

【参考資料】

茨城県原子力安全対策委員会
東海第二発電所
安全性検討ワーキングチーム(第3回)
ご説明資料
(津波の評価及び耐津波設計)

平成28年2月29日
日本原子力発電株式会社

目次

A-2 新規制基準等を踏まえた基準津波の設定	3
4. 地震に起因する津波の評価	3
4.1 プレート間地震に起因する津波	3
4.2 海洋プレート内地震に起因する津波	27
5. 地震以外に起因する津波の評価	29
5.1 陸上及び海底での地すべり並びに斜面崩壊に起因する津波	29
参考文献	37

(2) 想定津波の設定に反映する知見の分析(まとめ)

日本海溝沿いの領域に対して、検討波源モデルの設定及び波源特性の不確かさの考慮の検討の基礎とするため、文献調査を実施した。その結果、以下の結論が得られた。

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴 (破壊領域)

- ・ 複数の領域が連動して破壊した。
- ・ 余震を含む破壊領域の南限は、北米プレートとフィリピン海プレートの境界に位置している。

2011年東北地方太平洋沖地震に関連する知見

- ・ 固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。
- ・ 北米プレートとフィリピン海プレートの境界が余震を含む破壊伝播のバリアとして作用している。

(すべり)

- ・ すべりには不均質性が認められ、大きなすべりが生じた領域は三陸沖中部の南部、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖の4領域及びその沖合の海溝軸付近の領域である。

(地震の発生メカニズム)

- ・ 地震の前後でプレート境界上盤側で発生する地震のメカニズムは大きく変化した。

- ・ 大きなすべりが生じた領域は、固着の程度が大きい領域に対応している。

- ・ 地震前後で、応力状態が圧縮状態から引張状態へ変化したことから、三陸沖中部～福島県沖に蓄積されていた巨大地震を引き起こす歪みはほぼ完全に解消された。

- ・ 津波堆積物調査結果等から、過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。



想定津波の設定方針

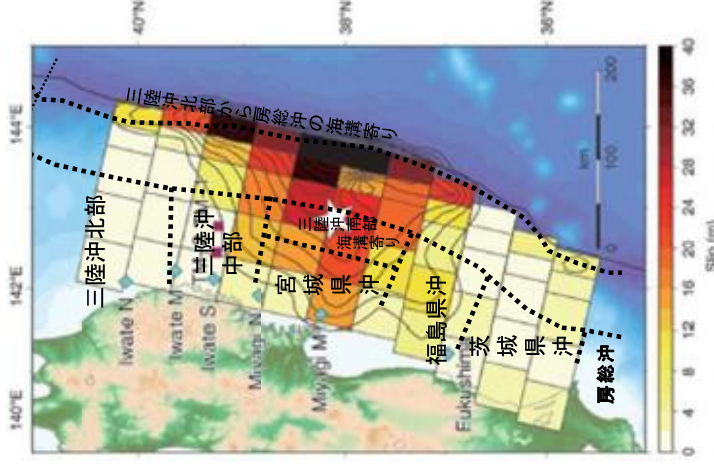
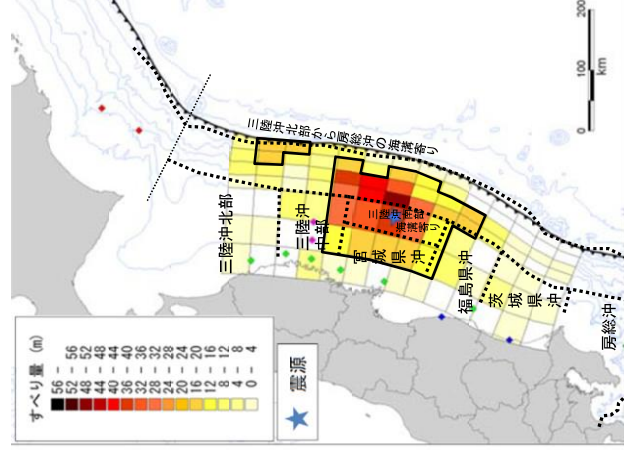
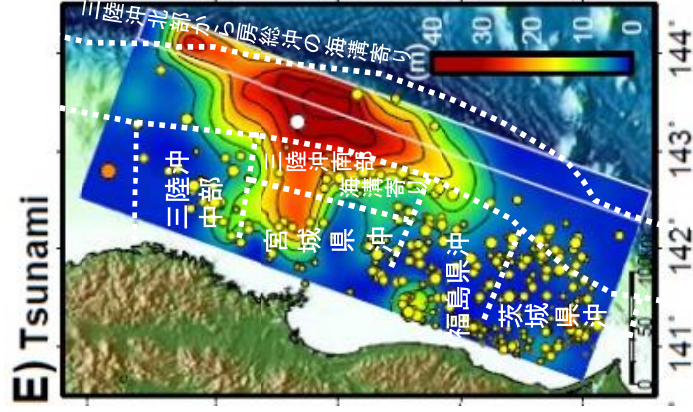
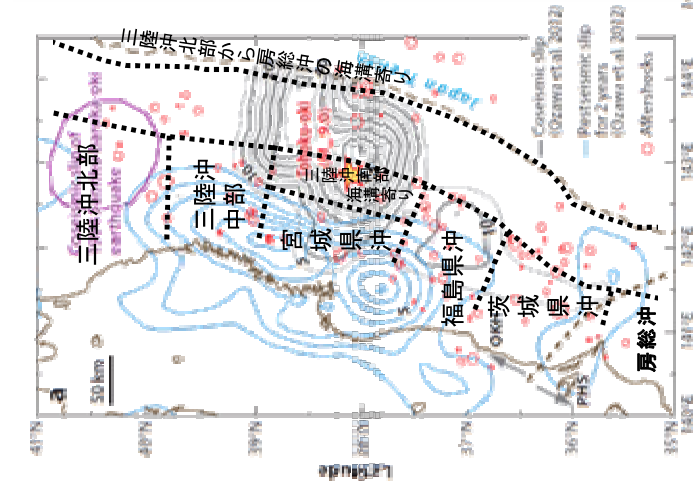
- I. 東北地方太平洋沖型の津波波源で大きなすべりが生じる領域は、三陸沖中部から福島県沖及びその沖合の海溝軸付近の領域とする。
- II. 茨城県沖に想定する津波波源の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。
- III. 2011年東北地方太平洋沖地震で応力を解放した領域では、東北地方太平洋沖型の地震津波の発生確率は極めて小さい。

2011年東北地方太平洋沖地震の知見(破壊領域とすべり)

他機関の検討※(Ozawa et al. (2012), Koketsu et al. (2011), 内閣府 (2012) 及びSatake et al. (2013))に基づけば、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊領域とすべりには以下の傾向が見られる。

「複数の領域が連動して破壊した。」

「すべりには不均質性が認められ、大きなすべりが生じた領域は三陸沖中部の一部、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖の一部の4領域及びその沖合の海溝軸付近である。」



陸上・海上のGPS及び水圧計データに基づく2011年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布(黒線)
(Ozawa et al. (2012)に加筆)

津波インバージョン解析
(Koketsu et al. (2011)に加筆)

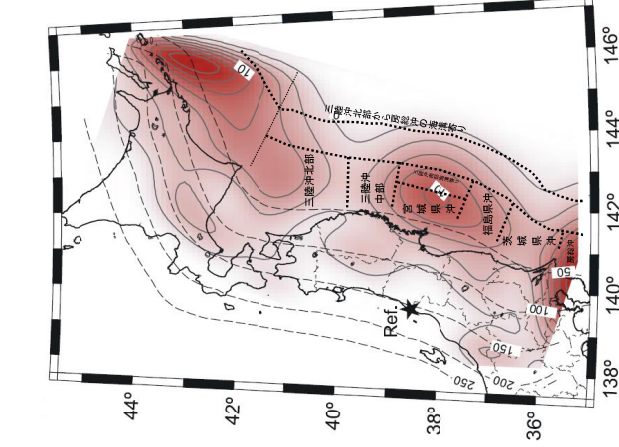
津波インバージョン解析
(内閣府(2012)に加筆)

津波インバージョン解析
(Satake et al.(2013)に加筆)

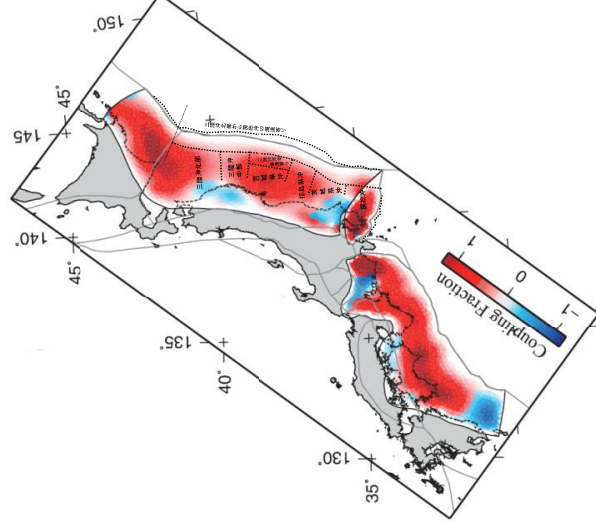
2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度とすべり)

他機関の検討 (Suwa et al. (2006), Loveless and Meade (2010, 2011)) に基づけば、固着の程度とすべりについて以下の傾向が見られる。
 「大きなすべりが生じた領域は、固着の程度が大きい領域に対応している。」

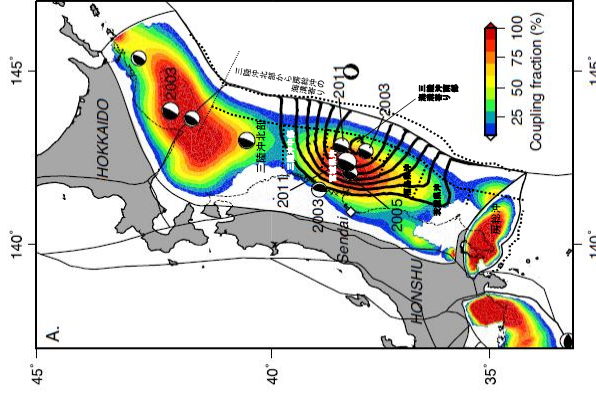
- Suwa et al. (2006), Loveless and Meade (2010, 2011) は、宮城県沖に固着が強い領域が認められるとしている。



1997～2001年のGPSデータに基づくすべり欠損速度
 (Suwa et al. (2006)に加筆)



1997～2000年のGPSデータに基づくプレート間カップリング率
 (Loveless and Meade (2010)に加筆)



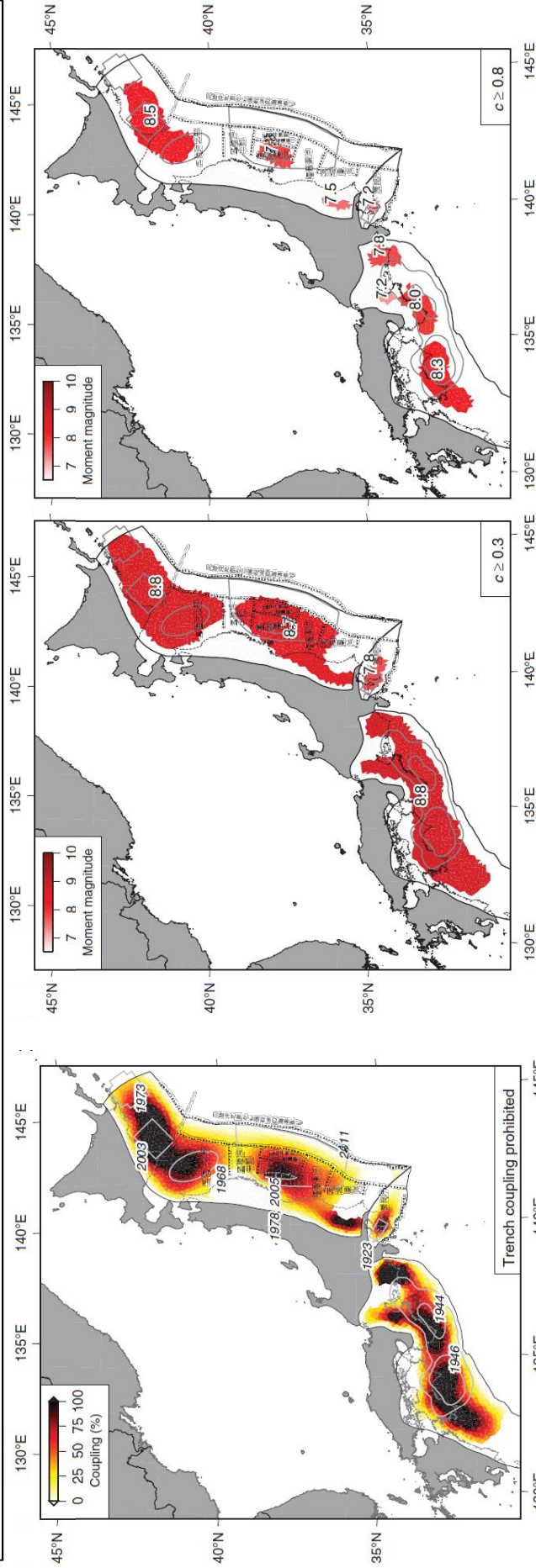
カラーコンター: 1996-2000年GEONETデータに基づくカップリング率
 黒線: 地震時すべり量(2.5m間隔)
 震源球: 1994年から本震までに発生したMw7.0以上、深さ100km未満の地震のメカニズム
 (Loveless and Meade (2011)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度と破壊伝播)

Loveless and Meade(2015)は、固着の程度と破壊伝播について、以下の見解を示している。

「本震については固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 日本海溝では、カップリング率0.3以上の領域と、東北地方太平洋沖地震の破壊領域はよく対応している。一方、カップリング率0.8以上の領域は日本周辺における20世紀以降の地震(東北地方太平洋沖地震を除く)の破壊領域と対応している。
- カップリング率0.8以上の領域は比較的頻度の高い地震の破壊領域を規定し、カップリング率0.3以上の領域は稀で巨大な地震の破壊領域に対応している可能性がある。
- カップリング率の低い領域が、地震時の破壊伝播に対し運動学的バリアとして働くと考えれば、将来発生する地震のポテンシャルを領域ごとに特定できる。



1997～2000年のGPSデータに基づくプレート間カップリング率

プレート間カップリング率が0.3以上の領域

プレート間カップリング率が0.8以上の領域

いずれの図においても灰色の曲線は、各種文献に基づく過去の地震のすべり量コンターを表す。

- 1946年東南海地震 (Mw 8.3) 及び 1944年東南海地震 (Mw 8.1) : すべり量 1m 及び 3m のコンター
- 1929年関東地震 (Mw ~ 7.9) : モデル化された破壊領域
- 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) : すべり量 4m のコンター
- 1978年宮城沖 (Mw 7.6) : 余震域
- 2005年宮城沖 (Mw 7.0) : 震央位置
- 1968年十勝沖 (Mw 8.2) : 余震域
- 2003年十勝沖 (Mw 8.2) : モデル化された破壊領域
- 1973年根室沖 (Mw 8.0) : すべり量 1m のコンター

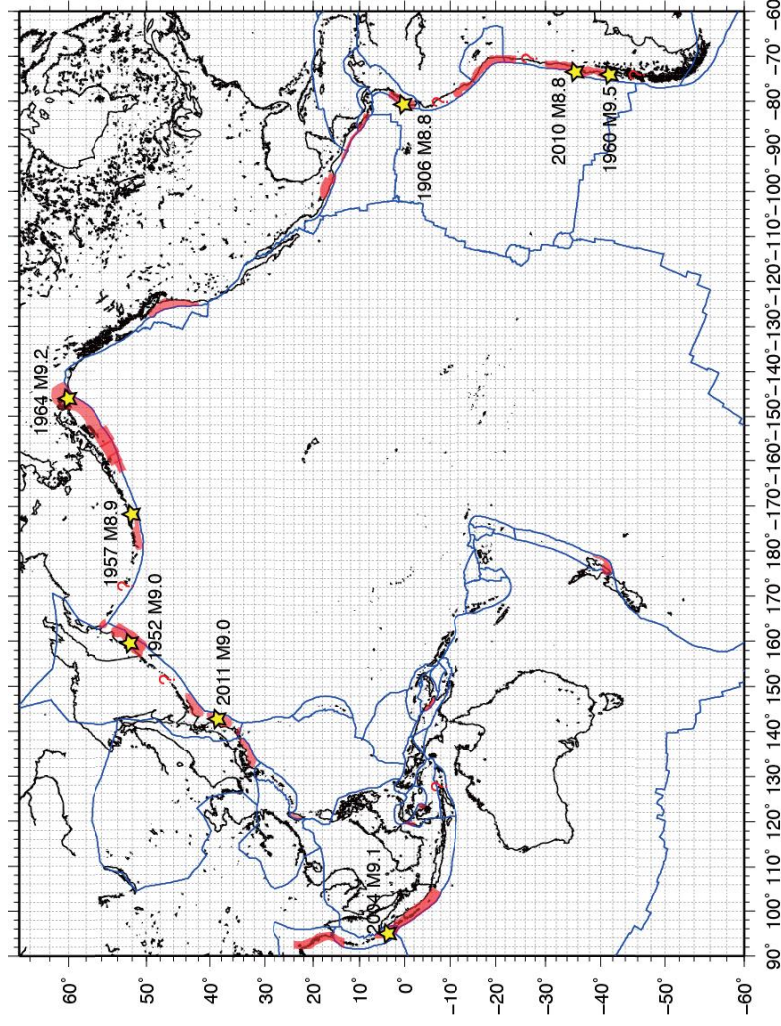
(Loveless and Meade (2015)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度とすべり)

西村(2013)は、固着の程度とすべりについて以下の見解を示している。

「大きなすべりが生じた領域は、固着の程度が大きい領域に対応している。」

- 固着が強いプレート境界と20世紀以降の巨大地震の発生域の関係を整理し、M9クラスの巨大地震は全てカップリング係数が中程度以上の特定の領域で発生しているとしている。



【カップリング係数が大きい(1に近い)地域】

- 北米カスケード、チリ、スマトラ、西南日本(南海トラフ)

【カップリング係数が中程度の地域】

- カムチャッカ、アリューシャン、アラスカ、メキシコ、中米、コロンビア、ペルー、東北日本(日本海溝、千島海溝)

【カップリング係数が小さい地域】

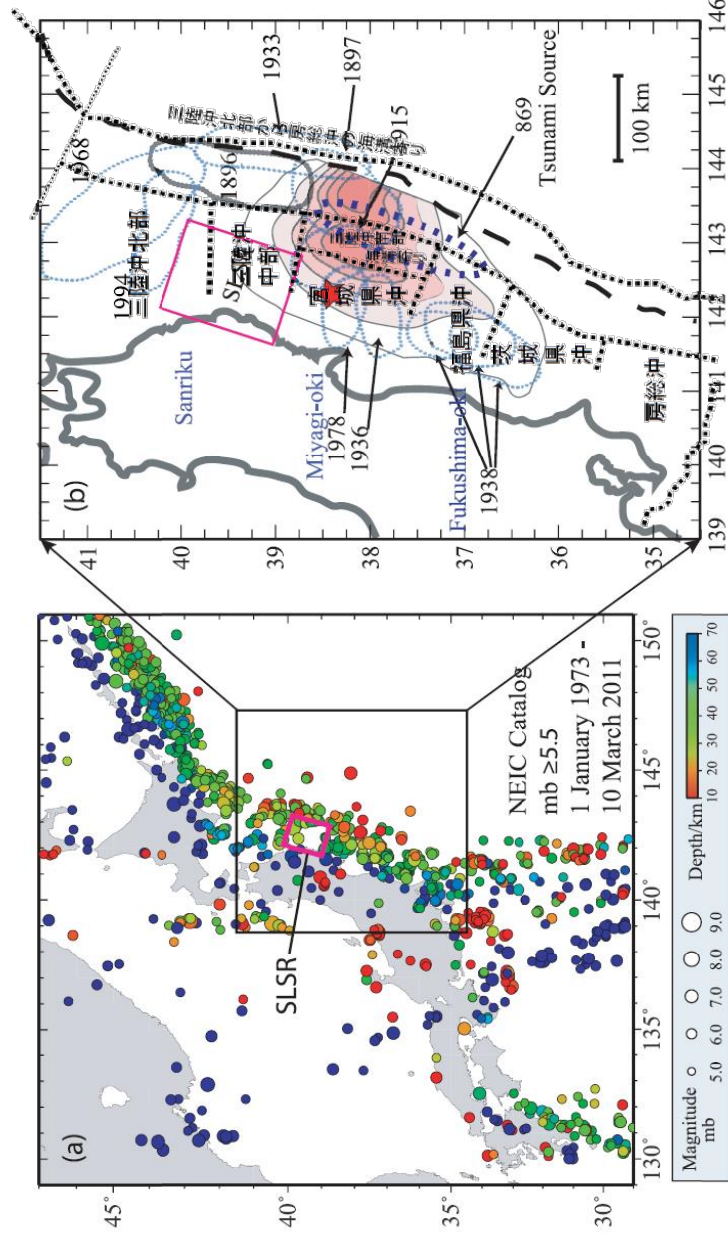
- ニュージージーランド、トンガ、伊豆・小笠原、マリアナ、琉球、フィリピン等

環太平洋とその周辺における測地データから推定されたプレート間カップリング分布
(西村(2013))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域)

地震調査研究推進本部(2012)及びYe et al.(2012)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。
「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 地震調査研究推進本部(2012)は、三陸沖中部については、(中略)カップリング率は他の領域に比べると低いと考えられるとしている。
- Ye et al.(2012)は、三陸沖中部のプレート境界深部のすべりにより歪みが解放される低地震活動領域(SLSR(Sanriku-Oki low-seismicity region))が存在し、2011年東北地方太平洋沖地震の大きなすべりの北限とSLSRが対応するとしている。



左: 米国立地震情報センター(NEIC)による1973年から2011年東北地方太平洋沖地震以前のM5.5以上の地震の震源分布

右: SLSRの位置(赤線)、主要既往地震の震源域(水色線)、1896年明治三陸沖地震の波源域(灰色線)、及び東北地方太平洋沖地震のすべり量分布のコンター

三陸沖中部における低地震活動領域(SLSR)と地震の分布の関係

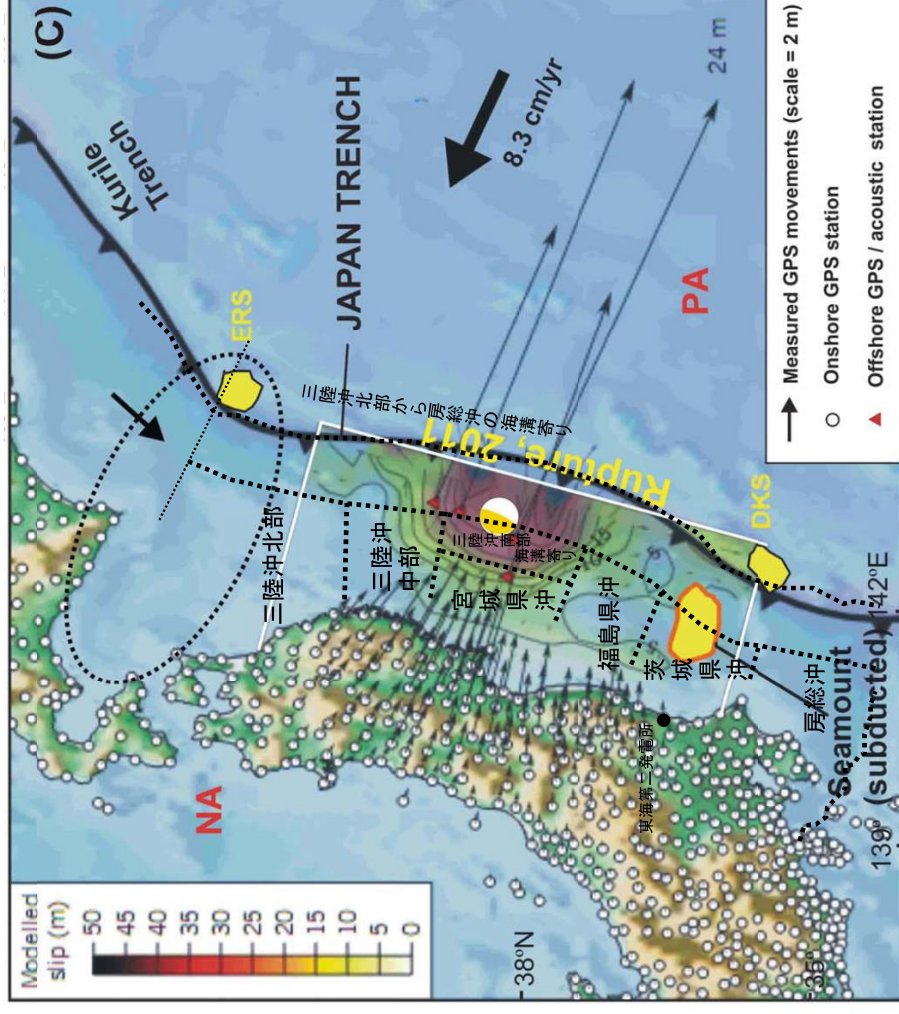
(Ye et al.(2012)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域)

Kundu et al.(2012)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。

「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の大ききなすべり領域(high slip patch)の南限では、沈み込む海山がプレート間のカップリングを弱め、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊のバリアとして作用したとしている。

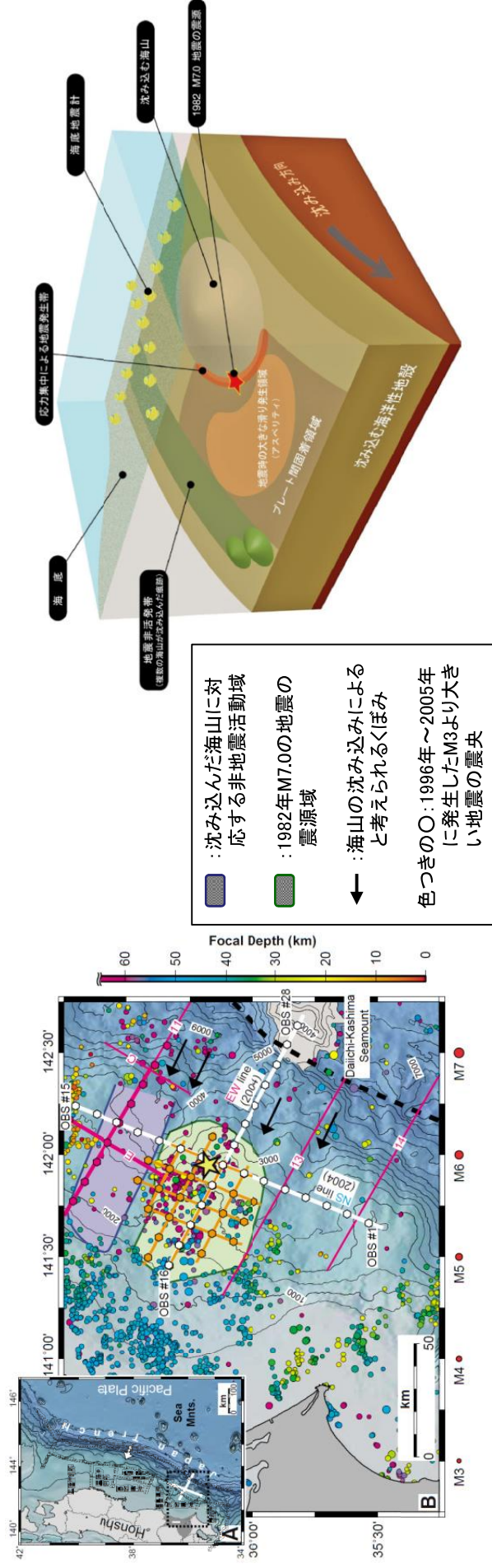


2011年東北地方太平洋沖地震の破壊領域(矩形), 陸上及び海域のGPSより推定したすべり量分布(コンター)及び海山の配置(黄色)
(Kundu et al.(2012)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域)

Mochizuki et al. (2008), 望月(2011)及び Nakatani et al.(2015)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。
「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- Mochizuki et al. (2008)及び望月(2011)は、以下の見解を示している。
 - ✓ 海山上のプレート境界はこれまで予測されていた性質とは異なり、固着強度が弱い。すなわち海山自身はアスペリティにはならない。
 - ✓ 茨城県沖北端付近の複数の海山が沈み込んだ領域ではプレート境界面上に海溝軸から堆積物から沈み込みが確認されており、このことがプレート境界における固着を弱くしている(したがって地震が発生しない)。この非発帯は海山の沈み込みによってプレート境界に接する下部地殻が削り取られ、そこに堆積物がたまっているために地震活動が非発帯になっている。過去に海山の通過した痕跡がアスペリティの境界になっている可能性がある。
 - ✓ 南側の沈み込む海山上のプレート境界では地震が発生しておらず、海山の麓周辺でM7程度の地震が集中的に発生している。この海山の沈み込みに伴って上盤側底部が破壊されることによって歪エネルギーを蓄えることができないうために地震活動が非発帯である可能性が考えられる。
- Nakatani et al.(2015)は、稠密海底地震計観測に基づき、北から伝播した東北地方太平洋沖地震本震の破壊は茨城沖海域を事前に停止したとしている。



複数の海山が沈み込んだ領域と地形及び地震活動の関係 (Mochizuki et al. (2008))に加筆)

周辺海域の構造の模式図 (望月(2011))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(破壊領域)

文部科学省測地学分科会(2013)は、破壊領域について以下の見解を示している。

「沈み込む海山及びプレート境界が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の余震については、大きなすべりの領域は震源から南東方向に約20kmの浅い領域に位置しており、この領域は沈み込むフィリピン海プレートの北東限と沈み込む海山に囲まれた場所に位置するため、この地震の破壊の伝播がフィリピン海プレートと海山によって止められたように見え、大地震の発生場所と規模(震源域の広がり)を海底地形やプレート構造などの地学的要因と関係する可能性があることが分かっている。

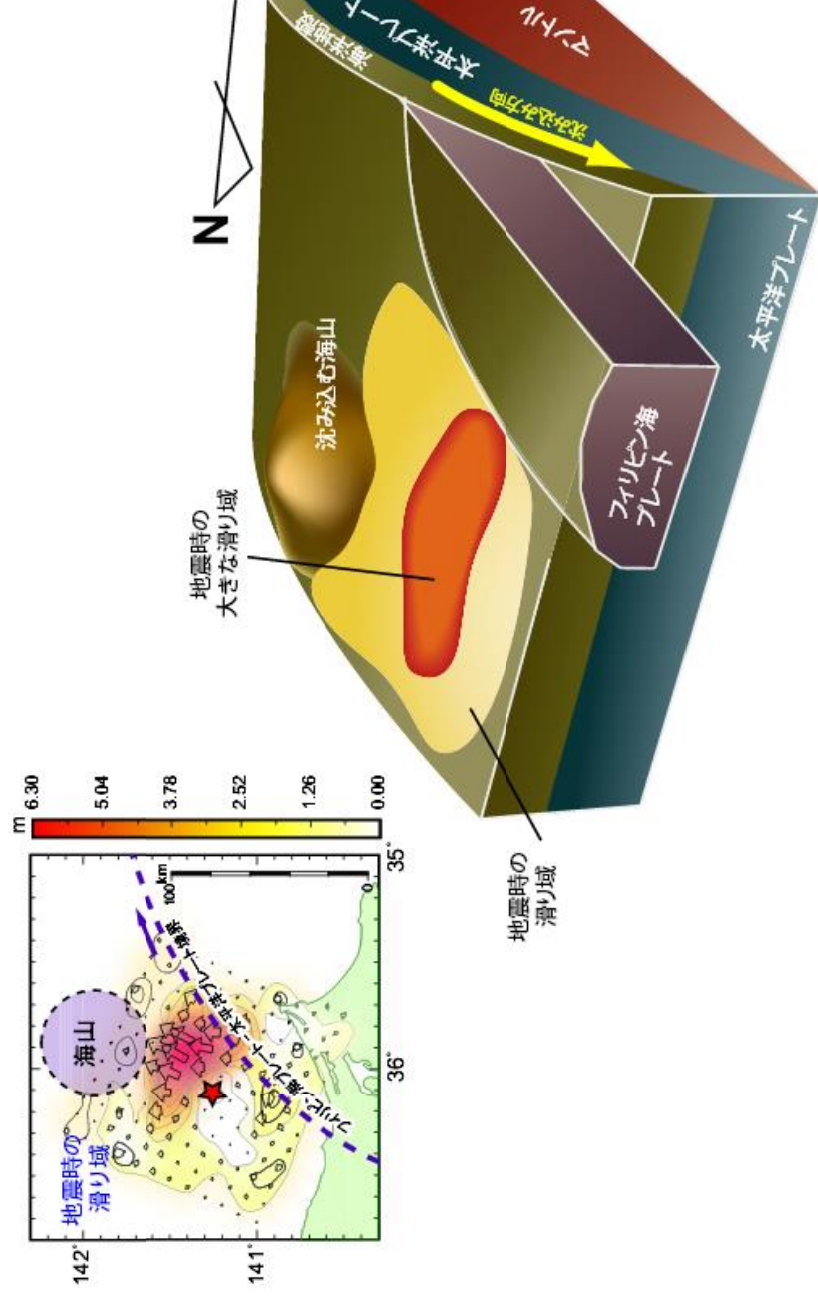


図12 (茨城県沖地震) 2011年茨城県沖の地震(M7.6)震源域の模式図。右上図は、近地強震波形とGSSデータ解析から求められた断層面上における滑り分布。大きな滑り域が太平洋プレート/フィリピン海プレート境界(青点線)と太平洋プレートとともに沈み込む海山(紫点線)に挟まれた位置にあり、これらの構造の境界が滑りを止めた可能性が考えられる。

(文部科学省測地学分科会(2013))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域)

Wang and Bilek (2014)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。

「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 機器観測された全ての巨大地震は、滑らかな地形が沈み込む海域で発生している。起伏の激しい地形を伴うプレート境界はクリープしており、超巨大地震を発生しない。
- 沈み込む海山は、起伏の激しい地形の典型例である。海山が沈み込む領域では中小規模の地震を伴うが、大地震を発生する証拠は得られていない。2011年東北地方太平洋沖地震の破壊の南側での停止は、フィリピン海プレートが下盤となる位置ではなく、海山が沈み込む領域で生じた。

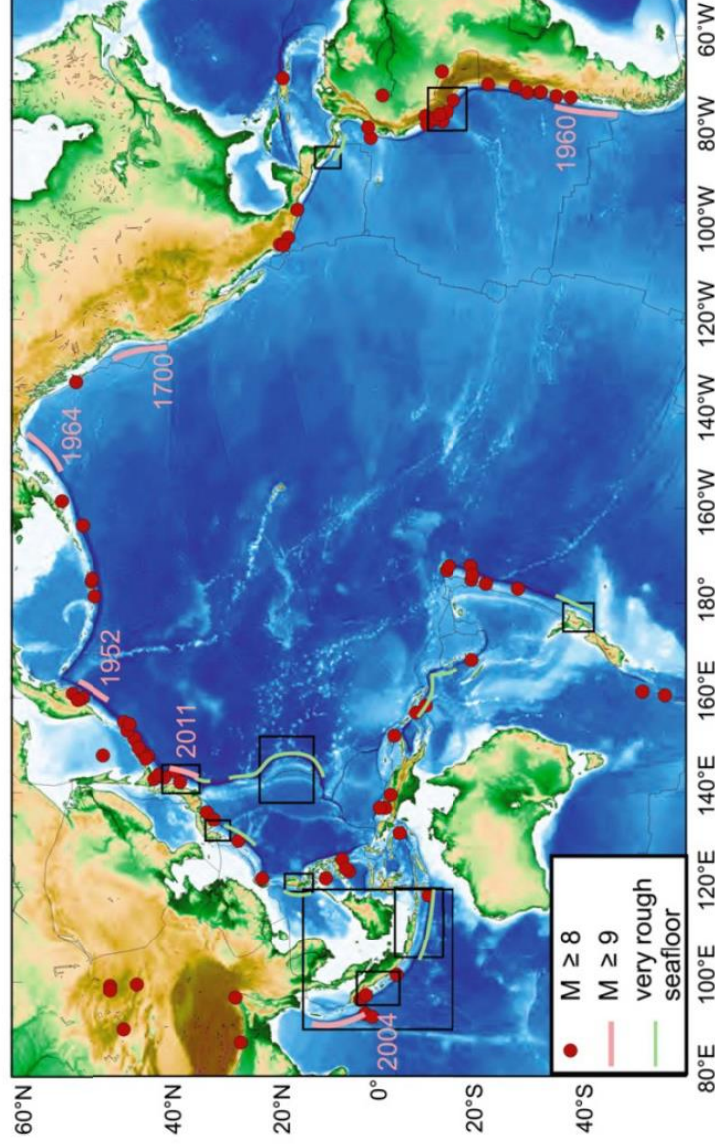


Fig. 1. World map showing general lack of correlation between rugged subducting seafloor and great megathrust earthquakes and showing locations of map areas of Fig. 2 through 10 and 14. Rupture extents of giant ($M_w \geq 9$) events are indicated with pink lines. Epicentre locations of other great ($M_w \geq 8$) events are from the USGS/NOAA catalogue for the time period of 1903–2012.

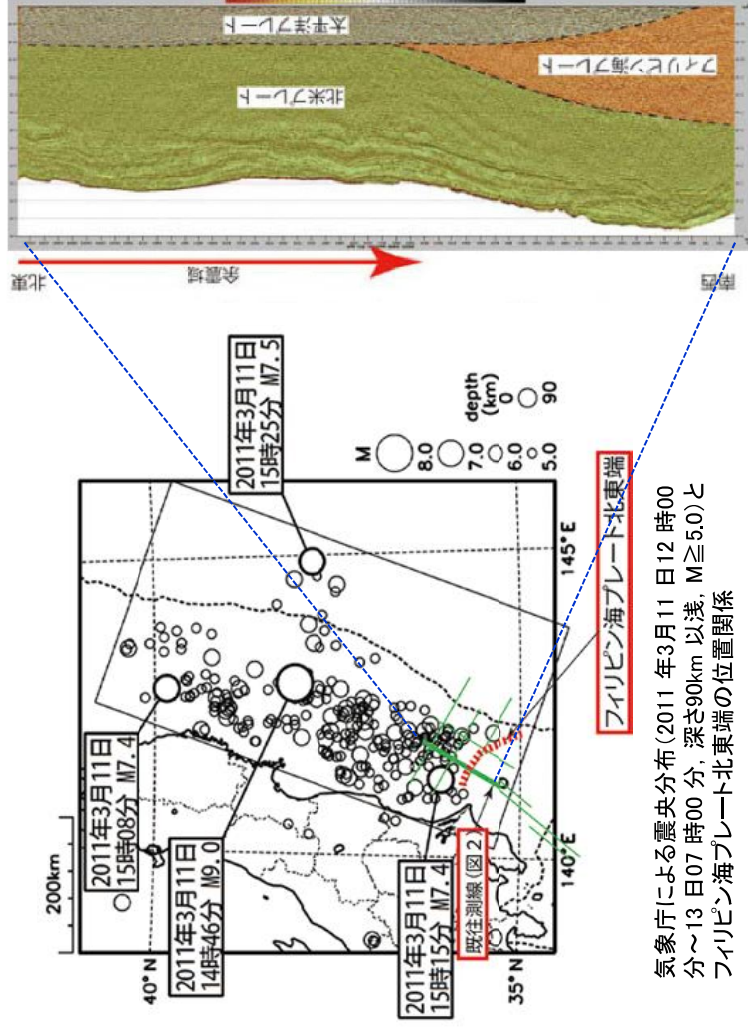
起伏の激しい海底と巨大地震の発生位置の分布

(Wang and Bilek (2014))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(破壊領域)

海洋研究開発機構(2012)及びShinohara et al.(2011)は、破壊領域について以下の見解を示している。
「プレート境界が破壊伝播のバリアとなっている。」

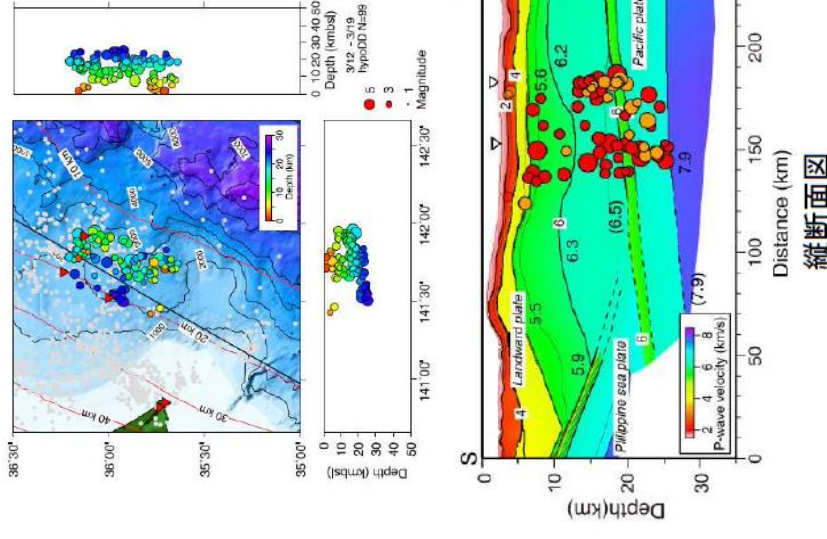
- 海洋研究開発機構(2012)は、2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布はフィリピン海プレート北東端をほぼ南限としており、沈み込む太平洋プレートの上にあるプレートが、北米プレートからフィリピン海プレートに変わる領域において、破壊の南への伝播が止められたとしている。
- Shinohara et al.(2011)は、2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布に関する分析から、フィリピン海プレート北東端の位置と破壊域が一致していることを明らかにするとともに、フィリピン海プレートは、破壊伝播のバリアとして作用する重要な役割を果たす可能性があるとしている。



気象庁による震央分布(2011年3月11日12時00分～13日07時00分、深さ90km以下、 $M \geq 5.0$)とフィリピン海プレート北東端の位置関係

反射法地震探査に基づく解釈図
房総沖では、銚子付近から南東方向に向って、フィリピン海プレート北東端が太平洋プレートと接している

(海洋研究開発機構(2012)に加筆)



2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布(3月12日-19日)とプレート境界面の位置関係
(Shinohara et al.(2011))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(地震のメカニズム)

Hasegawa et al.(2012)は、地震のメカニズムについて以下の見解を示している。

「地震前後で、プレート境界上盤側の応力状態が圧縮状態から引張状態へ変化したことから、三陸沖中部～福島沖に蓄積されていた歪みはほぼ完全に解消された。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の発生前後で、応力状態が変化していることにより、三陸沖中部～福島沖に蓄積されていた歪みはほぼ完全に解消されたと考えられるとしている。

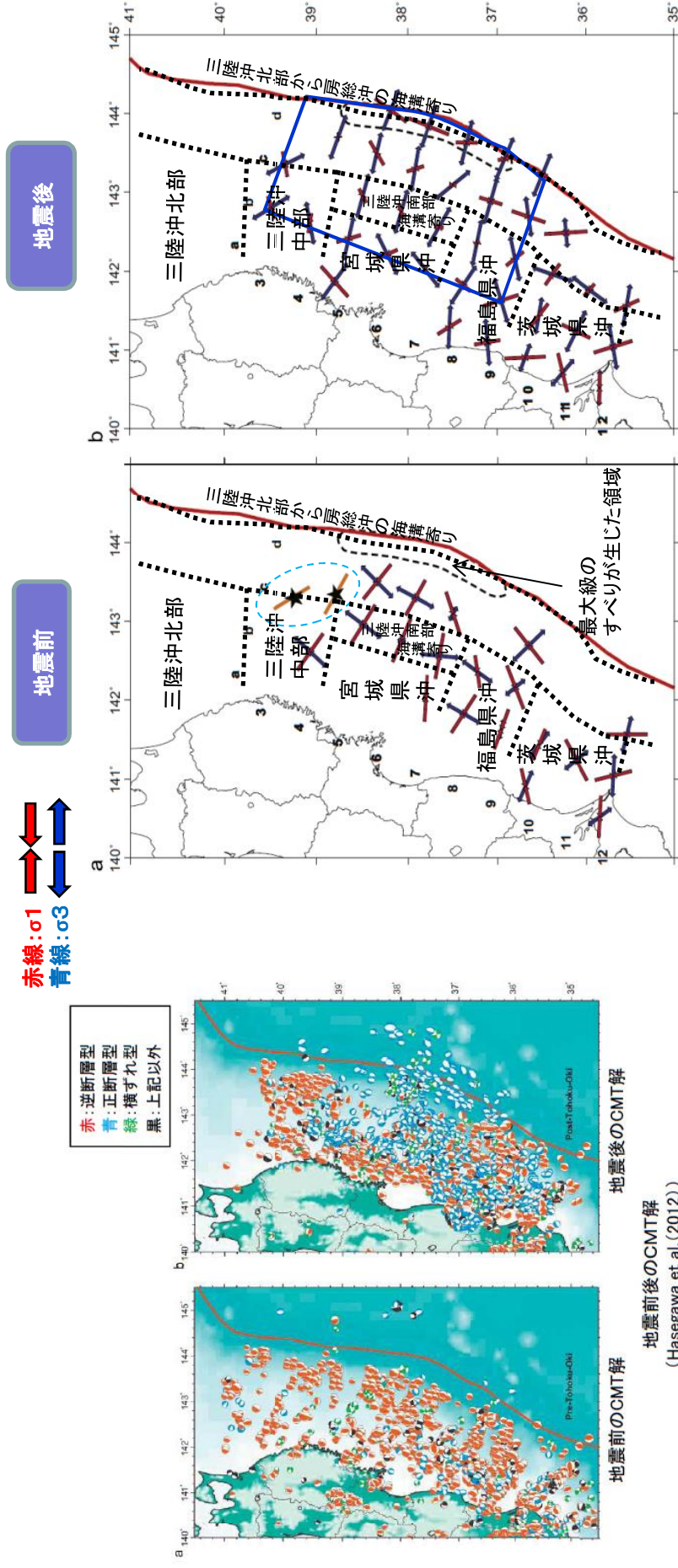


Fig. 6. Orientations of the best-fit σ_1 and σ_3 axes obtained by stress tensor inversions of upper plate events before (a) and after (b) the Tohoku-Oki earthquake. The σ_1 and σ_3 axes are indicated by red and blue arrows, respectively, at each grid node. The lengths of arrows correspond to the plunge of the principal stress axes. Orange bars with stars in (a) show the orientations of the maximum horizontal principal stresses axis estimated from borehole breakout at two sites on ODP Leg 186 (Lin et al., 2011). The area of the estimated largest slip is enclosed by a dashed line near the trench axis.

(Hasegawa et al. (2012)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(巨大地震の発生)

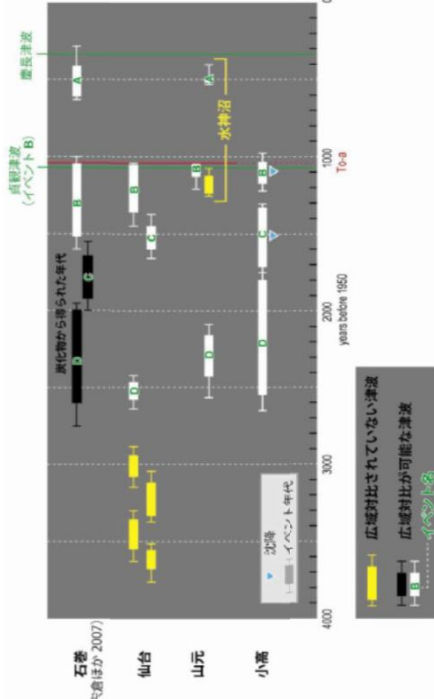
菅原他(2013)及び地震調査研究推進本部(2012)は、巨大地震の発生について以下の見解を示している。
「過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- 菅原他(2013)に基づけば、貞観869年の津波と2011年東北地方太平洋沖地震の仙台平野における浸水域や津波堆積物の到達限界は殆ど重なる。したがって、過去にも同じ海域で東北地方太平洋沖型の地震が発生していたと推測される。
- 地震調査研究推進本部(2012)は、東北地方太平洋沖型の地震の特徴のひとつである広い浸水をもたらず津波は、過去2500年間で5回発生していると確認され、これらの津波をもたらし続けた地震が繰り返し発生したとするとその発生間隔は400年～800年程度で平均発生間隔は600年程度であるとしている。

表2 三陸沖～房総沖で発生した主な地震のマグニチュード等

地震発生領域	地震発生日	地震の平均的発生頻度等 注1	地震規模		死者数 ^{注5}	
			M 注2	Mt, Mw 注4	死者	負傷者
東北地方太平洋沖型の地震	2011/ 3/11 14:46	平均発生間隔は600年程度	9.0	9.1, 9.0	16, 019 (行方不明)	6, 121
	15世紀 869/ 7/13 4-5世紀 紀元前3-4世紀		8.3	9.4 8.4 ^{注4}	3, 805	多数

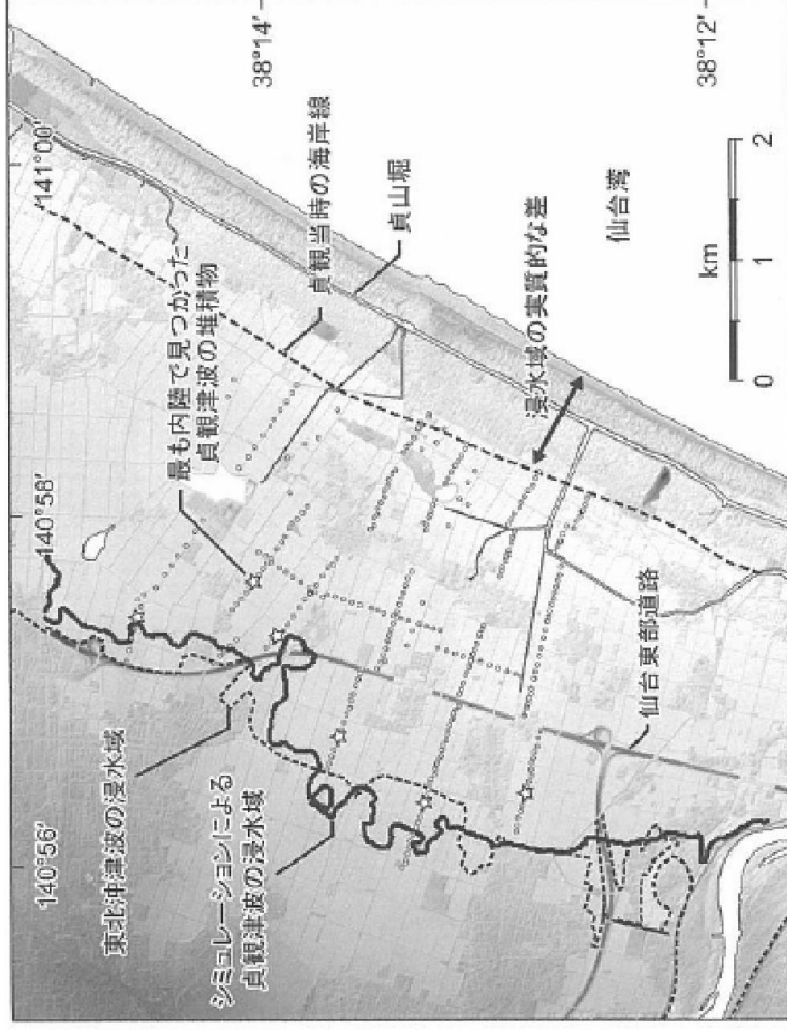
(地震調査研究推進本部(2012))



(A) 西暦1500年頃のイベント、(B) 869年の津波

(C) 西暦430年頃のイベント、(D) 紀元前390年頃のイベント

石巻市、仙台市、山元町、相馬市で見られた津波堆積物の地域間対比
(文部科学省 研究開発局他(2010)に加筆)



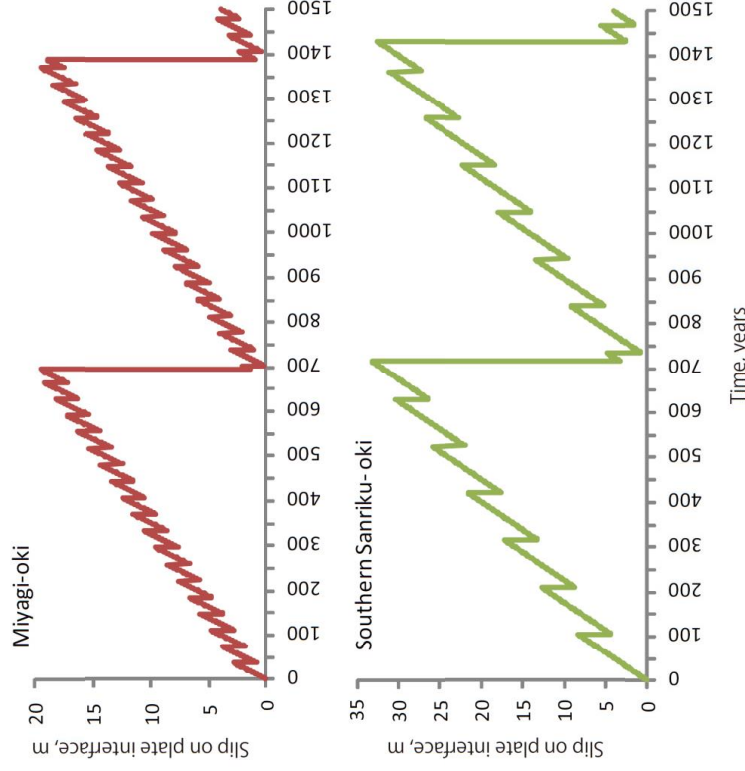
仙台平野における869年の津波と2011年東北地方太平洋沖地震津波の浸水域の比較
(菅原他(2013))

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(巨大地震の発生)

佐竹(2011)は、巨大地震の発生について以下の見解を示している。

「巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- ・ 頻度の高い中規模地震と数百年に一度の大規模地震の組合せで、プレートの沈み込みに伴う歪みの解放を説明できるモデルを提示しており、すべり残しが2011年型の地震ですべて解放されると仮定すると、そのサイクル(スーパーサイクル)は約700年となっている。



第3図 宮城沖(上)と三陸沖南部(下)における地震発生サイクルのモデル。第2図のすべり残しが2011年型の地震ですべて解放されると仮定すると、そのサイクル(スーパーサイクル)は約700年となる。横軸は時間(年)、縦軸はプレート境界におけるすべり(m)を示す。

第1表 日本海溝沿いの各領域における固有地震と2011年型地震のすべり量と発生間隔
Table 1. Size and recurrence intervals of characteristic and 2011-type earthquakes along Japan Trench

地震調査委員会の領域 Regions	固有地震の発生間隔 Characteristic interval, R (year)	固有地震のすべり量 Characteristic coseismic slip, d (m)	すべり残し Slip Deficit, S=8-d/R (cm/yr)	2011年のすべり量 2011 slip, D(m)	2011年型の発生間隔 Supercycle interval, D/S (year)
宮城沖 Miyagi-oki	37	2	2.6	17	660
三陸沖南部海溝寄り Southern Sanriku	105	4	4.2	30	720
津波地震 Tsunami earthquakes	530	6	6.9	45	660

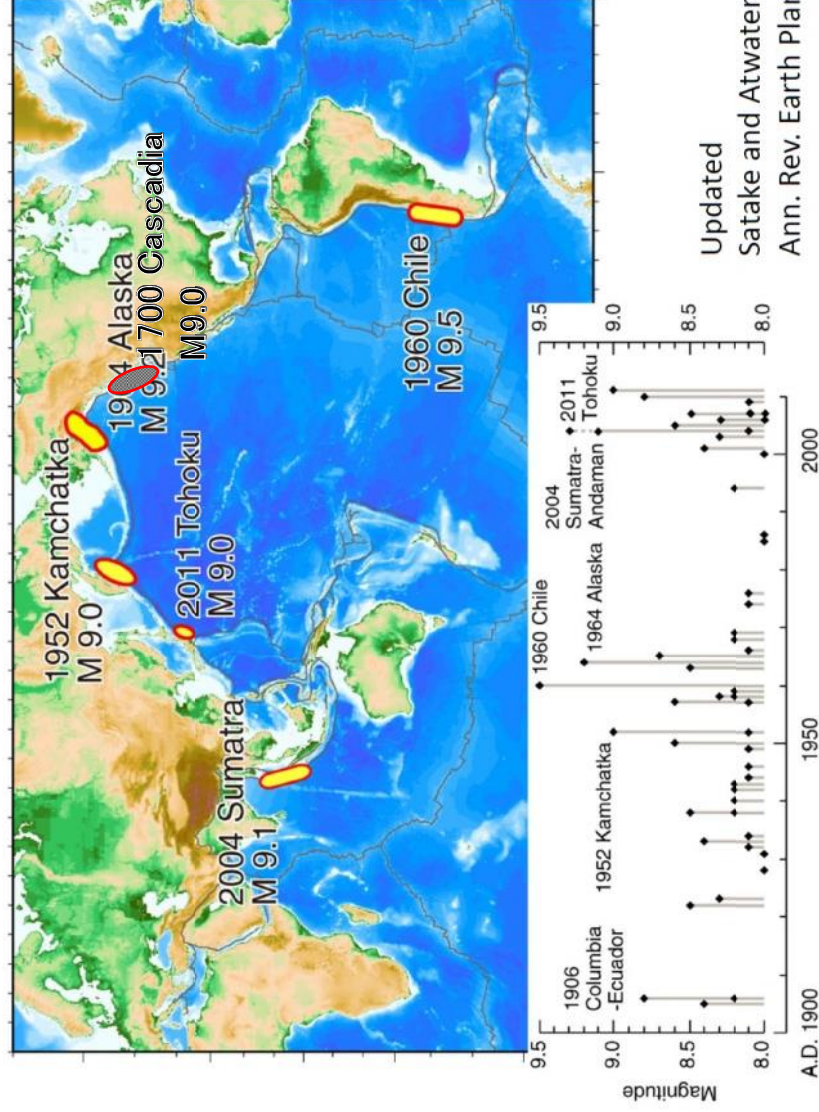
(佐竹(2011)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(巨大地震の発生)

他機関の文献※1～※6に基づけば、巨大地震の発生について以下の傾向が見られる。
「過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- プレート間で発生するM9クラスの巨大地震については、数百年間隔で繰返し発生している。

	日本海溝沿いの巨大地震 (2011年)	カスケード沈み込み帯の巨大地震 (1700年)	カムチャッカ沖の巨大地震 (1952年)	チリ沖の巨大地震 (1960年)	アラスカ沖の巨大地震 (1964年)	スマトラ沖の巨大地震 (2004年)
M9クラスの巨大地震の平均発生間隔	約600年 (※1)	平均約500年(全域の破壊) (※2)	平均100～400年 (※3)	平均約300年 (※4)	平均約600年 (※5)	平均400～500年 (※6)



※1. 地震調査研究推進本部(2012)
 ※2. 佐竹(2013)
 ※3. 谷岡(2013)
 ※4. 糸倉(2013)
 ※5. Shennan et al.(2007)
 ※6. Rajendran(2013)

Updated
 Satake and Atwater (2007,
 Ann. Rev. Earth Planet. Sci.)
 (Satake(2012)に加筆)

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見(巨大地震の発生)

当社の検討結果に基づけば、巨大地震の発生について以下の傾向が見られる。
「巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- 他機関の文献で得られた知見に基づくM9クラスの巨大地震の平均発生間隔、プレート相対運動速度及びカップリング係数で概算したすべり量と地震時すべり量には調和的な関係がある。

	カスケード沈み込み帯の巨大地震※ (1700年)	カムチャッカ沖の巨大地震※ (1952年)	チリ沖の巨大地震※ (1960年)	アラスカ沖の巨大地震※ (1964年)	スマトラ沖の巨大地震※ (2004年)
マグニチュード(M)	9.0	9.0	9.5	9.2	9.1
M9クラスの巨大地震の平均発生間隔①	平均約500年 (全域の破壊)	平均100~400年	平均約300年	平均約600年	平均400~500年
プレート相対運動速度②	3.2~3.8cm/年	6.9~8.4cm/年	6.3~7.5cm/年	2.2~5.2cm/年	1.6~4.4cm/年
カップリング係数③	1.0	0.5	1.0	0.6	0.5~1.0
概算のすべり量(A) (①, ②, ③より算出)	500年間で16~19m	100年間で3.5~4.2m 400年間で14~17m	385年間で24~29m 128年間で8~10m	600年間で8~19m 1000年間で13~31m	500年間で4~22m



地震時すべり量(a)	最大19m 平均14m	最大11.4m 平均3.2m	最大25~30m 平均11m	最大22m 平均8.6m	最大23m 平均8.6m