



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2003年十勝沖地震による北海道東部火山フロントに沿った誘発地震活動と静的応力変化との関連性
Author(s)	上田, 満治; 高橋, 浩晃
Citation	地震. 2輯, 58(2), 115-119 https://doi.org/10.4294/zisin1948.58.2_115
Issue Date	2005-09-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57961
Type	journal article
File Information	Zisin_58_115-.pdf



寄 書

2003年十勝沖地震による 北海道東部火山フロントに 沿った誘発地震活動と静的 応力変化との関連性

北海道大学大学院理学研究科附属地震
火山研究観測センター*

上田 満治[†]・高橋 浩晃

Triggered Earthquakes along the Volcanic Front
in the Eastern Hokkaido, Japan, and Its
Relevance to the Static Stress Change
Due to the 2003 Tokachi-oki
Earthquake

Mitsuharu UEDA and Hiroaki TAKAHASHI
Institute of Seismology and Volcanology,
Graduate School of Science, Hokkaido
University, Sapporo 060-0810, Japan

(Received March 15, 2005;

Accepted July 22, 2005)

§1. はじめに

2003年9月26日に北海道十勝沖を震源とする「2003年(平成15年)十勝沖地震($M_{JMA}=8.0$)」が発生した。この地震の発生直後から、震源域から北に約100 km離れた北海道東部(道東)内陸部の火山フロントに沿った領域で地震活動が活発化した[杉田・横田(2005), 高橋・笠原(2004)]。大地震の発生後に震源域から離れた場所で地震活動が活発化する現象は、本震断層の動きによる静的応力変化や地震波の到来による動的な応力変化により引き起こされると考えられている[たとえば, Broadsky *et al.* (2000), Protti *et al.* (1995)]。

国土地理院の全国GPS連続観測網(以下, GEONET)は、2003年十勝沖地震を引き起こした断層運動によって北海道全域に地殻変動が及んだことを明らかにした

[たとえば, Ozawa *et al.* (2004)]。このため、道東で発生した誘発地震活動は、地震時の地殻変動による静的な応力変化がその原因のひとつとして考えられた。静的応力変化による地震活動度の変化を評価する手法として、クーロン破壊応力変化(Coulomb Failure Stress Change, 以下 ΔCFS とする)がある[たとえば, King *et al.* (1994), Stein and Lisowski (1983)]。本論文では、2003年十勝沖地震に伴う地殻変動データを用いて ΔCFS を求め、誘発地震活動との関係について検討する。

§2. 地震および地殻変動データ

Fig. 1には、道東の火山フロントに沿った領域での2003年十勝沖地震発生前後各半年間の10 km以浅の地震の震央分布とその時空間分布を示す。カタログは気象庁のものを用いた。2003年十勝沖地震の発生によりFig. 1のほぼ全域で地震活動が誘発されたことが明瞭に示されている。一方、定常的な地震活動が停止した箇所もある(Fig. 1(a)の破線で囲った場所)。また、誘発地震活動で発生した主な地震のメカニズム解も示した。メカニズム解は32点以上で初動極性が読み取れた地震について求められた。 $M 4.5$ の地震だけは気象庁が求めたメカニズム解を引用した。東北東-西南西方向の節面をもつような右横ずれ型のメカニズム解が卓越していることがわかる。

ΔCFS に関して論じた多くの研究は、アプリオリに与えられた断層パラメータを用いて、半無限弾性体を仮定してOkada(1992)らの式により歪を算出し、応力-歪の関係式から ΔCFS を求める手法を用いている。この手法では、任意の点での ΔCFS が推定可能であり、空間的に密なデータを得られる利点があるものの、得られる値は仮定した断層モデルの任意性に依存する。

ところで、GEONETは世界最高の空間密度をもって配置されており、Fig. 2(a)が示すように2003年十勝沖地震が発生した時点で北海道内122観測点が稼働していた。誘発地震活動が観測された範囲は長さ120 kmに及んでいるが(Fig. 1)、これはGEONETの空間分解能(20-30 km)よりも有意に広い。このため、GEONETで得られた地殻変動データそのものを用いて地殻変動と誘発地震活動の関係を調べることが可能であると考えた。

そこで、GEONETの各GPS観測点で得られた水平変位データから直接歪を算出し、その値をもとにして ΔCFS の計算を行うこととした。上下成分は水平成分の数倍程度の誤差があり、一定精度下での議論が難しいため扱わない。本震による水平変位量は、各GPS観測点において地震発生前の2003年9月1日から9月25日ま

* 〒060-0810 札幌市北区北10条西8

[†] 現所属: 気象庁秋田地方気象台 〒010-0951 秋田市山王7-1-4 秋田第二合同庁舎

[†] Present Address: Akita Local Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency, Akita 010-0951, Japan

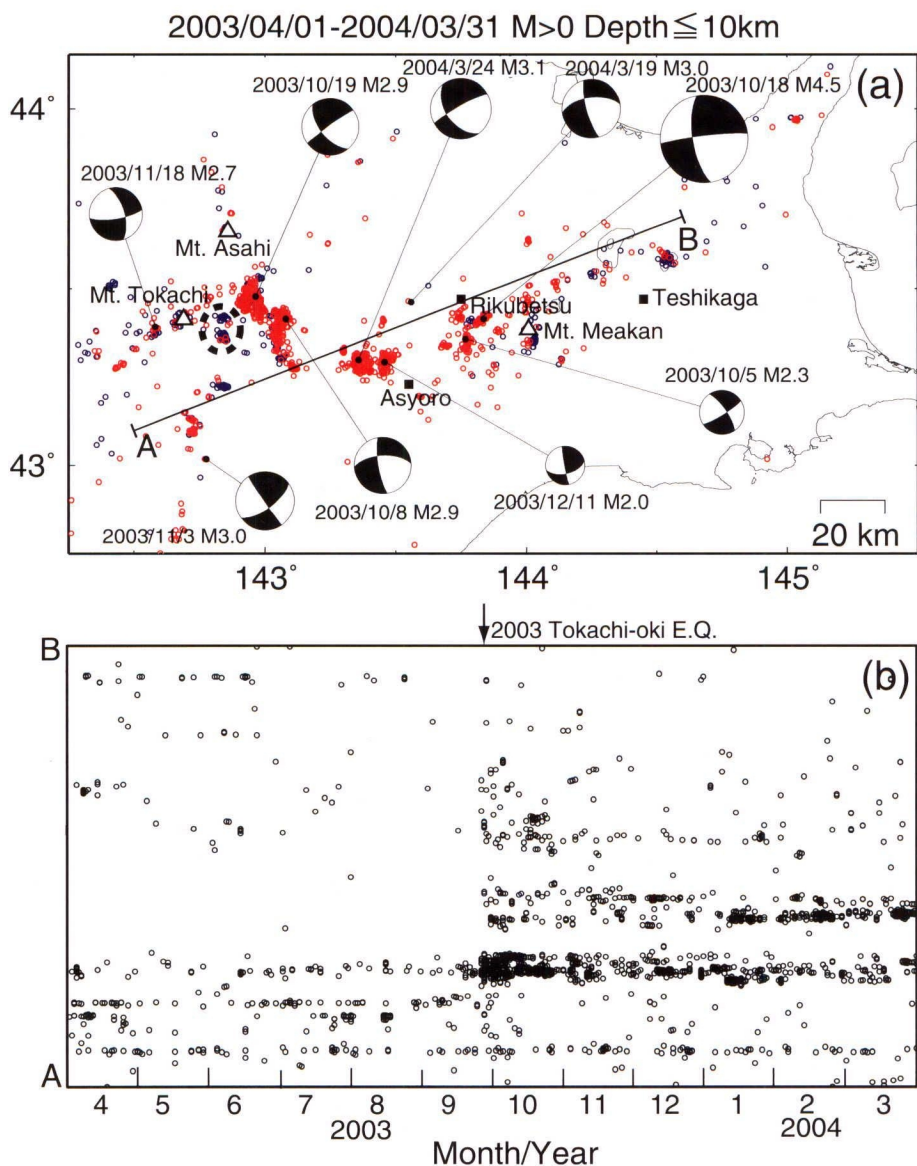


Fig. 1. (a) Epicentral distribution of shallow earthquakes ($d \leq 10$ km) during the six months before and after the 2003 Tokachi-oki earthquake on 26 September based on the JMA earthquake catalogue. Blue and red circles indicate epicenters before and after the mainshock, respectively. Focal mechanisms of major triggered earthquakes are also shown. Dotted circle indicates the place where seismic activity became inactive after the mainshock occurrence. (b) Space-time distribution of earthquakes projected onto the A-B line shown in (a).

での座標値の平均と、地震発生後の9月27日から30日までの平均値の差をとって求めた。Fig. 2(a)には、青森県の岩崎(950154)を固定した場合の地震時水平変位を示す。震源域に向かう水平変動ベクトルが北海道全域で観測されていることがわかる。

次に、GEONET観測網からできるだけ正三角形に近くなるように三角網を作成し、水平変位から歪を計算す

る手法[たとえば、壇原・友田(1969)]を用いてそれぞれの三角形内の歪を求めた。Fig. 2bには求められた主歪の分布を示す。これらの歪値を以下の式に入力することにより各三角要素での ΔCFS の計算を行った[たとえば、King *et al.* (1994)]。

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma$$

ここで $\Delta \tau$ はせん断応力変化、 μ' は見かけ摩擦係数、 $\Delta \sigma$

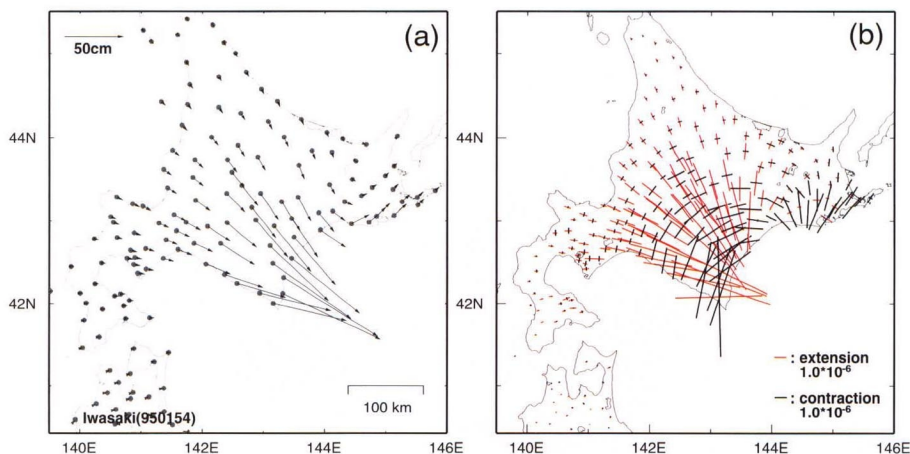


Fig. 2. (a) Coseismic horizontal displacements at GPS sites associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake. (b) Coseismic horizontal principal strains in triangular elements calculated from the horizontal displacements shown in (a).

は法線応力変化（伸張を正にとる）である。計算に用いた剛性率は 30 GPa, ポアソン比 0.25 で見かけ摩擦係数 μ' は 0.4 とした。Fig. 1 で示したように、誘発地震のメカニズム解は東北東-西南西走向の節面をもつような右横ずれが卓越している。そのため、その走向の平均値である N69°E の純粋な右横ずれ断層面を仮定し、その面上での Δ CFS を各三角要素について見積もった。

この手法では、GPS によるその場観測値から直接 Δ CFS を求めるため、先にも述べたような断層パラメータの任意性や、地殻の不均質性などによる影響を受けにくい。一方、GPS 観測点固有の地盤や水理特性などによるローカルなノイズの影響を受けやすくなる。また、地表面での地殻変動データしか利用できないため、得られる Δ CFS も地表面での値に限られ深さ方向に関する情報は得られない。しかし、実際には Δ CFS は水平方向に同様に深さ方向にも変化し、特に十勝沖地震のように低角逆断層の場合には、本震断層に近い部分でその値が大きく変化する [Lin and Stein (2004)]。

今回の誘発地震の発生領域は本震断層の下端から 100 km あまり離れており、地震が発生している深さも 10 km 程度までであるため、深さ方向への Δ CFS の変化による影響は小さいことが予想される [Lin and Stein (2004)]。しかしながら、 Δ CFS の深さ依存性についてより詳細な検討を行うために、国土地理院による十勝沖地震の断層パラメータ (<http://www.gsi.go.jp>) をアプリオリに与えて Δ CFS を計算し、対象領域でその値が深さ方向にどの程度変化するかを見積もった。その結果、対象領域での深さ 0 km と 10 km での Δ CFS の分布は、その空間パターンを同じくして南に 10 km 弱ずれ

るだけであった。この値は、ここで扱っている三角要素の大きさ（辺長が 20–30 km）よりも小さく、ゆえに地表面で求められた Δ CFS を用いて深さ 10 km 程度の誘発地震活動との関連を議論することは可能であると考えられる。

§ 3. 結果および議論

北海道東部の Δ CFS 分布と誘発地震の震央分布を Fig. 3 に示す。誘発地震活動が見られた 142.5 度付近から 144.5 度付近に至るまでの火山フロントを挟む領域で Δ CFS が増加していることがわかる。特に誘発地震が活発であった足寄や陸別付近では 0.10–0.18 MPa と増加量が大きかった。一方、地震活動にあまり変化が見られなかった屈斜路湖付近や十勝岳付近での Δ CFS 増加量はそれらよりも小さくなっている。誘発地震活動が観測されなかった屈斜路湖以東および十勝岳以西では、 Δ CFS は減少に転じている。このように、誘発地震活動が発生した場所と Δ CFS の増加が大きかった領域が一致していることは、この地震活動が Δ CFS の増加を直接的な原因として発生していた可能性を示している。King *et al.* (1994) は 0.01 MPa の Δ CFS の増加でも誘発地震が発生する場合があることを示したが、今回誘発地震が活発化したグリッドでの Δ CFS はこれよりも 1 桁以上大きい値であった。

ところで、火山フロントよりも前弧側の領域（十勝支庁中部）でも Δ CFS の増加が見られており、最大の増加を示したグリッドもここに位置している。しかし、この領域では誘発地震活動は観測されていない。また、これらの領域では定常的な地震活動度も極めて低い状態で

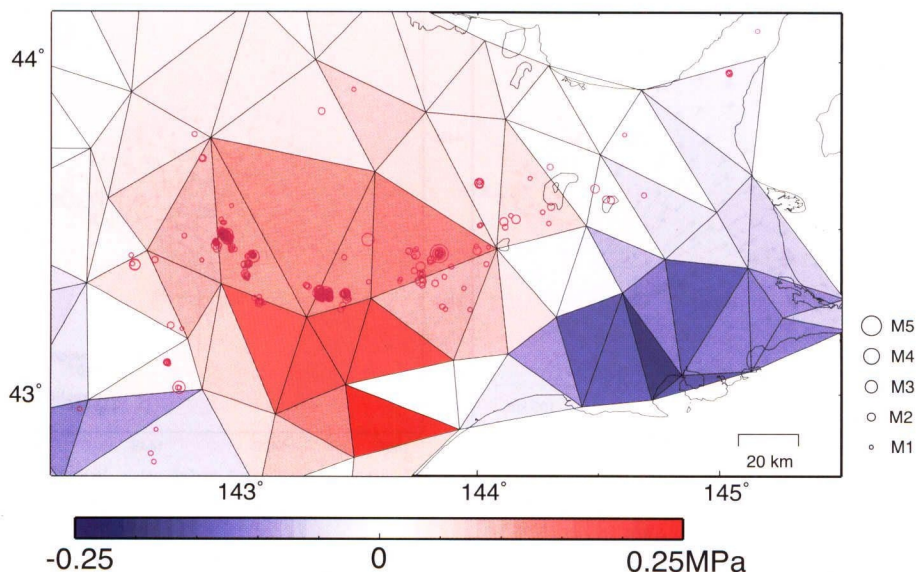


Fig. 3. Coulomb failure stress changes for the right-lateral strike slip mechanism on N69°E trending vertical fault plane in triangular elements. Red circles indicate epicenters of triggered earthquakes.

あった (Fig. 1). これは、誘発地震を発生させる ΔCFS の閾値が定常的な地震活動の有無で異なっている可能性を示唆している。つまり、定常的に地震活動度が高い領域では、既に断層面として働く弱面が形成されているために、相対的に小さな ΔCFS でも地震が誘発されると考えられる。これに対し、定常的な地震活動度が低い領域では、既存の弱面が存在しないために、脆性すべりを発生するためにはより大きな応力変化が必要になる。また、火山フロント付近では前弧域に比べて地殻熱流量が高くなっており [北海道立地下資源調査所 (1995)], 脆性破壊領域が薄いと考えられる。このような条件も、誘発地震活動の閾値に影響を与えていることが考えられる。

今回の誘発地震活動では、定常的な地震活動が停止した場所があった (Fig. 1). この場所で発生していた地震のメカニズム解が不明なため ΔCFS との関連についてはよくわからないが、地震活動が活発化した地域とは違った応力条件下にある可能性がある。また、143°E 付近には、北北西-南南東方向の震央分布が見られる。この走向は、 ΔCFS の計算で仮定した東北東-西南西の断層面と共役をなす節面の走向と調和的である。このため、北北西-南南東の断層面を用いた ΔCFS の計算も行ったが、得られた ΔCFS の値は東北東-西南西の断層面を仮定した場合の 5 分の 1 程度であった。

1952 年十勝沖地震 (M_{JMA} 8.2) では、2003 年の地震に比べて震源域が東側の釧路沖まで延びていた可能性が高いことが指摘されている [佐竹・他 (2005), 高橋・笠

原 (2004)]. この場合、 ΔCFS の増加が大きい範囲も 2003 年よりもより東方へ延びることになる。1952 年十勝沖地震の直後には、阿寒湖畔で鳴動を伴うような局所有感の誘発地震が地震発生後 34 時間ほぼ連続的に観測されている [中央气象台 (1953), 札幌管区气象台 (2000)]. しかしながら、2003 年の地震ではこのような現象は観測されなかった。このような誘発地震の発生様式の違いは、1952 年と 2003 年の震源域の広がりの違いを反映している可能性があり興味深い。

§ 4. ま と め

2003 年十勝沖地震発生直後から活発化した北海道東部火山フロント付近の誘発地震活動域の ΔCFS を、GEONET で観測された水平変位データを用いて歪を求めることにより推定した。その結果、誘発地震活動が活発であった領域で 0.10–0.18 MPa の ΔCFS 増加があったことが明らかになった。これは、誘発地震活動が十勝沖地震による ΔCFS の増加により引き起こされていた可能性を示している。定常的な地震活動度が低い領域でも ΔCFS の増加が認められたが、誘発地震活動はなかった。これは、定常的な地震活動の有無が誘発地震活動を引き起こすために必要な ΔCFS の閾値を決める要因のひとつとなっている可能性を示している。

謝 辞

本研究を行うにあたり、北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの笠原 稔教授から多く

のご意見を頂きました。査読者である橋本 学氏、熊谷博之氏、編集委員の鷺谷 威氏からは本稿を改善する上で有益なコメントを頂きました。国土地理院が公開しているGPS連続観測網の日毎座標値を用いた、震源メカニズム解の推定には、北海道大学、気象庁、防災科学技術観測所の地震波形データを使用した。本論文で用いた気象庁震源カタログは、気象庁が文部科学省と協力して北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市および独立行政法人海洋研究開発機構から提供を受けたデータを処理した結果である。記してここに感謝の意を表します。

文 献

- Brodsky, E. E., V. Karakostas and H. Kanamori, 2000, A new observation of dynamically triggered regional seismicity: Earthquake in Greece following the August, 1999 Izmit, Turkey Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2741–2744.
- 中央気象台, 1953, 昭和27年3月十勝沖地震調査報告, 験震時報, **17**, 1–2号, 188 pp.
- 壇原 毅・友田好文, 1969, 測地・地球物理, 共立出版, 286 pp.
- 北海道立地下資源調査所, 1995, 北海道地温勾配図.
- King, G. C. P., R. S. Stein and J. Lin, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 935–953.
- Lin, J. and R. S. Stein, 2004, Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip fault, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10.1029/2003JB002607.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the M_w 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 675–680.
- Protti, M., K. McNally, J. Pacheco, V. Gonzalez, C. Montero, J. Segura, J. Brenes, V. Barboza, E. Malavassi, F. Guendel, G. Simila, D. Rojas, A. Velasco, A. Mata, and W. Schillinger, 1995, The March 25, 1990 ($M_W=7.0$, $M_L=6.8$), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity, *J. Geophys. Res.*, **100**, 20345–20358.
- 札幌管区気象台, 2000, 北海道の地震活動 (第2版).
- 佐竹健治・平田賢治・谷岡勇市郎・山木 滋, 2005, 1952・2003年十勝沖地震の津波波源の比較—1952年津波の再検討に基づいて—, 月刊地球, 号外, **49**, 56–65.
- Stein, R. S. and Lisowski, M., 1983, The 1979 Homestead Valley Earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6477–6490.
- 杉田裕志・横田 崇, 2005, 「平成15年(2003年)十勝沖地震」と震源域およびその周辺域の地震活動について, 地震2, **57**, 305–314.
- 高橋浩晃・笠原 稔, 2004, 2003年十勝沖地震—1952年十勝沖地震からの地震活動・前震・本震・余震および誘発地震—, 地震2, **57**, 115–130.