

敷地周辺の フィリピン海プレート内地震の発生環境

Seismogenic environment of the intraslab earthquakes in the Philippine Sea plate around the Ikata NPP

2016/09/24

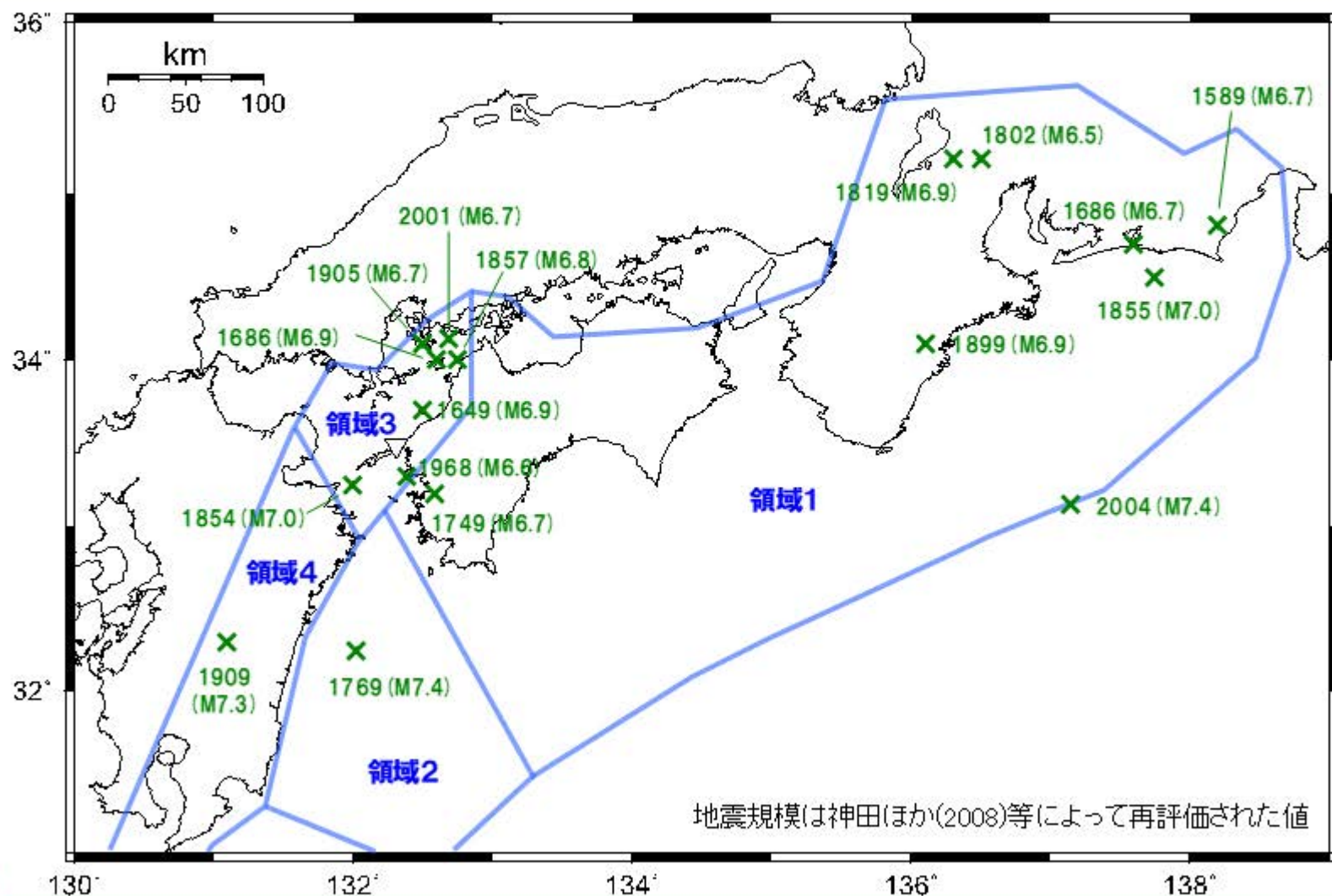
四国電力株式会社

小川 裕

歴史地震における敷地周辺の海洋プレート内地震の最大規模

Maximum magnitude of Intraslab earthquake in historical earthquakes around the Ikata NPP

伊方発電所周辺(領域3)で発生する海洋プレート内地震については、歴史地震の中でM7.0が最大規模となっている。



地震規模は神田(ほか)(2008)等によって再評価された値

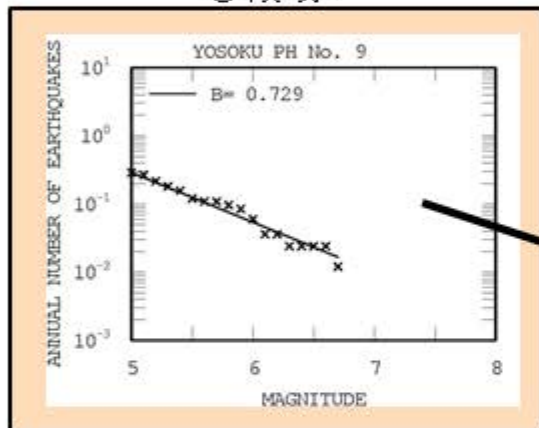
b値 解析結果

b-value (Analysis result)

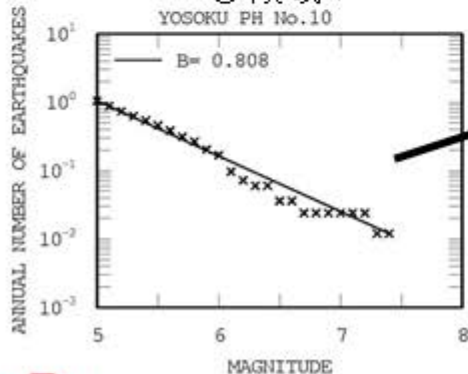
○縦軸を1年あたりの地震の累積発生数に換算して結果を示す。

○以降では、領域3においてM7を超える地震が発生していない理由について、メカニズムや構造の観点から検討を行う。

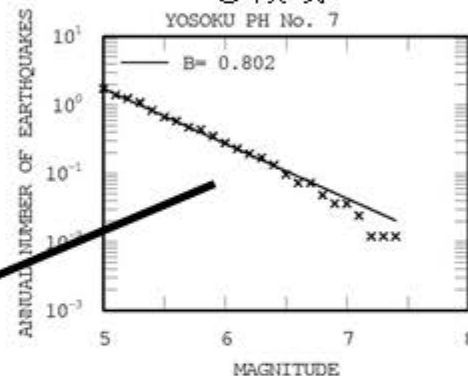
⑨領域3



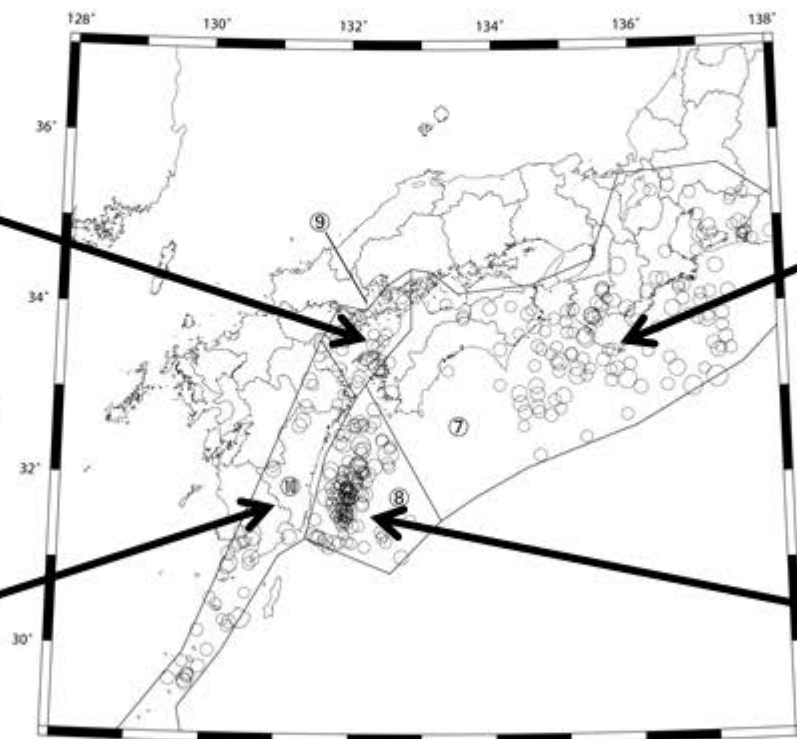
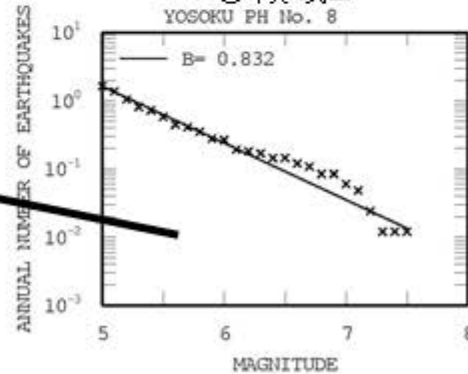
⑩領域4



⑦領域1



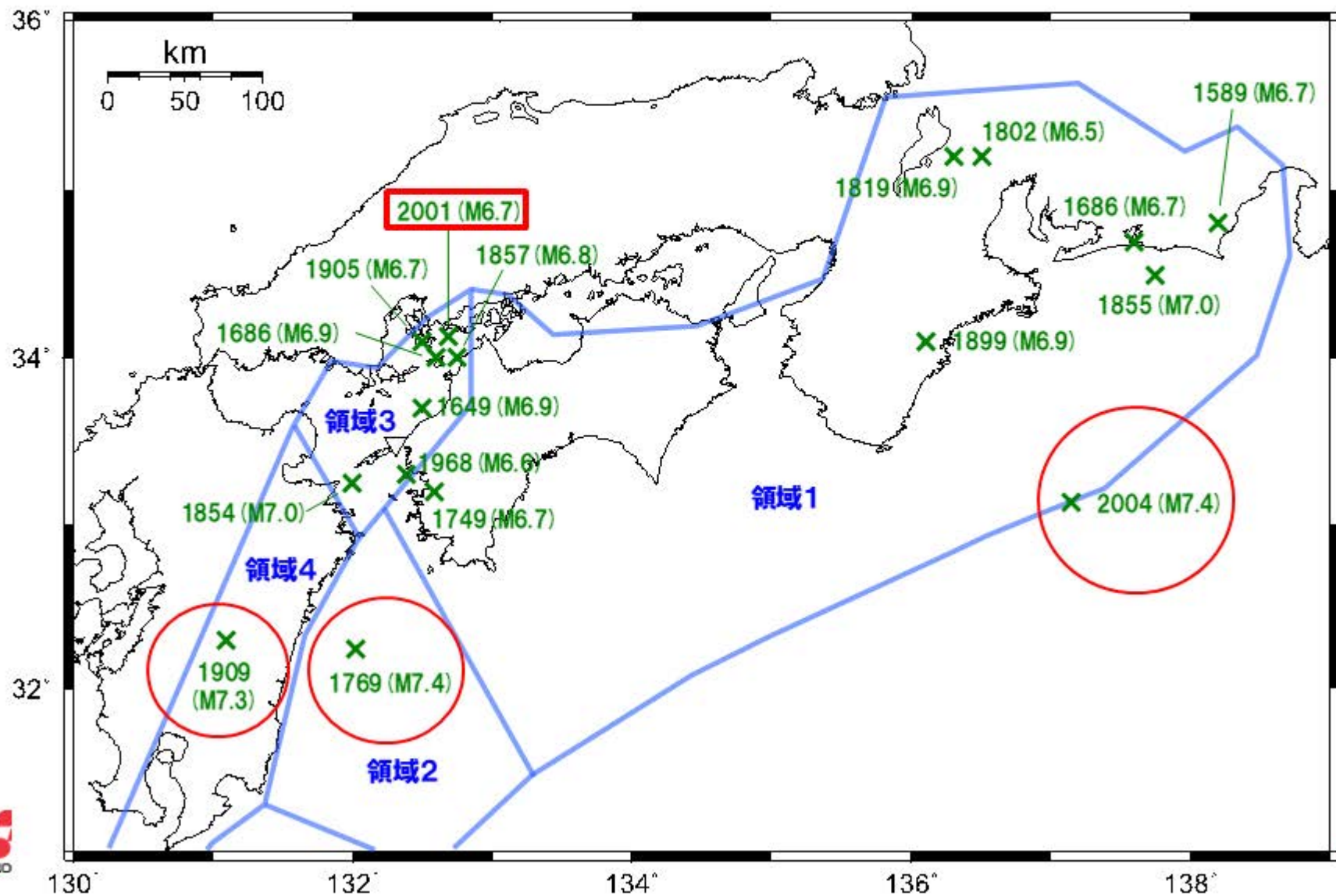
⑧領域2



フィリピン海スラブの歴史地震

Historical earthquakes - Philippine Sea Plate -

M7.0を超える地震は、2004年、1909年、1769年の3つ記録されている。これらについて、領域3における代表的な地震である芸予地震と対比して検討する。



Xu and Kono (2002)

○震源メカニズム解から南海トラフのスラブ内地震には2つの応力場（地震タイプ）が存在することがわかった。

1つは西四国から紀伊半島にかけてのDDCタイプ。

もう1つは、西四国から九州のDDEタイプである。両者の境界は西四国にあり、南南東から北北西の方向に隔てられる。

○両者の応力場の違いは、スラブの年代、深さ、傾斜、プレートのカップリングによる。

西四国から紀伊半島では、若いスラブ(11~20Ma)が緩い角度で沈み込み、プレート境界からの抵抗を受けDDC型となっている。

一方、西四国から九州では、古いスラブ(40Ma)が急傾斜で深さ160kmまで沈み込んでおり、この力によってDDE型となる。

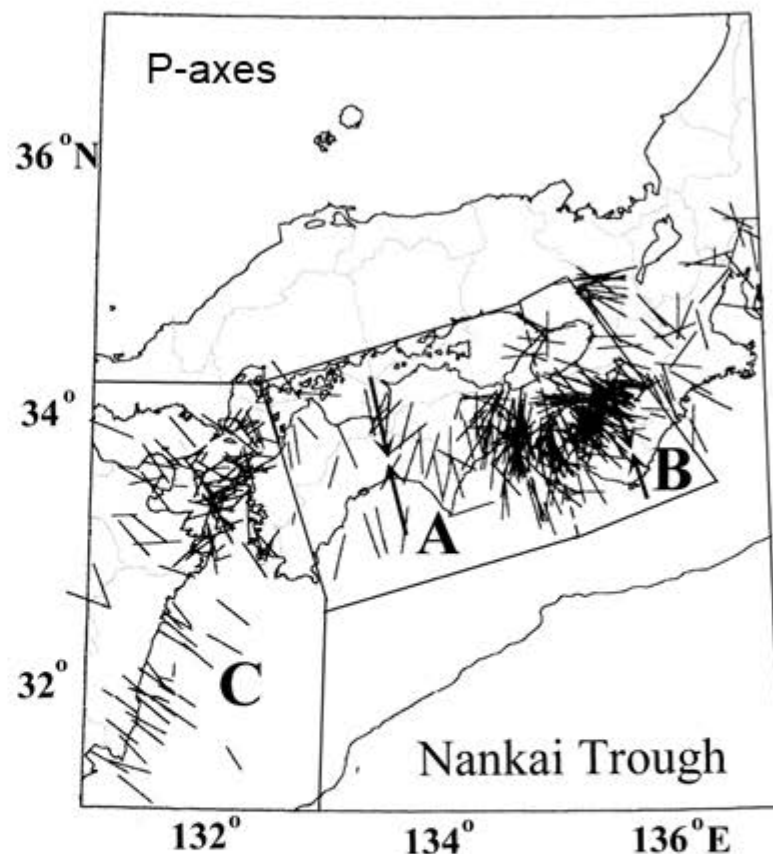


Fig. 7. Zoning in the Nankai trough for the profile analyses in Figs. 8, 9 and 10. Regions A, B and C for Shikoku, Kii and western Shikoku-Kyushu, respectively. Arrows in A and B indicate the maximum stress-axis of intraslab stress of the down-dip compression. The region C is of down-dip extension.

543 earthquakes ($M \geq 3$) during 1936-1998

【スラブの年代】

九州・パラオ海嶺を境に年代が異なる

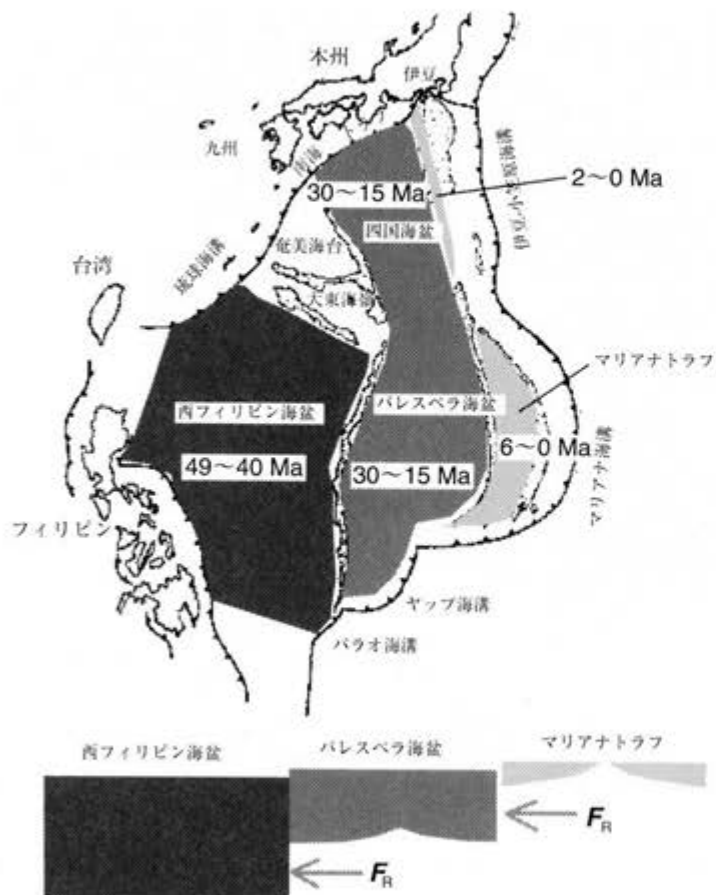
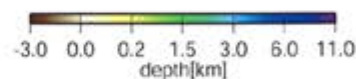
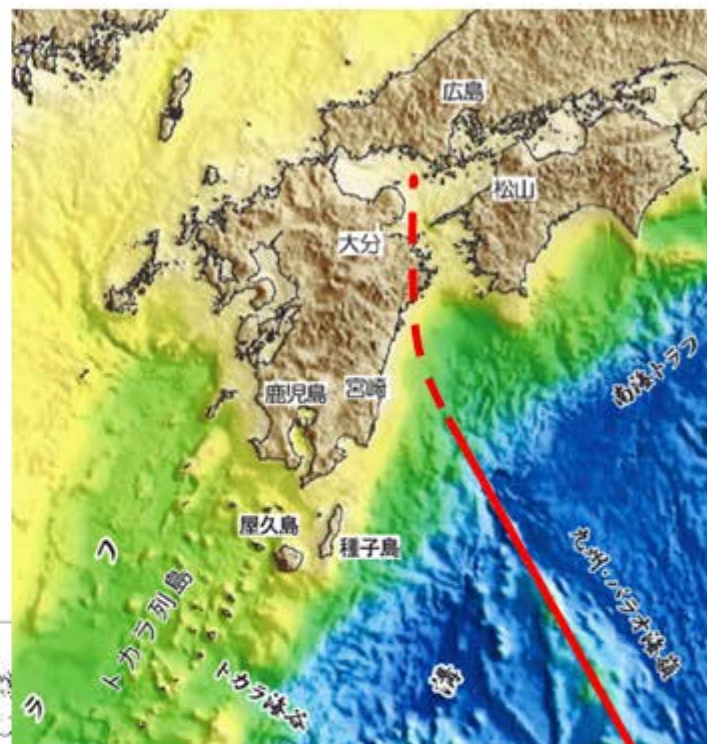
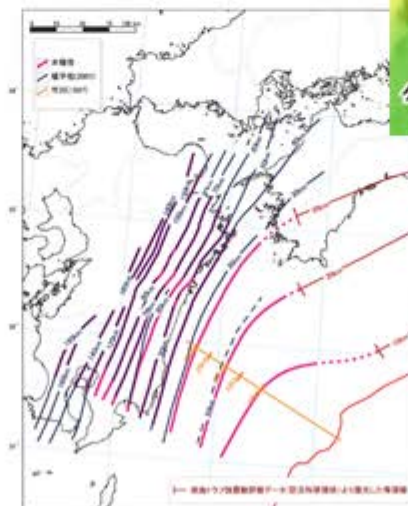


図 6.4.2 フィリピン海プレートを構成する海盆の年代 (Okino et al., 1998 などによる, Seno, 2000)



九州・パラオ海嶺とその延長 (推定)

プレートの急激な曲がりによって海嶺の延長はプレート走向方向に近づく

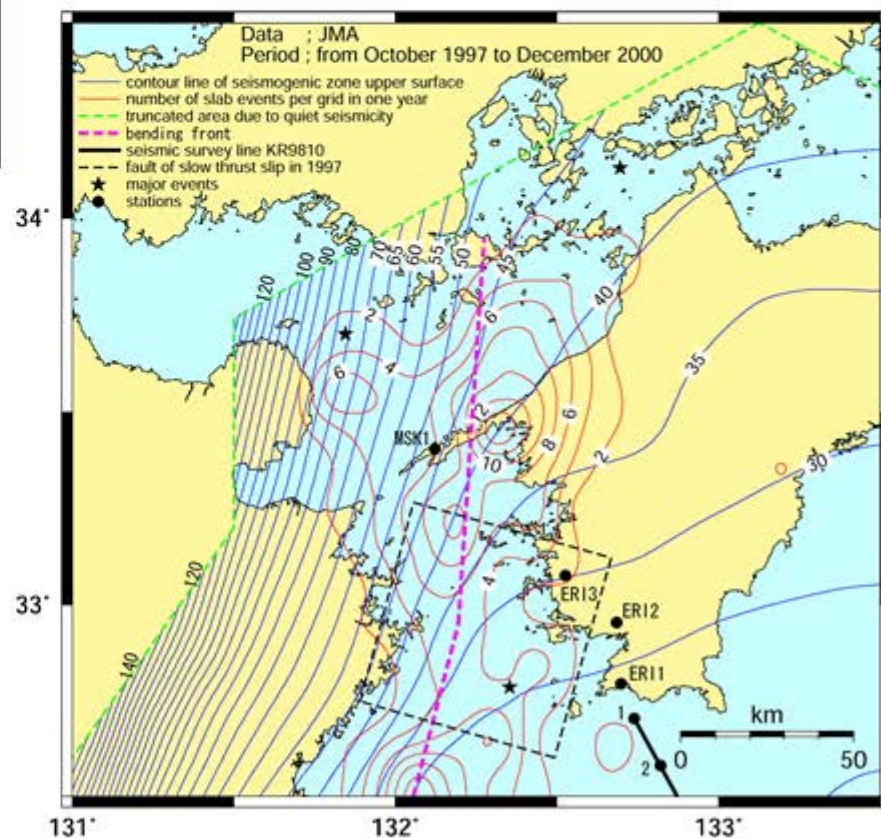
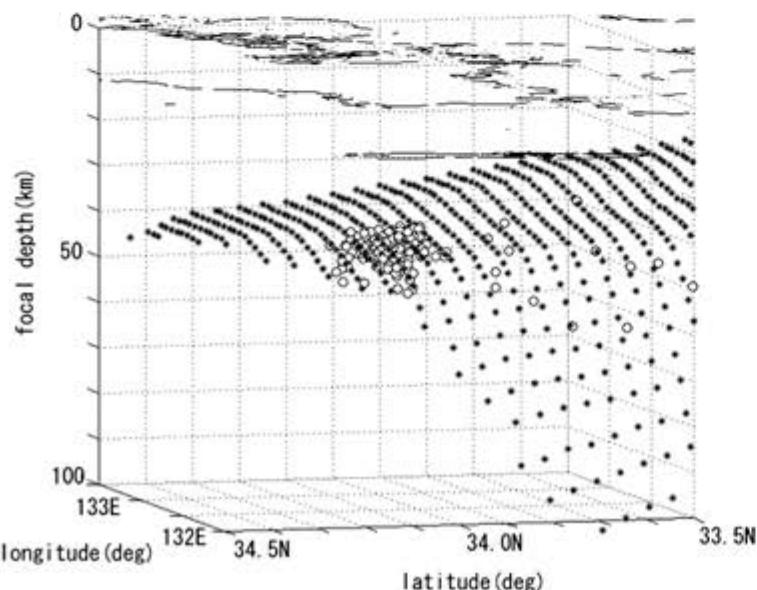
芸予地震のメカニズムに関する知見③

Knowledge of Geiyo earthquake ③

松崎・他(2003)

○2001年芸予地震は、基本的にはプレートの脱水、プレート内の構造の急変化、プレートの曲げ及び引張りの相互作用によるものと考える。

○安芸灘で芸予地震タイプの地震が約50年の再来間隔で発生しているが、伊予灘ではこのような地震が見当たらないのは、九州側からの圧縮力が影響しているのではないかと推察する。



芸予地震のメカニズムに関する知見④

Knowledge of Geiyo earthquake ④

Wang et al. (2004)

○フィリピン海スラブは東西方向の引っ張りを受けており、九州ではDDE型、南海域ではプレートの縁と平行する方向の引っ張りである。

○南海域の引っ張りは、若いスラブが沈み込む際、マンツルの抵抗を受け、東西に伸張されるものである。

○九州側は沈み込んだスラブの引っ張りによって地震が発生している。

○2001年芸予地震は、プレートの縁と平行方向の引っ張り、スラブの曲げの力（九州側スラブの引っ張り）を受けて発生した。この地域はプレートの縁と平行方向の引っ張り、曲げの力の両方を強く受ける地域であり、このため芸予地震の破壊が海洋性マンツルにまで達した。

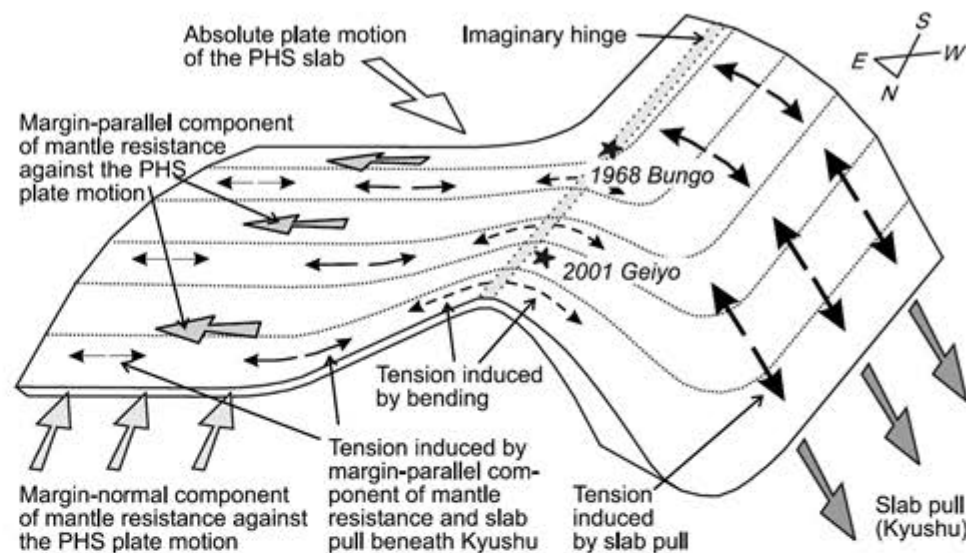


Figure 11. Schematic illustration of major contributing factors for in-slab stresses in SW Japan.

芸予地震のメカニズムに関する知見⑤

Knowledge of Geiyo earthquake ⑤

Shiomi et al. (2008)

- 西四国のスラブ内地震のメカニズムは、主に東西方向にT軸を持つ正断層タイプである。これは西方に沈み込むスラブの引張りによる。同じようなタイプの地震は、東海地方（伊勢湾）の深さ35km以深にも見られる。
- 東西引張りの正断層は、スラブがリッジ形状を呈している地域で発生している。

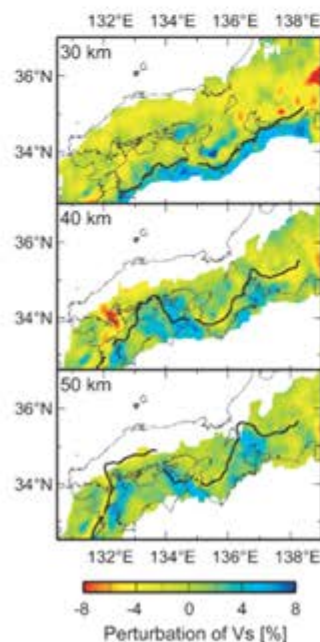


Figure 10. Comparison between the 30-, 40- and 50-km-depth contours of the oceanic Moho and S-wave velocity perturbations estimated by the tomographic analysis (Matsubara et al. 2008).

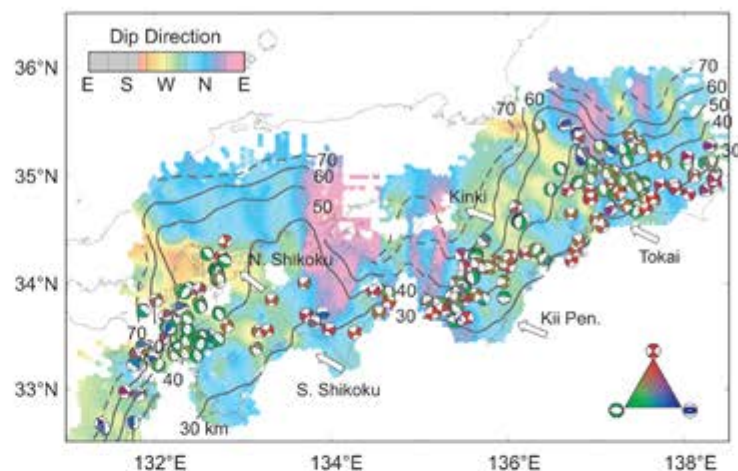


Figure 11. Dip direction of the oceanic Moho within the subducting Philippine Sea slab (PHS). The focal mechanisms plotted in this figure are selected with a magnitude of 3.0 or larger and with a focal depth range from 10 km above to 20 km beneath the oceanic Moho, except for earthquakes shallower than 25 km. The hypocentre locations and focal mechanisms are based on the JMA catalogue. The arrows indicate the direction of the crustal velocity field induced by the PHS subduction relative to the Amurian plate (from Miyazaki & Heki 2001).

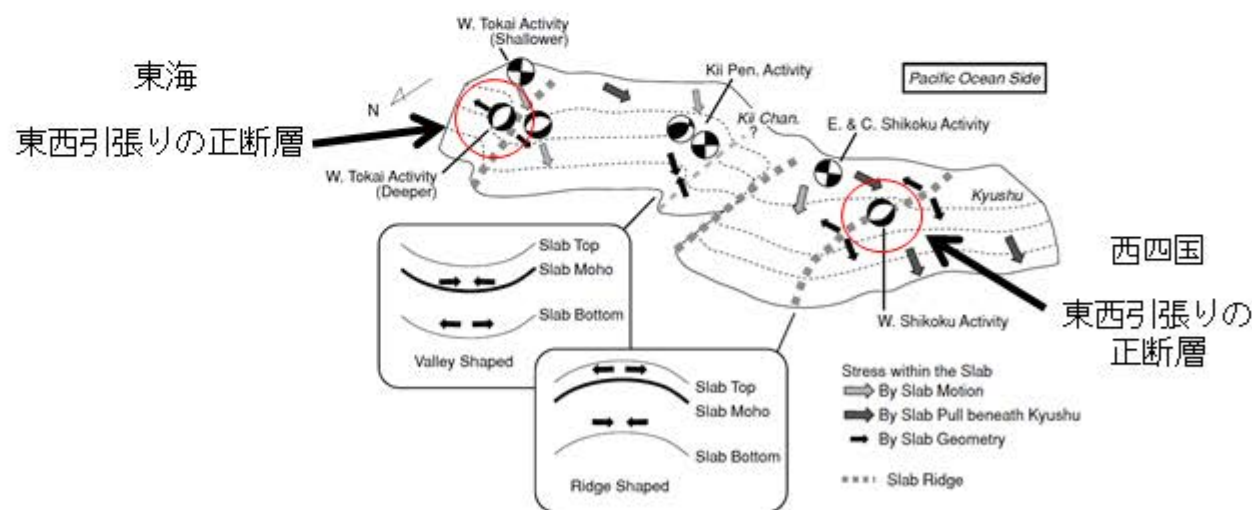


Figure 13. Schematic illustration of the relationship between the stress field within the subducting Philippine Sea slab and focal mechanism distributions. The focal mechanisms are displayed on the lower hemisphere.

2004年 紀伊半島南東沖地震 M7.4

Earthquake off the Southeast of Kii Peninsula, 2004 (M7.4)

○海溝から海側にかけてアウターライズという地形的にもりあがった部分があり、そのようなところの地下で地震が起こる。

○アウターライズ地震は、震源が浅い正断層型地震が多いが、やや深い逆断層型地震も時々起こる。これは沈み込みを開始するところでプレートが曲がり、プレート浅部で伸張、深部で圧縮の応力を受けるため、浅いところで正断層型、深いところで逆断層型となる(下図)。

○南海トラフでは、浅い正断層型地震の大きなものは現在まで知られていない。これはスラブが弧に平行な方向に伸張で、傾角方向に引っ張っていかないことが原因かもしれないが、まだ未経験というだけかもしれない。

○今回(2004年9月5日)の地震はフィリピン海プレートが沈み込みを開始するトラフ軸付近で起こったものである。この種の地震は海溝-アウターライズ地震と呼ばれる。上に述べたように主としてプレートの曲げが原因と考えられるとしても、南海トラフでこのような大きな逆断層型アウターライズ地震が起こったことは歴史的には知られていない。

[瀬野(2004)]

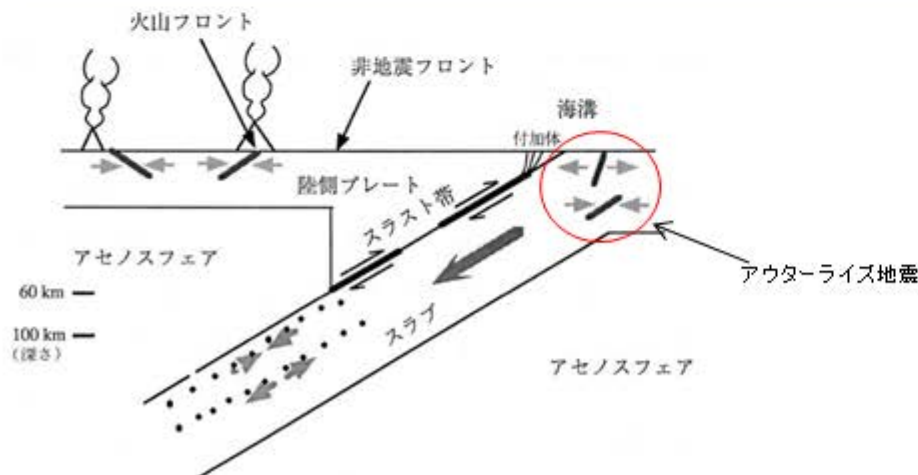
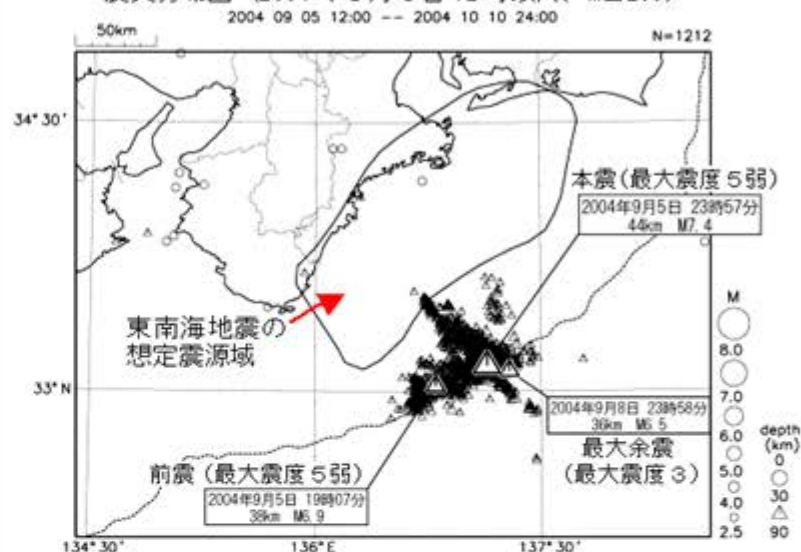
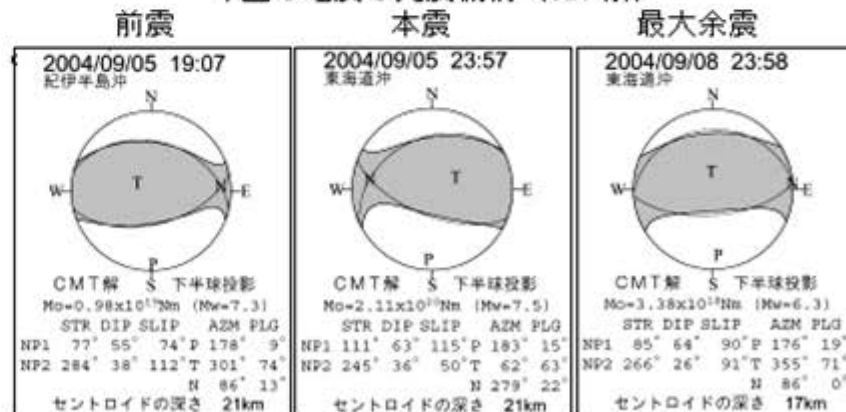


図 3.3.5 取東境界で起きる地震のいろいろなタイプ
大きい矢印はプレート運動を表す。

震央分布図 (2004年9月5日12時以降、M \geq 2.5)



今回の地震の発震機構 (CMT 解)



1909年 宮崎県西部の地震 M7.3

Western Miyazaki Earthquake, 1909 (M7.3)

○宇佐美(2003)によれば、この地震は深さ150kmで発生したとされている。

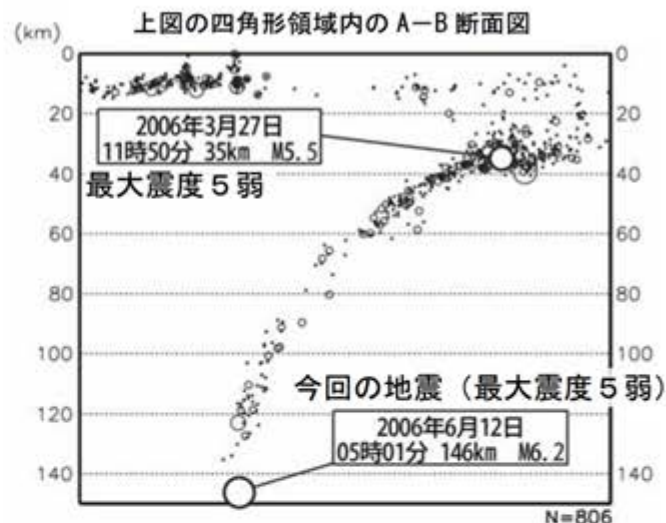
○似たような地震としては2006年6月12日の深さ146kmで発生した地震がある。

○この地震のメカニズム解は逆断層型を示している。

○沈み込んだ九州側のスラブは、年代が古く(40Ma)、スラブの厚さが厚いと考えられる。一方、敷地直下のスラブは、年代が若く、厚さも薄いと考えられる。

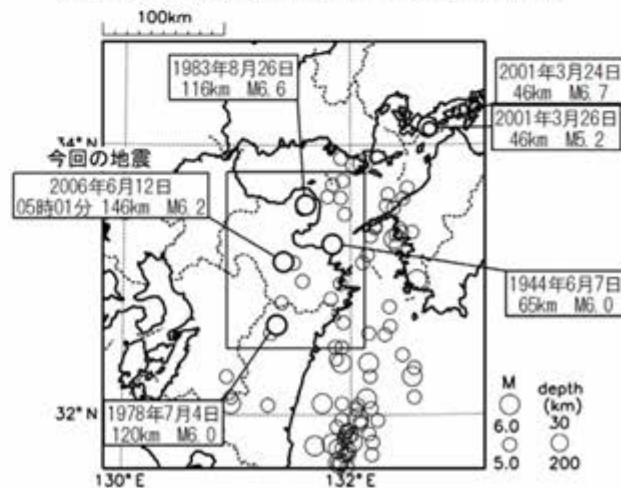
○したがって、このようなタイプの地震は、敷地直下のスラブ内には想定しがたい。

2006年6月12日の地震



2006年6月12日 大分県中部の地震 (周辺の過去の地震活動)
(深さ 30km~200kmの地震)

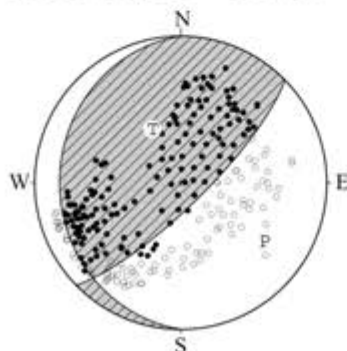
震央分布図
(1923年8月~2006年6月12日6時、深さ30~200km、M5.0以上)



図中の吹き出しは矩形内で発生したM6.0以上の地震および、「平成13年(2001年)芸予地震」の本震と余震を示す。

発震機構解 [初動解] (暫定)

2006/06/12 05:01



北西-南東方向に張力軸を持つ型

●は初動が上向き観測点、○は初動が下向き観測点を示す。
Pは圧力軸、Tは張力軸の方向を示す。(下半球等積投影)

1769年 日向・豊後の地震 M7.4

Hyuga-Bungo Earthquake, 1769 (M7.4)

神田・武村(2011)

- 図4に示すように九州側で震度が大きい分布が生じるためには1941年の地震のように深さ34kmまでの浅い地震の可能性が高い。
- 1769年の地震は、九州内陸またはその近傍で発生する震源の深いプレート内の地震の可能性は低い。松浦・他(2003)が指摘するようなプレート内地震の場合ならば比較的浅い地震と考えられる。
- また、この地域の被害地震としては低角逆断層地震が多く発生していることを考慮すると、1941年の地震のようなプレート境界地震の可能性もある。

松浦・他(2003)

- 熊本や大分県の被害は風水害によって増幅されている可能性がある。風水害も含んだ被害からの震度推定で震度Vの範囲が大きくでている。

- 発震機構が明確にはされておらず、プレート境界地震の可能性もある。
- 仮に、浅いスラブ内と考えた場合には、規模から2004年紀伊半島南東沖地震のようなタイプが考えられる。
- そうであるとする、長い断層面が想定されるが、日向灘のプレートの走向は比較的直線的であるのに対し、敷地周辺はプレート等深線が湾曲しており、このように長い断層面は想定しがたい。
- また、年代の古いプレートが破壊したために規模が大きいという可能性も考えられる。

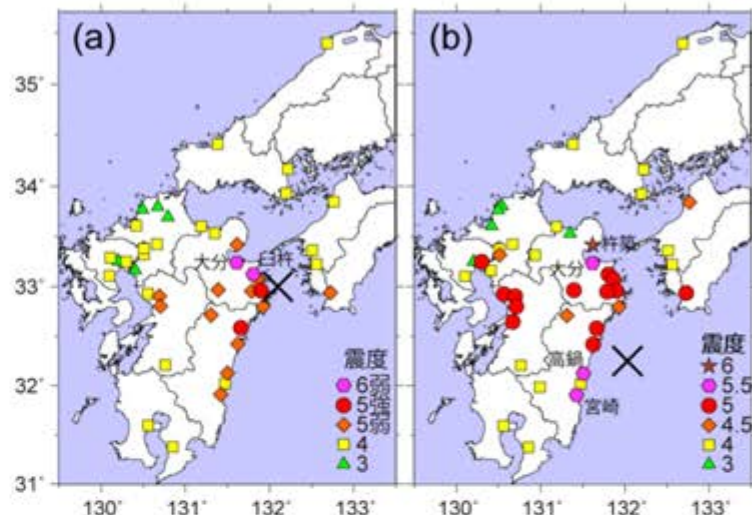


図4 1769年8月29日日向・豊後の地震の震度分布。震度5.5以上は地点名を表示。×は表1に示す震央。(a)宇佐美(2010)、(b)松浦・他(2003)

Fig. 4 Seismic intensity distribution of the 1769 event. A cross shows the epicenter. (a) Usami(2010), (b) Matsu'ura et al. (2003)

地域区分(領域)間の比較

Comparison between Regions

地震タイプの違いなどに着目して，領域毎の比較を行う。

項目	領域1			領域2	領域3	領域4
	アウターライズ	四国～東海	伊勢湾 35km以深	日向灘	安芸灘・伊予灘・豊後水道	九州
歴史地震の最大規模	7.4	7.0	6.9	7.4	7.0	7.3
プレートの年代	11～20Ma	11～20Ma	11～20Ma	40Ma	11～20Ma	40Ma
スラブの厚さ	30～35km	30～35km	30～35km	50km	30～35km	50km
プレート内での地震発生位置	沈み込む前	沈み込む前	沈み込んだ後	沈み込む前	沈み込んだ後	沈み込んだ後
プレート等深線の形状	直線的	湾曲	湾曲	直線的	湾曲	直線的
地震発生メカニズム	DDC	DDC	DDE	DDE	DDE	DDE
	縦ずれ	横ずれ	正断層	縦ずれ	正断層	逆断層

上記比較表から，歴史地震の最大規模が小さい領域では，プレートの年代が若くスラブの厚さが薄く，しかもプレート上面が湾曲している。
敷地が位置する領域3は，領域1（伊勢湾）と同じような地震環境にあるが，その他の領域とは異なる。

太平洋プレートの二重地震面

Kita et al. (2006)

○太平洋プレートの二重地震面の上面の深さ70~100kmに上面地震帯を発見した。

○これは、上面の地震分布が一樣ではないことを示している。

○上面地震帯の下限は、海洋性地殻内の含水鉱物の相転移が起こる深さと関係しているように見え、脱水脆性化でスラブ内地震の地震活動を説明できることを示す。

この断面図より、二重地震面下面まではプレート上面から30~40km

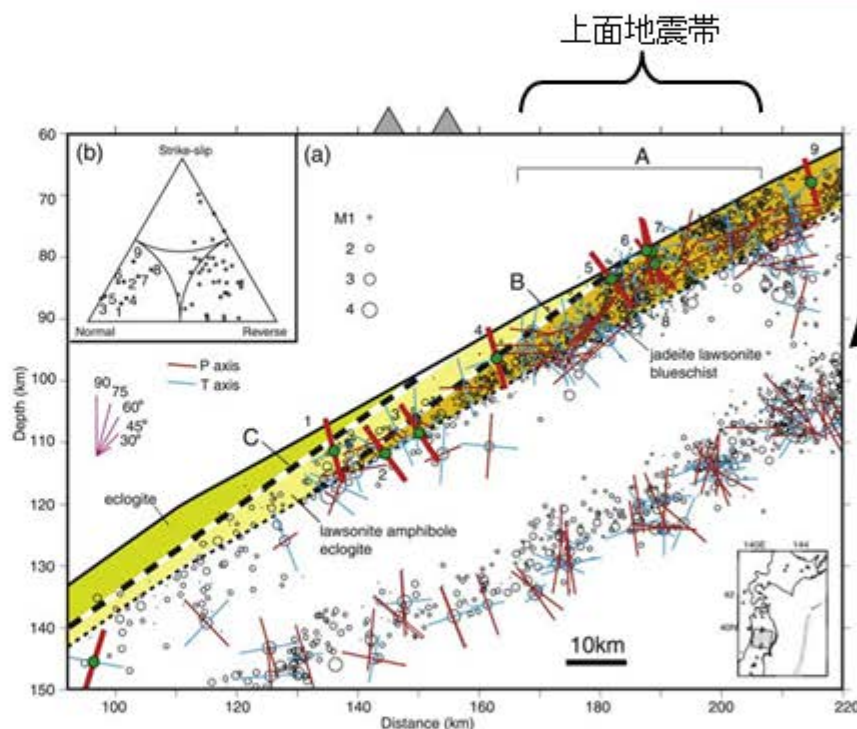


Figure 3. (a) Vertical cross-sectional view of the events in the square in the inserted map. Black circles and green circles with numerals show hypocenters and the normal fault [NF] type event shown on the triangle diagram (Figure 3b). Blue lines and red lines show respectively the T and P axes of events. The heavy red lines show the P axes of the NF. The heavy black solid line and dashed black line show the plate interface estimated by Zhao et al. [1997], the possible location of Moho (10 km deeper than the plate interface). Triangles show volcanoes. Metamorphic facies in the Tohoku subduction zone by Hacker et al. [2003] are shown in the yellow area (jadeite lawsonite blueschist), the orange area (lawsonite amphibole eclogite) and the green area (eclogite), respectively. Lines (B and C) show the location of the facies boundaries, respectively. (b) Triangle diagram [Frolich, 1992] for the upper seismic plane events in Figure 3a. Circles with numerals show the NF-type events. Note that the coordinate system is based on the slab surface.

フィリピン海プレートの二重地震面(東海地方・伊勢湾)

Miyoshi and Obara (2010)

- フィリピン海プレートのスラブ内地震の地震活動を震源分布に基づいて分析し、伊勢湾・琵琶湖付近に二重地震面を確認した。
- 下面の地震活動は上面よりも低調で、上面の下、約10kmに存在する。
- 上面の地震はT軸が東西であり、引張り場で発生している。下面の地震のうちスラブブリッジ付近で発生しているものは、圧縮場で発生しており、曲げ作用を受けたものである。(下図グレーハンチ部)

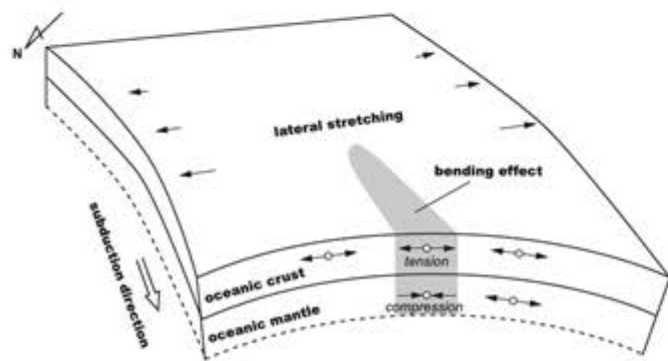


Fig. 6. Schematic illustration of the seismogenic stress field of the DSZ within the ridge-shaped slab. As the plate subducts, the slab stretches laterally. The bending effect (gray areas) appears only near the axis of the ridge-shaped slab.

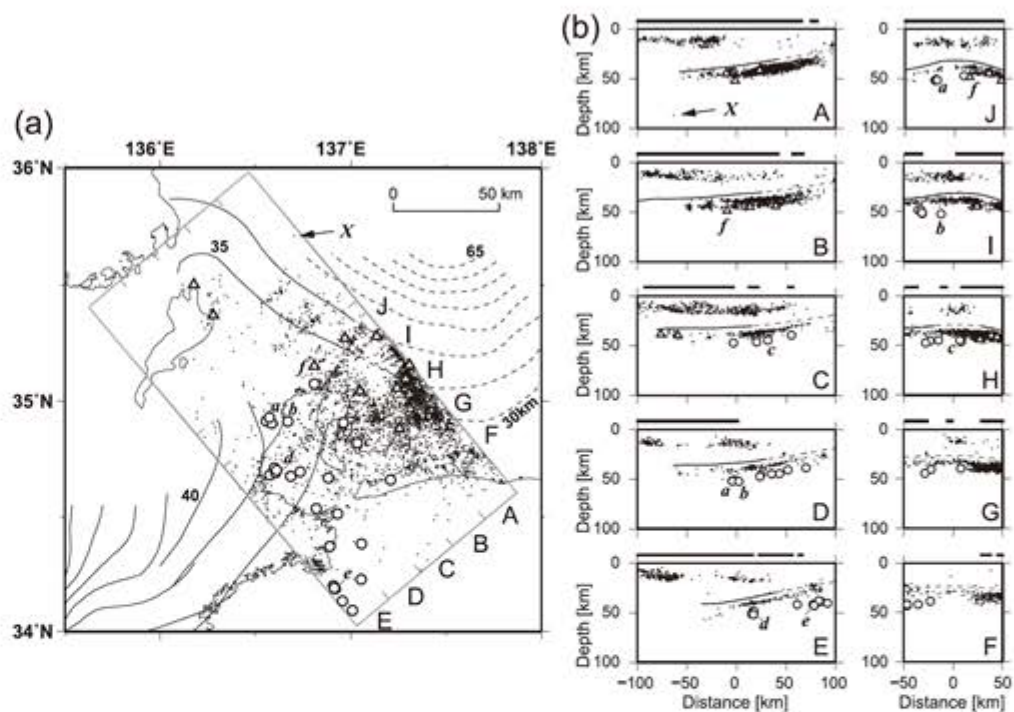


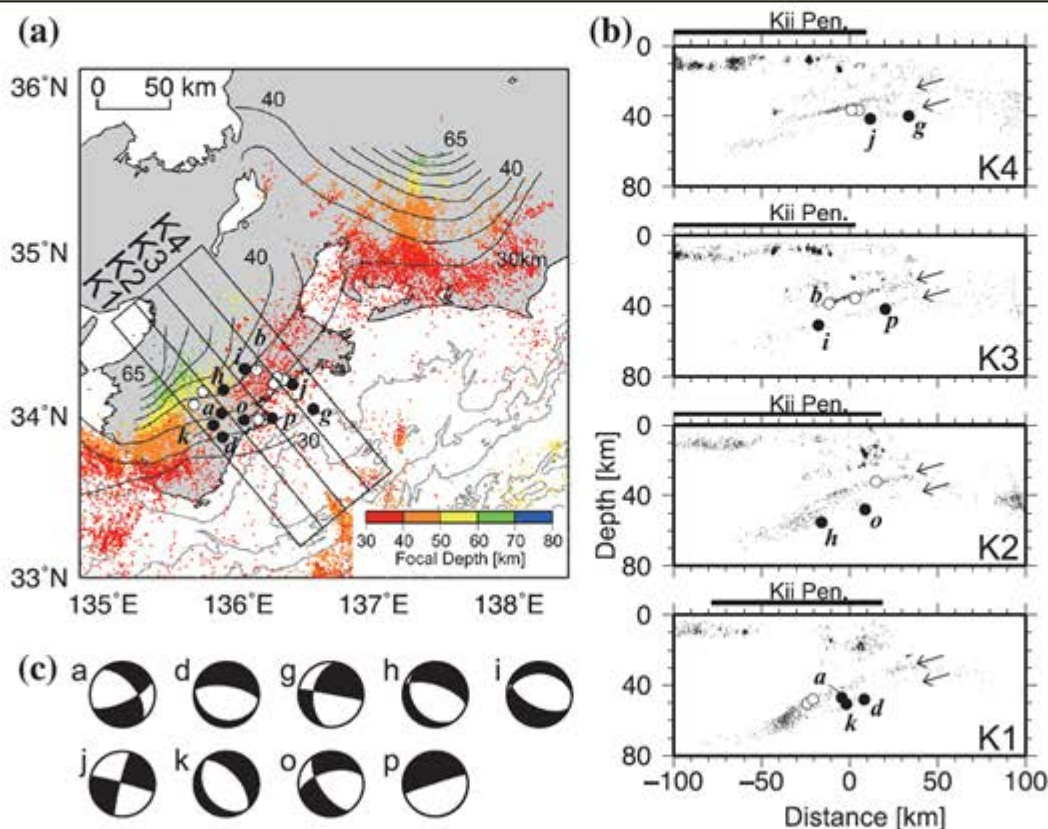
Fig. 3. Earthquake distribution obtained in this study. Dots and open circles indicate the locations of events within the upper plane and lower plane of the DSZ, respectively. Open triangles indicate the locations of reverse-fault- or strike-slip-type events with the *P*-axis orientation ranging from the E-W to the NE-SW directions. Solid and broken curves are the same as in Fig. 1. An "X" indicates the deepest event detected in this region, with the exception of the deep intra-Pacific-slab events (see discussion in Section 3). (a) Epicentral distribution of earthquakes located in this study. Earthquakes deeper than 30 km are shown. Symbols A to J indicate the rectangle areas used for the cross-sections in (b). (b) Vertical cross-sections of hypocenters (depth from 0 to 100 km) within each rectangular area indicated in (a). Solid and broken curves show the upper surface of the PHS plate (Miyoshi and Ishibashi, 2004). Thick bars above each box indicate land areas.

○が下面の地震

フィリピン海プレートの二重地震面(紀伊半島)

Miyoshi et al. (2012)

○フィリピン海プレートのスラブ内地震の地震活動を震源分布に基づいて分析し、紀伊半島に二重地震面を確認した。



この断面図より、
二重地震面下面ま
ではプレート上面
から10~15km程度

Figure 2. Earthquake distribution in and around the Kii Peninsula region. (a) Distributions of the oceanic crust events (open circles) and the oceanic mantle events (close circles) of the double seismic zone. The distribution of the earthquakes (depth: 30–80 km) that occurred between 1997 October 1 and 2010 January 31 is also shown. The upper surface of the Philippine Sea slab is as shown in Fig. 1(a). (b) Vertical cross-sections of the earthquakes (depth: 0–80 km) that occurred within each rectangular area indicated in (a). The two arrows in each box indicate the double seismic plane, and the thick bars above each box indicate land areas. (c) Focal mechanism (Hi-net catalogue) of the oceanic mantle events selected in this study.

2003年宮城県沖地震

Okada and Hasegawa (2003)

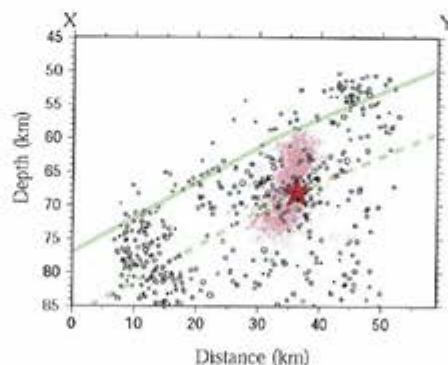
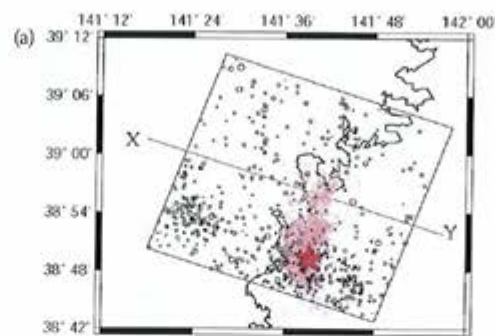
○2003年宮城県沖地震の破壊域はスラブ内の地殻とマントルの両方に広がり、震源（破壊開始点）はスラブ内のモホ面付近に位置する。

迫田・他(2004)

○二重深発地震面上面で発生する地震も下面の地震と同様に空間的に非一様な分布をする。

○2003年宮城県沖地震の本震震源付近では、本震発生前からスラブマントル内で高い地震活動が見られ、この地震は他の領域とは異なった「特異な」場所で発生したと推測される。

震源再決定前



震源再決定後

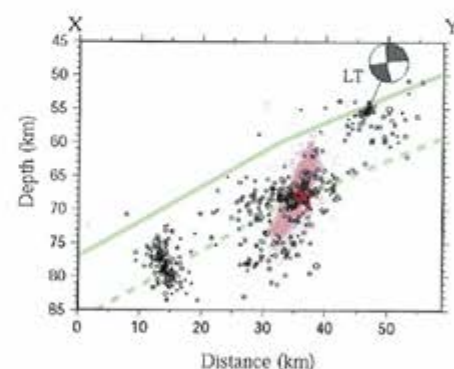
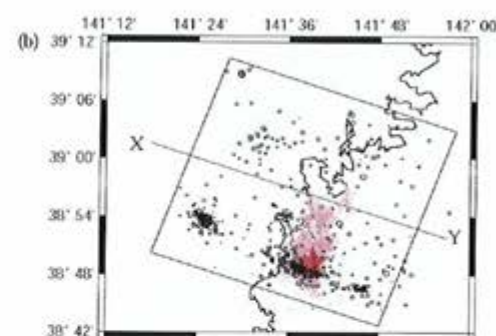


Fig. 5. Hypocenter distributions of the 2003 off Miyagi earthquake (star), its aftershocks (pink circles) and background earthquakes for the period from January 1, 1997 to May 25, 2003 (black circles) before relocated (a) and after relocated (b). Upper panels show epicenter distributions, and lower panels show vertical cross sections along the line XY shown in the upper panels. Green bold and dashed lines denote the locations of the upper plate boundary and the Moho, respectively.

ピンクの円が2003年宮城県沖地震の余震
黒の円は2003年宮城県沖地震発生前約6年半の地震

規模の大きいスラブ内地震に関する知見②

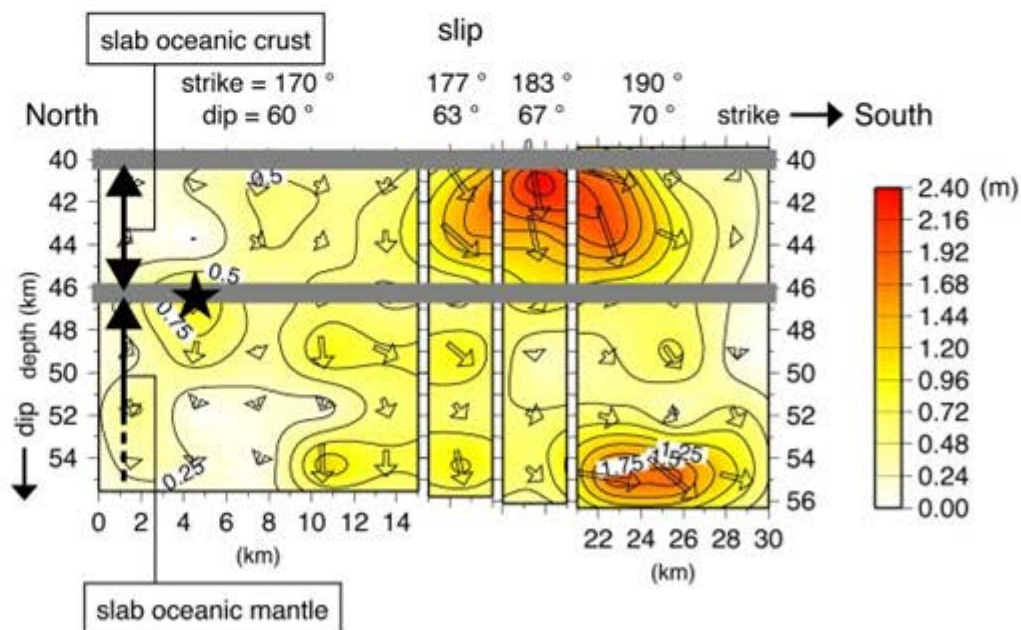
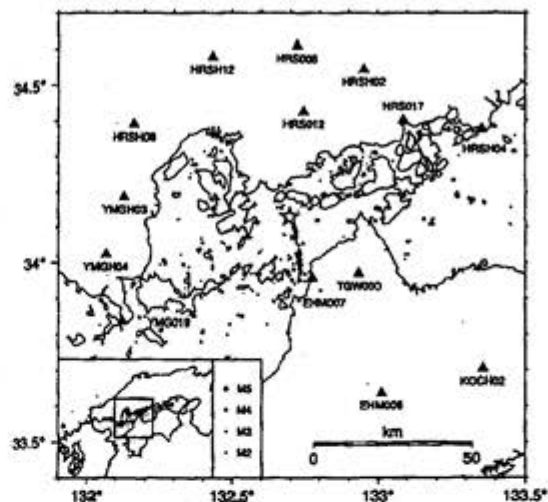
Knowledge of large intraslab earthquakes ②

2001年芸予地震

Takehi (2004)

○強震波形インバージョン (band pass filter: 0.1 to 0.5 Hz) により2001年芸予地震の破壊過程を解析した。

○2001年芸予地震の破壊領域は、海洋性地殻と海洋性マンツルの両方に及んでいる。



2001年芸予地震

菅ノ又 (2004)

○Double-Difference トモグラフィ法によって算定した速度構造と、芸予地震のすべり量分布を重ねて比較した。

○本震時の破壊は深さ52kmと深部の高速度異常域すなわちスラブマントル内にまで達していることがわかる。

○低速度域では大きな応力を蓄積することができず、非地震性すべり、あるいは小さな地震として応力を解消する一方で、高速度域のみが大きな応力を蓄積することができるために、地震時にアスペリティとして振舞うのかもしれない。

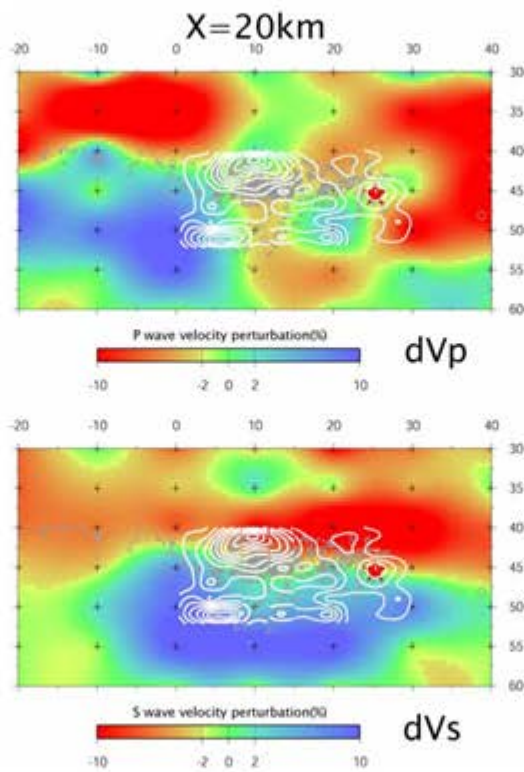


図 2.34 芸予地震の震源域を通る南北鉛直断面に本震のすべり量分布 (Kakehi, 2004; 白色のコンター)を重ねた図。すべり量分布のコンターは南北断面に投影している。灰色の丸印は芸予地震後に発生した地震(余震)の震源位置を表す。

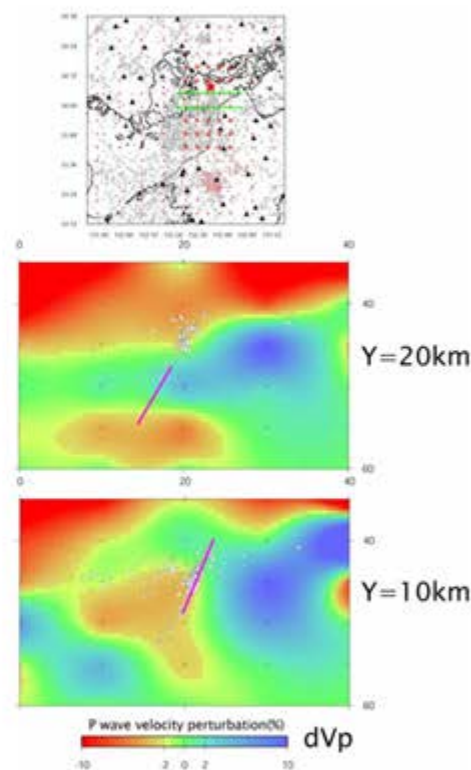


図 2.35 芸予地震の震源域を通る東西鉛直断面に本震のすべり量が大きかった領域(アスペリティ)を重ねた図。上段はY=20km、下段はY=10kmの東西断面を示す。Kakehi (2004)により得られたすべり量分布で0.75m以上の領域をピンク色の実線で示す。白色の丸印は断面から南北5km以内に発生した地震の震源を表す。

太平洋プレート

Kita et al. (2010)

- DDC型のメカニズムを持つ2003年宮城県沖地震 (M7.1) の余震は、DDC型の応力域に分布しており、中立軸を超えて発生していない。
- DDE型のメカニズムを持つ1993年釧路沖地震 (M7.5) の余震域は、DDE型の応力域である中立軸の下の領域にとどまるように見える。
- この結果は、規模の大きい地震においては、中立軸を超えて破壊が進展しないことを示唆するものかもしれない。

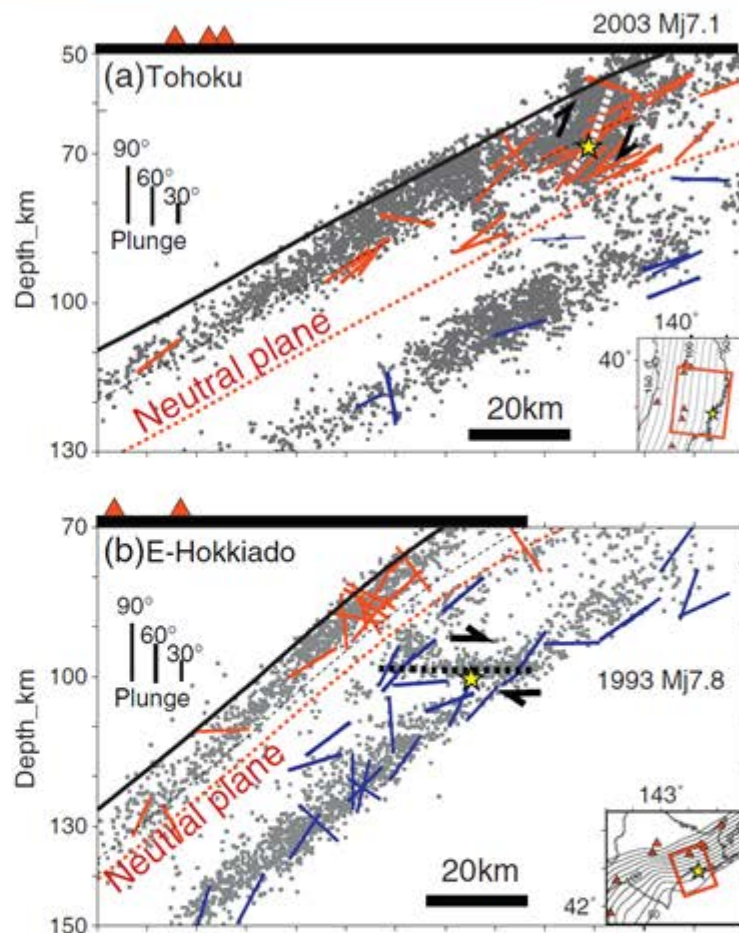


Fig. 10. Aftershock areas of the large intraslab earthquakes and the neutral plane. (a) Vertical cross-section of earthquakes and aftershocks of the 2003 Mj 7.1 Miyagi-oki earthquake beneath central Tohoku. Grey dots, a bold black line, and a thin dashed black line respectively show earthquakes, the plate interface and the slab Moho (7 km below the plate interface). The neutral plane of the stress field is shown as a red dotted line. The hypocenter of the 2003 Miyagi-oki event and the associated fault plane estimated by Okada and Hasegawa (2003) are shown as a yellow star and a thick white dashed line, respectively. Short red and blue lines show the P axes of events above the neutral plane and the T axes of events below it, respectively. (b) Vertical cross-section of earthquakes and aftershocks of the 1993 Mj 7.8 Kushiro-oki intraslab earthquake beneath eastern Hokkaido. The hypocenter of the 1993 Kushiro-oki event (from the JMA catalog) and the associated fault plane (Suzuki and Kasahara, 1996) are shown as a yellow star and a thick black dashed line. Other symbols are the same as in (a).

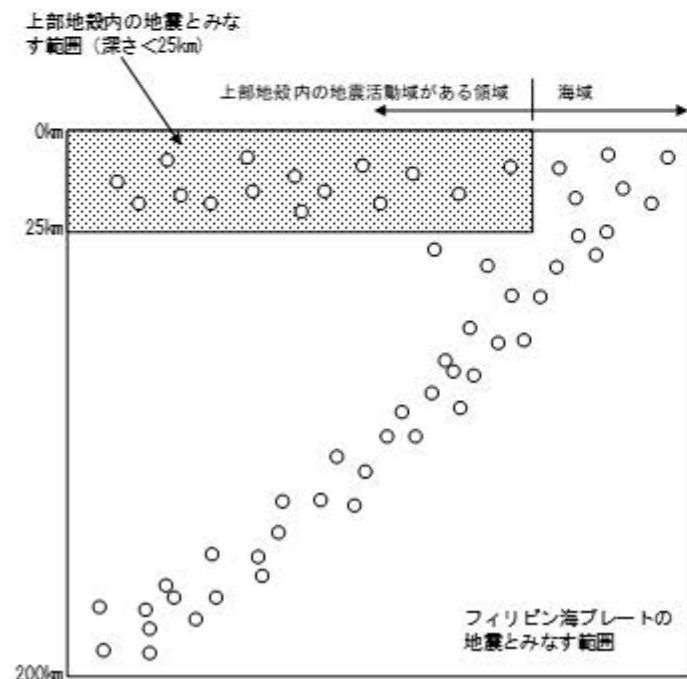
参考資料

Appendix

敷地周辺のフィリピン海プレートにおけるb値を算出する。

■解析条件

- 気象庁震源1926～2008年を使用
- M5以上、深さ200km以浅の地震を抽出
- 余震はM6.0以上の地震の発生後90日以内に発生した一定距離内の地震を除去
- 前震・群発地震は除去していない
- 陸域の深さ25km以浅の地震を除いた地震をフィリピン海プレートの地震と判断（下図参照）
- 領域を地震本部の領域に区切って算出



地震本部に基づくフィリピン海プレートの地震活動域

左記条件で選定された地震の震央分布を示す

領域3におけるその他の地震

Others earthquake in Region 3

1964年豊後水道の地震 M5.9
1968年豊後水道の地震 M6.6

原子力安全基盤機構

平成17年度原子力安全基盤調査研究
気象庁地震記録に基づくスラブ内地震の震源過程に関する研究

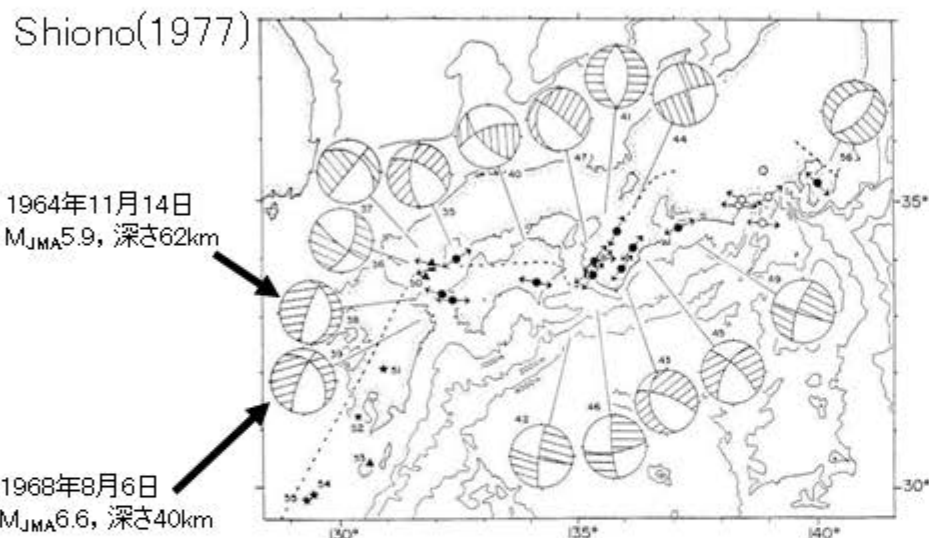
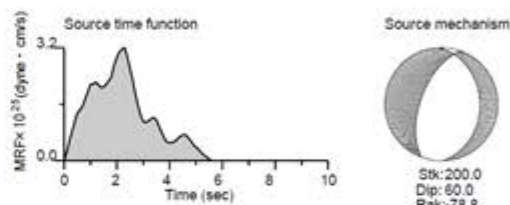


Fig. 7. Distribution of the T-axes for subcrustal earthquakes and simplified mechanism diagrams (lower hemisphere) of shock Nos. 35-49 and 56. A dotted line gives the location of the leading edge of the underthrusting Philippine Sea plate. In the southern Kanto region, the location of the leading edge of the Philippine Sea plate is inferred by Kawasaki (private communication) and also shown by a dotted line. It is an unsolved problem whether parallel extension appears even in southern Kanto.

敷地周辺のM6クラスの地震はいずれも
南北走向の正断層

1968/ 8/ 5 愛媛県西部の地震

Moment: 8.21×10^{25} dyne · cm
M_w: 6.5



南北走向
西傾斜60度
の断層面が
推定されている

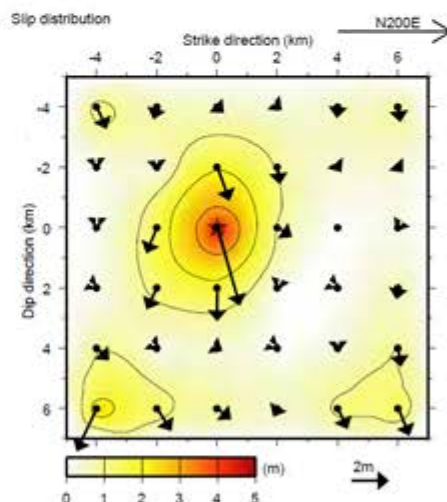


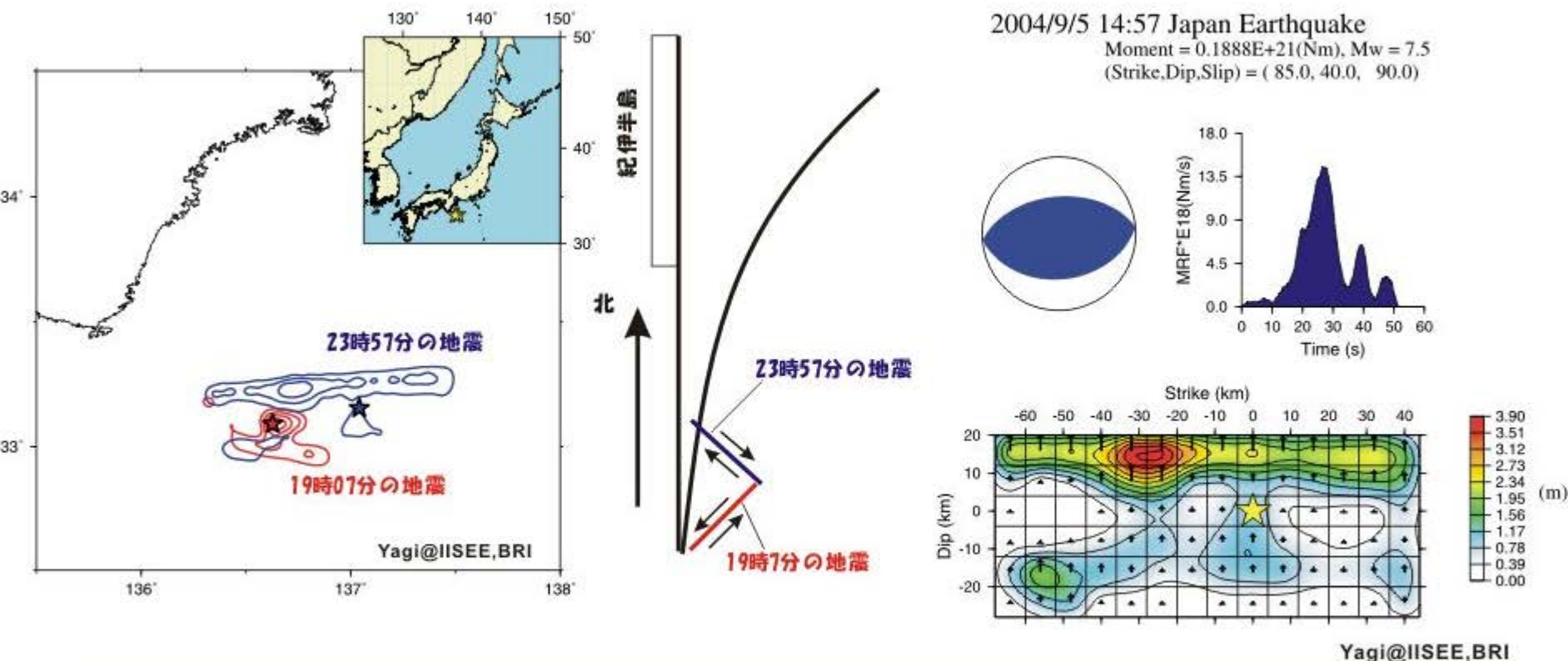
図1 2km メッシュを用いた1968年の地震のインバージョン結果。(左上)各小断層における震源時間関数を積算して求めた断層面全体の震源時間関数。(右上)各小断層のすべり量の積算から求めたメカニズム解,(下)各小断層面上のすべり方向とすべりの大きさ, ☆は破壊開始点を示す。コンターの間隔は1mとなっている。

2004年 紀伊半島南東沖地震 M7.4

Earthquake off the Southeast of Kii Peninsula, 2004 (M7.4)

八木 (2004)

遠地実体波を用いた波形インバージョンによりすべり量分布を推定した。



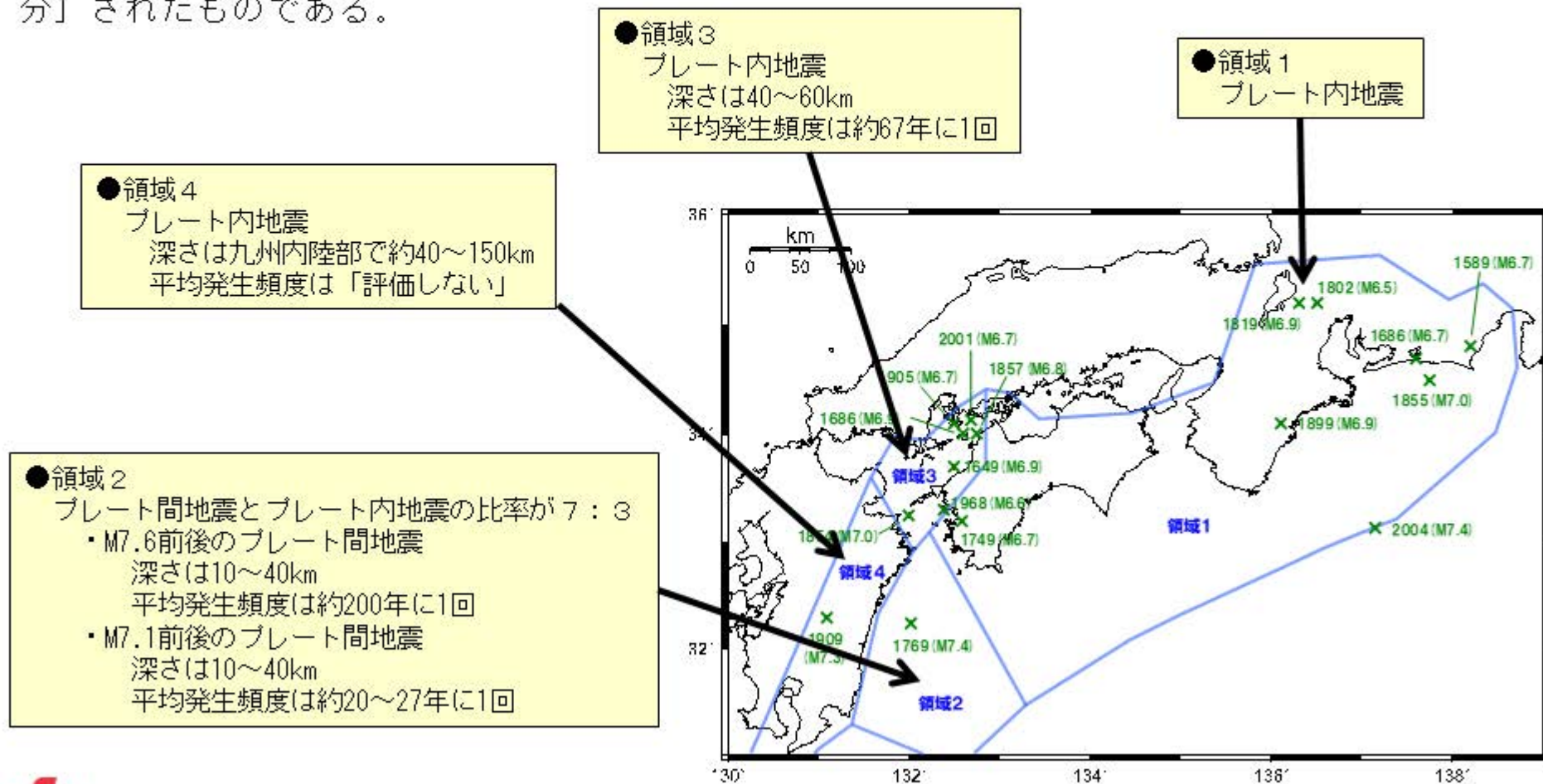
- 逆断層タイプの地震であり正断層が想定される敷地周辺とはメカニズムが異なる。
- この地震は沈み込む前の地震であり、敷地で想定される沈み込んだあとの地震ではない。
- 断層が100km程度と長い。紀伊半島南東沖のプレートの走向は比較的直線的であるのに対し、敷地周辺はプレート等深線が湾曲しており、このように長い断層面は想定しがたい。

地域区分(領域)間の比較(地震本部(2009))

Comparison between Regions (The Headquarters for Earthquake Research Promotion(2009))

M7を超える歴史地震は、敷地が属する領域3とは異なる領域(地域区分)で発生している。以下では、地域区分(領域)間での比較を行う。

地震本部(2009)による地域区分は、長期評価で設定された領域を参考に設定されている。そして長期評価の領域は、「地震タイプの違いや、地震活動の違いを考慮して、評価対象領域を区分」されたものである。



太平洋プレート

Zhao (2009)

○スラブの厚さはスラブの年代によると考えられ、東北日本の太平洋プレートの厚さは、90~100kmとイメージされる。

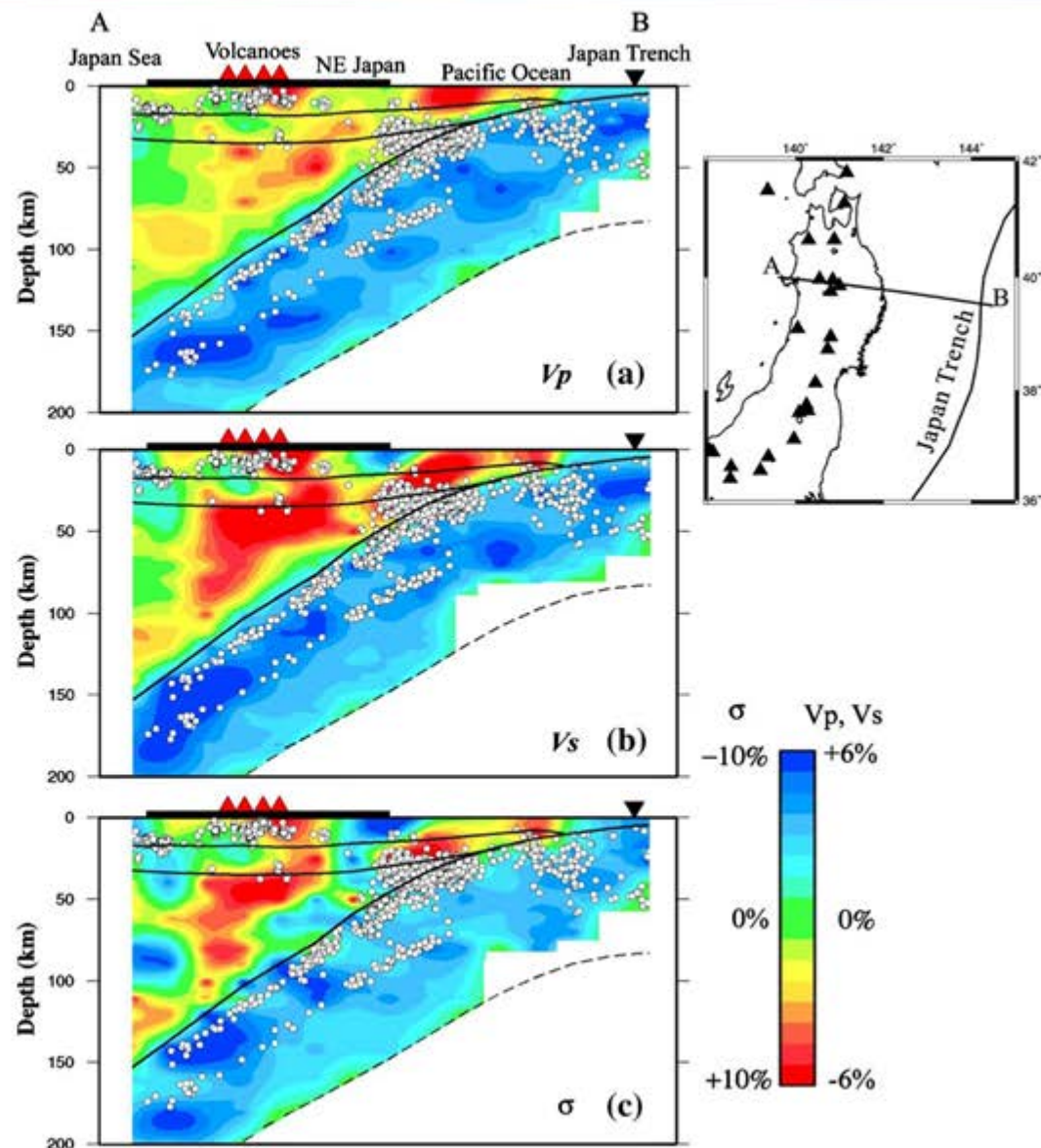


Fig. 12. Vertical cross sections of (a) P-wave velocity, (b) S-wave velocity, and (c) Poisson's ratio perturbations along a profile as shown on the insert map (Zhao et al., 2007a). Red denotes low velocity and high Poisson's ratio, while blue denotes high velocity and low Poisson's ratio. The color scale is shown on the right. Red triangles denote active arc volcanoes. The reverse triangles show the location of the Japan trench. Small white dots show earthquakes which occurred within a 15-km width along the profile. The three curved lines show the Conrad and Moho discontinuities and the upper boundary of the subducting Pacific slab. The dashed lines denote the estimated low boundary of the Pacific slab. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

フィリピン海プレート

Zhao et al. (2002)

○沈み込むフィリピン海スラブの厚さは、30~35kmと明瞭にイメージングされる。

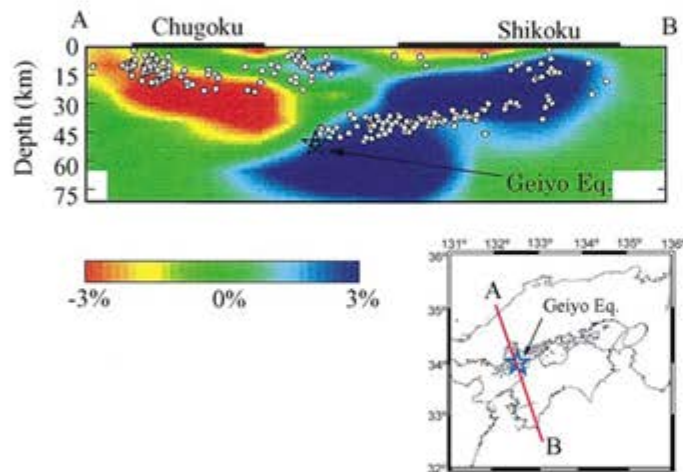


Fig. 12. Vertical cross-section of P-wave tomography along line AB in the insert map. Blue and red colors denote fast and slow velocities, respectively. The velocity perturbation scale is shown at the bottom. The star symbol shows the hypocenter of the 2001 Geiyo earthquake ($M = 6.8$). While circles denote microearthquakes that occurred from January 1985 to December 1993 within a 20 km width along the profile.

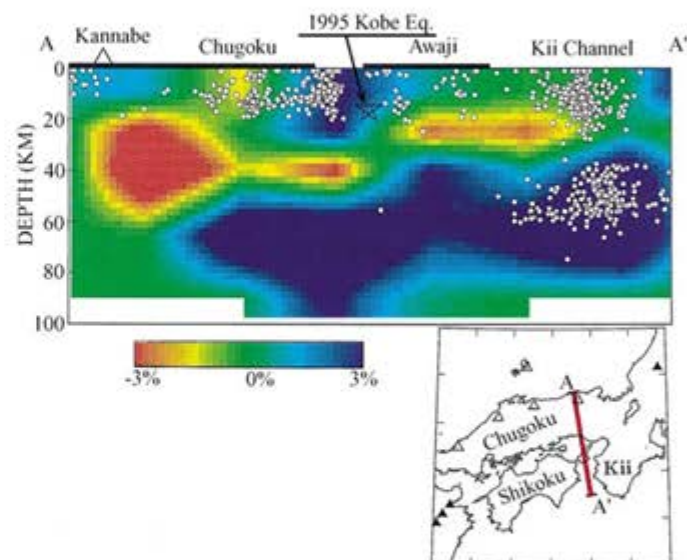


Fig. 10. Vertical cross-section of P-wave velocity structure down to a depth of 100 km along the line AA' in the insert map. Blue and red colors denote fast and slow velocities, respectively. The velocity perturbation scale is shown at the bottom. The star symbol shows the hypocenter of the 1995 Kobe mainshock ($M = 7.2$). White dots show the microearthquakes within a 20 km width from the line AA', which occurred during 1985–1993. The thick lines on the top show the land areas, the Chugoku District and Awaji Island. The open triangle denotes the Kannabe Quaternary volcano in Chugoku.

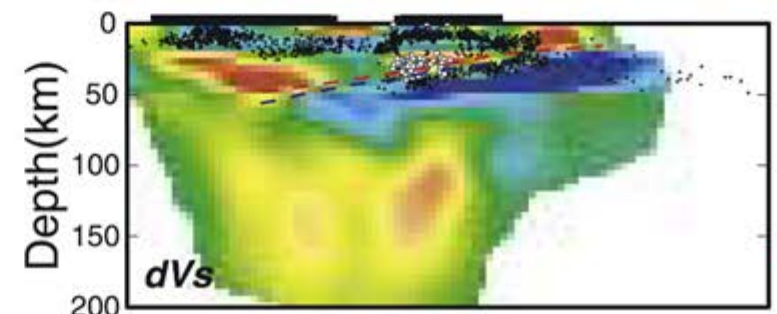
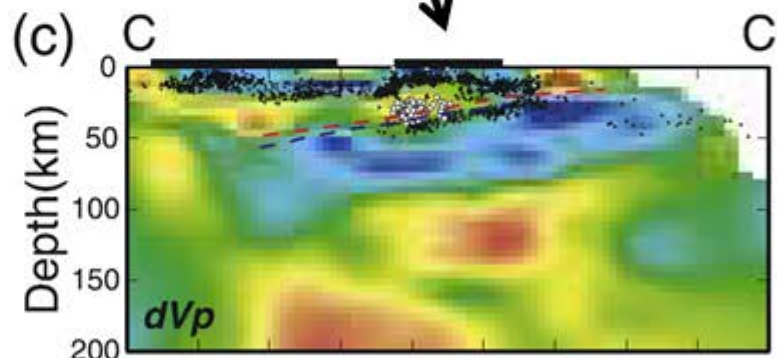
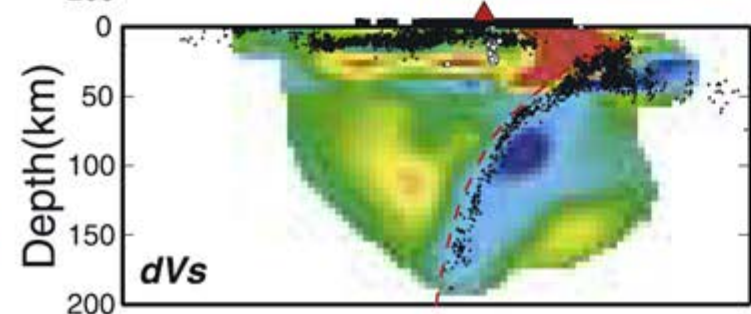
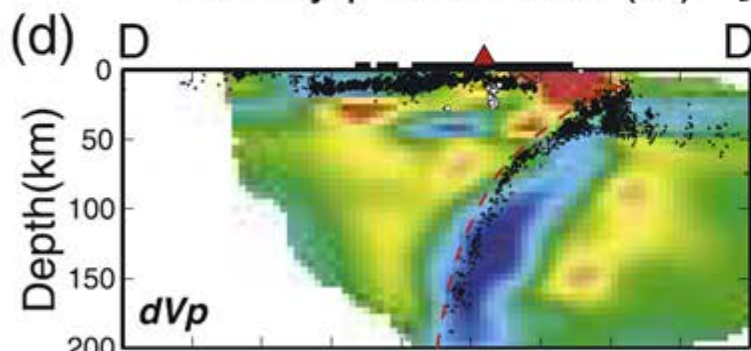
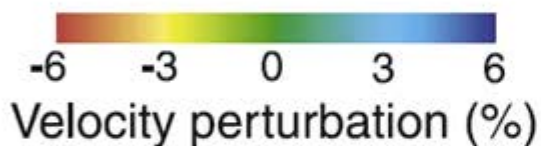
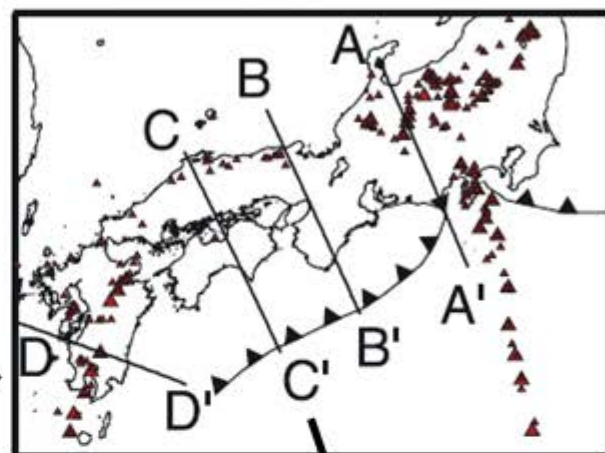
プレートの厚さに関する知見③

Knowledge of plate thickness ③

フィリピン海プレート(九州)

Nakajima and Hasegawa (2007)

九州の沈み込んだスラブは四国のスラブに比べて厚さが厚く(50km程度)にイメージングされている。



二重地震面の成因に関する知見

Knowledge of origin of double seismic zones

Seno and Yamanaka (1996)

- アウターライズで逆断層と正断層のペアがある沈み込み帯には、スラブ内にも二重面がある。
- それらは、海洋プレートの深部がホットスポット活動によって放出された水によって蛇紋岩化している場合に起こる。

Peacock (2001)

- アウターライズにおける正断層を通して二重面の下面の位置にまで水が注入されることが蛇紋岩化の原因

Kirby (1995)

- ホットスポット活動に伴うマグマに含まれる CO_2 が海洋プレート中へトラップされることとその揮発化が二重面下面の地震のメカニズム

菅ノ又・他(2006)

- プレート内へ貫入したプリュームにより、海洋性地殻内には含水鉱物が、スラブマントル内には CO_2 を含む鉱物が不均一に分布する。プレートの沈み込みに伴う含水鉱物の脱水反応によりスラブ地殻内で二重深発地震面上面の地震活動が、鉱物からの脱 CO_2 によりスラブマントル内において下面の地震活動や上面・下面の間の地震活動が引き起こされ、二重深発地震面の活動の空間的不均一性や上面・下面の空間的な相関性の原因となる。

スラブ内地震のスケーリング則に関する知見①

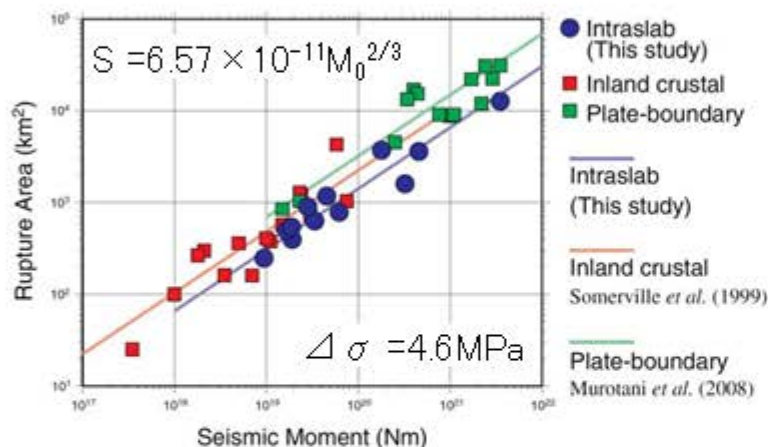
Knowledge of scaling relationship for intraslab earthquakes ①

Iwata and Asano(2011)

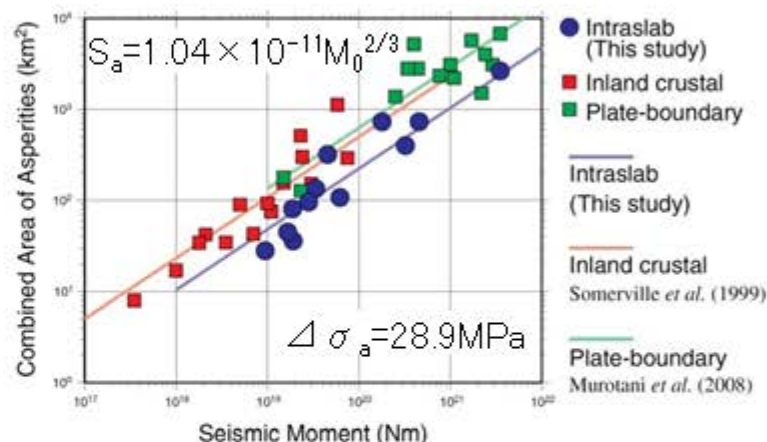
○スラブ内地震の破壊領域, 総アスペリティ面積, 平均すべり量は, 内陸地震よりも小さい。

図は, 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト ①首都圏でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等 平成20年度 成果報告書 より引用した。

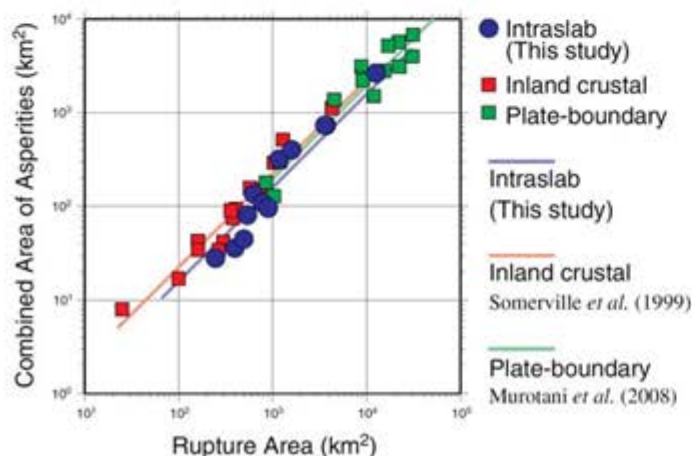
Rupture Area vs Seismic Moment



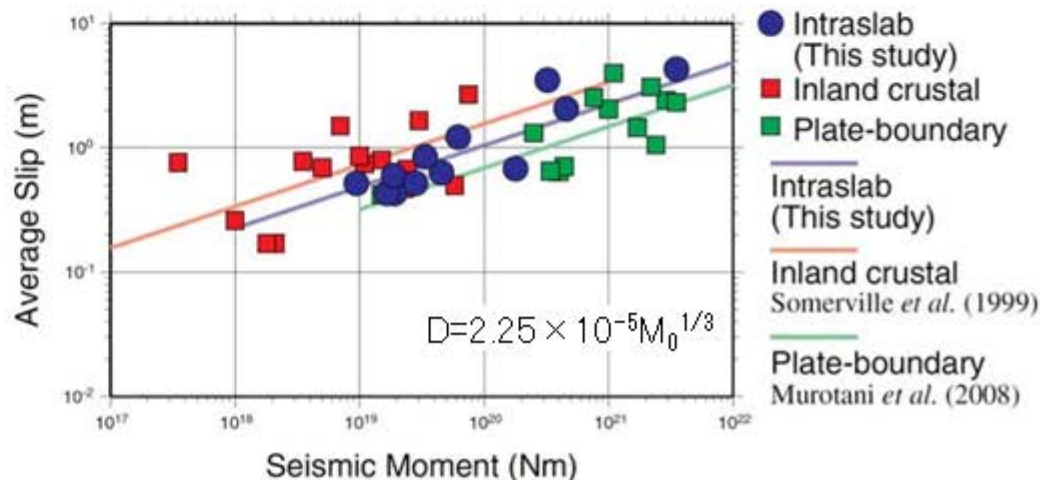
Combined Area of Asperities vs Seismic Moment



Combined Area of Asperities vs Rupture Area



Average Slip vs Seismic Moment



スラブ内地震のスケーリング則に関する知見②

Knowledge of scaling relationship for intraslab earthquakes ②

Iwata and Asano(2011)

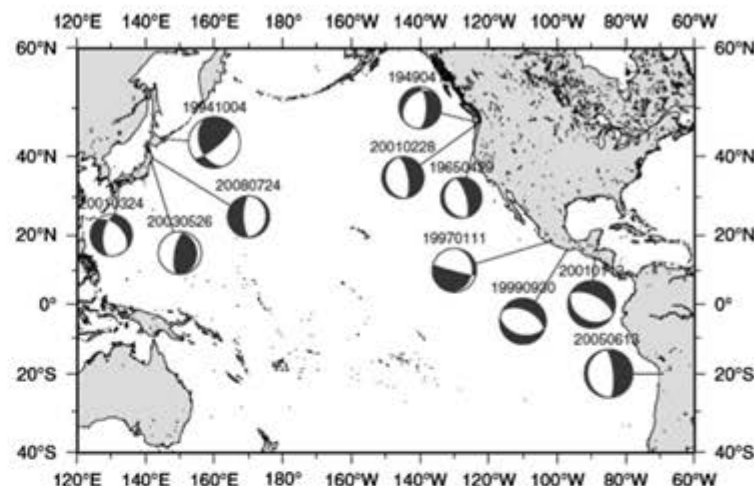


Figure 1
Map of intraslab events analyzed in this paper

Table 1

Source parameters characterized from heterogeneous source slip models of intraslab earthquakes

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	Kakehi (2005)
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> (2009)

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.

- ASANO, K., T. IWATA, and K. JIRIKURA, 2004, CHARACTERIZATION OF SOURCE MODELS OF SHALLOW INTRASLAB EARTHQUAKES USING STRONG MOTION DATA, 13th World Conference on Earthquake Engineering, No.835.
- 原子力安全基盤機構, 2005, 平成17年度原子力安全基盤調査研究 気象庁地震記録に基づくスラブ内地震の震源過程に関する研究(概要).
- Iwata, T. and K. Asano, 2011, Characterization of the Heterogeneous Source Model of Intraslab Earthquakes Toward Strong Ground Motion Prediction, *Pure Appl. Geophys.*, 168, 117-124.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2009, 全国地震動予測地図
- Takehi, Y., 2004, 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.*, 109, B08306.
- 神田克久・武村雅之・高橋利昌・浅野彰洋・大内泰志・川崎真治・宇佐美龍夫, 2008, 豊後水道近傍で発生した歴史的被害地震の地震規模, *地震*, 60, 225-242.
- 神田克久・武村雅之, 2011, 南海トラフ沿いの沈み込むスラブ内で発生した歴史地震の震度による地震規模推定, *歴史地震*, 28, 35-48.
- Kirby, S.H., 1995, Intraslab earthquakes and phase changes in subducting lithosphere, *Rev. Geophys.*, 33(S1), 287- 297.
- Kita, S., T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 2006, Existence of a seismic belt in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depths of 70-100 km beneath NE Japan, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL.33, L24310.
- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima and T. Matsuzawa, 2010, Existence of interplane earthquakes and neutral stress boundary between the upper and lower planes of the double seismic zone beneath Tohoku and Hokkaido, northeastern Japan, *Tectonophysics*, 496, 68-82.
- 松崎伸一・大野裕記・池田倫治・福島美光, 2003, 震源分布からみた伊予灘周辺フィリピン海プレートの形状および地震特性, *地震*, 56, 267-279.
- 松浦律子・中村操・茅野一郎・唐鎌郁夫, 2003, 震度分布にもとづく江戸時代の4地震の震源域と規模の再検討(概報) - 1662年日向灘・1769年日向・豊後・1847年善光寺地震・1861年宮城の4地震について - *歴史地震*, 19, 53-59.
- Miyoshi, T., T. Saito and K. Shiomi, 2012, Waveguide effects within the Philippine Sea slab beneath southwest Japan inferred from guided SP converted waves, *Geophys. J. Int.*, 189, 1075-1084.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2007, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL.112, B08306.
- Okada, T., and A. Hasegawa (2003), The M7.1 May 26, 2003 off-shore Miyagi prefecture earthquake in northeast Japan: Source process and aftershock distribution of an intra-slab event, NE Japan, *Earth Planets Space*, 55, 731-739.
- Peacock, S.M., 2001, Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducting oceanic mantle?, *Geology*, 29, 293-302.
- 迫田浩司・岡田知己・菅ノ又淳一・長谷川昭, 2004, 2003年5月26日宮城県沖地震(M7.1)と二重深発地震面上面の地震活動 - スラブ内大地震震源域における地震活動の特徴抽出 -, *地震*, 57, 187-198.

- Seno, T. and Y. Yamanaka, 1996, Double Seismic Zones, Compressional Deep Trench-Outer Rise Events, and Superplumes, Subduction Top to Bottom, edited by G. E. Bebout, D. W. Scholl, S. H. Kirby, and J. P. Platt Geophys. Monogr., 347-356.
- 瀬野徹三, 2001, 続 プレートテクトニクス の基礎, 朝倉書店
- 瀬野徹三, 2004, 紀伊半島南東沖地震の地学的意味, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/seno/off.kii.pen.html>
- Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito and K. Obara, 2008, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, Geophys. J. Int., 173, 1018-1029.
- Shiono, K., 1977, FOCAL MECHANISMS OF MAJOR EARTHQUAKES IN SOUTHWEST JAPAN AND THEIR TECTONIC SIGNIFICANCE, J. Phys. Earth, 25, 1-26.
- 菅ノ又淳一, 2004, スラブ内地震の発生機構に関する研究, 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻修士論文.
- 菅ノ又淳一・岡田知己・長谷川昭・迫田浩司・S.H. Kirby, 2006, Double-Difference Location法による東北日本弧下の稍深発地震の震源再決定, 地震2, 59, 1-18.
- 高橋利昌・浅野彰洋・大内泰志・川崎真治・神田克久・武村雅之・宇佐美龍夫, 2008, 17世紀以降に芸予地域で発生した被害地震の地震規模, 地震2, 60, 193-217.
- 武村雅之・神田克久・阿比留哲生・原弘明, 2009, 20世紀初頭に九州・南西諸島のサブダクション帯で発生した2つの地震の震度分布と地震規模, 歴史地震, 24, 7-31.
- 宇佐美龍夫, 2003, 最新版 日本地震被害総覧416-2001, 東京大学出版会
- Wang, K., I. Wada and Y. Ishikawa, 2004, Stresses in the subducting slab beneath southwest Japan and relation with plate geometry, tectonic forces, slab dehydration, and damaging earthquakes, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.109, B08304.
- Xu, J. and Y. Kono, 2002, Geometry of slab, intraslab stress field and its tectonic implication in the Nankai trough, Japan, Earth Planets Space, 54, 733-742.
- 八木真治, 2004, 2004年9月5日紀伊半島南東沖で発生した地震について, http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Japan20040905/Japan20040905_1-jhtml
- Zhao, D., O.P. Mishra and R. Sanda, 2002, Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 132, 249-267.
- Zhao, D., 2009, Multiscale seismic tomography and mantle dynamics, Gondwana Research, 15, 297-323.