

3.4.5.2 スラブ内地震による強震動予測の高度化に関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

「震源断層モデル等の構築」のうち、スラブ内地震とプレート間地震との震源モデルの比較に関連する。スラブ内地震は、内陸地殻内地震やプレート間地震に比べて、短周期地震波を強く励起することが知られている。この特性を考慮した強震動予測手法の高度化が望まれている。このためには、以下の項目について研究する必要がある。

- ・スラブ内地震の震源特性評価の高度化
- ・地盤の非線形応答評価の高度化

(b) 平成22年度業務目的

海洋プレート内で発生する地震として、沈み込んだ海洋プレート内で発生するスラブ内地震と沈み込む前の海溝の海洋側海洋プレート内で発生するアウターライズ地震とがある。後者の例として、1933年三陸沖巨大アウターライズ地震(Mw8.1)が知られているが、この地震による強震動記録は限られており、その震源モデルの詳細は不明である。

2007年1月13日に千島列島中部で巨大アウターライズ地震(Mw8.1)が発生し、北海道の4観測点で良好な強震動記録が得られている。本研究では、アウターライズ地震の震源特性を明らかにする目的で、経験的グリーン関数法を用いて、2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源モデルを推定する。そして、得られた震源パラメータの特徴を既存のスラブ内地震のスケールリング則に照らして検討する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
北海道大学大学院工学研究科	准教授	高井伸雄	
	元教授	笹谷 努	

(2) 平成22年度の成果

(a) 業務の要約

- ・2007年千島列島中部アウターライズ地震(Mw8.1)による震度分布は、この地震の2ヶ月前にほぼ同じ領域で発生した2006年千島列島中部プレート間地震(Mw8.3)よりも広い有感域を有しており、これは、海洋プレート内部で発生する地震が、プレート間地震に比べて短周期地震波を強く励起することを意味している。
- ・経験的グリーン関数法を用いて推定した2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震は、6個の強震動生成領域(SMGA)を有していることがわかった。
- ・極めて浅い地震でありながら、2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震のSMGAの総面積、応力降下量、短周期レベル等の震源パラメータは、既存のスラブ内地震のスケールリング則とほぼ整合していることがわかった。

(b) 業務の成果

1) はじめに

2006年11月15日に千島列島中部でMw8.3の巨大地震が発生した。また、このわずか2ヶ月の後の2007年1月13日にほぼ同じ場所でMw8.1の巨大地震が再び発生した。前者は大陸プレートと海洋プレートの境界で起きたプレート間地震で、後者は海溝の外側の海洋プレート内部で発生したアウターライズ地震である。両地震の震度分布を図1に示す。何れも北海道太平洋側を中心に揺れているが、有感域をみるとMwの小さいアウターライズ地震の方がより広い有感域を有し、震源から1500km以上離れた関東平野においても震度1~2が観測されている。これは、沈み込んだプレート内で発生するスラブ内地震において良く知られていることであるが、海洋プレート内部で発生する地震は、プレート間地震に比べて短周期地震波を強く励起することを意味している（例えば、Morikawa and Sasatani, 2003¹⁾）。

日本付近では、過去に1933年の三陸沖巨大アウターライズ地震（Mw8.1）が発生しているが、残念ながら、この地震による強震動記録は限られている（植竹・野口、2008²⁾）。よって、2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震は、1933年三陸沖アウターライズ地震の震源特性を考える上で重要な地震である。ここでは経験的グリーン関数法を用いて、千島列島中部で発生した2007年巨大アウターライズ地震の震源モデルを推定する。そして、得られた震源パラメータの特徴を既存のスラブ内地震のスケーリング則に照らして検討する。

2) 地震の概要

2007年アウターライズ地震（以後、本震と呼ぶ）及び経験的グリーン関数法の要素地震として用いる2006年12月7日に発生したMw6.4の地震（以後、前震と呼ぶ）について、Lamont - Doherty Earth ObservatoryのGlobal CMT Projectにより決定された諸元を表1に示す。前震は本震に近接した場所で発生しており、そのメカニズム解も本震と似た正断層である（図2）。

解析に用いる観測記録は、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターの根室観測点(NMR)、厚岸観測点(AKK)、広尾町茂寄観測点(MYR)、恵山観測点(ESH)で得られた広帯域速度記録である。観測点の位置を図2に、観測点の情報を表2に示す。観測された本震と前震の加速度記録の一例を図3に示す。本震のS波継続時間は、約80秒である。前震のS波は、時間とともに単純に減衰する包絡形状を有するが、本震のS波の包絡形状は、時間とともに減衰することが無く、約70秒後に再び大きくなってから減衰している。また、本震の最大加速度(PGA)は、前震よりも10倍以上大きい。

3) 本震の震源モデル

ここでは、以下に述べる経験的グリーン関数法（三宅・他、1999³⁾）を用いて本震の震源モデルを推定する。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{r}{r_{ij}} \right) \cdot F(t) * (C \cdot u(t)) \quad (1)$$

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'(1 - \exp(-1))} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[\exp\left\{-\frac{(k-1)}{(N-1)n'}\right\} \cdot \delta\left\{t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'}\right\}\right] \quad (2)$$

$$t_{ij} = (r_{ij} - r) / V_s + \xi_{ij} / V_r \quad (3)$$

ここで、 $U(t)$ は大地震に対する合成波形、 $u(t)$ は要素地震の観測記録、 N は大地震と要素地震の断層長さの比、 C はそれらの応力降下量の比、 $*$ はたたみ込み積分を意味する。 $F(t)$ は大地震と要素地震のすべり時間関数の違いを表現する補正関数であり、 τ は大地震の立ち上がり時間である。 t_{ij} は各小断層 (i, j) に対する破壊伝搬と観測点との距離による時刻ずれ、 r は破壊の開始点と観測点の距離、 r_{ij} は各小断層と観測点の距離、 ξ_{ij} は破壊開始点から小断層 (i, j) までの距離、 V_s は S 波速度、 V_r は断層内の破壊伝播速度、 n' は波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための任意の数である (図 4 参照)。

本解析で用いる観測点は、震源からの距離が大きく、また南西方向に偏っているため、これらの記録に対して通常の経験的グリーン関数法による震源モデル化手法を適用することは困難である。ここでは、Ammon *et al.*(2008)⁴⁾ による波形インバージョン結果を参考にする。彼らは、遠地長周期 P 波、SH 波、及びレイリー波のインバージョン解析から、図 5 に示すモーメント解放速度関数 (Moment Rate Function) と断層面上のすべり分布を得ている。この図から、南東に傾く長さ約 200km の断層面の上部約 25km に複数の大きなすべり領域が存在し、破壊は震源 (図 5 下図の座標の原点) から両方向 (南西及び北東) に速度約 3.5km/s で拡大している (同図には、10 秒ごとの破壊フロントが示されている) ことがわかる。破壊の継続時間は約 40 秒である。この破壊モデルを基にして、短周期領域も含んだ広帯域の強震動を生成する領域 (強震動生成領域 (SMGA); 三宅・他、1999³⁾) を経験的グリーン関数法で推定する。図 5 のすべり分布は、複数の SMGA の存在を暗示している。

ここで推定すべきパラメータは、 N と C (前者は、本震と前震の SMGA の大きさとすべりの立ち上がり時間の関係を規定する; 三宅・他、1999³⁾)、各 SMGA の空間的な位置とその破壊開始点及び破壊伝播速度である。また、本解析では、前震の断層面積を強震動記録から直接推定することが困難であるため、これも推定すべきパラメータとしている。さらに、簡単なために、SMGA の形状を正方形と仮定する。上記パラメータの最適値は、合成波形が、観測された変位、速度、加速度波形及び加速度スペクトルの形状を適切に説明するように試行錯誤的に探索される。なお、解析対象周波数は、0.1-20Hz である。この周波数範囲の選択で、観測された長周期 (周期 10 秒以上) の表面波の影響は除かれている。

得られた震源モデルのパラメータを表 3 に、6 個の SMGA の空間配置を図 6 に示す。すべての SMGA は $N=3$ で構成される正方形で、その面積は 18x18 km² となった。各 SMGA の破壊開始点の位置 (□印) と観測点の位置から、SMGA1 と 2 は、観測点に向かう破壊伝播、SMGA3~6 は、観測点とは逆方向に伝播する破壊である。NMR、MYR 観測点での観測波形と合成波形との比較を図 7 に示す。合成加速度のレベルが若干過小評価であるが、変位波形と速度波形の形状及び加速度波形の包絡形状がかなり良く再現できていることがわかる。

得られたパラメータの妥当性を考えるために、各 SMGA からの合成波形を出力し、それぞれの全体の合成波形への寄与について検討した。図 8 は、NMR における加速度波形の例である。SMGA1 と 2 による加速度波形には Forward Directivity 効果が、SMGA3~6 によるそれらには Backward Directivity 効果が期待されるが、これらの加速度波形の包絡形状にはそれほど大きな違いは見られない。SMGA5 と 6 が他と比べて大きな C (表 3 参照) を有するのは、図 8 の時刻約 110 秒で観測値が大きくなっていることを説明するためである。一方、図 9 に示す速度波形の

例では、Forward Directivity 効果と Backward Directivity 効果によって合成波形に大きな違いが生じている。観測された S 破部分の周期約 10 秒の波群は、SMGA1 と 2 の Forward Directivity 効果による寄与でほぼ説明される。観測された速度波形を説明するために SMGA3~6 の寄与は小さい。しかし、これらの SMGA は、図 8 に示すように観測加速度波形を説明するために必要なものである。なお、図 9 の各 SMGA による合成速度波形の特徴は、変位波形でも同じである。

4) 微視的断層パラメータの特徴

推定された断層モデルから得られる微視的断層パラメータを既存のスラブ内地震のスケールング則と比較する。

a) SMGA の面積

推定された断層モデルの SMGA 面積と地震モーメント (M_0) との関係を図 10 に示す。図中の破線は笹谷・他(2006)⁵⁾によるスラブ内地震のアスペリティ面積 (S_a) と M_0 との関係である。前震の SMGA 面積及び本震の SMGA 総面積は、スラブ内地震のスケールング則に比べてやや大きい値であるが、これらは、ばらつきの範囲内にある。なお、ここでは、SMGA 面積とアスペリティ面積とを同様とみなしている (三宅・他、1999³⁾)。

b) 応力降下量

まず、クラックモデルを仮定して、(4) 式から前震の応力降下量 ($\Delta\sigma$) を推定する。

$$\Delta\sigma = (7/16)[M_0/(S/\pi)^{1.5}] \quad (4)$$

ここで、 S は SMGA の面積である。前震の $\Delta\sigma$ は、45MPa である。本震の各 SMGA の応力降下量は、この値にそれぞれの C を乗じることで得られる。表 3 の C から得られた各 SMGA の応力降下量は表 3 に示されている。それらの平均値は、111MPa である。この値を浅野・岩田(2010)⁶⁾によるスラブ内地震の SMGA の応力降下量と深さの関係図に加筆した (図 11)。本震は極めて浅い場所で発生したにも関わらず、その応力降下量は、スラブ内地震と同様に大きな値を有することがわかる。

c) 短周期レベル A

次に、(5) 式から、震源スペクトルの短周期レベルを推定する (壇・他、2002⁷⁾)。

$$A = 4\pi\beta^2 \sqrt{\sum(r_n \Delta\sigma_n)^2} \quad (5)$$

ここで、 r は SMGA の面積を円形とした場合の半径、 β は S 波の速度 (4.6km/s)、添え字 n は複数の SMGA のそれぞれを表す。これまでに得られたパラメータを代入すると、前震と本震の A の値は次のようになる。前震： $A=4.02 \times 10^{19}$ Nm/s/s、本震： $A=7.37 \times 10^{20}$ Nm/s/s。これらの値をスラブ内地震の A - M_0 関係にプロットしたのが図 12 である。これから前震の A は、スラブ内地震のスケールング則にほぼ合致しているが、本震の A は、スケールング則よりも約 2 倍大きいことがわかる。

ここで、以下のことに注意する必要がある。上で推定した応力降下量は、クラックモデルを仮定して得られていることである。つまり、それは、観測された M_0 がすべて SMGA から解放され

たことを意味している。一方、アスペリティモデルに基づくと、観測された M_0 は、アスペリティと背景領域から解放されたものと考えらるべきである。近年の解析結果によると、 M_w6 以上のスラブ内地震の震源はアスペリティモデルで表わされると結論されている(笹谷・他、2006⁵⁾)。この結論に従うと、上で推定された応力降下量は、上限値を与えていると考えらるべきである。同様に、短周期レベルも上限値と考えらるべきである。もし、観測された M_0 の $1/2$ がアスペリティ(SMGA)から解放されたとすると、応力降下量と短周期レベルは、上の推定値の $1/2$ になる。残念ながら、今回の解析では、SMGA の M_0 への寄与率を評価できない。

(c) 結論ならびに今後の課題

2007年千島列島中部アウターライズ地震($M_w8.1$)による震度分布は、この地震の2ヶ月前にほぼ同じ領域で発生した2006年千島列島中部プレート間地震($M_w8.3$)よりも広い有感域を有しており、これから、アウターライズ地震が、スラブ内地震と同様にプレート間地震に比べて短周期地震波を強く励起することがわかった。次に、経験的グリーン関数法を用いて推定した2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震は、6個の強震動生成領域(SMGA)を有していることがわかった。最後に、極めて浅い地震でありながら、2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震のSMGAの面積、応力降下量、短周期レベル等の震源パラメータは、既存のスラブ内地震のスケーリング則とほぼ整合していることがわかった。

2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源モデルは、遠地長周期地震波のインバージョン解析から推定された震源モデルを基にしている。それは、利用できる強震動記録が、震源域から見て南西方向に限られていたからである。よって、より広い方位に分布する強震動記録の解析からアウターライズ地震の高精度な震源モデルを推定することが今後の課題となる。

(d) 引用文献

- 1) Morikawa, N. and Sasatani, T. : Source spectral characteristics of two large intra-slab earthquakes along the southern Kurile-Hokkaido arc, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 137, 67-80, 2003.
- 2) 植竹富一, 野口厚子 : 1933年昭和三陸地震の地震記象と2005年11月15日三陸沖の地震動記録の比較, *歴史地震*, 第23号, 152, 2008.
- 3) 三宅弘恵, 岩田知孝, 入倉孝次郎 : 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日($M_{JMA}6.5$)および5月13日($M_{JMA}6.3$)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, *地震* 2, 51, 431-442, 1999.
- 4) Ammon, C. J., Kanamori, H., and Lay, T. : A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands, *NATURE* Vol.451, doi:10.1038/nature06521, 561-566., SUPPLEMENTARY INFORMATION, 1-10, 2008.
- 5) 笹谷努, 森川信之, 前田宜浩 : 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, 123-134, 2006.
- 6) 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*, No73, 137-147, 2010.

- 7) 壇一男, 佐藤俊明, 入倉孝次郎 :アスペリティモデルに基づく強震動予測のための震源モデルの特性化手法, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 555-560, 2002.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源特性 口頭	川端渉・笹谷努・高井伸雄・前田宜浩	日本建築学会大会（富山大学）	2010年9月	国内
2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源特性 口頭	川端渉・笹谷努・高井伸雄・前田宜浩	第13回日本地震工学シンポジウム（つくば国際会議場）	2010年11月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所（雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
2007年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源特性	川端渉・笹谷努・高井伸雄・前田宜浩	第13回日本地震工学シンポジウム論文集 PaperID:GO3-Thu-PM-1	2010年11月	国内

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成23年度業務計画案

2005年11月15日に正断層のメカニズムを有する Mw7.0 の三陸沖アウターライズ地震が発生している。この地震は、K-NET 等の強震観測網の整備以降初めて発生した大規模なアウターライズ

地震であり、よって、アウターライズ地震の強震動特性及び震源特性を把握する上で極めて重要である。

まず、この地震による大量の強震動データを基にして、既存の最大加速度や擬似速度応答値の距離減衰式と比較することで、アウターライズ地震による強震動特性を明らかにする。次に、経験的グリーン関数法を用いてこの地震の震源モデルを推定し、アウターライズ地震の震源特性について検討する。

表 1 . 本震と前震の地震情報 (Global CMT Project)

Event	Date	Latitude	Longitude	Depth [km]	Moment [Nm]	Mw
Main shock	2007/01/23	46.17	154.80	12.0	1.78×10^{21}	8.1
Foreshock	2006/12/07	46.24	154.44	15.4	4.42×10^{18}	6.4

表 2 . 観測点情報 (距離と方位は本震に対する値)

	NMR	AKK	MYR	ESH
Sensor	VSE-11/12/F	VSE-11/12F	VS3	VSE-11/12F
Frequency Range	0.025~70 Hz	0.025~70 Hz	0.001~100Hz	0.025~70 Hz
Distance	760.8 km	843.5 km	994.2 km	1180.5 km
Azimuth	-112.0 degree	-111.7 degree	-112.4 degree	-109.6 degree

表 3 . 経験的グリーン関数法によって推定された強震動生成領域 (SMGA) のパラメータ

Parameters	SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4	SMGA 5	SMGA 6	EGF event
<i>N</i>	3	3	3	3	3	3	-
<i>C</i>	2.4	2.2	2.2	2.4	2.9	2.8	-
Area [km ²]	324	324	324	324	324	324	36
<i>V_r</i> [km/s]	3.0	2.8	2.8	3.0	2.8	2.6	-
Rise Time [s]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
Rupture Time [s]	5.0	11.0	8.5	19.0	31.0	38.0	-
Stress Drop [MPa]	107	98	98	107	130	125	45

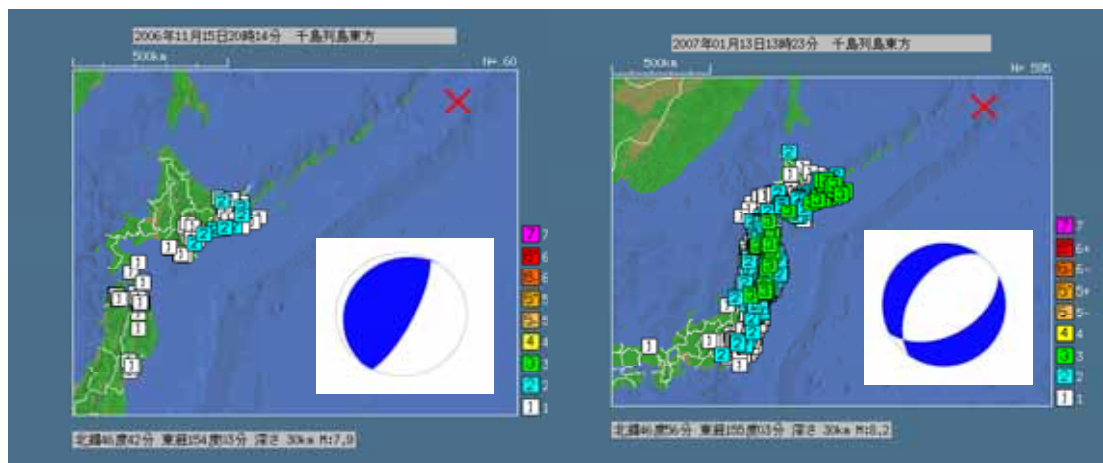


図1. 2006年11月15日プレート間地震(左)と2007年01月13日アウトターライズ地震(右)の震度分布。それぞれのメカニズム解も示されている。

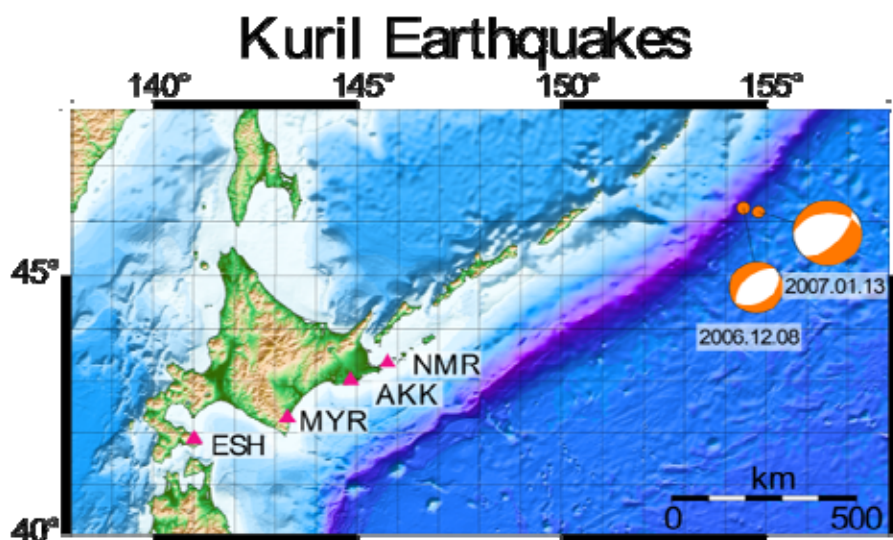


図2. 本震と前震の震央及びメカニズム解と観測点位置。

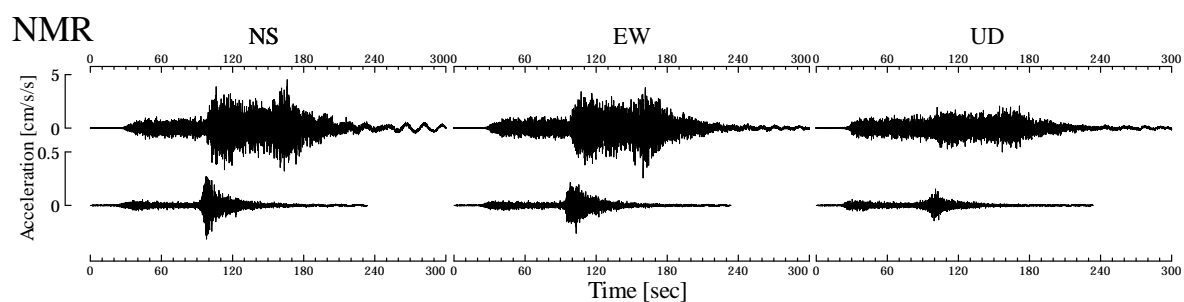


図3. NMR観測点で得られた加速度波形。上段:本震、下段:前震。

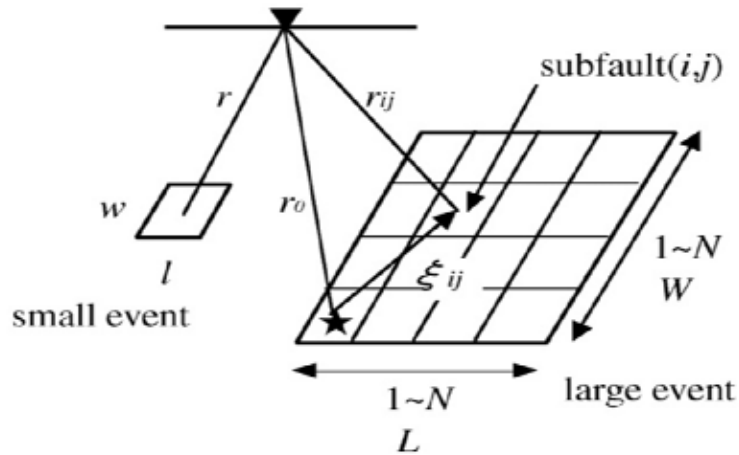


図4. 経験的グリーン関数法の模式図：三宅・他 (1999)³より引用。

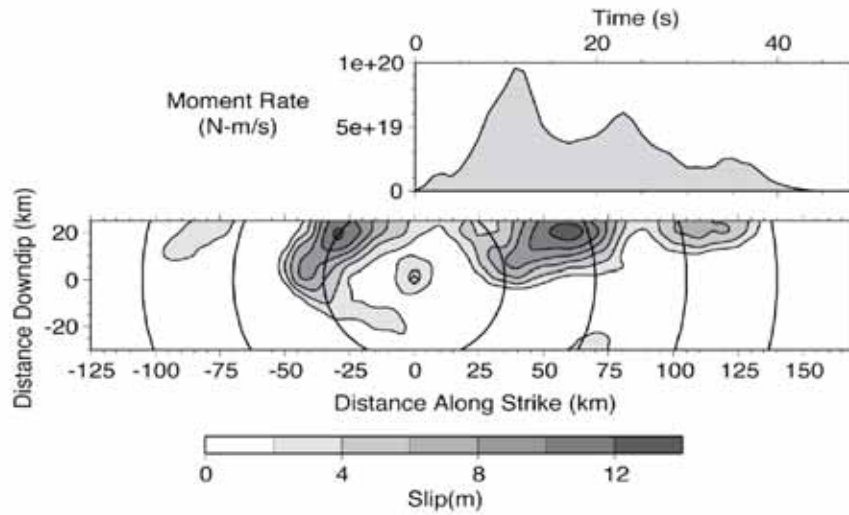


図5. Ammon *et al.* (2008)⁴による 2007 年千島列島中部巨大アウターライズ地震の震源モデル。
上図：モーメント解放速度関数、下図：すべり分布と 10 秒ごとの破壊フロント。

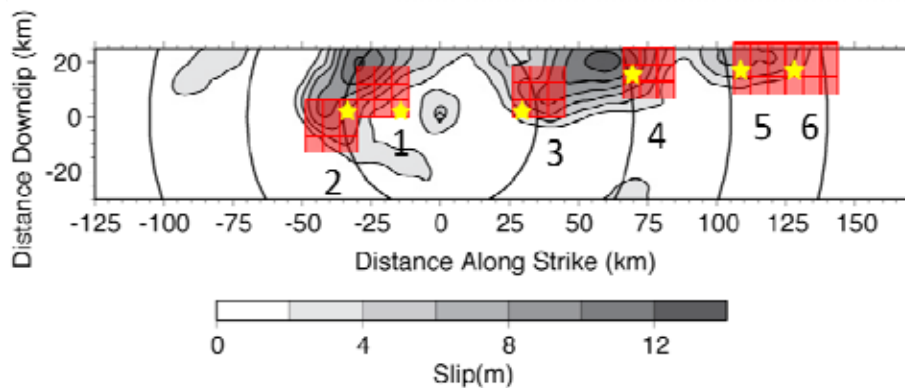


図6 推定された6個のSMGAの位置(Ammon *et al.* (2008)⁴によるすべり分布に加筆されている)。
SMGA 内の は破壊開始点を示す。

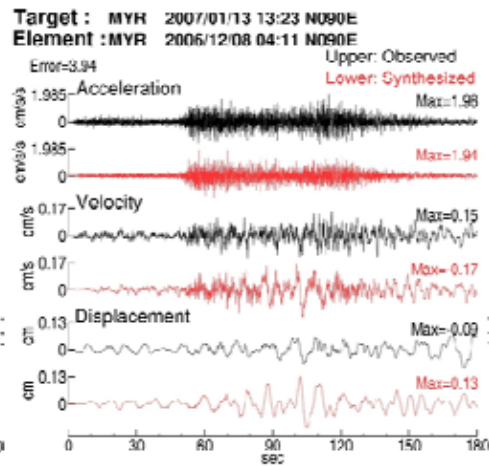
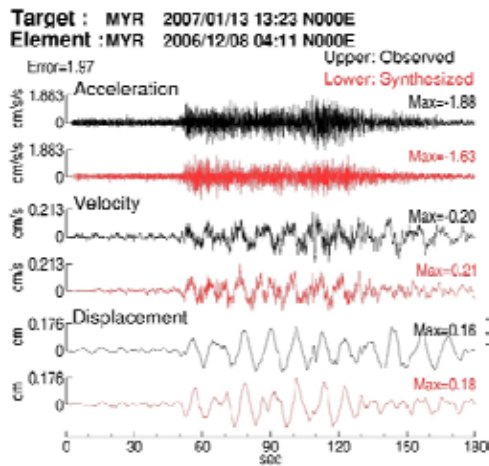
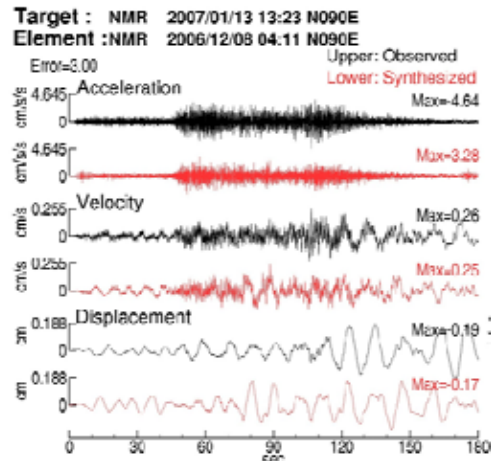
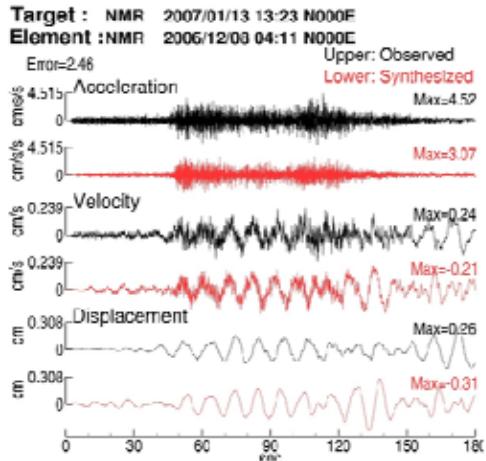


図 7 . 観測波形と合成波形の比較。上図 : NMR 観測点、下図 : MYR 観測点。
 上から、加速度、速度、変位波形が示されている。

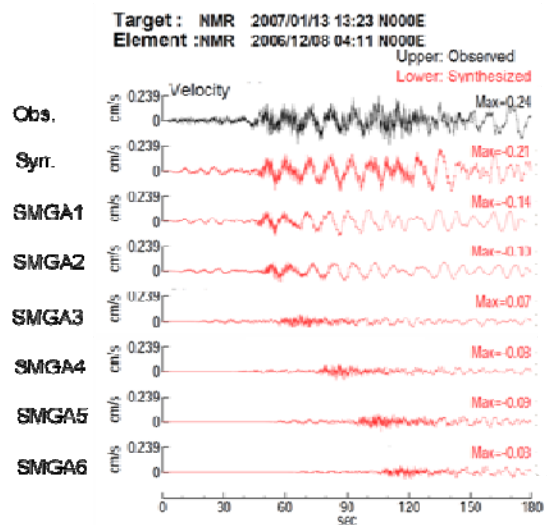
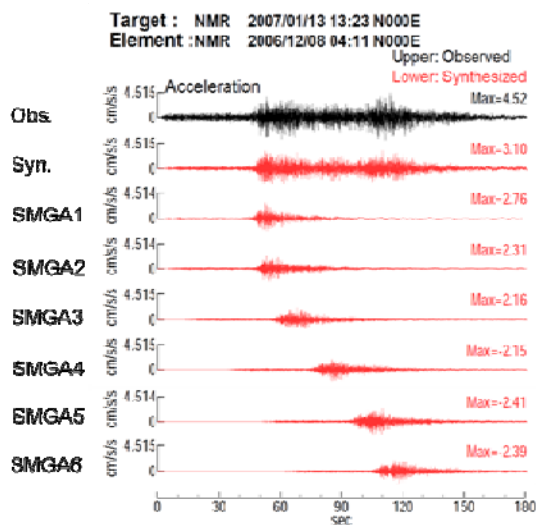


図 8 . 各 SMGA からの合成加速度波形。

図 9 . 各 SMGA からの合成速度波形。

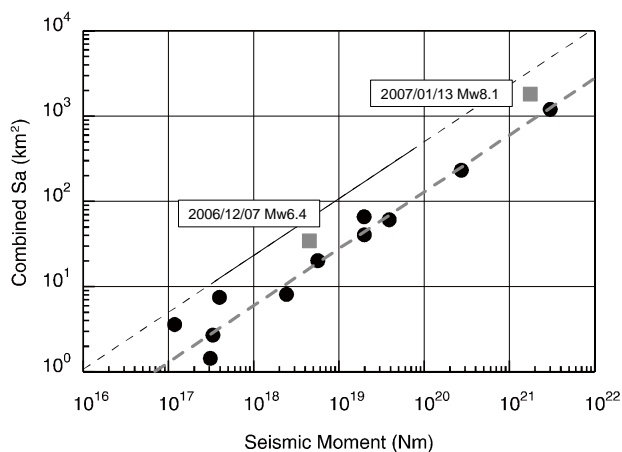


図 10 . スラブ内地震のアスペリティ (SMGA) 面積と地震モーメント (M_0) との関係。本震と前震の値が加筆されている。

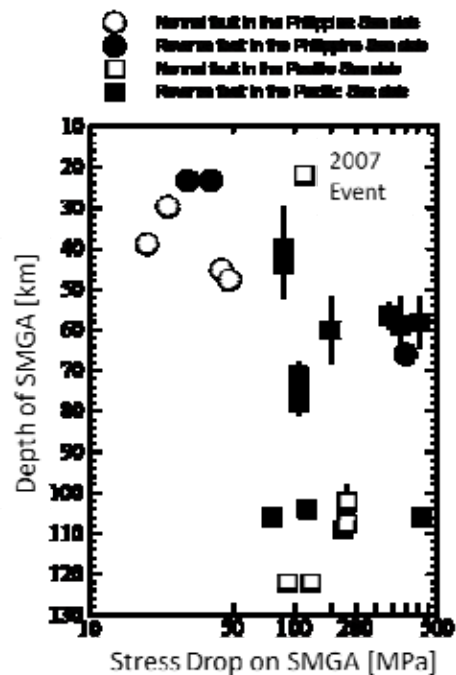


図 11 . SMGA の深さと応力降下量との関係。本震の値を浅野・岩田(2010)⁶⁾の図 6 に加筆。

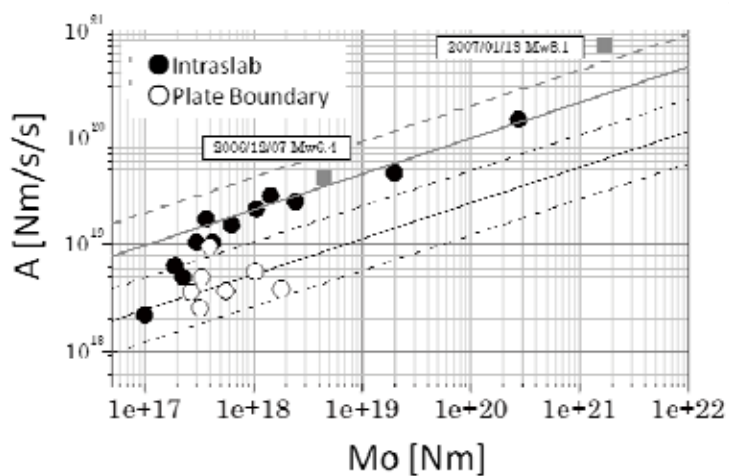


図 12 . 震源スペクトルの短周期レベル (A) と地震モーメント (M_0) との関係図に本震と前震の値 () を加筆。