

## 2. 2. 6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

### 目 次

#### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
  - 1) 平成 25 年度
  - 2) 平成 26 年度
  - 3) 平成 27 年度
  - 4) 平成 28 年度
  - 5) 平成 29 年度
  - 6) 平成 30 年度
  - 7) 平成 31 年度（令和元年度）
  - 8) 令和 2 年度
- (e) 令和 2 年度業務目的

#### (2) 令和 2 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 1) 最適すべりモデルとモデル変位応力場
  - 2) 2011 年東北沖地震後の応力変化
  - 3) 東北地方西岸の震源断層における応力変化
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

#### (3) 8 ヶ年の成果

- (a) 業務の成果
  - 1) 九州、中国地方の震源断層における  $\Delta CFF$
  - 2) 北海道の震源断層における  $\Delta CFF$
  - 3) 東北地方の日本海沿岸の震源断層における  $\Delta CFF$
- (b) 結論ならびに今後の課題
- (c) 引用文献

## (1) 業務の内容

### (a) 業務題目

#### 2.6 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備

### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐藤比呂志
	准教授	石山 達也
	特任助教	橋間 昭徳
	特任研究員	加藤 直子
地震予知総合研究振興会	主任研究員	岩崎 貴哉
University of Southern California	Associate Professor	David Okaya

### (c) 業務の目的

海域・海陸統合構造調査などによって得られるデータ（サブサブテーマ 2.2、2.3）や、構成岩石モデル（サブサブテーマ 2.5.3）から得られるレオロジー特性を反映させ、より現実的な日本海周辺域の構造を反映した構造モデルを構築する。この構造モデル内に、断層の形状モデル（サブサブテーマ 2.5.1）を取り入れ、プレート境界での変位に伴う内陸の断層面上での応力変化を求めることにより、海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備を行う。

### (d) 8カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

#### 1) 平成 25 年度：

構成岩石の暫定モデル（サブサブテーマ 2.5.3）に基づいて、日本海海域周辺のリソスフェア構造を日本列島の三次元モデルに反映させるための、デジタルデータを作成した。

#### 2) 平成 26 年度：

日本海および沿岸域の断層形状モデル（サブサブテーマ 2.5.1）と構成岩石の初期モデル（サブサブテーマ 2.5.3）に基づいて、日本海海域周辺の粘弾性モデル（初期モデル）を作成し、東北地方太平洋沖地震後の応力緩和に対応した断層面に作用するクーロン応力変化を求めた。

#### 3) 平成 27 年度：

平成 26 年度に作成した粘弾性モデル（初期モデル）の入力信号として、2011 年東北地方太平洋沖地震以前の巨大地震も合わせて考慮し、巨大地震の発生前と発生後の内陸断層のクーロン応力変化を共に評価した。

4) 平成 28 年度 :

平成 27 年度までに作成した粘弾性モデルの想定すべり領域を拡張し、南海トラフや千島海溝における巨大地震による応力変化の計算を可能にした。

5) 平成 29 年度 :

平成 28 年度までに作成した粘弾性モデルに基づいて、南海トラフ等のプレート境界プロセスによる日本海南部および西南日本沿岸に分布する震源断層面上のクーロン応力変化を検討した。

6) 平成 30 年度 :

千島弧のすべり欠損の増大に伴う内陸・海域の断層群周辺の応力変化を求め、プレート境界での応力蓄積に伴う内陸での地震の起こりやすさについて、定量的に明らかにした。

7) 平成 31 年度 (令和元年度) :

東北地方太平洋沖地震後の粘性緩和に伴う応力変化と、千島海溝・南海トラフ沿いのすべり欠損の増大に伴う応力蓄積の効果を取り入れた上盤プレート内の地震の発生のし易さについて評価を試みた。

8) 令和 2 年度 :

前年度までに検討した千島海溝、日本海溝、南海トラフの個々のプレート境界過程による応力蓄積の知見を総合し、本プロジェクトの断層モデルを用いて、今後数十年間の日本海と沿岸域の上盤プレート内地震についての評価方法と問題点を取りまとめた。

(e) 令和 2 年度業務目的

前年度までに検討した千島海溝、日本海溝、南海トラフの個々のプレート境界過程による応力蓄積の知見を総合し、本プロジェクトの断層モデルを用いて、今後数十年間の日本海と沿岸域の上盤プレート内地震についての評価方法と問題点を取りまとめる。

**(2) 令和 2 年度の成果**

(a) 業務の要約

前年度までに検討した日本列島域の三次元有限要素モデル (FEM) により、千島海溝、日本海溝、南海トラフの個々のプレート境界過程 (プレート間固着) を統合して日本海海域の応力場を計算した。上記各プレート境界過程を矛盾なく統合するために、中間領域の伊豆衝突域ー相模トラフ、日本海溝ー千島海溝会合部の固着パターンを地殻変動データに矛盾しないように与え、FEM によって地殻変動を計算して GNSS 観測による変動パターンと矛盾のないように固着分布を設定した。最適モデルによる応力場を、日本海沿岸域の震源断層に投影し、断層面上のクーロン応力を計算した。

## (b) 業務の成果

現在、日本列島周辺で進行している主なプレート境界過程として、日本海溝における2011年東北沖地震までの固着、その破壊とその余効すべり、南海トラフ下の固着と琉球海溝の海溝後退、千島海溝下の固着があげられる。平成30年度までに、それぞれのプレート境界プロセスを国土地理院のGNSS観測網による測地データのインバージョンにより求めた。この際、アセノスフェアの粘弾性緩和の影響も考慮した。FEMおよび各プレート境界プロセスの詳細については、Freed et al. (2017)<sup>1)</sup>、Becker et al. (2018)<sup>2)</sup>、Hashima et al. (2016a, 2018, 2019)<sup>3,4,5)</sup> および平成26、27、29、30年度報告書<sup>6,7,8,9)</sup> に詳述されている。平成31年度(令和元年度)には、これらの効果を直接重ね合わせて、応力場に対する各プレート境界過程の相対的寄与を見積もった<sup>10)</sup>。これらの効果は各地域の状況に合わせて地域ごとに取り出したデータを用いて個別に見積もったものであるため、これらを単純に重ね合わせるとそれぞれの境界で現れる人為的な効果の影響が出てしまう。本項では、各プレート境界過程をなめらかに接続し、日本列島域の応力場を統一的に計算する。本研究では、伊豆・小笠原海溝における固着は簡単のため0とする。

上に挙げたプレート境界過程のうち、南海トラフと千島海溝の固着については、上記の固着分布をそのまま取り入れる。日本海溝の固着については、2011年東北沖地震までに続いた定常的な固着の積算が東北沖地震によるすべり分布と同じであったと仮定する。昨年度の計算では固着期間を500年として固着分布を逆算したが、その計算結果は過小評価であった。小規模(～M7)の地震発生や、東北沖地震発生数年前に見られたような固着の剥がれなどを考えれば、固着の程度は時間的にある程度のゆらぎがあったと考えるのが自然である。また固着の空間分布にも研究により幅がある。そこで、本研究では、簡単のため、固着分布のパターンは昨年度のものと同じくFreed et al. (2017)<sup>1)</sup>によることとするが、その量についてはいくつかの場合を計算してGNSSデータと矛盾のないものを選ぶことにする。

南海トラフの東では伊豆・小笠原孤の衝突と相模トラフの固着が起きている。昨年度の計算ではこれらの効果を考慮しなかったため、関東地方での応力が観測と異なり伸張的になり、その影響が北陸～新潟沖までおよんだ。伊豆・小笠原孤の島弧衝突の効果についてはHashima et al. (2016b, 2020)<sup>11,12)</sup>により定常的な固着を与えることで表現される。一方、相模トラフについてはNoda et al. (2013)<sup>13)</sup>によりGNSSデータインバージョンにより固着速度が推定された。本研究では、伊豆衝突域から相模トラフまで一様に与え、GNSSデータと比較してその量を決定する。

日本海溝と千島海溝の会合部については、既往研究としてNishimura et al. (2004)<sup>14)</sup>、Suwa et al. (2006)<sup>15)</sup>、Hashimoto et al. (2009, 2012)<sup>16,17)</sup> が挙げられ、この地域でも固着の進行が起きていることが指摘された。この地域でも固着の空間パターンは一定とし、GNSSデータとの比較によりその量を決定する。

震源断層にかかる応力成分は、断層における応力テンソル $\sigma_{ij}$ 、震源断層の法線ベクトル $n_i$ 、すべり方向ベクトル $v_i$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) を用いて表すことができる。外部からかかる応力による断層のすべりやすさの指標であるクーロン破壊関数 $\Delta CFF$  は以下の式で表される。

$$\Delta CFF = \tau_s + \mu\sigma_n \quad (1)$$

$\sigma_n$  は法線応力成分（正は伸張）、 $\tau_s$  は剪断応力成分、 $\mu$  は見かけの摩擦係数である。各応力成分はそれぞれ

$$\sigma_n = \sigma_{ij} n_i n_j, \quad \tau_s = \sigma_{ij} n_i v_j \quad (2)$$

と表される（総和規約を適用）。

震源断層としてはサブサブテーマ 2.5.1 で得られた東北地方西岸の矩形形状モデルを用いる。断層面にかかる応力は、断層面の中央における値で代表させる。プレート境界プロセスによる日本海沿岸域の応力場は 100 km 以上の長波長分布になるので、矩形断層上の位置による応力値の変化は無視できる。断層のすべり方向ベクトル  $v_i$  は、Wallace-Bott 仮説<sup>18, 19)</sup>に基づき、震源メカニズム解のカタログから求めた広域応力場<sup>20)</sup>による断層面上の最大剪断応力方向であると仮定する。見かけの摩擦係数  $\mu$  は多くの研究で標準的に用いられる値 0.4 を仮定する。

### 1) 最適すべりモデルとモデル変位応力場

前項で述べた方法により、各地域のすべり分布を検討した。最適モデルにおいては、日本海溝のすべり欠損速度は、昨年度報告書で用いたすべり欠損速度の 1.5 倍とした。また、伊豆衝突域-相模トラフにおけるすべり欠損速度を 3 cm/yr、日本海溝-千島海溝会合部におけるすべり欠損速度を 2 cm/yr とした。これらのすべり速度欠損分布を南海トラフと千島海溝の固着分布の影響と合わせて日本列島域の変位速度分布を計算したものを図 1 に示す。得られたモデル速度場は、基本的に北海道から九州まで、太平洋、フィリピン海プレートの沈み込みによって西側に押されるような動きを示す変位場を示す。これは細部には違いはあるものの、東北沖地震前の日本列島の変位速度場（Sagiya, 2000）<sup>21)</sup>の性質を再現できている。

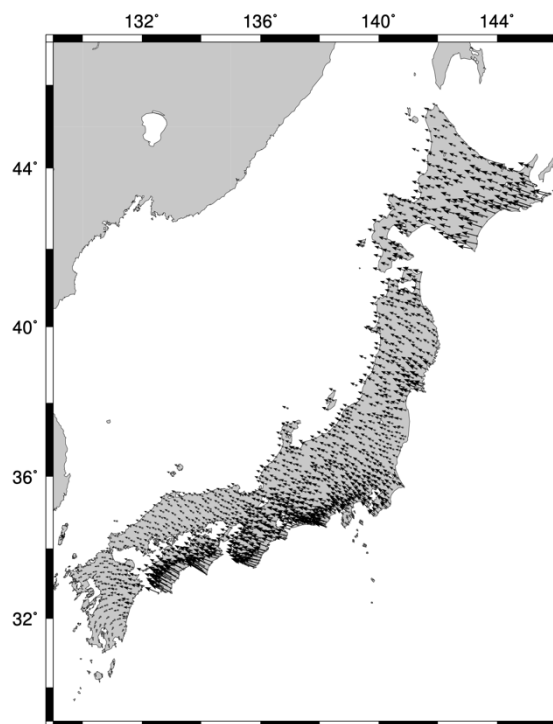


図 1 本研究モデルで計算した日本列島域の変位速度場。

図 2 に深さ 10 km における応力速度場を平均法線成分により示す。正の領域は体積膨張、負の領域は体積収縮的な応力速度場がかかっている。Sagiya (2000)<sup>21)</sup> の GNSS 観測による面積速度と比較すると、本研究の計算結果は日本海溝の固着域の南北、南海トラフの固着域と伊豆衝突域の境界などで、伸張的な応力速度が卓越している。この点に関しては、今後の改善が必要である。

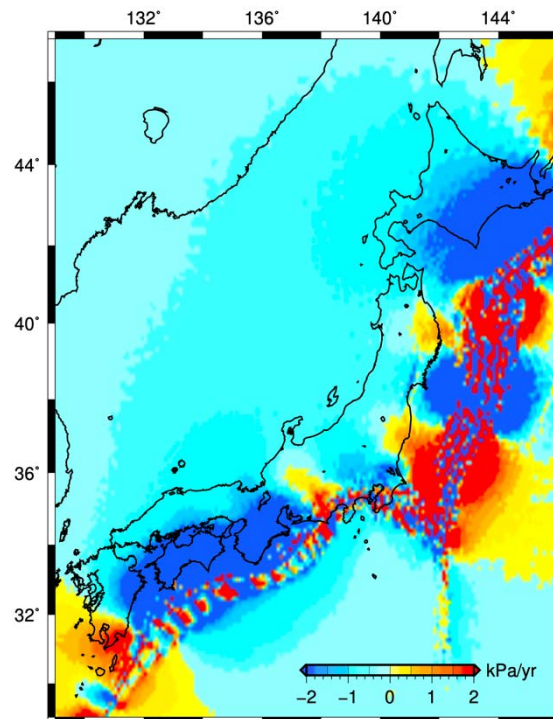


図 2 日本列島域の応力速度場。カラスケールは平均法線応力速度。黄色～赤は伸張的、水色～青は圧縮的。

## 2) 2011 年東北沖地震後の応力変化

図 3 に東北沖地震後の応力の時間変化を示す。東北沖地震直前の応力状態を 0 とする。ここでは 2003 年十勝沖地震の余効変動の効果は無視し、千島海溝は十勝沖地震前の固着状態に戻っていると仮定した。東北沖地震の影響は、時間とともに東北地方から西方の日本海海域に伝播していく一方で、北海道、西南日本は特に影響されず、千島海溝、南海トラフの固着に伴う応力蓄積が進展していく。この結果は東北地方から新潟、北陸沖まで数十年にわたり東北沖地震の影響が確実に残ることを示している。

この結果は昨年度に示した結果と基本的に同じである。固着による応力蓄積の設定にかかわらず、巨大地震の後は十年スケールでその影響が卓越するというを示している。

## 3) 東北地方西岸の震源断層における応力変化

以上、求めてきた応力場を震源断層上に投影し  $\Delta CFF$  を計算する。ここでは、東北地方西岸の震源断層（サブサブテーマ 2.5.1）の時間変化を示す。

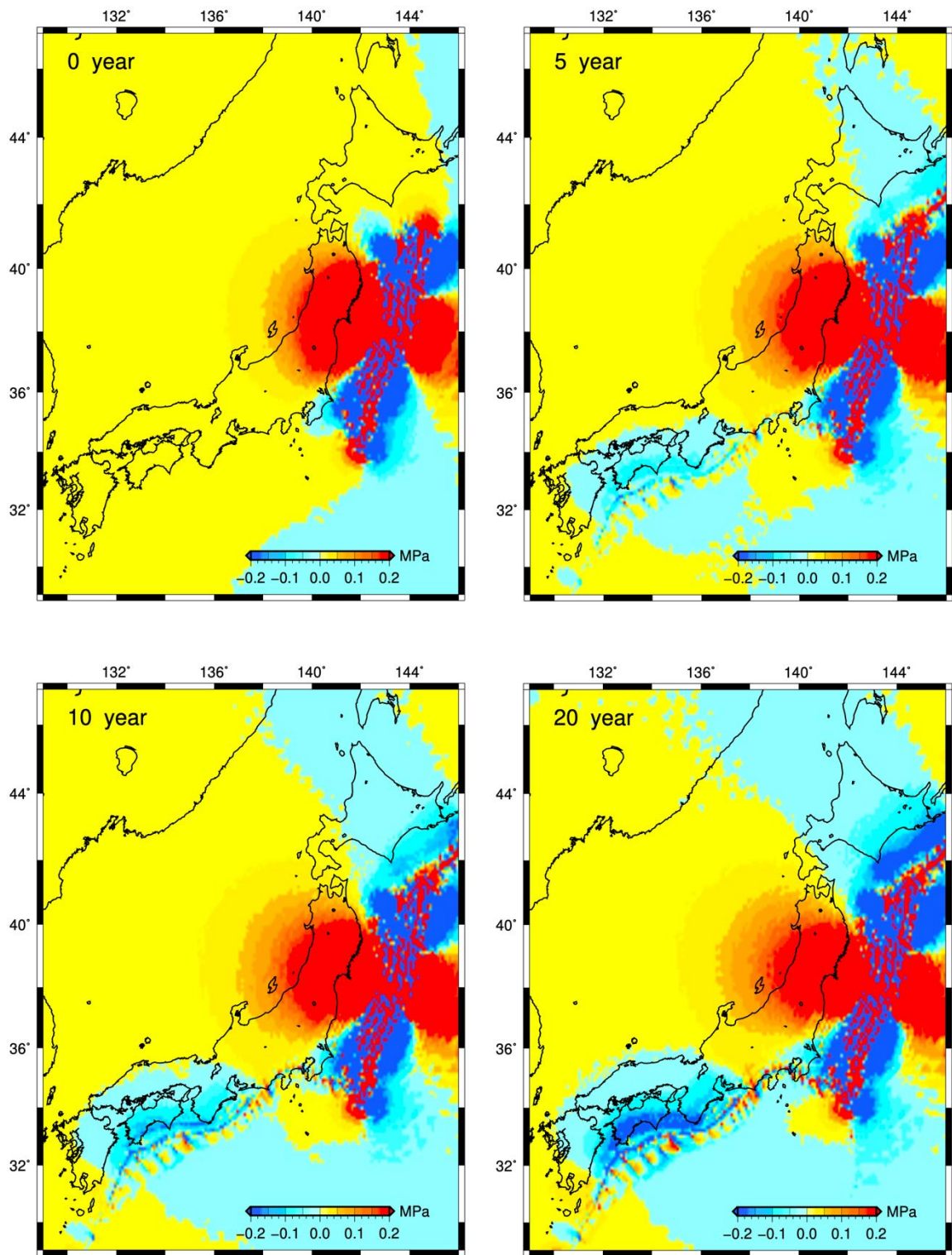


図3 東北沖地震の0、5、10、40年後の応力変化。カラースケールは平均法線応力変化。黄色～赤は伸張的、水色～青は圧縮的。

図 4 に東北沖地震前の東北地方西岸の震源断層上での  $\Delta CFF$  の結果を示す。対応する応力場は図 2 である。東北地方西岸の  $\Delta CFF$  は概ね正の値を示す。北緯  $41^\circ$  より北側の  $\Delta CFF$  の正の値が強い震源断層群は千島海溝の固着に対応し、平成 30 年度成果報告書で示した北海道地域の震源断層の  $\Delta CFF$  の計算結果と調和的である。北緯  $39^\circ$  付近の  $\Delta CFF$  の正の値が強い震源断層群は日本海溝の固着に対応する。両者の中間では、最大圧縮軸の回転が起こり、 $\Delta CFF$  が負となる震源断層も現れる。以上の  $\Delta CFF$  が正である震源断層は千島-日本海溝の固着による東西圧縮の応力変化にともない、基本的に南北走向の震源断層における断層運動を促進するように働く。これは平成 27 年度報告書の結果  $\eta$  と同じである。

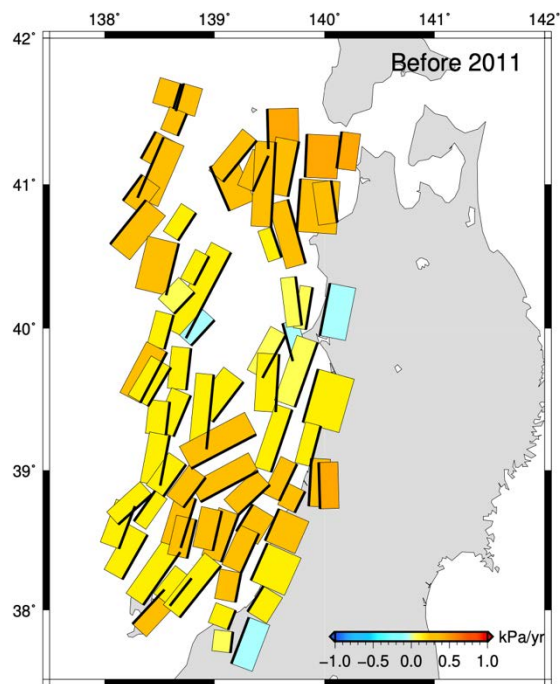


図 4 2011 年東北沖地震前の東北地方西岸の震源断層におけるクーロン応力変化。黄色～赤の応力は地震を起こしやすく、水色～青の応力は地震を起こしにくい。

図 5 に東北沖地震後の  $\Delta CFF$  分布を示す。東北沖地震直後はほぼ全域で  $\Delta CFF$  は負となる。2011 年東北沖地震による東西伸張の応力変化は、地震前とは逆に、断層運動を抑制するように働く。その後、時間とともに山形沖を中心とした南部では、負の  $\Delta CFF$  の値が強まっていくが、北部の津軽沖の震源断層は千島海溝の固着の効果により正值に転ずる。この結果は昨年度に示した結果と基本的に同じである。これは、結果的には日本海溝-千島海溝の会合部の影響が、日本海沿岸域に及ぶほどには強くはなかったということを示している。

なお、2019 年山形沖地震は、地震活動に対しては抑制的な応力下で発生した。これは、本研究の応力計算結果と矛盾するように見える。地震発生には、応力の他に断層強度という要素を考慮する必要がある。断層強度は通常環境下では時間的に変化しないと仮定する



が、何らかの理由で断層面へ流体が流入することにより低下することもあり、地震発生を引き起こすこともある<sup>22)</sup>。断層強度については、流体の挙動も含めた物性の影響について今後詳細に調べる必要がある。

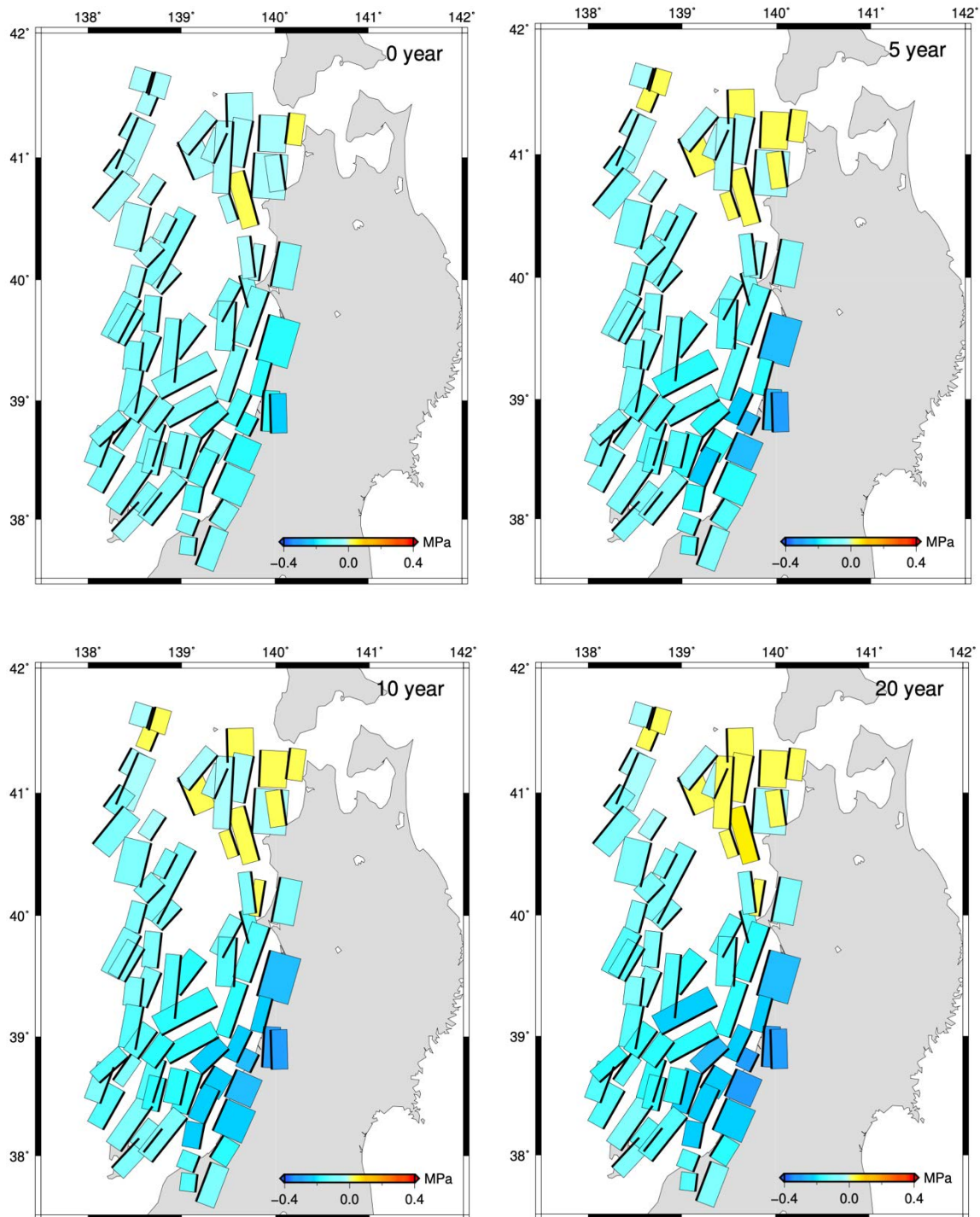


図5 2011年東北沖地震後の東北地方西岸の震源断層におけるクーロン応力変化。黄色～赤の応力は地震を起こしやすく、水色～青の応力は地震を起こしにくい。

(c) 結論ならびに今後の課題

昨年度までの日本海溝、南海トラフと千島海溝のプレート境界過程を統合するために、それぞれの中間領域にも固着分布を設定し、GNSS 観測による変位速度場と矛盾のないプレート境界過程の分布を設定した。この条件のもと、日本列島域の応力速度場を計算し、さらに東北地方西岸域の震源断層にかかる応力を計算した。東北沖地震の影響は東北地方の西岸から、新潟、北陸地方の沿岸にかけて、数十年程度残ることを示した。また、東北地方西岸の震源断層においては、東北沖地震により震源断層の活動は抑制されるが、千島海溝の固着の効果が無視できない。

以上の計算は、各地域の固着分布を、その分布を成り立たせる各条件については無視し、計算が発散しないようになめらかに接続した結果得られたものであることに注意する必要がある。変位速度場の特徴を大局的に再現することで、応力速度場の計算についても一定の保証は得られているが、特にプレート境界に近い領域では細部に実際の応力場とは異なる傾向が見られる地域もある。しかし、日本海沿岸地域では細部の異同の影響はだいぶ緩和されて、ある程度現実に近い応力速度場が達成されている。とはいえ、より現実的な応力速度場を計算するためには、単一のモデルによるインバージョンし、プレート境界プロセスを統一的に求め、その上で応力計算を行うのが望ましい。それは今後の課題として残されている。

これまで示してきたように、各地域の震源断層に対する応力を計算することで地震活動はよく説明できる。より精度の高い応力計算のためには、各震源断層の形状や断層物性の把握が必要である。また、2019年山形沖地震の発生に見るように、応力载荷に対して例外的な地震発生は常に起こりうる。このような地震発生のメカニズムの解明のためには、断層強度の変化がどのように起こるのかについての知見の蓄積が必要であろう。

(d) 引用文献

- 1) Freed, A.M., Hashima, A., Becker, T.W., Okaya, D.A., Sato, H., Hatanaka, Y.: Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.459, pp.279-290, 2017.
- 2) Becker, T.W., Hashima, A., Freed, A.M., Sato, H.: Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.504, pp.174-184, 2018.
- 3) Hashima, A., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H., Okaya, D.A.: Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, pp.doi: 10.1186/s40623-016-0535-9, 2016.
- 4) Hashima, A., Sato, H., Ishiyama, T., Freed, A., & Becker, T. W.: Stress accumulation rate on source faults around the junction of Ryukyu and Southwest Japan arcs using finite element model, 2018 SCEC Annual Meeting, Poster #120, 2018.
- 5) Hashima, A., Sato, H., Ishiyama, T., Freed, A.M.: Crustal Deformation and Stress Accumulation on Source Faults around Hokkaido, Japan, due to Coupling at the

- Kuril trench, 2019 IUGG General Assembly, JS03p-366, 2019.
- 6) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子: 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 26 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 267-278, 2015.
  - 7) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子: 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 27 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 299-310, 2016.
  - 8) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子, D.A. Okaya: 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 29 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 251-264, 2020.
  - 9) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子, D.A. Okaya: 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 30 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 257-270, 2021.
  - 10) 佐藤比呂志, 石山達也, 橋間昭徳, 加藤直子, 岩崎貴哉, D.A. Okaya: 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 31 年度 (令和元年度)「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 2021.
  - 11) Hashima, A., Sato, T., Sato, H., Asao, K., Furuya, H., Yamamoto, S., Kameo, K., Miyauchi, T., Tsumura, N., Kaneda, H.: Simulation of tectonic evolution of the Kanto Basin of Japan since 1 Ma due to subduction of the Pacific and Philippine Sea plates and the collision of the Izu-Bonin arc, *Tectonophysics*, Vol.679, pp.1-14, 2016.
  - 12) Hashima, A., Sato, H. Sato, T.: Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.72, pp.79, 2020.
  - 13) Noda, A., Hashimoto, C., Fukahata, Y., Matsu'ura, M.: Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: application to the Kanto region, central Japan, *Geophysical Journal International*, Vol.193, pp.61-77, 2013.
  - 14) Nishimura, T., Hirasawa, T., Miyazaki, S., Sagiya, T., Tada, T., Miura, S., Tanaka, K.: Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during 1995-2002 estimated from continuous GPS observations, *Geophysical Journal International*, Vol.157, pp.901-916, 2004.
  - 15) Suwa, Y., Miura, S., Hasegawa, A., Sato, T., Tachibana, K.: Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field, *Journal of Geophysical Research*, Vol.111, B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2006.
  - 16) Hashimoto, C., Noda, A., Sagiya, T., Matsu'ura, M.: Interplate seismogenic zones along the Kuril–Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, Vol.2, pp.141-144, 2009.
  - 17) Hashimoto, C., Noda, A., Matsu'ura, M.: The Mw9.0 northeast Japan earthquake: total rupture of a basement asperity, *Geophysical Journal International*, Vol.189,

- pp.1-5, 2012.
- 18) Wallace, R.E.: Geometry of shearing stress and relation to faulting, *The Journal of Geology*, Vol.59, pp.118-130, 1951.
- 19) Bott, M.H.P.: The mechanics of oblique slip faulting, *Geological Magazine*, Vol.96, pp.109-117, 1959.
- 20) Terakawa, T., Matsu'ura, M.: The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, Vol.29, pp.TC6008, doi:10.1029/2009TC002626, 2010.
- 21) Sagiya, T., Miyazaki, S., Tada, T.: Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.157, pp.2303-2322, 2000.
- 22) 佐藤比呂志, 石山達也, 篠原雅尚, 酒井慎一, 橋間昭徳, 野徹雄, 小平秀一, 佐藤壮, 松原誠: 2019年山形沖地震震源域周辺の地殻構造の特徴, *日本地震学会 2019年度秋季大会*, S24-07, 2019.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
Hashima, A., H. Sato, T. Ishiyama, A. M. Freed, and T. W. Becker	Fault stressing in the overriding plate due to megathrust coupling along the Nankai trough, Japan (オンライン発表)	EGU General Assembly 2020 (オンライン)	令和2年5月4日	国外
橋間昭徳, 佐藤比呂志, 佐藤利典	房総半島下における正断層型地震の発生と応力蓄積モデル (オンライン発表)	JpGU-AGU Joint meeting 2020 (オンライン)	令和2年7月12-16日	国内
橋間昭徳, 佐藤比呂志, 石山達也, A. M. Freed, and T. W. Becker	プレート間巨大地震の固着による内陸震源断層への応力蓄積: 南海トラフと千島海溝 (オンライン発表)	JpGU-AGU Joint meeting 2020 (オンライン)	令和2年7月12-16日	国内
石辺岳男, 松浦律子, 寺川寿子,	Validating the Method Estimating	JpGU-AGU Joint meeting 2020 (オ	令和2年7月12-16日	国内

橋間昭徳, 望月将志 (オンライン発表)	Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field	ンライン)		
佐藤比呂志, 石山達也, 野徹夫, 小平秀一, 加藤直子, J. Claringbould, 松原誠, 橋間昭徳, 石川正弘, 佐藤 壯 (オンライン発表)	日本海と沿岸の震源断層モデル	日本地震学会2020年度秋季大会 (オンライン)	令和2年10月29日	国内
石辺岳男, 寺川寿子, 橋間昭徳, 望月将志, 松浦律子 (オンライン発表)	広域三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説を用いた断層すべり角推定手法の検証	日本地震学会2020年度秋季大会 (オンライン)	令和2年10月31日	国内
石辺岳男, 寺川寿子, 橋間昭徳, 望月将志, 松浦律子 (オンライン発表)	広域三次元応力場ならびに Wallace-Bott仮説を用いた断層すべり角推定手法の検証~主要活断層帯を対象として~	日本活断層学会2020年度秋季学術大会 (オンライン)	令和2年11月23日	国内

## 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Hashima, A., H. Sato, and T. Sato	Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan (論文発表)	Earth Planets Space, 72, 79	令和2年6月3日	国外
佐藤比呂志, 石山達也, 橋間昭徳	震源断層の長期評価に向けて (論文発表)	地震予知連絡会会報, 104, 476-479	令和2年9月	国内

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(g) 8 ヶ年の成果

(a) 業務の成果

2011年東北沖地震後の日本列島における広範囲な地殻活動変化に見られるように、プレート境界過程と内陸地震活動には密接な関連がある。日本海沿岸域で起こる地震についてもプレート境界過程の影響を解明することが急がれる。

本研究では、まず、太平洋・フィリピン海両プレートの沈み込みをとりいれ、平成28年度までに日本海海域まで含む広域な領域を対象とした三次元有限要素モデルを構築した<sup>1,2,3)</sup>。モデルには、海域・海陸統合構造調査などによって得られるデータ（サブサブテーマ2.2、2.3）や、構成岩石モデル（サブサブテーマ2.5.3）から得られるレオロジー特性を考慮し、弾性リソスフェアと粘弾性アセノスフェアの2層構造を取り入れた。

このモデルを用い、南海トラフ、千島海溝、日本海溝で進行する固着分布を、日本列島のGNSS（GPS）観測による地殻変動データのインバージョンにより推定する。得られた固着分布にもとづき、各地域における応力場を計算した。サブサブテーマ2.5.1で明らかにした震源断層について、計算した応力場が震源断層にどのように作用するのかを調べるため、各断層においてクーロン破壊関数（ $\Delta CFF$ ）を計算した。この結果にもとづき、日本海沿岸域の震源断層の活動性について議論を行なった。以下、各地域に関して得られた成果を詳述する。

1) 九州、中国地方の震源断層における $\Delta CFF$ （平成29年度）

九州、中国地方の震源断層は琉球海溝－南海トラフのプレート境界過程の影響を受けている。九州の震源断層では、全般的に $\Delta CFF$ は大きい正值を示す。また、日本海の震源断層のうち、ごく沿岸の断層に関しては、 $\Delta CFF$ が正值を示す。特筆すべきなのは、2005年福岡西方沖地震、2015年薩摩半島沖地震、2016年熊本地震という3つのM7級の被害地震がこれらの断層で発生したということである。

2) 北海道の震源断層における $\Delta CFF$ （平成30年度）

北海道周辺の震源断層は千島海溝のプレート境界過程の影響を受ける。北海道の震源断層は全般的に正の $\Delta CFF$ を示す。千島海溝においては2011年東北沖地震に匹敵するMw8.8

以上の巨大地震が発生する可能性が指摘されており（地震調査委員会, 2019）<sup>4)</sup>、それに伴う内陸地震の発生も懸念される。2018年北海道胆振地震は、深部のマントル内で発生したが、本研究で評価した同地域の震源断層と同じような南北走向の逆断層型地震であったので、近隣の震源断層と同様に正の $\Delta CFF$ を受けていたと考えられる。マントル内における応力場については、マントルの粘性やそれを支配する温度構造も含め、今後詳しい検討が必要である。

### 3) 東北地方の日本海沿岸の震源断層における $\Delta CFF$ （平成31年度、令和2年度）

東北地方およびその周辺域の震源断層は日本海溝のプレート境界過程の影響を受けている。東北地方の日本海沿岸の震源断層は、地震前は固着により全般的に正の $\Delta CFF$ であったのが、地震後は概ね負に転じた。実際、東北沖地震後は、一部の断層をのぞいて、それまで活発だった内陸の震源断層における活動が沈静化した<sup>5)</sup>。その後は、アセノスフェアにおける粘弾性緩和の進行につれ、 $\Delta CFF$ の負の値が大きくなる傾向にある。一方、津軽半島沖では千島海溝の固着の影響により $\Delta CFF$ が正の断層が増えていく。

### (b) 結論ならびに今後の課題

プレート境界地震の日本海沿岸域の地震に対する影響を調べるため、日本列島域の三次元有限要素モデルを構築し、日本海沿岸の震源断層における $\Delta CFF$ を計算した。計算結果は、概ね近年の被害地震の発生に調和的であった。これはすなわち、巨大地震前の固着（南海トラフ、千島海溝）、または東北沖地震後のアセノスフェアの粘弾性緩和といったプレート境界過程が内陸地震の発生に強く影響しているということを示す。また、この結果は、モデル計算を用いて震源断層の活動性を評価することの有用性を示している。

今後残された課題として以下の点が挙げられる。

- (1) ごく近隣の似た形状の断層群でも $\Delta CFF$ が正と負の断層が混在する場合がある。これらの断層では応力と断層強度が微妙なバランスにあり、それにより $\Delta CFF$ の正負が左右される。このような地域で精確に $\Delta CFF$ を見積もるためには、よりいっそう詳細に震源断層の形状や物質特性を求める必要がある。
- (2) 津軽半島沖や新潟-北陸沖など、複数のプレート境界過程が相互作用しあう地域での震源断層の評価は、平成31年度と令和2年度に試みたが容易ではない。個々のプレート境界過程の重ね合わせではなく、統一的な枠組みで取り扱う必要がある。
- (3) 地震は応力の解放過程であり、実際に観測される応力場と地震発生のパターンはよく符合する。このことは本研究のアプローチの正当性を示している。しかし、2019年山形沖地震のように、応力計算によって説明できない地震もある<sup>6)</sup>。これは、地震が、応力蓄積以外にも断層強度の低下によっても引き起こされるからである。この影響を取り入れるためには、断層帯における物質特性、流体の影響についても考慮する必要がある。

### (c) 引用文献

- 1) Hashima, A., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H. and Okaya, D.A.: Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake: influence of 3-D elastic

- structure around Japan, *Earth Planets Space*, 68, 159, pp.1-15, doi:10.1186/s40623-016-0535-9, 2016.
- 2) Freed, A.M., Hashima, A., Becker, T.W., Okaya, D.A., Sato, H. and Hatanaka, Y.: Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, pp.279-290, doi:10.1016/j.epsl.2016.11.040, 2017.
  - 3) Becker, T.W., Hashima, A., Freed, A.M. and Sato, H.: Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 504, pp.174-184, doi:10.1016/j.epsl.2018.09.035, 2018.
  - 4) 地震調査委員会：千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版），[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/chishima3.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/chishima3.pdf)（2021年4月8日確認），2019.
  - 5) Toda, S., Stein, R.S., Lin, J.: Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, *Geophysical Research Letters*, 38, L00G03, doi:10.1029/2011GL047834, 2011.
  - 6) 佐藤比呂志, 石山達也, 篠原雅尚, 酒井慎一, 橋間昭徳, 野徹雄, 小平秀一, 佐藤壮, 松原誠: 2019年山形沖地震震源域周辺の地殻構造の特徴, 日本地震学会 2019年度秋季大会, S24-07, 2019.