

3. 4. 2 震源断層モデルの高度化に関する調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

広帯域強震動生成に関係するすべり分布や応力降下量、破壊様式といった震源断層のパラメータの把握とその地域性・深さ依存性についての分析を行う。そのため、既往のプレート境界地震、スラブ内地震を中心とした震源断層モデルの収集及び広帯域地震波を用いた震源過程の解析による結果の分析を行い、首都直下で発生する地震に対する震源断層モデルの高度化に資する。

(b) 平成 20 年度業務目的

平成 19 年度に引き続き、国内外で発生したプレート境界地震及びスラブ内地震の地震波等を用いて推定された震源モデルを収集し、地震規模に対する断層面上のすべり分布、それから求められる応力降下量分布の不均質特性を調べる。強震記録が多く得られているスラブ内地震に対して、強震記録観測点のサイト特性を評価した上で広帯域地震波を用いた震源過程の解析を行い、強震動予測のための震源断層モデル構築に必要な震源特性の抽出を継続する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	教授	岩田知孝	
京都大学防災研究所	助教	浅野公之	

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 20 年度業務目的に従い 2 つの業務を行った。ひとつはスラブ内地震の震源モデルを収集し、地震規模に対する断層サイズ、断層面上のすべり分布から地殻内地震やプレート境界地震で行われているすべりの特性化のための基準に従うアスペリティサイズや平均すべり量を求め、それらの値を地殻内地震やプレート境界地震のそれらと比較するとともに、スラブ内地震震源モデルの特性化に利用できる経験式を提案した。もうひとつは、スラブ内地震である 2008 年 7 月岩手県沿岸地震の広帯域シミュレーションに基づく震源モデルの提案と、強震波形インバージョンによる震源モデルとの比較を行って特性化震源モデル構築の検討を行った。

(b) 業務の成果

1) スラブ内地震の震源特性化

a) はじめに

日本における直下地震としては一般的には大陸プレート内、つまり地殻内地震を想定することになるが、首都圏直下には大陸プレートの下にフィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込んでいることから、これらの海洋プレート（スラブ）内で発生するスラブ内

地震やプレート境界の地震も想定する必要がある。内陸地殻内地震や海溝型プレート境界地震に対しては Somerville et al. (1999)¹⁾、Mai and Beroza (2001)²⁾や Murotani et al. (2008)³⁾によって、運動学的震源インバージョンの結果がコンパイルされ、断層面積や平均すべり量、アスペリティ総面積などの地震モーメントに対する経験式が提案されている。これには断層面積のみならず、アスペリティ総面積が地震モーメントに比例するスケーリング則や平均的な応力降下量が与えられており、この式に基づく強震動予測のための震源モデルの構築方法が提案されている (入倉・三宅, 2001⁴⁾; 入倉・他, 2003⁵⁾)。本項目ではこれまでにほとんど提案されてこなかった、スラブ内地震の強震動予測のための震源断層モデル化手法の高度化を目的とし、震源断層モデル構築に必要な震源特性を抽出するため、既往のスラブ内地震の震源インバージョン結果から震源パラメータを抽出、整理して、不均質すべりモデルの経験式を提案する。

b) データと解析結果

ここでは主として強震波形を用いた震源インバージョンによって解析されたスラブ内地震の不均質震源断層モデルの収集を行った。まず、既にモデル化が進んでいる内陸地殻内地震や海溝型プレート境界地震との比較を行うため、これらの地震の震源モデルのすべり分布の解析で用いられている Somerville et al. (1999)の規範¹⁾に従って、すべり分布から破壊領域及びアスペリティ領域を抽出し、断層面積(S)、アスペリティ総面積(S_a)、平均すべり量(D)などを求めた。

国内外のスラブ内地震 11 個(M_w 6.6 - 8.3)⁶⁾⁻¹⁰⁾が収集されて分析された (図 1、表 1)。イベントは日本付近に限らず北米～中南米で発生したものも含まれている。日本付近のイベントも、太平洋プレートでのイベントだけでなく、フィリピン海プレートのイベント (2001 年芸予地震) も含まれている。断層タイプはほとんどが正断層タイプ (N) であるが、逆断層タイプ (R) も 2 つ含まれている。震源深さは 35 km から 115 km である。地震モーメントに対する断層面積、平均すべり量、総アスペリティ面積の関係、及び断層面積と総アスペリティ面積の関係をそれぞれ図 2 - 4、及び図 5 に示す。比較のために、地殻内地震¹⁾、プレート境界地震³⁾のイベント値と、それぞれの経験的關係も図に示している。図にはここで収集されたデータに基づくスラブ内地震の地震モーメントに対する断層面積、平均すべり量、総アスペリティ面積の経験式も直線で示している。

スラブ内地震のこれらの断層パラメータの地震モーメントに対する比例関係は、地殻内地震やプレート境界地震のそれと一致しており、その定数が異なる程度であるように見受けられる。スラブ内地震の断層面積、平均すべり量、アスペリティ総面積について、地震モーメントを基準として地殻内地震やプレート境界地震のそれと比較する。断層面積とアスペリティ総面積は、同規模の内陸地殻内地震のそれらに比べれば、それぞれ 64%、45% となり、プレート境界地震のそれらよりも小さい。一方、平均すべり量は、内陸地殻内地震とプレート境界地震の中間にあたり、内陸地殻内地震のそれより小さく、プレート境界地震のそれより大きい。この並びは一見矛盾しているように思われるが、スラブ内地震の発生域の剛性率が他の環境の地震よりも大きいため、平均すべり量としては内陸地殻内地震より小さいことが起きている。これらの特徴は発生域や地震深さの依存性も考えられるが、ここでは総イベント数が多くないため、全体の平均像に着目している。

Boatwright (1988)の式 17)に基づいてアスペリティ領域の応力降下量を見積もると、10—65 MPa の範囲にあった。これは、内陸地殻内地震のそれに比べて同等から大きい方に分布している。

図 2-4 に示すスラブ内地震の地震モーメント (M_0 in N/m) に対する断層面積 (S)、アスペリティ面積 (S_a)、平均すべり量 (D) の関係式は以下のようなになる。

$$S[\text{km}^2] = 6.57 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (1)$$

$$S_a[\text{km}^2] = 1.04 \times 10^{-11} M_0^{2/3} \quad (2)$$

$$D[\text{cm}] = 2.25 \times 10^{-5} M_0^{1/3} \quad (3)$$

これらのスラブ内地震の不均質断層すべりの経験式の提案から、強震動予測のための震源モデルの構築を考えることができる。図 6 にはこのようにして特徴づけられるすべり特性化の震源モデルを地殻内地震のそれと対比して示す。与えられた地震モーメントに対して 2 つの地震がどういう不均質すべり分布を持っているかを模式的に示している。本来この図形で表現される体積に震源域の剛性率をかけたものが地震モーメントであるので、スラブ内地震の震源域の方が大きい剛性率をもつために、体積が小さくなる。

c) まとめ

スラブ内地震の不均質なすべりモデルを収集し、断層面積、アスペリティ面積、平均すべり量の経験式を提案した。ここで求められた不均質すべり分布の特徴は、周期が 1 秒程度以上の長周期の波形のモデリングによって求められた震源モデルから得られたものであるので、セクション 2) や既往研究で行われているすべり領域の大きいところと広帯域強震動生成の関係を精査して強震動予測用の震源モデルを提案する必要がある。

2) 広帯域地震波を用いたスラブ内地震の震源モデルの構築

a) はじめに

強震動予測のための震源断層モデル構築のためには、実際に起きた地震に対する広帯域強震動のモデリングによって震源モデルを推定し、それらの結果から特徴を抽出し震源断層モデル化手法を構築する必要がある。セクション 1) で得られた不均質震源特性と広帯域強震動に関わる震源特性の関係を調査する。広帯域地震波を用いて震源特性を適切に求めるためには、震源から観測点までのグリーン関数の評価が重要になる。約 1 Hz 以上の高周波数帯域を含む周波数帯域では、決定論的に理論グリーン関数を計算することができるほどの地下構造モデルを与えることが困難であるため、実際に対象地域で発生した小地震の観測波形記録をグリーン関数として用いる経験的グリーン関数法による手法が開発されている。適切な小地震記録を選択することで、広い周波数帯域で強震動シミュレーションを実施することが可能である。これまでもいくつかのスラブ内地震（例えば、1993 年釧路沖

地震¹⁸⁾、2003年宮城県沖の地震¹⁹⁾に対して広帯域強震動の解析に基づく震源モデルが提案されている。平成20年度は2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震を対象とし、広帯域地震波を用いて経験的グリーン関数法による震源モデルの構築を実施した。

2008年7月24日00時26分に岩手県沿岸北部(39.732°N, 141.635°E)の深さ108.1 kmで気象庁マグニチュード6.8の正断層型の地震が発生した(図7)。この地震は、この地域の下に沈み込んでいる太平洋スラブの二重地震面のうち下面で発生したスラブ内地震である。発生頻度の少なさもあり下面での大地震の震源モデルが詳しく分析された事例はあまりない(例えば、森川・藤原, 2002²⁰⁾)。今回の地震に対しては、Suzuki et al. (2008)¹⁶⁾が強震波形記録のうちの低周波数成分(1 Hz以下)を用いた運動学的震源インバージョン解析により、詳細な破壊過程を推定している。Suzuki et al. (2008)によれば、震源域の北側と南側で断層面の走向が異なること、最大アスペリティは北側の面に存在すること、南側の面にも観測強震波形のパルス波に寄与する小さなアスペリティがあることが指摘されている。本研究では、広帯域地震波を用いた解析により、2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルを構築し、強震動生成領域の特徴及び波形インバージョン法で求められている不均質すべり分布との関係を調べた。

b) 2008年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルの構築

本研究では、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)²¹⁾を用いた広帯域強震動シミュレーション(0.2–10 Hz)によって2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動生成領域(Miyake et al., 2003)²²⁾からなる震源モデルを推定した。2008年7月24日11時27分に発生した最大余震(39.620°N, 141.522°E, 深さ111.9 km)の記録を経験的グリーン関数として用いた。この余震は余震域の南端付近で発生した地震であり、F-netによるメカニズムは本震と同じく正断層型である(図7参照)。地震モーメントは 5.37×10^{16} Nm (M_w 5.1)である。この地震の余震活動は低調であり、本研究で採用した最大余震のほかには経験的グリーン関数として利用可能な余震は強震観測網では観測されなかった。

まず、波形合成のためのパラメータ N と C の値を決定するため、本震と最大余震のコーナー周波数を求めた。震央を取り囲む岩手県内のKiK-netの地中観測点17地点で観測された加速度波形のS波部分20.48秒間のウィンドウを切り出し、スペクトル比を計算した。各ウィンドウの前後1秒間に余弦関数型のtaperを適用したもののFourierスペクトルをとり、その振幅スペクトルを中心周波数の10%の幅で平滑化した。これに伝播経路特性として実体波を仮定した幾何減衰と Q 値による減衰の影響を補正したものを震源スペクトル比とした(図8)。ここで、S波の Q 値はSato et al. (1997)²³⁾による $Q(f) = 110f^{0.69}$ を用い、震源域のS波速度は4.5 km/sと仮定した。全観測点で得られたスペクトル比の対数平均を観測スペクトル比とし、Source Spectral Ratio Fitting Method(三宅・他, 1999)²⁴⁾によって本震と余震のコーナー周波数を推定した。本震と最大余震のモーメント比はF-netで求められている地震モーメントの比320に固定した。その結果、本震のコーナー周波数は0.65 Hz、余震のそれは2.68 Hzと求まった。これらから経験的グリーン関数法による波形合成のためのパラメータ N と C を決定した。

次に、観測波形の特徴から、本震の震源モデルが2つの強震動生成領域からなると仮定し、各強震動生成領域の面積(長さとは幅は等しいと仮定)、ライズタイム及び強震動生成

領域内の破壊開始点、破壊伝播速度、2番目の強震動生成領域の位置及び破壊時刻をグリッドサーチによって推定した(表2)。この際、前述の N と C の値は、1番目の強震動生成領域に対しては $N_1 = 2$ 、 $C_1 = 4.4$ 、2番目の強震動生成領域に対しては $N_2 = 4$ 、 $C_2 = 4.4$ と与えた。本震の断層面全体の幾何形状はSuzuki et al. (2008)で提案されているモデル¹⁶⁾に従った。1番目の強震動生成領域は破壊開始点(気象庁によって決定された震源位置)を含む南側の断層面(走向223度、傾斜角65度)に位置し、2番目の強震動生成領域は北側の断層面(走向179度、傾斜角71度)に位置すると仮定した。モデルの評価は三宅・他(1999)の提案した評価関数²⁴⁾に基づいて、変位波形と加速度エンベロープの残差の和が最小になるときの震源パラメータの組み合わせを最適解とした。震源域を取り囲むKiK-netの4観測点(IWTH02, IWTH09, IWTH14, IWTH18)の地中観測記録の水平2成分(EW及びNS成分)のS波部分(S波到達1秒前から10秒間)をターゲットとした。

モデリングの結果、南側の断層面に位置する1番目の強震動生成領域の面積は6.8 km²、北側の断層面に位置する2番目の強震動生成領域の面積は27.0 km²と求められた。図9に本研究で得られた震源モデルとSuzuki et al. (2008)の波形インバージョン解析¹⁶⁾によるすべり分布の比較を示す。強震動生成領域の空間的な位置としては、Suzuki et al. (2008)の波形インバージョン結果でのすべり量の大きな領域と重なっている。つまり、内陸地殻内地震の場合の考え方と同様に、アスペリティが強震動生成領域として振る舞っているといえる。これらの強震動生成領域での応力降下量はそれぞれ262 MPaであった。

図10に観測波形と得られた震源モデルによる合成波形の水平2成分(EW及びNS成分)の比較を示す。図の黒実線で描かれた波形が各強震観測点での観測波形(左から加速度、速度、変位波形)。赤実線で描かれた波形が合成波形である。ここで得られた震源モデルから計算された合成波形は観測波形の特徴を広い周波数帯域でよく説明していることがわかる。図11に観測波形と合成波形の加速度Fourier振幅スペクトルの比較を示す。合成波形のスペクトルは一部の周波数で振幅の落ち込みが見られるものの全体として広い周波数帯域で観測スペクトルをよく再現している。特に、低周波数側及び高周波数側のスペクトルの振幅レベルはよくあっていることから、強震動生成領域の地震モーメント及び応力降下量の推定値が妥当であるといえる。

c) スラブ内地震の強震動生成領域のスケーリング

推定された強震動生成領域の面積と地震モーメントの関係を図12に示す。これまでの既往のスラブ内地震の震源モデル^{18)・20)・24)・25)}も併せてプロットするとともに、これまでの内陸地殻内地震の震源モデル^{22)・26)・32)}とも比較した。2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動生成領域の面積は、既往のスラブ内地震と同じスケーリング関係にある。このことはスラブ内地震の強震動生成領域の面積が内陸地殻内地震のそれよりも系統的に小さいことを指摘したAsano et al. (2003)²⁴⁾と同様の傾向にあるといえる。浅野・他(2004)¹⁹⁾は、2003年5月26日に宮城県沖の太平洋スラブ上面付近(深さ72 km)で発生した逆断層型のスラブ内地震の震源モデルを推定した。この地震の強震動生成領域での応力降下量は105 MPaと推定されており、国内外の内陸地殻内地震に対する平均的な応力降下量(10~20 MPa)に比べて大きく、2003年宮城県沖の地震で短周期強震動が強く生成された要因となっている。2008年岩手県沿岸北部の地震の強震動生成領域の応力降下量はそれよりも大

きいものである。Morikawa and Sasatani (2004)¹⁸⁾は 1993 年釧路沖地震の震源モデルを推定し、強震動生成領域での応力降下量を 200-400 MPa であることを明らかにしており、同様の深さで発生している 2008 年岩手県沿岸北部の地震と同程度の値である。

太平洋プレートのように二重地震面を持つスラブでは、スラブの上面と下面で広帯域強震動生成に関わる震源特性に違いがあるかどうかを調べることは地震学的な意味合いのみに限らず、スラブ内地震を対象とした強震動予測のための震源のモデル化において必要不可欠な情報である。この東北日本の事例の比較からは、震源の深い下面の地震の方が強震動生成領域の応力降下量は大きいという結果となった。このことから、応力降下量の違いは上面の地震と下面の地震の発生する深さによる震源特性の違いを反映しているものと考えられる。

比較のため、同様の手法で求められているルーマニアのスラブ内地震の強震動生成領域 (Oth et al., 2007) の面積³³⁾を図 12 にプロットした。ルーマニアのスラブ内地震も日本国内のスラブ内地震と同様に、強震動生成領域の面積が同規模の内陸地殻内地震に比べ小さいことがわかる。

以上より、スラブ内地震を想定した強震動予測の震源断層モデルの設定においては、スラブ内地震に対する解析結果を反映し、同じ地震モーメントをもつ内陸地殻内地震の場合よりも、大きな応力降下量を強震動生成領域もしくはアスペリティに与える必要があること、応力降下量の値は想定する震源の深さによる違いも考慮して設定する必要がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

スラブ内地震の震源モデルを収集し、地震規模に対する断層サイズ、断層面上のすべり分布から地殻内地震やプレート境界地震で行われているすべりの特性化のための基準に従うアスペリティサイズや平均すべり量を求め、それらの値を地殻内地震やプレート境界地震のそれらと比較するとともに、スラブ内地震震源モデルの特性化に利用できる経験式を提案した。また、スラブ内地震である 2008 年 7 月岩手県沿岸北部の地震の広帯域シミュレーションに基づく震源モデルの提案と、強震波形インバージョンによる震源モデルとの比較を行って特性化震源モデル構築の検討を行った。

今年度の検討によって、スラブ内地震の強震動予測のための震源モデル構築のためのパラメータ設定方法のプロトタイプが提案されたため、この方法の妥当性の検証を実際の記録に基づいて行う。対象とする地震としては、強震観測網が設置されてから起きた 2003 年宮城県沖、2001 年芸予地震等を想定し、いくつかの破壊シナリオを設定し、経験的グリーン関数法、及び統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行い、観測強震記録と比較して、モデル構築手法の適用性を検討する。

(d) 引用文献

- 1) 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 the Prediction of Strong Ground Motion, *Seism. Res. Lett.*, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 2) Mai, P.M. and G.C. Beroza: Source Scaling Properties from Finite-Fault-Rupture

- Models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, pp.604-615, 2000.
- 3) Murotani, S., H. Miyake, and K. Koketsu: Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes, *Earth Planets Space*, Vol.60, pp.987-991, 2008.
 - 4) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, Vol.110, pp.849-875, 2001.
 - 5) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲, L.A. Dalguer: 将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ, *京都大学防災研究所年報*, Vol.46B, pp.105-120, 2003.
 - 6) Ichinose, G.A., H.K. Thio, and P.G. Somerville: Moment Tensor and Rupture Model for the 1949 Olympia, Washington, Earthquake and Scaling Relations for Cascadia and Global Intraslab Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.96, pp.1029-1037, 2006.
 - 7) Ichinose, G.A., H.K. Thio, and P.G. Somerville: Rupture process and near-source shaking of the 1965 Seattle-Tacoma and 2001 Nisqually, intraslab earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.31, L10604, doi:10.1029/GL019668, 2004.
 - 8) Shao, G., C. Ji, and M. Simons: Slip histories of six large subduction earthquakes from 1990 to 2004, *EOS Trans. AGU*, Vol.87, No.52, Fall Meet. Suppl., Abstract S31A-0170, 2006 (CD-ROM).
 - 9) Santoyo, M.A., S.K. Singh, and T. Mikumo: Source process and stress change associated with the 11 January, 1997 (Mw=7.1) Michoacán, Mexico, in-slab earthquake, *Geofisica Internacional*, Vol.44, pp.317-330, 2005.
 - 10) Hernandez, B., N.M. Shapiro, S.K. Singh, J.F. Pacheco, F. Cotton, M. Campillo, A. Iglesias, V. Cruz, J.M. Gómez, and L. Alcántara: Rupture History of September 30, 1999 Intraplate Earthquake of Oaxaca, Mexico (Mw=7.5) from Inversion of Strong-Motion Data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.28, pp.363-366, 2001.
 - 11) Vallée, M., M. Bouchon, and S.Y. Schwartz: The 13 January 2001 El Salvador earthquake: A multidata analysis, *J. Geophys. Res.*, Vol.108, No.B4, 2203, doi:10.1029/2002JB001922, 2003.
 - 12) 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, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, B08306, doi:10.1029/2004JB002980, 2004.
 - 13) 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「西日本の地震活動」*, pp.239-246, 2002.
 - 14) 青井真, 関口春子, 功刀卓, 森川信之, 本多亮, 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*, Vol.27, pp.29-34, 2005.
 - 15) Delouis, B. and D. Legrand: Mw 7.8 Tarapaca intermediate depth earthquake of 13 June 2005 (northern Chile): Fault plane identification and slip distribution by waveform inversion, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, L01304, doi:10.1029/2006GL028193,

- 2007.
- 16) Suzuki, W., S. Aoi, and H. Sekiguchi: Source process of the 2008 Iwate-Ken Engan-Hokubu, intraslab, earthquake revealed from strong motion records, Programme and Abstracts of the 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and the 2008 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, X3-035, 2008.
 - 17) Boatwright, J.: The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 78, 489-508, 1988.
 - 18) Morikawa, N. and T. Sasatani: Source Models of Two Large Intraslab Earthquakes from Broadband Strong Ground Motions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.94, pp.803-817, 2004.
 - 19) 浅野公之, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 2003年5月26日に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*, Vol.57, pp.171-185, 2004.
 - 20) 森川信之, 藤原広行: スラブ内地震のスケーリング則(2), 2002年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, S042-013, 2002 (CD-ROM).
 - 21) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp.151-156, 1986.
 - 22) Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura: Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulation: Kinematic Heterogeneous Source Model and Strong Motion Generation Area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, pp.2531-2545, 2003.
 - 22) Satoh, T., H. Kawase, and T. Sato: Statistical spectral model of earthquakes in the eastern Tohoku district, Japan, based on the surface and borehole records observed in Sendai, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.87, pp.446-462, 1997.
 - 23) 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)及び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, *地震第2輯*, Vol.51, pp.431-442, 1999.
 - 24) Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura: Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations, *Earth Planets Space*, Vol.55, pp.e5-e8, 2003.
 - 25) 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*, Vol.69, pp.123-134, 2006.
 - 26) 釜江克宏, 入倉孝次郎: 1994年ノースリッジ地震(M_w = 6.7)の震源モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.643-648, 1998.
 - 27) Kamae, K. and K. Irikura: Source Model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and Simulation of Near-Source Ground Motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.88, pp.400-412, 1998.
 - 28) 池田隆明, 釜江克宏, 三輪滋, 入倉孝次郎: 経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.561, pp.37-45, 2002.
 - 29) Ikeda, T., K. Kamae, S. Miwa, and K. Irikura: Source modeling and strong ground

motion simulation for the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng., Paper no. 1289, 2004 (DVD-ROM).

- 30) Birgören, G., H. Sekiguchi, and K. Irikura: Rupture model of the 1999 Düzce, Turkey, earthquake deduced from high and low frequency strong motion data, Geophys. Res. Lett., Vol.31, L05610, doi:10.1029/2003GL019194, 2004.
- 31) Kamae, K., T. Ikeda, and S. Miwa: Source model composed of asperities for the 2004 Mid Niigata Prefecture, Japan, earthquake ($M_{JMA}=6.8$) by the forward modeling using the empirical Green's function method, Earth Planets Space, Vol.57, pp.533-538, 2005.
- 32) Suzuki, W. and T. Iwata: Source model of the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake estimated from the empirical Green's function simulation of broadband strong motions, Earth Planets Space, Vol.58, pp.99-104, 2006.
- 33) Oth, A., F. Wenzel, and M. Radulian: Source parameters of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes from empirical Green's functions modeling, Tectonophysics, Vol.438, pp.33-56, 2007.

(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
スラブ内地震の強震動予測のための不均質震源断層モデルの特性化（口頭）	浅野公之・岩田知孝	日本地球惑星科学連合2008年大会	平成20年5月	国内
Characterization of Heterogeneous Source Model of Intraslab Earthquakes Toward Strong Ground Motion Prediction（ポスター）	Iwata, T., and K. Asano	アメリカ地球物理学連合2008年秋季大会	平成20年12月	国際
強震動予測のためのスラブ内地震の不均質震源モデルの特性化（口頭）	岩田知孝・浅野公之	平成20年度京都大学防災研究所研究発表講演会	平成21年2月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

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 21 年度業務計画案

平成 20 年度までに得られたスラブ内地震のデータベースに基づいてすべり分布の不均質性の特性化を行った。これらの分析によって得られた不均質特性を反映させた震源モデル構築手法に従って、既存のスラブ内地震の強震動評価を行い、その妥当性や適用性を検討するとともに、強震動予測の高度化に向けたパラメータの整理を行う。対象とする地震としては、2003 年宮城県沖、2001 年芸予地震等とする。いくつかの破壊シナリオを設定し、経験的グリーン関数法、及び統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行い、観測強震記録と比較して、モデル構築手法の適用性を検討する。

表 1. 収集・分析されたスラブ内地震の震源断層パラメータ

No.	Earthquake	Depth (km)	FT	M_0 (Nm)	M_W	S (km ²)	S_a (km ²)	D (cm)	D_a (cm)	S_a/S	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	Reference
1	1949/4/13 Olympia, WA	60	N	1.91×10^{19}	6.8	396	36	43	112	0.09	5.9	65.0	Ichinose <i>et al.</i> (2006)
2	1965/4/29 Seattle-Tacoma, WA	60	N	9.43×10^{18}	6.6	248	28	52	215	0.11	5.9	52.1	Ichinose <i>et al.</i> (2004)
3	1994/10/4 E. off Hokkaido, Japan	64	R	3.50×10^{21}	8.3	12705	2640	430	851	0.21	6.0	28.7	Shao <i>et al.</i> (2006)
4	1997/1/11 Michoacán, Mexico	35	N	4.54×10^{19}	7.0	1176	320	63	162	0.27	2.7	10.1	Santoyo <i>et al.</i> (2005)
5	1999/9/30 Oaxaca, Mexico	40	N	1.79×10^{20}	7.5	3713	731	68	156	0.20	1.9	9.8	Hernandez <i>et al.</i> (2001)
6	2001/1/13 El Salvador	54	N	4.57×10^{20}	7.7	3600	733	206	381	0.20	5.2	25.3	Vallée <i>et al.</i> (2003)
7	2001/2/28 Nisqually, WA	56	N	1.66×10^{19}	6.8	496	43	43	167	0.09	3.7	40.4	Ichinose <i>et al.</i> (2004)
8	2001/3/24 Geiyo, Japan	46	N	1.88×10^{19}	6.8	540	81	60	146	0.21	3.6	24.3	Takehi (2003)
9	2001/3/24 Geiyo, Japan	46	N	3.36×10^{19}	7.0	630	135	85	182	0.15	5.2	24.2	Sekiguchi and Iwata (2002)
10	2003/5/26 off Miyagi, Japan	72	R	6.20×10^{19}	7.0	784	108	122	291	0.14	6.9	49.9	Aoi <i>et al.</i> (2005)
11	2005/6/13 Tarapaca, Chile	108	N	3.92×10^{20}	7.7	1600	400	351	770	0.25	14.9	59.7	Delouis and Legrand (2007)
12	2008/7/24 N. Iwate, Japan	115	N	2.82×10^{19}	6.9	900	96	52	135	0.11	2.5	23.9	Suzuki <i>et al.</i> (2008)

FT: Fault type, N: Normal fault, R: Reverse fault, M_0 : Seismic moment, M_W : Moment magnitude, S : Rupture area, S_a : Combined area of asperities, D : Average slip in S , D_a : Average slip in S_a , $\Delta\sigma$: Average stress drop for the rupture area, $\Delta\sigma_a$: Average stress drop for the asperities.

表 2. 2008 年岩手県沿岸北部の地震の震源パラメータ

	強震動生成領域 1	強震動生成領域 2
走向 (deg.)	223	179
傾斜角 (deg.)	65	71
地震モーメント (Nm)	1.89×10^{18}	1.51×10^{19}
長さ (km)	2.6	5.2
幅 (km)	2.6	5.2
面積 (km ²)	6.8	27.0
ライズタイム (s)	0.08	0.16
応力低下量 (MPa)	262	262
破壊時刻 (s)	0.0	1.9
破壊伝播速度 (km/s)	3.15	

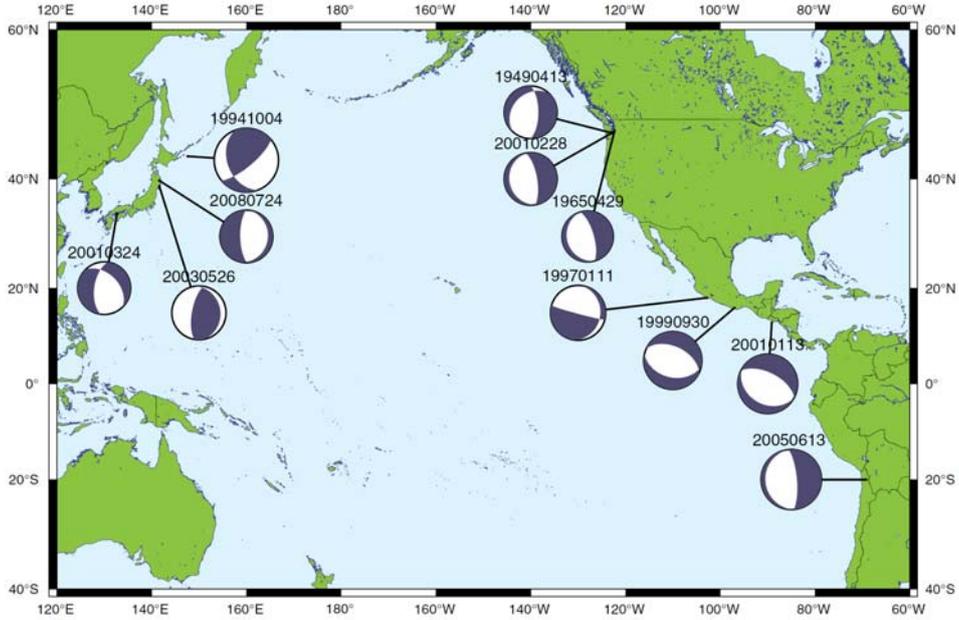


図 1. 震源インバージョンによる不均質震源断層モデルを収集したスラブ内地震の震央とメカニズム解（下半球投影）。

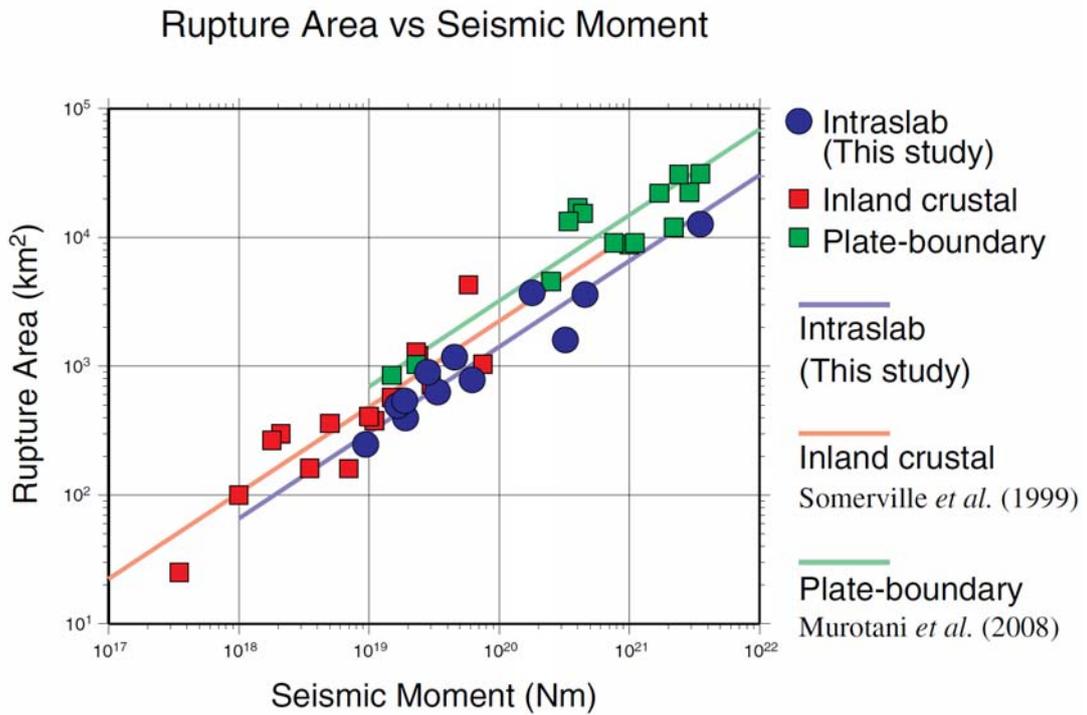


図 2. 断層面積と地震モーメントの関係。

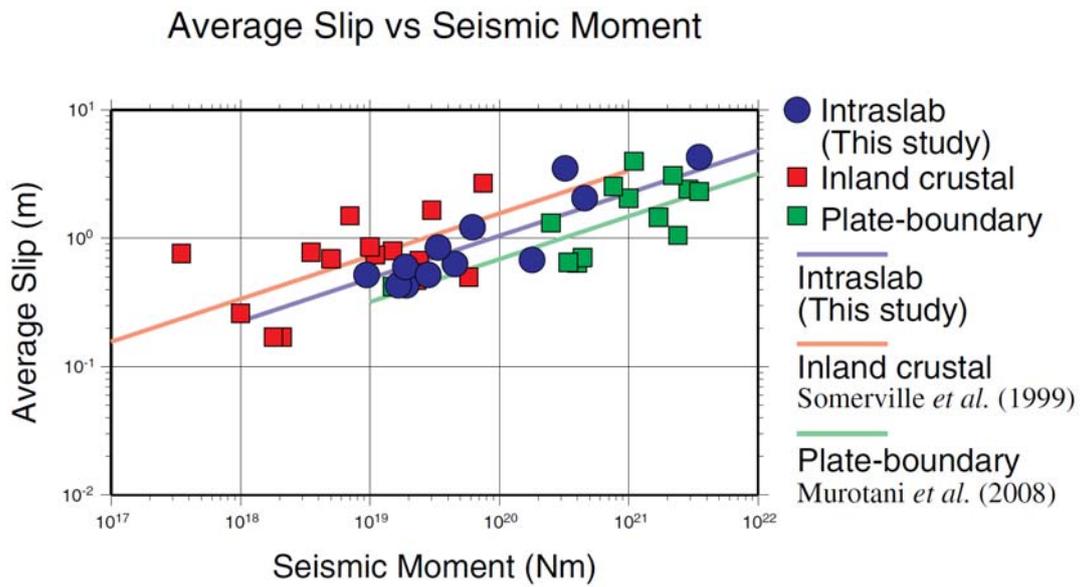


図 3. 平均すべり量と地震モーメントの関係。

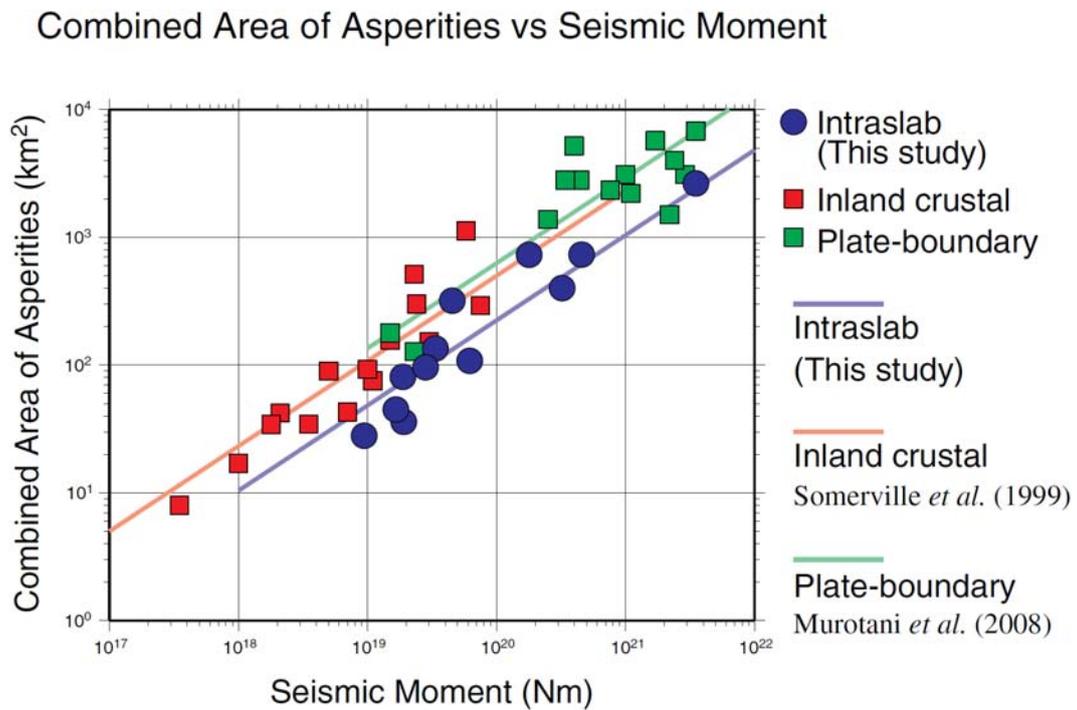


図 4. アスぺリティ総面積と地震モーメントの関係。

Combined Area of Asperities vs Rupture Area

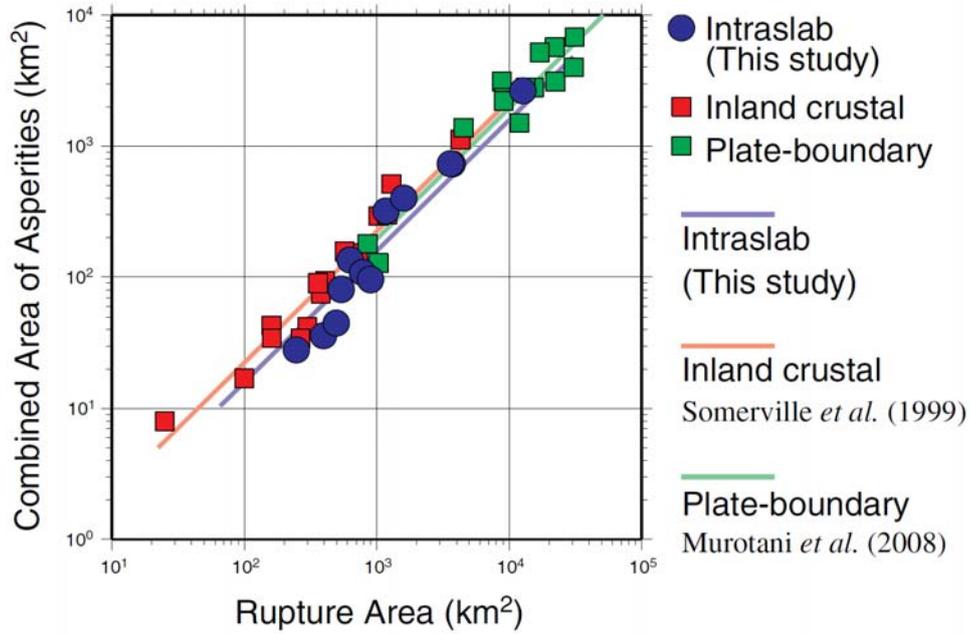


図 5. アスペリティ総面積と断層面積の関係。

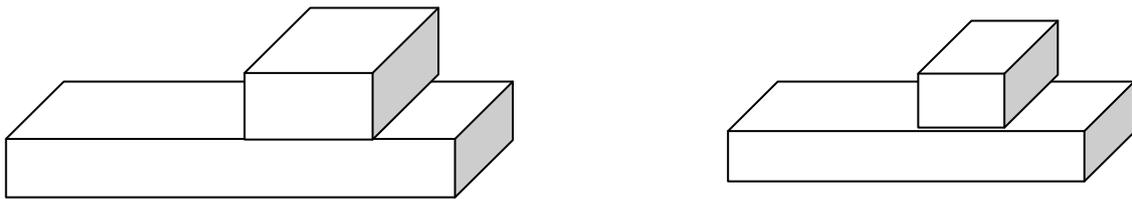


図 6. 内陸地殻内地震（左）とスラブ内地震（右）の模式的な不均質断層すべりモデル。縦軸方向がすべり量を表す。

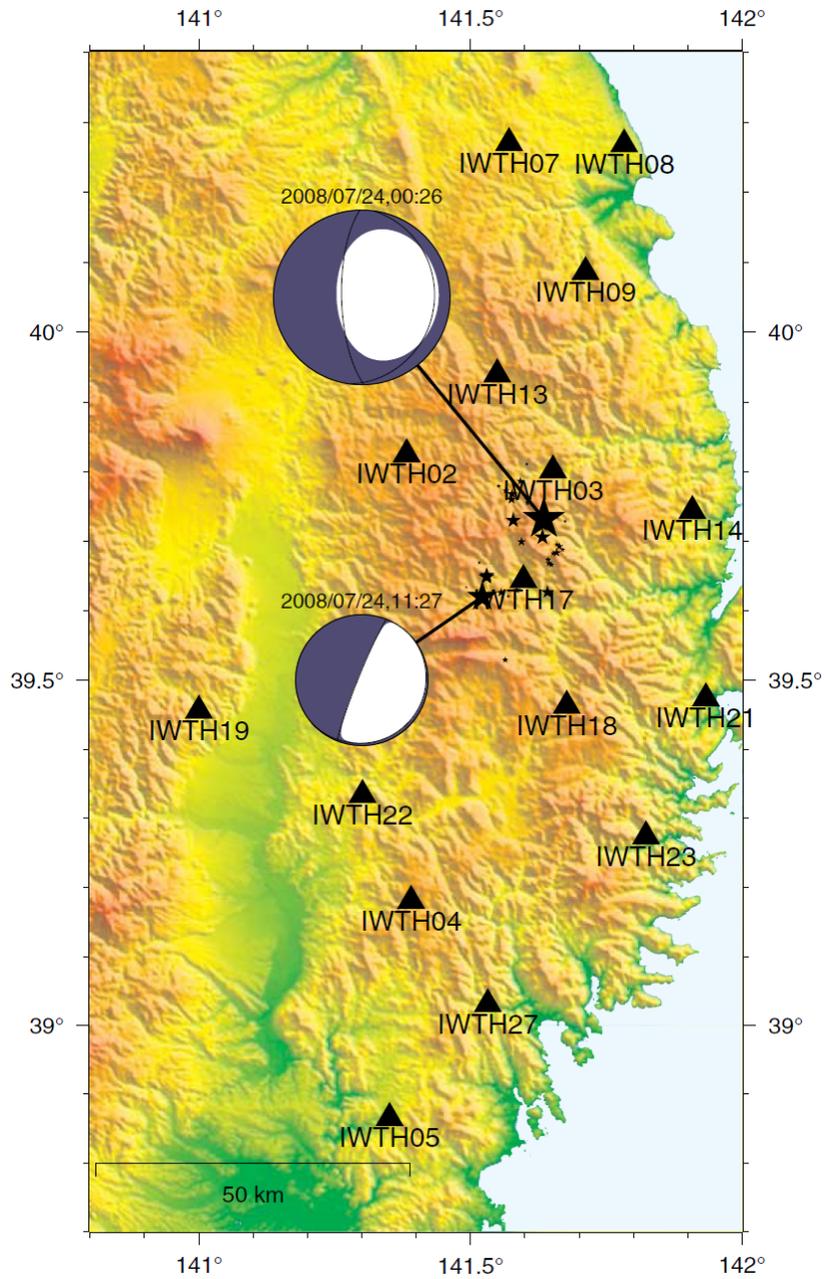


図 7. 2008 年岩手県沿岸北部の地震の本震及び最大余震（EGF）の震央とメカニズム解、震源モデルの解析に使用した強震観測点。

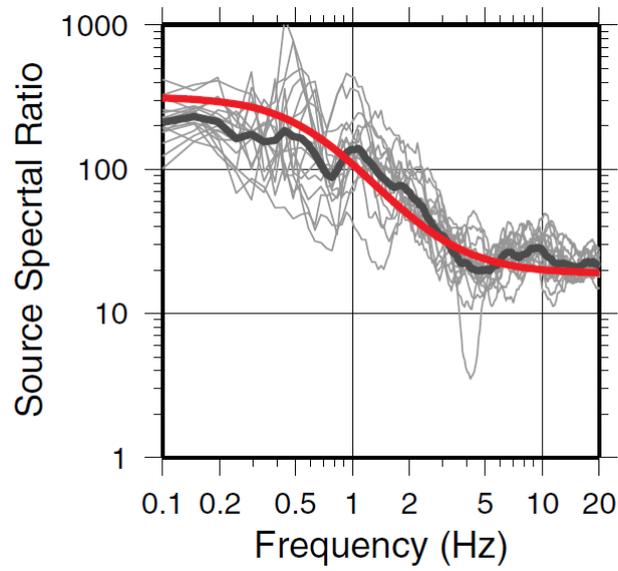


図 8. 本震と最大余震 (EGF) の震源スペクトル比。黒実線が観測スペクトル比の平均値、赤実線が ω^{-2} 震源モデルによる理論スペクトル比。

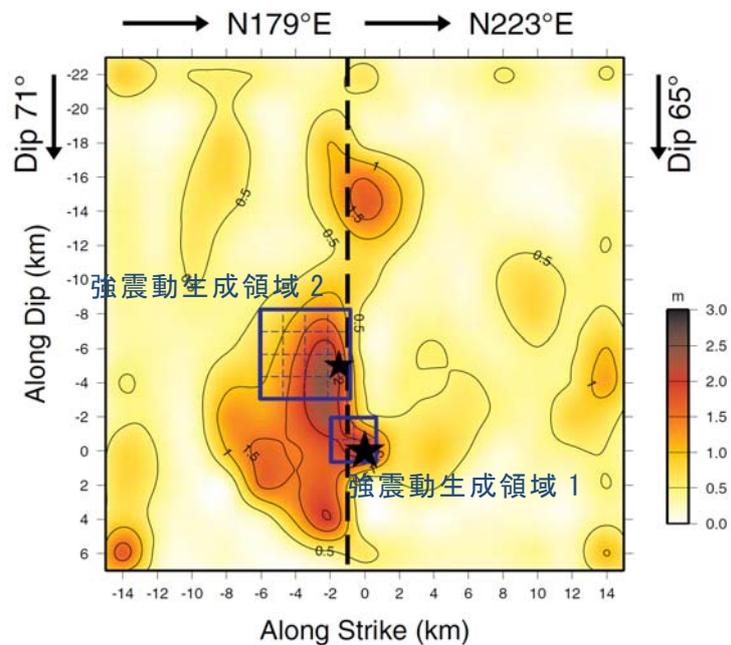


図 9. 広帯域強震動シミュレーションにより推定された 2008 年岩手県沿岸北部の地震の震源モデルと Suzuki et al. (2008) によるすべり分布の比較。

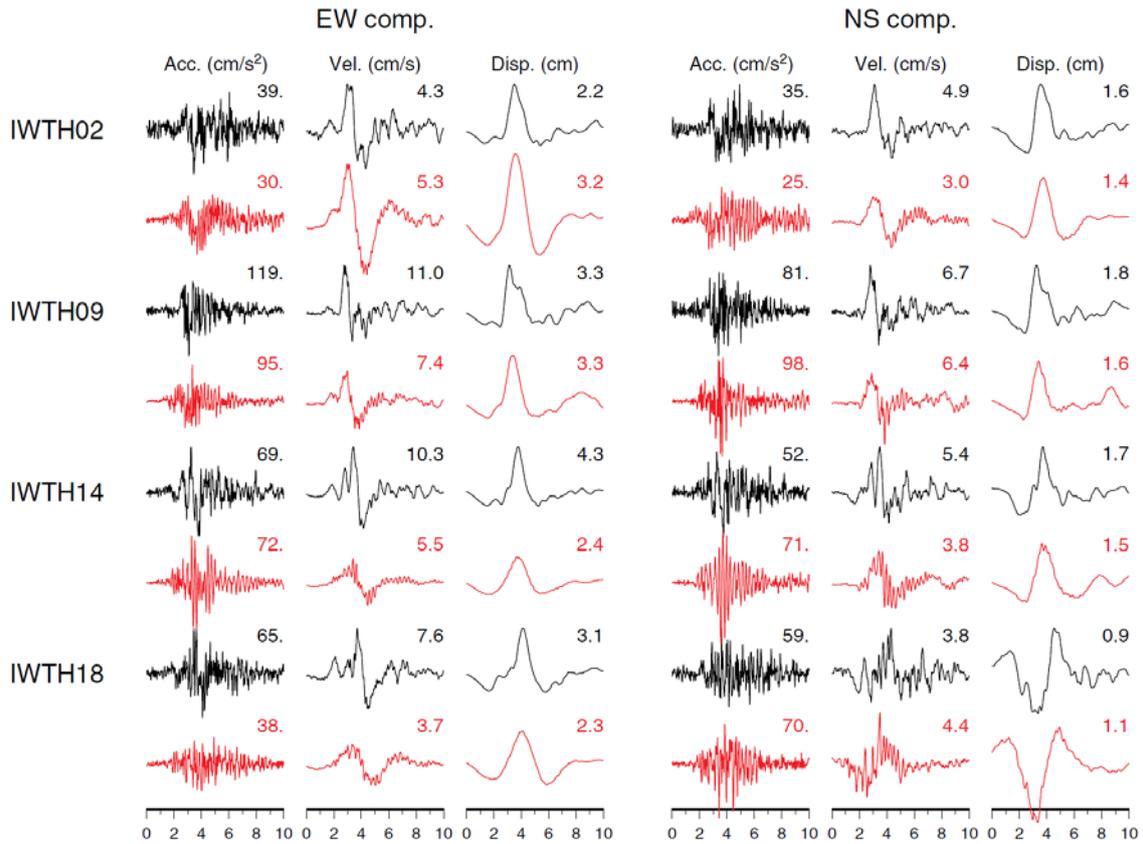


図 10. 水平 2 成分の観測波形（黒）と合成波形（赤）の比較（加速度，速度，変位，各 0.2–10 Hz）。波形の右上の数値はそれぞれの最大振幅。

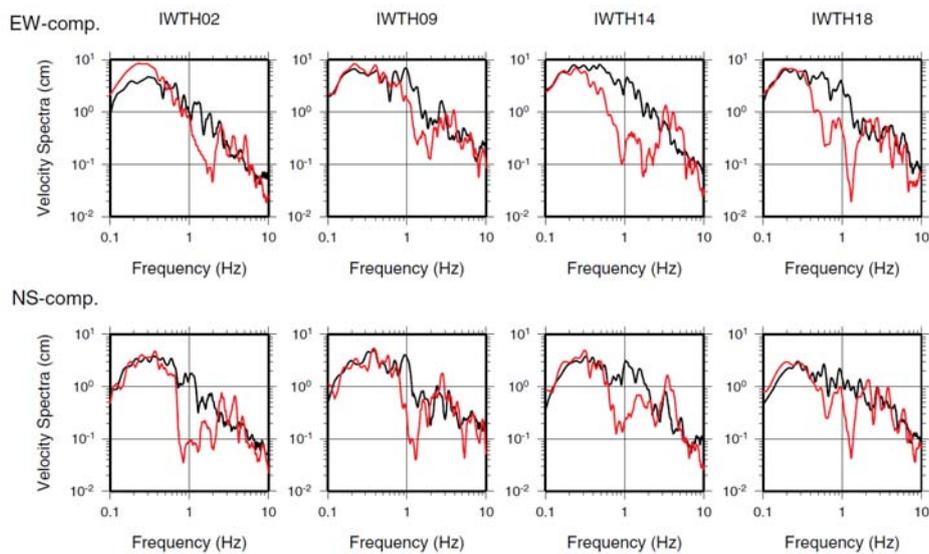


図 11. 水平 2 成分の観測波形（黒）及び合成波形（赤）の Fourier 加速度振幅スペクトルの比較。

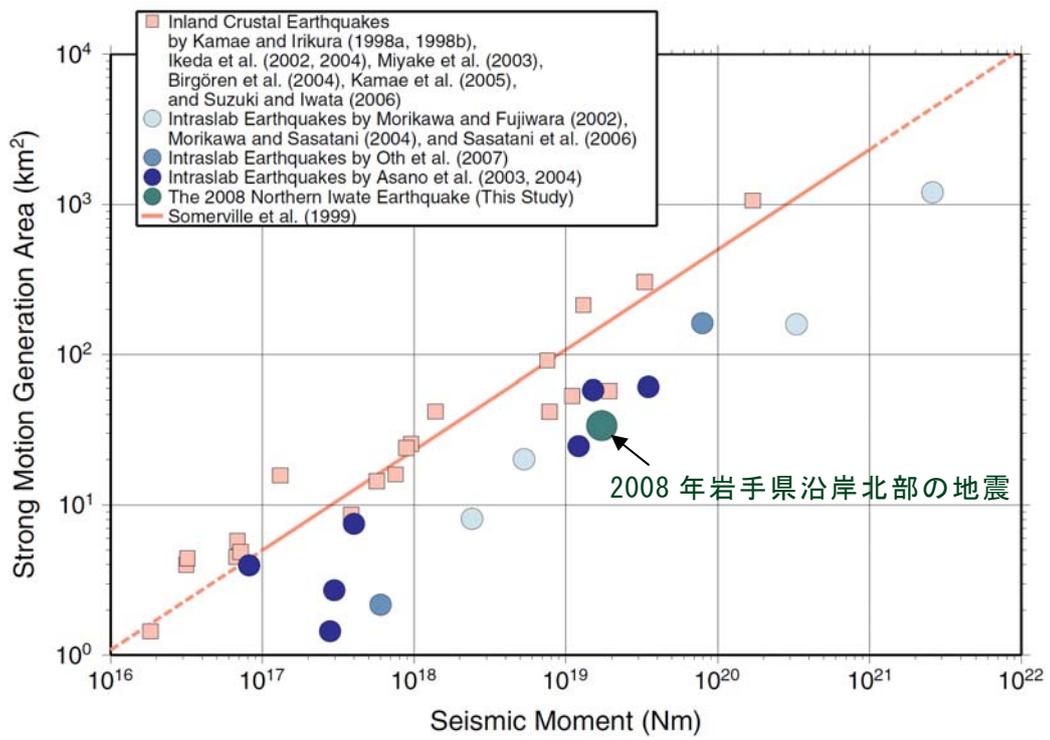


図 12. スラブ内地震の強震動生成領域の面積と地震モーメントの関係。