

3. 研究の成果

3. 1 長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

(1) 研究の内容

(a) 研究の題目

長周期地震動予測に資するデータ・資料の収集等

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人 防災科学技術研究所	研究領域長	藤原 広行
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	河合 伸一

(c) 研究の目的

地下構造探査等のデータや資料及び既往の地下構造モデルについて、海域を含むものを重点的に収集・整理する。それらと「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」に海域の構造を追加、統合することにより、海溝型巨大地震の長周期地震動予測に必要な全国の地下構造モデルを作成する。海溝型巨大地震に関する研究の文献や事例、長周期地震動予測地図の成果を収集し、震源モデル、地震動計算手法及び計算量に関する問題点を整理する。

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 研究の要約

プレート境界構造に関する既往のモデルや地下構造探査のデータ及び資料を収集・整理した。南西諸島及び日本海東縁部の海域のプレート境界構造の初期モデルを作成し、「全国地震動予測地図」で用いられている「全国深部地盤構造モデル」と統合した。

2003 年十勝沖地震及び南海トラフの地震について、既往の研究等による震源モデルを収集し、強震動の予測に大きく影響を及ぼすアスペリティ配置について整理した。

長周期地震動予測の計算手法に関して、 Q 値の組み込み方法に関する現状の課題を整理するとともに、南海トラフの地震を対象とした差分法による地震動シミュレーションに必要な計算時間を見積もった。

以上の震源モデルおよび計算手法をサブテーマ②で実施する震源モデル化手法の検討やサブテーマ③、④で実施する時刻歴計算等で利用できるよう整備した。

(b) 研究の成果

1) 地下構造モデル等の収集・整備

太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みに関して、地震調査研究推進本部

地震調査委員会（以下、地震本部）による海溝型地震の長期評価でまとめられている資料を収集した。これらのデータをコンパイルし、深度コンター図作成した(図 3.1-1、図 3.1-2)。一方、「長周期地震動予測地図」2012 年試作版（地震本部、2012）では、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）が作成されているが、その中で、フィリピン海プレートの構造については、長期評価後の新しい研究成果である Sato et al. (2005)及び馬場・他（2006）などが参照されている。

また、日本海東縁部のプレート境界構造に関して、地質構造・地史に基づく資料（大竹・他、2002；図 3.1-3）、微小地震の震源分布及び弾性波速度構造データ（Matsubara and Obara, 2011；図 3.1-4）及び島弧を横断する大深度の地質断面（柳井・他、2010、伊藤・佐藤 2010；図 3.1-5）の資料を収集した。

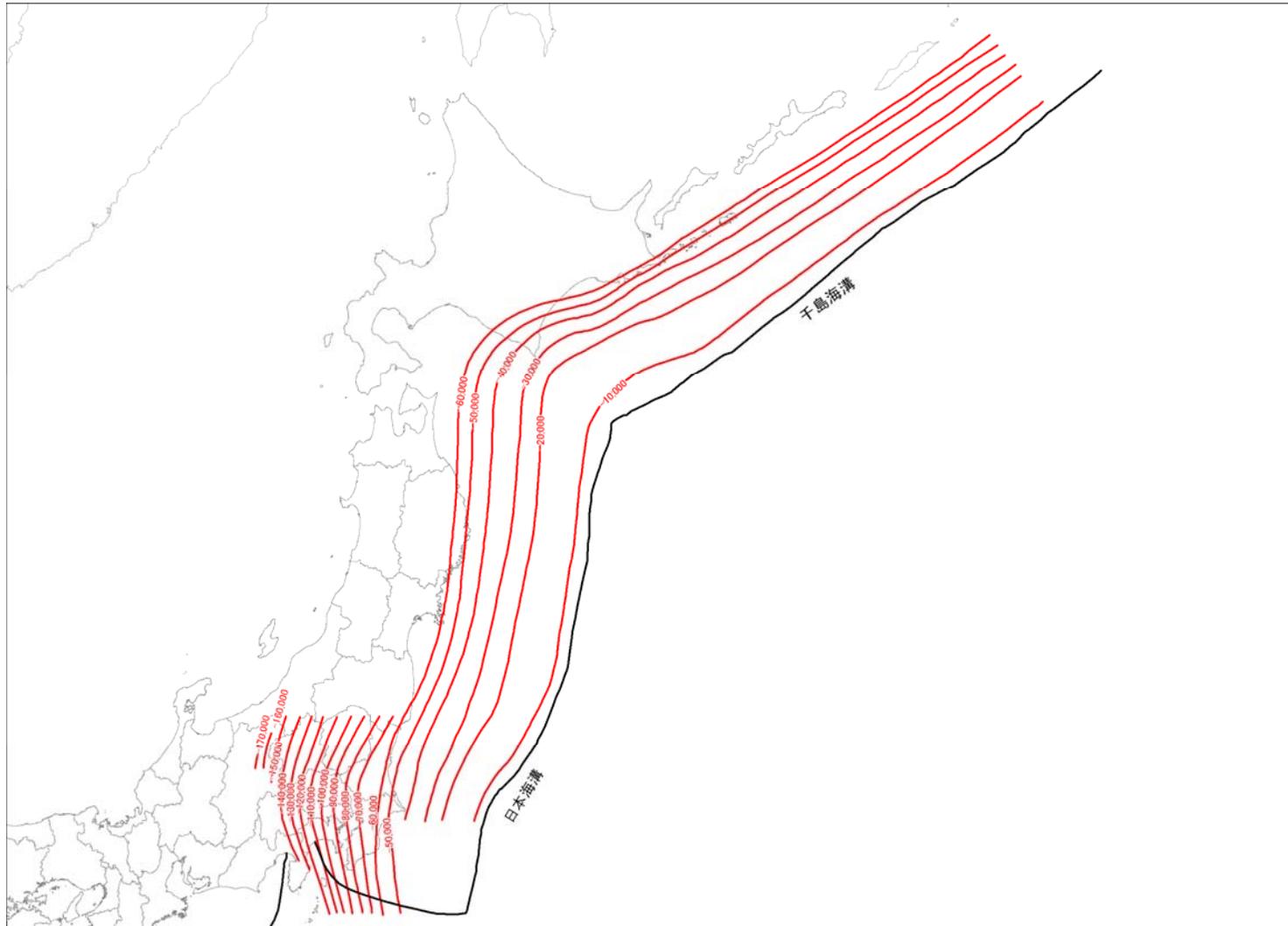


図 3.1-1 収集した資料に基づく太平洋プレート上面の深度コンター。

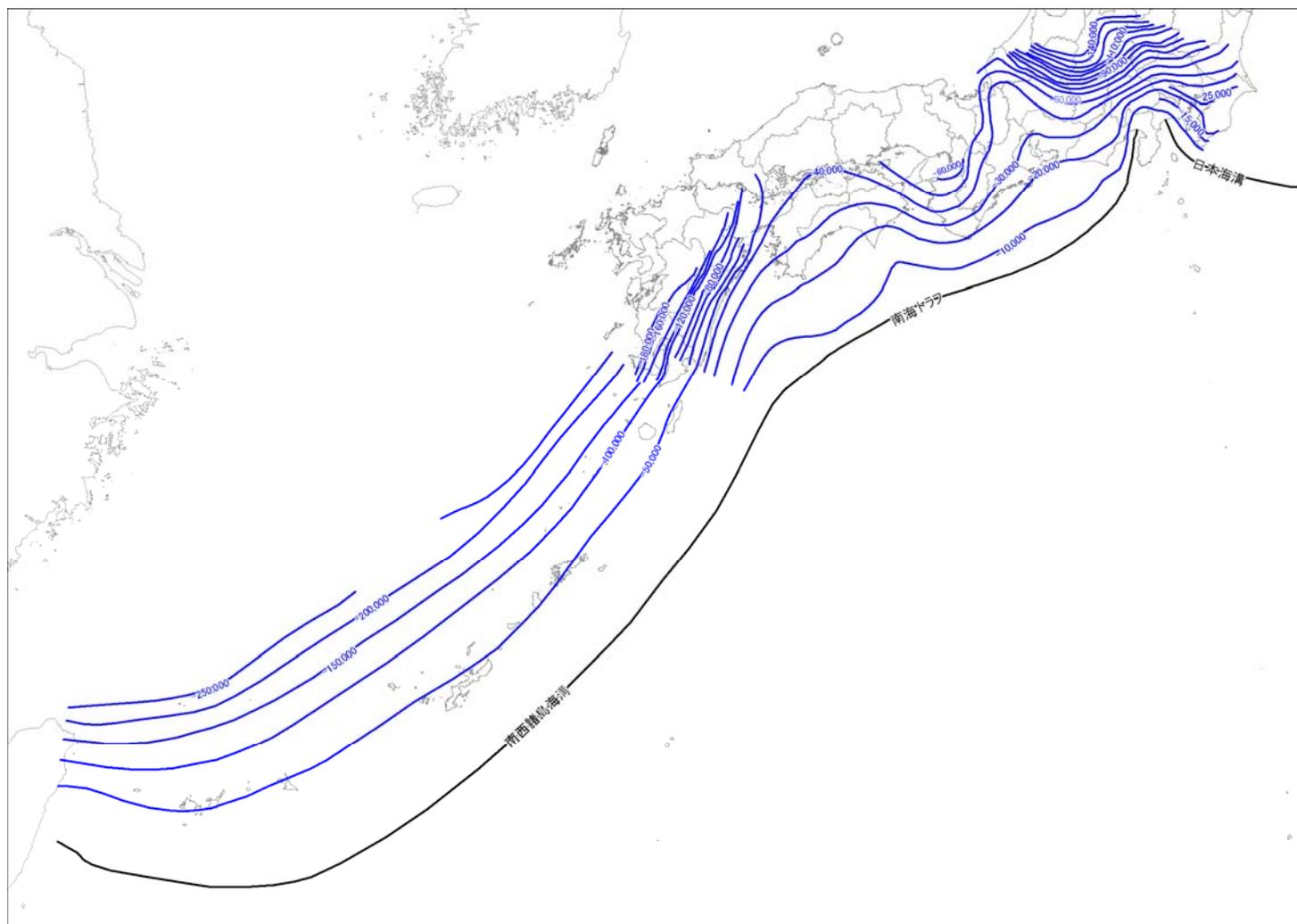


図 3.1-2 収集した資料に基づくフィリピン海プレート上面の深度コンター。

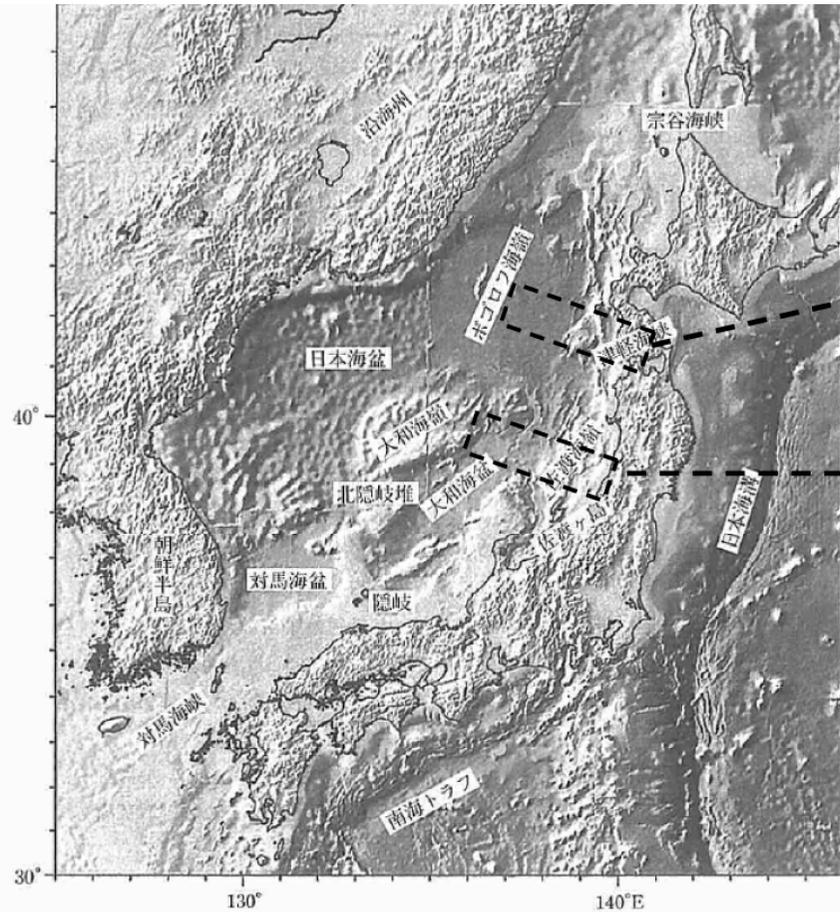


図 4.1 日本海およびその周辺の地形

日本海は日本列島とユーラシア大陸に囲まれた海盆であり、北部には水深が3500-3700 mの日本海盆が、南部には大和海盆、対馬海盆が広がる。日本海盆と大和海盆が日本列島と接する日本海の東縁部には、小規模な海嶺とトラフないし海盆が多数分布する（日本周辺は浅田(2000)ほか水路部測量データ、その他の区域はSmith and Sandwell (1997)のデータを用いた）。

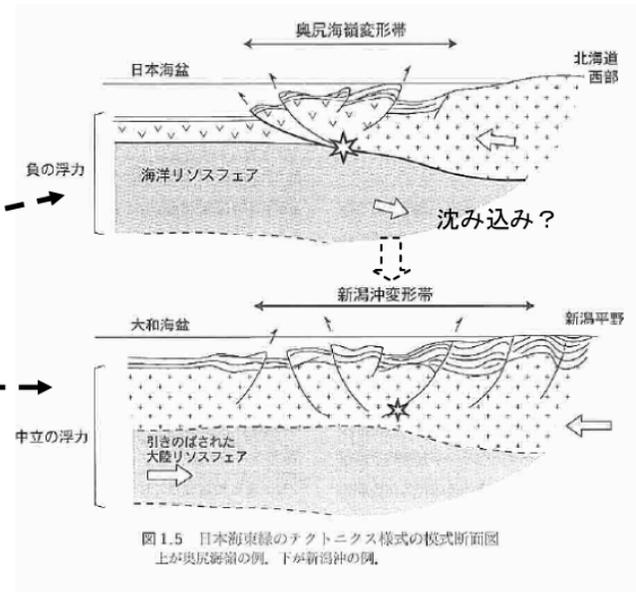


図 1.5 日本海東縁のテクトニクス様式の模式断面図
上が奥尻海嶺の例、下が新潟沖の例。

図 3.1-3a 日本海東縁の地殻構造（大竹・他、2003 に加筆）。

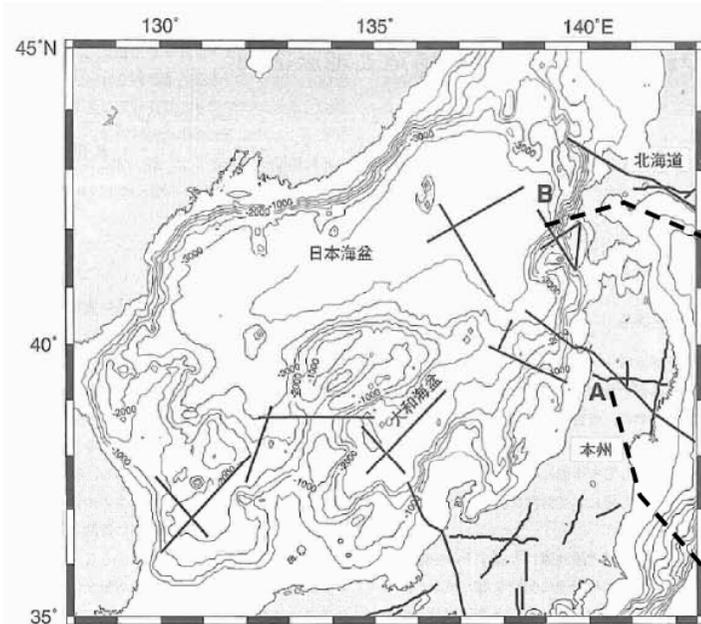


図 3.1 これまでに実施された地殻構造調査の測線位置
水深を 500 m ごとのコンターで示す (Nishizawa and Asada, 1999 に加筆, 陸上の探査測線は吉井, 1994 による)。

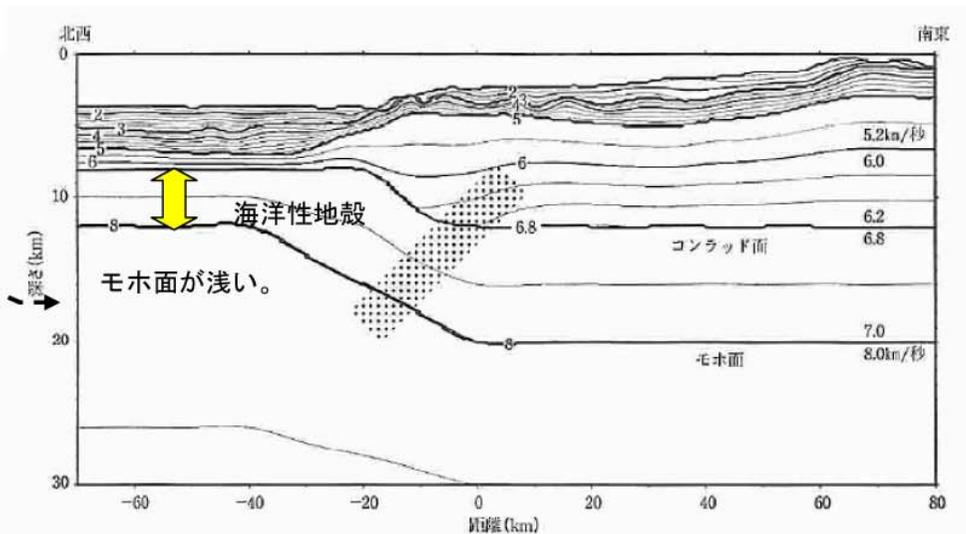


図 3.3 日本海盆から沿岸付近に至る測線 (図 3.1 の B) に沿った地殻構造 (日野ほか, 1995)
P 波速度を 0.1 km/秒ごとのコンターで示す。ハッチは 1993 年北海道南西沖地震 (M 7.8) の断層面。

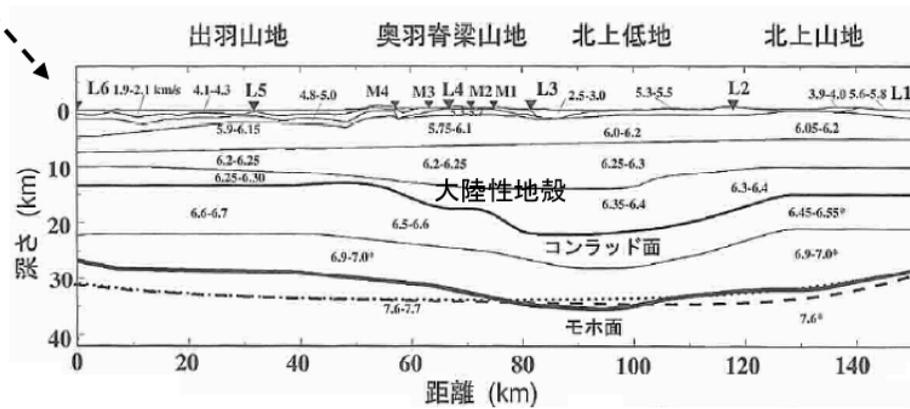


図 3.1-3b 日本海東縁の地殻構造 (大竹・他、2003 に加筆)。

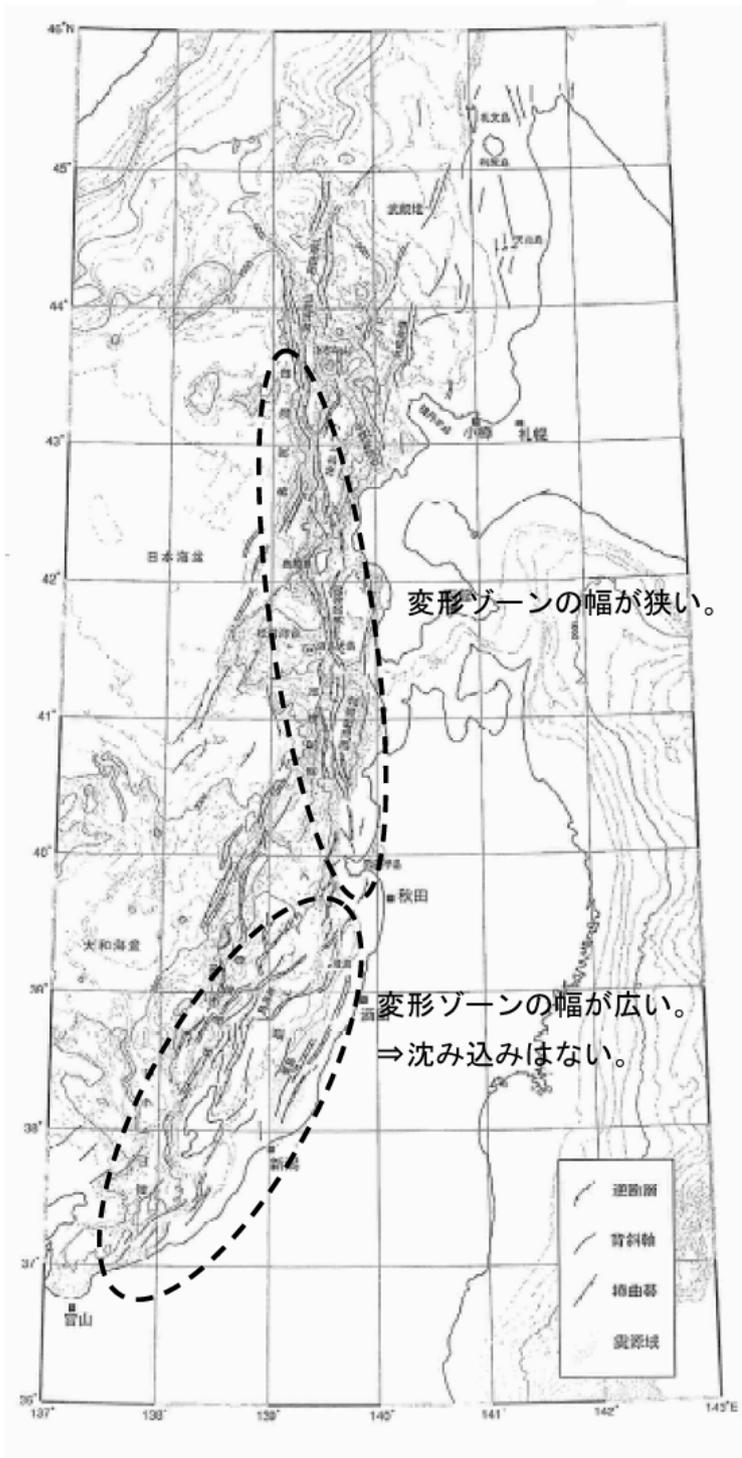


図 4.4 日本海東縁海域で過去約 300 万年間に形成された主要な逆断層と背斜構造

一般に逆断層は背斜構造を伴うが、背斜軸と断層が非常に近い場合には断層だけを、断層が明瞭でない場合には背斜軸だけを示した。背斜構造だけしか示されていない場合も、逆断層が伏在していると考えられる。

灰色の領域は、北から、1993 年北海道南西沖地震（日野ほか，1994）、1983 年日本海中部地震（Sato *et al.*, 1986）、1964 年新潟地震の余震域（草野・浜田，1991）を示す。

図 3.1-3c 日本海東縁の地殻構造（大竹・他、2003 に加筆）。

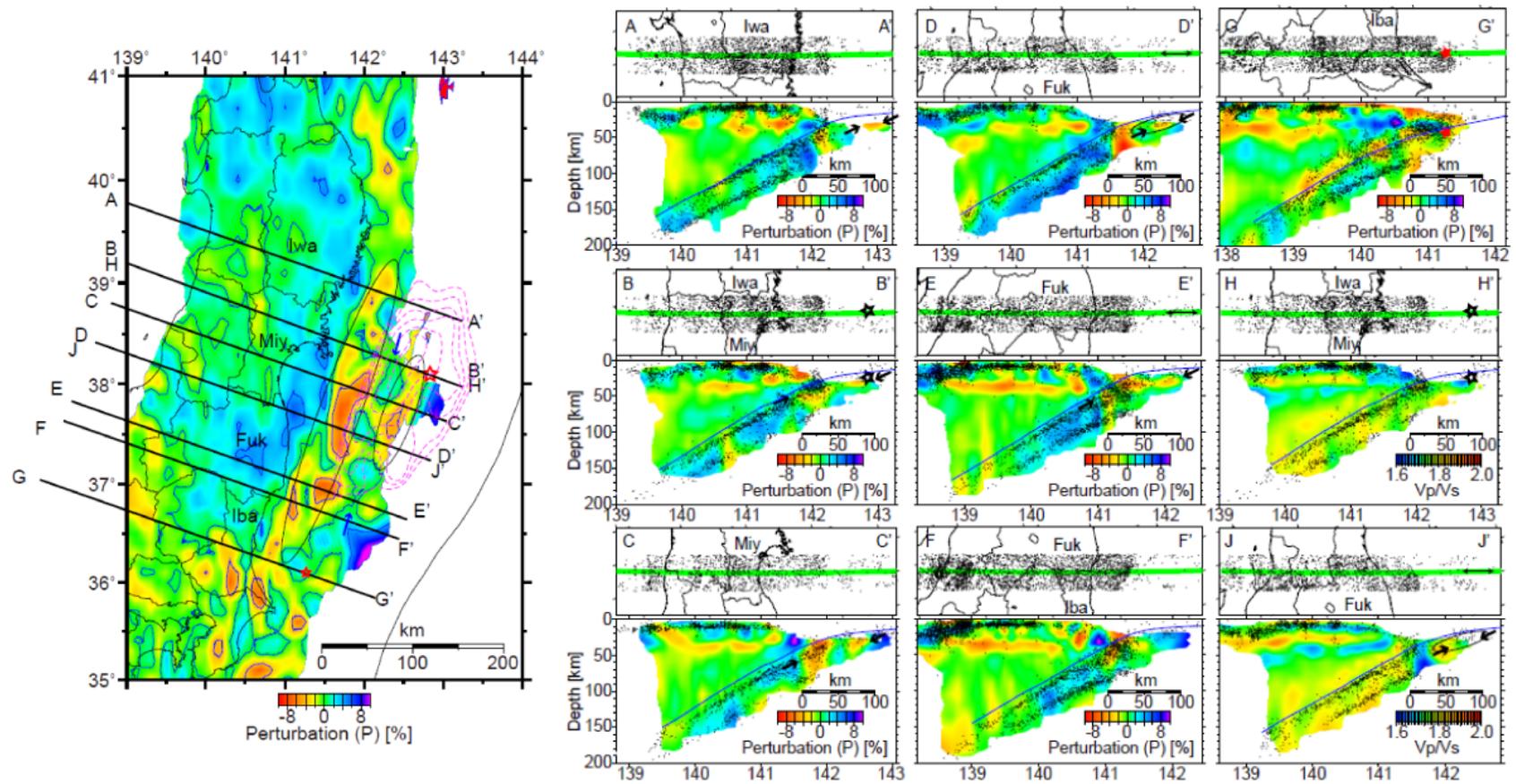


図 3.1-4 Matsubara and Obara (2011) による P 波速度構造と震源分布。

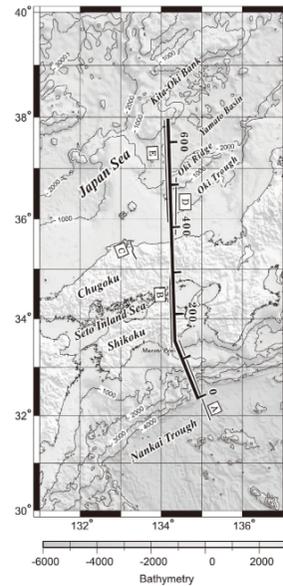


図1 統合断面線(太線)と地震探査測線A-E(細線)。断面線上の数字は南海トラフからの距離(km)を示す。測線A、B、C、D、およびEは、それぞれ Kodaira *et al.* (2002)、Ito *et al.* (2009)、鳥取県 (2003)、田中・小草 (1981)、そして Sato *et al.* (2006) による。

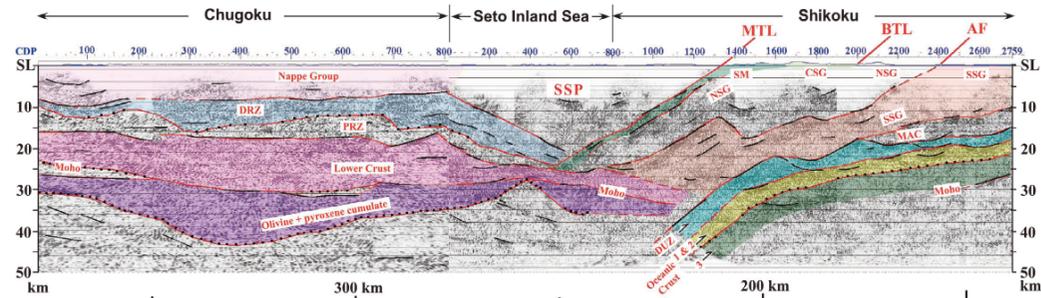


図2 2002年西南日本海陸統合地震探査による測線Bの時間断面。顕著な反射領域の上限は実線で、さらにその領域が明瞭で連続的な下限をもつ場合は点線で示してある。Ito *et al.* (2009) の Fig. 8 を一部簡略化。DRZ: 強反射帯。PRZ: 弱反射帯。SSP: Seto Subsurface Prism。SM: 三波川変成岩類。CSG: 秩父累層。NSG: 北部四万十層群。SSG: 南部四万十層群。MAC: 中期中新世以降の付加体。DUZ: デュープレックス・底付帯。

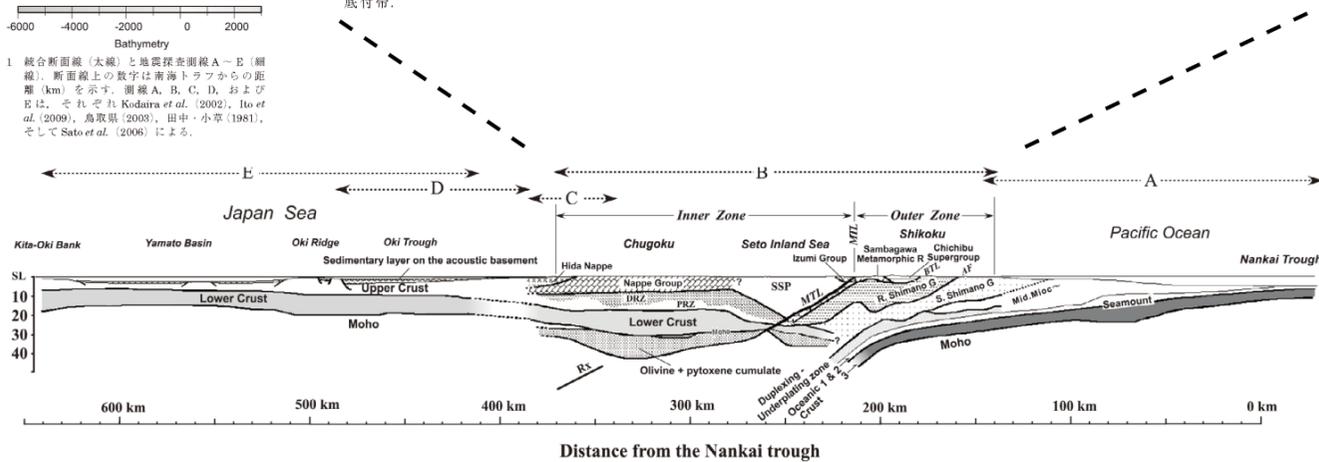


図3 南海トラフ-大和盆北縁地殻構造断面。SSP: Seto Subsurface Prism。DRZ: 強反射帯。PRZ: 弱反射帯。MTL: 中央構造線。BTL: 仏像構造線。AF: 安芸断層。Rx: 強反射層。A、B、C、D、E: 測線A、B、C、D、およびEによる断面図位置。A-B断面図は Ito *et al.* (2009) の Fig. 9 による。

図3.1-5 日本列島の大深度地質構造 (伊藤・佐藤、2010より)。

2) 地下構造モデルへの海域の構造の追加

1)で収集・整理した資料等に基づき、海域の地下構造モデルとして、南西諸島及び日本海東縁部のプレート境界面構造を追加する。太平洋プレート及び南西諸島を除くフィリピン海プレートの境界面構造については、全国1次地下構造モデル(暫定版)を用いた。

南西諸島のプレート境界面構造の追加に関しては、中村・兼城(2000)に基づいて設定し、全国1次地下構造モデル(暫定版)と不整合が生じないように接続した。このとき、深さ方向については、沈み込みの開始が約1500万年前というフィリピン海プレートの運動史、及びフィリピン海プレートが北西方向に3~4cm/年の速度で移動しているという測地学的な観測結果より、プレートの長さ約400kmまでをモデル化することとした。結果的に、沈み込むプレートの傾斜から深さ200km程度までがモデル化されている。以上により設定されたプレート境界面構造を図3.1-6に示す。

日本海東縁部のプレート境界面構造の追加に関しては、中村(1983)による「沈み込み帯が形成されつつある」との考えを踏まえて、以下の手順によりモデルを作成した。

①地表における境界の設定

- ・南北方向に分布するひずみ集中帯をプレート境界とする。
- ・新潟県沖において沈み込みが認められないことから(図3.1-3a)、大陸性地殻と海洋性地殻の境界(沈み込みの南端)を、男鹿半島付近に設定。
- ・沈み込む範囲における海底での海洋性地殻の深さは8~12km程度に設定(図3.3-1b)。
- ・北端については不明であるが、ここではひずみ集中帯の変形部が確認できる宗谷岬沖まで設定(図3.1-3c)。

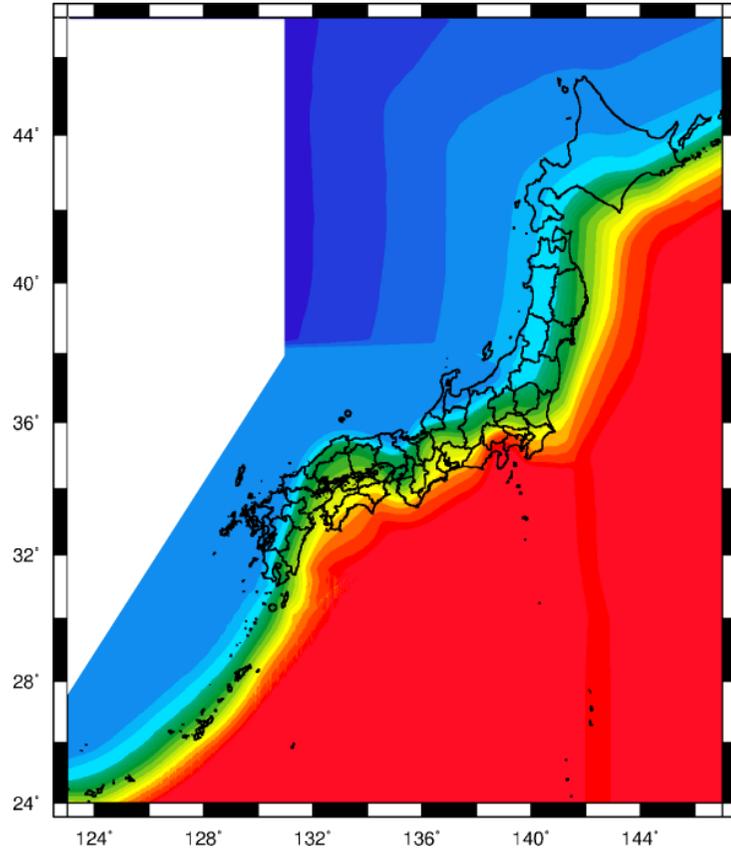
②沈み込みの形状

- ・海洋性地殻の沈み込みの速度は1.0~2.2cm/年(地震調査委員会、2003)。
- ・沈み込みの開始時期は100万年前(原子力発電環境整備機構、2004)。
- ・以上より、沈み込みの深さは10~66kmとなるが、ここでは、深さ50km付近まで設定。
- ・沈み込みの角度は、太平洋プレートより小さく設定。

このようにして作成したモデルの断面を図3.1-7に、また平面図を図3.1-8示す。なお、本モデルは、震源分布や大深度断面図で沈み込みが確認されていない中で設定した、あくまで暫定的な初期モデルという位置付けとする。

以上作成したプレート境界面構造モデルを「全国深部地盤構造モデル」(藤原・他、2009)に組み込むことにより統合した。

フィリピン海プレート上面



太平洋プレート上面

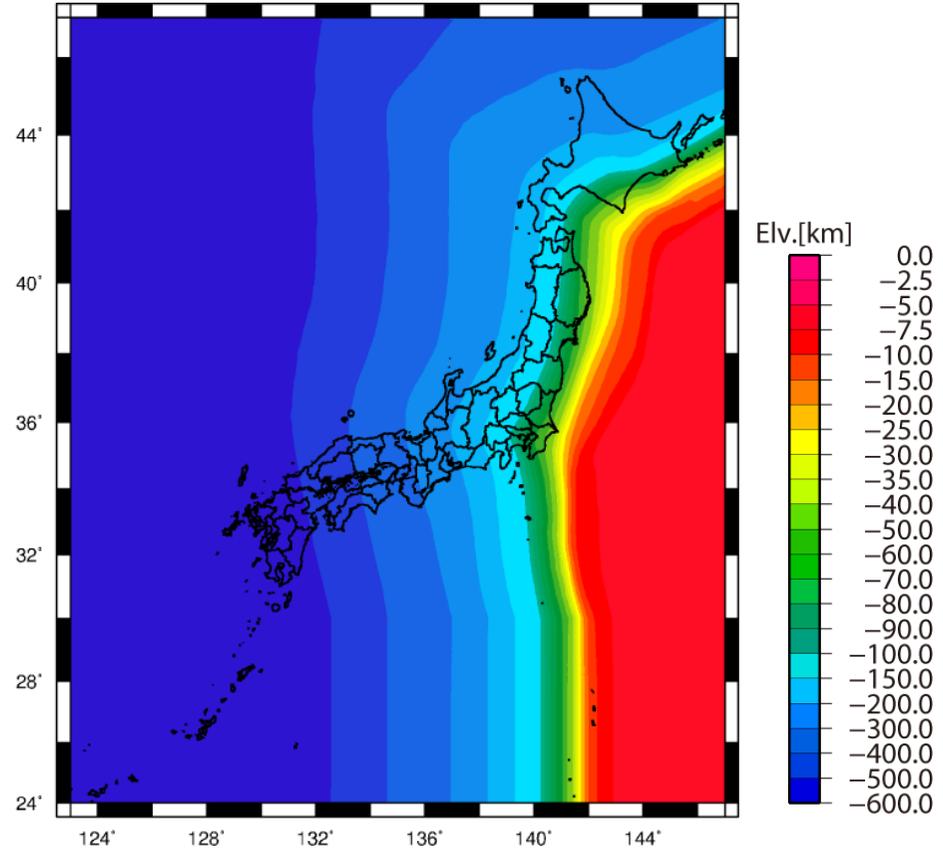


図 3.1-6 本検討で設定した太平洋側から沈み込むプレート上面の深度コンター。フィリピン海プレート上面の東日本地域については、太平洋プレート上面に接合させている。

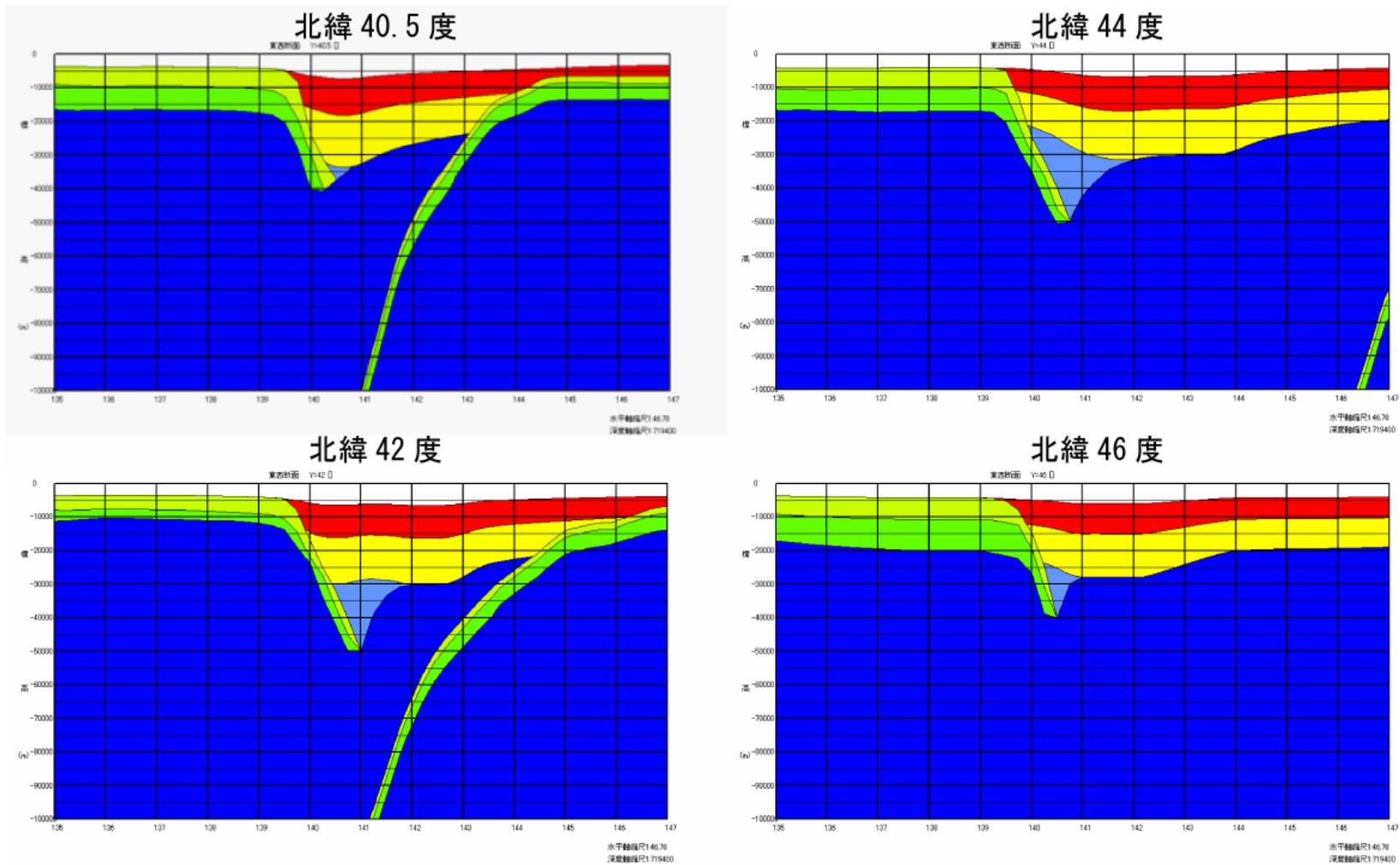


図 3.1-7 本検討で設定した日本海東縁部のプレート境界モデルの東西断面図。それぞれ西端(左)は東経 135 度、東端 (右) は東経 147 度。

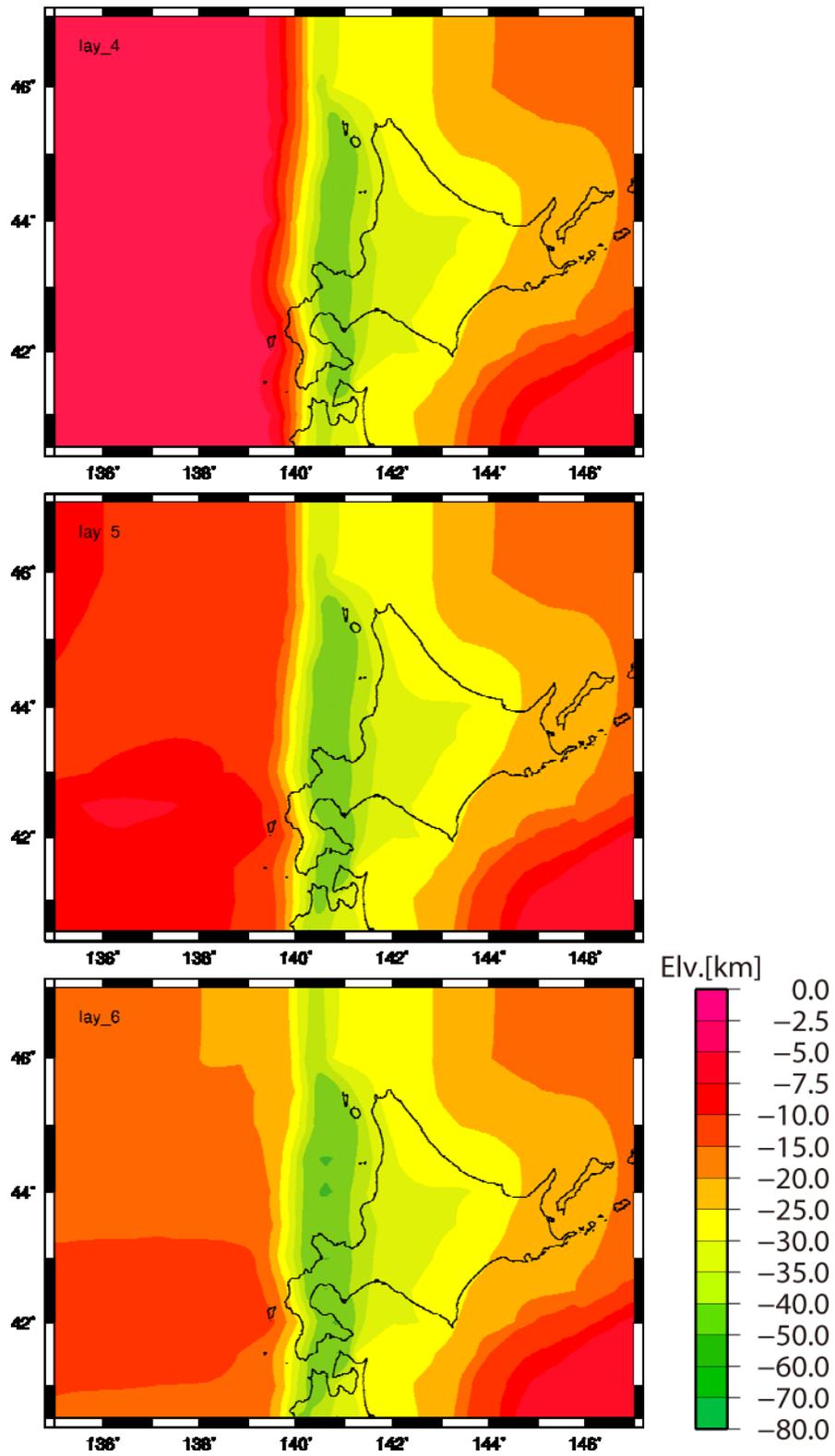


図 3.1-8 本検討で設定した日本海東縁部のプレート境界モデルの平面図。
 上：海洋性地殻第 2 層、中：海洋性地殻第 3 層、下：海洋性マントルの上面 の各標高

3) 震源モデル等の収集・整備

海溝型巨大地震の震源モデルに関して、2003年十勝沖地震（表 3.1-1）、及び南海トラフの地震（表 3.1-2）を対象とした既往研究等によるモデルを収集した。

ここで、多くの観測記録に基づく解析事例が豊富な2003年十勝沖地震の震源モデルについて、アスペリティの位置を比較する。2003年十勝沖地震については、地震動の長周期成分の解析やGPS測地データ及び津波波形の解析から得られているアスペリティ（すべりの大きな領域に相当）が、破壊開始点付近及び断層面の北西部分に存在するのに対して、地震動の短周期成分（強震動記録）の解析から得られているアスペリティは、断層面の北東部分にも存在し、アスペリティ全体の面積が小さい傾向が見られるものが多い（図 3.1-8）。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルについては、「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）」（地震調査委員会、2011）でまとめられている（図 3.1-9）。地震動の長周期成分の解析から得られているアスペリティ（すべりの大きな領域に相当）が海溝軸付近にあるのに対して、地震動の短周期成分（強震動記録）から得られているアスペリティは陸側に点在しており、面積も小さく、2003年十勝沖地震よりも両者の差異が顕著である。

表 3.1-1 本検討で収集した2003年十勝沖地震の震源モデル。

著者	使用データ	対象周波数帯
Hirata et al. (2004)	津波	—
Tanioka et al. (2004)	津波	—
Yamanaka and Kikuchi (2003)	遠地変位波形	0.004~1Hz
Koketsu et al. (2004)	強震動速度波形及びGPS測地データ	0.05~0.2Hz
Yagi (2004)	遠地及び強震動の変位波形	0.002~1Hz
Honda et al. (2004)	強震動速度波形	0.02~0.2Hz
釜江・川辺 (2004)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.1~10Hz
額瀨・他 (2006)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.1~10Hz
Morikawa et al. (2006)	強震動波形及び擬似速度応答スペクトル	0.05~10Hz
Nozu and Irikura (2008)	強震動速度波形	0.1~10Hz
久世・他 (2008)	強震動記録の加速度包絡線	0.13~10Hz

表 3.1-2 本検討で収集した南海トラフの地震に関する震源モデル。

著者	使用データ（カッコは予測）
中央防災会議 (2003)	(震度)
地震調査委員会 (2003)	(震度)
武村・神田 (2006)	震度
山中 (2004)	強震動の変位波形
地震調査委員会 (2009)	(長周期地震動)
地震調査委員会 (2012)	(長周期地震動)

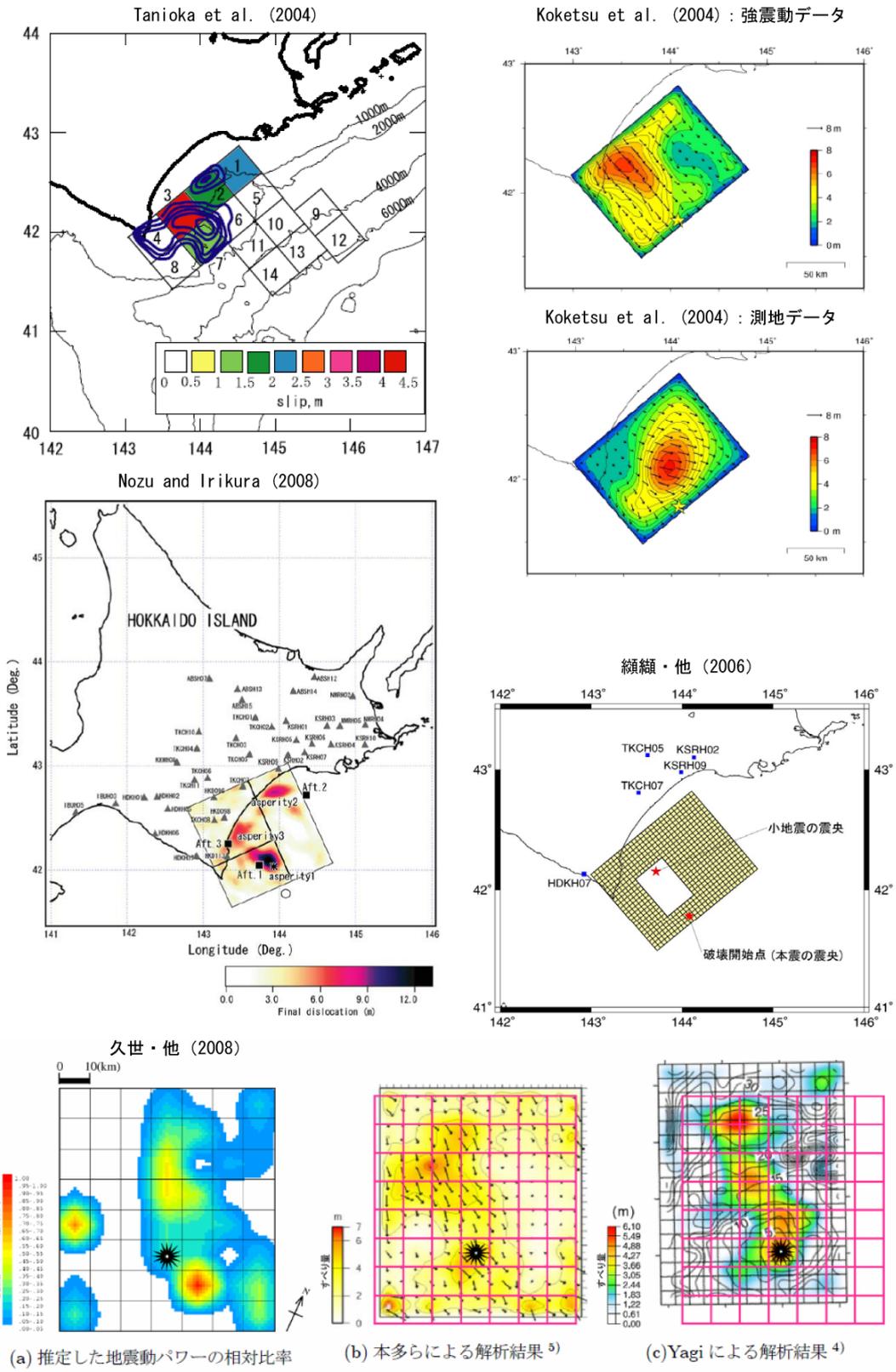
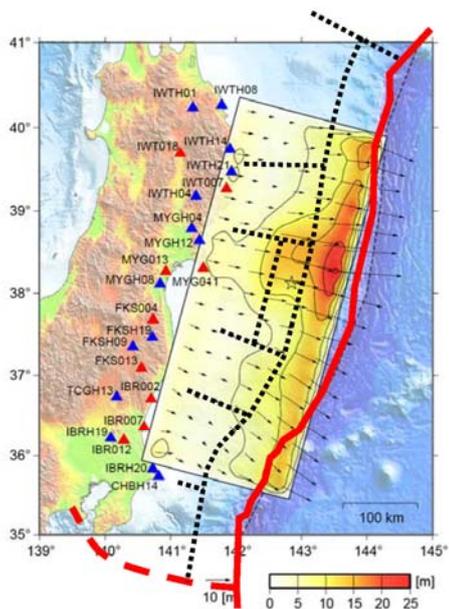
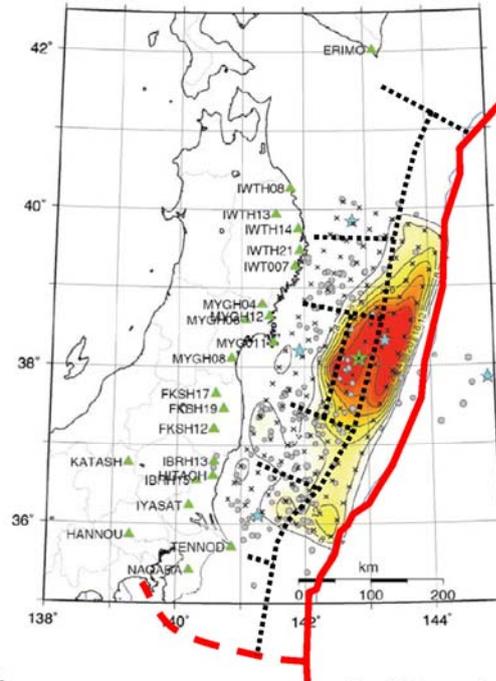


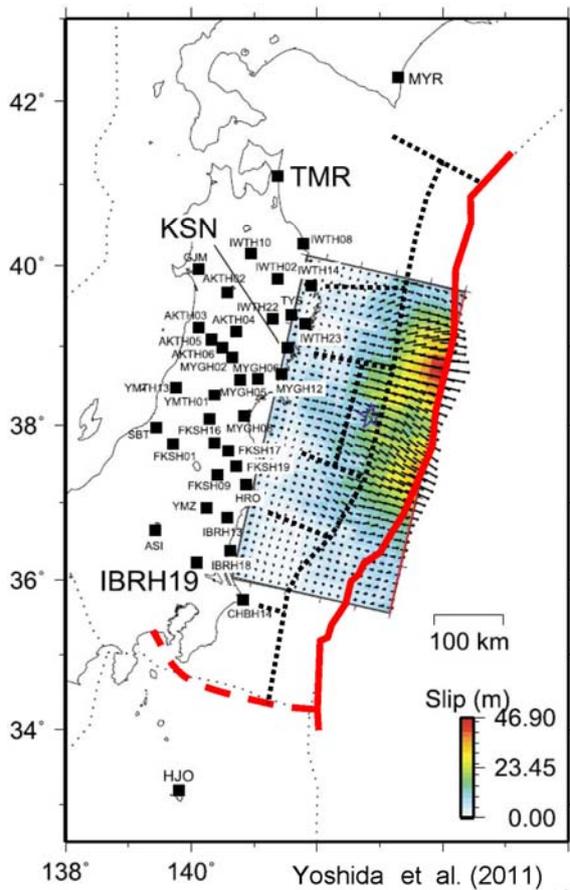
図 3.1-8 2003 年十勝沖地震の震源モデルの例。Tanioka et al. (2004) 中のコンターは Yamanaka and Kikuchi (2003) による滑り分布。



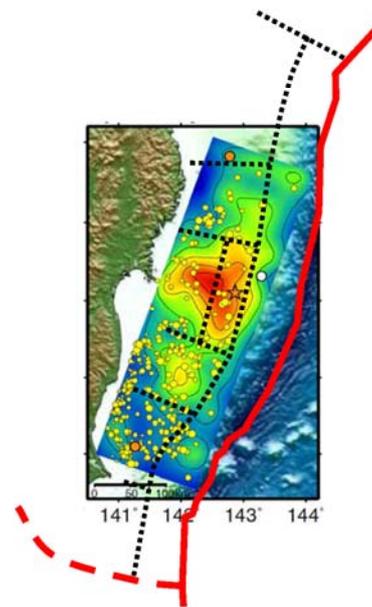
防災科研作成



Yoshida et al. (2011)

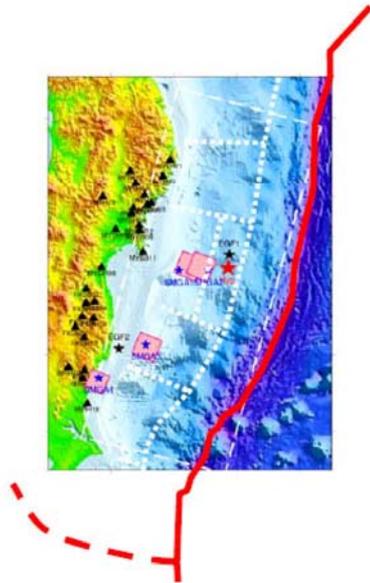


Yoshida et al. (2011)

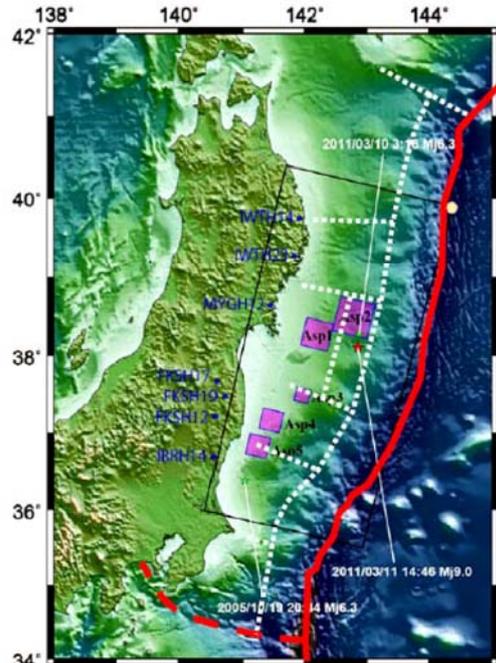


Koketsu et al. (2011)

図 3.1-9a 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル間のアスペリティ位置の比較（地震調査委員会、2011 より）。



浅野・岩田(2011)



釜江・川辺(2011)

表 各モデルの強震動生成域のパラメータ

浅野・岩田(2011)

	SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4
Length (km)	33.0	33.0	33.0	27.5
Width (km)	33.0	33.0	33.0	27.5
Area (km ²)	1089.0	1089.0	1089.0	756.3
Rise Time (s)	6.60	6.60	1.38	1.15
M ₀ (Nm)	3.81E+20	5.33E+20	2.90E+20	1.04E+20
Δσ (MPa)	25.8	36.1	19.7	12.2
Slip (m)	5.2	7.2	3.9	2.0
Delay Time (s)	24.0	65.6	108.5	128.3

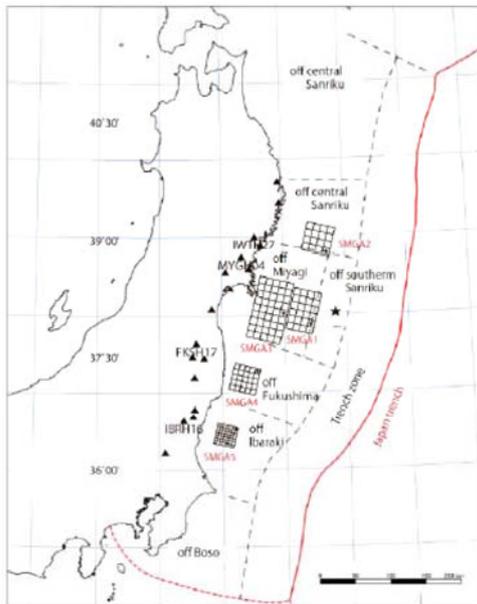
釜江・川辺(2011)

	Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走行 (°)	195	195	195	195	195
傾斜角 (°)	13	13	13	13	13
面積 (km ²)	40×40	50×50	20×20	30×30	30×30
地震モーメント(N・m)	9.9×10 ²⁰	2.21×10 ²¹	1.77×10 ²⁰	2.39×10 ²⁰	2.58×10 ²⁰
応力降下量 (MPa)	37.8	43.2	54	21.6	23.1
ライズタイム (s)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破壊開始時刻 (s)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリーン関数として用いた地震	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2011/03/10 3:16 Mw6.3	2005/10/19 20:44 Mw6.3

Kurahashi and Irikura and (2011)

	L (km)	W (km)	Mo(Nm)	Stress Drop (MPa)	Delay time from Origin time (sec)
SMGA 1	62.40	41.60	2.31E+21	41.3	15.64
SMGA 2	41.60	41.60	7.05E+20	23.6	66.42
SMGA 3	93.60	52.00	4.34E+21	29.5	68.41
SMGA 4	38.50	38.50	3.83E+20	36.4	109.71
SMGA 5	33.60	33.60	3.99E+20	26.0	118.17

※本震の総地震モーメント量Moは(Mw9.0:4.5×10²²N・m)



Irikura and Kurahashi (2011)

図 3.1-9b 2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル間のアスペリティ位置の比較(地震調査委員会、2011より)。

4) 計算手法等の収集・整備

三次元地下構造モデルを用いた海溝型巨大地震の長周期地震動計算においては、効率性からも数値解析的手法である差分法が採用されることが多い。「長周期地震動予測地図」2009年試作版のうち、宮城県沖地震については林・引間(2001)、想定東海地震、東南海地震及び「長周期地震動予測地図」2012年試作版の南海地震(昭和型)については、Pitarka(1999)の差分法が用いられている。後者では、減衰(Q値)について、Graves(1996)の方法により与えられているが、地下構造モデルでは減衰が周期に依らず一定と仮定されているのに対して、周期が長いほど小さいQ値となっていることが「長周期地震動予測地図」2012年試作版において課題として挙げられている。一方、林・引間(2001)においても、Graves(1996)とは異なるものの周波数に依存するQ値が設定されている。

「全国地震動予測地図」における主要活断層帯を対象とした詳細法による地震動計算のうち、長周期成分については、Aoi and Fujiwara(1999)の差分法が用いられている。本研究では、Aoi and Fujiwara(1999)による差分法を適用することとし、サブテーマ④で実施する南海トラフの巨大地震を対象として、防災科学技術研究所のスーパーコンピューターを使用して以下の条件

- 格子間隔：不連続格子 (Aoi and Fujiwara, 1999)
 - ◇ 水平方向 200m、深さ方向 100m (第1領域：深さ 0~8 km)
 - ◇ 水平方向 600m、深さ方向 300m (第2領域：深さ 8~70 km)
 - ◇ 格子数： $3498 \times 5448 \times 81 + 1166 \times 1816 \times 207 \approx 20$ 億格子
- Q値の参照周期：5秒
- 時間間隔：0.008333秒 (約120 Hz)
- タイムステップ数：60000ステップ (=500秒間)
- 計算波形の有効周期帯：2秒以上

にて地震動シミュレーションを実施する上での計算時間は、南海地震、東南海地震、想定東海地震の全てが連動する場合において、防災科学技術研究所のスーパーコンピューター(Altix4700 ; 256CPU)で24~36時間である。

(c) 結論ならびに今後の課題

従来の地下構造モデルが南西諸島まで拡張されたことにより、全国を対象とした長周期地震動予測地図作成のための地下構造モデルが整備された。また、日本海東縁部のプレート境界構造を作成したことにより、当該地域で発生する巨大地震の震源モデルの設定への貢献が期待できる。

2003年十勝沖地震について震源モデルの収集を実施し、モデル間の比較から海溝型巨大地震においては、長周期地震動の解析によるアスペリティと短周期地震動の解析によるア

スペリティの位置や大きさに差異が見られることを示した。さらに、観測史上最大規模の地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデルについても比較を行い、その差異がより顕著であることを示した。

一方で、今回作成したプレート境界構造モデルはわずかな情報から作成されており、その精度等は既往部分と比べても劣るものである。また、文部科学省による「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」や「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」などによる知見に基づく新たなフィリピン海プレートの境界面モデルも示されつつあり、これらの成果を地下構造モデルに取り込むことも今後の課題である。

震源のモデル化に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震マグニチュード 9 クラスの地震について、提示されている震源モデルからは地震動の長周期成分と短周期成分の放出源が異なる可能性も示唆されており、今後より詳細な検討を必要とする。また、計算手法に関しては、差分法における減衰 (Q 値) の組み込み方についてさらなる検討が必要である。

(d) 引用文献

- 1) Aoi, S. and H. Fujiwara, 3-D finite difference method using discontinuous grids, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 918-930, 1999.
- 2) 馬場俊孝・伊藤亜紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志, 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, S111-006, 2006.
- 3) 中央防災会議, 第 16 回東南海、南海地震等に関する専門調査委員会, 参考資料, 2003.
- 4) 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川讓・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛, 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 337, 2009.
- 5) 原子力発電環境整備機構, 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, 原子力発電環境整備機構技術報告書, NUMO-TR-04-02, 2004.
- 6) Graves, R. W., Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1091-1106, 1996.
- 7) 林宏一・引間和人, 差分法による三次元弾性波動場計算 (その 3) - 不等間隔格子と PC クラスタによる大規模モデルの計算 -, 日本地震学会講演予稿集, B59, 2001.
- 8) Hirata, K., Y. Tanioka, K. Satake, S. Yamaki and E. L. Geist, The tsunami source area of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami travel times and its relationship to the 1952 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 367-372, 2004.
- 9) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi and H. Fujiwara, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of the K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, 56, 317-322,

2004.

- 10) 伊藤谷生・佐藤比呂志, 西南日本における海溝・島弧・縁海系の地殻構造—南海トラフから大和海盆北縁まで—, 地学雑誌, 119, 235-244, 2010.
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について (中間報告), 2001.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 日本海東縁部の地震活動の長期評価, 2003.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2009年試作版, 2009.
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版)」, 2011.
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2012年試作版—南海地震 (昭和型) の検討—, 2012.
- 16) 釜江克宏・川辺秀典, 2003年十勝沖地震 (M8.0) の震源のモデル化と強震動予測レシピの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 519-520, 2004.
- 17) Koketsu, K., K. Hikima, S. Miyazaki and S. Ide, Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source rupture process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 329-334, 2004.
- 18) 瀨瀬一起・三宅弘恵・小林励司・田中康久・池上靖史, 1923年関東地震の広帯域強震動評価: 震度分布再現に向けたモデル化の現状, 首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開 平成17年度成果報告シンポジウム予稿集, <http://www.cuee.titech.ac.jp/syutoken/activities/h17pdf/4.pdf>, 2006.
- 19) 久世益充・杉戸真太・能島暢呂, 2003年十勝沖地震におけるアスペリティ分布の推定, 土木学会地震工学論文集, 28, 論文番号104, 2005.
- 20) Matsubara, M. and K. Obara, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, 63, 663-667, 2011.
- 21) Morikawa, N., S. Aoi, R. Honda, S. Senna, Y. Hayakawa and H. Fujiwara, Application of the "Recipe for strong motion evaluation" to the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake, ESG2006, Paper No. 48, 2006.
- 22) 中村一明, 日本海東縁新生海溝の可能性, 東京大学地震研究所彙報, 58, 711-722, 1983.
- 23) 中村衛・兼城昇司, 地震分布から求めた南西諸島における沈み込んだフィリピン海プレート形状, 琉球大学理学部紀要, 70, 73-82, 2000.
- 24) Nozu, A. and K. Irikura, Strong-motion generation areas of great subduction-zone earthquake: waveform inversion with empirical Green's functions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 180-197, 2008.
- 25) 大竹政和・平朝彦・太田陽子 (編), 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会, 2002.

- 26) Pitarka, A., 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 27) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, 462-464, 2005.
- 28) 武村雅之・神田克久, 震度データのインバージョン解析による過去の東海・南海地震の短周期地震波発生域, *地震予知連絡会会報*, 76, 598-604, 2006.
- 29) Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino and T. Kanazawa, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth Planets Space*, 56, 373-376, 2004.
- 30) Yagi, Y., Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, *Earth Planets Space*, 56, 311-316, 2004.
- 31) Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, 55, e21-e24, 2003.
- 32) 山中佳子, 1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程, *月刊地球*, 26, 739-745, 2004.
- 33) 柳井修一・青木一勝・赤堀良光, 日本海の拡大と構造線—MTL, TTL—そしてフォッサマグナー, *地学雑誌*, 119, 1079-1124, 2010.