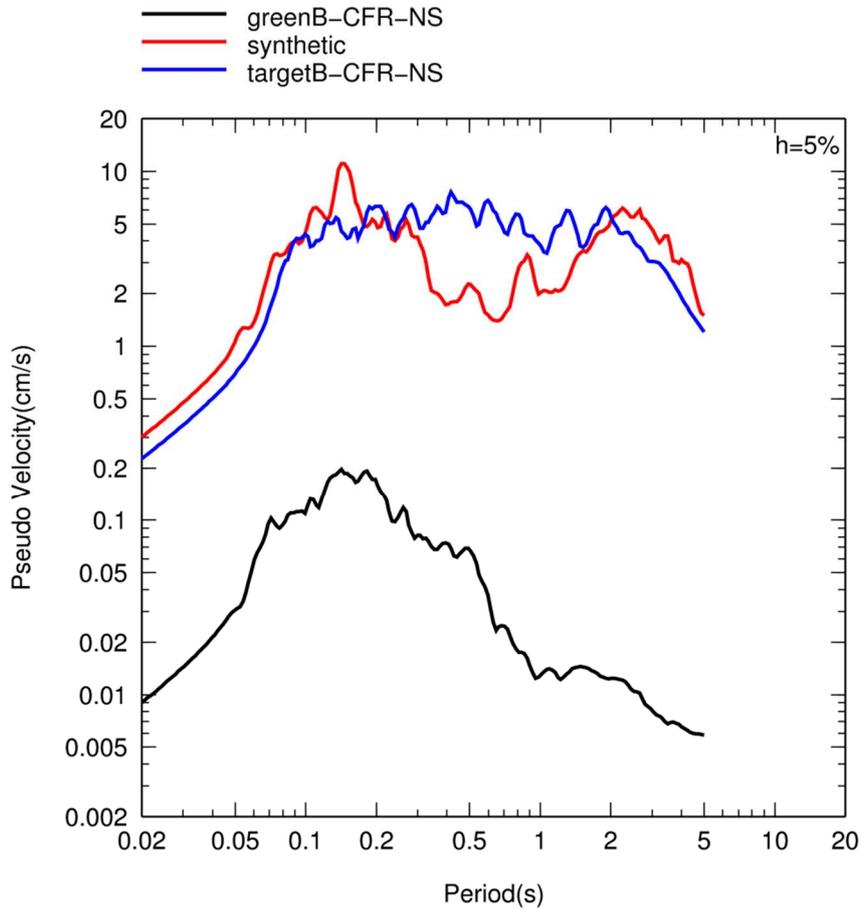
各図の (b)には減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルを示す。図より、0.3 秒より短い周期と 1 秒より長い周期の再現性は高いが、0.3 秒から 1 秒の周期帯域で過小になっていることがわかる。EGF-B の応答スペクトルは 0.3 秒から 1 秒の周期帯域で谷になっていないことから、波形合成のパラメータに原因があると考えられる。入倉(1994)によると、重ね合わせ数 N が大きい場合、要素地震のコーナー周期と大地震のコーナー周期の間で合成結果が過小になることが示されている。今の場合、要素地震のコーナー周期は $1/(4\text{Hz}) = 0.25$ 秒で、大地震のコーナー周期は N 倍の $0.25 \times 16 = 4$ 秒であるので、合成結果の過小な速度応答スペクトルの原因は $N=16$ としたことにある可能性が大きい。今後、要素地震に規模補正を施し大きくして、結果的に $N=5$ 程度で波形合成を行えるようにして、中間周期帯域の速度応答スペクトルの過小評価が改善されるかどうかを検討する必要がある。

図 4.4-6 から図 4.4-8 には MLR における計算結果を示す。EW 成分の再現性は高く、UD 成分の再現性も低くはないが、NS 成分の合成結果は Target-B 地震の観測記録を過小評価している。これは、NS 成分の場合、Target-B 地震の MLR における最大加速度は 77.3Gal で CFR における最大加速度 70.2Gal とほぼ同じであるにもかかわらず、EGF-B 地震の MLR における最大加速度は 0.3Gal で CFR における最大加速度 2.7Gal の $1/10$ と極めて小さくなっているためである。この顕著な差の原因については、今後調査する必要がある。

図 4.4-9 から図 4.4-11 には VRI における計算結果を示す。CFR における合成結果と同様、最大加速度の再現性は高いが、主要動部分の継続時間はやや過小評価している。また、減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルも、短周期域と長周期域では再現性が高いが中周期帯域で過小評価になっている。



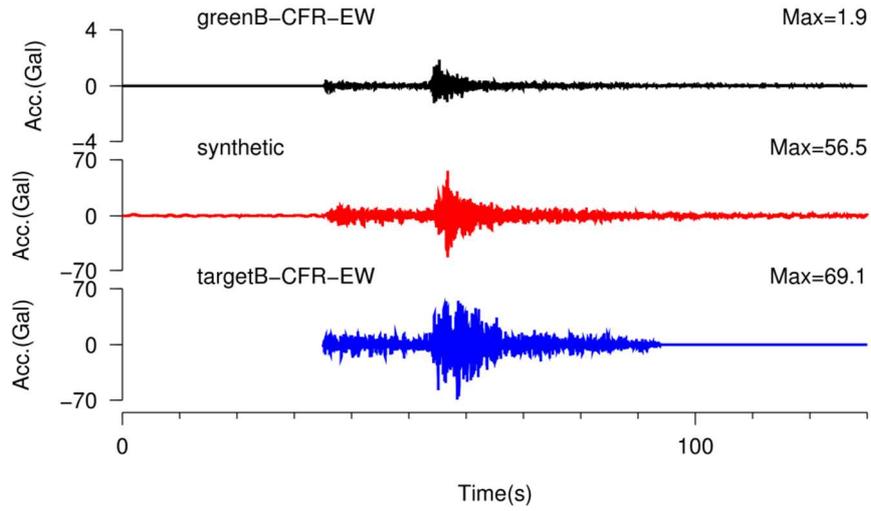
a) 加速度波形



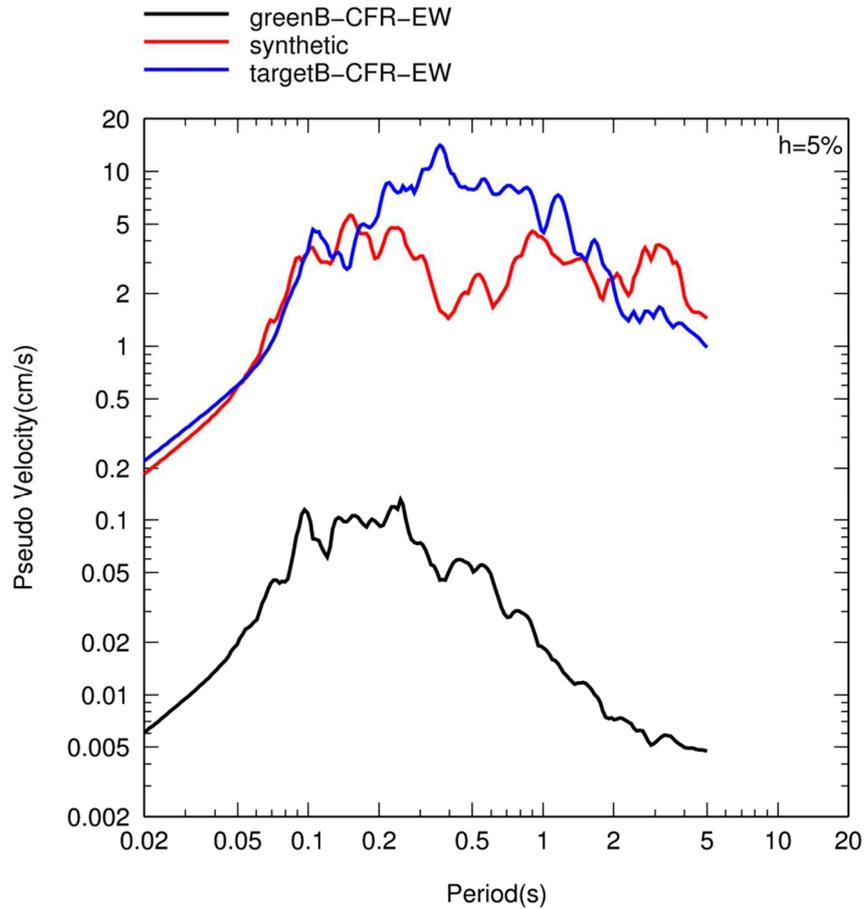
targetB-19860830-CFR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-3 CFR における合成結果 (NS 成分)



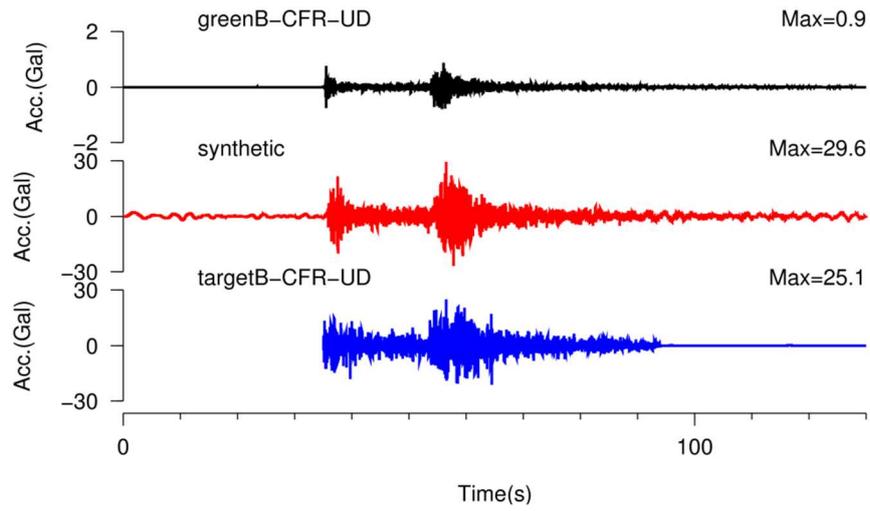
a) 加速度波形



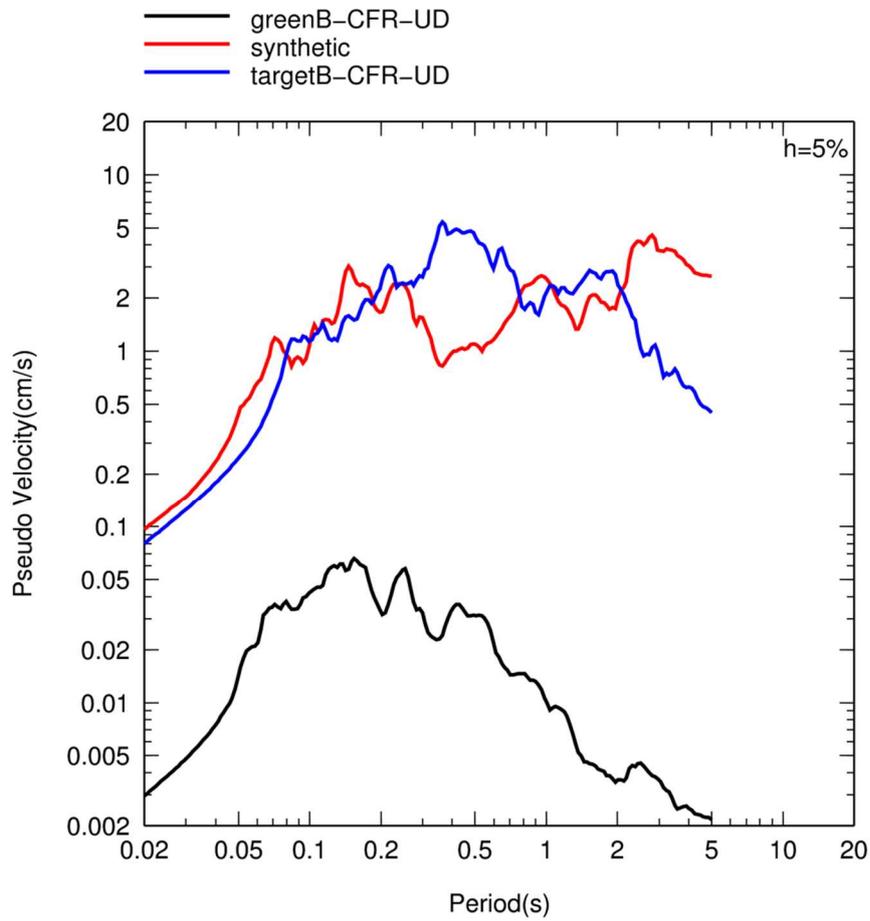
targetB-19860830-CFR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-4 CFR における合成結果 (EW 成分)



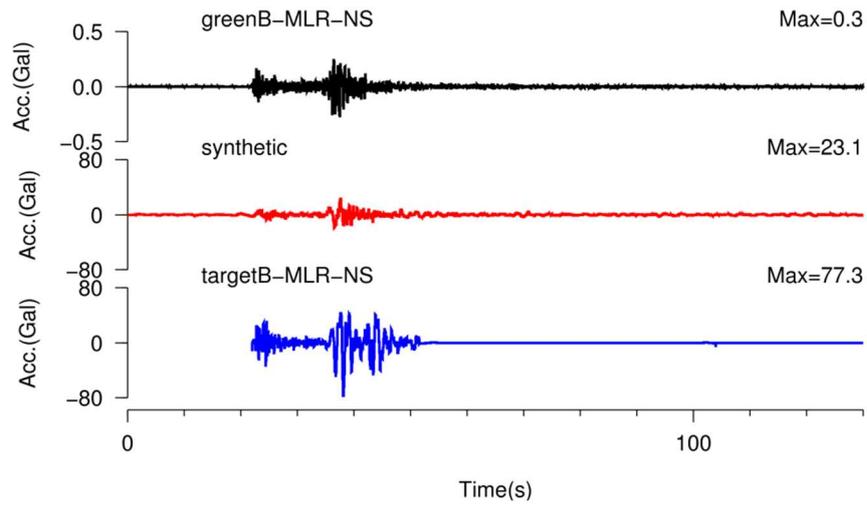
a) 加速度波形



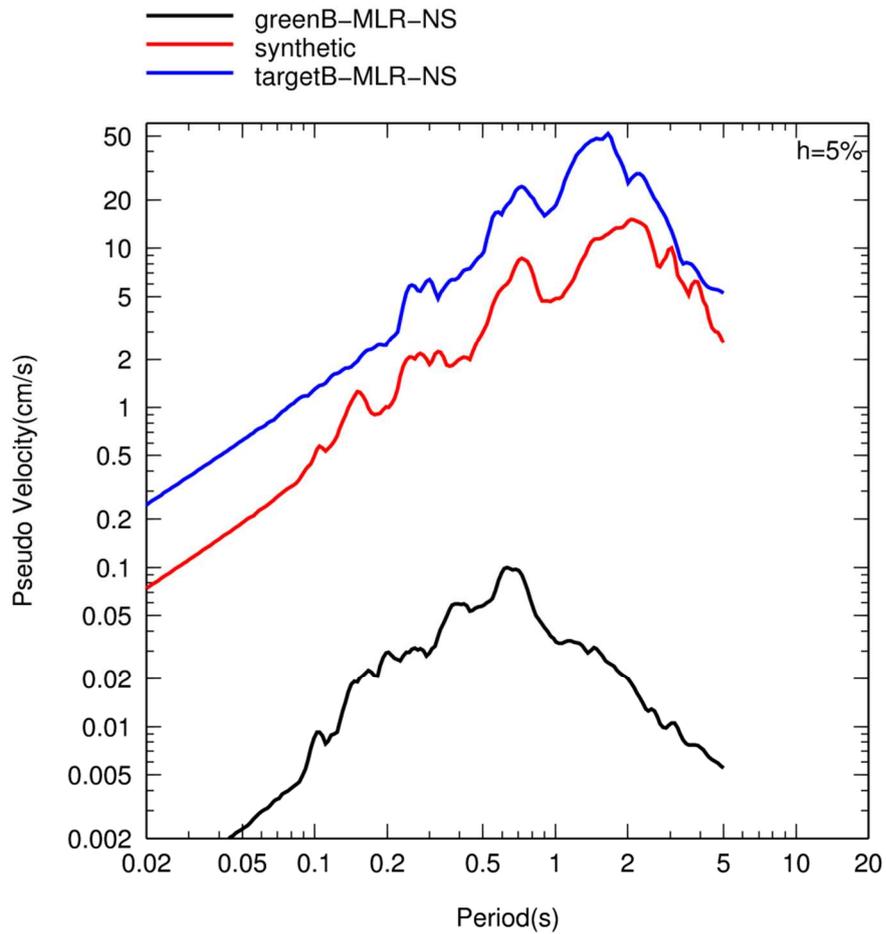
targetB-19860830-CFR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-5 CFR における合成結果 (UD 成分)



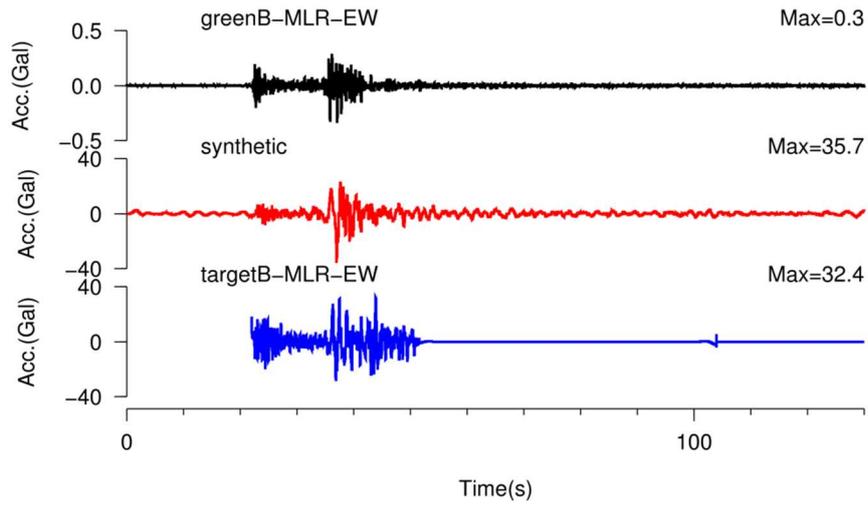
a) 加速度波形



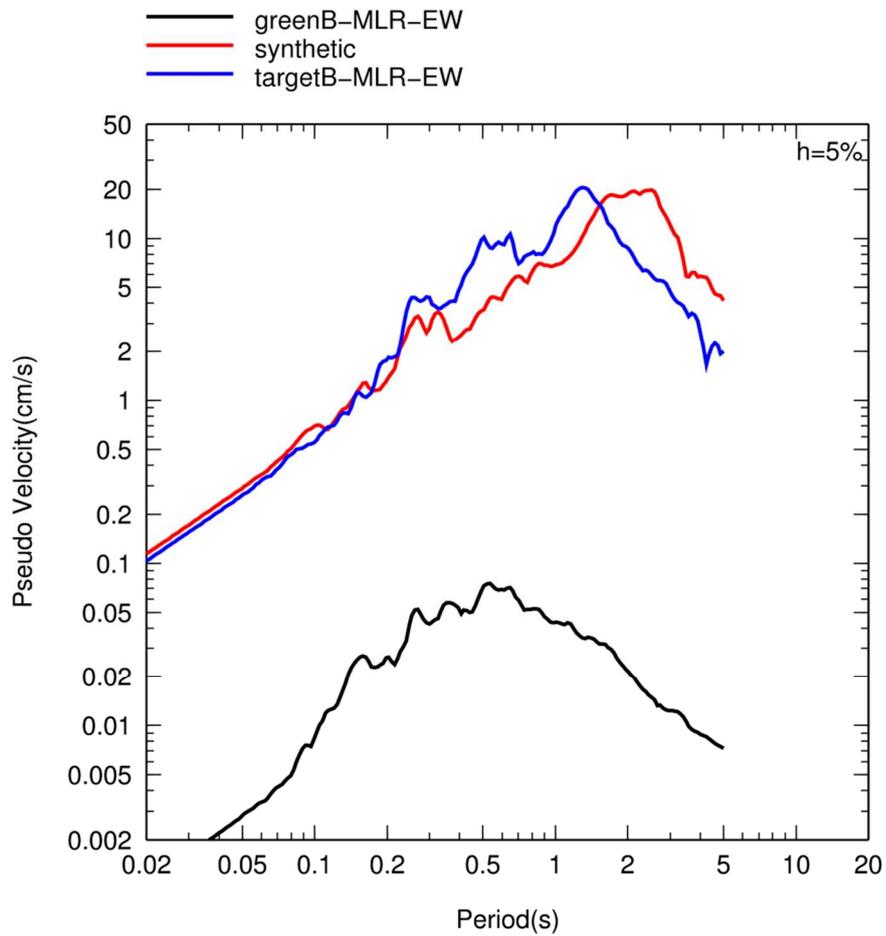
targetB-19860830-MLR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-6 MLR における合成結果 (NS 成分)



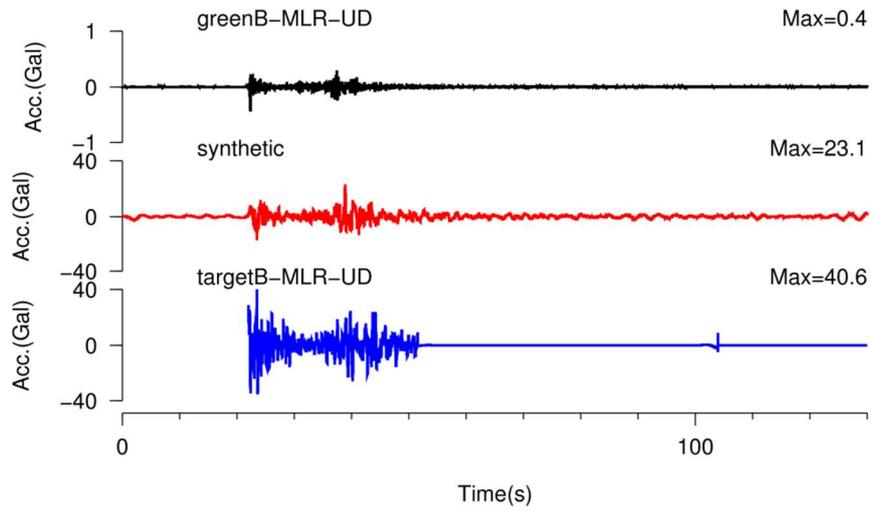
a) 加速度波形



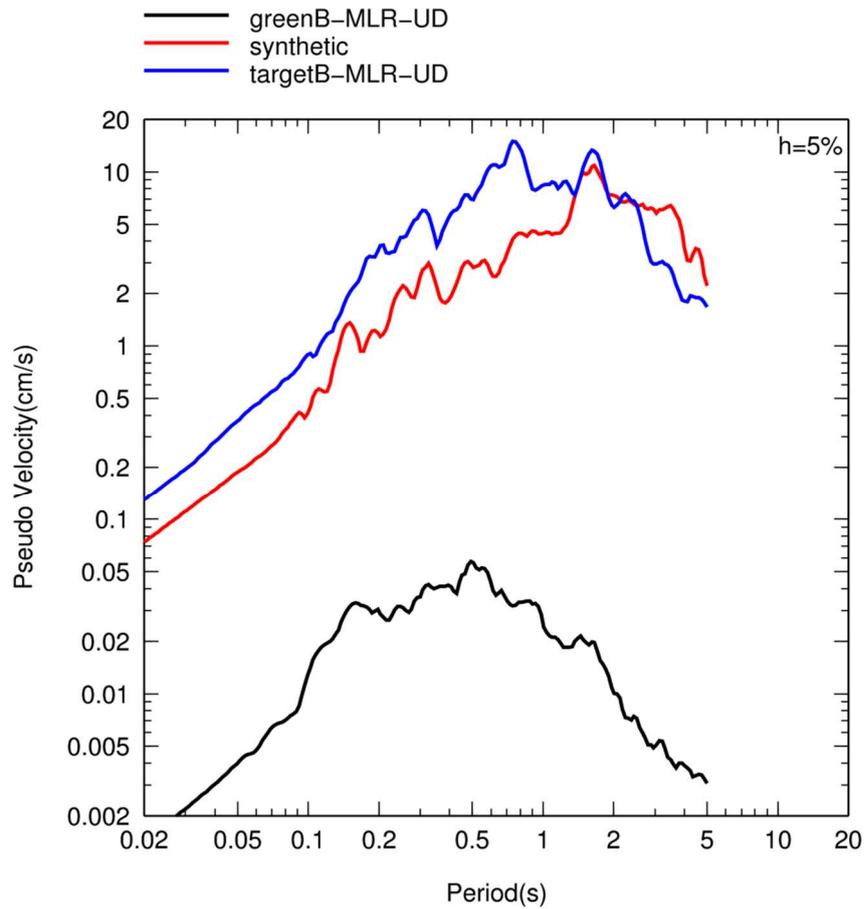
targetB-19860830-MLR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-7 MLR における合成結果 (EW 成分)



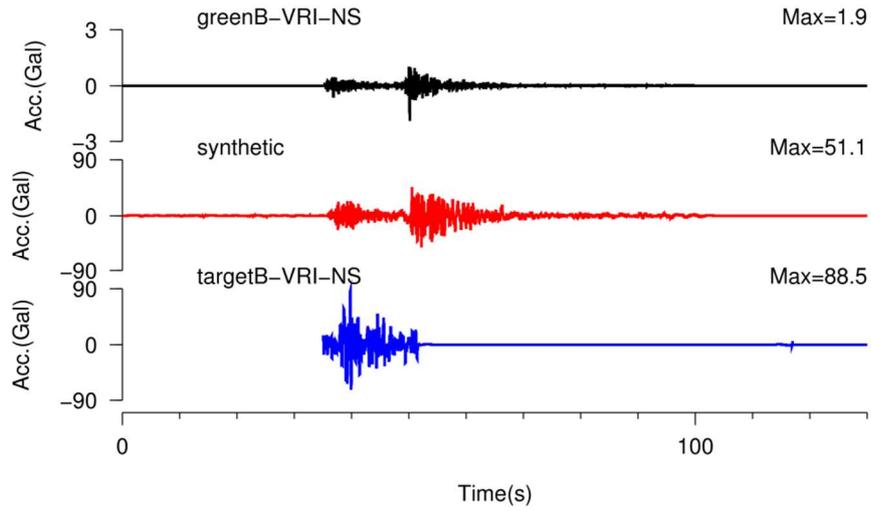
a) 加速度波形



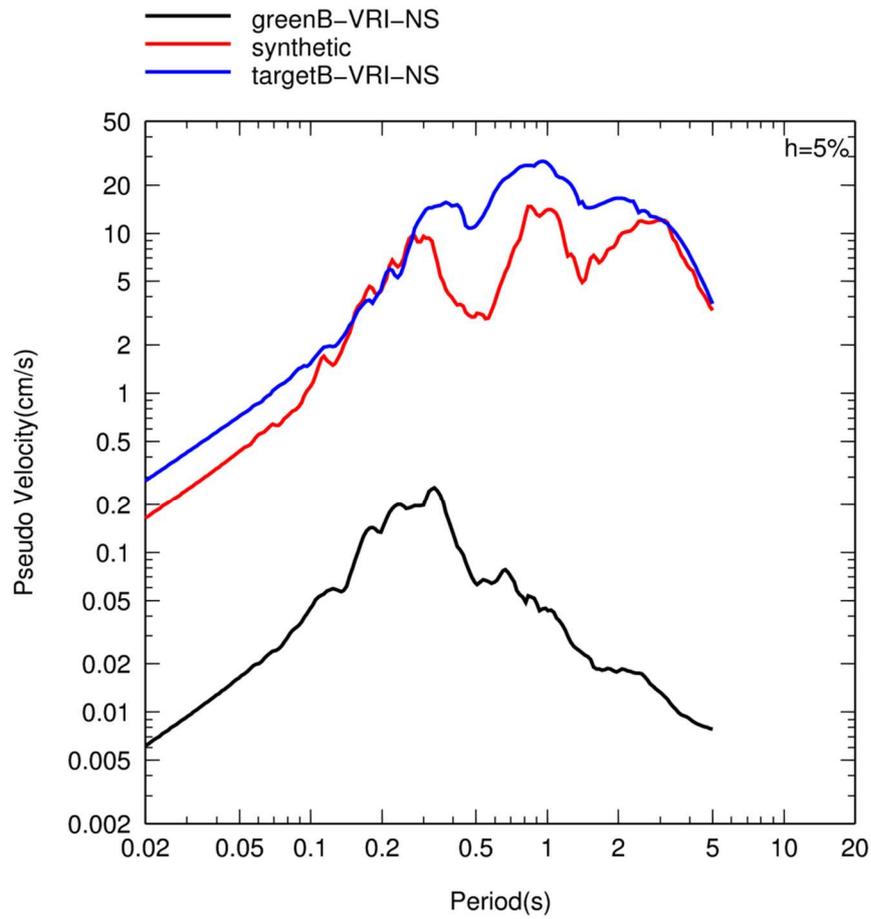
targetB-19860830-MLR

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-8 MLR における合成結果 (UD 成分)



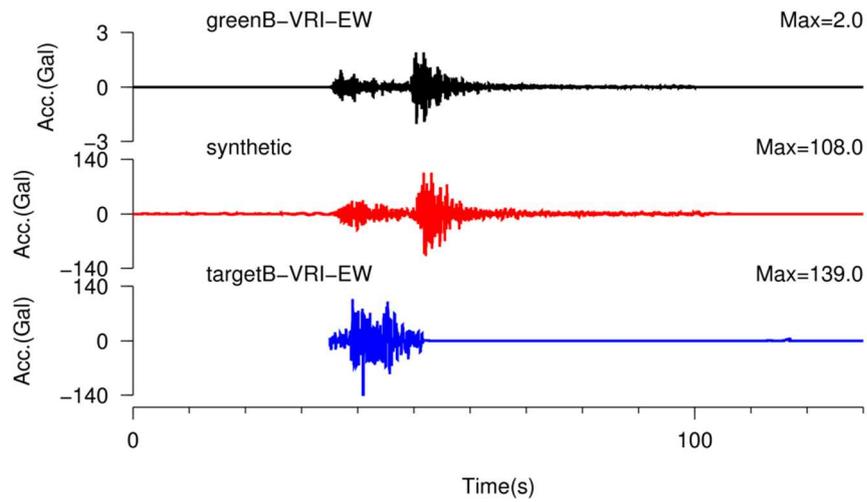
a) 加速度波形



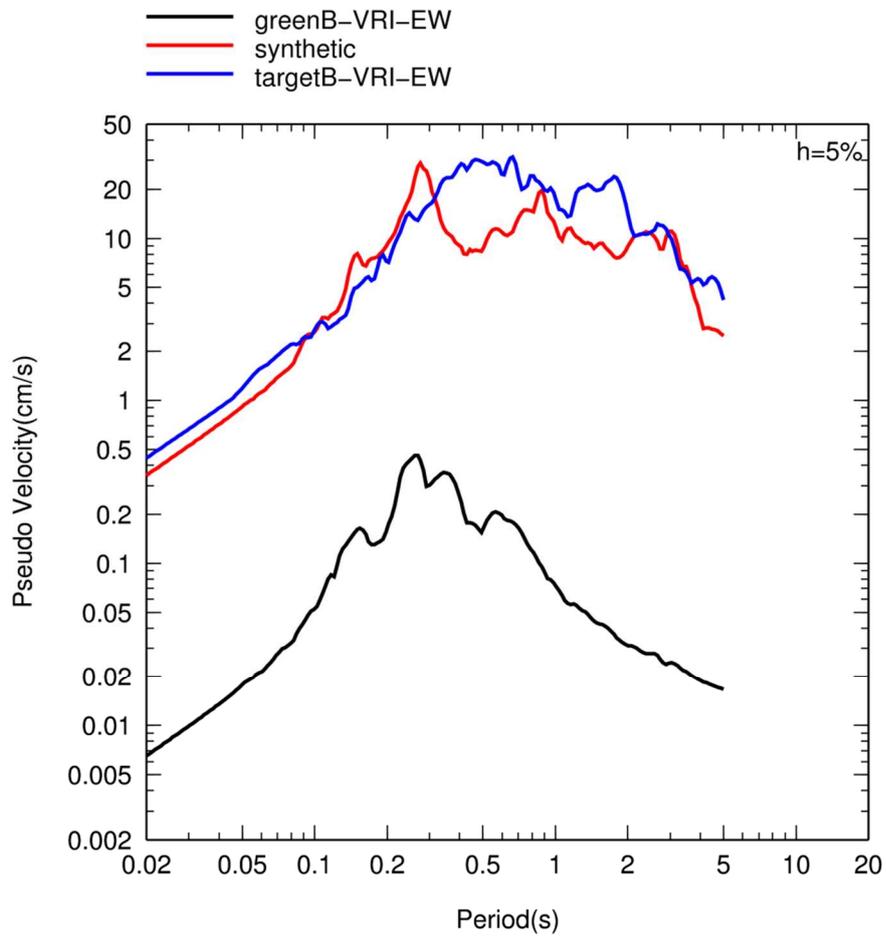
targetB-19860830-VRI

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-9 VRI における合成結果 (NS 成分)



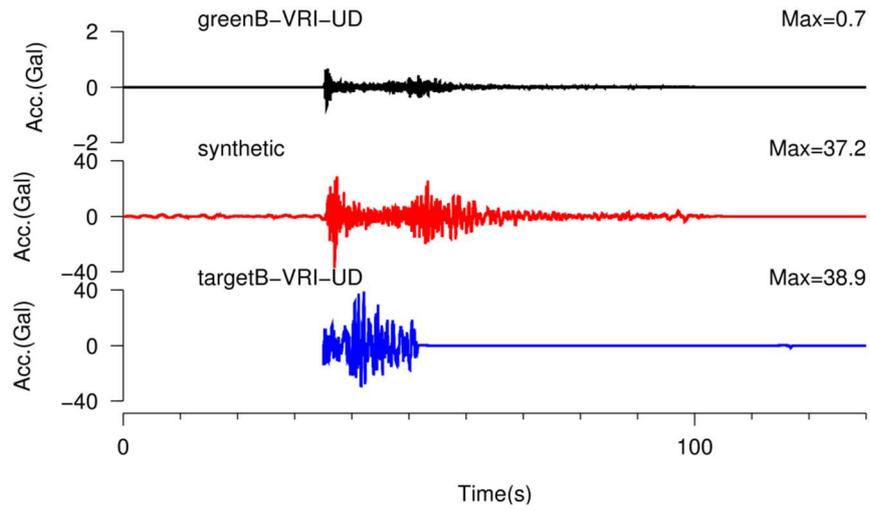
a) 加速度波形



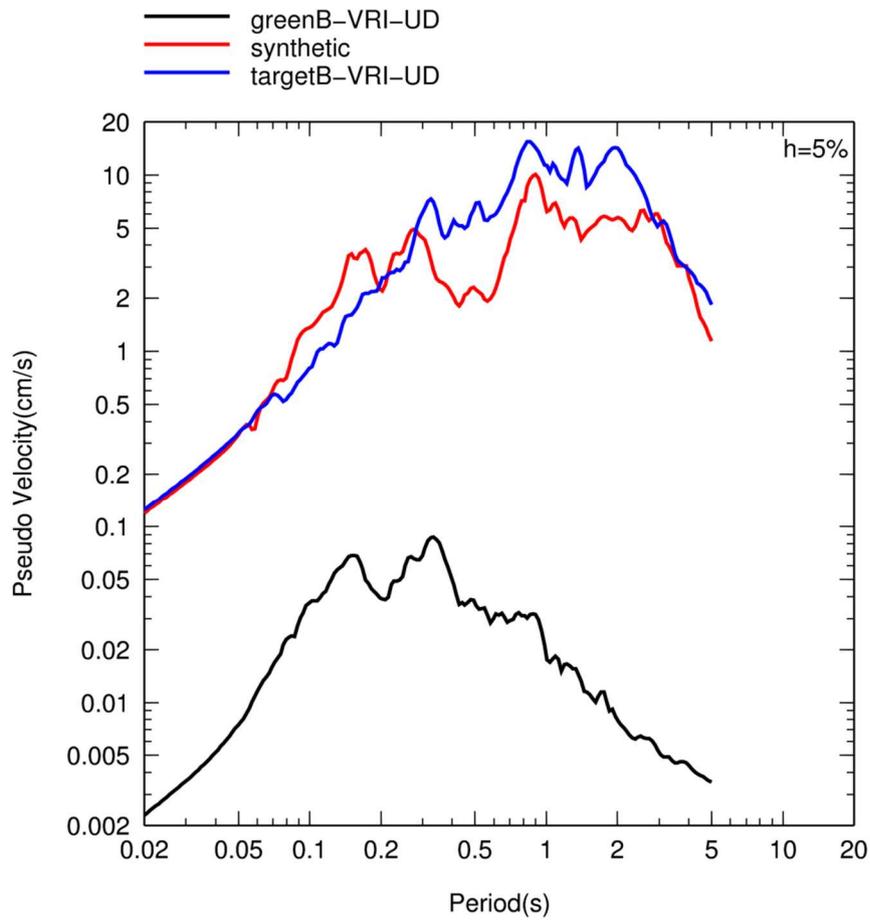
targetB-19860830-VRI

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-10 VRI における合成結果 (EW 成分)



a) 加速度波形



targetB-19860830-VRI

b) 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図 4.4-11 VRI における合成結果 (UD 成分)

5. 結 論

海洋プレート内地震の地震動評価の精度向上のため、国内外で起きた海洋プレート内地震の地震動特性及び地震動評価について情報収集・整理し、地域的な震源特性を調査した。

国内の海洋プレート内地震の震源特性の調査では、スラブ内地震の地震動特性および断層パラメータの設定方法に関する文献を調査するとともに、スラブ内地震およびアウターライズ地震の断層パラメータに関する調査・分析を行った。国内のスラブ地震の場合、地震モーメントと短周期レベルの関係、および地震モーメントとアスペリティの面積の関係は笹谷・他(2006)による経験的關係式に、震源深さと短周期レベルの関係は佐藤(2013)による経験的關係式に概ね整合していることがわかった。国内のアウターライズ地震の場合、地震モーメントと短周期レベルの関係、および震源深さと短周期レベルの関係は、短周期レベルの求め方の違いにより異なる傾向が見えるが、その原因は計算に用いられたQ値の差と考えられ、今後、海底地震計の観測記録を用いたQ値の検討が望まれる。また、アウターライズ地震の地震モーメントとアスペリティの面積の関係は笹谷・他(2006)による経験的關係式に概ね整合していることもわかった。

国外の海洋プレート内地震の震源特性の調査では、スラブ内地震の地震動特性およびスケーリング則に関する文献を調査するとともに、スラブ内地震の断層パラメータに関する調査・分析を行った。国外のスラブ地震の場合、地震モーメントと短周期レベルの関係、および地震モーメントとアスペリティの面積の関係は笹谷・他(2006)による経験的關係式に、震源深さと短周期レベルの関係は佐藤(2013)による経験的關係式に概ね整合しており、ある程度のばらつきはあるがスラブ別の差は小さかった。

国外の海洋プレート内地震の地震動評価では、国外のスラブ内地震の地震動解析事例を調査するとともに、ルーマニアのスラブ内地震を対象に、地震観測記録を収集し、経験的グリーン関数法による地震動再現解析を行った。解析の結果、ターゲットの地震の最大加速度はほぼ再現できているが、主要動部分の継続時間や、速度応答スペクトルの中間周期帯域が過小評価になっている。今後、破壊開始点や破壊伝播速度、および重ね合わせ数による影響を調べながら、解析結果の改善策について検討する必要がある。

参考文献

- 1) Abe, Katsuyuki: Mechanics and tectonic implications of the 1966 and 1970 Peru earthquakes, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 5, pp. 367-379, 1972.
- 2) 青井真・関口春子・功刀卓・本多亮・藤原広行: 近地強震動記録による宮城県北部の地震(2003/05/26, 18:24)の震源インバージョン, 防災科学研究所(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/miyagi/toppage.html> 2017/2/16 アクセス), 2003.
- 3) 青井真・関口春子・功刀卓・森川信之・本田亮・藤原広行: 近地強震波形記録を用いた波形インバージョンによる 2003 年宮城県沖地震の震源破壊過程, 月刊 地球, pp. 29-34, 2005.
- 4) 新井健介・壇一男・石井透・花村正樹・藤原広行・森川信之: 強震動予測のためのスラブ内地震の断層パラメータ設定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 716 号, pp. 1537-1547, 2015.
- 5) 浅野公之・岩田知孝: 経験的グリーン関数法による 2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震 (M_{JMA} 6.5)の震源モデルの推定と強震動シミュレーション, 北海道大学地球物理学研究報告, No. 73, pp. 137-147, 2010.
- 6) Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura: Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth, Planets and Space*, Vol. 55, pp. e5-e8, 2003.
- 7) Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura: Characterization of source models of shallow intraslab earthquakes using strong motion data, *Proceedings of 13th WCEE*, no. 835, 2004.
- 8) 浅野公之・岩田知孝・入倉孝次郎: 2003 年 5 月 26 日宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 地震, 第 2 輯, 第 57 巻, pp. 171-185, 2004.
- 9) Atkinson, G. M. and D. M. Boore: Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, pp. 1703-1729, 2003.
- 10) Baker, Glenn Eli and Charles A. Langston: Source parameters of the 1949 magnitude 7.1 south Puget Sound, Washington, earthquake as determined from long-period body

- waves and strong ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 5, pp. 1530-1557, 1987.
- 11) 防災科学研究所：2001年4月3日静岡県中部の地震活動，地震予知連絡会会報，第66巻，5-4，pp. 241-244，2001.
 - 12) Brune, James N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009, 1970.
 - 13) 壇一男・武藤尊彦・宮腰淳一・渡辺基史：スラブ内地震による強震動を予測するための特性化震源モデルの設定方法，日本建築学会構造系論文集，No. 600，pp. 35-42，2006.
 - 14) 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，No. 545，pp. 51-62，2001.
 - 15) Dan, K., T. Watanabe, and T. Tanaka: A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of the Architectural Institute of Japan)*, No. 396, pp. 27-36, 1989.
 - 16) Delouis, Bertrand and Denis Legrand: M_w 7.8 Tarapaca intermediate depth earthquake of 13 June 2005 (northern Chile): Fault plane identification and slip distribution by waveform inversion, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L01304, 2007.
 - 17) Garcia, Daniel, Shri Krishna Singh, Miguel Herraiz, Javier Francisco Pacheco, and Mario Ordaz: Inslab earthquakes of central Mexico: Q, source spectra, and stress drop, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 3, pp. 789-802, 2004.
 - 18) Garcia, Daniel, Shri Krishna Singh, Miguel Herraiz, Mario Ordaz, and Javier Francisco Pacheco: Inslab earthquakes of central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 6, pp. 2272-2282, 2005.
 - 19) Geller, R. J., Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 66, No. 5, pp. 1501-1523, 1976.

- 20) 原田怜・釜江克宏: 2011年4月7日宮城県沖のスラブ内地震の震源のモデル化, 京都大学原子炉実験所 (http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku2/20110407_miyagioki_slab.pdf 2017/2/16 アクセス), 2011.
- 21) Harada S., K. Kamae, H. Kawabe, and H. Uebayashi: Source modeling of the off Miyagi intraslab earthquake ($M_{JMA} = 7.1$) occurred on April 7, 2011, Proceedings of 15th WCEE, 2012.
- 22) Hernandez, B., N. M. Shapiro, S. K. Singh, J. F. Pacheco, F. Cotton, M. Campillo, A. Iglesias, V. Cruz, J. M. Gomez, and L. Alcantara: Rupture history of September 30, 1999 intraplate earthquake of Oaxaca, Mexico ($M_w=7.5$) from inversion of strong-motion data, Geophysical Research Letters, Vol. 28, No. 2, pp. 363-366, 2001.
- 23) 引間和人・山中佳子・瀬瀬一起・菊地正幸: 強震動・遠地実体波による2003年5月26日宮城県沖の地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, p.179, 2003.
- 24) Ichinose, Gene A., Hong Kie Thio, and Paul G. Somerville: Rupture process and near-source shaking of the 1965 Seattle-Tacoma and 2001 Nisqually, intraslab earthquakes, Geophysical Research Letters, Vol. 31, L10604, 2004.
- 25) Ichinose, Gene A., Hong Kie Thio, and Paul G. Somerville: Moment tensor and rupture model for the 1949 Olympia, Washington, earthquake and scaling relations for Cascadia and global intraslab earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 1029-1037, 2006.
- 26) 池田孝: 観測記録に基づいたスラブ内地震の短周期レベル, 北海道大学地球物理学研究報告, No.73, pp. 71-85, 2010.
- 27) 池田孝・武村雅之・加藤研一: 強震記録に基づくフィリピン海プレート内で発生するスラブ内地震の高振動数成分の励起特性- 北海道・東北地方のスラブ内地震との比較-, 日本建築学会構造系論文集, 第586号, pp. 53-61, 2004.
- 28) 池田孝・武村雅之・加藤研一: 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, 2002.
- 29) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156, 1986.

- 30) 入倉孝次郎：震源のモデル化と強震動予測，地震，第 46 卷，第 4 号，pp. 495-512，1994.
- 31) Iwata, Tomotaka and Kimiyuki Asano: Characterization of the heterogeneous source model of intraslab earthquakes toward strong ground motion prediction, Pure and Applied Geophysics, Vol. 168, pp. 117-124, 2011.
- 32) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），(http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf 2017/2/22 アクセス)，2016.
- 33) Kakehi, Y.: Analysis of the 2001 Geiyo, Japan, earthquake using high-density strong ground motion data: Detailed rupture process of a slab earthquake in a medium with a large velocity contrast, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, B08306, 2004.
- 34) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 20, pp. 2981-2987, 1997.
- 35) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 3, pp. 879-897, 2006.
- 36) 川端渉・笹谷努・高井伸雄・前田宣浩：2007 年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源特性，日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM)，pp. 275-280，2010.
- 37) 川辺秀憲・釜江克宏・上林宏敏：2009 年駿河湾の地震(Mj6.5)の震源モデル，日本建築学会大会(北陸)，pp.707-708，2010.
- 38) 菊地正幸：リアルタイム地震学，東京大学出版，pp. 142-143，2003.
- 39) Kikuchi, M., and H. Kanamori: The Shikotan earthquake of October 4, 1994: lithospheric earthquake, Geophysical Research Letters 22, pp. 1025-1028, 1995.
- 40) 国土地理院：2003 年 5 月 26 日宮城県沖の地震に伴う地殻変動について，地理院報道発表資料 5 月 26 日(<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003-0527.html> 2017/2/16 アクセス)，2003.

- 41) 倉橋奨・入倉孝次郎・宮腰研・正木和明: 2009年駿河湾を震源とする地震の震源モデルの構築と波形シミュレーション, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, P1-20, p.160, 2009.
- 42) Malgrange, M. and R. Madariaga: Complex distribution of large thrust and normal fault earthquakes in the Chilean subduction zone, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 73, pp. 489-505, 1983.
- 43) 宮原有史・笹谷努・高井伸雄・重藤迪子: 経験的グリーン関数法を用いた2011年3月11日三陸沖アウターライズ地震($M_w7.6$)の震源モデルの再検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2構造II, pp. 319-320, 2013.
- 44) 森川信之・藤原広行: スラブ内地震のスケーリング則(2), 地球惑星科学関連学会2002年合同大会予稿集, S042-P013, 2002.
- 45) Morikawa, N., and H. Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, No.5, pp.878-888, 2013.
- 46) Morikawa, N., and T. Sasatani: Source models of two large intraslab earthquakes from broadband strong ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, pp. 803-817, 2004.
- 47) 森川信之・笹谷努・藤原広行: 経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002.
- 48) 野津厚: 表層地盤の非線形挙動を考慮した1993年釧路沖地震の強震動シミュレーション, *土木学会地震工学論文集*, Vol. 27, No. 0202, pp. 1-8, 2003.
- 49) 野津厚: 2009年8月11日駿河湾の地震($M_j6.5$)の特性化震源モデル, 日本建築学会大会(北陸), pp.705-706, 2010.
- 50) Ohta, Y., S. Miura, M. Ohzono, S. Kita, T. Iinuma, T. Demachi, K. Tachibana, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Suzuki, T. Sato, N. Uchida, A. Hasegawa, and N. Umino: Large intraslab earthquake (2011 April 7, M 7.1) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0): Coseismic fault model based on the dense GPS network data, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 1207-1211, 2011.

- 51) Okada, T. and A. Hasegawa: The M7.1 May 26, 2003 off-shore Miyagi prefecture earthquake in northeast Japan: Source process and aftershock distribution of an intra-slab event, *Earth Planets Space*, Vol. 55, pp. 731-739, 2003.
- 52) 岡崎由佳・笹谷努・高井伸雄: 2005年三陸沖アウターライズ地震(M_w7.0)の震源のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 構造Ⅱ, pp. 109-110, 2011.
- 53) Oth, Adrie, Friedemann Wenzel, and Mircea Radulian: Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions modeling, *Tectonophysics*, Vol. 438, pp. 33-56, 2007.
- 54) Parameswaran, Revathy M. and Kusala Rajendran: 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, 2016.
- 55) Santoyo, Miguel A., Shri K. Singh, and Takeshi Mikumo: Source process and stress change associated with the 11 January, 1997 (M_w=7.1) Michoacan, Mexico inslab earthquake, *Geofisica Internacional*, Vol. 44, No. 4, pp. 317-330, 2005.
- 56) 笹谷努・森川信之・前田宣浩: スラブ内地震の震源特性, 北海道大学地球物理学研究報告, No. 69, pp. 123-134, 2006.
- 57) Sasatani, T., N. Takai, M. Shigefuji, Y. Miyahara, W. Kawabata, and Y. Okazaki: Source characteristics of large outer rise earthquakes in the Pacific Plate, *Proceedings of 15th WCEE*, 2012.
- 58) 佐藤智美: 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, 2004.
- 59) 佐藤智美: 2009年駿河湾の地震の短周期レベルと距離減衰特性, 日本地震学会大会, p. 161, 2009.
- 60) 佐藤智美: スペクトルインバージョンと経験的グリーン関数法に基づく2009年駿河湾の地震の震源モデルの推定, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第658号, pp. 2153-2162, 2010.
- 61) 佐藤智美: 東北地方のアウターライズ地震, 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87巻, 第689号, pp. 1227-1236, 2013.

- 62) 関口春子・岩田知孝: 2001年芸予地震の破壊過程と強震動, 月刊地球号外 No. 38, pp. 239-246, 2002.
- 63) Seno, Tetsuzo and Masaki Yoshida: Where and why do large shallow intraslab earthquakes occur?, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 141, pp. 183-206, 2004.
- 64) 司宏俊・翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 63-70, 1999.
- 65) Si, H., S. Midorikawa, H. Tsutsumi, C. Wu, T. Masatsuki, and A. Noda: Preliminary Analysis of Attenuation Relationship for Response Spectra on Bedrock based on Strong Motion Records Including the 2011 M_w 9.0 Tohoku Earthquake, 10CUEE CONFERENCE PROCEEDINGS 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.113-117, 2013.
- 66) 芝良昭・野口科子: 広帯域地震動を規定する震源パラメータの統計的特性-震源インバージョン解析に基づく検討-, 地球工学研究所 電力中央研究所報告書, N11054, pp.1-28, 2012.
- 67) Singh, S. K., X. Perez-Campos, V. H. Espindola, V. M. Cruz-Atienza, and A. Iglesias: Intraslab earthquake of 16 June 2013 (M_w 5.9), one of the closest such events to Mexico City, Seismological Research Letters, Vol. 85, No. 2, pp. 268-277, 2014.
- 68) 染井一寛・宮腰研・入倉孝次郎: 強震波形インバージョンから推定した2011年4月7日宮城県沖のスラブ内地震の震源過程, 日本地震学会大会, P3-50, p. 251, 2012.
- 69) 染井一寛・宮腰研・岡崎敦: 経験的グリーン関数法から推定した2011年4月7日宮城県沖のスラブ内地震の震源モデル, 日本建築学会大会, pp. 85-86, 2012.
- 70) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for prediction of strong motion, Seismological Research Letters, Vol. 70, pp. 59-80, 1999.
- 71) Strasser, F. O., M. C. Arango, and J. J. Bommer: Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude, Seismological Research Letters, Vol. 81, 2010.

- 72) Suzuki, W., S. Aoi, and H. Sekiguchi: Rupture process of the 2008 northern Iwate, intraslab, earthquake derived from strong motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 99, pp. 2825-2835, 2009.
- 73) Takeo, M., S. Ide, and Y. Yoshida: The 1993 Kushiro-Oki Japan earthquake A high stress-drop event in a subducting slab, *Geophysical research Letters*, Vol. 20, No. 23, pp. 607-2610, 1993.
- 74) Tanioka, Yuichiro, Kenji Satake, and Larry Ruff: Analysis of seismological and tsunami data from the 1993 Guam earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 144, pp. 823-837, 1995.
- 75) 上野寛・迫田浩司・吉田康宏: 近地強震波形を用いた駿河湾の地震(平成 21 年 8 月 11 日;Mj6.5)の震源過程解析, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, P1-19, p.160, 2009.
- 76) Vallee, Martin, Michel Bouchon, and Susan Y. Schwartz: The 13 January 2001 El Salvador earthquake: Amultidata analysis, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B4, 2003.
- 77) 八木勇治: 2003 年 5 月 26 日宮城県沖で発生した地震(M_{jma} 7.0)の震源過程, 建築研究所 (http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/east_honshu20030526/east_honshu20030526-j.html 2017/2/16 アクセス), 2003.
- 78) Yagi and Kikuchi: Rupture process of the Geiyo earthquake of March 24, 2001 (Mw 6.7) (Reserved on March 9, 2001) (<http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/Aki-nada/>), 2001.
- 79) 山中佳子: 4 月 7 日宮城沖地震(M7.4), 名古屋大学地震 火山・防災研究センター リアルタイム地震学・NGY地震学ノート, No. 37, (http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2011/NGY37.html 2017/2/16 アクセス), 2011.
- 80) 山中佳子・菊地正幸: 5 月 26 日宮城県沖地震 (Mj7.0) 東京大学・地震火山情報センター・EIC 地震学ノート (http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/030526n.html 2017/2/16 アクセス), No. 135, 2003.
- 81) Zhao, J. X., F. Jiang, P. Shi, H. Xing, H. Huang, R. Hou, Y. Zhang, P. Yu, X. Lan, D. A. Rhoades, P. G. Somerville, K. Irikura, and Y. Fukushima: Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class

and Simple Geometric Attenuation Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 4, pp. 1535-1551, 2016.

- 82) Zhou, Y. H., L. S. Xu, and Y. T. Chen: Source process of the 4 June 2000 southern Sumatra, Indonesia, earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, No. 5, pp. 2027-2035, 2002.