

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

「震源モデル等の構築」のうち、スラブ内地震による強震動予測などの研究を行い、震源断層モデルや強震動予測の高精度化につなげる部分にあたる。

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23年度業務目的

4) 震源断層モデル、強震動予測の高度化に資するため、プレート境界型地震とスラブ内地震の震源モデルの特性の比較などを行う。

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プレート内で発生する浅いアウターライズ地震とがある。前者の震源特性については多くの研究例があるが、後者についてのその研究は極めて少ない。アウターライズ地震が、スラブ内地震と同様な震源特性を有するかどうかを明らかにすることは重要である。

2005年11月15日に三陸沖において、正断層のメカニズムを有する海洋プレート内の浅い地震であるアウターライズ地震が発生した。これは、K-NET等の強震観測網の整備以降に初めて発生したMw7.0という大規模なアウターライズ地震である。ここでは、このアウターライズ地震の強震動特性及び震源特性について検討する。そして、得られた震源パラメータ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。さらに、太平洋プレートとフィリピン海プレートにおける海溝近くの浅い地震の震源特性を比較する。

(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院 | 准教授 | 高井伸雄 | |
| 同 | 元教授 | 笹谷 努 | |

(2) 平成23年度の成果

(a) 業務の要約

4) 震源断層モデル、強震動予測の高度化に資するため、プレート境界型地震とスラブ内地震の震源モデルの特性の比較などを行った。

強震動特性：

- ・2005年三陸沖アウターライズ地震（Mw7.0）による最大加速度の距離減衰関係は、既存のスラブ内地震の予測式よりもはるかに上側に分布していること、及び、この地震による擬似速度応

答の距離減衰関係は、既存のスラブ内地震による予測式とほぼ整合していることがわかった。

震源特性：

- ・極めて浅い地震でありながら、2005年三陸沖アウターライズ地震の強震動生成領域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。
- ・太平洋プレート内のアウターライズ地震の応力降下量は、フィリピン海プレート内の浅い地震のそれよりもはるかに大きいことがわかった。

(b) 業務の成果

1) はじめに

2005年11月15日06時39分に、三陸沖の海溝よりも海洋側のアウターライズ地域で海洋プレート内の浅い大地震（Mw7.0）が発生した。これは、K-NET等の強震観測網の整備以降に初めて発生した大規模なアウターライズ地震で、多くの観測点で強震動記録の得られた初めてのアウターライズ大地震である。三陸沖では、過去に1933年の三陸沖巨大アウターライズ地震（Mw8.4）が発生して津波による大被害をもたらしたが、残念ながら、その地震による強震動記録は限られている（植竹・野口、2008¹⁾）。よって、2005年三陸沖アウターライズ地震は、1933年三陸沖巨大アウターライズ地震の強震動特性及び震源特性を考える上で重要な地震である。

ここでは、まず、既存の3つの距離減衰式と2005年三陸沖アウターライズ地震による最大加速度（PGA）及び擬似速度応答値の距離減衰関係を比較することで、この地震による強震動特性について検討する。次に、経験的グリーン関数法（EGF法）を用いて震源モデルを構築し、この地震の震源特性について検討する。そして、得られた震源パラメータ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。最後に、太平洋プレートとフィリピン海プレートにおける海溝近くの浅い地震の震源特性を比較する。

2) 地震の概要

気象庁（JMA）及びHarvardによる2005年三陸沖アウターライズ地震の震源情報を表1に、また、この地震による震度分布を図1に示す。最短の震央距離が約300kmと遠いため、最大震度は3であるが、ほぼ東日本全体で有感である。JMAによる本震の震央と1ヶ月間の余震分布を図2左に示す。本震の震央が、余震分布からはみ出す特異な位置関係となっている。これは、本震の破壊が極めて小さい初期破壊を伴っているため、震源決定に用いたP波及びS波の読み取り値が対応していないことによるエラーで、それぞれの走時を読み直すことで、本震の震央が、ほぼ余震分布の中央に位置していることを確かめた（図2右、表1；一柳昌義、2010（私信））。図2には正断層のメカニズム解（Harvard解）も示されている。余震分布の長軸は、北北東に走向を有する節面とほぼ一致していることが分る。

強震動特性の解析には、K-NET及びKiK-net観測点で得られた記録を用いる。この地震の場合、K-NETの57点で観測記録がP波部分のみで終了していることを注意しておく。これらを除いたK-NETの320点及びKiK-netの282点、計602点の記録を解析に用いる。また、震源モデルの構築においては、EGF法で用いる要素地震（1991/05/07、Mw6.0）がK-NET等の構築前に発生しているため、JMAによる強震動記録を用いる。

3) 強震動特性

2005 年三陸沖アウターライズ地震の強震動特性を理解するために、既存の 3 つの距離減衰式（司・翠川, 1999²⁾; Dhakal et al., 2010³⁾; Kanno et al., 2006⁴⁾）との比較を行う。これらの距離減衰式は、それぞれ最大加速度 (PGA)、擬似速度応答、加速度応答を対象としている。ここでは擬似速度応答を検討するため Kanno et al. の加速度応答を擬似速度応答に変換して利用する。これらの回帰解析に用いられたデータセットの特徴は、司・翠川と Kanno et al. の式が日本列島全域のデータを使用しているのに対し、Dhakal et al. が東北日本のデータのみを使用していることである。ちなみに、2005 年三陸沖アウターライズ地震はこれら 3 つのデータセットには入っていない。

最初に、上述の距離減衰式の特徴について記す。司・翠川は、地震を 3 つのタイプ（地殻内、プレート間、スラブ内地震）に分類し、地震の深さ依存性を深さの関数として、3 つのタイプに対する PGA の距離減衰式を得ている。Dhakal et al. は、地震を 2 つのタイプ（プレート間、スラブ内地震）に分類し、東日本の火山フロントを境にした減衰構造の違いを考慮した 2 つの減衰パラメータを使用して（図 5 を参照）、擬似速度応答の距離減衰式を得ている。この距離減衰式は深さ依存性を考慮していないが、2 つの地震タイプによって深さ範囲が異なっている（プレート間：21-51 km、スラブ内：59-126 km）。一方、Kanno et al. は、地震のタイプ分けを行わずに、深さ 30km で地震を分類して、加速度応答の距離減衰式を得ている。

2005 年三陸沖アウターライズ地震の震源が日本列島から遠いため、最も近い観測点でも震源距離が約 300km である。既存の距離減衰式は震源距離 300km 以内を対象としている（Kanno et al. は 500km 以内）が、今回は 300km 以上の距離でもそれらが成り立つと仮定して、観測データとの比較を行う。

a) PGA の距離減衰関係

まず、司・翠川によるスラブ内地震の距離減衰式を用いて、2005 年三陸沖アウターライズ地震の PGA 距離減衰関係の特異性について記す。その際に参考として、同様にフィリッピン海の海洋プレート内で発生した 2004 年 9 月 5 日紀伊半島沖地震を使用する。紀伊半島沖においては、19 時 07 分頃に前震 (Mw7.2)、23 時 57 分頃に本震 (Mw7.5) が発生しているが、2005 年三陸沖アウターライズ地震のマグニチュードにより近い前震の距離減衰関係と比較する。それぞれの震央位置とメカニズム解を図 3 に示す。

2004 年紀伊半島沖地震・前震の PGA の距離減衰関係と司・翠川のスラブ内地震の距離減衰式との比較図を図 4 左に示す。図より多少のばらつきはあるものの、この距離減衰関係は距離減衰式とほぼ調和的であることがわかる。一方、2005 年三陸沖アウターライズ地震の比較図（図 4 右）を見ると、観測された PGA は全体的に司・翠川式による予測値よりもはるかに上側に分布している。また、距離 400~600km では約 100 倍に及ぶ範囲に点が分布し、300~600km の距離範囲では上限値の点はほぼフラットで、減衰が極めて小さいことを暗示している。司・翠川の距離減衰式は日本列島を対象としたものであるが、図 4 から、日本列島の東日本と西日本における減衰構造に違いのあることが示唆される。

東日本の減衰構造は、火山フロントを境にして前弧側が High Q で背弧側が Low Q と言われて

いる。この影響を考慮するために、以下のように伝播経路を評価する。図 5 において星印を震源、丸印を観測点とし、火山フロントを境にして東側が前弧側 (FAMW)、西側が背弧側 (BAMW) である。そして、震源から観測点に至る伝播経路を前弧側 (R1) と背弧側 (R2) に分けて、経路全体に対する R1 の割合を Ratio として(1)式のように評価する (高井・岡田、2002⁵⁾)。

$$\text{Ratio} = R1 / (R1 + R2) \quad (1)$$

図 6 に PGA 距離減衰関係(図 4 右)を Ratio で色分けしたものを示す。Ratio=1 の赤色の分布は、距離 300~600km の上限値を示しており、PGA があまり減衰しないことを示している。図 4 右において、観測値全体が予測値よりも上側に分布しているのは、経路の大部分が HighQ 領域を占めていることによると考えられる。また、ほぼ同じ距離において比べると、Ratio が 1 より小さくなると PGA が小さくなり、前弧側と背弧側では減衰の大きさの違うことを示している。また、これが、距離 400~600km で約 100 倍に及ぶ範囲に点が分布している要因の一つと考えられる。

次に、震源から前弧側に至る経路全体の減衰特性を評価する。司・翠川の減衰式を基本として、図 6 の Ratio=1 のデータに合致する粘性減衰に関する係数 k を求める。 $k=0.001$ を用いた司・翠川の減衰式が、Ratio=1 のデータと調和的であることが見てとれる。なお、図 4 における司・翠川の減衰式では、 $k=0.003$ が用いられている。

b) 擬似速度応答の距離減衰関係

2005 年三陸沖アウターライズ地震による K-NET と KiK-net 観測点における加速度記録から擬似速度応答 (減衰定数 $h=0.05$) を求め、固有周期ごとの強震動特性を調べる。ここで、擬似速度応答値は、水平 2 成分の擬似速度応答時刻歴をベクトル合成したなかの最大値である。また、応答値の表示は、PGA 距離減衰関係と同様に、Ratio に応じて色分けされている。

観測値との比較を行うのは、Dhakal et al.のスラブ内地震と Kanno et al.の浅い地震の距離減衰式である。図 7 に、固有周期 (T) 0.1sec、0.3sec、1sec、3sec における擬似速度応答値の距離減衰関係と 2 つの予測式との比較を示す。T=0.1sec の擬似速度応答値は、ある距離で見ると、Ratio に応じて値が小さくなるのがわかる。この特徴は、PGA の距離減衰関係と良く似ており、この特徴をうまく説明する距離減衰式は、Dhakal et al.によるものである。しかし、観測値は、Dhakal et al.による距離減衰式よりもやや大きな値をとっている。一方、Kanno et al.の距離減衰式と比較すると、観測値が大幅に上側に分布している。つまり、彼らの予測値は、大幅な過小評価となっている。

T=0.3secの距離減衰関係は、固有周期 0.1sec の時よりもそのバラツキは小さくなったものの、依然として Ratio に応じて値が小さくなるのがわかる。また、観測値は、Dhakal et al.の距離減衰式と同程度の Ratio の値をもつ値と調和的である。一方、Kanno et al.の距離減衰式による予測値は、依然として過小評価である。

T=0.1sec から 3.0sec の距離減衰関係を見ると、固有周期の増大にともない距離及び Ratio による観測値のバラツキが小さくなるのがわかる。Dhakal et al.の Ratio=1.0 と 0.7 の距離減衰式が接近していることがこれを良く表わしている。しかし、T=1.0sec と 3.0sec 観測値は、彼らの予測値よりも若干下側に分布している。一方、Kanno et al.の距離減衰式は固有周期が大きくなるにつれ、観測値よりも大きな予測値、つまり、過大評価となることもわかる。

c) まとめ

以上の検討から、2005年三陸沖アウターライズ地震による強震動特性は、以下のようにまとめることができる。PGAの距離減衰関係は、司・翠川式によるスラブ内地震の予測値よりもはるかに上側に分布している。また、擬似速度応答値の距離減衰関係は、Dhakal et al.によるスラブ内地震の距離減衰式と調和的である。より詳しく言うと、 $T=0.1\text{sec}$ では、予測式よりも若干大きな値を有するが、固有周期が長くなると、予測式よりも若干小さな値を有する。この地震の場合、震源距離がこれらの予測式の適用範囲を超えているため、これらの特徴の定量的な議論は困難であるが、2005年三陸沖アウターライズ地震は、スラブ内地震と同様に、短周期地震波を強く励起する特性を有すると言える。

4) EGF法による震源モデルの構築

ここでは、経験的グリーン関数法(三宅・他、1999⁶⁾)を用いて2005年三陸沖アウターライズ地震の震源モデルを構築する。図2に示した余震の中から要素地震を選定するのが最適であるが、強震記録のとれた余震がなかったため、1991年5月7日に発生した地震(Mw6.0)を要素地震として採用する。要素地震の震源情報を表2に示す。この地震の震央は2005年三陸沖アウターライズ地震(ターゲット地震)よりも北側に位置しているが、Harvardによるメカニズム解はターゲット地震と同じ正断層型である(図8)。

震源のモデル化にはJMAの強震記録を使用する。図8に示されている観測点が両地震とも記録した17観測点である。この中で、P波或いはS波が記録されていないJMAD5D(寿都)とJMAE35(飯田)と、後述の両地震のS波加速度スペクトル比が異常な形状を示したJMAE1F(宇都宮)を除いた14観測点を解析に使用する。ターゲット地震は95型強震計、要素地震は87型強震計による記録である。両地震計のサンプリング周波数が95型強震計で100Hz、87型強震計で50Hzと異なっているため、ターゲット地震の観測記録を50Hzにリサンプリングした。また、ターゲット地震と要素地震の震央が約100km離れているため、ここでは要素地震の震源をターゲット地震の位置に移動させた。その際に、要素地震の原記録に幾何減衰補正(振幅補正)を行った。解析対象周波数は、0.2-10.0Hzである。

ここで構築する震源モデルは、できるだけ単純なモデルで広帯域強震動を説明できるものとするため、震源断層面に矩形の強震動生成領域(SMGA; Miyake et al. 2003⁷⁾)を配置するモデルを仮定する(SMGAとは、全断層領域内での相対的にすべり速度の大きい領域として定義されている)。この場合、広帯域強震動の地震波はすべて震源断層面内のSMGAからのみ放射されるとし、背景領域の寄与はないものと仮定している。

最初に、ターゲット地震のメカニズム解とその余震分布から断層面を設定する。図2から、北北東に走向を有し、東側に傾斜する節面を断層面とする。次に、ターゲット地震と要素地震の断層面の長さの比 N と、応力降下量の比 C を推定する。これらのパラメータは、以下の関係を用いて推定される(横井・入倉⁸⁾)。

$$CN^3 = M_0/m_0 \quad (2)$$

$$CN = A_0/a_0 \quad (3)$$

ただし、 A_0 及び α_0 は加速度スペクトルの高周波数側の平坦レベル、 M_0 及び m_0 は地震モーメントであり、それぞれ大文字がターゲット地震、小文字が要素地震に対する値を表わす。両地震のモーメント比から $M_0/m_0 = 33$ であり、 N が自然数であるので、(2)式から $N = 3$ が求められる。さらに、(2)式より $C = 1.2$ となる。一方、図9に示すターゲット地震と要素地震のS波加速度スペクトル比の1~10Hzの平均から、短周期レベル比 $A_0/\alpha_0 = 4.2$ を得る。 N とこの比と(3)式から $C = 1.4$ を得る。ここでは2つの C の平均として $C = 1.3$ を用いることとする。

最後に、SMGAの大きさ、すべりの立ち上がり時間、破壊伝播速度、SMGA内の破壊開始点を未知数として、加速度、速度、変位波形の合成波形と観測波形の形状及び両加速度スペクトルの形状の一致度を目視により確認しながら、試行錯誤的にこれらのパラメータを推定する。合成と観測の波形の比較は、振幅の大きなS波を対象に行う。SMGAの大きさは、長さ6kmから12kmの範囲、すべりの立ち上がり時間は0.2secから0.6secの範囲、破壊伝播速度は1.5km/sから4.0km/sの範囲で探索する。SMGA内の破壊開始点は9パターンしかないが、方位による観測波形の形状から最適な位置を設定する。なお、上に示した探索範囲は、ターゲット地震に関するものであるが、それらは、 N を通して要素地震のそれにも関係している。

長さと同幅が等しいSMGAの大きさを想定して震源モデル(正方形モデル)を得た。得られた震源モデルのパラメータを表3に、強震動生成領域のモデルを図10に、JMAD62(浦河)、JMAE00(盛岡)、JMAE06(仙台)、JMAE2D(水戸)観測点での観測波形と合成波形、加速度スペクトルの比較を図11に示す。図11を見ると、JMAD62(浦河)では合成波形の振幅が観測波形よりも若干小さく、その形状も良い一致とは言えないが、JMAE00(盛岡)、JMAE06(仙台)、JMAE2D(水戸)では、合成波形が観測波形を良く再現している。また、全体的に観測加速度スペクトル形状も良く再現できている。残りの11観測点における合成波形による観測波形の再現性も、ここで例示したものと同程度である。さらに、図12に合成波形と観測波形による擬似速度応答スペクトルの比較例を示す。両者は、良い一致を示している。

5) 微視的断層パラメータの特徴

1991年及び2005年三陸沖アウターライズ地震の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(表4)を既存のスラブ内地震のスケーリング則と比較する。

a) SMGAの面積と M_0 の関係

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13に示す。図中の破線は笹谷・他、(2006)⁹⁾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。1991年地震と2005年地震のSMGA面積は、スラブ内地震のスケーリング則に合致していることがわかる。なお、ここでは、SMGA面積とアスペリティ面積とを同一とみなしている(三宅・他、1999⁶⁾)。

b) 短周期レベルAと M_0 の関係

まず、クラックモデルを仮定して、(4)式から1991年地震の応力降下量($\Delta\sigma$)を推定する。

$$\Delta\sigma = (7/16)[M_0/(S/\pi)]^{1/3} \quad (4)$$

S は要素地震のSMGAの面積である。1991年地震の応力降下量は197MPaで、これに C を乗じることで2005年地震の応力降下量が256MPaと求められる。

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、2002¹⁰⁾)。

$$A = 4\pi\beta^2(S/\pi)^{0.7}\Delta\sigma \quad (5)$$

S は SMGA 面積、 $\Delta\sigma$ は SMGA の応力降下量、 β は S 波速度である。 $\beta = 4.6\text{km/s}$ として、SMGA 面積と、先に求めた応力降下量を用いると、1991 年地震の短周期レベルは $A = 7.1 \times 10^{19}\text{Nm/s/s}$ 、2005 年地震の短周期レベルは $A = 2.8 \times 10^{20}\text{Nm/s/s}$ と求められる。これらの値をスラブ内地震の A - M_o 関係にプロットしたのが図 14 である。これから 1991 年及び 2005 年地震の A は、スラブ内地震のスケーリング則（笹谷・他、2006⁹⁾）よりも約 3 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、推定された M_o 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、推定された M_o は、アスペリティと背景領域から解放されたものと考えべきである。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、2006⁹⁾）。これに従うと、上で推定された応力降下量及び短周期レベルはその上限値と考えるべきである。例えば、観測された M_o 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 となる。残念ながら、今回の解析では、アスペリティモデルとした場合の SMGA の M_o への寄与を評価できないが、1991 年及び 2005 年三陸沖アウターライズ地震が、その浅い震源にも関わらず、スラブ内地震と同様に、大きな応力降下量と短周期レベルを有していることがわかった。

6) 議論

図 4 において、2005 年三陸沖アウターライズ地震の PGA 距離減衰関係が、司・翠川(1999)²⁾ のスラブ内地震の距離減衰式よりもはるかに上側に分布していること、及び、2004 年紀伊半島沖地震・前震の PGA の距離減衰関係が、司・翠川(1999)²⁾ の距離減衰式でほぼ説明できることを示した。そして、そこでは、この相違の要因を東日本と西日本の減衰構造の違いにあると考えた。Suzuki et al. (2005)¹¹⁾は、EGF 法によって 2004 年紀伊半島沖地震・前震の震源モデルを構築している。その結果によると、その応力降下量は 8.3MPa で、2005 年三陸沖アウターライズ地震の値 (256MPa) に比べて極めて小さい。これは、図 4 に示す両地震の PGA 距離減衰関係の相違の要因として、東日本と西日本の減衰構造の違いのみならず、震源特性の違いも考慮する必要があることを意味している。

最近、浅野・岩田(2010)¹²⁾は、EGF 法によって 2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震 ($M_{JMA}6.5$) の震源モデルを構築した。これは、海溝近くのフィリピン海プレート内で発生した浅い逆断層地震である。震源は、2つの SMGA でモデル化され、それぞれの応力降下量は、35.7MPa と 27.5MPa である。これらの値も、2005 年三陸沖アウターライズ地震の値 (256MPa) に比べて数分の一と小さい。これらの事実は、太平洋プレート内とフィリピン海プレート内の浅い地震の震源特性が大きく異なる地域性の存在することを意味している。

(c) 結論ならびに今後の課題

K-NET 等の強震観測網の整備以降に初めて発生した 2005 年三陸沖アウターライズ地震 ($M_w7.0$) の強震動特性と震源特性について検討した。この地震による PGA の距離減衰関係は、

司・翠川(1999)²⁾によるスラブ内地震の予測式よりもはるかに上側に分布していることがわかった。また、擬似速度応答の距離減衰関係は、Dhakal et al. (2010)³⁾によるスラブ内地震の予測式とほぼ整合していることがわかった。

EGF 法によって構築した震源モデルから、極めて浅い地震でありながら、この地震の SMGA のパラメータが、既存のスラブ内地震のスケーリング則（笹谷・他、2006⁹⁾）とほぼ整合していることがわかった。また、フィリピン海プレート内で発生した浅い地震に比べて、太平洋プレート内で発生したこの地震が、極めて大きな応力降下量を有することがわかった。

2005 年三陸沖アウターライズ地震の強震動データは、震源距離約 300km 以遠で得られたものである。強震動特性の検討では、データと既存の距離減衰式による予測値とを比較する手法を用いたが、このデータの距離範囲は、減衰式の適用範囲外である。ここでは、既存の距離減衰式を外挿して比較したが、その妥当性を検証する必要がある。また、EGF 法による震源モデルの構築も、極めて距離の大きなデータに基づくものである。解析精度の向上のために、より震源に近い海底地震計の観測データが必要であると考え。最後に、太平洋プレート内とフィリピン海プレート内で浅い地震の震源特性に大きな相違のあることを指摘したが、解析例を増やして検証する必要があると考える。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地震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，63-70，1999.
- 3) Dhakal P. Yadab, N. Takai, and T. Sasatani: Empirical analysis of path effects on prediction equation of pseudo-velocity response spectra in northern Japan, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 39, 443-461, 2010, DOI: 10.1002/eqe
- 4) Kanno T, A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., 96, 879-897, 2006, DOI: 10.1785/0120050138
- 5) 高井伸雄・岡田成幸：火山フロントを考慮した地震動の距離減衰式改善の試み，第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集，605-608，2002.
- 6) 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.
- 7) 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., 93, 2531-2545, 2003.
- 8) 横井俊明・入倉孝次郎：震源スペクトルの Scaling 則と経験的グリーン関数法，地震 2, 44, 109-122, 1991
- 9) 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.

- 10) 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.
- 11) Suzuki, W., T. Iwata, K. Asano, and N. Yamada: Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green's function method: Earth Planets Space, 57, 345-350, 2005.
- 12) 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.

(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 |
|---|---------------------------|---|---------|---------|
| Spatial Distribution Features of Pseudo Velocity Response from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.1) and Its Intraslab Aftershock (Mw7.1); Poster | N. Takai, and T. Sasatani | 4 th IASPEI/IAEE Int. Sym.: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Univ. of Ca. Santa Barbara | 2011年8月 | 国際 |

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 |
|---|---------------------------|---|---------|---------|
| Spatial Distribution Features of Pseudo Velocity Response from the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.1) and Its Intraslab Aftershock (Mw7.1) | N. Takai, and T. Sasatani | Proc. 4 th IASPEI/IAEE Int. Sym.: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Univ. of Ca. Santa Barbara | 2011年8月 | 国際 |

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

表1 2005年三陸沖アウターライズ地震の震源情報

| | Latitude | Longitude | Depth | Moment | Magnitude |
|---------|----------|-----------|---------|--------------|-----------|
| JMA | 38.02° | 144.94° | 45.00km | - | Mj 7.2 |
| Harvard | 38.22° | 144.97° | 18.00km | 3.7x10**19Nm | Mw7.0 |
| 一柳 (私信) | 38.21° | 144.75° | 12.90km | - | - |

表2 1991年三陸アウターライズ地震の震源情報

| | Latitude | Longitude | Depth | Moment | Magnitude |
|---------|----------|-----------|---------|---------------|-----------|
| JMA | 39.38° | 144.97° | 18.30km | - | Mj 6.0 |
| Harvard | 39.50° | 144.51° | 15.0km | 1.12x10**18Nm | Mw6.0 |

表3 得られた震源モデルのパラメータ

| SMGA | |
|------------------|------------|
| Length | 7.2 km |
| Width | 7.2 km |
| Area | 51.8 km**2 |
| Rise time | 0.52 sec |
| Rupture velocity | 2.1 km/s |

表4 2005年と1991年アウターライズ地震の微視的断層パラメータ

| | 2005 Event | 1991 Event |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| SMGA | 51.8 km**2 | 5.76 km**2 |
| Stress Drop | 256 MPa | 197 MPa |
| Short-period Level | 2.8x10**20 Nm/s/s | 7.1x10**19 Nm/s/s |

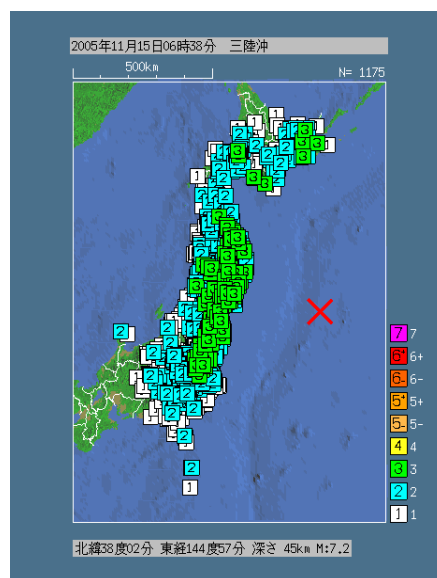


図1 2005年三陸沖アウターライズによる震度分布 (JMAによる)

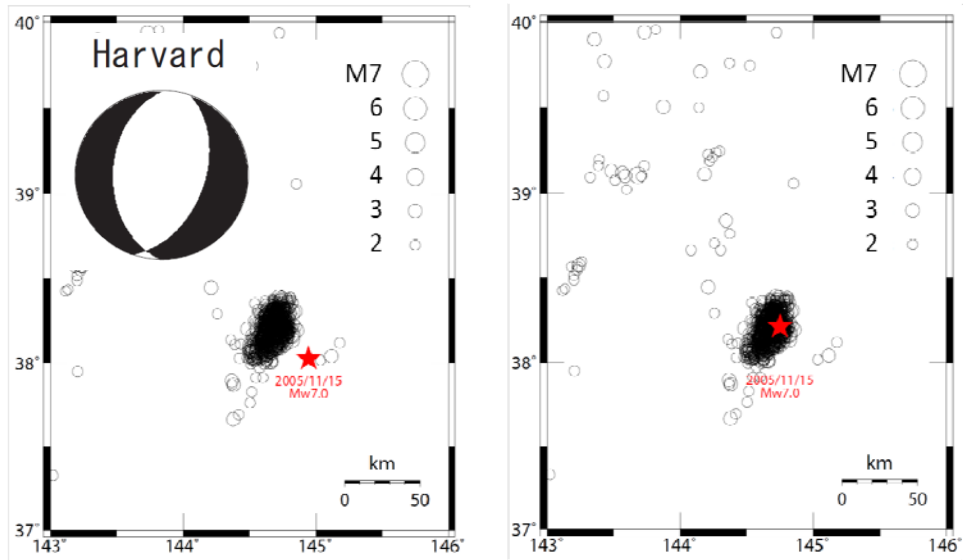


図2 2005年三陸沖アウターライズ地震の余震活動（1ヶ月間；JMAデータによる）。
 左：JMAによる本震の震央（★）。右：一柳によって再決定された本震の震央（★；私信）。
 Harvardによるメカニズム解も示されている。

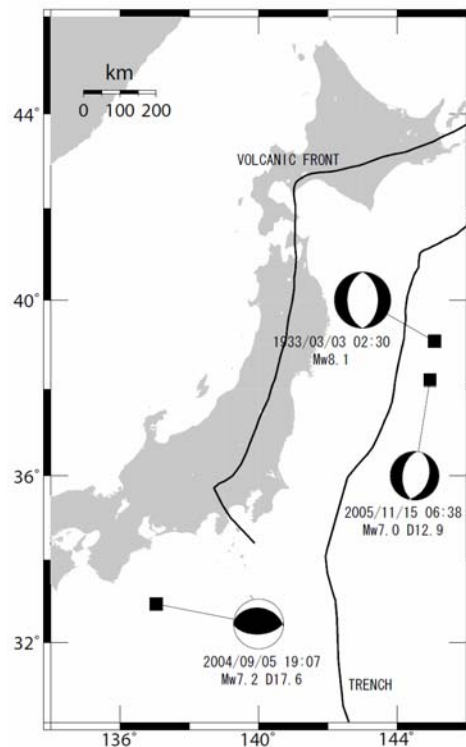


図3 2005年三陸沖アウターライズ地震と2004年紀伊半島沖地震・前震の震央とメカニズム解。
 1933年三陸沖巨大アウターライズ地震の震央とメカニズム解も示されている。

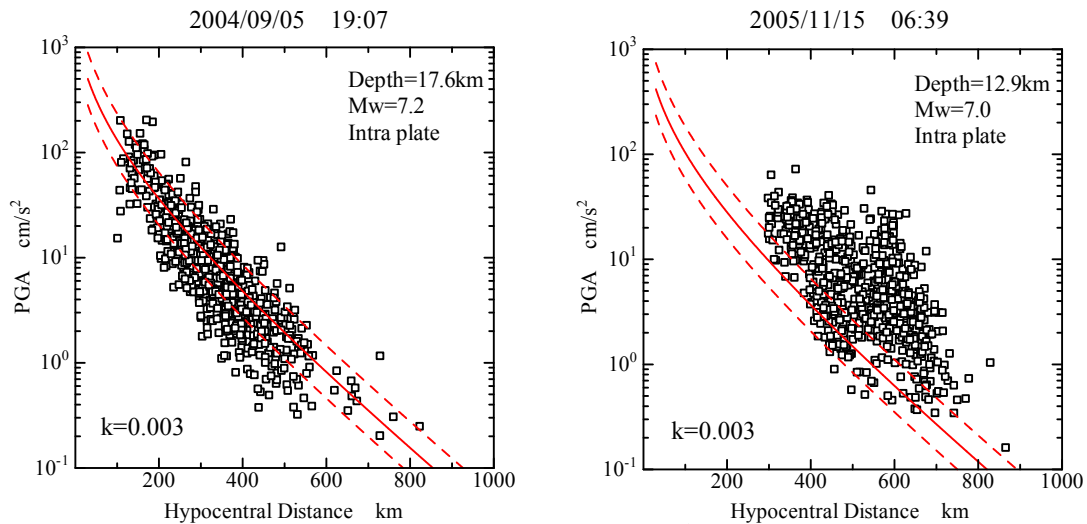


図4 PGA 距離減衰関係と司・翠川(1999)²⁾による予測式との比較。

左：2004 紀伊半島沖地震・前震、右：2005 年三陸沖アウトターライズ地震。

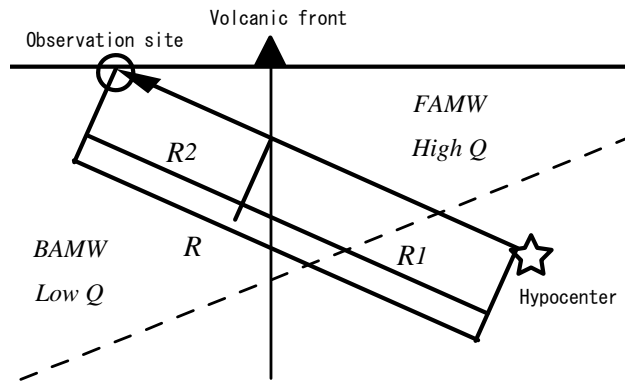


図5 火山フロントを境にした距離の分割。

FAMW：前弧側マントルウェッジ、BAMW：背弧側マントルウェッジ。

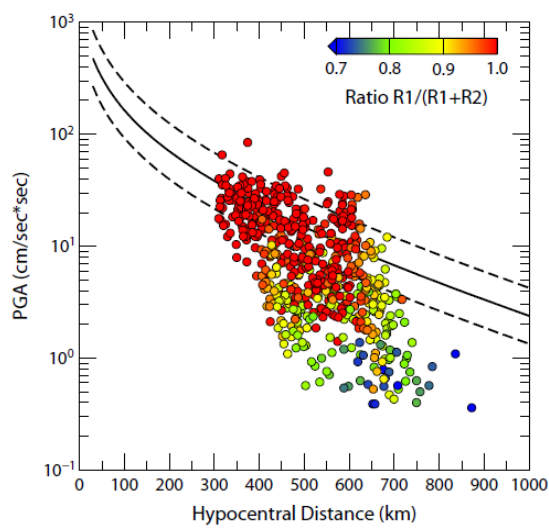


図6 Ratio で色分けした PGA の距離減衰関係。Ratio=1 のデータを説明するための予測式 (ただし、司・翠川(1999)²⁾による予測式において $k=0.001$ としている) も加筆されている。

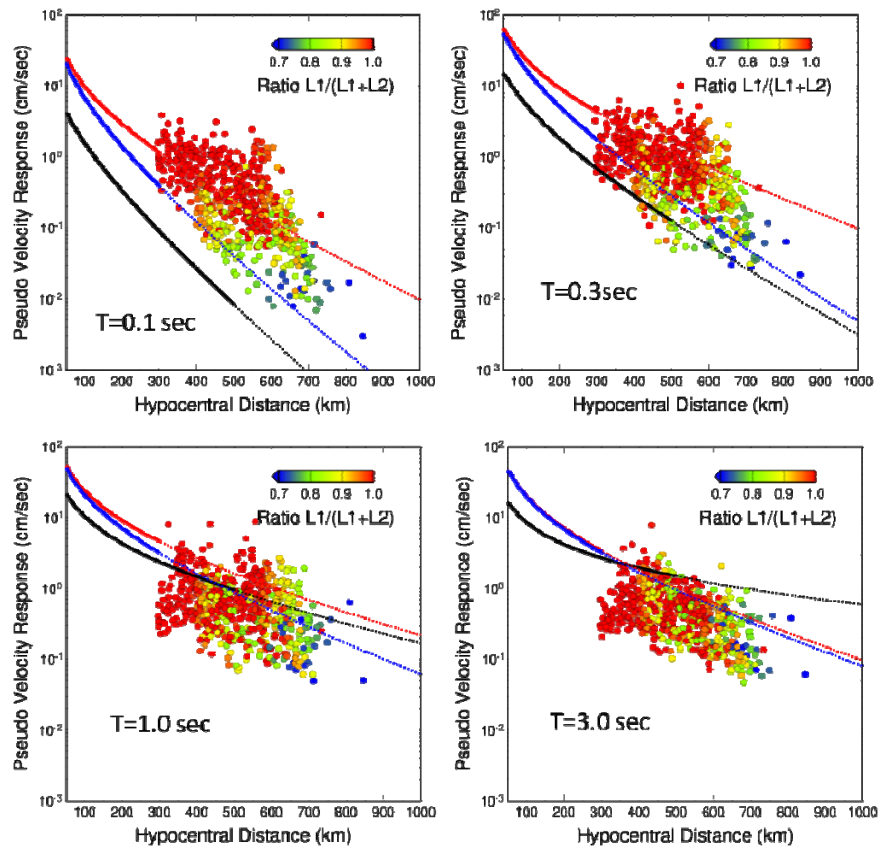


図7 擬似速度応答値の距離減衰関係と Dhakal et al. (2010)³⁾と Kanno et al. (2006)⁴⁾による予測式との関係

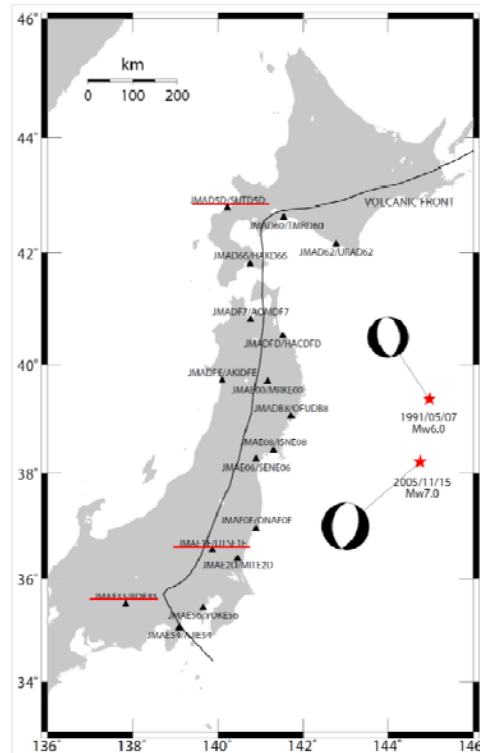


図8 ターゲット地震（2005地震）と要素地震（1999地震）の震央とメカイズム解、及び、EGF解析に用いられたJMA観測点の分布（ただし、下線を付した観測点は除く）。

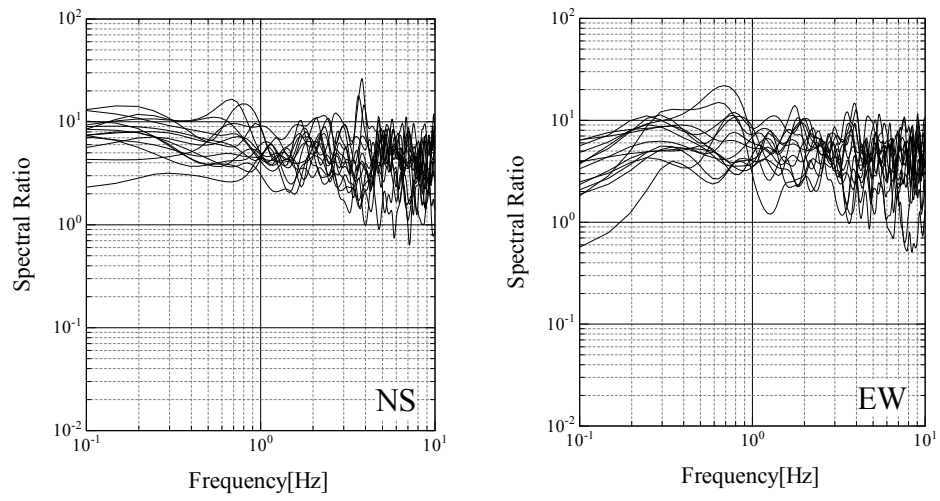


図9 ターゲット地震/要素地震のS波スペクトル比（14観測点の比が重ねて示されている）。

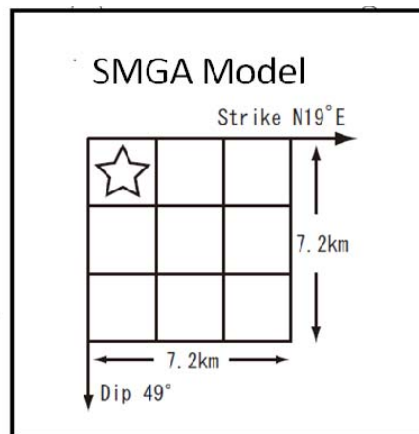


図10 推定されたSMGAモデル。☆は放射状破壊の開始点を表す。

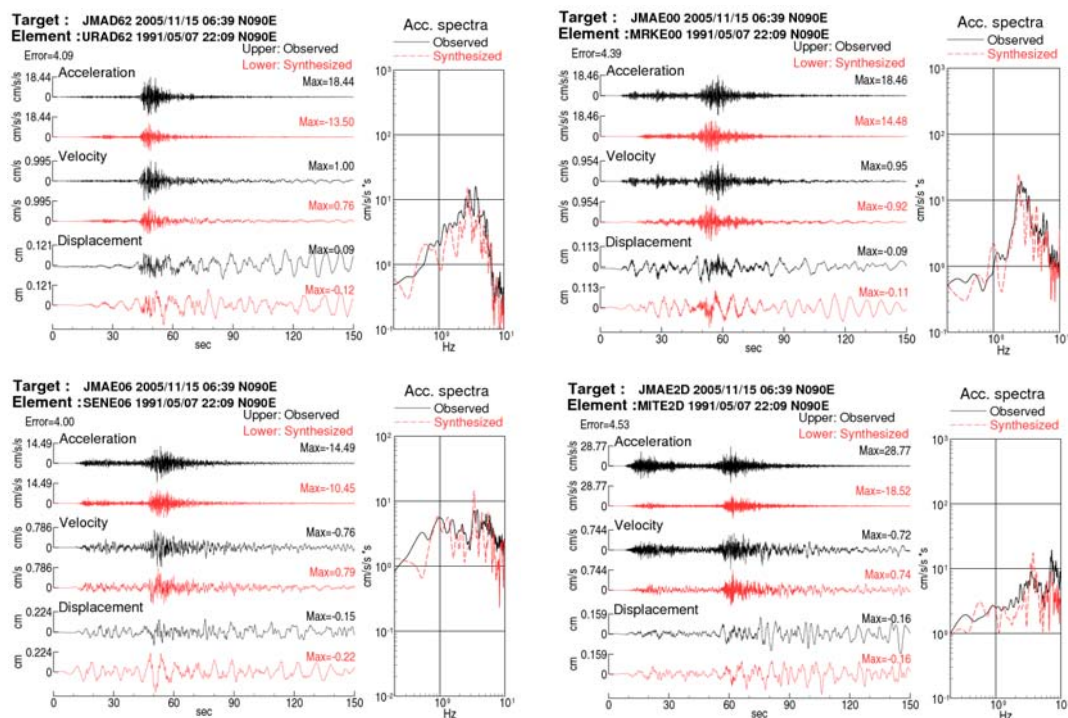


図 11 合成波形と観測波形の比較例。上左：浦河、上右：盛岡、下左：仙台、下右：水戸。

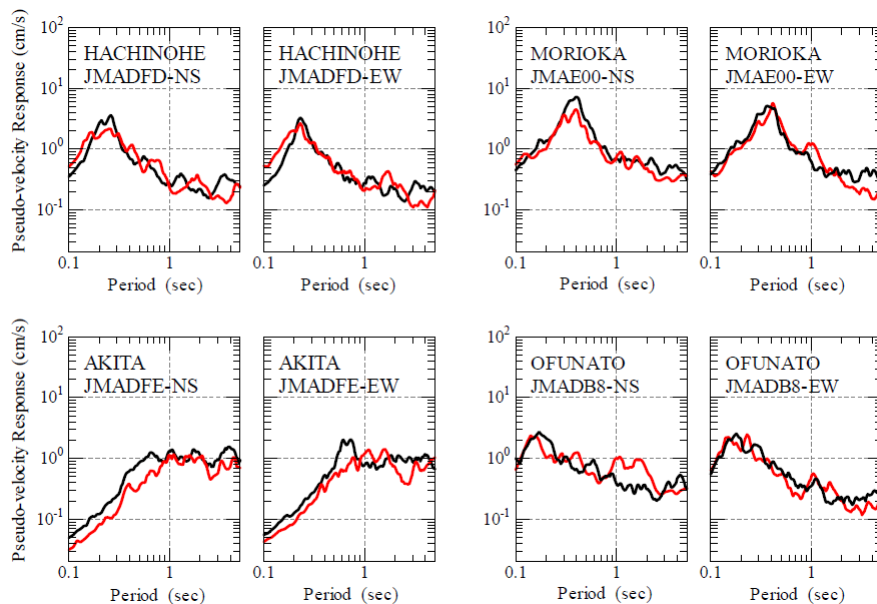


図 12 合成波形と観測波形の擬似速度応答スペクトルの比較図。赤線：合成、黒線：観測。

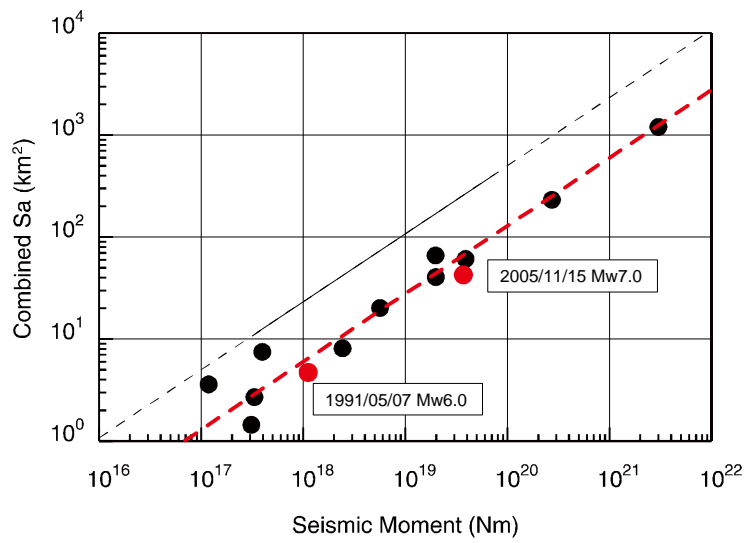


図 13 SMGA の面積と地震モーメントとの関係。赤い波線：スラブ内地震の $Sa-Mo$ 関係。

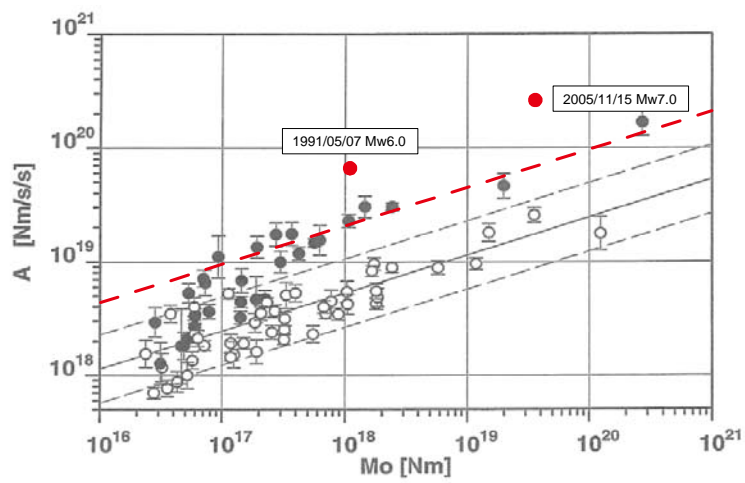


図 14 短周期レベル A と地震モーメントとの関係。赤い波線：スラブ内地震の $A-Mo$ 関係。