

新島・式根島・神津島の変動はなぜ時間変化するのか？

—2000 年三宅島噴火に伴う地殻活動—

飯尾能久*

東京大学地震研究所

Why do displacement velocities of the Niijima, Shikinejima, and Koudushima islands vary over time?

—Crustal activity accompanied by the 2000 Eruption of Miyakejima Volcano—

Yoshihisa Iio*

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

Displacement velocities of the Niijima, Shikinejima, and Koudushima islands to Minamiizu from June to August in 2000 measured by the GEONET vary over time. It seems that the displacement velocities of the Shikinejima and Niijima islands show a reverse correlation. This can be explained by two pairs of dyke and fault plane, the northern and southern pairs. It is inferred from seismic activity that these pairs alternately became active. The displacement velocity of the Shikinejima was large when the southern pair was active, while that of the Niijima was large when the northern pair was active. Further, all of the displacement velocities became small for a few days after a large earthquake ($M > 6$) occurred. This might be explained by a decrease in volumetric strain in and around the magma chambers in the lower crust.

Key words: Niijima, Shikinejima, GPS, dyke, and magma chamber.

1. はじめに

2000 年三宅島噴火および三宅島・式根島間に推定されているマグマの活動においては、地震活動だけでなく地殻変動についても、国土地理院 GEONET や防災科学技術研究所の傾斜計の観測網により、ほぼリアルタイムでその推移が捉えられた(例えば、村上・他, 2000; 山本・他, 2000)。地殻活動の把握における、多項目のデータの有効性が改めて確認された。

これらのデータは、複雑な地殻変動の時間変化を示している。例えば、国土地理院 GEONET でとらえられた 2000 年 7、8 月の新島・式根島・神津島の変位速度は時間的に一定ではない(例えば、村上・他, 2000)。地殻活動の予測においては、その時間的な変動の原因を明らか

にすることが重要である。本論文は、この時間的な変化とそのメカニズムについて調べる。方法としては、インバージョン等により精細な運動学的モデルを推定するのではなく、GPS による地殻変動および地震活動のデータの両方を、力学的に合理的に説明することを試みる。

2. データ

2.1 GPS データ

国土地理院 GEONET による、伊豆 2 (93086) に対する新島・式根島・神津島の変動を調べた。解析した期間は、6 月 28 日から 8 月 28 日までの 2 ヶ月間である。6 時間のデータを 3 時間毎に解析して得られたデータ(監視用データ, Fig. 1a) から、前後に 2 cm 以上飛びがある

*e-mail: iio@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

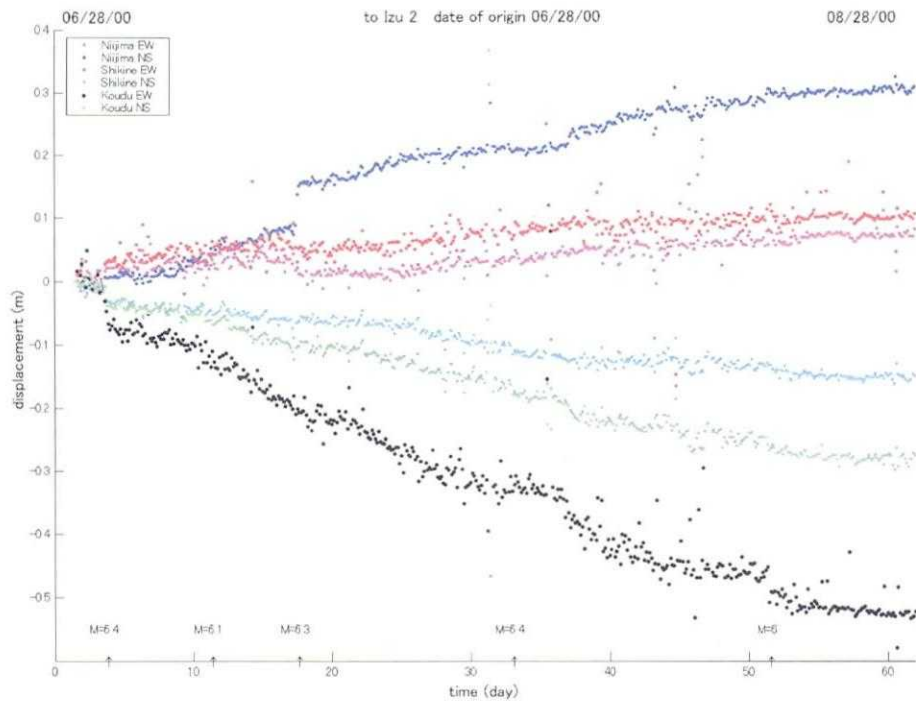


Fig. 1 (a)

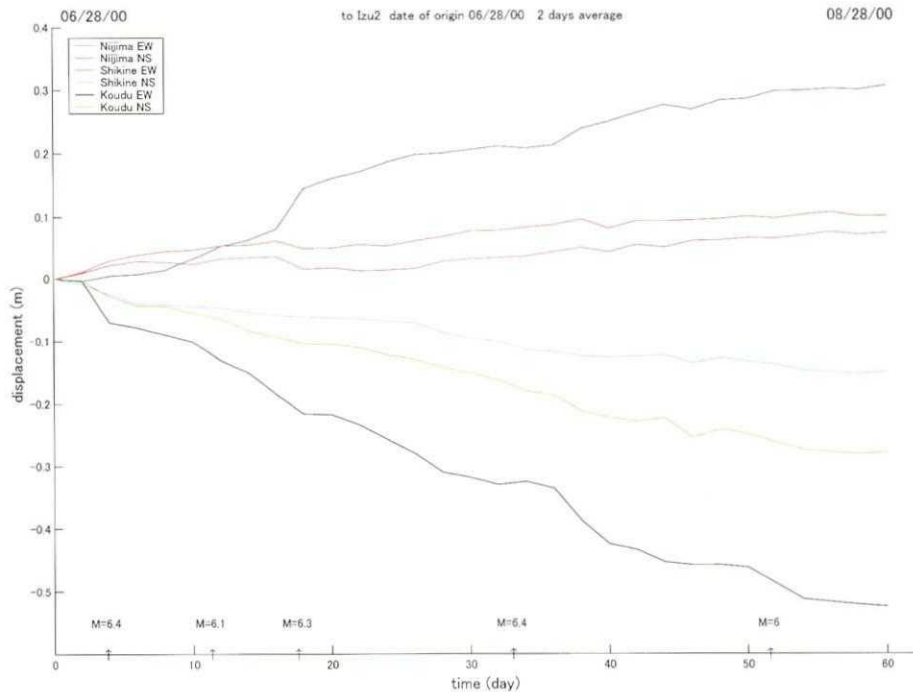


Fig. 1 (b)

データを除いて、2日間の平均を求め (Fig. 1b), それから各島の代表的な成分について変位速度 (Fig. 1c) を計算した. 計算結果は, それぞれ解析区間の中央にプロットされている. 図の横軸は6月28日からの経過日数である. ところで, このデータは, 伊豆2を固定点とした

ものであり, 伊豆2の変位の分だけバイアスがかかっている. しかし, 村上・他 (2000) によると, ほぼ同期間における伊豆2の変位は, 3つの島の中で変位が最も小さい式根島に比べても7分の1程度であるので, 以下の議論ではバイアスは無視できると考えられる.

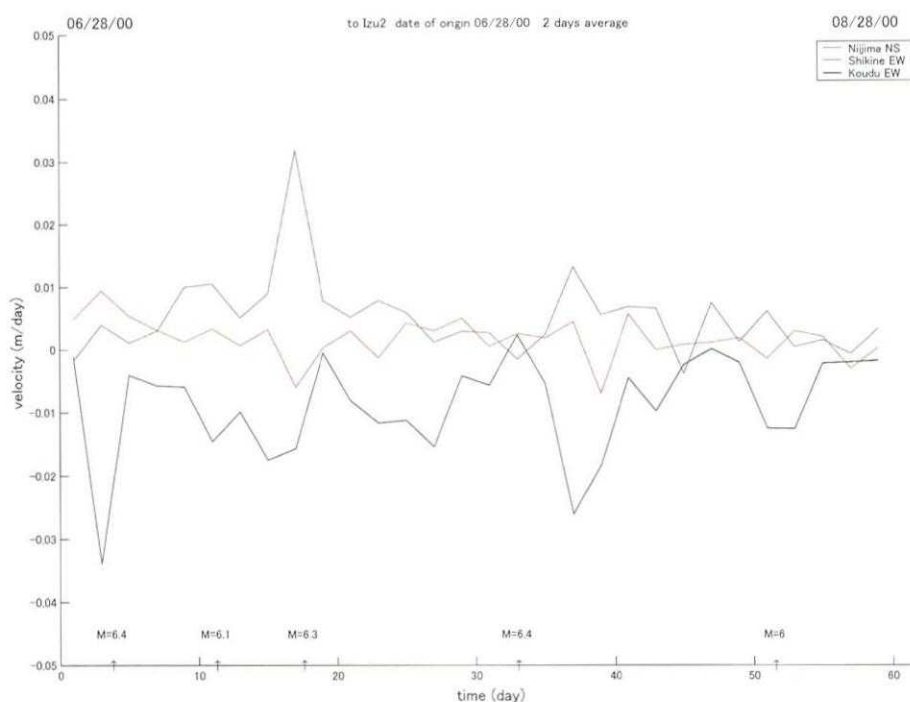


Fig. 1 (c)

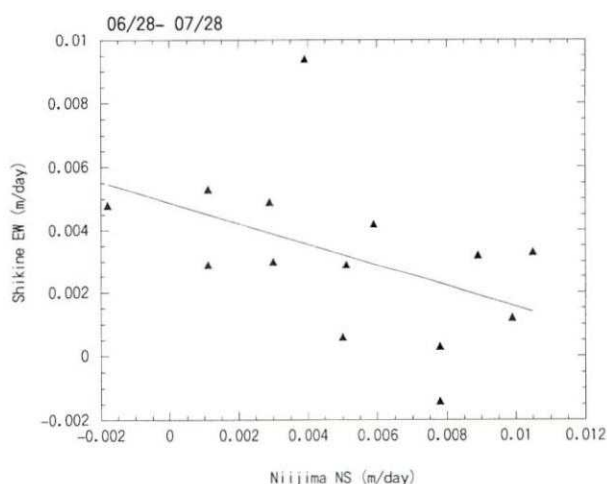


Fig. 1 (d)

Fig. 1. (a) Displacements, (b) averaged displacements per two days, and (c) velocities per day differentiated from the averaged displacements of the Koudushima, Shikinejima, and Nijima islands relative to Izu2 from June 28, 2000 to August 28, 2000 measured by the GEONET. Dates of occurrences of large earthquakes ($M > 6$) are indicated by arrows. The upward direction is East or North. The data points are plotted at the center of the period when the data were obtained. (d) Correlation between velocities per day differentiated from the averaged displacements, of the Shikinejima and Nijima islands relative to Izu2 from June 28, 2000 to July 28, 2000.

既に報告されているように、大局的には、神津島は南西へ、式根島は南東へ、新島は北北東へ変位した（例えば、木股・他、2000）。しかしながら、Fig. 1bを注意深く見ると、M6クラスの地震によるコサイスマックなステップを除いても、各曲線は様なトレンドを示してい

るのではないことが分かる。例えば、新島のEW成分を見ると、全体的には東へ変位しているが、15-20日目（以下、月無しで日のみ述べる時は6月28日から数えた通算日、つまり図の横軸の値を指している）にはほとんど動いていない。神津島の東西成分も時々、変位が横ばい

になるときがある。

Fig. 1c に示されている変位速度の時間変化に関して、この 2 ヶ月間における系統的な特徴として、以下の 2 点を上げることができる。

1 つめは、Fig. 1c において、新島の北向きの速度が大きい時は、式根島の東向きの変位速度が小さい傾向が見られることである。特に、変動の大きな解析期間の前半においてその傾向が良く分かる。ただし、17 日目付近の大きな値は、7 月 15 日の新島北方の地震によるステップによるものであり、除外して見なければならない。Fig. 1d に、上記の 17 日目付近の大きな値を除いた、解析期間の前半における上記 2 つの成分の相関をプロットしてみた。相関係数は 0.5 とあまり大きくないが、新島の北向きの速度が大きい時は、式根島の東向きの変位速度が小さい傾向があることが分かる。

2 つめは、3 つの島とも同時に変動速度が小さくなることがあることである。小さくなる期間が短いため、Fig. 1c では必ずしも明らかではないが、Fig. 1b, 1a を見ると、7 月 15 日の新島北方の地震 M6.3 および 7 月 30 日の三宅島西方の地震 M6.4 の発生後に、3 つの島とも変位が止まっているように見えることが分かる。

2 つめに関しては、地震時のステップによる見かけ上のものである可能性も考えられなくはない。しかし、次節で述べるように、その期間の地震活動が極めて低調であることから、地震後しばらく続く停滞は、見かけ上のものではないと考えられる。

なお、神津島は、ダイクや断層から近いにも関わらず、他の 2 つの島に比べて、比較的単調な変動を示している。これは、ダイクや断層との geometry によるものと考えられる。本研究は、変動の時間変化に注目して解析するため、以下においては、主に新島と式根島の変動の解析を行う。

2.2 地震データ

上記の GPS による 3 つの島の変位のデータを、地震活動のデータと比較する。用いたデータは、気象庁による暫定震源データである。Fig. 2a に、式根島から三宅島へ連なる群発地震のトレンドに沿った MT 図を示す。上が式根島側、下が三宅島側であり、Fig. 3 に長方形で示された領域に発生した M3 以上の地震がプロットされている。Y 軸の原点は、北緯 34.2 度、東経 139.3 度を通る北東南西方向の直線に対応している。既に報告されているように（例えば、石川, 2000）、地震活動はバースト的であるが、個々のバーストにおいては、上記の線付近を境に北西側、南東側に片寄った分布を示している。Fig. 2b は、走向方向にはダイクと同じ長さ、鉛直方向にはダ

イクを中心とした幅 10 km の領域に発生した地震について、北西側、南東側に分けて日別の地震回数をプロットした。両方が同時に活発化することは少なく、相補的な活動を示していることが分かる。

Fig. 2a において、10-15 日付近の上方に外れた活動が 7 月 15 日の新島北方の地震 M6.3 に対応するもの、30-35 日付近の下方に外れた活動が、7 月 30 日の三宅島西方の地震 M6.4 に対応するものである。2 つの地震の発生後に群発地震活動が静穏化していることがよく分かる。

3. 解 釈

3.1 新島と式根島の変位速度の逆相関

新島・式根島・神津島の変位速度の時間変化における 2 つの観測結果、(1) 新島の北向きの速度が大きい時は、式根島の東向きの変位速度が小さいこと、(2) 3 つの島とも同時に変動速度が小さくなること、について解釈を行う。

式根島は南東、新島は北北東、神津島は西南西方向に変位するという全期間を通じての大局的な変動パターンは、木股・他 (2000) 等で述べられているように、三宅島と式根島の間に貫入したダイクと、7 月 1 日に発生した M6.4 の断層の地震すべりおよび非地震性すべりで説明できる。ダイクだけで 3 つの島の変位を説明しようとすると、ダイクの方向を式根島に向けなければならない。しかし、この付近の北西-南東の最大圧縮応力の方向（例えば、石川, 2000）や地震の震源分布に調和的にダイクを置く限り、ダイクの方向を式根島に向けることは難しい。そのため、断層のすべりが必要となる。ちなみに、7 月 1 日に発生した M6.4 の断層のすべりだけだと新島の変位が小さくなり、観測データを説明できない。ダイクの方向が式根島を向いていない geometry においては、式根島の動きは、基本的には断層の動きを反映している。ここでは、上記の 2 つの観測結果を説明するために、木股・他 (2000) 等によるモデルの改良を行う。地震の断層パラメーターは、モーメントテンソルインバージョンによる福山・久保 (2000) の解や、広帯域地震波の波形インバージョンによる菊地・山中 (2000) の解などが報告されているが、より詳しい解析から得られた菊地・山中 (2000) によるものを基本的には用いた。まず (1) について考える。

地震活動について、北緯 34.2 度付近を境に、北西側、南東側で相補的な活動を示していることは、ダイクが、北西側、南東側に交互に貫入している可能性を示している。さらに、GPS データ (Fig. 1) と震源データ (Fig.

新島・式根島・神津島の変動はなぜ時間変化するのか？

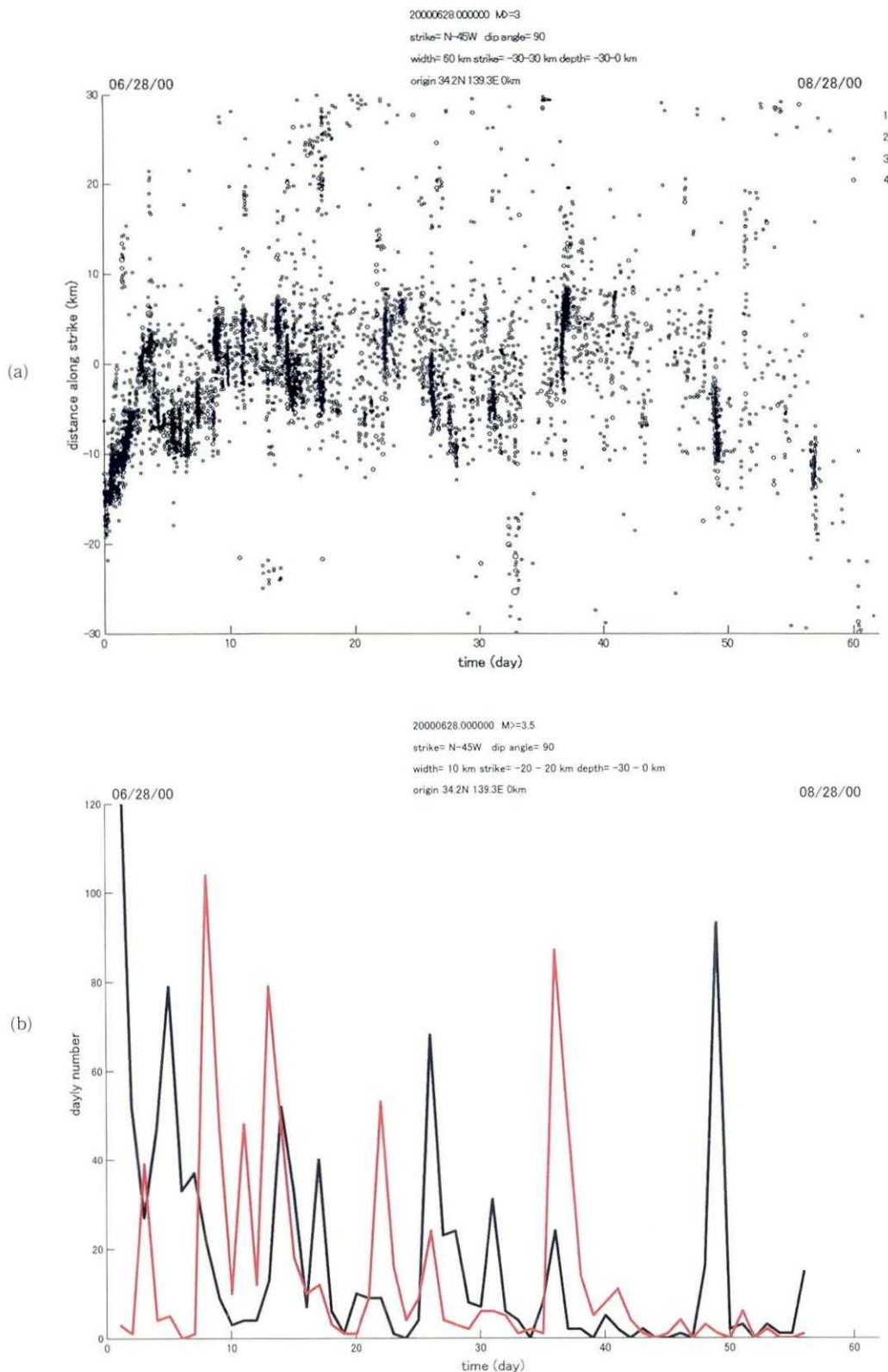


Fig. 2. (a) Magnitude-Time plots of earthquakes occurring in the region indicated in Fig. 3 from the surface to a depth of 30 km from June 28, 2000 to August 28, 2000. The vertical axis indicates the distance along the strike of the dyke intrusion. The top and bottom is NW, the direction of Shikinejima island, and SE, that of the Miyakejima island, respectively. (b) Daily numbers of earthquakes divided into two groups of the northwestern (red) and southeastern (black) sides of the line that passes through the point of 34.2°N and 139.3°E. Earthquakes occurring within a distance of 5 km in the perpendicular direction to the dyke were analyzed.

2) を比較すると、新島の変位が大きい時は地震活動が北側で活発であり、その逆も成り立っていることがわかる。よって、新島の変位が大きい時は、北側のダイクが活動し、小さい時は南側のダイクが活動していると考えられる。一方、上に述べたように、式根島の動きはダイクだけでは説明できないことから、北西側、南東側のダイクの両方に、断層のすべりを付随させる必要がある。ここで、地震の震源分布を2つに分けた北緯 34.2 度付近は、7月1日に発生した M6.4 の断層の位置にほぼ対応している。

これらのことを最も単純に説明するために、Fig. 3 に示すようなモデル化を行った。北西側・南東側、同じ長さを持つ2つのダイクが活動していると考えた。7月1日に発生した M6.4 の断層は、ダイクの東西の長さ 10 km と 5 km の2つの部分に分割し、それぞれの部分が

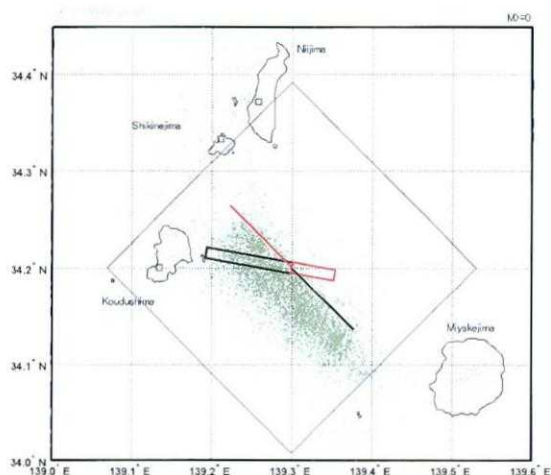


Fig. 3. A model that consists of two pairs of faults and dykes. The red and black are the northern and southern pairs, respectively. Parameters of faults and dykes are shown in Table 1. The fault plane of the June 1, 2000 M6.4 is divided into the eastern and western sub-faults. Earthquakes occurring in the blue rectangle were analyzed and are plotted in Fig. 2a.

独立にすべるものと考えた。そして、一方の変動が他方の変動を促進するという、力学的に合理的な組み合わせとなる。北側のダイクと東側の断層、南側のダイクと西側の断層という、2つのペアを作った。これは、岩石実験における AE ソースとして知られている複合テンションクラックモデルと同様のものである。ダイクの位置は地震の震央分布の北東端に沿っておいた。というのは、これより西では式根島の変動を再現することが難しいからである。海底地震計のデータを含めて再決定した震央分布は、Fig.3 に示され陸上のみで決定された分布の北東端に集中すること（酒井・他, 2001）ことから、このダイクの位置は合理的であると考えられる。M6.4 の断層パラメーターは、断層の近くに位置する神津島の変動を説明するために、菊地・山中（2000）によるものから、走向のみを福山・久保（2000）によるものに変更した。他の2つの島の変動は、断層からやや離れているので、どちらの断層モデルでも説明可能である。ダイクも含めて形状に関するパラメーターの値を Table. 1 に示す。

Fig. 4 に、これら2つのペアによる変位分布を示す。ダイクの開口変位を 3m, 断層のすべりを 2m とした。黒矢印で6月28日から7月15日の新島北方の地震 M 6.3 の発生前までの各島の変位も示している。両方のペアによる変位の和で、M6.3 の発生前までの変位量をほぼ説明できる。南側のペアによる変位分布は、式根島が新島よりやや大きい。北側については、新島が式根島よりずっと大きくなっていることがわかる。つまり、新島・式根島に関して、ダイクと断層のどちらが近くにあるかによって、両者の変位の大きさが逆転する。南側のペアが活動する場合は、式根島近くにある断層のすべりにより、式根島の変動がやや大きくなる。北側のペアが活動する場合は、近くにあるダイクの寄与により、新島の動きが大きくなるのである。

3. 2. 3つの島で同時に変動速度が小さくなること

(2) については、時間的な一致から、7月15日の新島北方の地震 M6.3、および7月30日の三宅島西方の地震

Table 1. Fault parameters.

Date	Magnitude	Azimuth	Dip	Slip	Length	Width	Depth
7/01 16:01	M6.4	100	76	-166	15	5	-7.5
7/15 10:30	M6.3	277	86	163	10	5	-7.5
7/30 21:25	M6.4	288	90	-173	15	7.5	-12.5
Dyke north		135	90	—	10	5	-7.5
Dyke south		135	90	—	10	5	-7.5

Azimuths, dips, and slips (slip angles) are measured by the standard procedure. Depths indicate the depths of the center of fault planes.

新島・式根島・神津島の変動はなぜ時間変化するのか？

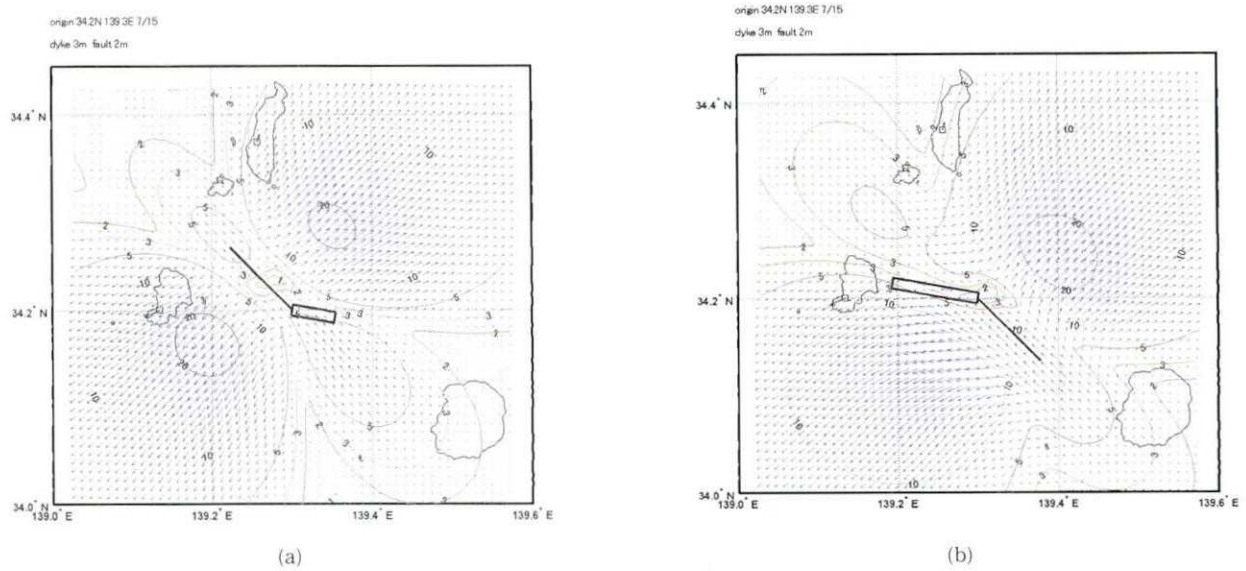


Fig. 4. Displacements from June 28 before the July 15 earthquake of M6.3 occurring near Niiijima island, calculated by the northern pair (a) and southern pair (b). Contours indicate magnitudes of horizontal displacements (cm).

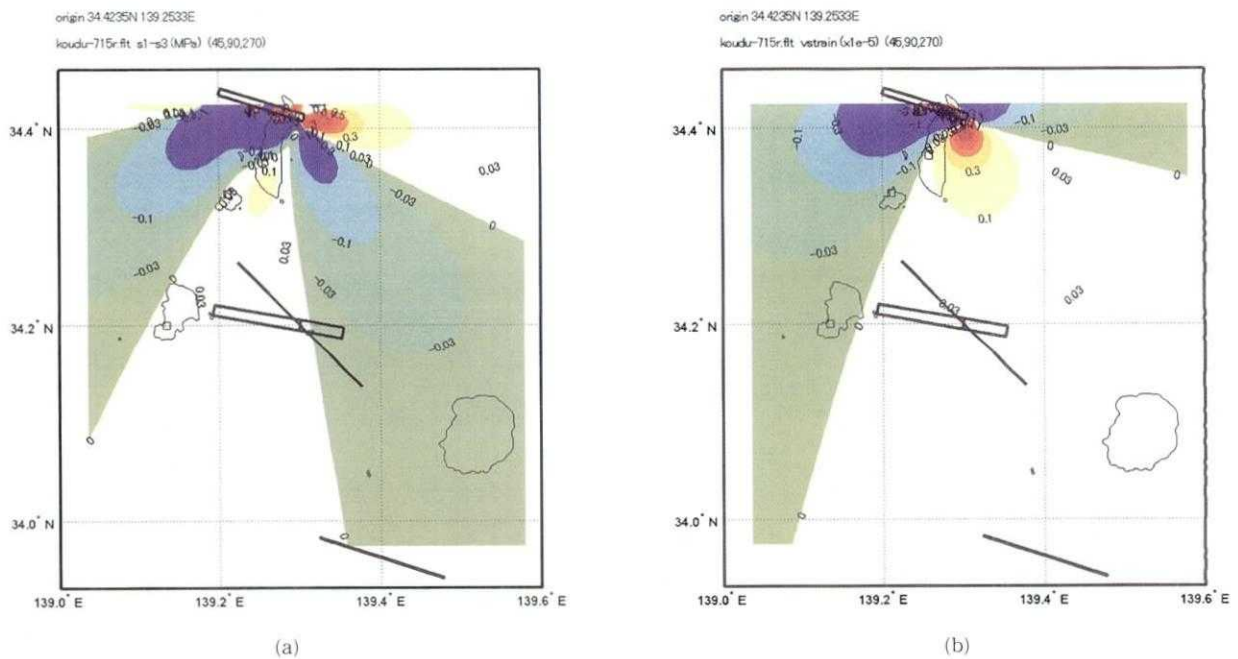


Fig. 5. Distribution of changes in differential stress (MPa) (a) and volumetric strain ($\times 10^{-5}$) (b) caused by the July 15 earthquake of M6.3 occurring near the Niiijima island. The distribution on a horizontal plane at a depth of 7.5 km is shown.

M6.4により、ダイクの活動が一時的に押さえられた可能性がある。そこで、ダイクに対する、これらの地震による静的な応力や歪を計算してみた。ダイクへの影響を及ぼす可能性のあるものとして、差応力や体積歪が考えられる。Fig. 5a, bに7月15日の新島北方の地震 M6.3, Fig. 6a, bに7月30日の三宅島西方の地震 M6.4による、

差応力と体積歪の変化を示した。差応力は、ダイクの走向方向の水平面内最大圧縮応力 s_1 と直交方向の水平面内最小圧縮応力 s_3 の差とした。深さ 7.5 km の平面上の値が示されている。7月15日の新島北方の地震の断層パラメーターは、菊地・山中(2000)によるものから、余震分布のトレンドに合うように、走向・傾斜・すべり角

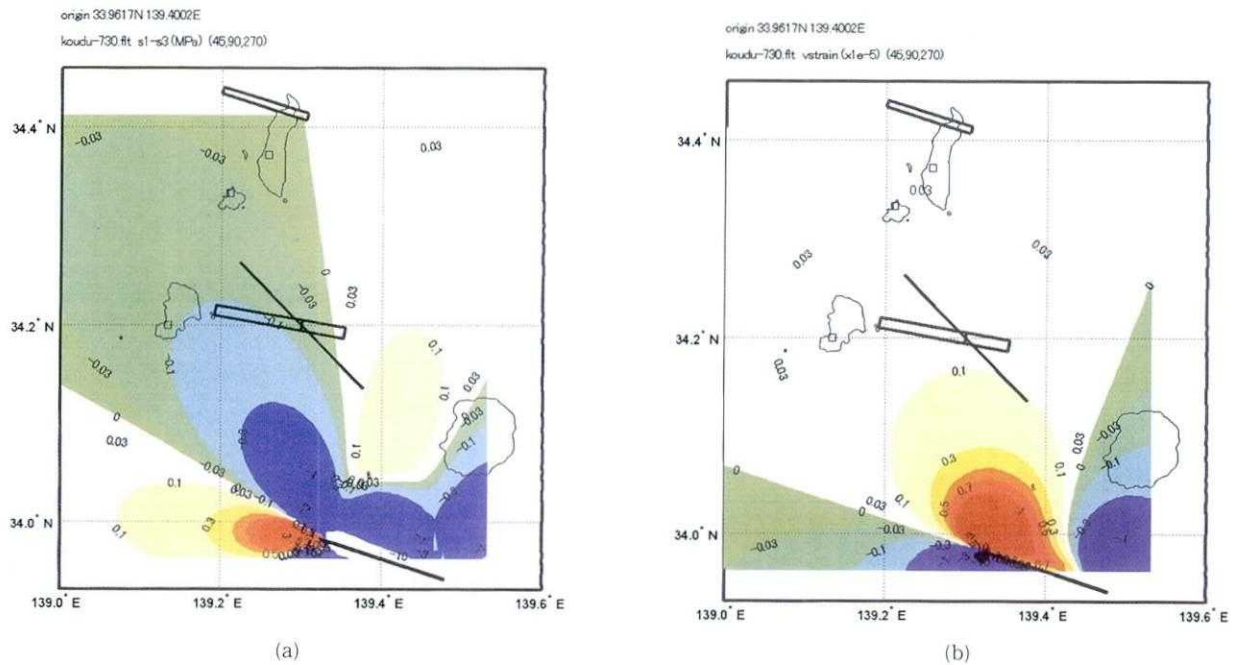


Fig. 6. Distribution of changes in differential stress (MPa) (a) and volumetric strain ($\times 10^{-5}$) (b) caused by the July 30 earthquake of M6.4 occurring west of Miyakejima island. The distribution on a horizontal plane at a depth of 7.5 km is shown.

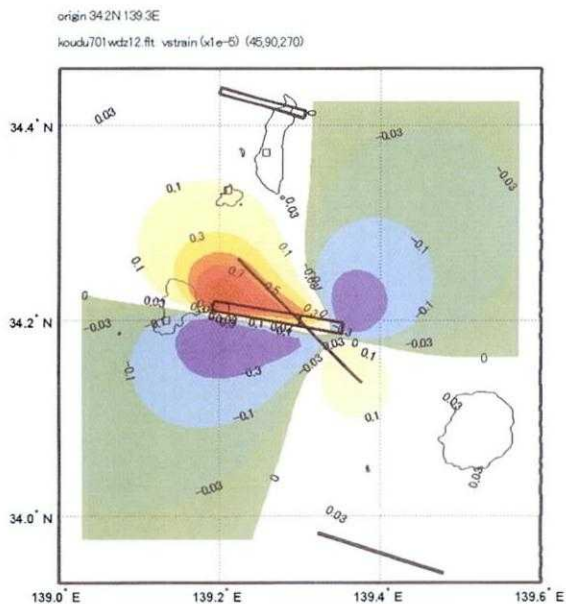


Fig. 7. Distribution of changes in volumetric strain caused by the July 01 earthquake of M6.4 occurring east of Koudushima island. The distribution on a horizontal plane at a depth of 12 km is shown.

を福山・久保 (2000) によるものに変更している。また、7月30日の三宅島西方の地震の断層面は、メカニズム解と震源分布のトレンドが調和的な、東西方向の断層面を選んだ。

両方の地震は、ダイクに対して点対称のような位置関係にあり、その効果は量的にもよく似ている。差応力が小さくなると、ダイクが閉じやすと考えられるが、両方の地震とも、ダイク全体で負の値とはならなかった。また、ダイクに対する法線応力についても、その方位依存性のため、ダイクの全面で正の変化とはならない。一方、体積歪に関しては、両方の地震とも、ダイクの全体で正の値、つまり、張力場となった。7月30日の三宅島西方の地震の断層面は、南北である可能性も指摘されているが(菊地・山中, 2000)), 仮にそちらをとったとしても、ダイクへの影響はほとんど変わらない。

両方の地震について、体積歪の膨張がダイク全体で起こっている。したがって、体積歪の膨張が、3つの島の変位の鈍化、つまりダイクの活動低下に関係している可能性が考えられる。これは一意的な結果ではなく、一つの可能性を示唆するに過ぎないが、以下にそのメカニズムを考察してみる。

ダイクが貫入すると考えられる上部地殻においては、膨張の体積歪は、ダイクを開きやすくして、その活動を促進すると考えられる。しかし、これは観測結果と逆センスなので、膨張の体積歪は、ダイクそのものではなく、下部地殻か上部マントルに存在すると推定されているダイクの供給源(例えば、木股・他, 2000); 大久保・他, 2000))に作用する可能性が考えられる。Fig. 5, 6では、深さ7.5 kmの変化を示したが、ほぼ横ずれ型の断層な

ので、その2-3倍程度の深さ範囲においても効果は同様である。ダイクの直下にあるマグマだまりの体積歪は膨張となり、マグマだまりの圧力が低下したため、ダイクの活動が一時的に押さえられた可能性が考えられる。

これらの2つの地震はダイクから遠くで発生したが、近くに発生した7月1日M6.4についても、体積歪の分布を調べてみた。Fig. 7にダイクの直下と考えられる深さ12kmの変化を示す。ダイク近傍では正の値となっており、Fig. 2aに示されているように、7月1日以降、地震活動が南へ戻ったことと調和的である。

マグマだまりに対する地震の影響に関しては、圧縮応力が増加すると噴火が促進されるという考え方がある(例えば、McNutt, 1999)。ここで示したことは、調和的な結果であると考えられる。

4. おわりに

近年のGPSや地殻変動連続観測網の整備により、三宅島近海の群発地震の原因と考えられるマグマの動きの実体が明らかになってきた。これは、地殻活動の推移の予測において大きな進歩であると考えられる。群発地震の活動の推移予測においても、経験的なやり方だけでなく、その原因に立脚した予測が可能となると期待される。

しかしながら、2000年三宅島噴火および新島・式根島・神津島周辺のマグマの活動に関連して観測された地殻変動は、少なくとも見かけ上は、時間的にかなり複雑な様相を示した。これらの時間的な変動のメカニズムをひとつひとつ明らかにしていくことが、今後の地殻活動の予測のために重要である。本論文では、力学的な視点を重視して、可能なモデルの一例を示した。

本研究のもう一つのポイントは、下部地殻の問題である。

マグマが上部地殻を上昇する場合には、地震活動が活発化する。逆に、この場合は、地震活動の変化により、マグマの動きが推定できる。一方、微小地震が発生しない下部地殻にマグマがある場合には、地震活動から得られる情報は少ない。しかしながら、下部地殻内におけるマグマの挙動を実証的に明らかにすることは、その活動の予測を行う上で重要であると考えられる。本研究においては、一つの可能性として、下部地殻における体積膨張が、マグマの供給を低下させることを述べた。地殻活動における下部地殻の挙動は、内陸大地震発生に本質的

な寄与していることも指摘されており(飯尾・小林, 1997)、色々な側面からの下部地殻の挙動に関する研究が重要であると考えられる。

謝 辞

GPSデータについては、国土地理院GEONETの監視用データを使わせていただきました。データ提供の労を取って下さった測地観測センター衛星測地課衛星情報係菊田有希枝さんを始め関係の方々に感謝いたします。地震の震源データは、気象庁の暫定震源データを使わせていただきました。気象研究所石川有三さんにお世話になりました。瀬野哲三氏と匿名の査読者のコメントは、本稿を改善する上で大変有益でした。本研究に際して、メールグループheraldおよび文部科学省科学技術振興調整費総合研究「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化」のメンバーとの議論が大変有益でした。

文 献

- 福山英一・久保篤規, 2000, 三宅島・神津島・新島近海で発生した群発地震のモーメントテンソル解から得られた応力場, 日本地震学会講演予稿集, A05.
- 飯尾能久・小林洋二, 1997 大地震の始まりの物理的解明に向けて, 地震予知研究シンポジウム1997, 論文集, 99-116.
- 石川有三, 2000, 地震活動と火山噴火のテクニクス, 月刊地球, 257, 802-809.
- 木股文昭・山岡耕春・工藤 健・高井香里・藤井直之, 2000, 2000年三宅島・神津島における地殻活動と推定されるダイク貫入とクリープモデル, 日本地震学会講演予稿集, A07.
- 菊田正幸・山中佳子, 2000, EIC地震学ノート, http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/.
- 酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月将志・塩原 肇・ト部卓・平田 直・篠原雅尚・金沢敏彦・西澤あずさ・藤江剛・三ヶ田 均, 2000, 地震活動から見た三宅島2000年噴火時のマグマの移動, 地学雑誌, 110, 2, 145-155.
- Macnutt, S.R., 1999, Eruptions of Pavlof Volcano, Alaska, and their possible modulation by ocean load and tectonic stresses: Re-evaluation of the hypothesis based on new data from 1984-1998, *Pure appl. Geophys.*, 155, 701-712.
- 村上 亮・西村卓也・小沢慎三郎・鷲谷 威・矢来博司・多田 堯・海津 優, 2000 年三宅島噴火および新島・神津島近海の群発地震活動に伴う地殻変動, 月刊地球, 258, 822-827.
- 大久保修平・古屋正人・孫 文科・田中愛幸・渡辺秀文・及川純・前川徳光・大島弘光, 2000, 重力の時空間変動からよみとる三宅島火山活動の推移(その2)一陥没孔形成後一, 日本地震学会講演予稿集, A18.
- 山本英二・大久保正・岡田義光, 2000, 神津島における地殻傾斜の連続観測結果, 日本地震学会講演予稿集, A08.

(Received July 30, 2001)

(Accepted January 11, 2002)