

様々な断層モデルへの地震によるクーロン破壊応力変化解析ツールの開発

Development of an Analysis Tool for Earthquake-Induced Changes in Coulomb Failure Stress on Various Fault Models

岩切一宏¹, 上田満治¹

Kazuhiro IWAKIRI¹ and Mitsuharu UEDA¹

(Received September 5, 2018: Accepted November 20, 2018)

1 はじめに

規模の大きな地震と、その後の周辺の地震活動の変化との関連性については、クーロン破壊応力変化（以下、 ΔCFF ）を用いて議論されることが多い（例えば、Reasenber and Simpson, 1992, Toda et al., 2011）。 ΔCFF は、地震発生後に、地震による地殻変動から推定される応力の変化量をもとに、周辺の断層が動きやすくなる、または、動きにくくなる方向に受ける影響度を定量的に表すものである。

「大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方」報告書（地震調査委員会, 2016）では、将来提供されることが望ましい防災情報の一つとして、大地震後の隣接断層への影響の定量的な評価をあげている。また、気象庁は、例えば、南海トラフ沿いで M7 級の地震発生後に、南海トラフ地震発生の可能性が平常時と比べて相対的に高まったと評価した場合には、「南海トラフ地震に関連する情報」を発表する。これらの検討段階において、大地震発生が周辺の断層を動きやすくする方向に影響を与えたかどうかを ΔCFF により把握することは、周辺地域の地震発生の可能性を評価するうえで、ひとつの指標になると考えられる。

気象庁で用いられている地殻変動解析支援プログラム MICAP-G（内藤・吉川, 1999）には、一つの断層パラメータへの水平または傾斜方向の ΔCFF 分布を計算・描画する機能が搭載されている。しかし、任意の場所における複数種類の断層パラメータへの ΔCFF は計算することができない。そのため、例えば、断層面上に配置した小断層に対する ΔCFF を計算し、断層面

上の ΔCFF の分布は描くことができない。そこで、我々は、発震機構解の節面、プレート境界、既存もしくは任意の断層面といった、様々な断層モデルへの ΔCFF を計算・描画するツールを作成したので報告する。

2 ツールの仕組みの概要

ΔCFF の計算や結果図の描画の処理は、Perl で作成した。図の描画には Generic Mapping Tools（Wessel and Smith, 1998, 以下、GMT）を用いた。入力したパラメータを引数とした計算や描画の実行等は、PHP で作成し、サーバ内で処理される。図 1 に、発震機構解の節面への ΔCFF 計算ツールを例に、パラメータの設定や計算結果の出力についての概要を示す。ツールの使用者は、図 1 に示すようなパラメータの入力から、計算開始、計算結果の図の確認、図等の取得までを端末においてブラウザで操作できる。震源断層やその周辺断層を複数設定する場合は、ブラウザでのパラメータ入力作業が多くなるため、パラメータのテキストファイルを別途作成し、それを読み込ませる。ツールの仕組みの概要は以下の通りである。

2.1 ΔCFF の計算

地震を起こした震源断層が周辺の断層（以下、レシーバ断層）へ与える ΔCFF は、剪断応力の変化 ($\Delta\tau$) と法線応力の変化 ($\Delta\sigma$) から (1) 式で計算する（例えば、橋本, 1995）。

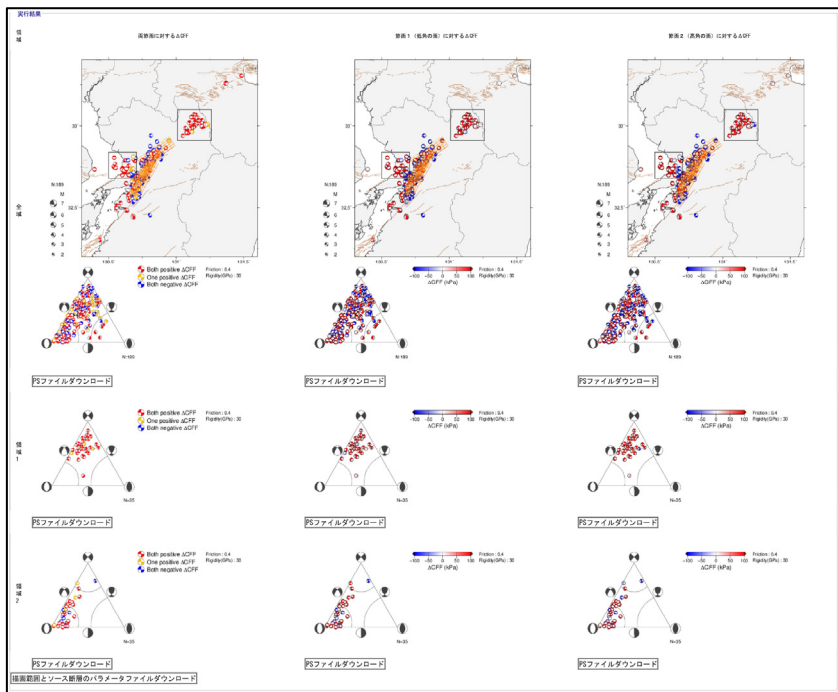
¹ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

(a) パラメータ設定の例

STEP1. 設定
 描画範囲とソース断層の設定
 ※パラメータファイルから設定する場合はファイルを指定して読み込む
 描画範囲 : 緯度: 32.2 ~ 33.4
 経度: 130.3 ~ 131.6
 ソース断層の指定方法 : Mwから断層長・幅、すべり量を算出 断層長・幅、すべり量を直接設定
 ソース断層 1 : 緯度: 32.88031 経度: 130.99128 深さ(km): 2.600
 走向(0~360): 235 傾斜(0~90): 60 すべり角(-360~360): -160
 断層長(km): 27.0 断層幅(km): 15.0 すべり量(mm): 1000.0
 ソース断層面の基準点 : 断層中心 断層左上
 レシーバ断層(メカニズム)の設定
 メカニズムファイル : ※ファイルサイズ上限: 2Mバイト
 発震時刻(O.T) : 2016年 04月 16日 01時 00分 2017年 04月 30日 23時 59分 59秒
 マグニチュード : M2.0 ~ M9.9
 深さ : 0 ~ 20 km
 メカニズム登録フラグ : K登録 S登録
 計算条件
 剛性率(GPa) : 30
 摩擦係数 : 0.4
 描画設定
 ΔCFFの表示スケール(kPa) : ±1 ±10 ±100 ±500
 レシーバ断層としたビーチボールの節面 : 描画しない 描画する
 地図上のビーチボールの大きさ(倍率) : 1.0
 活断層 : 描画しない 描画する(地震調査研究推進本部の長期評価による活断層トレース)
 フィリピン海プレート上面のコンター : 描画しない 描画する(南海トラフ周辺) 描画する(すべて)
 太平洋プレート上面のコンター : 描画しない 描画する(コンターの深さ10km~ [60] km, コンター間隔 [10] km)
 南海トラフ想定震源域 : 描画しない 描画する
 東北地方太平洋沖地震の余震域 : 描画しない 描画する
 強調表示するイベントの指定
 強調表示指定 : 指定しない ファイルから指定
 領域設定
 領域指定 : 指定しない ファイルから指定
 STEP2. 実行
 実行 リセット

- 出力する地図の範囲を設定
- 震源断層パラメータを設定
(複数の断層面を設定する場合は、パラメータのテキストファイルを読み込ませる)
- レシーバ断層パラメータを設定
(発震機構解のファイルを読み込ませる)
- 剛性率、摩擦係数を設定
- 出力図の描画に係るパラメータを設定
- 強調表示(太線で囲む)する発震機構解を設定
- ΔCFF で色分けした発震機構解を三角ダイアグラムに表示する矩形領域を設定
- 計算開始

(b) 計算結果の出力の例



- ΔCFF で色分けした発震機構解を地図に表示
 左図: 両方の節面
 中図: 低角な方の節面
 右図: 高角な方の節面
- 地図中の矩形領域における ΔCFF で色分けした発震機構解を三角ダイアグラムに表示
 上図: 全領域
 中図・下図: 地図中の 2 つの矩形領域
- 各出力図(PostScript), 地図範囲データ, 震源断層パラメータをダウンロード可

図 1 発震機構解の節面への ΔCFF 計算ツールにおける (a) パラメータ設定および (b) 計算結果の出力のブラウザ画面の例. (b) の図の詳細な説明については図 3 を参照.

$$\Delta CFF = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma \quad (1)$$

ここで $\Delta\tau$ は断層すべりの方向を正、 $\Delta\sigma$ は圧縮の場合を正とし、 μ' は間隙水圧の効果を含んだ見かけの摩擦係数である。 ΔCFF の値が正の場合は、レシーバ断層の破壊が促進、負の場合は抑制されることを示している。仮に、レシーバ断層に応力が十分に蓄積された状態であれば、 ΔCFF が正の場合は地震が誘発される可能性がある。

実際の計算では、Okada (1992) に基づく計算プログラム DC3D (防災科学技術研究所 Web サイト, http://www.bosai.go.jp/study/application/dc3d/DC3Dhtml_J.html) により、有限矩形断層のすべりによる半無限均質弾性体中の任意の点における変位およびその空間微分を計算する。そして、応力とひずみの関係式により、任意の点で仮定したレシーバ断層が受ける応力の変化量および ΔCFF を求める。

2.2 震源断層のパラメータ設定

本ツールでは、発生した地震の震源断層パラメータとして、断層の位置、走向、傾斜、すべり角、長さ、幅、すべり量を入力する。複数の震源断層を設定する場合は、パラメータファイルを作成して読み込ませる。断層の長さ、幅、すべり量については、地震のマグニチュードを入力すればスケールリング則から算出する機能もある。また、プレート境界をレシーバ断層とする場合は、震源断層の深さを 2.3 節の (3) で設定したプレート境界の深さに移動させることができる。

2.3 レシーバ断層のパラメータ設定

次の (1) ~ (5) に示した断層パラメータ (走向、傾斜、すべり角) を設定できる。

(1) 1 種類のレシーバ断層

指定した深さの水平面へ、格子状にレシーバ断層を仮想配置して、1 種類の断層パラメータを設定する。これにより、 ΔCFF の水平面での空間分布を計算する。その際に、格子数の指定により空間解像度を調整するが、解像度が高くなるほど、計算領域内の ΔCFF の最大値が大きくなることに注意する。

(2) 発震機構解の節面

地震の震源における発震機構解の 2 枚の節面をレシーバ断層として、それぞれの節面の断層パラメータを

設定する。これにより、発震機構解の各節面への ΔCFF を計算する (例えば, Ishibe et al., 2017)。

(3) プレート境界

南海トラフおよび日本海溝 (北海道から伊豆弧北部) のプレート境界面に、0.05 度間隔で仮想配置したレシーバ断層を事前に下記①~③の手順で設定してある。これにより、プレート境界で発生する地震への ΔCFF を計算する。

① プレート上面の格子化

フィリピン海プレート上面 (Hirose et al., 2008 ; 弘瀬・他, 2008 ; Nakajima et al., 2009 ; Nakajima and Hasegawa, 2007 ; Baba et al., 2002) および太平洋プレート上面 (Kita et al., 2010 ; Nakajima and Hasegawa, 2006 ; Nakajima et al., 2009) の等深線データを、GMT の `blockmedian` および `surface` を用いて、緯度、経度ともに 0.05 度間隔で格子化する。

② 走向および傾斜角を求める

格子点における最大の「傾斜角」とその水平方位を GMT の `grdgradient` を用いて求め、水平方位の 90 度方向を「走向」とする。

③ すべり角を求める

格子点におけるプレート相対運動方向を MORVEL (DeMets et al., 2010, <http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL>) を用いて計算する。その際、フィリピン海プレートについては、アムールプレートを固定する。太平洋プレートについては、三重会合点付近 (N34.22° 付近) より北は北米プレートを固定、それより南はフィリピン海プレートを固定する。プレート相対運動方向の逆方向を断層すべりの水平成分として、格子点を中心とする断層面へ投影し、それが断層面上において走向となす角度を「すべり角」とする。

(4) 既存の断層面

既存のレシーバ断層パラメータとして、全国地震動予測地図「震源を特定した地震動予測地図」(地震調査研究推進本部 Web サイト, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report) の断層モデルを参照する。断層面およびその格子点の位置データは、地震ハザードステーション J-SHIS (防災科学技術研究所 Web サイト, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>) で公開されているデータファイルをダウンロードし、本ツールで利用する。これにより、既存の断層パラメータに基

づいた断層面への ΔCFF を計算する。

(5) 任意の断層面

指定した位置と大きさ（長さ、幅）の断層面上に、レシーバ断層を格子状に仮想配置して、1 種類の断層パラメータを設定する。これにより、任意の場所に設定した断層面への ΔCFF を計算する。

2.4 ΔCFF 分布以外の描画データ

地図上の ΔCFF 分布に重ねて、震央、発震機構解の震源球、プレート上面の等深線、地震調査委員会の長期評価による活断層（地震調査研究推進本部 Web サイト、https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/）の地表トレース等を描画する。

地図上に矩形領域を最大 6 個まで設定でき、各領域内の発震機構解を Frohlich (2001) の分類による断層型で色分けして、三角ダイアグラムに描画する。また、発震機構解の主圧力軸、主張力軸、中立軸の方位分布

をローズダイアグラムに描画する。読み込み可能な震源および発震機構解データのフォーマットは、地震月報カタログ編（気象庁 Web サイト、<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>）と同じである。

3 ツールの実行例

2.3 節に記述したレシーバ断層への ΔCFF の計算例を以下に示す。図 2 から図 5 は、 ΔCFF の分布や凡例等の図を、ツールによる計算結果の出力図から抽出して本稿に挿入したものであり、出力図の配置そのものとは異なる。また、各図には、説明のために活断層名、矩形領域名、矢印等を追加してある。

3.1 ΔCFF の水平分布の例

平成 28 年（2016 年）熊本地震について、2016 年 4 月 14 日 M6.5、15 日 M6.4、16 日 M7.3 の 3 つの地震が、その周辺に与える ΔCFF の水平分布を図 2 に示す。

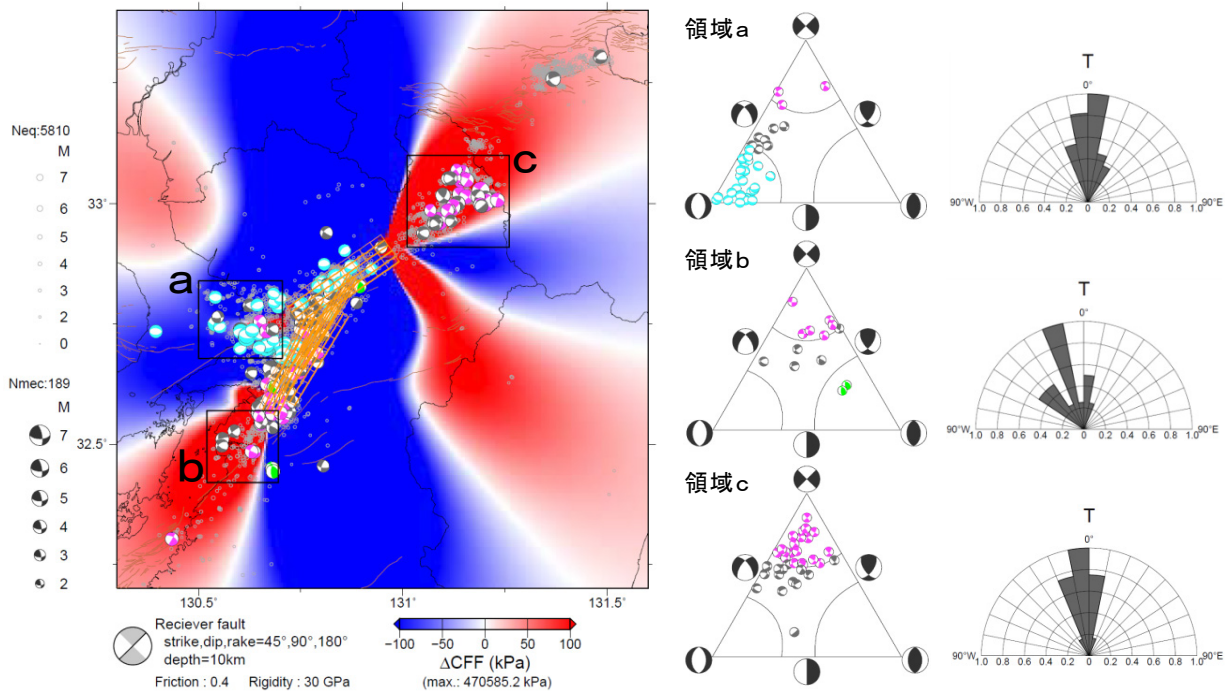


図 2 平成 28 年（2016 年）熊本地震について、2016 年 4 月 14 日 M6.5、15 日 M6.4、16 日 M7.3 の 3 つの地震がその周辺に与える ΔCFF の水平分布（深さ 10km）と発震機構解の分布。

地図中の橙矩形は 3 つの地震の震源断層モデルの地図投影、灰丸は震央、震源球は初動発震機構解を示しており M7.3 の地震発生後から 2017 年 4 月 30 日までの地震（ $M \geq 2.0$ 、深さ ≤ 20 km）である。茶線は地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレースを示す。地図の左下には仮定したレシーバ断層パラメータを示す。中央列の三角ダイアグラムには、領域 a、b、c 内の発震機構解の断層型を Frohlich (2001) による分類で色分けして示す。地図中の震源球の色も同じ分類による。右列のローズダイアグラムは、各領域内の発震機構解の主張力軸の方位分布であり、横軸には方位別個数の最大数を 1 とした割合を示す。 ΔCFF の凡例の下の「(max:)」は、表示範囲内の全レシーバ断層に対する ΔCFF 計算結果の最大値を示す。

震源断層モデルは近地強震波形による震源過程解析結果（田中，2018）を用いた。レシーバ断層として北東-南西走向の右横ずれ断層を仮定している。

震源断層の近傍では、震源過程解析により推定されたモデルの精度が ΔCFF に影響するため、ここでは震源断層からやや離れた周辺領域に注目する。震源断層

の走向方向の延長線上に ΔCFF が正の領域が卓越しており、この領域には、横ずれ断層型の地震が多く発生している領域 b と領域 c も含まれている。震源断層の北方と南方では、負の ΔCFF が広がっており、それに対応するように発震機構解が得られるような比較的規模の大きな地震はあまりみられない。

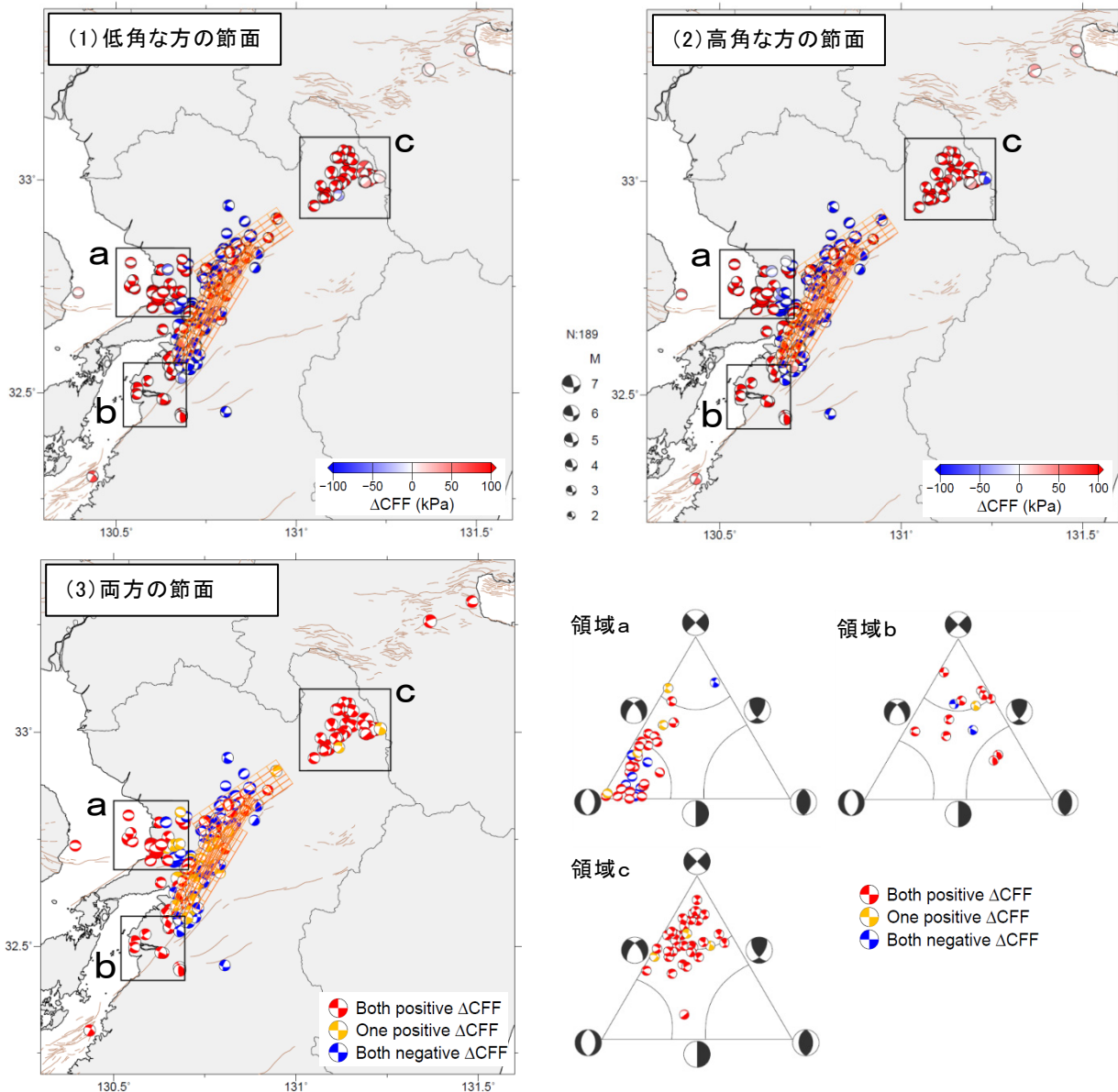


図3 平成28年（2016年）熊本地震について、2016年4月14日 M6.5、15日 M6.4、16日 M7.3の3つの地震による、周辺の発震機構解の節面をレシーバ断層とした ΔCFF 。

発震機構解の2枚の節面のうち、(1)は低角な方の節面、(2)は高角な方の節面、(3)は両節面への ΔCFF を示す。(1)、(2)にはレシーバ断層とした節面を黒線で示す。(3)の発震機構解の赤は両方の節面ともに ΔCFF が正、橙は一方の節面のみ ΔCFF が正、青は両方の節面ともに ΔCFF が負を示す。三角ダイアグラムには、(3)の領域 a, b, c 内の発震機構解を図2と同じ分類で示し、色分けは(3)の発震機構解と同じである。地図中の橙矩形、震源球、茶線は、それぞれ図2と同じ震源断層モデル、発震機構解、活断層の地表トレースを示す。

3.2 発震機構解の節面における Δ CFF の例

3.1 節と同じ M6.5, M6.4, M7.3 の 3 つの地震による, 周辺の地震の発震機構解の節面をレシーバ断層とする Δ CFF を図 3 に示す. 領域 a, b, c のいずれにおいても, 両方の節面または一方の節面の Δ CFF が正の発震機構解が多い. 典型的な横ずれ断層や正断層から外れる発震機構解の多くでも, Δ CFF は正である. また, 震源断層から遠く離れた大分県や八代海においても Δ CFF が正の発震機構解がみられる.

3.1 節と 3.2 節で示したように, 3 つの地震発生後にその震源断層からやや離れた領域にみられる地震活動は, 3 つの地震によって生じた Δ CFF と調和的である.

3.3 南海トラフ地震想定震源域・太平洋プレート境界における Δ CFF の例

2004 年 9 月に紀伊半島南東沖のフィリピン海プレート内で発生した地震活動 (最大規模は 9 月 5 日の M7.4) が, 南海トラフ地震想定震源域のプレート境

界に与えた Δ CFF を図 4 (a) に示す. 震源断層モデルは国土地理院 (2005) の地殻変動による断層モデル (表 1) を用いた. 震源断層近傍のプレート境界では正の Δ CFF が分布し, 離れたところでは主に負の Δ CFF が広がっている.

図 4 (b) には, 2016 年 11 月 22 日に福島県沖の陸のプレート内で発生した M7.4 の地震が, 太平洋プレートと陸のプレートの境界に与えた Δ CFF を示す. 震源断層モデルは遠地実体波による震源過程解析結果 (気象庁, 2016) を用いた. 震源断層周辺のプレート境界では, 正の Δ CFF が広く分布している.

3.4 断層面における Δ CFF の例

2018 年 6 月 18 日に発生した大阪府北部の地震 (M6.1) の周辺には, 地震調査委員会が長期評価を公表している活断層がいくつも存在する. それらの活断層をレシーバ断層とした, 断層面上における Δ CFF 分布を図 5 に示す. レシーバ断層のパラメータおよび位置データ

表 1 2004 年 9 月の紀伊半島南東沖の地震活動 (最大 M7.4) の震源断層モデル (国土地理院, 2005)

	走向	傾斜	すべり角	上端深さ (km)	長さ (km)	幅 (km)	すべり量 (m)
断層面 1	135	40	131	10.6	46.4	13.9	2.14
断層面 2	245	57	61	6.3	66.4	23.6	3.27

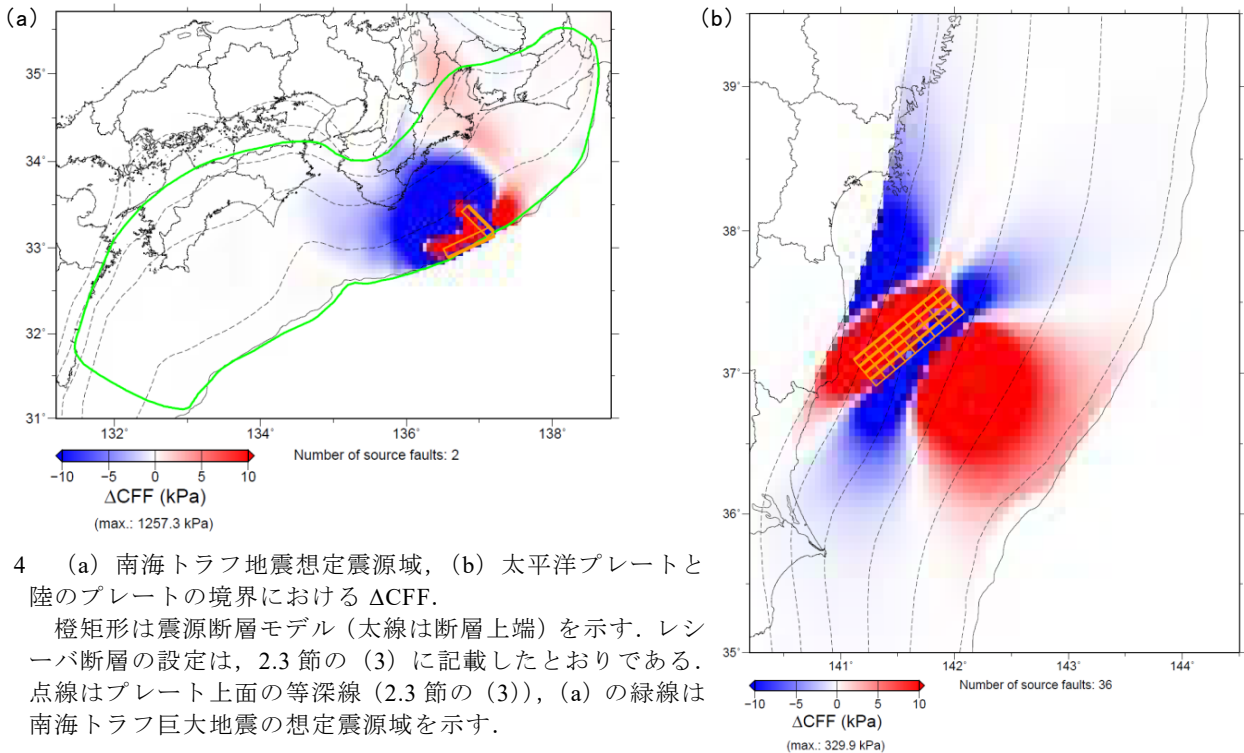


図 4 (a) 南海トラフ地震想定震源域, (b) 太平洋プレートと陸のプレートの境界における Δ CFF.

橙矩形は震源断層モデル (太線は断層上端) を示す. レシーバ断層の設定は, 2.3 節の (3) に記載したとおりである. 点線はプレート上面の等深線 (2.3 節の (3)), (a) の緑線は南海トラフ巨大地震の想定震源域を示す.

は、2.3 節の (4) で示した Web サイトより取得した。また、震源断層モデル (表 2) は余震の震源分布および発震機構解 (初動解, CMT 解) から推定した。なお、黒点線の四角で囲んだ上町断層帯の屈曲ケース (北側) の深さ約 10km 以深については、それ以浅の地震動予測地図の断層モデル (傾斜 70°) に接続するように、

文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所 (2013) の上町断層帯の地下深部形状を参考に、2.3 節の (5) に従い、傾斜 30° のレシーバ断層を別途設定した。M6.1 の地震の断層近くにあるレシーバ断層には、大きな正の ΔCFF が分布しており、正と負のコントラストが大きい。

表 2 2018 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震 (M6.1) の震源断層モデル

	走向	傾斜	すべり角	上端深さ (km)	長さ (km)	幅 (km)	すべり量 (m)
断層面 1	50	70	150	10	5	5	0.29
断層面 2	0	40	60	9.7	2	4	0.29

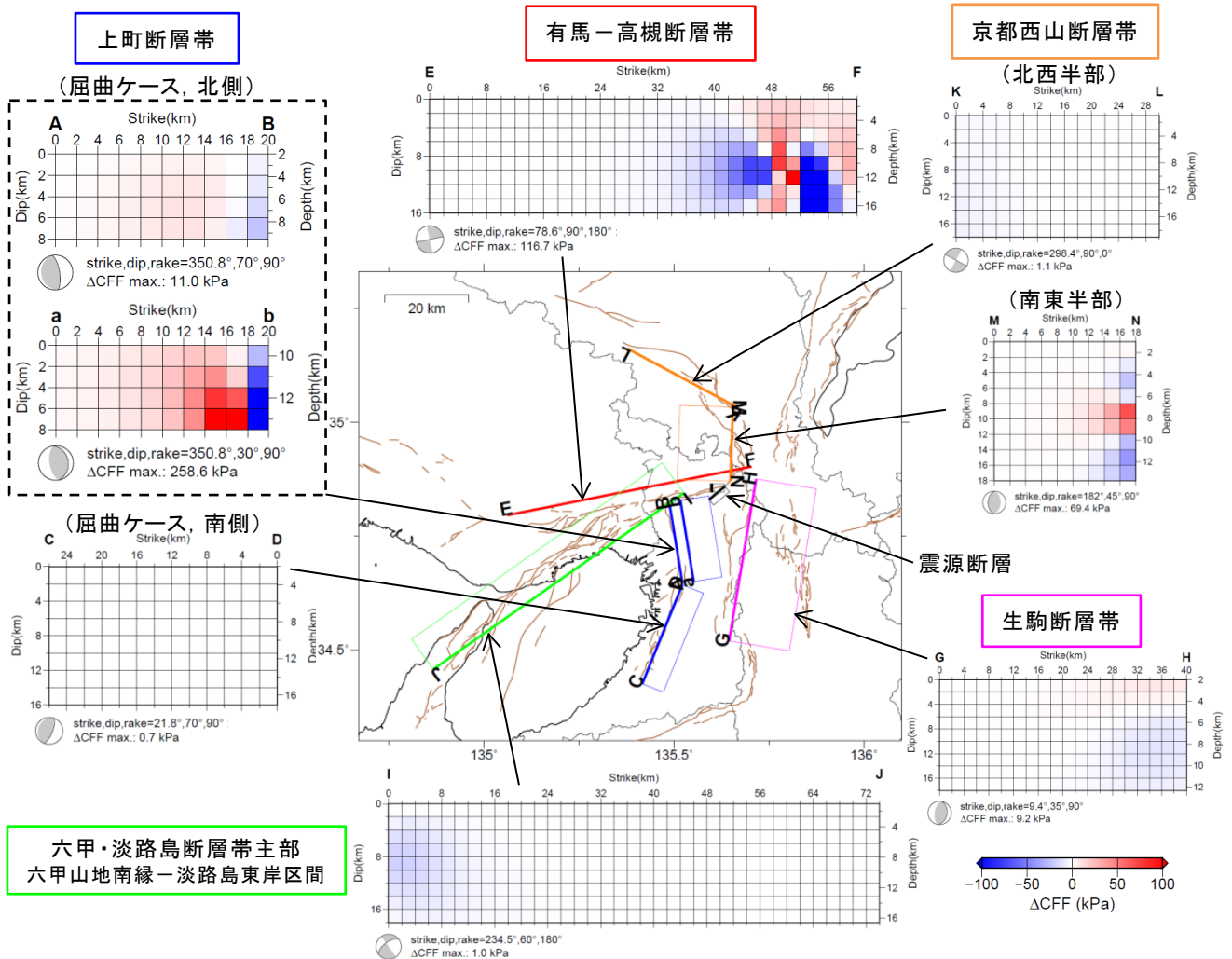


図 5 2018 年 6 月 18 日の大阪府北部の地震 (M6.1) による、周辺の活断層をレシーバ断層とした ΔCFF 。

地図中の 2 つの黒矩形は M6.1 の地震の震源断層モデル (表 2) の地図投影、その他の色付きの矩形はレシーバ断層の地図投影であり、太線は断層上端を示す。茶線は図 2 と同じ活断層の地表トレースを示す。地図周辺の図は、レシーバ断層面における ΔCFF 分布を示しており、各図の下にはレシーバ断層パラメータを記す。

4 まとめ

大地震が発生した後に、その周辺において次の大地震が発生する可能性や、周辺の地震活動の変化についての評価に資するため、 Δ CFF を計算・描画するツールを作成した。本ツールの最大の特徴は、 Δ CFF を計算するレシーバ断層として、発震機構解の節面、プレート境界、既存もしくは任意の断層面といった、様々な断層モデルを設定できることである。

本ツールは、気象庁本庁のサーバで動作しており、地震調査研究推進本部の地震調査委員会等へ提出する地震活動評価の資料の作成に既に活用されている。各管区および沖縄気象台からは、端末のブラウザで本庁のサーバにアクセスして本ツールを利用できる。

今後は、 Δ CFF の描画のさらなる工夫や、 Δ CFF 分布以外の描画データの種類を増やす等、改良に取り組んでいきたい。

謝辞

ツールの作成にあたり MICAP-G の処理内容についてご教示いただいた気象研究所の山本剛靖氏、プレート境界のレシーバ断層パラメータを作成いただいた地震予知情報課の山内崇彦氏、ツールの改良にあたり有益なご意見をいただいた地震予知情報課の武田清史氏と清水淳平氏に感謝する。大阪府北部の地震 (M6.1) の震源断層パラメータは、地震予知情報課の関係諸氏によって求められたものである。査読者の長野地方気象台長の内藤宏人氏には、本稿の改善に有益な多くのご助言をいただいた。合わせて感謝申し上げます。

文献

気象庁 (2016): 2016年11月22日福島県沖の地震—遠地実体波による震源過程解析 (暫定) —, 気象庁Webサイト, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/index.html>, (参照2018-09-28).

国土地理院 (2005): 中部・近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, **73**, 426-463.

地震調査委員会 (2016): 「大地震後の地震活動の見直しに関する情報のあり方」報告書, 地震調査研究推進本部Webサイト, https://www.jishin.go.jp/reports/research_report/yosoku_info, (参照2018-09-03).

田中美穂 (2018): 近地強震波形を用いた震源過程解析, 平成28年 (2016年) 熊本地震調査報告, 気象庁技術報告,

135, 21-29.

内藤宏人・吉川澄夫 (1999): 地殻変動解析支援プログラム MICAP-Gの開発, 地震2, **52**, 101-103.

橋本 学 (1995): 兵庫県南部地震に伴う応力変化: 断層モデルによるクーロン破壊関数の変化の計算と地震活動の変化との比較, 地震2, **48**, 521-530.

弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川 昭 (2008): Double-Difference Tomography法による関東地方の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震2, **60**, 123-138.

文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所 (2013): 上町断層帯における重点的な調査観測 平成22~24年度成果報告書, 地震調査研究推進本部Webサイト, https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/uemachi_juten/, (参照2018-09-03).

Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uihira (2002): The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **132**, 59-73.

DeMets, C., R. G. Gordon, and D. F. Argus (2010): Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.*, **181**, 1-80.

Frohlich, C. (2001): Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms, *Geophys. J. Int.*, **144**, 300-308.

Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa (2008): Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315.

Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake (2017): Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes, *Geoscience Letters*, **4**:5.

Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa (2010): Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Science Lett.*, **290**, 415-426.

Nakajima, J., and A. Hasegawa (2006): Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16309.

Nakajima, J., and A. Hasegawa (2007): Subduction of the

Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, **112**, B08306.

Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa (2009): Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309.

Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.

Reasenber, P. A. and R. W. Simpson (1992): Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, *Science*, **255**, 1687-1690.

Toda, S., R. S. Stein, and J. Lin (2011): Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G03.

Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New, improved version of the generic mapping tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.

(編集担当 上野寛)