

伊東沖と岩手山における火山性力源による 地震のトリガリング

西 村 卓 也*

Earthquake Triggering due to Volcanic Deformation Sources in Areas East off Ito and around the Mt. Iwate Volcano

Takuya NISHIMURA *

Abstract

A change of Coulomb Failure Stress (CFS) is commonly used to explain a mechanism of earthquake triggering due to both earthquake faulting and volcanic sources. First, we introduced crustal deformation and source model for five episodes of volcanic activities off Ito, central Japan and around the Mt. Iwate volcano, northern Japan based on dense geodetic measurements. And then, we calculated spatial distribution of a CFS change due to the estimated source models and compared the observed seismic activities.

In the case of the 1998 earthquake swarm off Ito, the region where opening of dike and the largest earthquake ($M5.7$) increase CFS was concordant with the hypocenter distribution observed after the largest earthquake. However, the largest earthquake occurred in the area where CFS decreased.

In the case of the Iwate volcano, a volcanic inflation source increased CFS by 0.33 MPa at the hypocenter of the $M6.1$ earthquake that occurred on September 3, 1998. The calculated CFS change is 7 % of the coseismic stress drop. The $M6.1$ earthquake occurred at the northern edge of the Nishine Fault found by geographical and geological studies. It suggests that the inflation promoted the rupture of a known Quaternary fault. Stress shadow caused by the $M6.1$ earthquake explains the observed quiescence of the seismic swarm activity west of $E140.95^\circ$ after the occurrence of the earthquake.

Key words : stress change, earthquake triggering, volcanic deformation source, crustal deformation

キーワード : 応力変化, 地震のトリガリング, 火山性力源, 地殻変動

* 国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室

* Crustal Deformation Research Division, Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geographical Survey Institute

I. はじめに

地震と火山の噴火が時空間的に近接して発生した事例は、宝永東海地震の49日後に発生した富士山の宝永噴火や1914年桜島大正噴火の日に発生した鹿児島地震(M7.1: 宇津, 1979)など数多く知られている。火山活動と地震は、地殻内で周辺の応力場に支配されている現象である。いままで、多くの研究者によって両者の因果関係を静的な応力変化で説明できることが示されてきた。(例えば、山岡, 1994; 鶴川, 1994)。

1992年のLanders地震や1995年兵庫県南部地震の発生以降、地震の断層運動や火山性の力源が周辺の地震の発生に与える影響について、クーロンの破壊応力(Coulomb Failure Stress 以下CFSと略す)の変化によって説明することが一般的になっている(例えば、Stein and Lisowski, 1983; King *et al.*, 1994; 橋本, 1997; Toda *et al.*, 1998; Nostro *et al.*, 1998)。クーロンの破壊応力に関する説明は、多くの教科書(例えば、Scholz, 1990)や参考文献などに記されているので割愛するが、すべり面上に働く剪断応力と摩擦力の両者を考慮して、すべりが起こりやすくなるかどうかを評価することができる量である。2000年の三宅島から神津島での地殻活動(Nishimura *et al.*, 2001b)を挙げるまでもなく、火山活動は群発地震を伴うことが一般的であり、群発地震の震源域から離れた地震も誘発することがある。CFSを用いることによって群発地震の発生域と火山性変動源の位置関係や、周囲の活断層での地震のトリガリングを議論することができる。

本論文では、1995-1998年の伊東沖の群発地震活動と1998年の岩手山の火山活動の地殻変動データから推定された断層モデル(西村ほか, 1988; Nishimura *et al.*, 2001a)を紹介し、周辺の地震活動が断層モデルから計算されるCFSの変化によって説明できるかどうかの検討を行う。なお、本稿ではdike貫入時の地殻変動源モデルとして使われるTensile Faultの訳語として「開口断層」という用語を用いた。dikeという単語は、鉛直方向に伸びた板状のマグマの貫入という意味を

含むので、純粋に地殻変動の力源モデルを表す意味で、開口断層を用いている。

II. 火山性力源周辺での応力変化

火山性力源の周囲でクーロンの破壊応力(CFS)がどう変化するかを計算してみよう。開口断層(dike)の先端付近のCFS変化については、Rubin and Gillard (1998)によって詳細な検討が行われているが、ここでは観測されている震源分布と比較するために、全体的な空間パターンについて概観する。

口絵1-1は、開口断層が開口することによるCFSの変化(Δ CFS)の空間水平分布を示したものである。まず、地域的な初期応力場として、最大主応力軸および最小主応力軸が水平面内にあり、深さ方向に様な平面応力状態を仮定した。そして、最大圧縮軸の方向に走向を持ち、鉛直方向には無限の長さを持つ開口断層が、1m開口した場合の応力変化を加えて、CFSが最大となるすべり面におけるCFSの変化(Δ CFS)を計算した。ただし、すべり面は鉛直面のみを仮定したので、地震のメカニズム解はすべて横ずれ断層型になる。なお、本論文で行った Δ CFSの計算は、すべて摩擦係数0.4、剛性率30GPaを仮定した。

口絵1-1(a)は、初期応力の最大圧縮応力および最小圧縮応力を80MPa, 50MPaとしたときの場合の Δ CFSの計算結果である。赤紫と緑の線は、それぞれ右横ずれと左横ずれの場合のすべり面の方向を表している。 Δ CFSの増加域は、開口断層の端から断層の延長方向とは斜めに伸びていることがわかる。また、このように初期応力の差応力が大きい場合は、断層の近傍であってもCFSが最大になる面はそれほど変化せず、地域的な応力場から期待されるメカニズムの地震が発生することになる。一方の口絵1-1(b)は、最大圧縮応力および最小圧縮応力を53MPa, 50MPaとしたときの場合である。 Δ CFSの増加する領域が断層の端で大きくなるという特徴は、口絵1-1(a)と同様であるが、断層の周囲を取り囲むよう増加域が広く分布する。また、断層近傍では、断層の開口による応力変化によって様々な走向の地震が

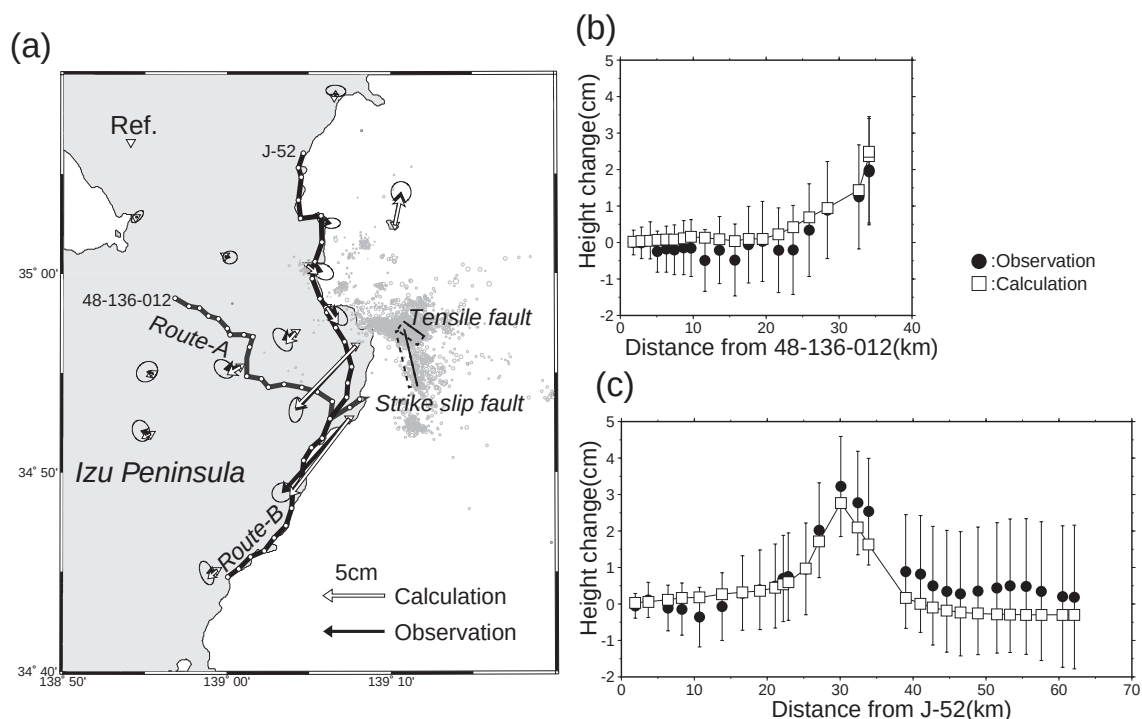


図 1 1998 年 4-5 月の伊東沖群発地震に伴う地殻変動と断層モデル。

(a) GPS 観測点における水平変位ベクトルと推定された断層の位置。変位ベクトルの観測値は、1998 年 4 月 6-15 日と 6 月 11-20 日の平均値の差を表している。誤差楕円は 1 標準偏差の大きさを表す。矩形の領域が推定された断層の位置で、実線が矩形断層の一番浅い辺を表している。震源分布は気象庁による。(b) 伊豆半島を東西に走る水準路線 (Route-A) における上下変動。(c) 伊豆半島の東海岸を走る水準路線 (Route-B) における上下変動。

Fig. 1 Displacement and fault model of the earthquake swarm off Ito for April-May, 1998.

(a) Horizontal displacement vectors of GPS sites and the location of estimated faults. Error ellipsoids means 1-sigma. (b) Vertical displacement on leveling route-A across the Izu Peninsula. (c) Same as (b) but on leveling route-B along the east coast of the Izu Peninsula.

発生することになる。

口絵 1-1 (a), (b) に示したように、開口断層 (dike) 周辺の地震活動のパターンが地域的な差応力によって異なることは、鶴川 (1994) により指摘されているが、CFS を用いることにより直感的に図示することができる。

III. 伊東沖群発地震で見られるトリガリング

1) 地殻変動による断層モデルの推定

伊豆半島の伊東沖では、1978 年から 1998 年まで毎年のように群発地震が発生しており、1989 年には手石海丘で海底噴火が発生した。国土地理院では 1992 年から伊東周辺での GPS 連続観測を開

始した。1994 年には、図 1 に示したような GPS 観測網がほぼ完成し、日々の地殻変動の監視を行っている。また年 2 回、水準測量も行われており群発地震に伴う隆起が観測されている。

西村ほか (1998) は、1995 年 9-10 月、1996 年 10 月、1997 年 3 月、1998 年 4-5 月の 4 回の群発地震活動に伴う地殻変動観測結果を用いて、断層モデルの推定を行った。伊東沖の群発地震は dike が貫入することにより発生し、その地殻変動は開口断層を用いてモデル化できる (Okada and Yamamoto, 1991)。以下では、西村ほか (1998) が、開口断層のパラメータをインヴァージョンで推定した研究について説明する。地殻変動の計算

表 1 伊東沖群発地震の断層パラメータ。断層パラメータは Aki and Recharads(1980)の慣例に従って記述した。

Table 1 Estimated parameters of tensile and shear faults of earthquake swarms off Ito, Central Japan. The parameters of faults are represented in the convention of Aki and Recharads (1980).

Event	Data period (GPS)	Data period (Leveling)	Type of fault	Latitude Longitude (°)	Depth (km)	Length × Width (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)	Open (m)
1998 Apr.-May	1998/4/6-15 ~ 1998/6/11-20	1997/6-8 ~ 1998/6-7	Tensile	N34.960 E139.180	0.3	2.3 × 5.7	126	80	—	—	1.19
			Shear	N34.953 E139.180	1.6	5.3 × 1.9	167	65	5	0.82	—
1997 Mar.	1997/2/17-26 ~ 1997/3/26-4/4	1996/10-11 ~ 1997/6-8	Tensile	N34.970 E139.161	0.5	1.9 × 5.8	126	76	—	—	1.11
			Shear	N34.964 E139.182	2.3	4.3 × 2.5	157	65	350	1.23	—
1996 Oct.	1996/10/1-10 ~ 1996/11/10-19	1996/7-8 ~ 1996/10-11	Tensile	N34.989 E139.136	4.3	1.2 × 8.4	123	60	—	—	1.15
1995 Sep.-Oct	1995/8/26-9/6 ~ 1995/10/28-11/6	1995/6-7 ~ 1996/7-8	Tensile	N34.979 E139.154	2.0	2.2 × 7.7	117	74	—	—	0.87
			Tensile	N34.955 E139.160	6.7	1.3 × 3.3	118	76	—	—	0.81

には、ポアソン比が 0.25 で一様な半無限弾性体を仮定した Okada (1992) による解析解を用いた。インヴァージョンは、Matsu'ura and Hasegawa (1987) によって定式化された非線形最小二乗法を用いた。データは、表 1 に示した 2 つの期間の観測値の差を、それぞれの活動による地殻変動と見なして解析した。GPS からは、南北、東西、上下の 3 成分のデータを用い、水準測量からは 2 つの路線における上下変動のデータを用いている。データとして用いた GPS 観測点と水準路線は図 1 に示した。

1997 年と 1998 年の活動では群発活動中の最大地震が気象マグニチュード 5.7 と大きく、GPS から地震に伴うステップ的な地殻変動が観測されているため、地震断層と開口断層の 2 枚の断層のパラメータを推定した。その際、地震断層の走向、傾斜角、すべり角は防災科学技術研究所の FREESIA 観測網によって決められたメカニズム解の 2 つの節面から、余震分布を考慮して 1 つの節面へと固定した。また 1995 年 9-10 月の活動は、

地震活動の時間的ピークが 2 つに分かれており、両者の震源の位置も異なるので、2 枚の開口断層を仮定した。

図 1 に、1998 年の活動において推定された断層位置および地殻変動の観測値と計算値を示す。推定された断層の位置は群発地震の震源域と一致し、計算値は観測値の誤差の範囲内におさまっている。なお図 1 (a) の GPS による水平変位の誤差楕円は、活動前後の 2 つの期間における平均値の差の標準偏差を表しており、図 1 (b) と (c) の誤差範囲は一等水準測量の往復差の制限である $s=2.5\sqrt{L}$ を用いた。ここで s と L は誤差 (単位 mm) と水準点間の距離 (単位 km) である。同様の方法で推定した 4 回の群発地震のパラメータを表 1 にまとめた。貫入 dike の厚さは、4 回の活動のいずれも 1 m 前後であった。dike として貫入したマグマの体積は、1995 年から 1998 年の活動までそれぞれ $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$, $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ である。これは、Okada and Yamamoto (1991) によって推定された 1989 年の活動の 2.1

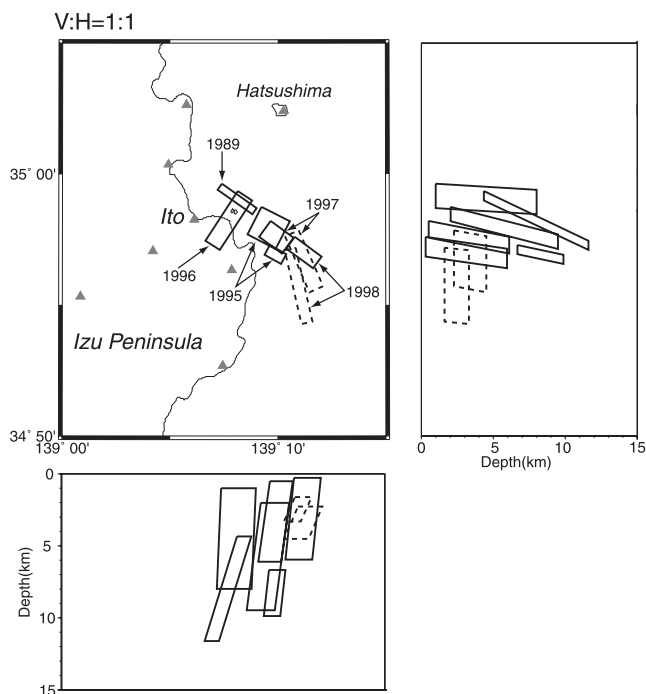


図 2 伊東沖群発地震における dike 貫入位置。
実線の矩形領域が dike を表しており、破線の矩形領域は 1997 年と 1998 年の活動の最大地震(ともに M5.7)の地震断層を表している。1989 年の活動は Okada and Yamamoto (1991) による結果を用いた。

Fig. 2 Location of dikes associated with the earthquake swarms east off Ito. Solid and broken rectangles are dikes and shear faults, respectively. The model of the 1989 event is estimated by Okada and Yamamoto (1989).

$\times 10^7 \text{ m}^3$ より小さいが、個々の活動で貫入したマグマの体積の比は最大でも 2 程度におさまっている。

図 2 に、4 回の群発地震において推定された断層の位置と Okada and Yamamoto(1991)によって推定された 1989 年の活動における dike の位置を示した。図 2 より、どの群発地震においても dike の走向は西北西-東南東方向であり、それらがほぼ一直線上に並んでいることがわかる。さらに dike の位置は、互いにほとんど重複せず、以前に貫入した場所を避けるように並んでいることがわかった。

2) dike と群発地震の位置関係

伊東沖の群発地震の震源分布を見ると、前章で計算した dike 周辺の ΔCFS の増加域に対応する

ような地震分布の特徴を見いだすことができる。伊東沖の群発地震のメカニズム解の多くは、西北西-東南東を最大圧縮軸とする横ずれ断層型である(東京大学地震研究所, 1997)。また貫入ダイクの走向も、前節で求めたように西北西-東南東であり、地域的な応力場を反映した群発地震が発生している。1997 年 3 月の群発地震の震源分布(東京大学地震研究所, 1997, 第 2 図)を見ると、地震の最も密集している領域は前節で推定した dike の位置に対応するが、その周辺では南南西と北北東側には地震が少ない傾向が見受けられる。逆に、周辺での地震の発生域は、図 1-1 (a) に示した ΔCFS の増加域に対応するように dike の延長線上から一定の角をなす方向に伸びている。図 1-2 は、1998 年の群発活動の断層モデル(開口断層

+地震断層)を用いて計算した Δ CFS と最大地震の発生(1998 年 5 月 3 日)以降の震源分布を重ねて示したものである。 Δ CFS を計算したすべり面は、図中に示したメカニズム解の北北西-南南東の節面である。推定された dike の近傍を除けば、地震の発生域は Δ CFS の増加域と良く対応している。もう一方の節面における CFS を計算すると、全体を反時計回りに約 15 度回転したような分布となるが、そのような場合でも地震の発生域はおおむね Δ CFS の増加域に対応している。

しかし、5 月 3 日の最大地震については、メカニズムは地域的な応力場から期待されるものではあったが、地震断層の位置は dike の開口による Δ CFS の減少域に対応するため、静的応力増加によるトリガリングでは説明できない。一方、1997 年の活動の最大地震は Δ CFS の増加域に位置する。図 2 の破線で示したように、1998 年の群発活動での最大地震の断層面は 1997 年の最大地震とほとんど同じ位置にあたり、既存の弱面の割れ残りだった可能性がある。Horikawa (2001) は、たとえ Δ CFS を減少させるような方向であっても、周囲の急激な応力変化が不安定すべり(地震)を誘発するメカニズムを考察しており、1998 年の最大地震もそのようなメカニズムで説明できるかもしれない。また、口絵 1-2 の dike の近傍においては、 Δ CFS の減少域でも多くの地震が発生している。その理由としては、実際の dike 周辺では、dike の厚さの空間的な不均質などにより、ここで用いた単純な断層モデルによる応力場とは異なった複雑な応力場となっている可能性がある。さらに、dike の開きによる応力擾乱が地域的な応力にくらべて大きい場合(口絵 1-1 (b) のような場合)は、dike 周辺では様々な震源メカニズムの地震が発生する。口絵 1-2 はあらかじめすべり面を仮定して Δ CFS を計算したものであるが、図に示した dike の近傍の微小地震のメカニズムは必ずしも明らかではなく、様々な震源メカニズムが混在しているのかもしれない。

IV. 1998 年岩手山火山活動で見られたトリガリングと静穏化

岩手山周辺では、1998 年の 2 月中旬から山体直下浅部の地震が増加した(田中ほか, 1999)。同時に、岩手山周辺に設置された GPS によって、岩手山の膨張を示す地殻変動が観測されるようになった(例えば, Miura *et al.*, 2000)。当初、群発地震は岩手山の山頂直下で発生していたが、4 月下旬から発生域が西側の黒倉山や姥倉山、そして葛根田の地熱地帯へと拡大し、東岩手から西岩手に連なる稜線の直下で群発地震が発生するようになった。また同じころ地殻変動も加速するような変化を見せたため噴火に対する緊張感が高まった。地殻変動と地震活動は 7 月をピークにやや減少する傾向を見せたが、9 月 3 日に群発地震の発生域とはやや離れた岩手山の西南西 11 km を震源とする気象庁マグニチュード 6.1 の地震が発生し、震源に近い雫石町長山では震度 6 弱を観測した。この地震に伴い、従来から知られていた活断層である西根断層の北端部付近に地表地震断層が現れた(越谷ほか, 1998)。9 月 3 日の地震の発生以降、岩手山の活動は全般的に低調となった。

岩手山の周辺には、国土地理院や東北大学によって多くの GPS 観測点が設置されたが、山岳部における電源および通信手段確保の困難さから、群発地震の発生域近傍での GPS 観測は必ずしも十分ではない。しかし、空間的に高分解の面的地殻変動が得られる干渉 SAR 技術の登場(例えば, Massonet *et al.*, 1993)により、岩手山の火山性地殻変動や 1998 年 9 月 3 日の地震に伴う地殻変動の空間パターンが詳細に得られている(Fujiwara *et al.*, 1999; Nishimura *et al.*, 2001a)。

Nishimura *et al.* (2001a) は、1998 年 4 月下旬から 9 月 3 日の地震発生までの干渉 SAR と GPS による地殻変動観測データから変動源の推定を行った。その結果、岩手山の西 13 km の地下 7.9 km において球状圧力源(茂木モデル)の体積が 0.033 km³ 増加したという結果を得た。Fujiwara *et al.* (1999) は、干渉 SAR によって面的に得られた 9 月 3 日の地震に伴う地殻変動のパターンを

詳細に解析し、地表の調査で発見された地震断層に加えて、ほぼ平行で西に2 km離れた断層が動いたことを示した。しかも、変動量の大きさや断層長は西側の断層の方が大きく、主断層というべきでもであった。Nishimura *et al.* (2001a) は、干渉 SAR, GPS, 光波測距観測によって得られた M6.1 の地震に伴う地殻変動から、Fujiwara *et al.* (1999) によって示された平行な2つの断層面を用いて断層面上のすべり分布の推定を行った。推定の結果によると、震源メカニズムはおおむね右横ずれ成分を持つ逆断層であり、モーメントマグニチュードは6.0である。

9月3日の本震の破壊域や余震域は、それ以前の群発地震の発生域とは異なり、その震源メカニズムや活断層である西根断層の北端部で発生していることから、テクトニックな地震と言える。しかし、この地震の震源域の近傍に火山性の球状圧力源が推定されており、その増圧と地震の発生が時間・空間的に近接していることから、火山活動がこの地震の発生に何らかの影響を与えたと考えることは自然であろう。そこで図 1-3 に示すように、球状圧力源の体積増加に伴う9月3日の地震の震源メカニズムに対応する CFS の変化を計算した。その結果、震源の位置での ΔCFS は 0.33 MPa の増加となった。この応力変化は、地震による応力降下量 (4.9 MPa: 菊地・山中, 1998) の7%にあたる。すなわち、西根断層北端には既に地震発生に必要な応力の93%が蓄積されていたが、火山活動による球状圧力源の体積増加がさらに7%の応力を増加させたため、9月3日の地震の発生に至ったと考えることができる。

Fujiwara *et al.* (1999) は、干渉 SAR による地殻変動分布から、2つの主要な断層以外にも直線的に変位が不連続になっている場所を見つけ、小断層における微小なすべりによるものと考えた。Nishimura *et al.* (2001a) の断層モデルから、これらの小断層における ΔCFS を計算すると、ほとんどの小断層で ΔCFS が増加しており、本震によって微小なすべりが誘発されたと結論付けている。

1998年9月3日の地震発生以降、岩手山の群発

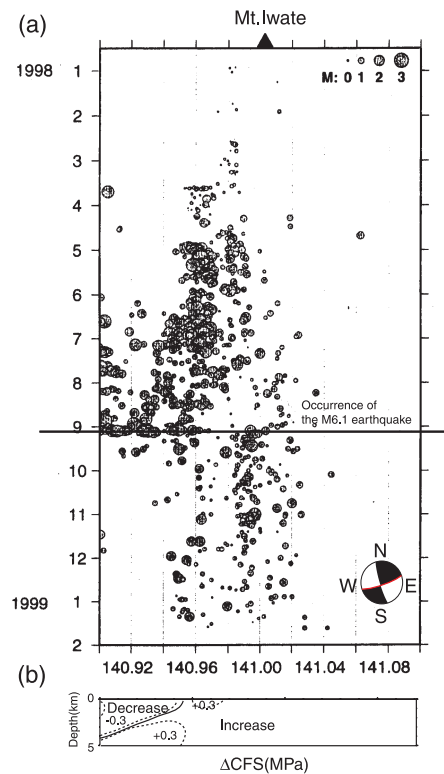


図 3 岩手山の群発地震の時空間変化と ΔCFS の関係。

(a) 東西方向に投影した群発地震の時空間変化図。東北大学 (1999) による図に加筆。震源球の東西に近い節面において、CFS を計算した。

(b) 1998 年 9 月 3 日の地震による北緯 39.85° における ΔCFS の東西断面。

Fig. 3 Space-time plot of the epicenters of earthquakes around the Mt. Iwate volcano and Coulomb stress change (ΔCFS).

(a) Space-time plot on epicenter E-W profiles. Modified from Tohoku Univ. (1999). An EW plane of a beachball is the focal mechanism used to calculate ΔCFS . (b) E-W profile of ΔCFS at N39.85°.

地震の発生に顕著な変化が見られた。図 3 (a) に東西方向に投影した群発地震の時空間分布図 (東北大学大学院理学研究科, 1999) を示す。地震活動は西側へと拡大しており、9月3日の地震の直前1か月間を見ると、多くの地震は東経 140.96°

より西側で発生していた。しかし、地震の発生後、東経 140.96°より西側では地震活動がそれほど見られなくなったのに対し、それより東側ではほとんど変化がないか、むしろ増加する傾向が見られる。図 3 (b) に 9 月 3 日の地震による、群発地震発生域での Δ CFS の東西断面を示す。CFS を計算した地震のメカニズムは、田中ほか (1999) によって求められたものの一般的な解を用いた。地震の直前に活発であった西側の群発地震は、おおむね深さ 3 km よりも浅い領域で発生していたが、その領域では Δ CFS が顕著に減少している。その一方で、東経 140.95°より東側は CFS がやや増加する領域となり、地震活動の消長と調和的である。ここで示した岩手山の群発地震活動の変化は、 Δ CFS の減少域 (Stress Shadow) における地震の静穏化の典型的な事例であると言える。

V. おわりに

伊東沖の群発地震と岩手山の火山活動において、断層モデルの推定とクーロンの破壊応力 (CFS) を用いた地震のトリガリングについて考察を行い、実際の地震活動が計算された CFS 変化と良く対応していることを明らかにした。本論文で示した、火山性の力源によるクーロン破壊応力変化の値は、力源の形状や地震発生地点との位置関係によって、大きく変わりうる。しかしながら、詳細な地殻変動データから精度の高い火山性力源の推定が行えれば、地震発生予測や防災に役立つ重要な情報を提供できるであろう。

一方で、火山性力源に対する外部からの応力変化が火山活動の推移にどう影響するかは、必ずしも明らかになっていない。2000 年の三宅島の火山活動においても中規模地震の発生と噴火の関連性が指摘されており、重要な研究課題であると考えられる。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、国土地理院の多田 堯博士、村上 亮博士、鷺谷 威博士による助言や議論は大変参考になりました。インヴァージョンのプログラムは鷺谷 威博士による FLTINV を一部改造したものを用

いました。岩手山の解析では、文部科学省の藤原 智博士による干渉 SAR による地殻変動観測結果を使用させていただきました。匿名査読者によるコメントは、本稿の修正に大変有益でした。震源分布は気象庁の統合データ処理の結果を用いました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Aki, K. and Richards, P.G. (1980): *Quantitative Seismology*. W.H. Freeman and Company.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M. and Rosen, P.A. (1999): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2049–2052.
- 橋本 学 (1997): 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修正再計算. *地震*, **50**, 21–28.
- Horikawa, H. (2001): Earthquake doublet in Kago-shima, Japan: Rupture of asperities in a stress shadow. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **91**, 112–127.
- King, G.C.P., Stein, R.S. and Lin, J. (1994): Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **84**, 935–953.
- 菊地正幸・山中佳子 (1998): 98 年 9 月 3 日岩手県内陸北部の地震 (Mj6.0). EIC 地震学ノート, No. 50, http://kea.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/980903.html
- 越谷 信・大石雅之・野田 賢・奥寺勇樹・加藤貴史・滝口真一・三田地喜之・嶋守真紀・斎藤徳美・矢内桂三・平野信一・澤 祥・福留高明・佐藤比呂志・大槻憲四郎・長濱裕幸・中村教博・土井宣夫・東郷正美・栗田泰夫・吉岡敏和 (1998): 1998 年 9 月 3 日岩手県内陸北部の地震に伴う地震断層、活断層研究, **17**, 9–20.
- Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K. and Rabaute, T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**, 138–142.
- Matsu'ura, M. and Hasegawa, Y. (1987): A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints. *Phys. Earth Planetary Interior*, **47**, 179–187.
- Miura, S., Ueki, S., Sato, T., Tachibana, K. and Hamaguchi, H. (2000): Crustal deformation associated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate Volcano, Northeastern Japan as observed by a dense GPS network. *Earth Planets Space*, **52**, 1003–1008.
- 西村卓也・鷺谷 威・小田切聡子・多田 堯 (1998): 1998 年 4–5 月の伊豆半島北東部の地殻変動と断層モデル. 日本地震学会講演予稿集, 秋季大会, 99.
- Nishimura, T., Fujiwara, S., Murakami, M., Tobita, M., Nakagawa, H., Sagiya, T. and Tada, T. (2001a): The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern

- Japan, observed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635-638.
- Nishimura, T., Ozawa, S., Murakami, M., Sagiya, T., Tada, T., Kaidzu M. and Ukawa, M. (2001b): Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3745-3748.
- Nostro, C., Stein, R., Cocc, M., Belardinelli, M. and Marzocchi, W. (1998): Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes, Italy, by elastic stress transfer. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24487-24504.
- Okada, Y.(1992): Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **82**, 1018-1040.
- Okada, Y. and Yamamoto, E.(1991): Dyke Intrusion Model for the 1989 Seismovolcanic Activity Off Ito, Central Japan. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10361 - 10376.
- Rubin, A.M. and Gillard, D. (1998): Dike-induced earthquakes: Theoretical considerations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 10017-10030.
- Scholz, C.H. (1990): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press.
- 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.
- 田中 聡・中道治久・浜口博之・植木貞人 (1999): 1998年の岩手山における地震活動. 月刊地球, **21**, 273 - 279.
- Toda, S., Stein, R.S., Reasenber, P.A., Dieterich, J.H. and Yoshida, A.(1998): Stress transferred by the 1995 Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, **103**, 24543-24565.
- 東京大学地震研究所 (1997): 伊豆半島付近の地震活動 (1997年2月～1997年4月). 地震予知連絡会会報, **58**, 239-249.
- 東北大学大学院理学研究科 (1999): 岩手山の地震活動と地殻変動(1998年10月～1999年1月). 火山噴火予知連絡会会報, **73**, 16-24.
- 鵜川元雄 (1994): ダイクの貫入と群発地震. 地学雑誌, **103**, 537-547.
- 宇津徳治 (1979): 1885～1925年の日本の地震活動. 東京大学地震研究所彙報, **54**, 253-308.
- 山岡耕春 (1994): 地殻応力から見た火山活動と地震との関係—伊豆大島での観測から—. 火山, **39**, 141-153.

(2001年12月3日受付, 2002年3月5日受理)