

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

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、以下の項目について研究する。

- ・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
- ・広帯域地震波増幅特性評価の高度化
- ・スラブ内における地震発生層に関する研究
- ・スラブ内地震による高精度ハイブリッド強震動予測手法の確立

(b) 平成 20 年度業務目的

2006 年から 2009 年にかけて千島列島東方沖で顕著な地震活動が発生している。それは、プレート間地震と海洋プレート内地震による活動で、Mw8 クラスの大地震 2 つを含んでいる。海洋プレート内大地震は発生頻度が低いので、この地震活動による地震の記録は貴重である。最初に、海洋プレート内大地震（スラブ内大地震）とプレート間大地震の短周期地震波の励起特性を比較する。次に、規模の異なる 3 つの海洋プレート内地震による短周期地震波励起の地震規模及び深さ依存性について検討する。これらは、スラブ内地震の既存の短周期地震波励起特性（スケーリング則）を検証することを目的としている。

(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	教授	笹谷 努	

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

2006 年 11 月 15 日と 2007 年 1 月 13 日に千島列島シムシル島の東方沖で Mw8 を超える 2 つの大地震が、わずか 2 ヶ月の間にほとんど同じ場所で発生した。前者は、海溝軸の陸側で発生したプレート間地震であるが、後者は、海溝軸の海側で発生した海洋プレート内地震（スラブ内地震）である。最初に、北海道で観測された記録を基にして、これらの地震による短周期地震波の励起特性を比較した。その結果、2007 年海洋プレート内大地震が、2006 年プレート間大地震に比べて約 10 倍強い短周期地震波を励起したことがわかった。次に、同じ地域で発生した規模の異なる 3 つの海洋プレート内地震（Mw : 6.4、7.4、8.1）による記録を基に、これらの地震による短周期地震波励起特性のスケーリング則について検討した。その結果、Mw7.4 と 8.1 の地震は、既存のスケーリング則に比べて約 2 倍強い短周期地震波を励起したことがわかった。

(b) 業務の成果

1) はじめに

2006年11月15日と2007年1月13日に千島列島シムシル島東方沖でMw8を越える2つの大地震が、わずか2ヶ月の間にほとんど同じ場所で発生した。2006年千島列島東方沖地震は海溝軸の陸側で発生したプレート間地震であるが、2007年千島列島東方沖地震は海溝軸の海側の海洋プレート内で発生したOuter Rise Earthquakeである。これまで日本列島付近では、Mw8クラスの沈み込む海洋プレート内の大地震は数が少なく、また、良好な強震動記録が残されていない。今回は、震源近傍ではないが、幸にも上記2つの大地震による広帯域の強震動記録が北海道で得られている。これらのデータは、地震カテゴリーによる大地震の震源特性の相違を明らかにする絶好の機会を提供した。

また、2009年01月16日に2007年海洋プレート内大地震(Mw8.1)の余震域の北東部で、Mw7.4の海洋プレート内地震が発生した。この地震は、2007年海洋プレート内大地震が正断層のメカニズムを有するのに対して、逆断層のメカニズムを有している、また、前者が約10kmの深さで発生したのに対して、後者は約50kmの深さで発生している。これらに加えて、2007年海洋プレート内大地震の前震として、2006年12月08日にMw6.4地震が深さ約15kmで発生している。これら3つの地震による強震動記録は、海洋プレート内地震の震源特性の地震規模及び深さ依存性を明らかにする絶好のデータである。

ここでは、上記2つの課題についての業務の成果を報告する。

2) プレート内大地震とプレート間大地震による短周期地震波の励起特性

2006年11月15日20時14分ころ(日本時間)に千島列島シムシル島の東方沖でMw8.3の大地震が発生し、北海道の太平洋沿岸及び東北地方北部で有感となり最大震度2を観測した(図1)。その約2ヶ月後の2007年1月13日13時23分ころ(日本時間)、ほぼ同じ場所でMw8.1の大地震が発生し、北海道、東北から関東、甲信越までの広い範囲で有感となり、最大震度3を観測した(図1)。日本列島から見てこれらの地震はほぼ同じ場所で発生しているにもかかわらず、Mw8.3の2006年地震よりもむしろより規模の小さいMw8.1の2007年地震の方がはるかに大きい有感域を有している。USGSによるこれらの地震の震源パラメータとHarvardによるMwは表1の通りである。

全国展開のK-NET及びKiK-net観測点では、両地震に対してP波初動から記録されているものが少なく、しかも記録時間が短い。よって、これらのデータから2006年と2007年の両地震による強震動記録を詳細に比較することは困難である。一方、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設置の根室観測点(NMR)、厚岸観測点

(AKK)、広尾町茂寄観測点(MYR)、及び恵山観測点(ESH)では連続記録が得られており、今回の解析に活用できる。図2に観測点の位置を、表2に観測点の情報を示す。

観測計器が速度型強震計であるので、観測波形を微分及び積分して加速度及び変位波形を得た。例として、NMRとMYR観測点における2006年と2007年の千島列島東方沖地震による加速度、速度、変位波形の例を図3と図4に示す。両地震による速度及び変位波形の最大振幅に大差はないが、加速度振幅に関しては数倍の差異がある。海洋プレート内で発生した2007年地震の方が大きな加速度を有している。また、加速度記録ではS波部分でのその最大値が得られている。

両地震による加速度波形の性質を比較するために、S波部分のスペクトル及びそのスペクトル比を求めた。表面波の混入をできるだけ避けるために、スペクトル解析のウィンドウはS波到着から約40秒間とし、その前後5%にコサイン型のテーパーをかけ、高速フーリエ変換で得られたスペクトルに対し、Parzen-window（幅0.3Hz）を用いて平滑化を行った。図3と図4の加速度波形をみると、P波コーダ部分がS波に比べてかなりの大きさを有していることがわかる。このP波コーダのS波スペクトルへの影響をチェックするために、S波到着直前のP波コーダに対しても同様にスペクトルを求めた。各観測点で得られた2006年と2007年地震の振幅スペクトルとそのスペクトル比（2007/2006）の例を図5と図6に示す。各観測点のスペクトル形状は、各観測点のサイト特性を反映して、特に高周波数側（>1Hz）で異なっている。しかし、そのスペクトル比はお互いに似ていることがわかる。また、P波コーダのスペクトルは、特に2006年地震において、10Hz以上ではS波スペクトルとほぼ同様のレベルとなっている。よって、以下では10Hz以下の周波数に注目して議論する。

水平2成分のスペクトル比を重ね書きした図7は、4観測点でのスペクトル比がお互いに似ていることを明確に示している。観測された地震波の加速度スペクトル($O(f)$)は、以下のように震源特性($S(f)$)、伝播経路特性($P(f)$)、サイト特性($G(f)$)を含んでいる。

$$O(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \quad (1)$$

2つの地震のスペクトル比をとると、(2)式が得られる。

$$\frac{O_{07}(f)}{O_{06}(f)} = \frac{S_{07}(f)}{S_{06}(f)} \cdot \frac{P_{07}(f)}{P_{06}(f)} \cdot \frac{G(f)}{G(f)} \quad (2)$$

ここで、添え字06と07は2006年地震及び2007年地震を表す。同一観測点の記録を用いているので両地震に対するサイト特性は等しい。また、2つの地震の震源が観測点からほぼ同じ方位であり、震央距離もほぼ等しいこと（表2）から両地震の伝播経路特性も等しい（ $P_{06}(f) \approx P_{07}(f)$ ）と仮定できる。よって、観測された2つの地震のスペクトルの比をとることで、2つの地震のS波加速度震源スペクトルの比が得られる。

$$\therefore \frac{O_{07}(f)}{O_{06}(f)} = \frac{S_{07}(f)}{S_{06}(f)} \quad (3)$$

S波のスペクトル比は、1Hzで約3、3Hzで約10と増大し、そこから20Hzまでは10~20の間におさまっている。これは、Outer Rise Earthquakeである2007年海洋プレート内大地震が、2006年プレート間大地震に比べて短周期地震波を10倍ほど強く励起したことを意味している。加速度震源スペクトルの短周期（高周波数）レベル(A)は、(4)式に示すようにアスペリティパラメータと関係している。

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

ここで、 β はS波速度、 r_n と σ_n はアスペリティの面積を円形とした場合の半径とそこでの応力降下量である（壇・他、2003）¹⁾。また、この式は、n個のアスペリティが存在する場合に相当する。図7の高周波数側の大きなスペクトル比（~10倍）は両地震のこのAの比に相当している。これは、図16示す規模の小さな地震から求められた海洋プレート内地震とプレート間地震のA・Mo関係とは大きくずれている。これに関しては、最後に議論する。

3) プレート内地震の短周期地震波励起特性の地震規模及び深さ依存性

2009年01月16日に2007年海洋プレート内大地震(Mw8.1)の余震域の北東部で、Mw7.4の海洋プレート内地震が発生した。この地震は、2007年地震に比べて震源が深く(50km)、メカニズムも逆断層と異なっている(図8)。この地震による日本での震度分布は、図1左に示すMw8.3の2006年プレート間大地震によるそれよりも有感域が大きいという特徴がある(図8)。また、ほぼ同じ領域で2007年プレート内大地震の前震として、2006年12月08日にMw6.4の地震も発生している。この地震は、2007年地震とほぼ同じ深さで、正断層のメカニズムを有する(図9)。以下においては、規模の異なるこれら3つの地震による記録の解析から、短周期地震波励起特性の地震規模依存性、さらに、深さ依存性(或いは、断層タイプ依存性)について検討する。Harvardによる震源情報を表3に示す。

2009年地震によって観測された記録の例を図10と図11に、2006年地震によるそれを図12と図13に示す。2009年地震の場合、2006、2007年地震と比べて震源が深いため、速度および変位波形において表面波の励起が他とは異なっていることがわかる(図10、11と図3、4及び図12、13を比較せよ)。

図14と図15にNMRとMYRにおける3地震のS波加速度スペクトルを示す。解析手法は前節と同様である。地震規模に応じて、スペクトルのレベルは異なっている。これらのスペクトルからそれぞれの短周期レベルの絶対値を推定することは困難である。それは、距離が遠いため、幾何学的減衰及び非弾性的減衰の影響を正確に評価することが困難であることによる。そこで、Mw6.4地震のスペクトルレベルに対するMw7.4とMw8.1地震のそのレベルを比較することで、地震規模依存性、及び深さ依存性について検討する。この際に、既存の研究から得られた短周期レベル A と地震モーメント Mo のスケーリング則を基準に考察する。

図15は、2007年地震と2009年地震の2006年地震に対するスペクトル比を示す。4観測点における水平2成分のスペクトル比を重ね書きしたものである。周波数2Hzから10Hzまでのスペクトル比の平均値を短周期レベル A の比として推定し、2007/2006~14、2009/2006~6を得た。ここで基準とする $A \cdot Mo$ 関係を図16に示す。これは、北海道東部で発生したプレート間及びスラブ内地震の $A \cdot Mo$ 関係である(笹谷・他、2006)²⁾。実線は、内陸地殻内地震の $A \cdot Mo$ 関係で、破線はそのバラツキである(壇・他、2001)³⁾。プレート間地震の $A \cdot Mo$ 関係は、内陸地殻内地震のそれとほぼ同じであるが、スラブ内地震の $A \cdot Mo$ 関係は、内陸地殻内地震のその約4倍大きいことがわかる(図中にスラブ内地震の $A \cdot Mo$ 関係式が示されている)。ただし、この関係は、Mw7.6以下の地震から推定されたものである。今回の解析から、それよりも大きいMwでの $A \cdot Mo$ 関係がこのスケーリング則に合致するかどうかを確かめることが本研究の目的である。

図17は、Mw6.4地震の $A \cdot Mo$ 関係が、既存の関係上に乗ると仮定して、Mw7.4とMw8.1の地震の A の値をそれぞれのスペクトル比と Mo を基に描いたものである。この図から、規模の大きなプレート内地震の A の値は、スケーリング関係よりも2倍ほど大きいことがわかる。間接的な推定法であるが、 Mo の大きな領域での $A \cdot Mo$ 関係を明らかにしたことは重要と考える。また、2007年地震(深さ:10km、正断層)と2009年地震(深さ:50km、

逆断層)の A がほぼ同一なスケーリング則を示すことから、短周期レベル A の深さ依存性及び断層タイプ依存性の存在しないことがわかる。なお、同図には、2006年11月15日に発生したプレート間大地震の A の値が、示されている。この場合、基準とする地震は、この地震の前震である2006年9月30日に発生したプレート間地震 ($M_w6.6$) である。2006年プレート間大地震は、スケーリング則による値の約 $1/2$ に位置している。その結果、2007年海洋プレート内大地震と2006年プレート間大地震とで A の値が約10倍異なることになる。これは、前節での結論と合致している。

(c) 結論ならびに今後の課題

2006年11月15日と2007年1月13日に千島列島シムシル島の東方沖で M_w8 を超える2つの大地震がほとんど同じ場所で発生した。前者は、プレート間地震であるが、後者は、海溝軸の海側で発生した海洋プレート内地震である。これらの地震によるS波加速度スペクトルの比較から、2007年海洋プレート内大地震が、2006年プレート間大地震に比べて約10倍強い短周期地震波を励起したことがわかった。次に、同じ地域で発生した規模の異なる3つの海洋プレート内地震 ($M_w : 6.4, 7.4, 8.1$) によるS波加速度スペクトルを基に、これらの地震による加速度震源スペクトルの短周期レベルのスケーリング則について検討した。その結果、 $M_w7.4$ と 8.1 の地震は、既存のスケーリング則に比べて約2倍大きい短周期レベルを有することがわかった。今後も、発生頻度の低い海洋プレート内大地震の加速度震源スペクトルの短周期レベルのスケーリング則について検討する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 壇一男, 石井透, 渡辺基史, 佐藤俊明: 巨視的震源情報と不均質震源特性との関係の分析, 地震被害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 第1回シンポジウム論文集, pp. 29-36, 2003.
- 2) 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, pp. 123-134, 2006.
- 3) 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, 545, pp. 51-62, 2001.

(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	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
千島列島東方沖で発生した2007年海洋プレート内地震の短周期地震波の励起特性 (口頭)	川端 涉 笹谷 努 高井伸雄	日本建築学会大会 (広島大学)	平成20年9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 21 年度は、平成 19 年度および平成 20 年度の業務を引き継いで、スラブ内地震の震源モデル設定レシピの妥当性の検証と、その強震動予測手法の問題点の抽出に関して解析事例を増やす。これは、スラブ内地震による強震動予測の高度化に必須と考える。

また、2003 年 5 月 26 日に宮城県沖で発生したスラブ内地震（Mw7.0、深さ 72km）を解析の対象として、S 波の H/V スペクトル比の変化が地盤の非線形応答を表すことを理論的に明らかにし、地盤の非線形応答を強震動予測に組み込む手法を開発する。まず、等価線形法（SH 波鉛直入射）により仮定した地盤の非線形応答時のひずみレベル及び地盤パラメータを推定する。次に、その値を用いて SV 波入射による水平地盤構造の応答を Propagator Matrix 法で評価し、非線形化による地盤物性値の変化と S 波の H/V スペクトル比の変化との関係を明らかにする。地盤の非線形応答を強震動予測に組み込む手法開発のためには、観測点の地盤構造の情報が必要である。KiK-net 観測点では、地表から地中地震計までの PS 検層結果が示されているが、減衰定数が不明である。そこで、観測記録を基に、減衰定数の推定とともに速度構造のチューニングを行う必要がある。また、地盤の動的変形特性も明らかでないが、これに関しては既存の平均的な値を用いるしかない。このような条件下で地盤の非線形応答を強震動予測に組み込んだ場合の有効性を検討する。

以上の業務の目標とする成果は、1) スラブ内地震の震源モデル設定レシピの妥当性の確認、2) 強震動時における S 波の H/V スペクトル比の変化に対する理論的な裏づけ、3) 過大な予測 PGA の要因が、地盤の非線形応答であることの確認、4) 地盤の非線形応答を強震動予測に組み込む手法の開発である。

表 1. 2006 年及び 2007 年千島列島東方沖地震の震源パラメータ

年 日 付, 時 刻	震 央	深 さ km	Mw
2006/11/15 20:14(JST)	153.230 E 46.706 N	13.5	8.3
2007/01/13 13:23 (JST)	154.455 E 46.272 N	12.0	8.1

表 2. 解析に用いた観測点

	NMR	AKK	MYR	ESH
Sensor	VSE-11/12F*	VSE-11/12F*	VS3*	VSE-11/12F*
Frequency range	0.025~70 Hz	0.025~70 Hz	0.001~100 Hz	0.025~70 Hz
Epical 2006	691.6 km	773.8 km	924.7 km	1106.8 km
Distance 2007	760.8 km	843.5 km	994.2 km	1180.5 km
Azimuth 2006	-118.7	-118.0	-117.7	-113.9
2007	-112.0	-111.7	-112.4	-109.6

*: velocity-type seismometer (Tokyo-Sokushin Co. Ltd.)

表 3. 千島列島東方沖海洋プレート内地震の震源パラメータ

年 日 付, 時 刻	震 央	深 さ km	Mw
2006/12/08 19:10	154.44 E 46.24 N	15.4	6.4
2007/01/13 04:23	154.80 E 46.17 N	12.0	8.1
2009/02/15 17:49	155.40 E 47.02 N	46.0	7.4

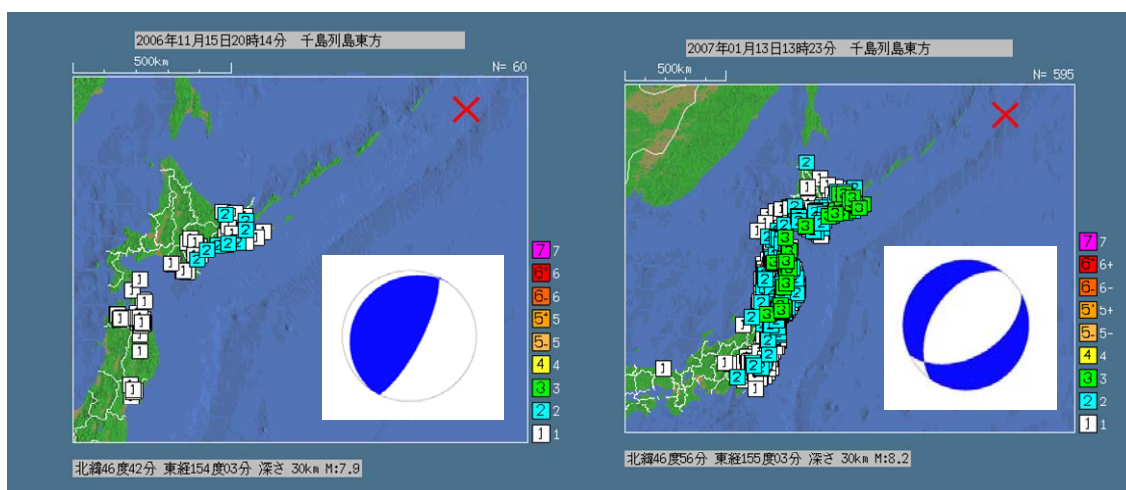


図 1. 左：2006 年千島列島東方沖地震による震度分布。右：2007 年千島列島東方沖地震による震度分布。気象庁による。それぞれの地震のメカニズム解も示されている。

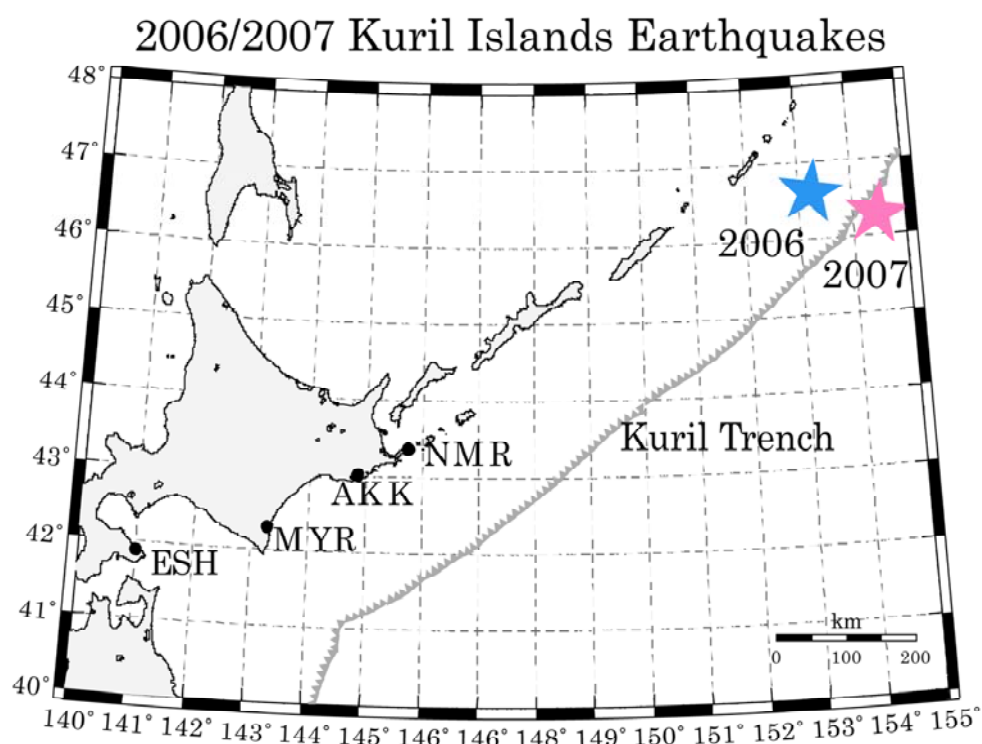


図 2. 2006 年と 2007 年千島列島東方沖地震の震央（★印）と解析に用いた観測点分布。

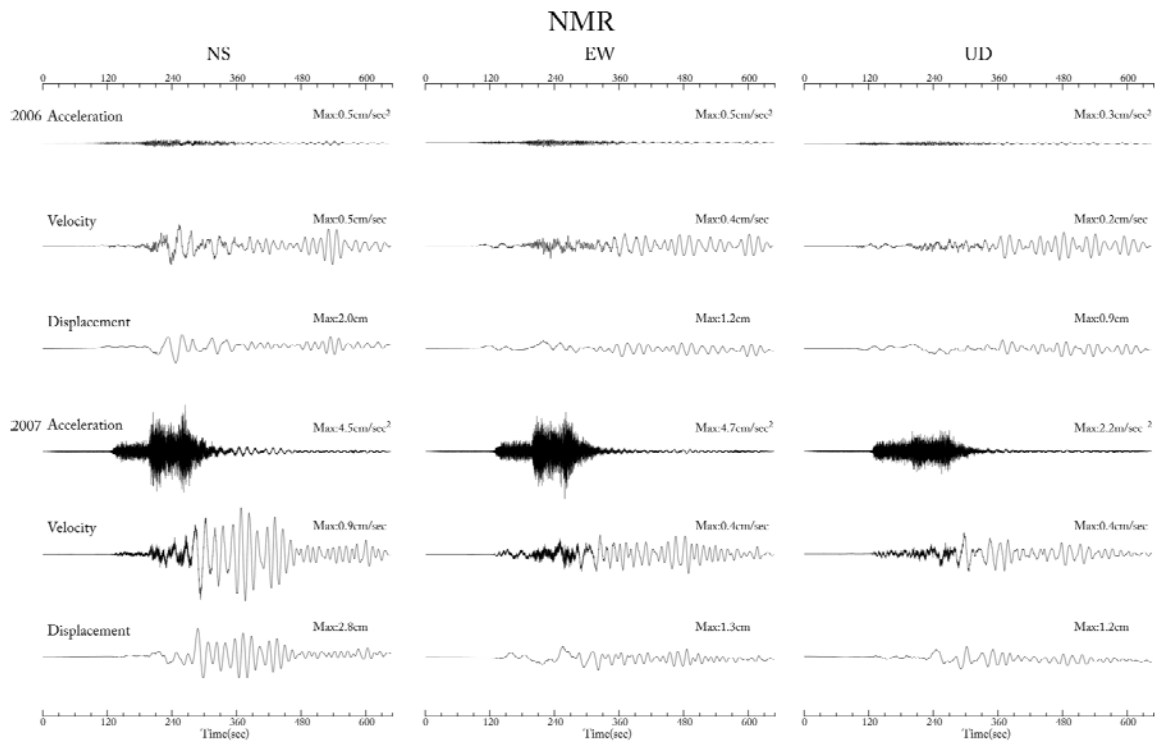


図 3. NMR における 2006 年と 2007 年千島列島東方沖地震による観測記録。それぞれの加速度、速度、変位波形が示されている。

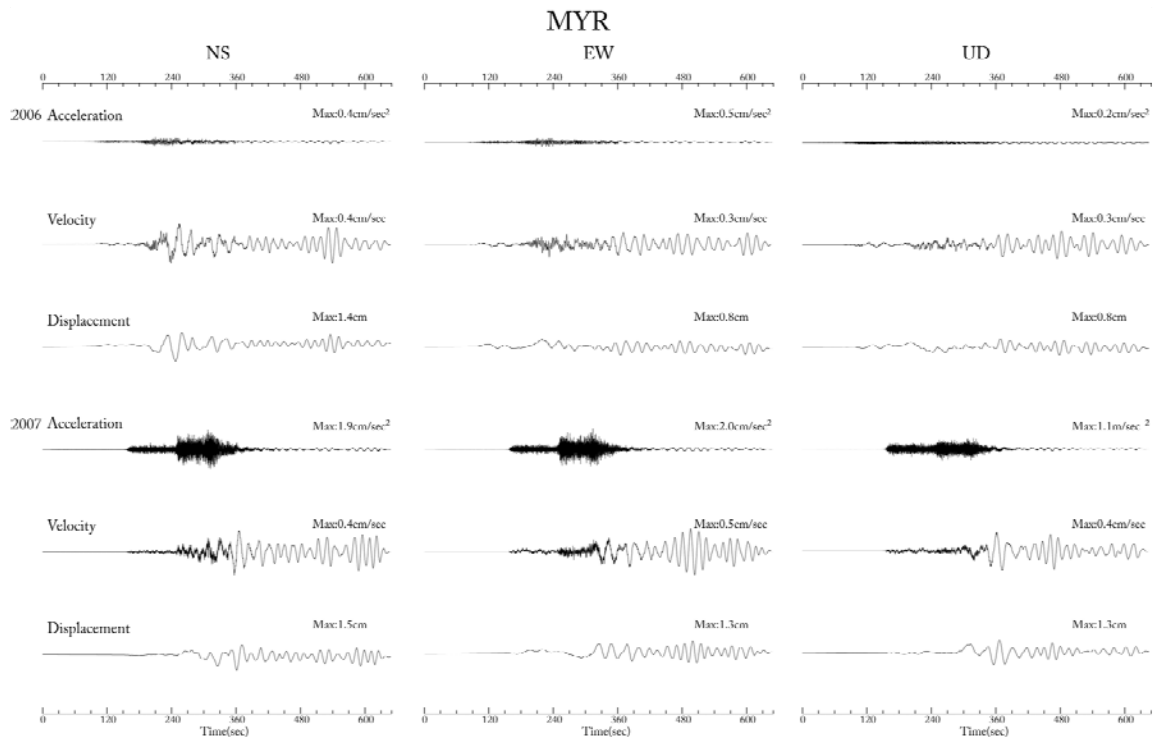


図 4. MYR における 2006 年と 2007 年千島列島東方沖地震による観測記録。それぞれの加速度、速度、変位波形が示されている。

NMR

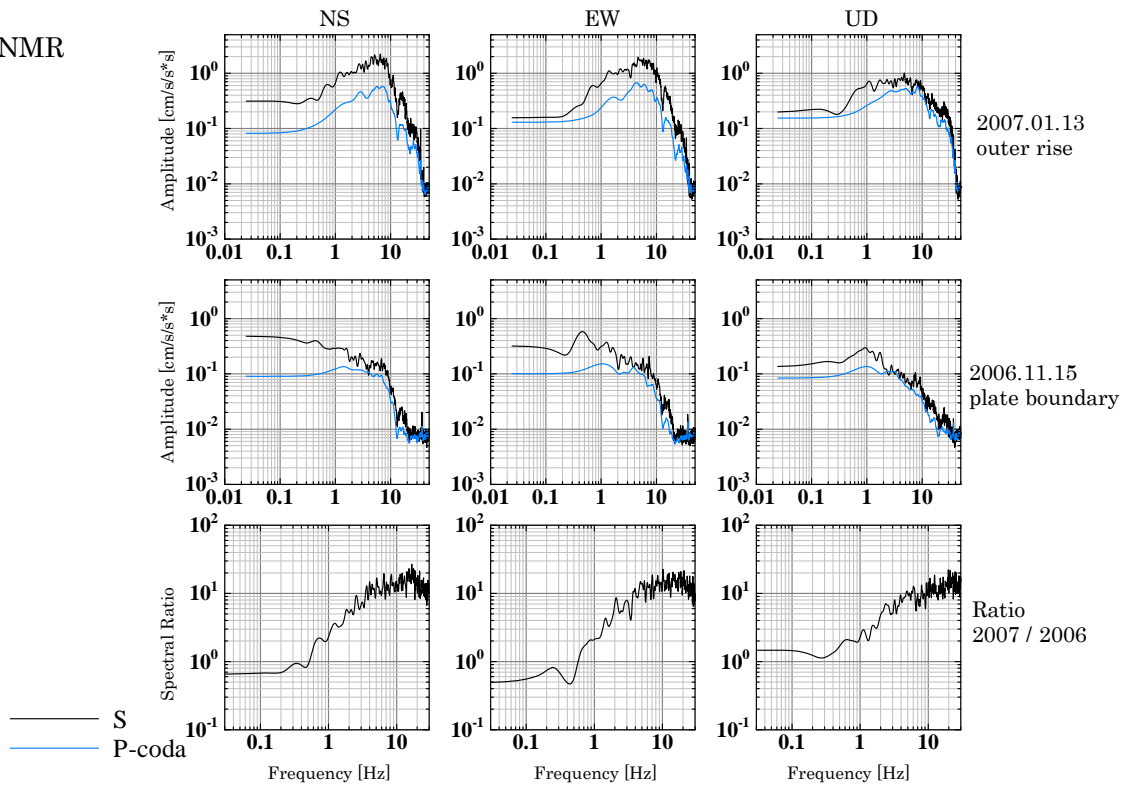


図 5. NMR における S 波と P 波コーダの加速度スペクトル、上：2007 年地震、中：2006 年地震。下：スペクトル比 (2007/2006)。

MYR

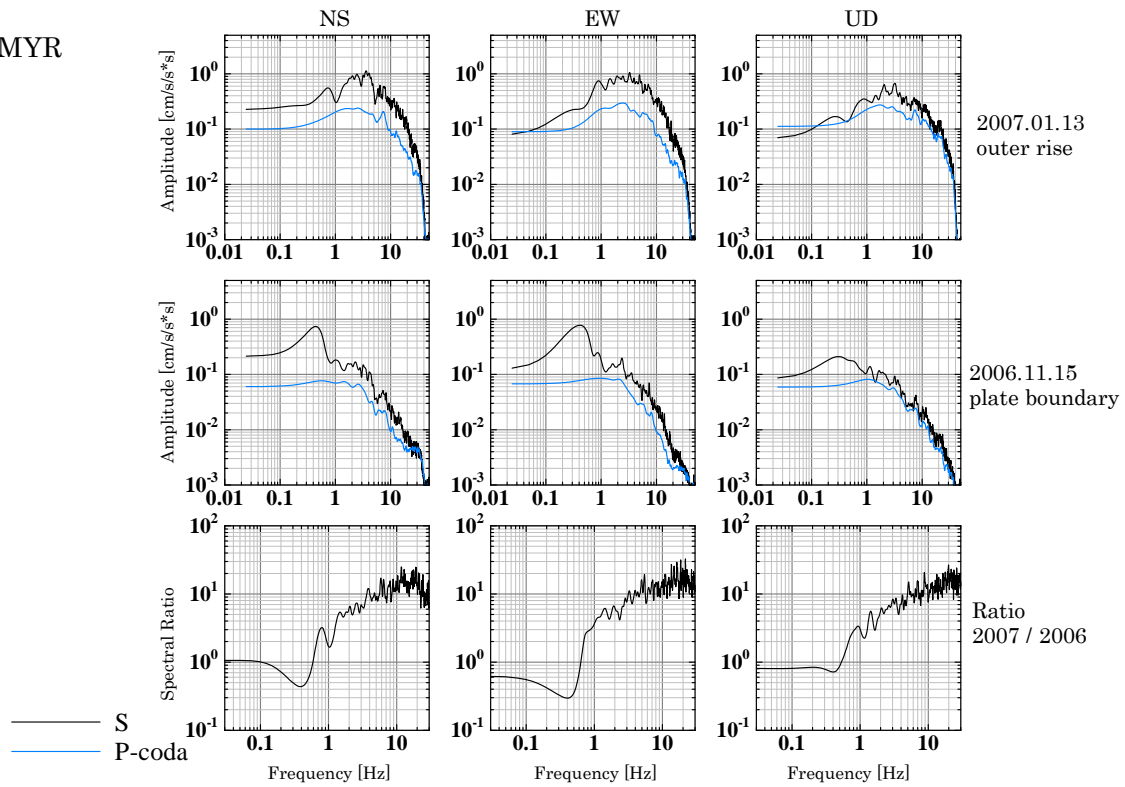


図 6. MYR における S 波と P 波コーダの加速度スペクトル、上：2007 年地震、中：2006 年地震。下：スペクトル比 (2007/2006)。

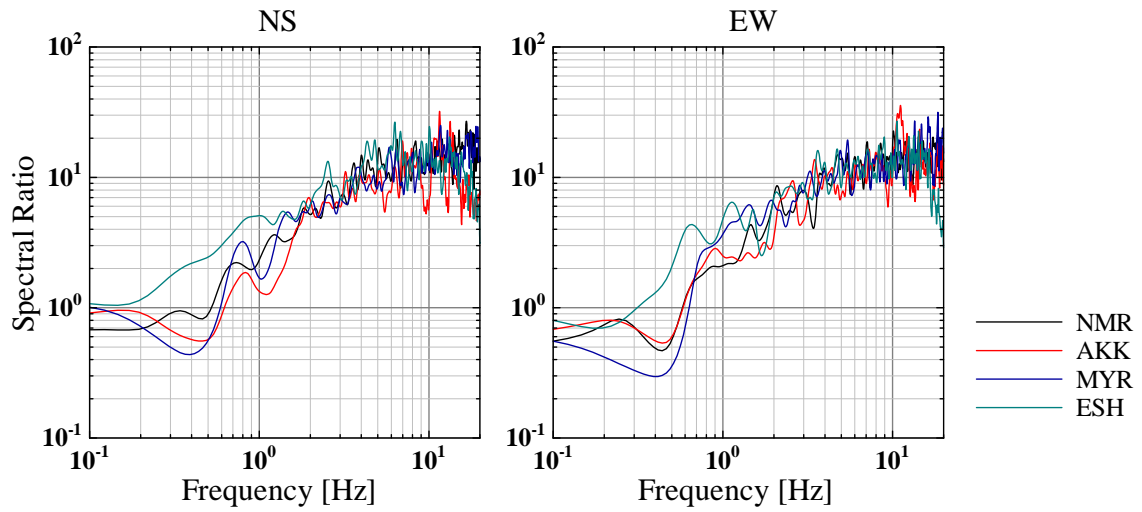


図 7. S波加速度スペクトル比（2007/2006）の重ね書き。

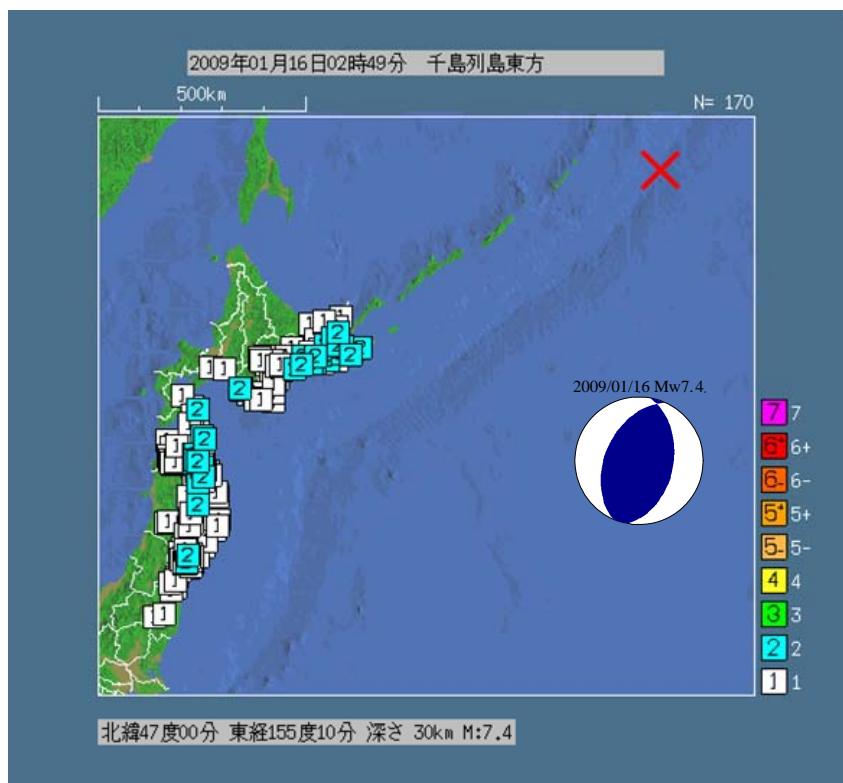


図 8. 2009年千島列島東方沖地震(海洋プレート内地震)による震度分布(気象庁による)。Harvardによるメカニズム解も示されている。

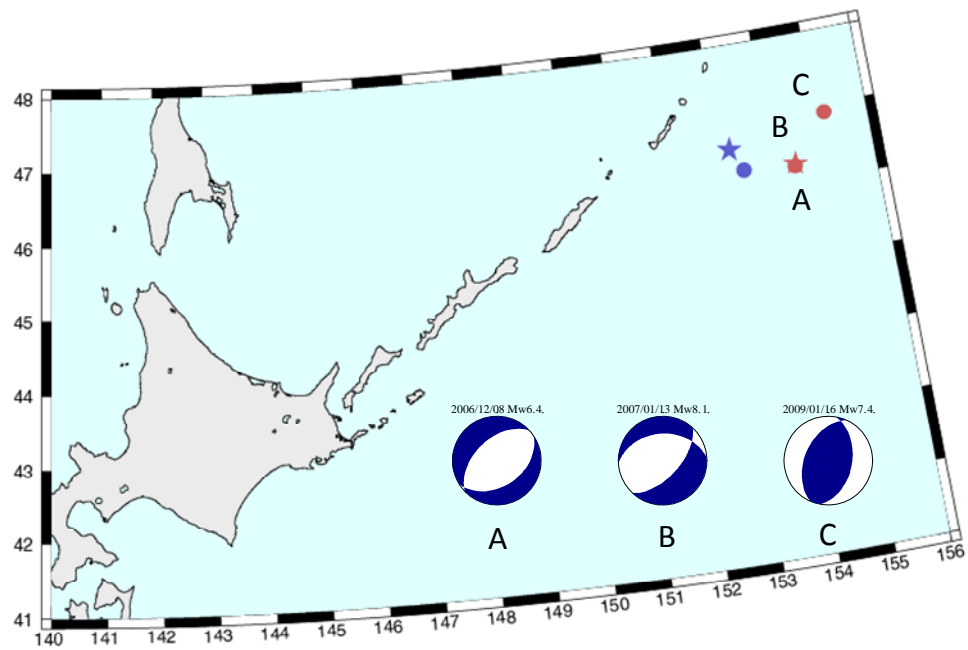


図 9. 3つの海洋プレート内地震の震央位置とメカニズム解。A：2006年地震、B:2007年地震、C：2009年地震。

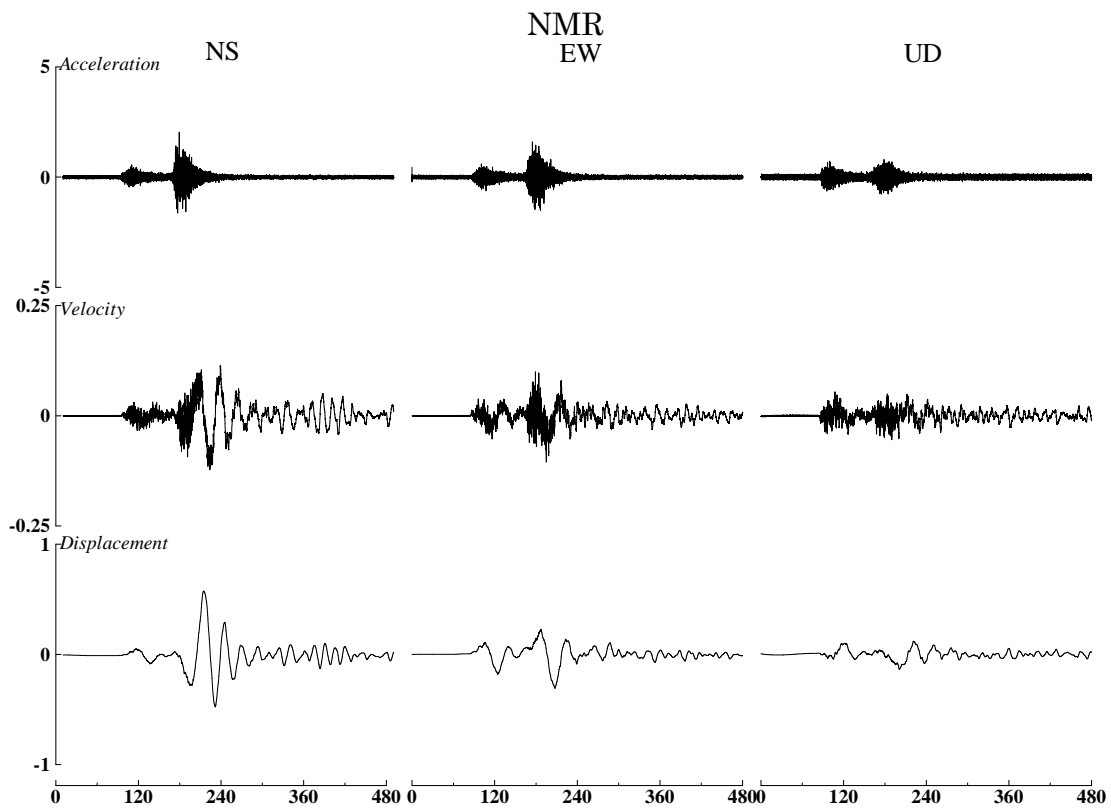


図 10. NMR における 2009 年地震による観測波形。上：加速度波形、中：速度波形、下：変位波形。

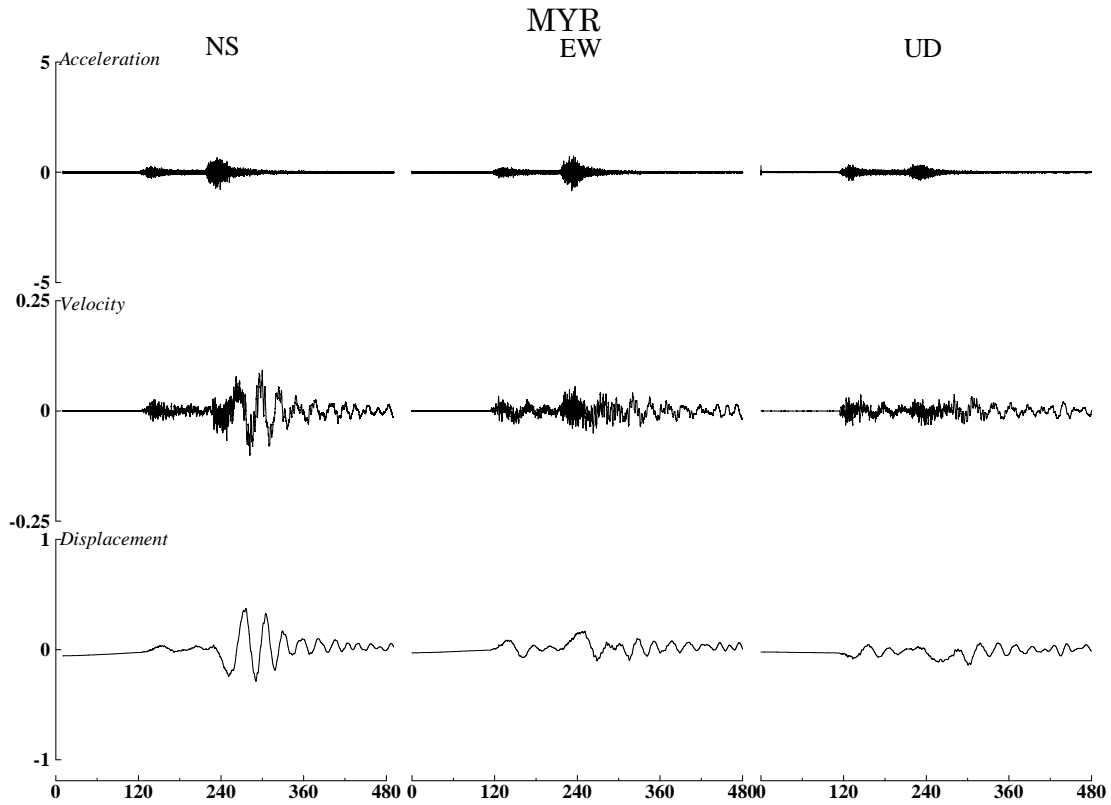


図 11. MYR における 2009 年地震による観測波形。上：加速度波形、中：速度波形、下：変位波形。

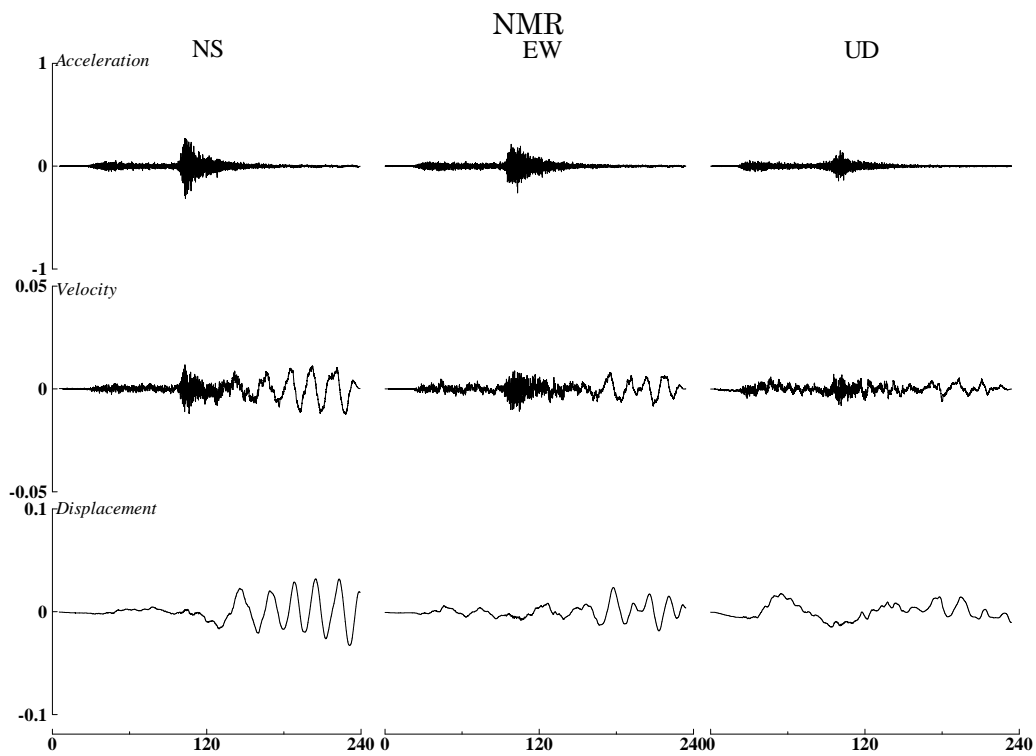


図 12. NMR における 2006 年地震による観測波形。上：加速度波形、中：速度波形、下：変位波形。

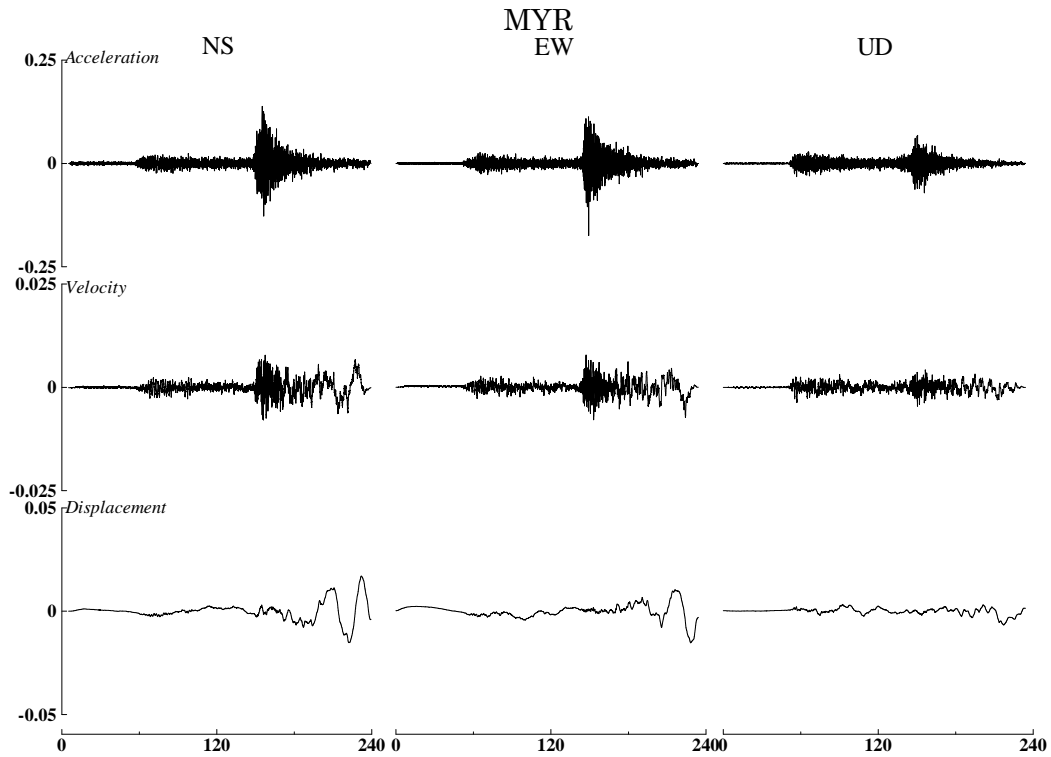


図 13. MYR における 2006 年地震による観測波形。上：加速度波形、中：速度波形、下：変位波形。

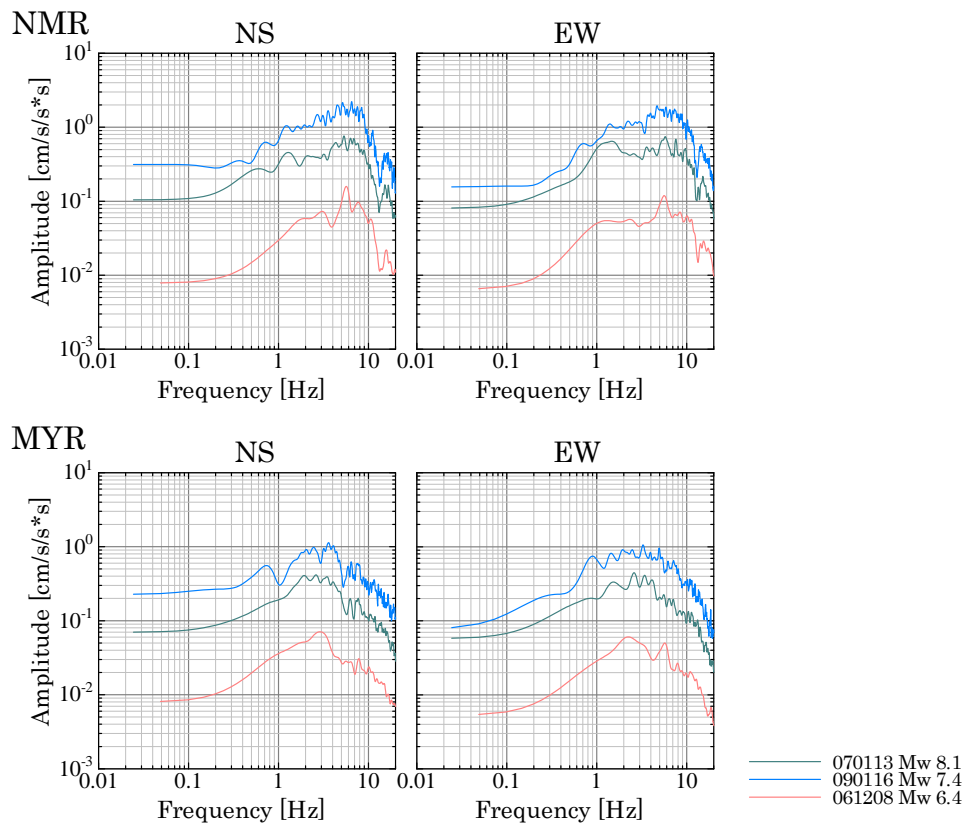


図 14. NMR と MYR における 2006 年、2007 年、2009 年地震による S 波加速度スペクトル。

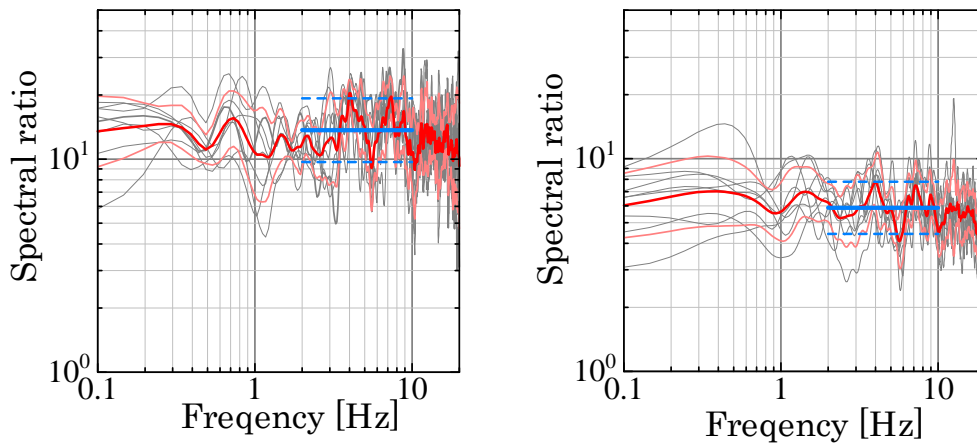
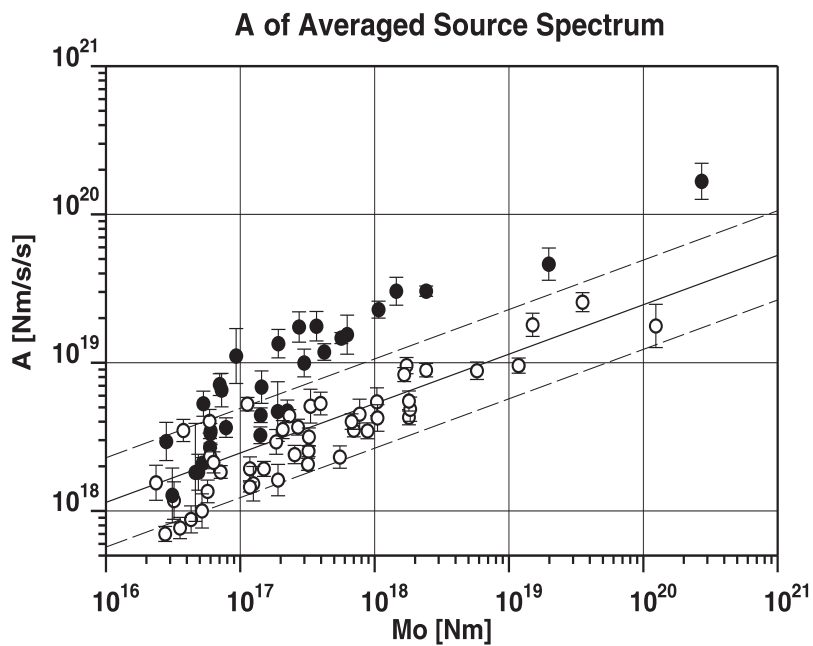


図 15. S 波スペクトル比の重ね書き。左：2007/2006、右：2009/2006。それぞれの図中の実線と破線は、スペクトル比の平均値とその標準偏差を示す。



$$A(\text{Nm/s}^2) \approx 2.1 \times 10^{13} \times Mo^{1/3}(\text{Nm})$$

図 16. プレート間地震 (○) とスラブ内地震 (●) の A - Mo 関係。実線と破線は、内陸地殻内地震の A - Mo 関係とその 2 倍と 1/2 倍の範囲を示す。

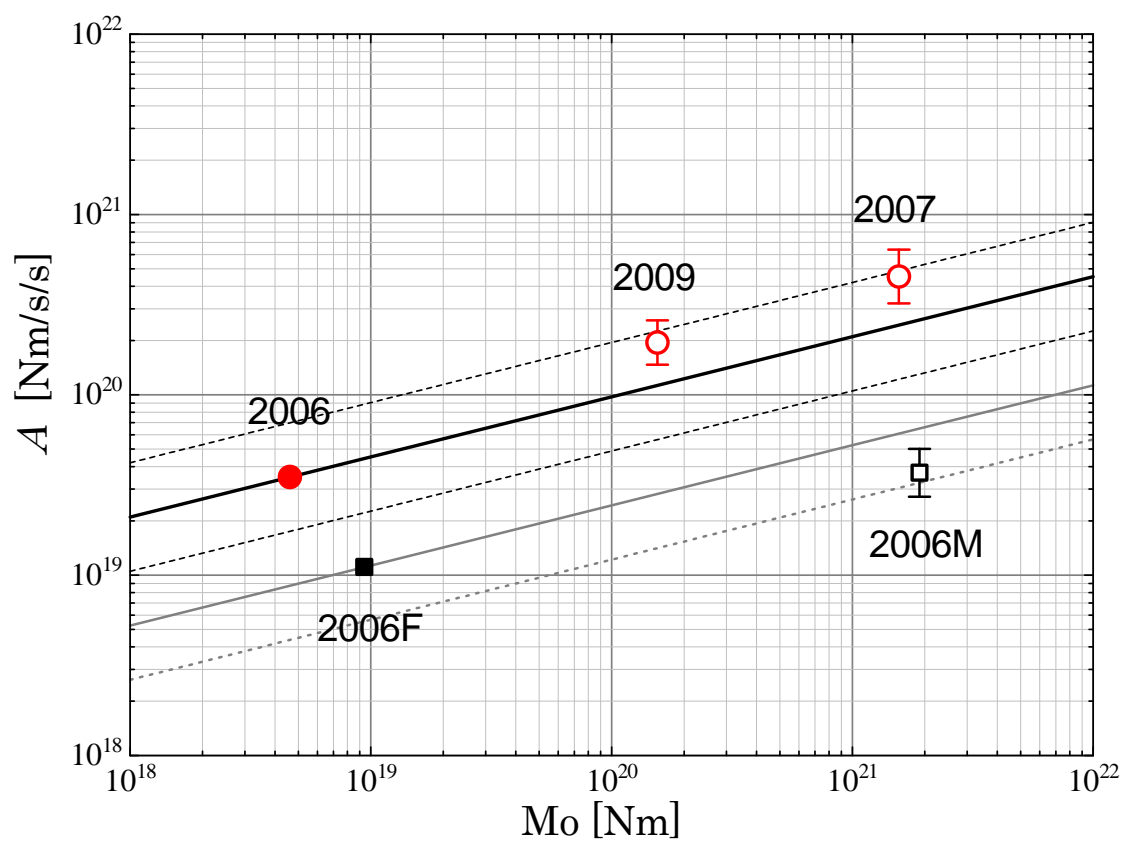


図 17. A - M_o スケーリング関係。太い実線：スラブ内地震（海洋プレート内地震）、細い実線：プレート間地震。●：2006年海洋プレート内地震、○：2007年、2009年海洋プレート内地震、■：2006年プレート間地震（前震）、□：2006年プレート間地震（本震）。点線は、それぞれのスケーリング関係の2倍と1/2倍の値を示す。