

平成 28 年 8 月 22 日

第 212 回 地震予知連絡会

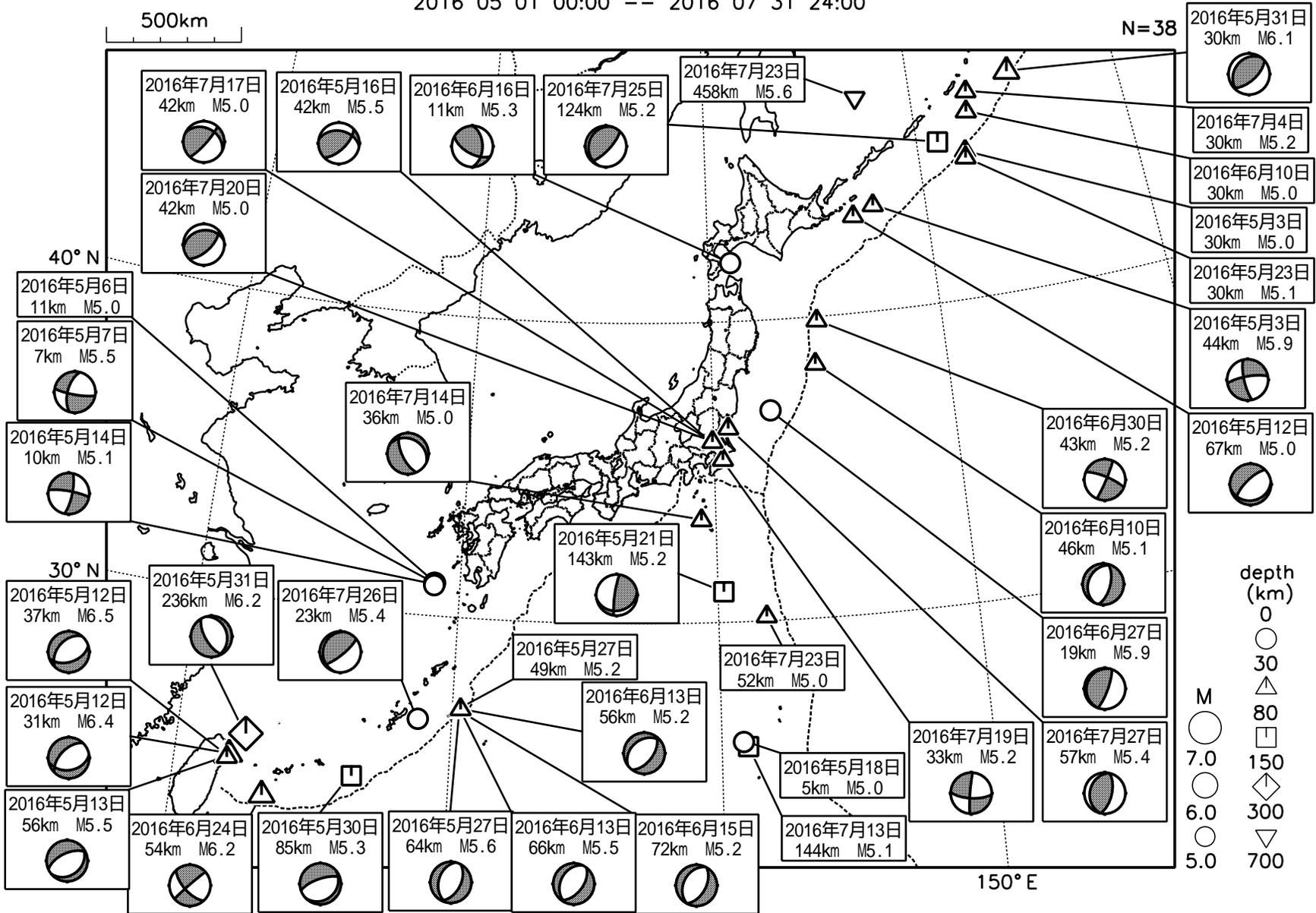
記者会見資料

事務局：国土地理院

地殻活動モニタリングに 関する検討

日本とその周辺の地震活動（2016年5月～7月、M 5.0）

2016 05 01 00:00 -- 2016 07 31 24:00

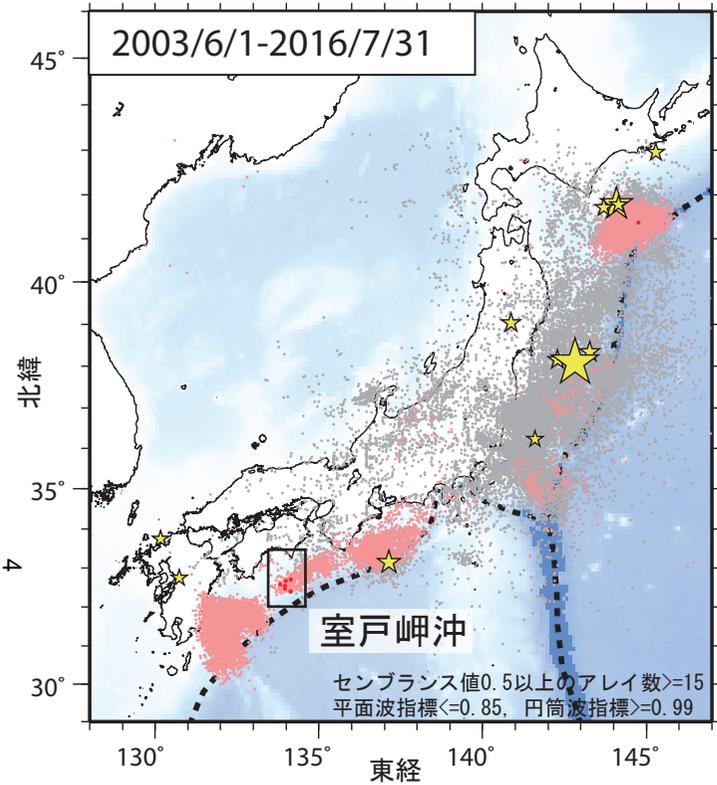


発震機構は気象庁によるCMT解

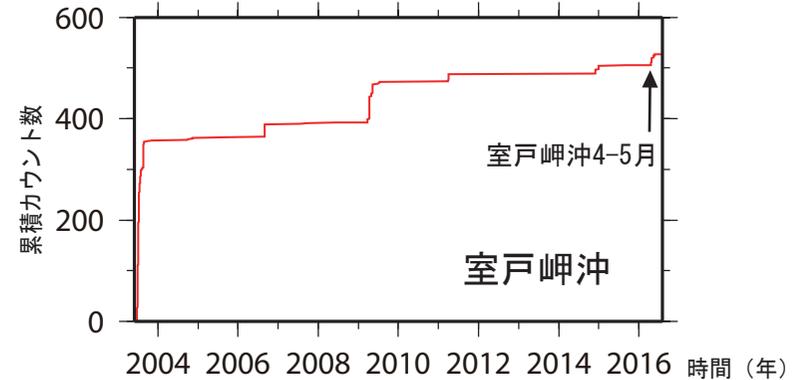
気象庁作成

日本周辺における浅部超低周波地震活動（2016年5月～7月）

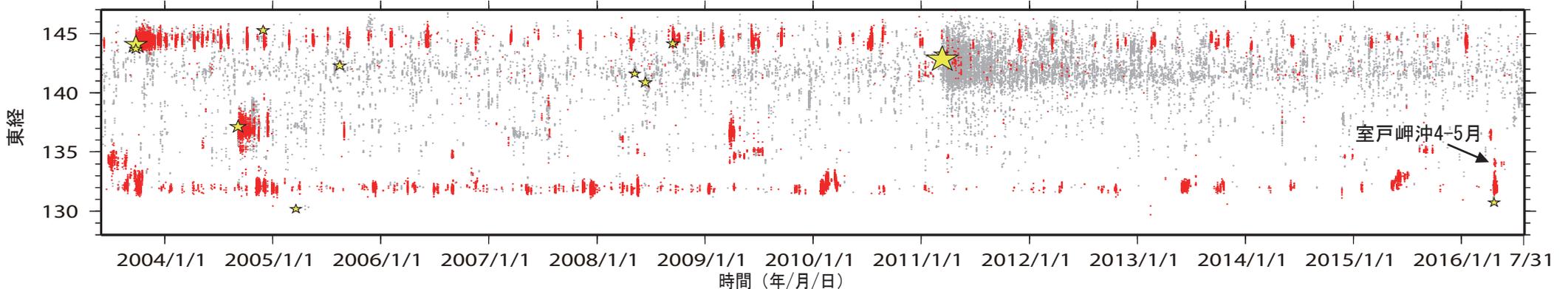
- 室戸岬沖では4月中旬以降の超低周波地震活動が5月下旬まで断続的に継続
- その他に目立った活動なし



第1図. 2003年6月1日から2016年7月31日までの期間にアレイ解析によって検出されたイベントの震央分布. 検出イベントを防災科研 Hi-net の手動または自動検測震源と照合し, 対応する地震が見出されたイベントを灰色で, それ以外を桃色 (2016年4月30日以前), および赤色 (5月1日以降) の点でそれぞれ示す. これらは主として周期10秒以上に卓越する超低周波地震を表すが, 東北地方太平洋沖地震の発生以降は, 除去しきれない通常の地震を含む. 期間内に発生した $M7$ 以上の地震 (ただし, 2011年～2015年の期間は東北地方太平洋沖地震の本震のみ) の震央を黄色星印で示す.



第2図. 室戸岬沖における検出イベントの累積カウンタ数の時間変化. 幅60秒間の解析時間窓を15秒毎に設定し, それぞれの解析時間窓内にイベントが検出される度に1カウントと数えるよう定義した.



第3図. 2003年6月1日から2016年7月31日までの期間に検出されたイベントの時空間分布. 検出されたイベントを防災科研 Hi-net 手動または自動検測震源と照合し, 対応する地震が見出されたイベントを灰色で, それ以外を赤色の点でそれぞれ示す. その他は第1図に同じ.

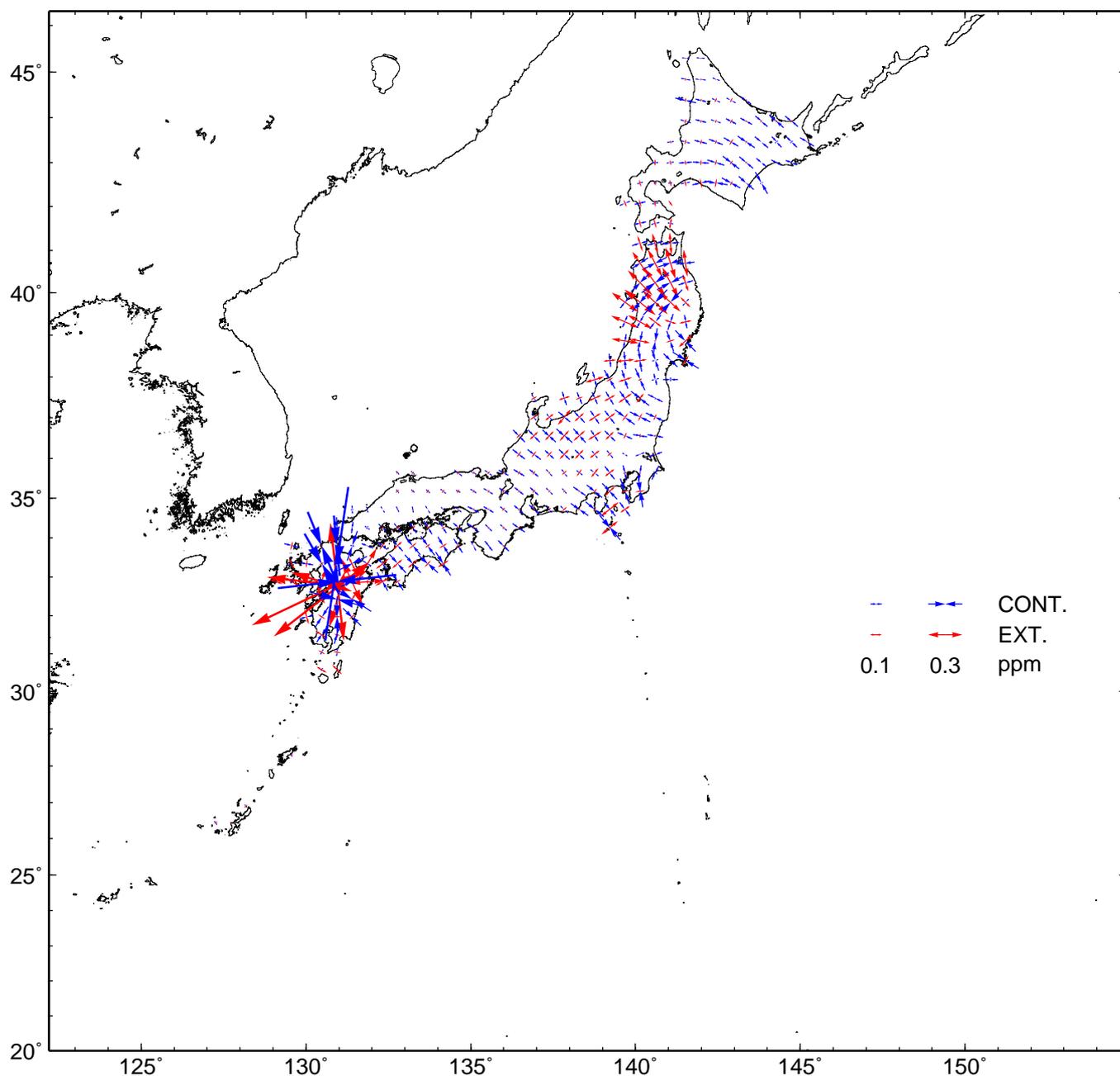
GNSS 連続観測から推定した日本列島のひずみ変化

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響によるひずみが見られる。

2016年4月に発生した熊本地震に伴う地殻変動の影響によるひずみが見られる。

基準期間：2015/07/02 - 2015/07/16 [F3：最終解]

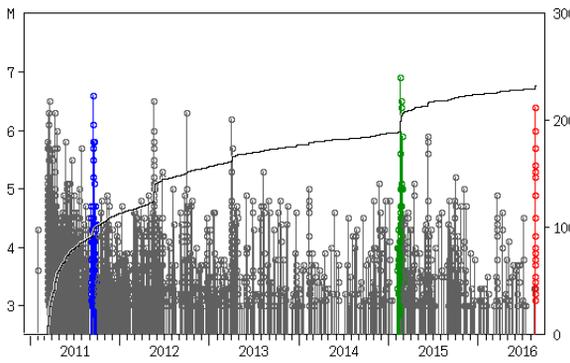
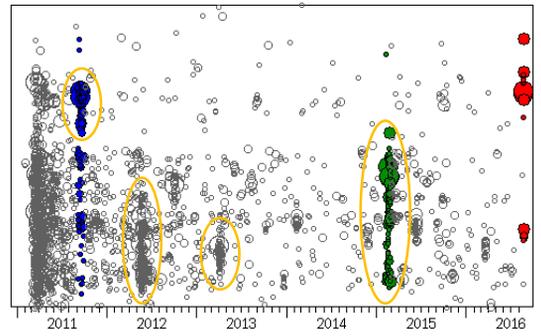
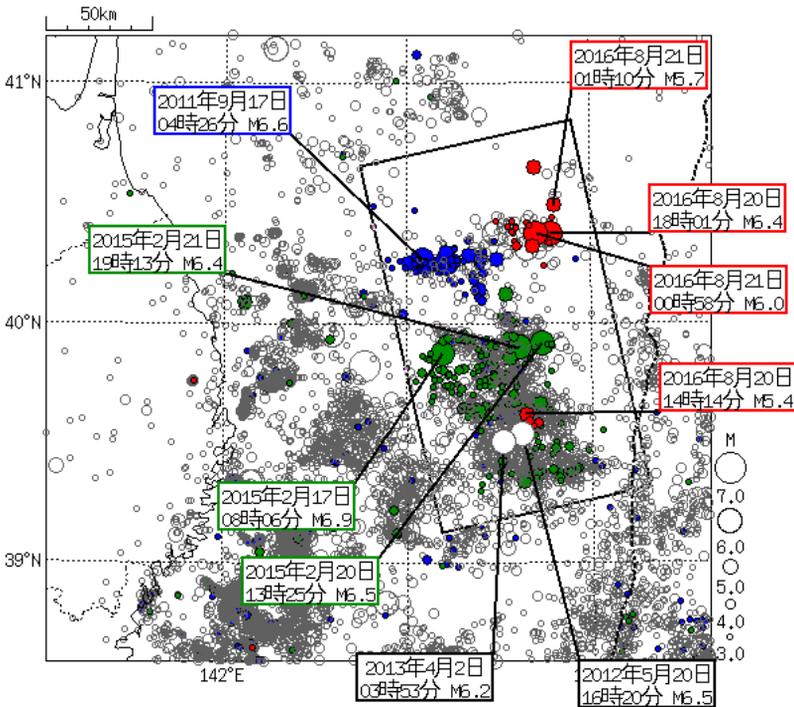
比較期間：2016/07/02 - 2016/07/16 [F3：最終解]



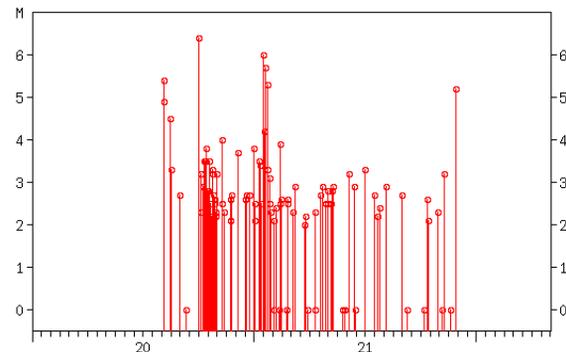
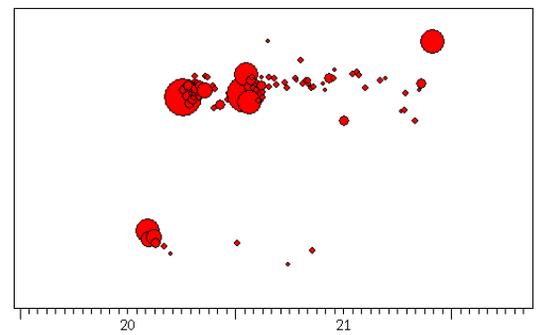
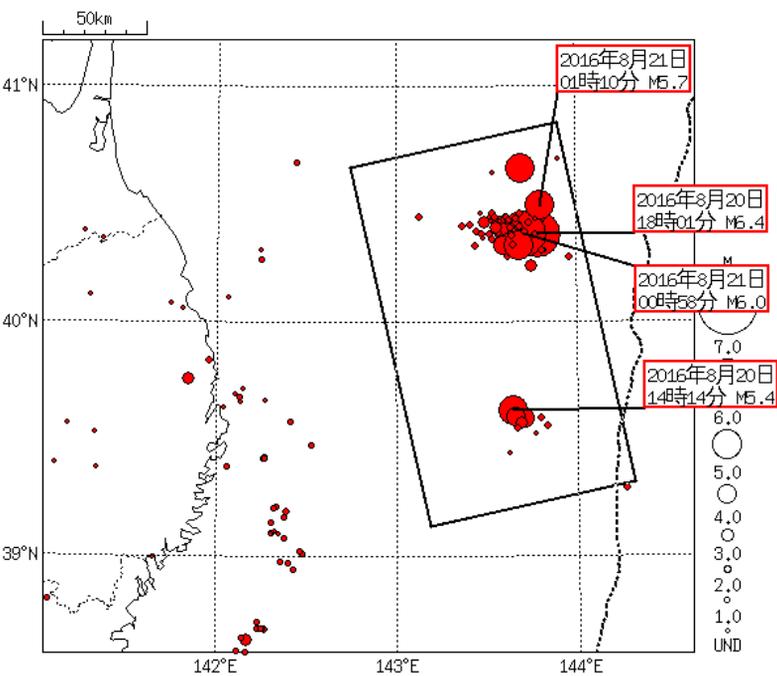
- ・ GNSS 連続観測による変位ベクトルからひずみ変化図を作成した。
- ・ 座標値の15日分の平均値から1年間の変位ベクトルを算出し、それに基づいてひずみを計算している。

三陸沖の活動

2011年1月1日～2016年8月21日、 $M \geq 3.0$
 青: 2011年9月、緑: 2015年2月、赤: 2016年8月20日以降

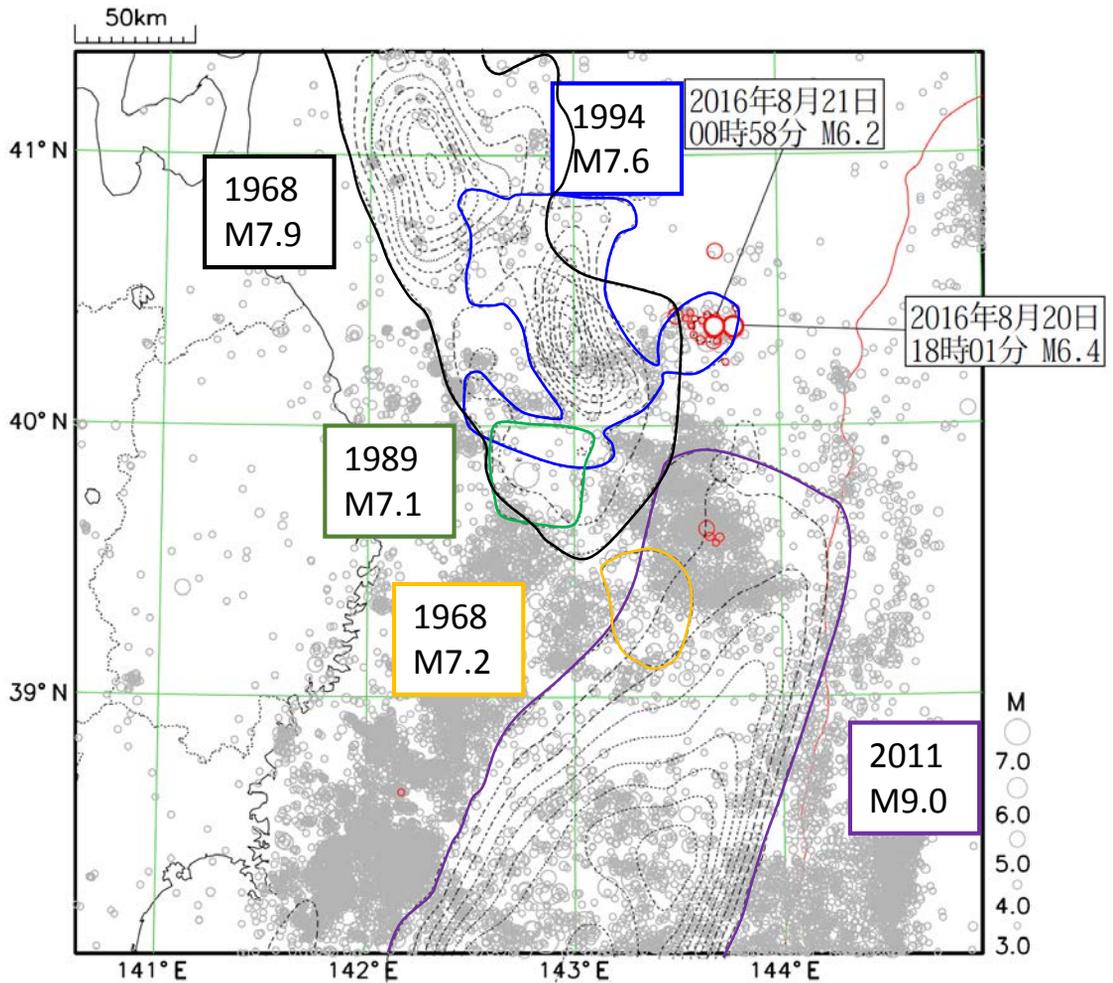


2016年8月20日～21日、M全て



2016年8月20日以降の三陸沖の活動と周辺の地震のすべり分布との位置関係

震央分布図
(2011年1月1日 - 2016年8月21日、深さ0~100km、M \geq 3.0)



8月20日以降の地震を赤で表示

各コンター

- 紫: 2011年東北地方太平洋沖地震 [Yoshida et al. (2011)]
- 黒と橙: 1968年十勝沖地震 [永井・他 (2001)]とその余震 [Yamanaka and Kikuchi (2004)]
- 緑: 1989年三陸沖の地震 [Yamanaka and Kikuchi (2004)]
- 青: 1994年三陸はるか沖地震 [永井・他 (2001)]

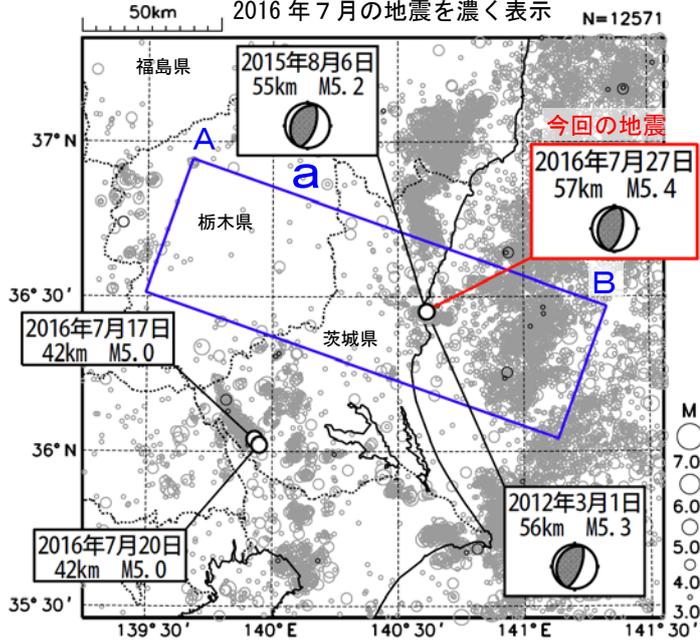
<参考文献>

- ・永井 理子, 菊池 正幸, 山中 佳子 (2001), 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究 - 1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較 -, 地震2, **54**, 267-280.
- ・Yamanaka, Y., and M. Kikuchi (2004), Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, **109**, B07307, doi:10.1029/2003JB002683.
- ・Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki (2011), Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, **63**, 565-569.

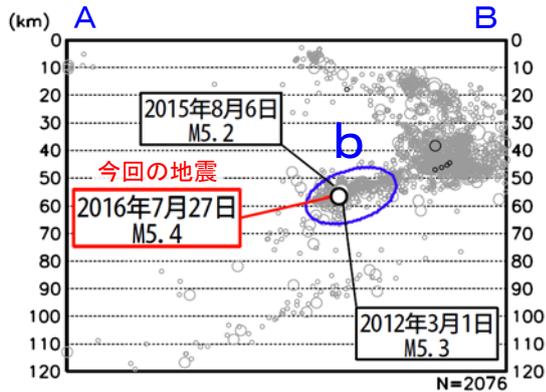
7月27日 茨城県北部の地震

震央分布図

(1997年10月1日～2016年7月31日、
深さ0～150km、 $M \geq 3.0$)
2016年7月の地震を濃く表示 N=12571

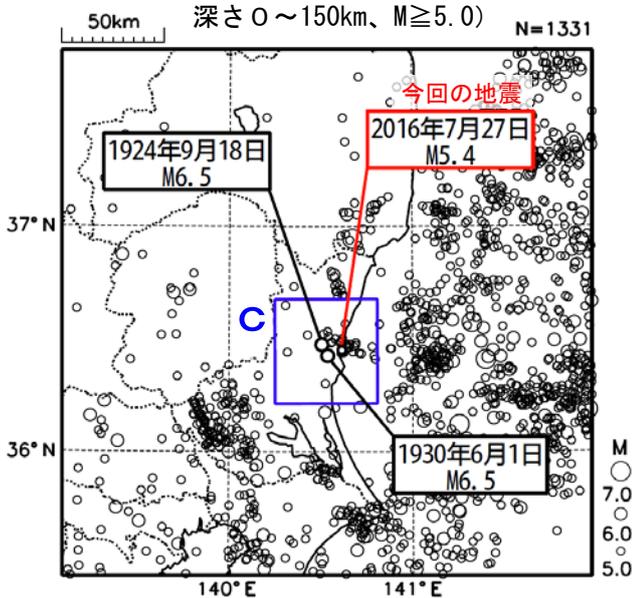


領域a内の断面図 (A-B投影)



震央分布図

(1923年1月1日～2016年7月31日、
深さ0～150km、 $M \geq 5.0$) N=1331

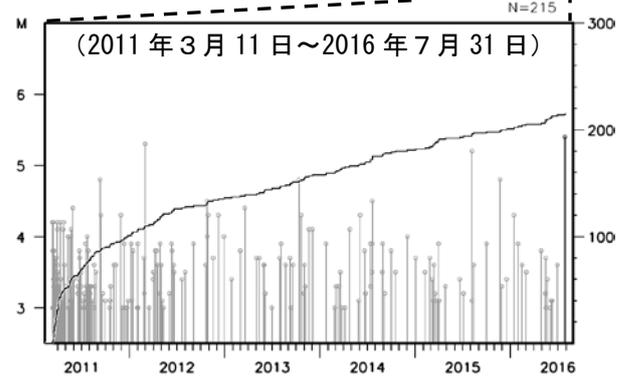
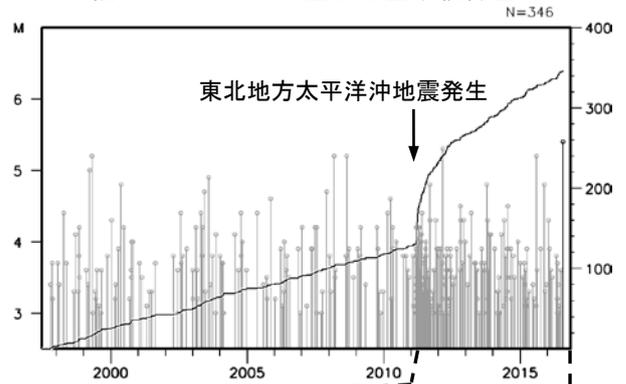


2016年7月27日23時47分に茨城県北部の深さ57kmでM5.4の地震 (最大震度5弱) が発生した。この地震は、発震機構が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した。

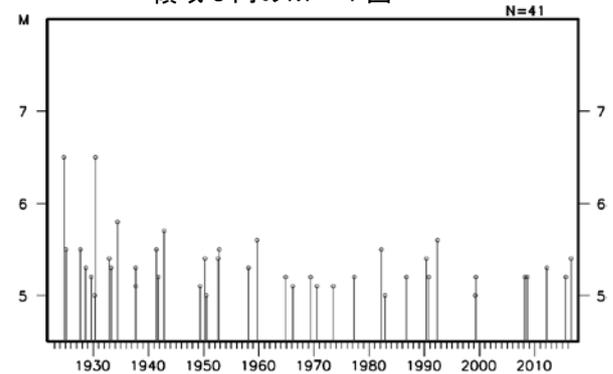
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源付近 (領域b) は、M5程度の地震が時々発生している。「平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震」の発生以降、活動がより活発になっており、2012年3月1日にはM5.3の地震 (最大震度5弱) が発生している。

1923年1月以降の活動をみると、今回の地震の震央付近 (領域c) では、M5.0以上の地震が度々発生しており、このうち、1930年6月1日に発生したM6.5の地震 (最大震度5) では、がけ崩れ、煙突倒壊などの被害が生じた (「日本被害地震総覧」による)。

領域b内のM-T図及び回数積算図



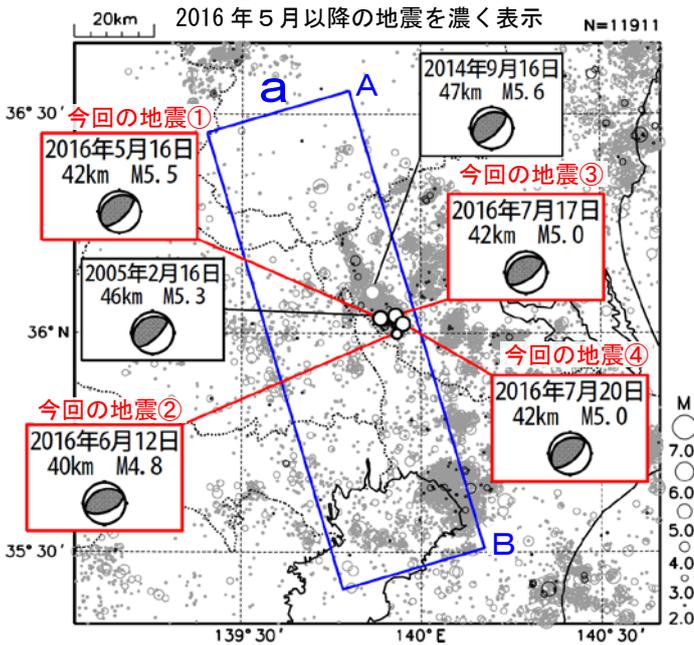
領域c内のM-T図



5月16日、6月12日、7月17日、7月20日 茨城県南部の地震

震央分布図

(1997年10月1日～2016年7月31日、
深さ0～100km、 $M \geq 2.0$)

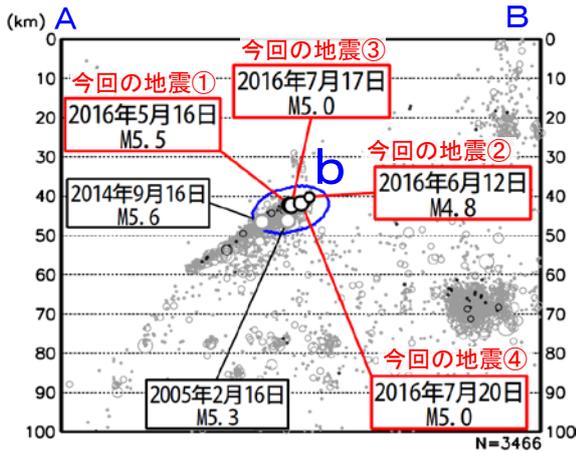


2016年5月16日21時23分に茨城県南部の深さ42kmでM5.5の地震（最大震度5弱、今回の地震①）が、6月12日07時54分に茨城県南部の深さ40kmでM4.8の地震（最大震度4、今回の地震②）が、7月17日13時24分（今回の地震③）と20日07時25分（今回の地震④）に、ともに茨城県南部の深さ42kmでM5.0の地震（最大震度4）が発生した。これらの地震は、発震機構が①、③、④の地震が北西-南東方向に、②の地震が北北西-南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、いずれもフィリピン海プレートと陸のプレートの境界で発生した。①と④の地震の発生後にはややまとまった地震活動がみられた。

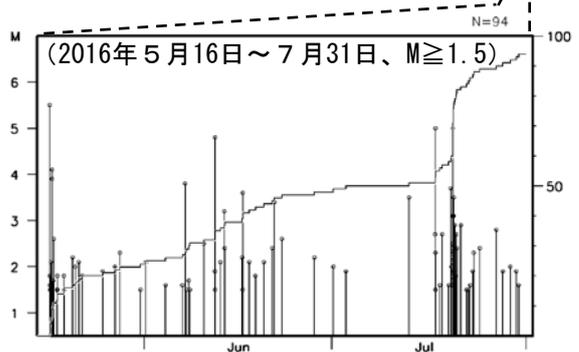
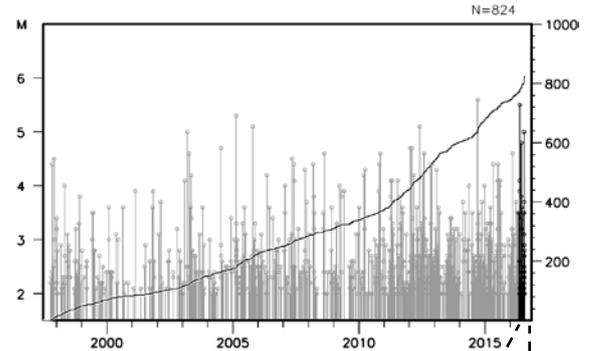
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源付近（領域b）は、活動が活発な領域で、M5程度の地震がしばしば発生している。

1923年1月以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺（領域c）では、M6程度の地震が時々発生している。

領域a内の断面図（A-B投影）

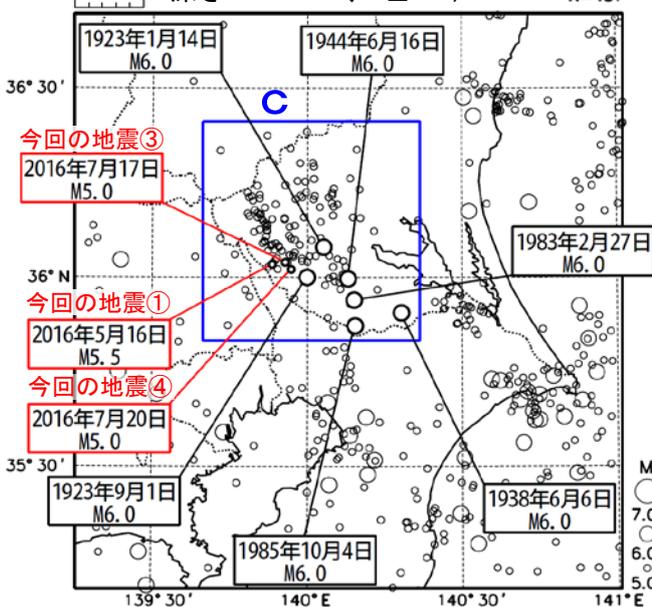


領域b内のM-T図及び回数積算図

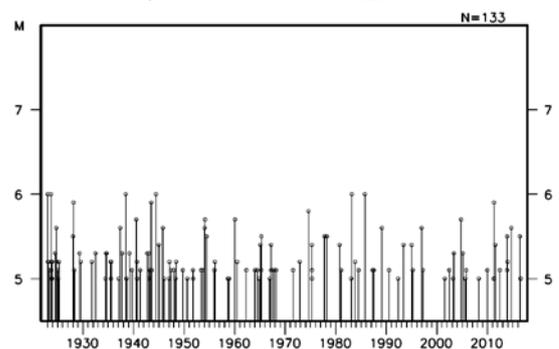


震央分布図

(1923年1月1日～2016年7月31日、
深さ0～100km、 $M \geq 5.0$)

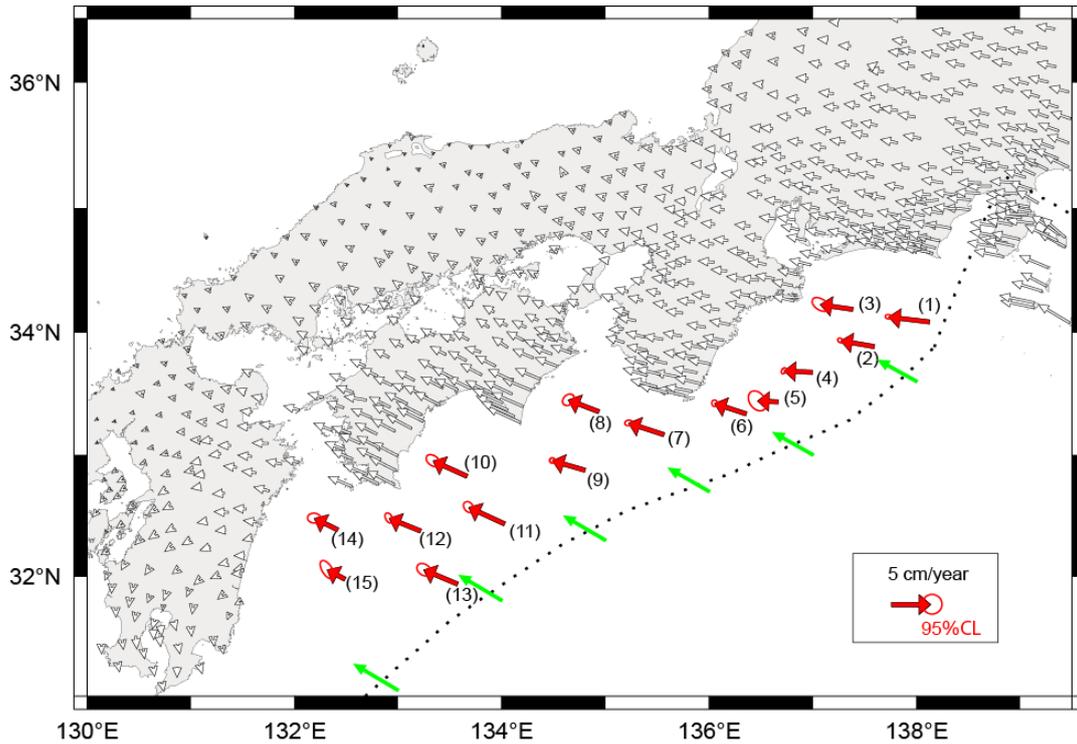


領域c内のM-T図



南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果

西南日本の年平均変位【アムールプレート固定】



観測点	(1) TOK1	(2) TOK2	(3) TOK3	(4) KUM1	(5) KUM2	(6) KUM3	(7) SIOW
速度 (cm/year)	5.3	4.4	4.2	3.7	2.7	4.3	4.8
角度	N277.3°E	N280.2°E	N278.7°E	N273.1°E	N272.8°E	N288.7°E	N288.6°E

(8) MRT1	(9) MRT2	(10) TOS1	(11) TOS2	(12) ASZ1	(13) ASZ2	(14) HYG1	(15) HYG2
4.2	4.4	4.8	5.1	4.4	4.7	3.4	2.6
N291.5°E	N286.8°E	N294.9°E	N295.3°E	N292.5°E	N293.3°E	N296.7°E	N298.1°E

- 解析には国土地理院提供の電子基準点 1 秒データ及び F3 解を使用している。
- 東北地方太平洋沖地震による地震時及び地震後の地殻変動の影響は、Iinuma et al. (2012, JGR) 及び Sun and Wang (2015, JGR) のモデルによる結果を用いて補正した。
- 陸上の移動速度は国土地理院電子基準点の 2006 年 3 月～2011 年 2 月（東北地方太平洋沖地震前）までの F3 解を線形回帰したものである。
- 緑色矢印は MORVEL モデルによるフィリピン海プレートのアムールプレートへの沈み込み速度である。

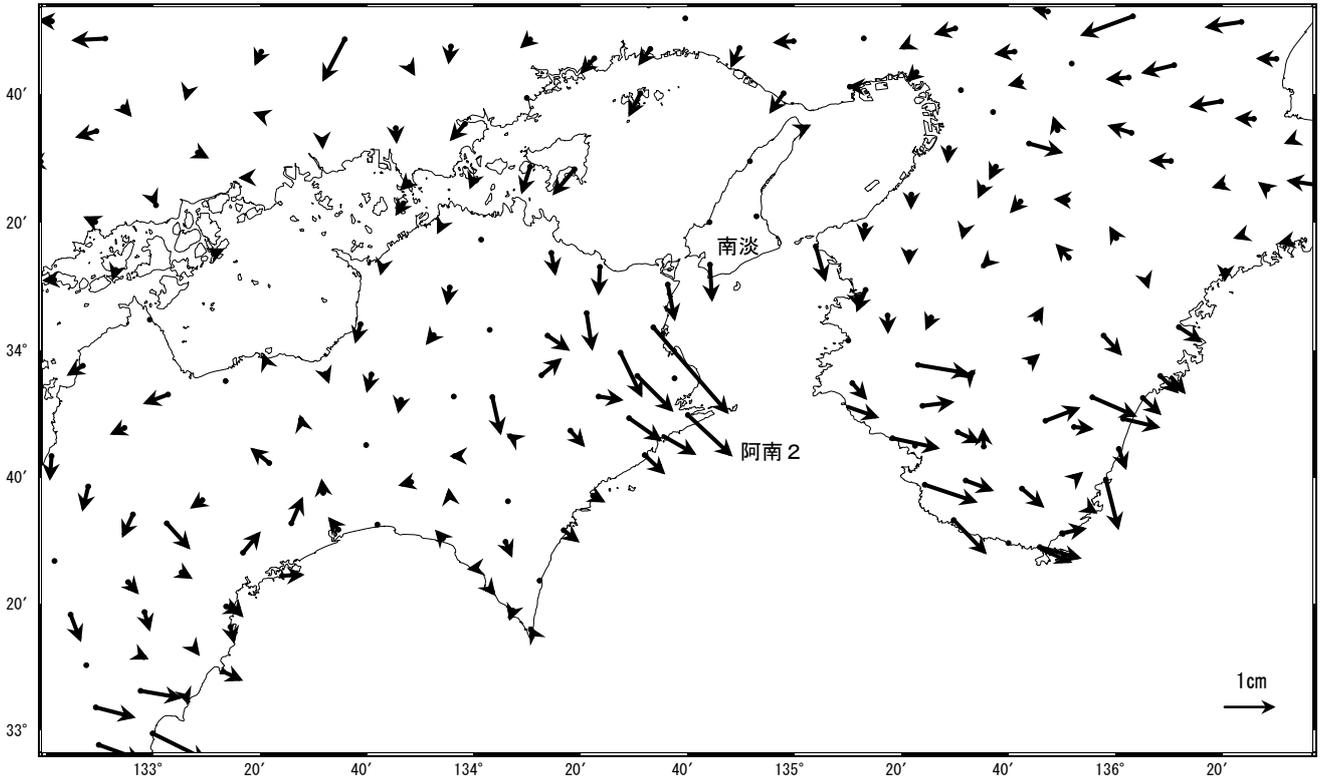
紀伊水道周辺の非定常的な地殻変動 (1)

紀伊水道周辺で2014年半ば頃から観測された非定常的な地殻変動は、現在は鈍化している。

地殻変動(水平) (一次トレンド・年周成分・半年周成分除去)

基準期間: 2014/07/01~2014/07/15 [F3: 最終解]
比較期間: 2016/07/10~2016/07/16 [F3: 最終解]

計算期間: 2012/05/01~2014/05/01

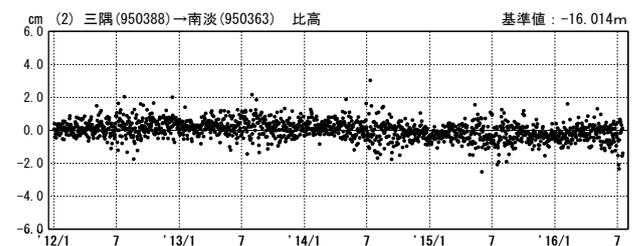
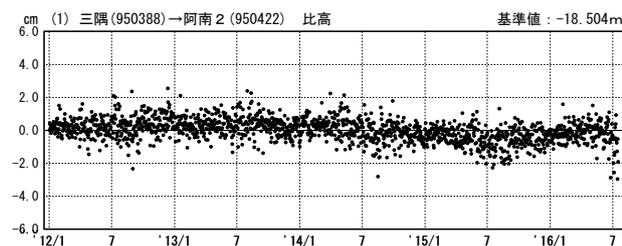
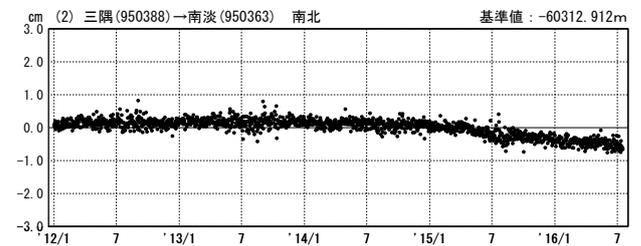
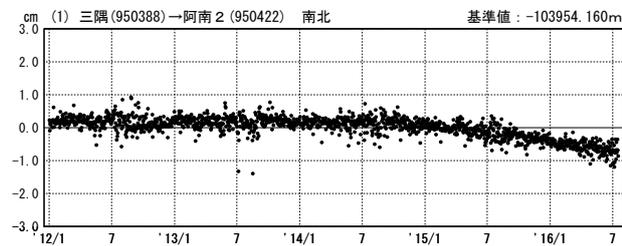
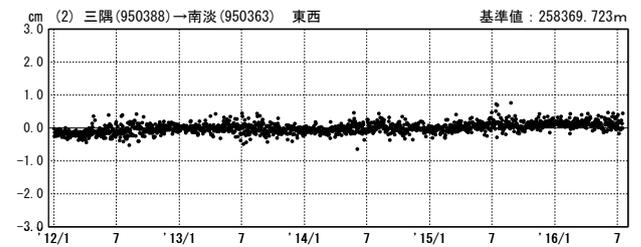
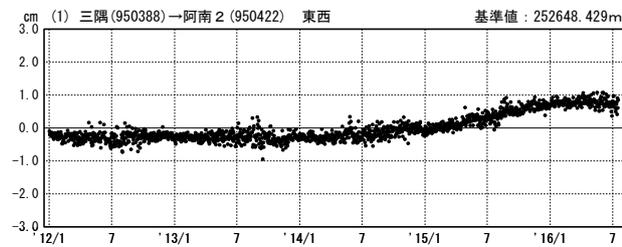


固定局: 三隅 (950388)

一次トレンド・年周成分・半年周成分除去後グラフ

期間: 2012/01/01~2016/07/16 JST

期間: 2012/01/01~2016/07/16 JST 計算期間: 2012/05/01~2014/05/01



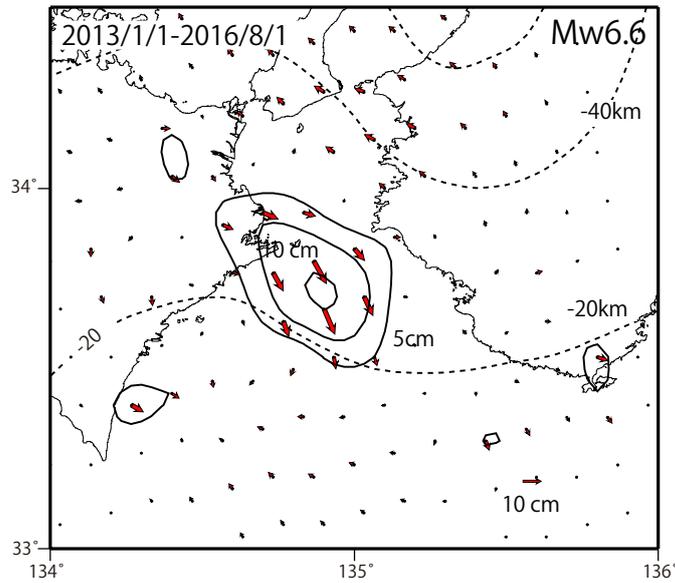
●— [F3: 最終解]

※三隅及び高知県、愛媛県、広島県の観測局には2016年4月の熊本地震に伴う地殻変動の補正を行った。

紀伊水道周辺の非定常的な地殻変動 (2)

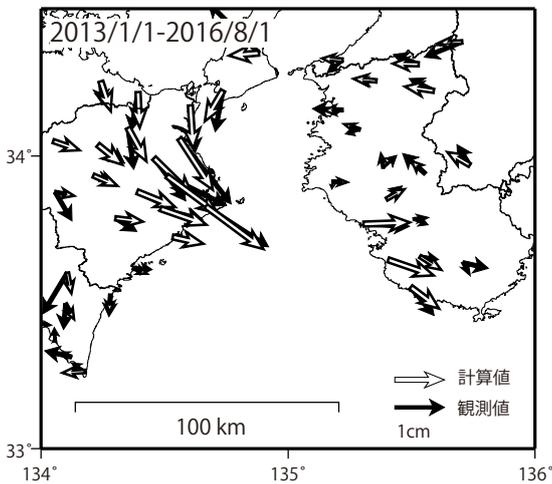
フィリピン海プレートと陸側プレートの境界で最大約15cmの滑りが推定された。

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面上の滑り分布



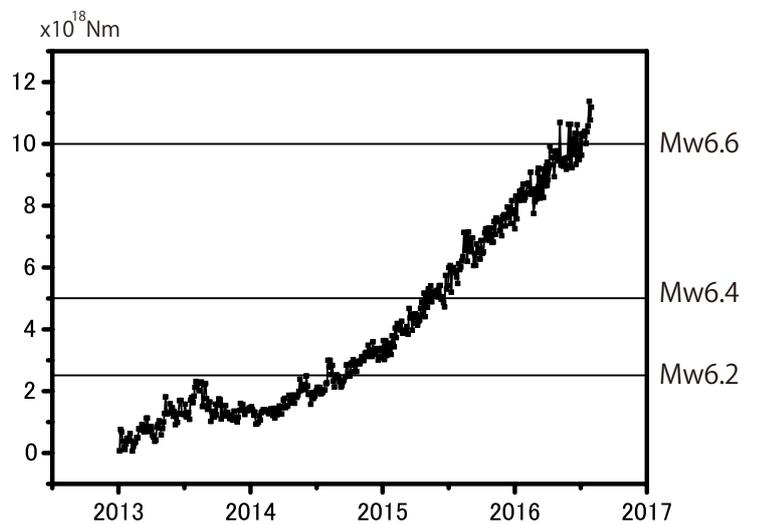
- ・ 時間依存インバージョンによる。
- ・ 赤矢印は陸側プレートのフィリピン海プレートに対する動きを示す。
- ・ 推定される滑り量を等値線 (黒実線) で示している (等値線間隔: 5cm)。
- ・ 黒破線は、沈み込むフィリピン海プレート上面の等深線 (弘瀬・他, 2007, 地震2)。

地殻変動ベクトルの観測値と計算値の比較 (水平)



固定局: 三隅 (950388)

モーメントの時間変化



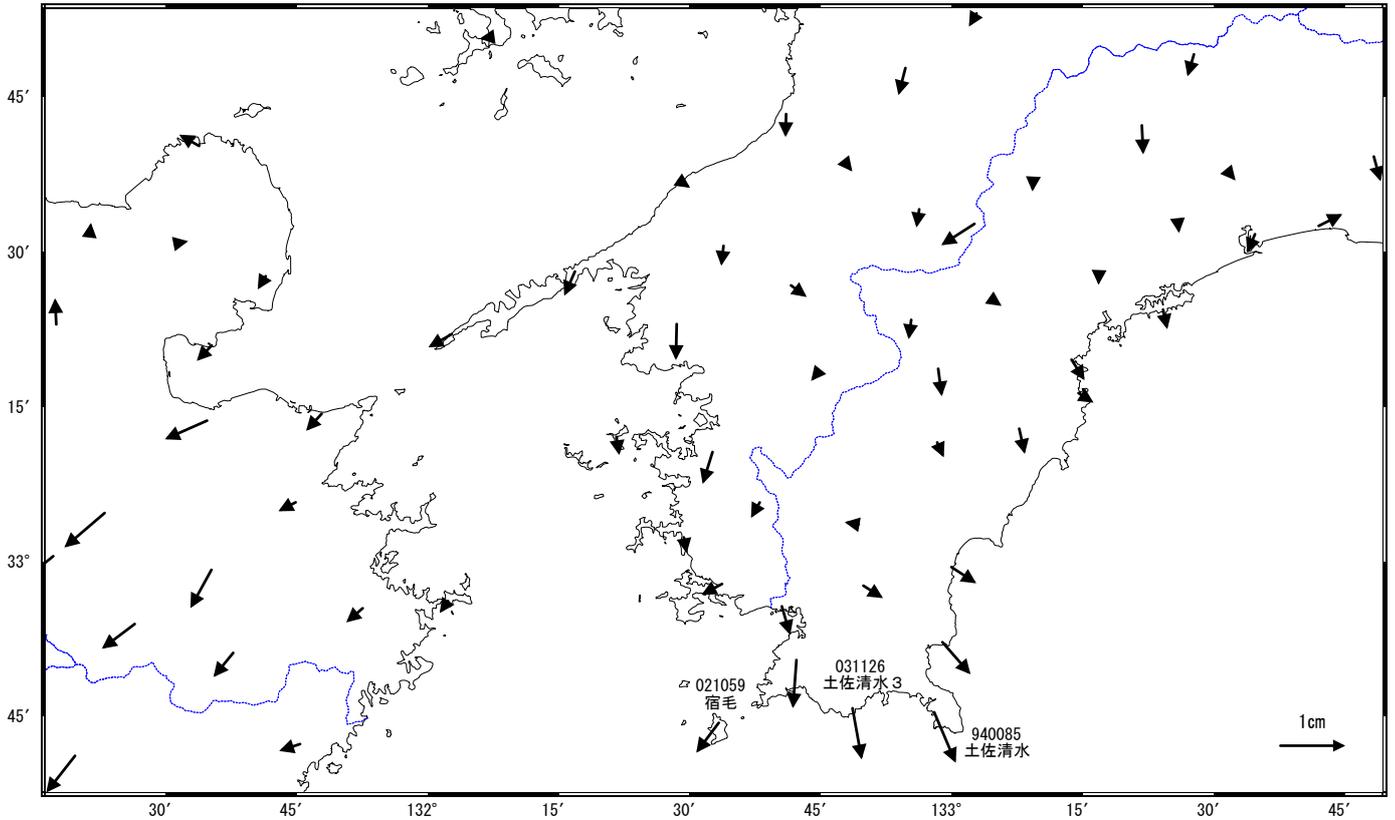
豊後水道周辺の非定常的な地殻変動（１）

豊後水道周辺で2015年12月頃から非定常な地殻変動が観測されている。

基準期間：2015/12/01～2015/12/15 [F3:最終解]
比較期間：2016/07/16～2016/07/30 [R3:速報解]

地殻変動（水平）（一次トレンド除去）

計算期間：2006/01/01～2008/01/01

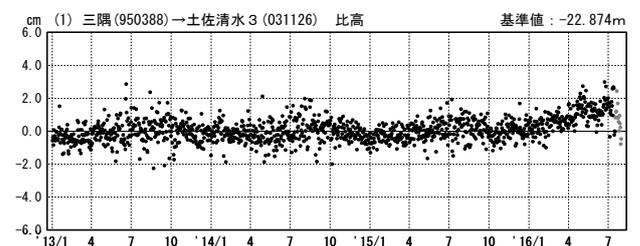
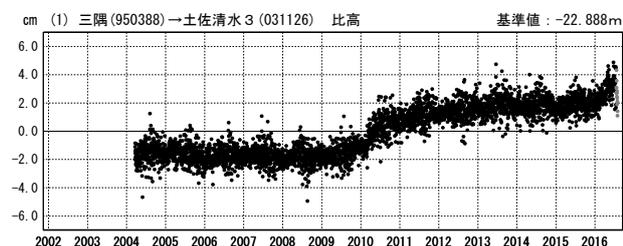
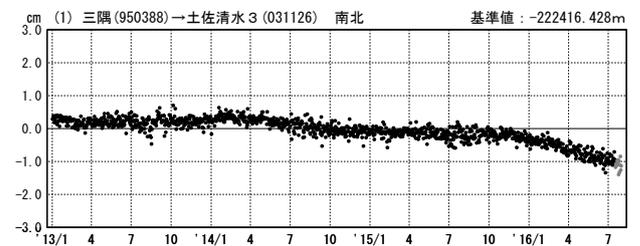
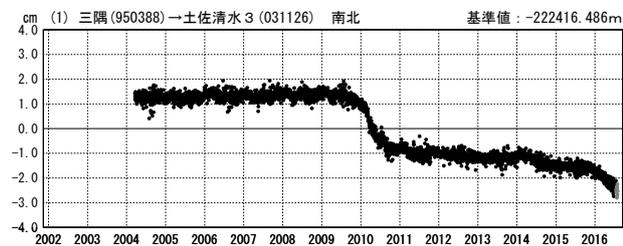
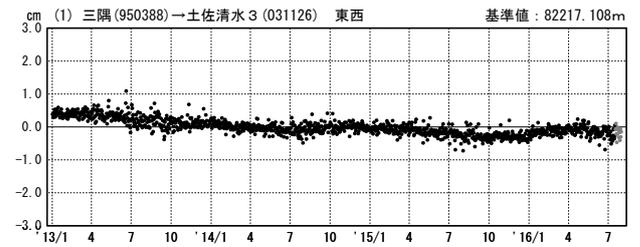
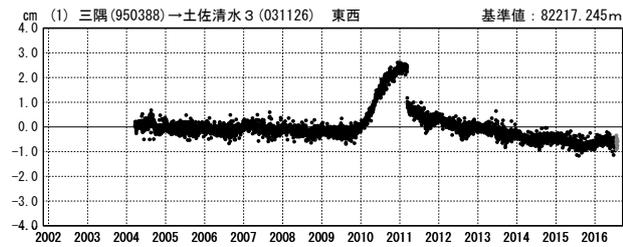


☆ 固定局：三隅 (950388)

一次トレンド除去後グラフ

期間：2002/01/01～2016/07/30 JST

期間：2013/01/01～2016/07/30 JST 計算期間：2006/01/01～2008/01/01



●— [F3:最終解] ●— [R3:速報解]

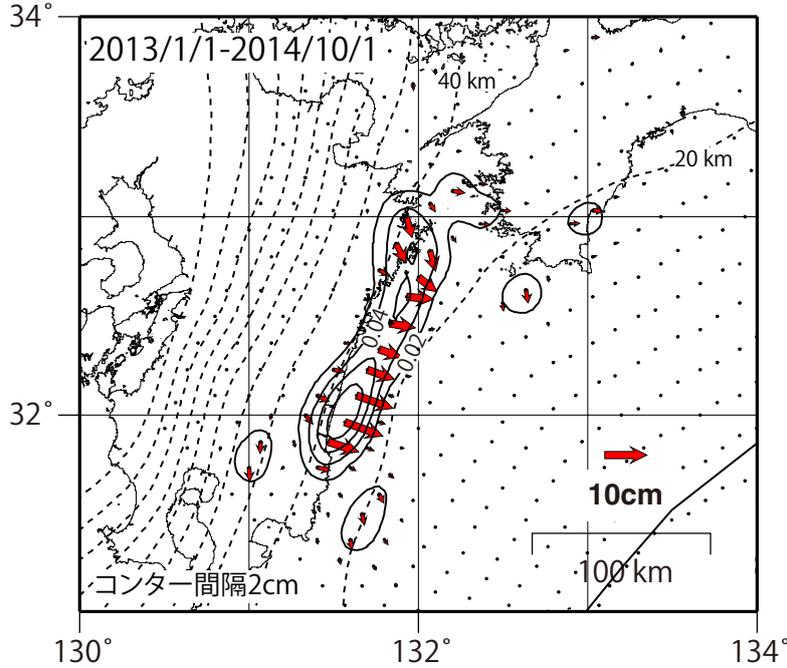
※全観測局に2016年4月の熊本地震に伴う地殻変動の補正を行った。

四国・九州地方の非定常的な地殻変動（２）

四国・九州地域の非定常地殻変動(2013-2015)(1)

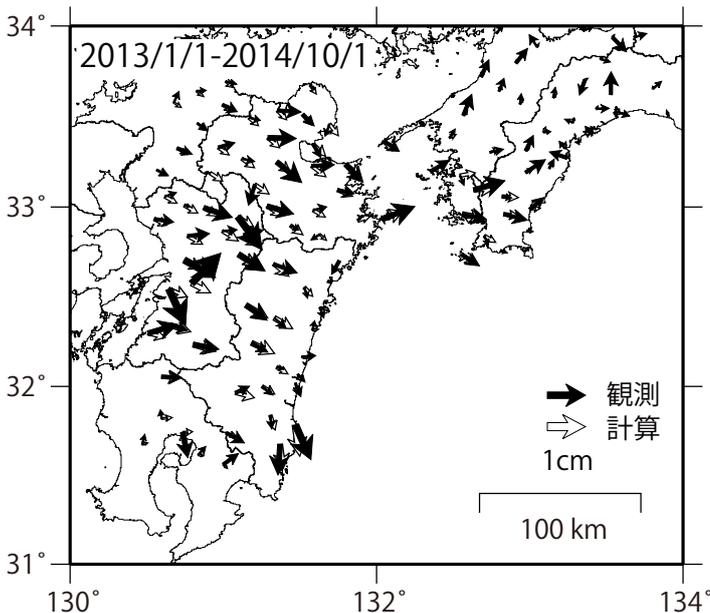
日向灘, 宮崎北部及び豊後水道のプレート境界ですべりが推定された。

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面の滑り分布



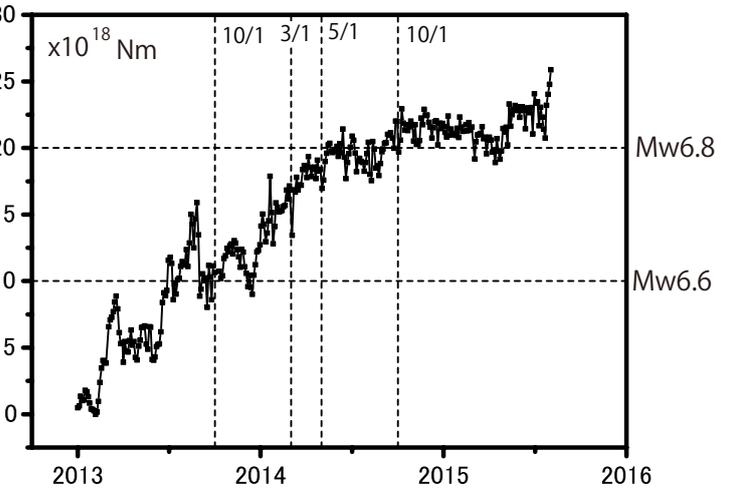
- ・ 時間依存のインバージョンによる。
- ・ 赤矢印は陸側プレートのフィリピン海プレートに対する動きを示す。
- ・ 推定される滑り量を等値線（黒実線）で示している（等値線間隔：2cm）。
- ・ 黒破線は、沈み込むフィリピン海プレート上面の等深線（弘瀬・他, 2007, 地震2）
- ・ 非定常地殻変動とは2012/1/1-2013/3/1の地殻変動速度からのずれを意味する
- ・ 3日平均のデータを作成し3日毎にサンプリングして解析している

地殻変動ベクトルの観測値と計算値の比較(水平)



固定局：三隅(950388)

推定モーメント

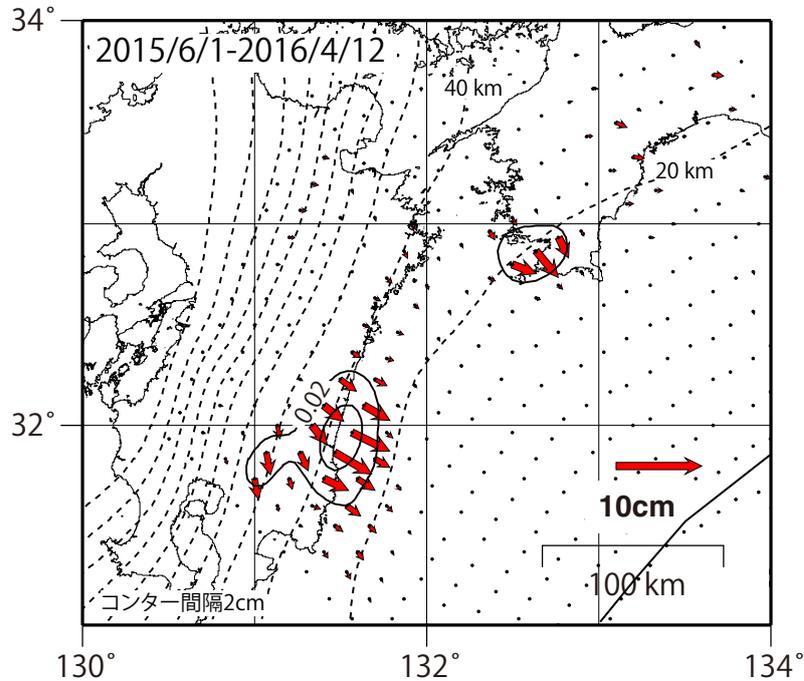


四国・九州地方の非定常的な地殻変動（5）

四国・九州地域の非定常地殻変動(2015-2016)(1)

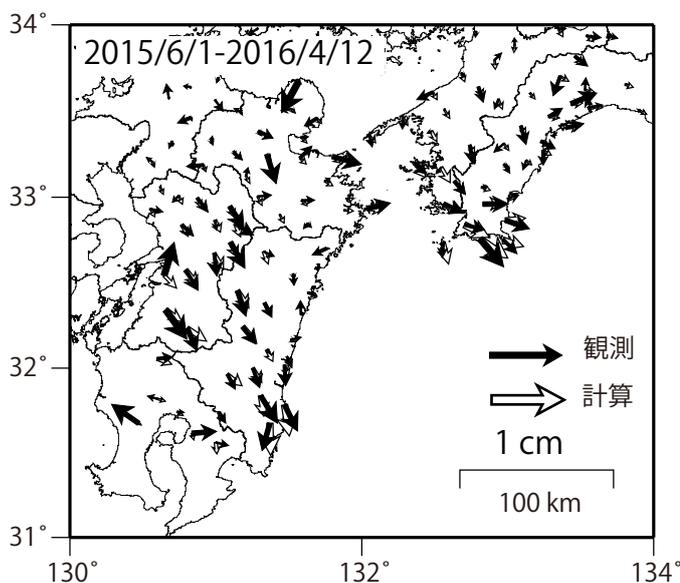
日向灘及び四国西部のプレート境界でプレート境界ですべりが推定された。

非定常地殻変動から推定されるプレート境界面の滑り分布



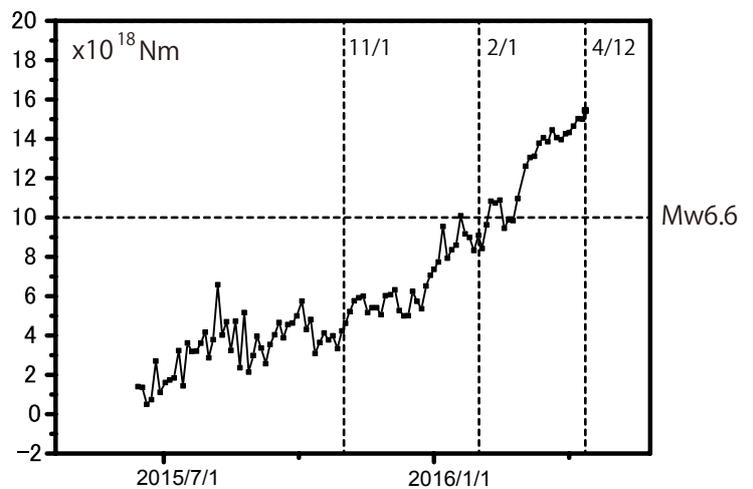
- ・ 時間依存のインバージョンによる。
- ・ 赤矢印は陸側プレートのフィリピン海プレートに対する動きを示す。
- ・ 推定される滑り量を等値線（黒実線）で示している（等値線間隔：2cm）。
- ・ 黒破線は、沈み込むフィリピン海プレート上面の等深線（弘瀬・他, 2007, 地震2）
- ・ 非定常地殻変動とは2012/1/1-2013/3/1の地殻変動速度からのずれを意味する。
- ・ 3日平均のデータを作成し3日毎にサンプリングして解析している。

地殻変動ベクトルの観測値と計算値の比較(水平)



固定局：三隅(950388)

推定モーメント



西南日本の深部低周波微動・短期的スロースリップ活動状況 (2016年5月～7月) その1

- 短期的スロースリップイベントを伴う顕著な微動活動：
紀伊半島北部から東海地方，7月25日～8月5日。
- 上記以外の主な微動活動：
紀伊半島中部，5月10日～15日．四国中部，4月29日～5月3日。

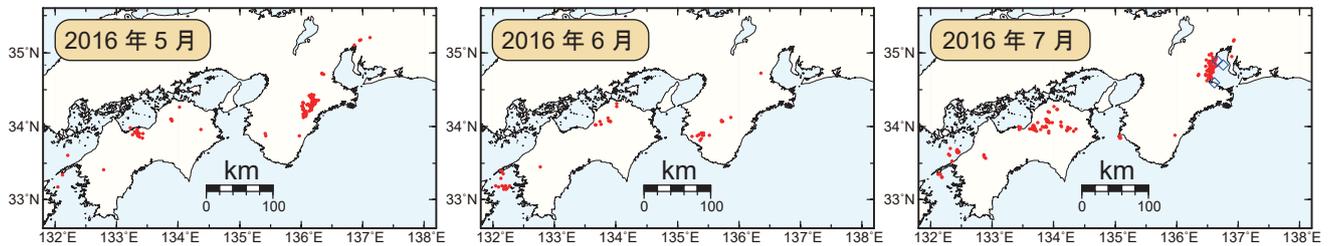


図1. 西南日本における2016年5月～7月の月毎の深部低周波微動活動. 赤丸はエンベロープ相関・振幅ハイブリッド法 (Maeda and Obara, 2009) およびクラスタ処理 (Obara et al., 2010) において，1時間毎に自動処理された微動分布の重心である. 青菱形は周期20秒に卓越する深部超低周波地震 (Ito et al., 2007) である.

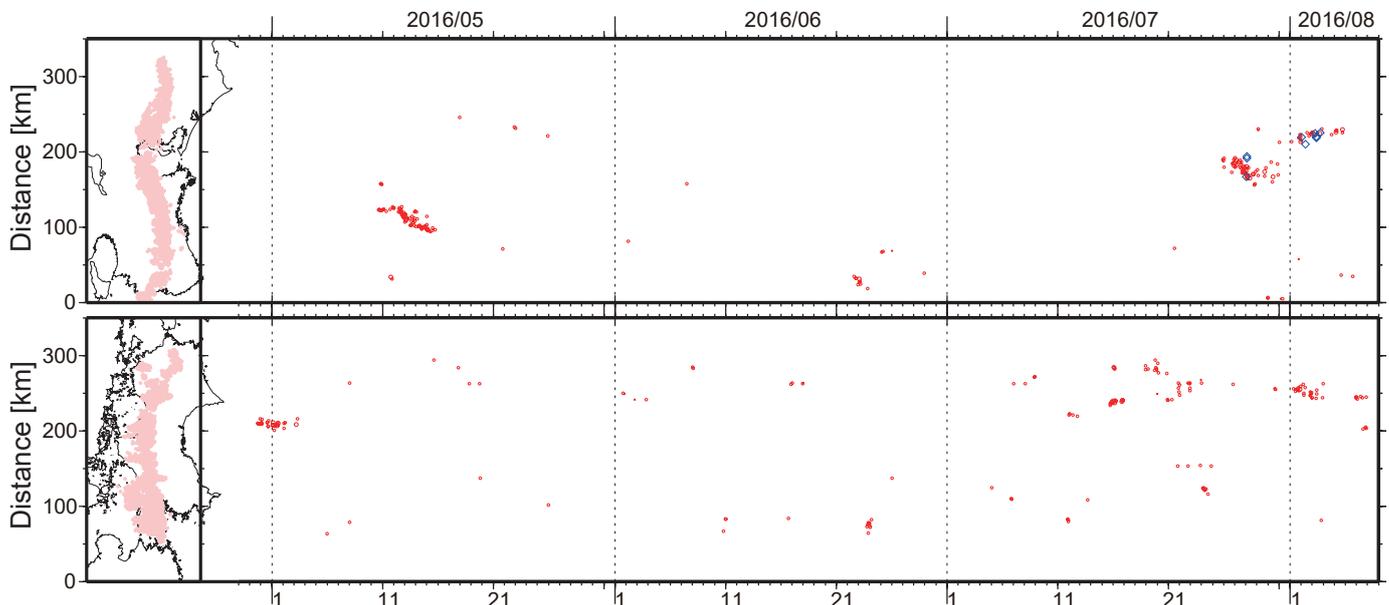


図2. 2016年4月28日～8月8日の深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布.

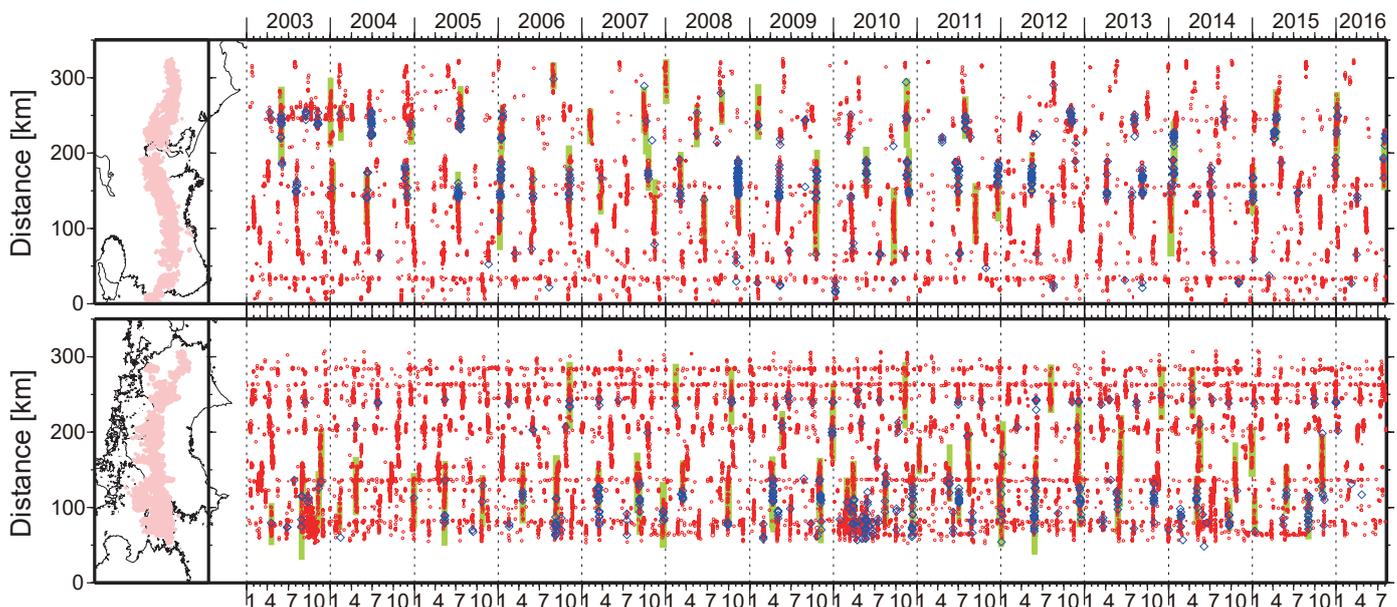


図3. 2003年1月～2016年8月8日までの深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布. 緑太線は，傾斜変動から検出された短期的スロースリップイベント.

平成 28 年 6 月 16 日の内浦湾の地震

(1) 概要

平成 28 年 (2016 年) 6 月 16 日 14 時 21 分に、内浦湾の深さ 11km で M5.3 の地震が発生し、北海道函館市 かつくみちよう 川汲町で震度 6 弱、函館市泊町で震度 5 弱を観測したほか、北海道道南を中心に、北海道道央から東北地方北部にかけて震度 4～1 を観測した。

気象庁はこの地震に対して、最初の地震波の検知から 9.3 秒後の 14 時 21 分 39.6 秒に緊急地震速報 (警報) を発表した。この地震により、北海道函館市で軽傷 1 人、住家一部破損 3 棟の被害が生じた (6 月 20 日 13 時現在、総務省消防庁による)。

(2) 地震活動

ア. 今回の地震の発生場所及び発生状況

2016 年 6 月 16 日 14 時 21 分に、内浦湾の深さ 11km で M5.3 の地震 (最大震度 6 弱) が発生した。この地震は、陸のプレートの地殻内で発生し、発震機構は北東-南西方向に圧力軸を持つ逆断層型である。

この地震の震央付近 (領域 a) では、M5.3 の地震の前からまとまった地震活動が続いており、6 月 21 日 00 時 10 分の M4.2 の地震 (最大震度 4) を含め、6 月 30 日までに震度 1 以上を観測した地震が 36 回発生した。この地震活動は、北北西-南南東方向にのびる長さ約 10 km、幅約 5 km の範囲で発生している。

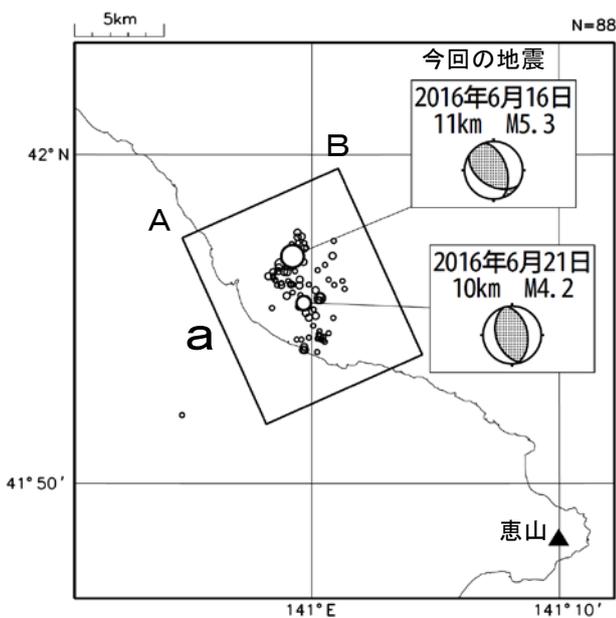


図 2-1 震央分布図
(2016 年 6 月 16 日～2016 年 7 月 31 日、
深さ 0～20km、M≥1.7)

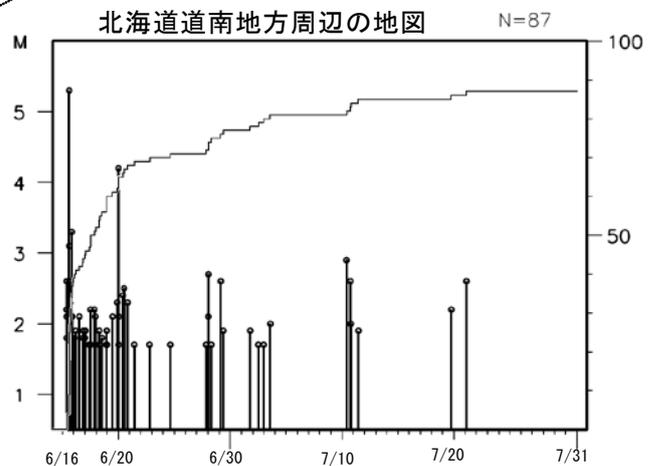
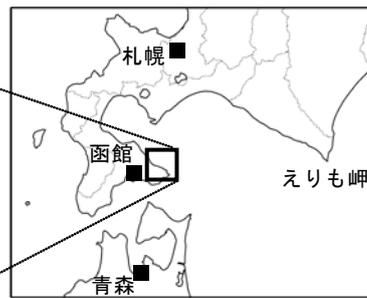


図 2-3 領域 a 内の M-T 図及び回数積算図

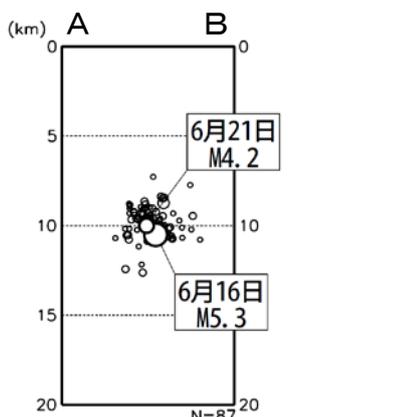


図 2-2 領域 a 内の断面図
(A-B 投影)

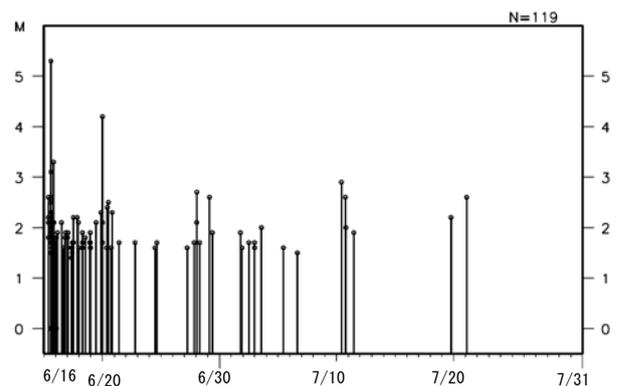


図 2-4 領域 a 内の M-T 図 (Mすべて)

表 2-1 震度 1 以上を観測した地震回数の表 (日別)

	1	2	3	4	5弱	5強	6弱	合計
6月16日	8	4	1				1	14
6月17日	1							1
6月18日	6							6
6月19日	4							4
6月20日		2						2
6月21日	1	3		1				5
6月22日								0
6月23日								0
6月24日								0
6月25日								0
6月26日								0
6月27日								0
6月28日								0
6月29日	1	1						2
6月30日	1	1						2
合計	22	11	1	1	0	0	1	36

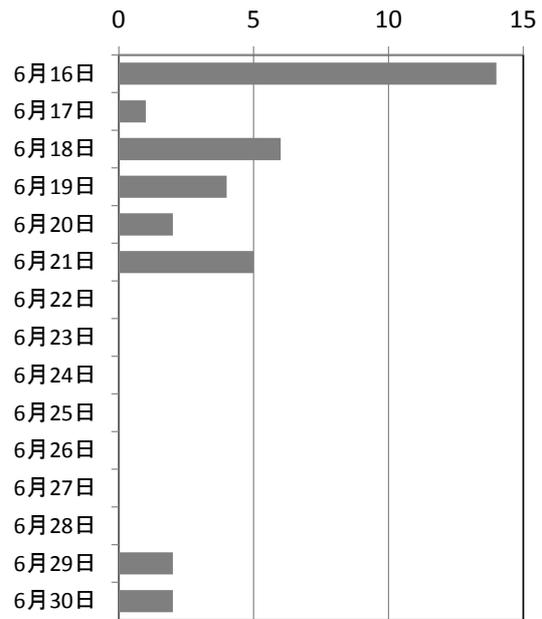


図 2-5 震度 1 以上を観測した地震回数 (日別)

イ. 最近の地震活動

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震央付近(領域b)は、地震活動が比較的活発な領域であるが、M4.0を超える地震は発生していなかった。

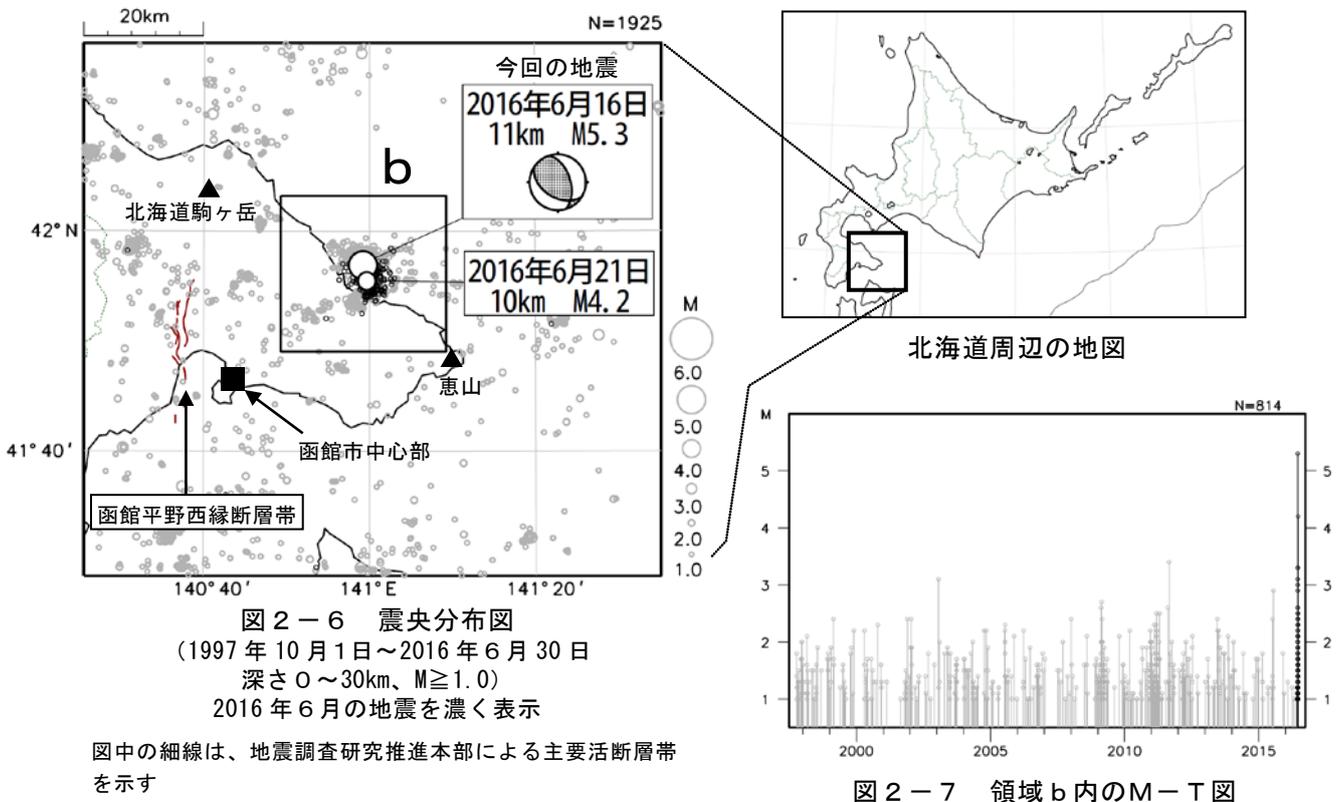


図 2-6 震央分布図
(1997年10月1日~2016年6月30日
深さ0~30km、M≥1.0)
2016年6月の地震を濃く表示

図中の細線は、地震調査研究推進本部による主要活断層帯を示す

図 2-7 領域 b 内の M-T 図

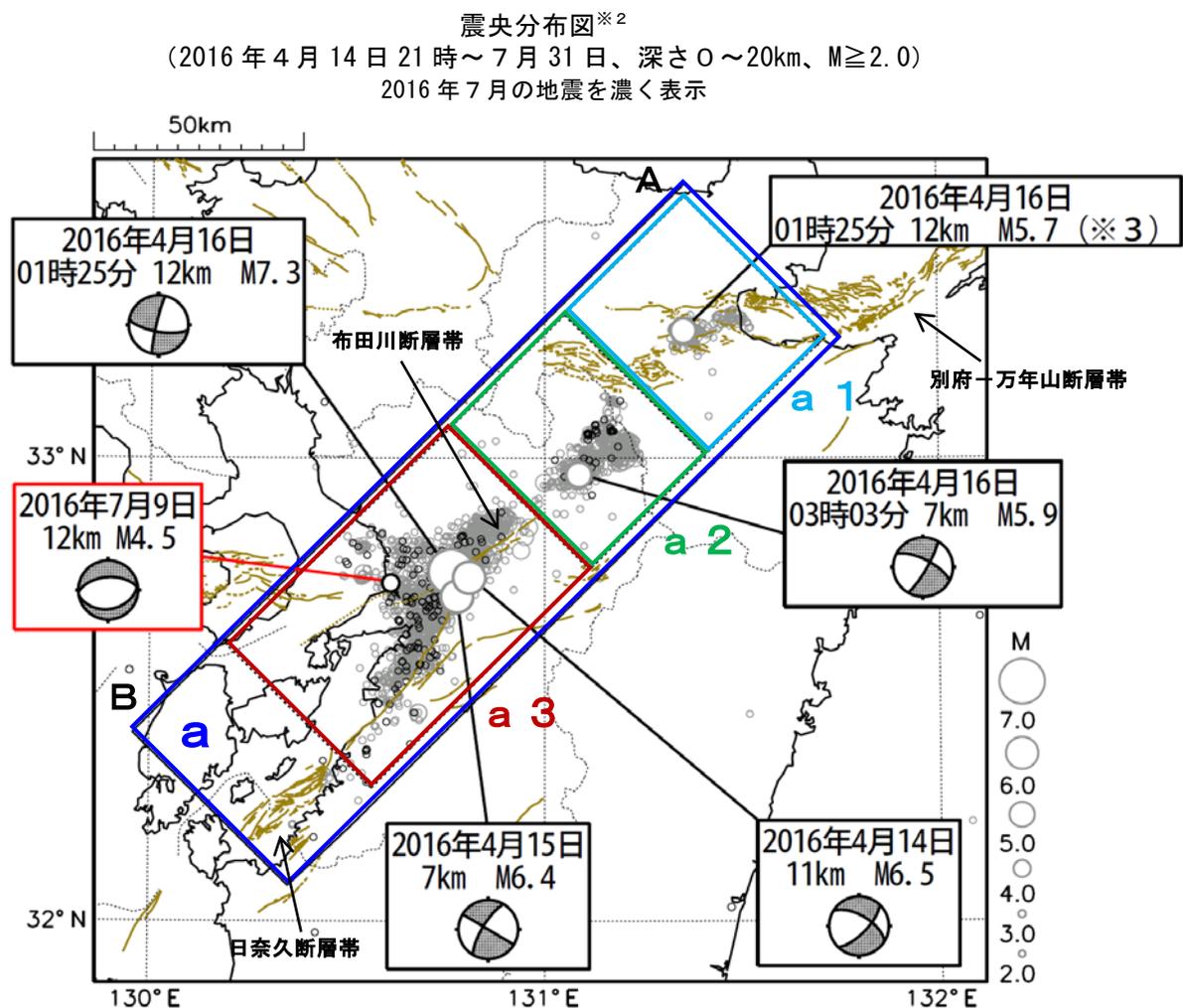
「平成 28 年（2016 年）熊本地震」

「平成 28 年（2016 年）熊本地震」（領域 a）の地震活動は、全体として引き続き減衰傾向が見られる。熊本県熊本地方（領域 a 3）及び阿蘇地方（領域 a 2）の活動は、減衰しつつも継続しており、M4.0 以上の地震が 1 回発生した。最大規模の地震は 7 月 9 日 18 時 05 分に有明海で発生した M4.5 の地震（最大震度 4）である。発震機構は、南北方向に張力軸を持つ正断層型である。大分県中部（領域 a 1）の活動は低下した。

7 月中に震度 1 以上を観測した地震は 114 回^{※1}（最大震度 4：1 回、最大震度 3：8 回、最大震度 2：19 回、最大震度 1：86 回）発生した。

今回の一連の地震活動により、死者 81 人、負傷者 2,054 人、住家全壊 8,549 棟などの被害が発生した（8 月 1 日 10 時 00 分現在、総務省消防庁による）。

※1 2016 年 7 月 31 日現在の速報値であり、後日の調査で変更されることがある。

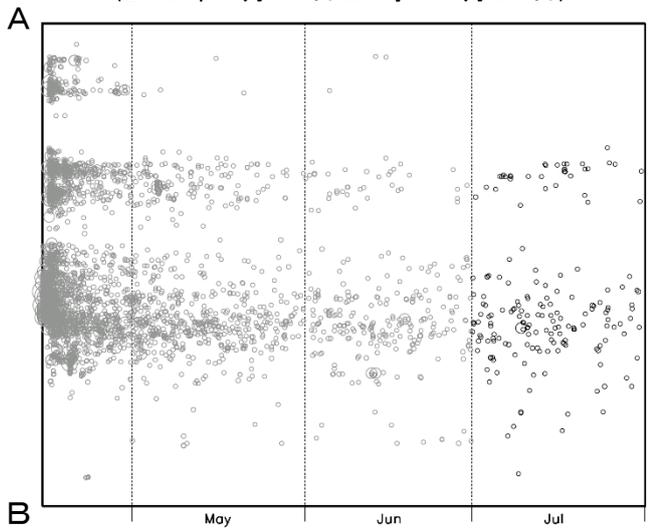


M6.0 以上の地震と各領域で最大規模の地震（7 月の地震は震度 4 以上を観測した地震）に吹き出しをつけている。

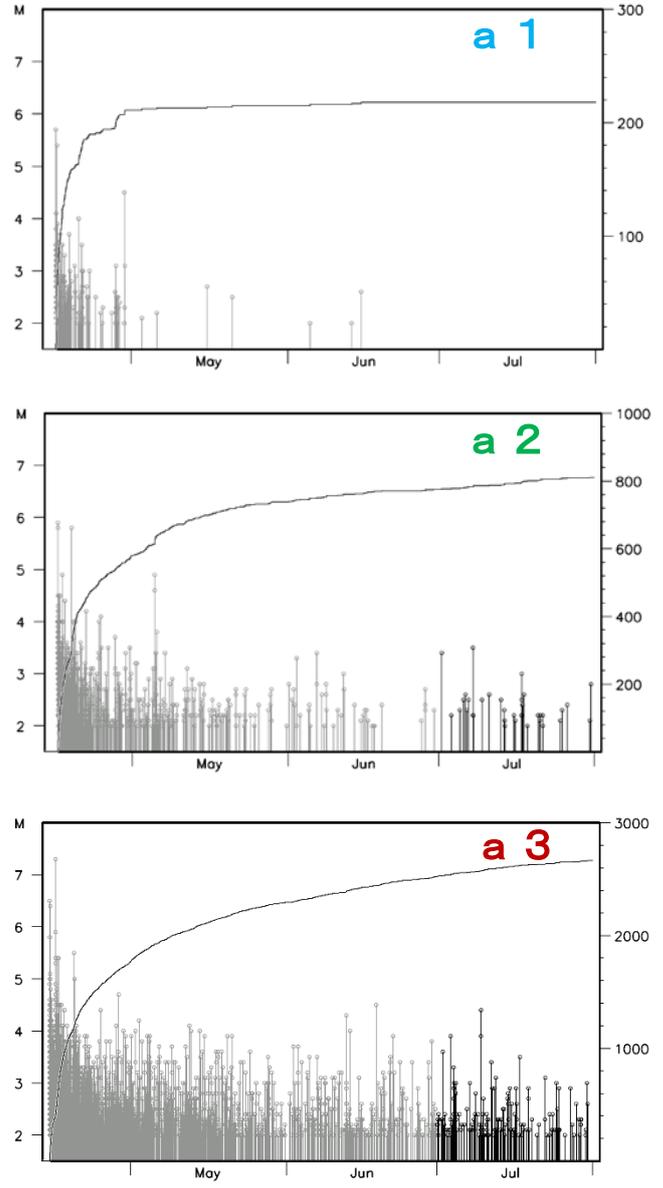
※2 4 月 14 日 21 時以降は未処理のデータがある。

※3 M7.3 の地震の発生直後に発生したものであり、M の値は参考値。

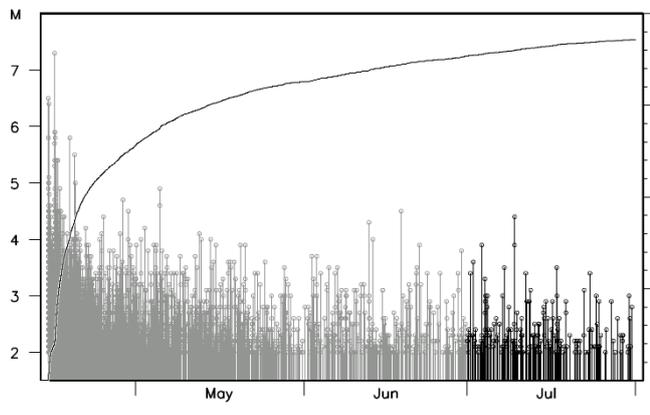
領域 a 内の時空間分布図※² (A-B 投影)
(2016 年 4 月 14 日 21 時 ~ 7 月 31 日)



領域 a1, a2, a3 内の M-T 図及び回数積算図※²
(2016 年 4 月 14 日 21 時 ~ 7 月 31 日)



領域 a 内の M-T 図及び回数積算図※²



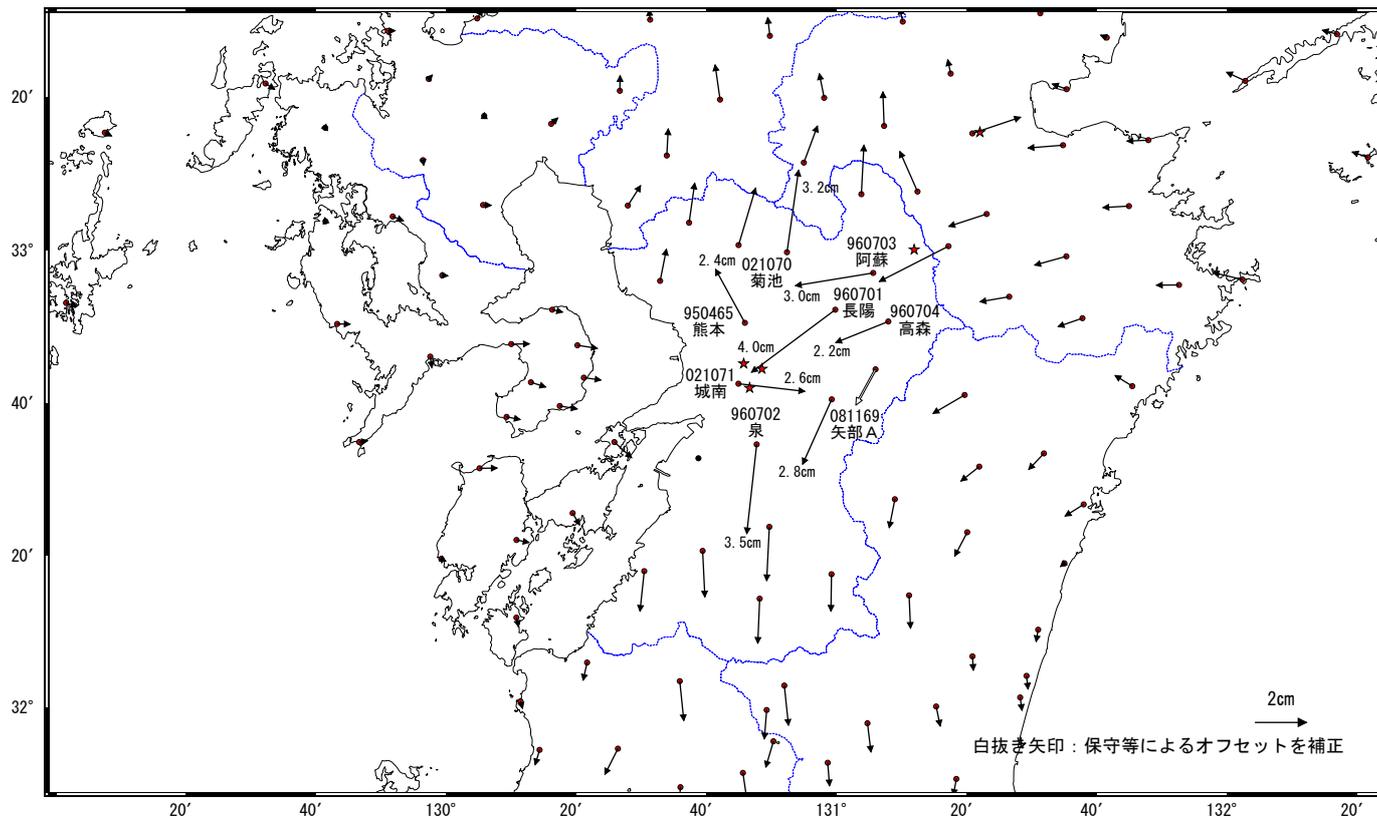
図は、震源の分布具合や活動の盛衰に着目するため、M5.0 未満の地震は自動処理により計算した震源 (計算誤差の大きなものを含む) を表示

平成28年(2016年)熊本地震(4月16日 M7.3)の余効変動(1)

この地震後に地殻変動が観測されている。

基準期間: 2016/04/17~2016/04/17 [F3: 最終解]
比較期間: 2016/07/28~2016/07/30 [R3: 速報解]

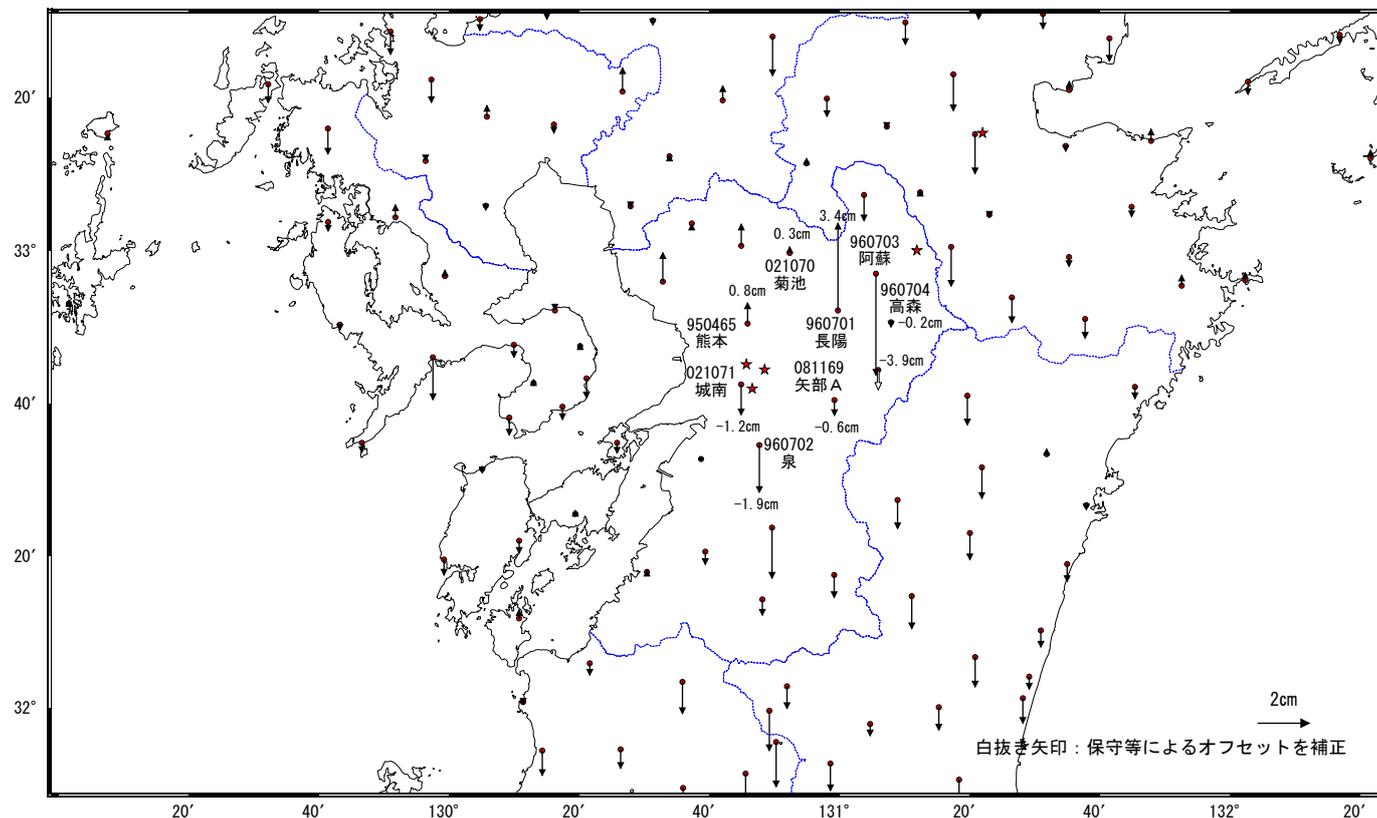
地殻変動(水平)



★ 固定局: 三隅(950388)

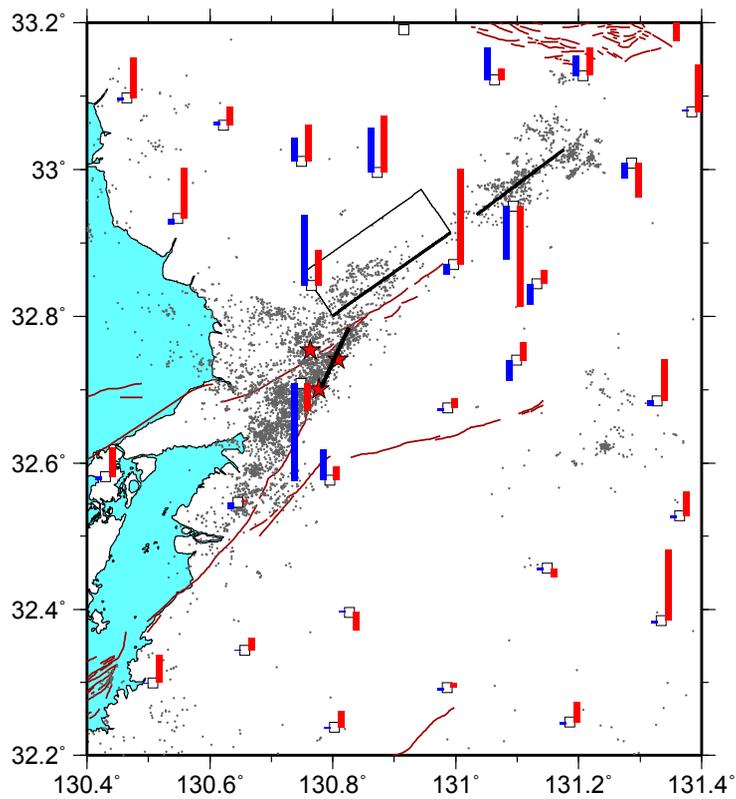
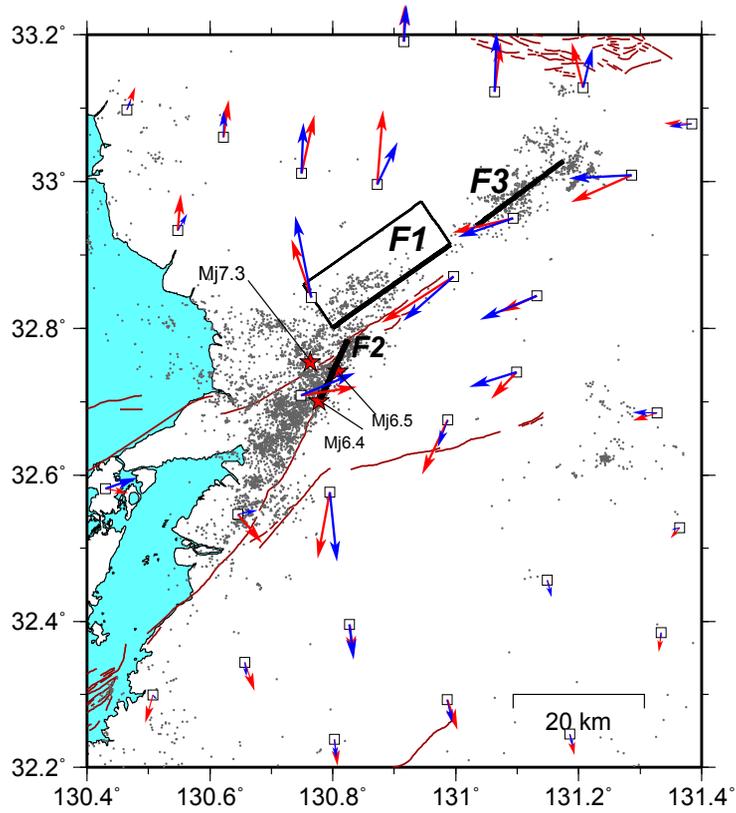
基準期間: 2016/04/17~2016/04/17 [F3: 最終解]
比較期間: 2016/07/28~2016/07/30 [R3: 速報解]

地殻変動(上下)



★ 固定局: 三隅(950388)

熊本地震余効変動モデル(暫定)



断層パラメータ

※位置は断層左上端

断層	経度 [°]	緯度 [°]	深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	滑り角 [°]	すべり量 [m]	M _w
F1	130.992 (0.025)	32.915 (0.021)	13.3 (7.3)	21.9 (6.3)	28.1 (8.8)	235	73.7 (19.2)	163.1 (28.9)	0.2 (0.8)	6.31
F2	130.826 (0.011)	32.784 (0.016)	8.5 (3.3)	9.9 (3.2)	5.1 (4.4)	205	86.7 (8.3)	-175.3 (16.0)	1.8 (0.7)	6.22
F3	131.176 (0.022)	33.027 (0.017)	3.2 (6.3)	16.5 (7.5)	5.8 (6.1)	233.5 (5.9)	88.6 (8.4)	155.2 (27.8)	0.3 (0.6)	5.89

重点検討課題の検討

「余効変動と粘弾性

—日本列島広域地殻活動予測に向けて—」

第 212 回地震予知連絡会 重点検討課題

「余効変動と粘弾性 ―日本列島広域地殻活動予測に向けて―」

コンビーナ 京都大学大学院理学研究科 平原和朗

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生から 5 年以上が経過した。今回の地震と同規模と思われる 869 年貞観地震発生前およびその後の 887 年仁和南海地震に至る日本列島における地震火山活動と現在の状況との比較や、2004 年スマトラ沖地震発生後 10 年以上も継続する周辺での地震火山活動を考えると、東北地方太平洋沖地震が日本列島の地震火山活動に及ぼす現在及び今後に渡る影響を評価する必要がある。こういった視点から、第 209 回重点検討課題では、「東北地方太平洋沖地震がもたらす広域地殻活動」を取り上げ、日本列島全域から北東アジアへ至る地震時地殻変動、および現在なお広域的に継続しているその余効変動を議論し、広域的な地震活動等を含む地殻活動の変化について整理した。その趣旨説明には、「ここでは余効変動の原因には言及せず、結果として広域的にもたらされたひずみ・応力変化の特徴と地震活動等地殻活動の変化を整理することで、次回に予定される広域変動の将来予測とその影響に関する議論につなげていきたい。」とある。

そこで、本重点検討課題では、地震後に生じるゆっくりとした地殻変動である余効変動とその主要因である粘弾性緩和について、今後の地殻活動予測の観点から議論する。

余効変動の一要因として、断層の延長上や周辺で生じる地震時すべりと同じ向きを持つ余効すべりが挙げられる。東北地方太平洋沖地震により、陸域から日本海溝にかけて東向き大きな地震時地殻変動が生じ、その後余効すべりから期待されるように東方への余効変動が生じた。ところが、大すべり域直上の海底は逆の西方への変動を示した。これは地震後すぐに断層面が固着して海底を西方へ変動させた可能性を示し、当初多くの研究者を悩ませた。しかし、上部マントルは弾性応答に加えて地震後遅れて変動し応力を緩和させる流動特性を持つ粘弾性媒質から成り、地震により生じた上部マントル内でのゆっくりとした流動を考えると説明がつくことが分かった。教科書にも載っている話であるが、多くの研究者にとって実際に目にしたのは初めてであった。このように余効変動は主として余効すべりと粘弾性緩和から生じており、両者を同時に考える必要がある。

まず、こういった弾性と粘弾性体との相違や、余効すべりや粘弾性緩和はどれくらいの期間継続し（時定数）、それらは何によって決まるのかといった基礎的事項を、簡単なモデルにより紹介する。次に、東北地方太平洋沖地震震源域とその周辺、および日本列島広域で観測された水平・上下余効変動の複雑な時空間変動パターンを説明しようとするモデル、すなわち沈み込むプレートを含む上部マントルや内陸地殻の不均質構造までも考慮した様々な 3 次元不均質粘弾性モデルの構築と余効すべりの推定研究を紹介する。これらの観測とモデル研究の現状を整理し、日本列島広域地殻活動予測に向けてどういった取り組みが必要かを議論したい。

話題提供者〔敬称略〕

1. 余効変動と粘弾性 ―基本的理解―

京都大学大学院理学研究科 平原 和朗

2. 東北地方太平洋沖地震の余効変動 ―海域における観測と粘弾性モデル―

海洋研究開発機構 飯沼 卓史

3. 不均質岩石レオロジーを考慮した東北沖地震余効変動解析

東北大学 武藤 潤

4. 2011年東北沖地震後の地殻変動データを用いた粘性構造と余効すべりの推定

東京大学地震研究所 橋間昭徳

5. 東北地方太平洋沖地震の粘性緩和による変動と粘性構造の不均質の重要性

国土地理院 水藤 尚

6. 日本列島とその周辺の3次元粘弾性不均質モデル構築に向けて

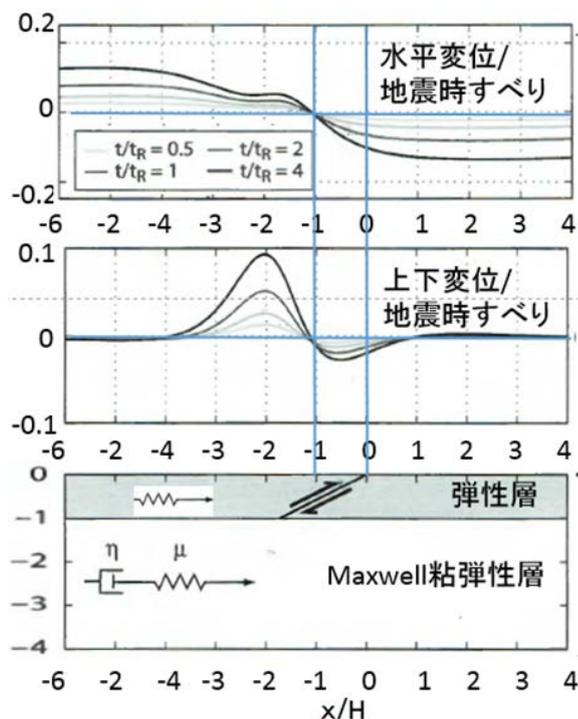
海洋研究開発機構 堀 高峰

余効変動と粘弾性 —基本的理解—

京都大学大学院理学研究科 平原和朗

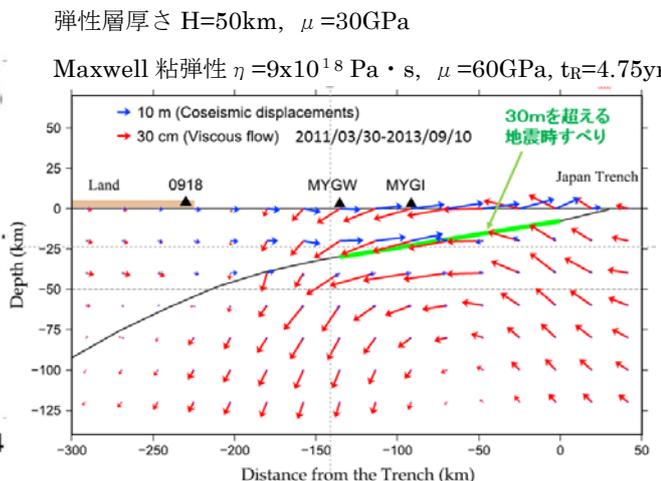
地震後に観測されるゆっくりした地殻変動（余効変動）の発生要因として、1)間隙弾性反発 (poroelastic rebound :PE)、2)余効すべり (afterslip)、3)粘弾性緩和 (viscoelastic relaxation) が挙げられる。1)は、間隙流体を含む多孔質弾性体中で生じる変動で、地震時に圧縮（伸張）された領域では、地震後に間隙流体が流出（流入）し、収縮・沈降（伸張・隆起）する。観測された時定数は、週～月で、変動は流体拡散に支配され、その流体拡散係数は透水係数/流体粘性率に比例する。2)は、岩石の摩擦則である速度状態依存則を考えると、震源域（速度弱化域 $a \cdot b < 0$ ）で生じた地震時すべりにより震源域延長部（速度強化域 $a \cdot b > 0$ ）で励起される地震後のゆっくりすべりによる変動である。観測されている時定数は、月～年であり、対数時間依存性を示す。3)は、地殻下部や上部マントルの粘弾性層に地震時応力により励起された流動により引き起こされる地震後に観測される広域変動である。観測された時定数は、年～数十年である。

東北地方太平洋沖地震では、断層および断層周辺の多孔質弾性体構造（間隙率分布や透水率構造等）が不明で、また時定数が短く変動が断層周辺に限られることもあり、1)については研究が少なく、主として2)と3)に関する研究が行われている。ここでは、海底で観測された大すべり域直上での地震時変動とは逆向きの西向き余効変動に関連して、粘弾性媒質中での流動について、弾性層と Maxwell 粘弾性（バネとダッシュポットの直列モデル）層から成る2層成層モデルを示す。左下図は、Segall(2010)の教科書に載っている、厚さ H の弾性層中での逆断層すべりによる地表での4時刻 ($t/t_R = 0.5, 1, 2, 4$; $t_R = \eta$ 粘性率/ μ 剛性率)での地殻変動を表す。断層直上で断層すべりによる地震時変動と逆向きの変動が現れているのが分かる。右下図は、Yamagiwa et al.(2015)により推定された、弾性・粘弾性2層構造モデルによる、東北地方太平洋沖地震時（青矢印）と余効変動（赤矢印）を2次元断面に投影したものである。粘弾性層に励起された流動により断層直上で地震時変動と逆向きの変動が生じていることが分かる。



Segall(2011) Fig.6.21 を改変

弾性層厚さ $H=50\text{km}$, $\mu=30\text{GPa}$
 Maxwell 粘弾性 $\eta=9 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\mu=60\text{GPa}$, $t_R=4.75\text{yr}$



Yamagiwa et al.(2015) Fig.4 を改変

東北地方太平洋沖地震の余効変動

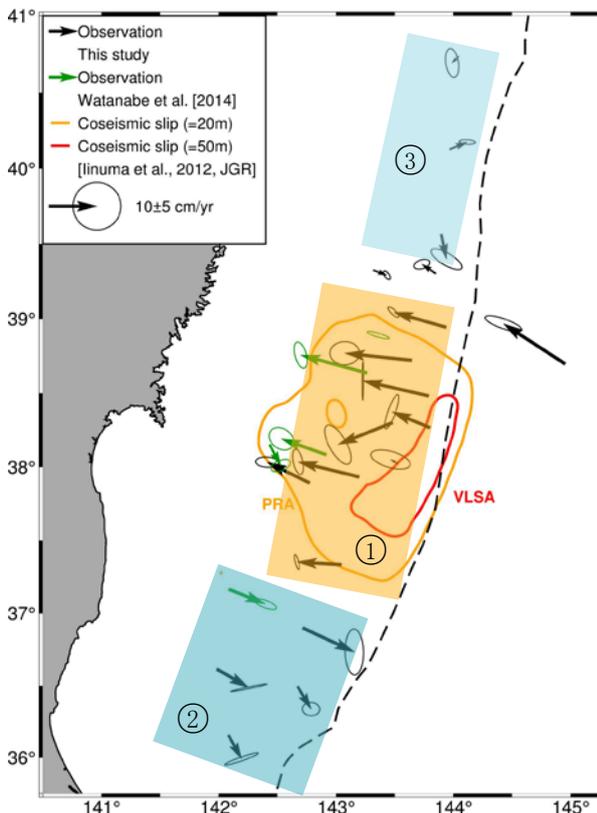
―海域における観測と粘弾性モデル―

飯沼卓史¹, 富田史章², 木戸元之², 太田雄策², 日野亮太², 長田幸仁²

¹ 海洋研究開発機構, ² 東北大学

東北地方太平洋沖地震後に新規に設置した GPS・音響測距結合方式の海底地殻変動観測点(20 点)における、2012 年 9 月から 2015 年 11 月までの期間の変位速度を、各観測点での 4~6 回のキャンペーン観測をもとに明らかにした。2011 年 4 月から 12 月までの海陸の観測データをもとに構築された粘弾性構造モデルを用いて得られる、各観測点における変位速度の予測値と比較したところ以下の特徴がみられた。

- ① 地震時に大きなすべりが発生した宮城県～福島県の沖合の点では、観測された変位速度は、粘性緩和によって生じる変位速度の予測値と概ね同程度の大きさの陸向きとなった。
- ② 福島県南部から茨城県の沖合にかけては、粘弾性構造モデルから期待されるものよりも有意に大きな海溝向きの変位速度が観測された。
- ③ 岩手県から青森県の沖合においては、粘性緩和による変位速度の予測値と観測値との間に有意な差は見られない。



これらの特徴から、次のことが示唆される。

- ① 地震時に大きなすべりが発生した領域においては、依然粘性緩和が余効変動の主要因である。
- ② 福島県南部から茨城県の沖合のプレート境界浅部では余効すべりが発生しており、これも継続中である
- ③ 岩手県から青森県の沖合においては、プレート境界浅部において顕著な余効すべりが発生してはいない

また、宮城県北部沖合の観測点においては、観測された陸向きの変位速度は、粘弾性構造モデルから期待されるものよりも大きく、この差異は、地震時すべりモデルを改訂することで解消できる可能性がある。

不均質岩石レオロジーを考慮した東北沖地震余効変動解析

1. 稠密観測による内陸の局所的余効変動

データ：国土地理院（GEONET）、海上保安庁（図 1 灰矢印、図 3 青点）と東北大学のデータ（図 1 白矢印、図 3 赤点）を使用
 期間：2011/4/23 ~ 12/10
 解析：本震時の最大すべり域を通る宮城—山形の測線を作成

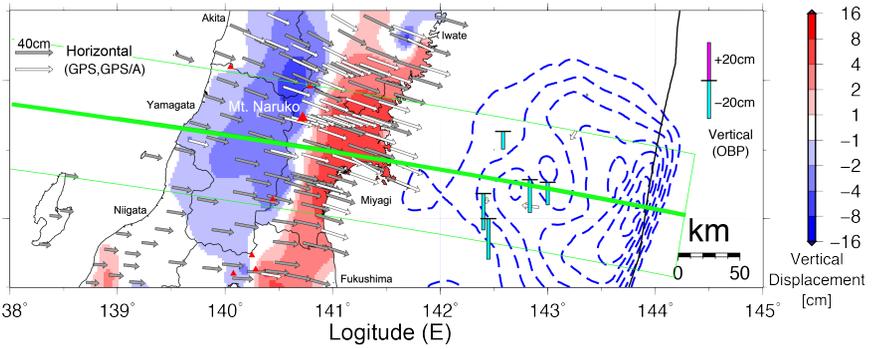


図 1. 余効変動観測結果

- 観測結果（図 1）
- ・ 水平成分：海底で西向き、陸域は全般東向き
 - ・ 垂直成分：海底は沈降、陸域は前弧から火山フロントで隆起、背弧側で沈降
 - ・ 鳴子火山周辺（図 3 の水平位置 $x = 300$ km）で局所的な変動

2. 2次元有限要素法による解析

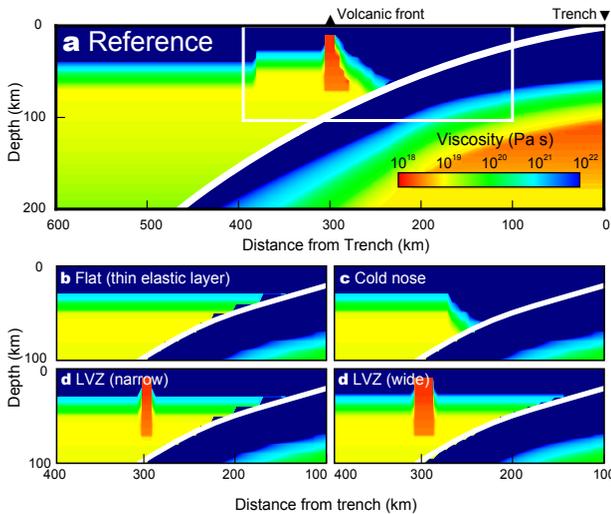


図 2. 内陸不均質粘弾性モデル

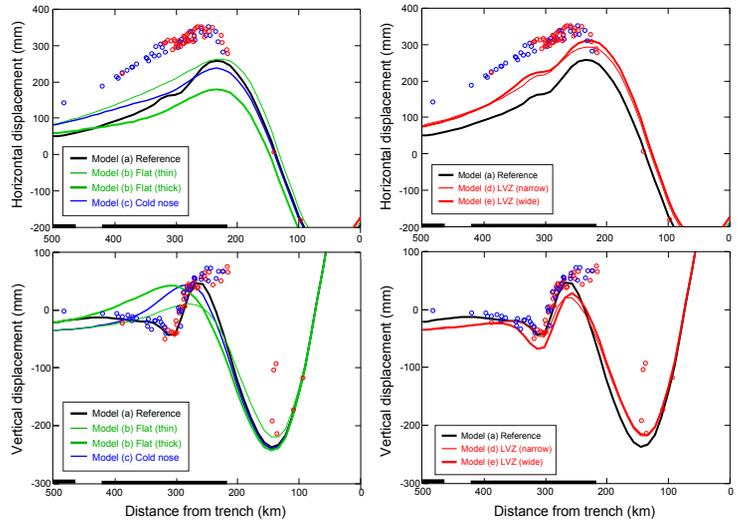


図 3. 内陸の粘弾性緩和変位

内陸不均質粘弾性モデル（図 2）と有限要素法による解析
 弾性層厚さと前弧の構造による影響

- ・ 水平成分：東向き変位は弾性層厚に依存（図 3 左上）
- ・ 垂直成分：海底で西向き、陸域は全般東向き（図 3 左下）

火山フロント（鳴子火山）直下の低粘性体の影響

- ・ 水平成分：火山フロントで変位大（図 3 右上）
- ・ 垂直成分：局所的沈降を再現（図 3 右下）
 （水平幅 10 km, 上端深さ 10 km, 粘性率 $\sim 10^{18}$ Pas を拘束）

3. 余効すべりの逆解析

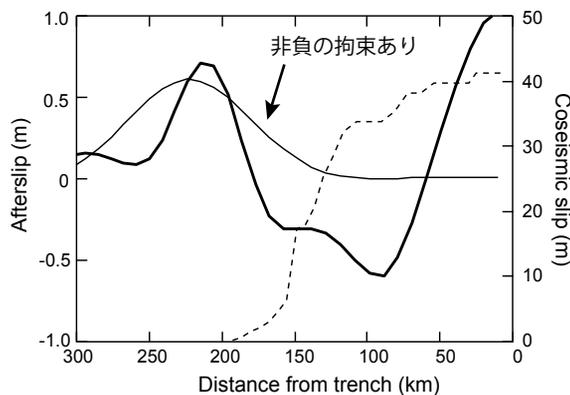


図 4. 余効すべりの推定

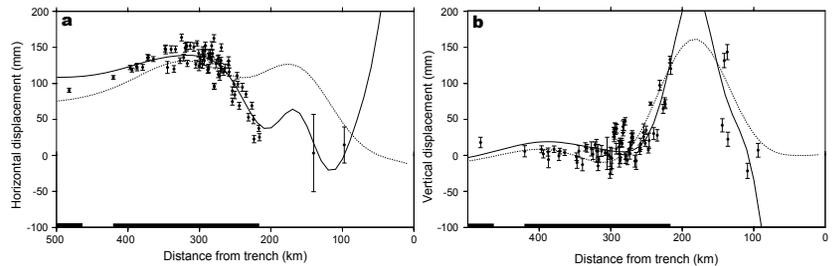


図 5. 観測とモデルとの残差：水平（左）、垂直（右）変動

粘弾性緩和による変位と観測変位との差は、余効すべりによる変位として、すべり量を逆解析により推定（図 4）

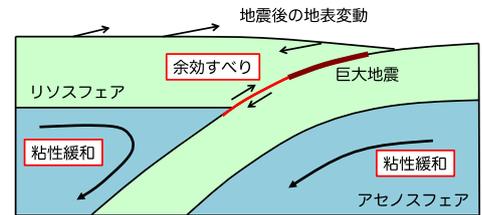
- ・ 余効すべりは、本震時のすべり下端で 0.6 m ほど
- ・ 観測との残差：非負の拘束をかけたモデルは前弧側の陸域に残差残る（図 5 点線）が拘束をかけないモデルは観測をよく説明（実線）

2011 年東北沖地震後の地殻変動データを用いた粘性構造と余効すべりの推定

橋間 昭徳(東京大学地震研究所)

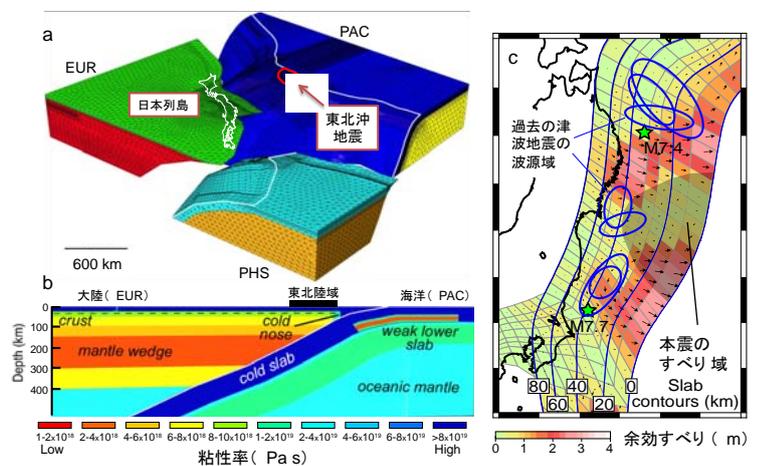
巨大地震後の地殻変動はどのようにして起こるのか?

地震後の地殻変動のメカニズムとして余効すべりと粘性緩和の 2 つが推定されてきた(右図)。地殻変動の水平成分はどちらのメカニズムでも説明しうる。一方、上下成分(隆起沈降パターン)の十分な説明は、まだなされていない。水平・上下成分をともに説明することが、メカニズムの解明の鍵となる。しかし、沈み込み帯の粘性構造は詳しくはわかっていない。



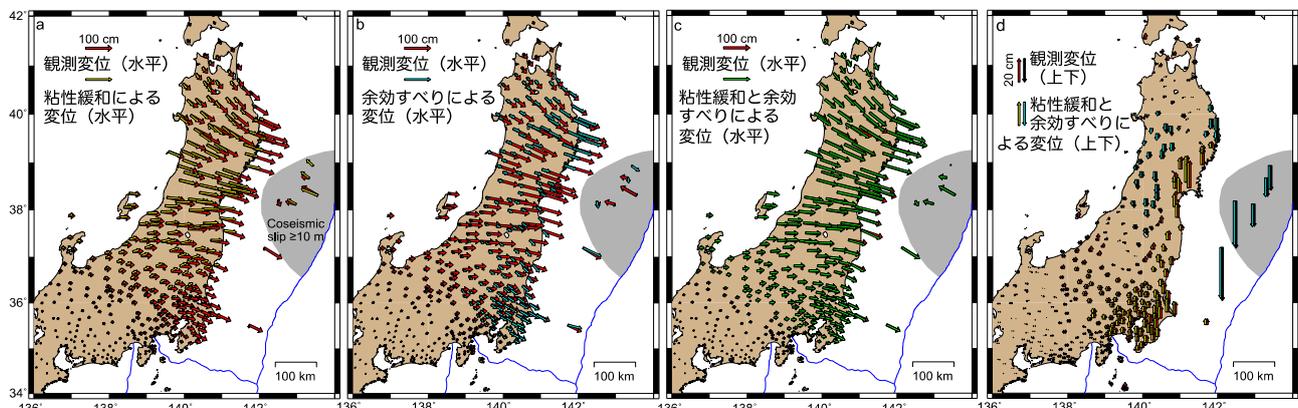
有限要素モデルによる地殻変動解析

現実的なプレート境界形状を取り入れた有限要素モデルを構築した(右図 a)。このモデルを用い、様々な粘性構造を仮定して変位を計算し、観測変位を最も説明する粘性構造を求めた。右図 b の赤色で示した低粘性領域が、大陸側の深さ 150-300 km と、沈み込む海洋プレートの屈曲部分の底部に存在し、粘性緩和を起こす。観測変位と計算変位の残差から余効すべり分布を求めた。余効すべりは本震すべりの南北に見られる(右図 c)。



地殻変動に対する粘性緩和と余効すべりの寄与

粘性緩和は東北南部(下図 a)、余効すべりは関東と東北北部(下図 b)の変位に寄与する。両者を合わせると、全域の観測変位を水平・上下成分ともに説明することができる(下図 c,d)。

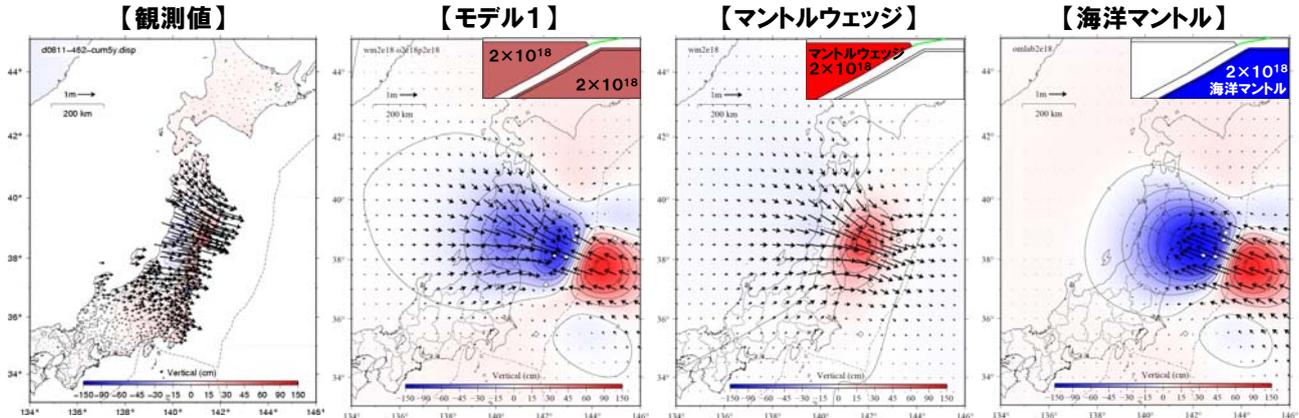


このように、現実的な粘性構造とすべり分布に基づく地殻変動モデルにより地殻変動データを説明できる。このモデルを発展させることで、広域的な地殻変動・地震活動の予測に資する。

東北地方太平洋沖地震の粘性緩和による変動と粘性構造の不均質の重要性

粘性緩和による変動の特徴と粘性構造の不均質

- ◆なぜ粘性構造(マントルウェッジ、海洋マントル、LAB)が必要なのか？
- ◆これらの粘性構造はどの観測量に対して効くのか？



【モデル1】 一様な粘性構造

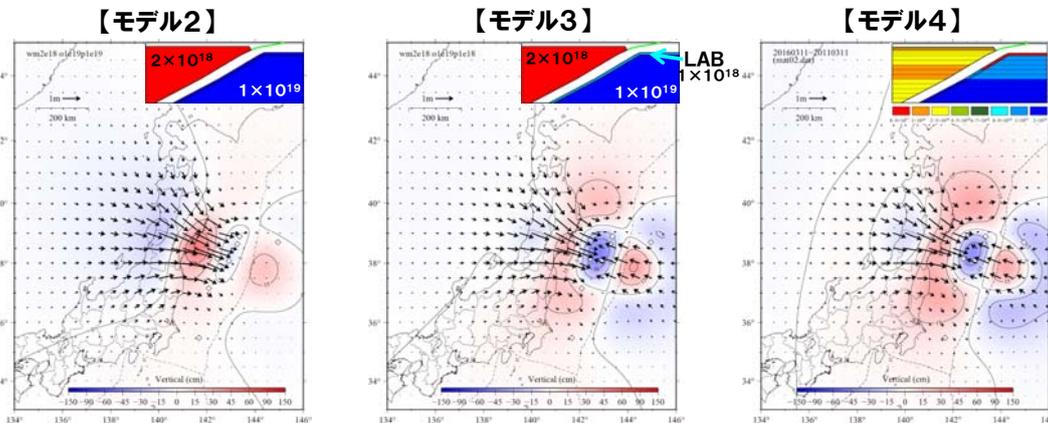
- ⇒ 観測値(上下変動)との乖離が大きい
- ⇒ 粘性構造の不均質の必要性

【マントルウェッジ】 ⇒ 東向きの変動、太平洋側の隆起

【海洋マントル】 ⇒ 西向きの変動、海域及び広域的な沈降

【モデル2】 適切な粘性率の値(過去の研究から)

- マントルウェッジ 10^{18} オーダー、海洋マントル 10^{19} オーダー
- ⇒ 海域の西向きの変動・沈降が小さくなる



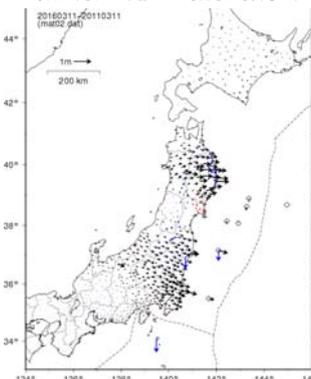
【モデル3】 海洋プレート下の低粘性領域(LAB)の存在

- ⇒ 西向きの変動、海域の沈降を説明
- ⇒ 遠方(中日本から西日本)の水平変動の向きがあわない

【モデル4】 粘性構造の深さ依存性

- ⇒ 遠方(中日本から西日本)の変動を説明

【モデル4】 残差(観測値-粘性緩和)



※粘性緩和による変動の算出には、マントルウェッジ、海洋マントル、LABの粘性率の違い、粘性率の深さ依存性等の粘性構造の不均質が重要

◆現状の最適モデルでは、粘性緩和によって

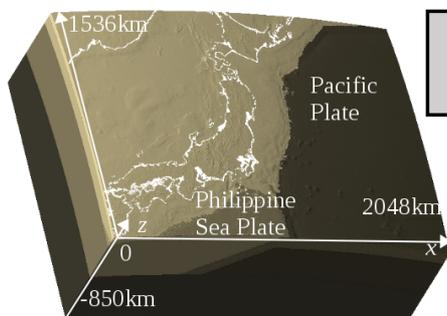
- ・東北地方中部の水平変位の大部分は説明される
- ・東北地方北部と南部、関東地方では、東向きの変位が残る
- ・同地域では東西伸張のひずみが卓越
- ・東北地方北部と南部太平洋側で沈降、牡鹿半島で隆起が残る

余効すべりの影響？

基盤となりうるシミュレーション&統合解析ツール

データ解析: 高詳細FEMそのものを用いたインバージョン

- 地殻変動観測値と計算値の差のノルムの、粘性率と断層すべり量に関する最小化問題として逆解析を定式化

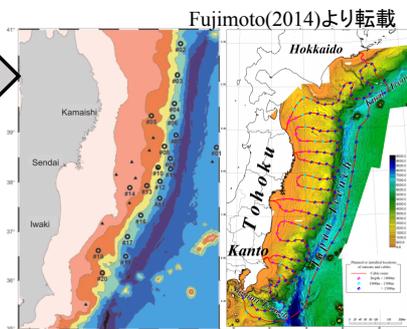


日本列島の高詳細有限要素モデル (38億自由度)

大規模有限要素解析により
 地殻変動と目的関数勾配を計算
 勾配計算にアジョイント法使用

大自由度問題の繰り返し計算
 →京コンピュータでの計算用に
 高速かつスケラブルな解析
 手法を開発・実装

勾配法ベースの探索により
 粘性率と断層変位量を更新



GEONETに加え, SNETやGPS/A観測点
 での計算値を用いた双子実験を実施

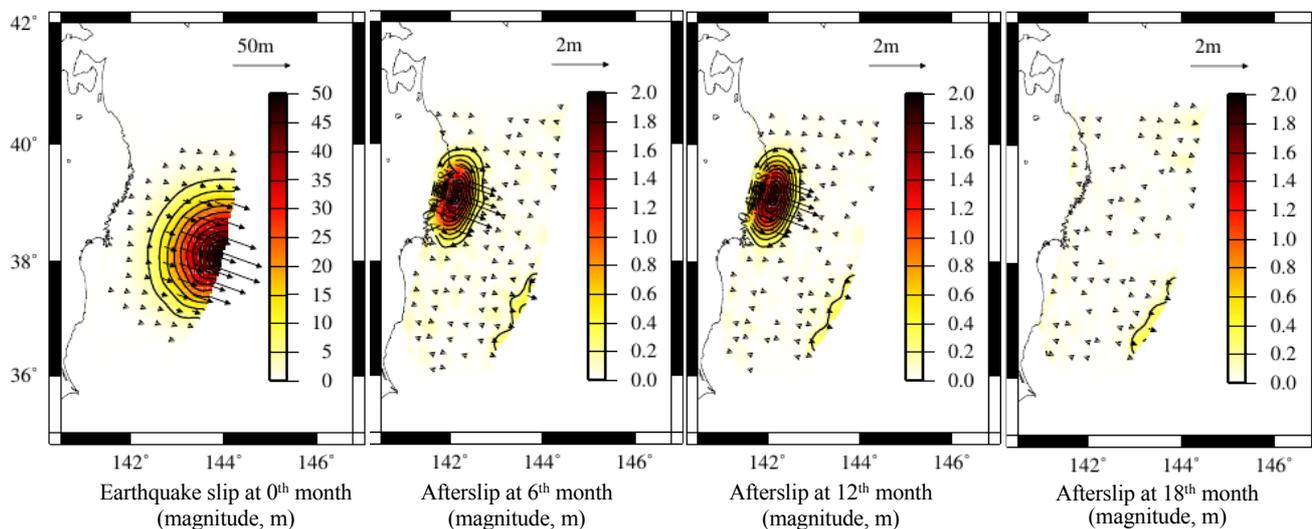
縣・他(2015)

高精度までVerificationの進んだ高詳細FEMでValidationを行えるように

数値実験による推定結果

Parameter	Viscosity (PaS)		
Name	true	Initial	estimated
η_1	5.000×10^{18}	1.000×10^{19}	5.122×10^{18}
η_2	5.000×10^{18}	1.000×10^{19}	4.801×10^{18}
η_3	1.000×10^{18}	1.000×10^{19}	1.000×10^{18}

- パラメタは粘性率、すべり分布ともに全体としてよく推定できている
- ただし、データが不十分な海溝軸付近で与えていない余効すべりが現れている



第 213 回地震予知連絡会 重点検討課題

「南海トラフ地震」

コンビーナ 名古屋大学大学院環境学研究科 山岡耕春

南海トラフでは過去 100 年から 200 年間隔で巨大地震が発生してきたとされている。南海トラフの地震は、人口密度が高く、産業の集積している西日本の広い範囲に被害を与える可能性の高いものであり、首都圏直下地震とならんで我が国の中で地震防災上もっとも関心の高い地震である。直近の昭和の南海地震から今年で 70 年であり、次の地震の切迫性も議論されている。また地震予知連絡会における重点検討課題として第 192 回（2011 年 8 月 22 日）に取り上げられてから 5 年が経過し、前回以降、2011 年 12 月に内閣府から最大規模の地震の想定が発表され、2013 年 5 月には地震本部から南海トラフの地震活動の長期評価の改定が公表された。このようなことから、最近の南海トラフ地震に関する研究成果を重点検討課題で取り上げ、議論を行いたい。

社会的には、次の南海トラフ地震がどのような地震なのか、どの程度切迫しているのか、短期的な予測はどの程度可能なのか、といった点に関心が高い。このような社会の関心に十分答えるためには、プレート境界面の強度分布、プレート境界域の物性分布などのような場に依存する量に加え、過去に発生した地震の滑り履歴を反映した直近の地震後の応力状態、さらにスロー地震などによるプレート境界面の応力・ひずみ分配過程について十分に正確に知る必要がある。この重点検討課題では南海トラフ域に関する上記の知見について、現時点での整理と検討を行うことを目的とする。すなわち、プレート境界地域の構造について、プレートの固着について、過去に発生した地震について、低周波地震・微動やスローイベントについて、ひずみ計・GNSS 等によるモニタリングについて、さらにそれらを総合したプレート境界地震発生シミュレーションの現状についての報告を受け、議論を行う。

平成28年8月22日

平成28年度第1回重点検討課題運営部会

平成28年度第1回重点検討課題運営部会報告

1. 平成28年度後期, 平成29年度前期重点検討課題の選定

平成28年度後期, 平成29年度前期重点検討課題4回分の地震予知連絡会重点検討課題名(予定)を選定した.

地震予知連	コンビーナ	課 題 名
第213回(2016/11)	山岡部会長	南海トラフ地震
第214回(2017/02)	松澤副会長	予測実験の試行03
第215回(2017/05)	篠原 委員	海域モニタリングの進展
第216回(2017/08)	平田 委員	首都圏直下地震(仮)