伊豆諸島北部で2000年に発生した火山・地震活動に関連した地殻変動
Crustal deformation associated with the 2000 eruption of Miyake volcano and earthquake swarm near Kozu island.

地理地殻活動研究センター　村上　亮・西村卓也・小沢慎三郎
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Makoto MURAKAMI, Takuya NISHIMURA and Shinzaburo OZAWA

要　旨

2000年夏に伊豆諸島北部では，活発な群発地震活動，三宅島における数回の噴火およびその後のカルデラ形成に至る顕著な地殻活動が発生した。この活動は三宅島における2000年６月26日からの地震数の急激な増加から始まった。国土地理院のGPS連続観測網は，この活動に伴う地殻変動の空間的・時間的進展を捉えていた。これにより，三宅島の大規模な収縮及び沈降と，神津島－新島間の顕著な距離の伸張，並びに房総半島，伊豆半島，東海地方等広範囲にわたる地殻変動の広がりなどが観測された。地殻変動は，三宅島島内の球状力源の収縮，三宅島と神津島間の海底地殻にダイクが貫入したことを示唆する。大きな収縮が進んだ７月－９月をいくつかに分けた期間毎の収縮源の位置の推定や，噴火前の地殻変動からの推定では，マグマ溜まりの位置が一貫して三宅島内の南西または南南西の地下５km－９kmに求まった。一方，GPSなどによる地殻変動データは神津島周辺の今回の活動以前から顕著な地殻活動が発生していたことと1999年初頭からそれが減速していたことを示している。

1. はじめに

伊豆諸島は，太平洋プレートとフィリピン海プレートの境界に沿って，点々と連なる火山性の島々から構成されている。三宅島火山は，玄武岩質マグマによる成層火山であり，我が国の主要な活火山の一つである。この千年間でも14回の歴史的噴火が知られており，［津久井・鈴木，1998］，最近でも，1940，1962，1983とほぼ20年毎に噴火が発生している。この傾向に続くとすれば，次の噴火がそう遠くないことが懸念されていた。一方，神津島，式根島，新島は流紋岩質のマグマ性の噴出物からなる火山性の島々であるが，ごく最近の活動はない。

2000年の活動は，三宅島の最近の過去の噴火と同様に地殻変動を伴った地震数の増加とともに始まり，地震分布は西方海上に移動して，活動は短期間に終了したように見えた。しかしながら，地震活動が神津島近海に移った後も，活発な地震活動がその周辺で継続し，三宅島の収縮性の地殻変動も衰える気配を一向にみせなかった。さらに，神津島周辺では，引き続いて，活発な群発地震活動が続くとともに，７月初旬頃から神津島－新島間の距離が顕著に伸び始めた。三宅島では，その後，山体は収縮しながら山頂では噴火をするという，全く予想を超えた展開を見せた。その間，防災科学技術研究所の傾斜計は40数回のステップ性の変動を記録した［Ukawa, et al., 2000］。その一部はGPSでも観測されている。また，７月８日に最初の噴火を迎えた後，ごく短期間の間に巨大な陥没孔が出現するというさらに予想を超えた活動形態となった。噴火は８月29日のものを最後とするまで何度か続いた。さらに，９月以降は，現在に至るまで，火山観測史上類を見ない大量のガスの放出が続いている。

今回の活動は，非常に複雑で，過去の活動形態に基づく類推が通用しない特異な性格を有するものである。しかし，その一方で，一連の火山活動を理解するために最新の技術を用いた各種の観測がなされ，各種の興味深いデータが得られている。その多くは，噴火以前から観測が継続されている。地殻変動観測の分野においても，GPS連続観測や傾斜計の観測が継続されており，貴重なデータが得られている。

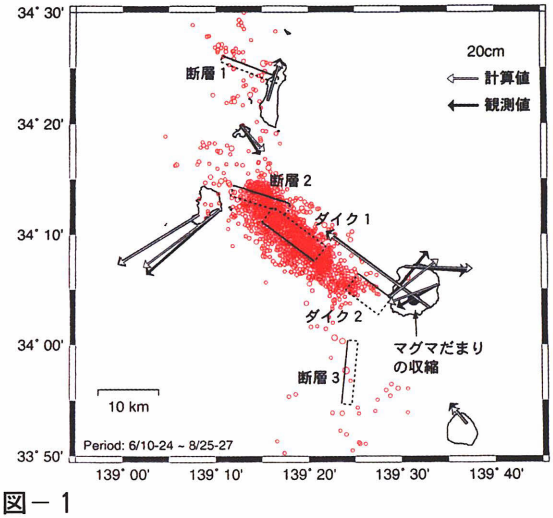
今回の一連の活動は，三宅島の活動と神津島付近の活動が密接に関連していることを我々に強く認識させるものであったが，1994年から開始されたGPS連続による地殻変動データは，今回の活動の以前から，三宅島の膨張，神津島，式根島，新島の顕著な隆起と神津島－新島間の距離の開きなどの地殻変動の存在を示していた。これら全てを統一的に説明する試みは，まだその途についてばかりであり，活動の全貌や，それ以前の地殻変動との関連を理解するにはほど遠い状態にある。ただし，地殻活動に関する観測データは，一通り揃った段階であり，これまで得られているGPS観測等の結果を取りまとめ，現在までに見えてきた活動の姿と，今後の解析を待つ課題を紹介する。

2. 三宅島周辺における2000年地殻活動の概要とGPS観測結果

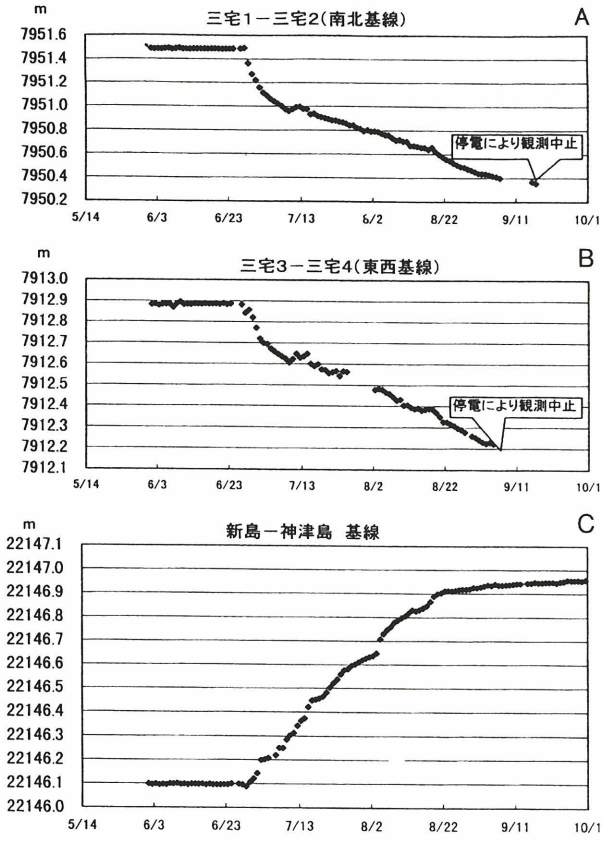
2000年の火山活動は，2000年６月26日UT９:00時頃からの三宅島の地下約３kmの浅発地震から始まった。地震活動とほぼ同時に地殻変動も始まったことが，傾斜計とGPS連続観測によって確認されている。活動開始の６時間後に微小地震活動は西方に移動し始め，６月27日

に，三宅島の西方約1.5kmで海底の小噴火が発生した。

活発な地震活動は，さらに神津島へ向けて北西方向に移動し，ほぼ50日間継続した。一方，三宅島は活動開始直後から収縮及び沈降を続けていたが，７月８日に，三宅島山頂で，最初の噴火が発生し，この噴火後山頂が陥没してカルデラが形成された。規模の大きな噴火は，このほか７月14－15日，８月10日，18日と29日にも発生している。また，９月からは，山頂火口から日量２－４万トンという多量の火山ガスが発生し始め，現在に至っている。



図－１
GPS 連続観測による伊豆諸島北部の地殻活動に伴う水平変動（2000年６月10－24日と８月25－27日の比較による）。黒い矢印は観測値，白い矢印はNishimura et al.［2001］によるモデルから計算される計算値である。図中の四角および黒丸は，Nishimura et al.［ibid］によって仮定された，ダイク，断層，および三宅島の収縮源である。小さい丸印は，気象庁が決定した震央である［JMA，2000］。



図－２
GPS連続観測による三宅島南北基線(A)，三宅島東西基線(B)，及び新島神津島基線(C)の変化。三宅島では停電により観測が中断している。GPSの24時間毎の計算値を使用して基線長の変化をプロットした。

図１は，GEONETにより観測された，伊豆諸島北部とその近接地域の水平な地殻変動をを示している。変動ベクトルは，それぞれ，６月10－24日と，８月25－27日の平均座標の差を表している。約２ヵ月間のプレート運動がもたらす変動は，図１の変動の大きさに比べて無視できる量であり，観察された変動は主に今回の伊豆諸島の活動に起因していると考えられる。

活動開始のきっかけとなった三宅島では，地殻変動パターンは，全てのベクトルが中心に向かう，ほぼ一様な収縮を示していることに加え，全ての観測点で大きな沈降が見られ，西側の阿古では80cmに達している。一方，神津島と新島の間では大きな距離の開きがみられ，その大きさは２ヶ月間で90cmに及んでいる。このような，伊豆諸島北部の変動は，房総半島，関東地方南部，伊豆半島，東海地方にも及んでおり，それぞれ数cmづつの変動がみられる。

図２は，いくつかの基線について基線長の時間変化を示す。三宅島島内に設置してある４点のGPS観測点で構成される基線のうち，南北の測線（図２－A）および東西の測線（図２－B）をみると，群発地震の開始とほぼ同時に変化が始まっている。群発地震が始まってから10日ほど経過した後は，９月頃まで，ほぼ一定の速度で島の収縮を意味する変動が継続した。７月８日，７月14日と８月18日など，三宅島の山頂噴火に対応する屈曲が時間変動パターンに現れている。しかし，ほぼ等速度で進んだ収縮の全体的な傾向に比べると大きいものではない。また，この間，防災科研の傾斜計は40数回の特徴的なステップ状の傾斜変化を捉え［Ukawa et al., 2000］，それらは地震計でも発震源における一様な膨張を示唆する波形［菊池・山中，2000］として捉えられている。また傾斜変化に対応した変化はGPSでも捉えられているものがある。このステップ発生のメカニズムについては，シリン

ダー状のピストンがマグマ溜まりに間欠的に陥没するモデルが提出されている[熊谷ほか，2000，大湊ほか，2000]。なお，後述するように，この期間の収縮源を地殻変動から推定すると，その位置は一貫して三宅島の南西部に求まっている。

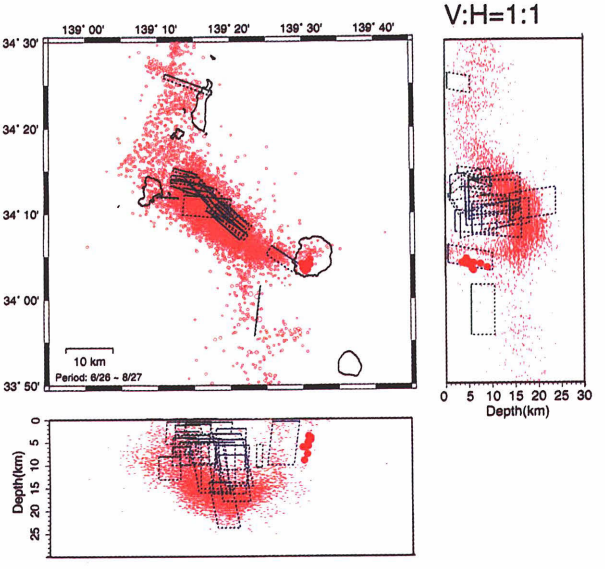
一方，神津島と新島を結ぶ基線の距離（図２－Ｃ）の変化は群発地震活動が神津島に近づいた６月28日から始まっている。この基線には，この間発生したいくつかのＭ６クラスの地震のco-seismicな変動が明瞭に現れている。この基線の変化は，群発地震活動の消長と歩調を合わせながら進行し，約50日間継続した。なお，収縮は，2001年に入ってもわずかながら進行している。

これらを説明するモデルとして，Nishimuraほか[2001]は，図１の様な配置を仮定し，インバージョンを行った。彼らは，三宅島内の球状減圧源，２つのtensile性不連続面（図１のダイク１および２），並びにダイクＢの北西端に存在する，７月１日，７月８日，及び８月18日の地震と同様のメカニズムのクリープ性断層（図１のクリープ性断層）を想定して，パラメータを推定している。その結果から，質量の収支を考察し，彼らは，三宅島の大部分のマグマが30km北西に移動した可能性が高いと結論している。

地殻変動データから，力源の位置や大きさについては，このような解析によって次第に明らかとなってきたものの，なぜ北西方向にダイクが貫入したのか，ダイクのマグマの供給源は全て三宅島にあるのか，神津島の近くに別にマグマ溜まりはなかったのか等，関連して生じる疑問については，未解決である。今後，様々な視点からの解析が必要であるが，興味深いアプローチの一つとして，小沢ほか[2000]による時間発展インバージョン手法による解析が行われている。この手法では，力源で働いている力の時間変化がトレースされているが，このような解析から力源活動の時間的な関連性に新たな情報が得られる可能性もある。

3. 三宅島のマグマ溜まりの位置の推定

今回の地殻活動の概要は，上に紹介したとおり三宅島のマグマ溜まりのマグマが活動をきっかけにして神津島の方向に移動したと考えられる。今回の観測結果からマグマ溜まりの位置や大きさについて何か推定する材料はないであろうか。三宅島においては，活動のごく初期を除いて，一様に島の収縮が続いていたが，この期間をいくつかに区分し，マグマ溜まりの位置を個別に推定した。図３は，その結果である。深さについては，決定精度がそれほどないため，推定結果が５kmから９km程度に分布している。一方，水平位置については一貫して三宅島の南西部に位置していることが興味深い。また，図４は６月１日から９月４日までの三宅島島内南北（図２－Ａ）および東西基線（図２－Ｂ）の基線長変化の相関を取ったものであるが，収縮のスピードがこの期間中大きく変化して

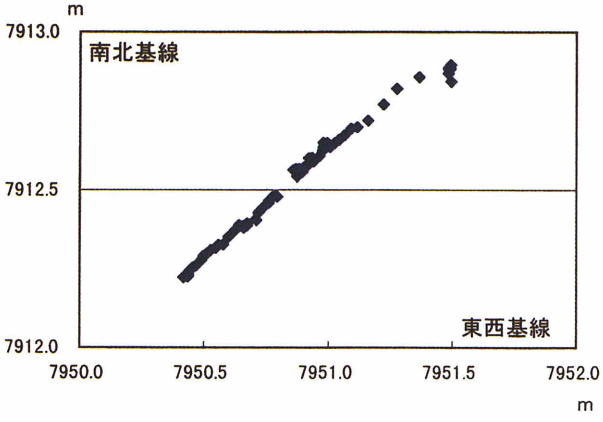


図－３
異なる時期における力源の推定結果。解析した期間は，(1) 6／26－28，(2) 6／28－7／5，(3) 7／5－13，(4) 7／13－19，(5) 7／19－28，(6) 7／28－8／2，(7) 8／2－8／7，(8) 8／7－8／11，(9) 8／11－16，(10) 8／16－20，(11) 8／20－27の11期間である。推定の方法は，基本的にNishimura et al.［2001］と同じである。四角形は図１と同様にダイク，横ずれ系の断層であり，期間毎に推定した。黒丸は各期間毎に推定された三宅島地下のマグマ溜まりの位置である。深さは幅があるが，水平位置はほぼ南西部に求まっている。白抜きの丸は気象庁による震源を示す［JMA, 2000］。

いるにもかかわらず，変化の比はほぼ一定である。このことはこの活動を通じて三宅島の収縮に関与する力源の位置は変化していないことを強く示唆するものである。また，先にも紹介したNishimuraほか[2001]による全体期間を通じた解析結果でもカルデラの南南西部に求まることが報告されており，これらの結果には一貫性がある。

一方，今回の噴火以前にもマグマ溜まりの推定の試みはなされている。多田・中村[1986]は，1983年噴火前，噴火時，および噴火後の３時期を選び，上下変動から三宅島のマグマの挙動を推定している。噴火時はダイクの貫入等の影響があり，マグマ溜まりを想定していないが，噴火の前後の時期のマグマ溜まりの位置を議論している。それによれば，山頂の約１－２kmの深さ８kmと推定しており，今回の我々の結果と整合している。

また，その後も地殻変動の観測が実施されており，マグマ溜まりの位置の推定に利用可能なデータが存在する。それらは，三宅島西部の阿古における験潮結果，東京都による水準測量，及び1994年から開始された国土地理院



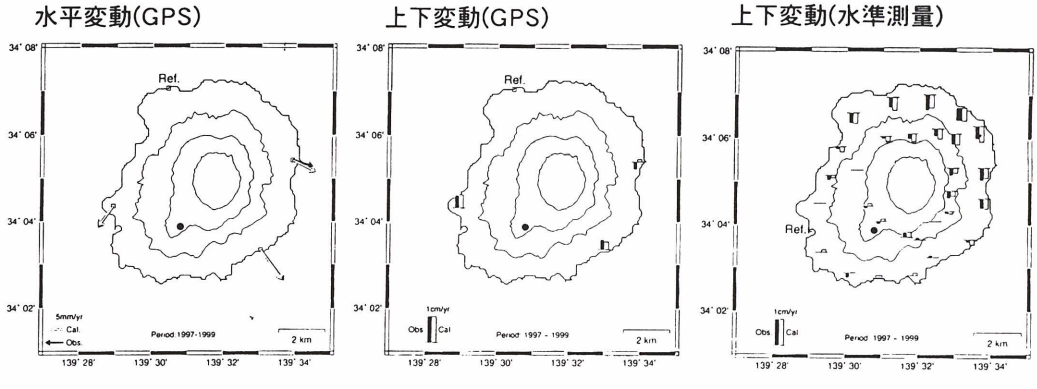
図－4
GPSによる三宅島南北基線（図2－A）と東西基線（図2－B）の時間変化の相関。縦軸が南北基線，横軸が東西基線である。プロットはほぼ直線にのり，相関が非常によいことがわかる。

によるGPS連続観測の結果である。図5は，水準測量結果から描いた上下変動図である。験潮結果は，1983年の噴火後，阿古が約20cm隆起したことを示しており，また，水準測量の結果も，一貫して，島の北東部に対して，南西部が相対的に隆起していたことを示している。

これらの観測結果を踏まえて，1997～1999年間の水準測量結果とGPS観測結果を総合した地殻変動データに対して，1点の球状膨張源の存在を仮定し，マグマ溜まりの位置の推定を試みた結果を図6に示す。ここでも，マグマ溜まりが島の南西部の深さ約9kmに求まっている。また，この結果から推定される体積増加のスピードは，$6.2\times10^{6}m^{3}$／yr程度である。1983年以降，等速で膨張が続いていたとすると約$10^{8}m^{3}$のマグマが蓄積されていたことになる。これらから推定される隆起量は験潮による結果とも矛盾しない。一方，今回の活動では，$10^{9}m^{3}$程度の容積のマグマが関与したと推定され[Nishimura ほか2001]，約20年間に蓄積したほぼ10倍のマグマが活動したことになる。

水準測量の変化のパターンは基本的には北東部に対する南西部の隆起であるが，図5にあるように，変動のパターンには，マグマ溜まりの膨張以外の要素も反映されている。最初に気がつくことは，カルデラ部分の沈降であり，それ以外にも，1983年の割れ目噴火の両側それぞれ約2kmに局所的な隆起の目玉が存在している。このパターンは1983年の割れ目火口の地下にダイクが存在し，一定の速度で開口していたと考えると説明がつく。熱的な収支からこのようなダイクが，徐々にに開口しながら安定して存在しうるかはさらに検討を要するが，少なくとも地殻変動を説明するためには魅力のあるアイデアである。なお，図5のA，B両図の空間パターンが基本的には同一であることから，このパターンが安定して継続していたことを示唆している。

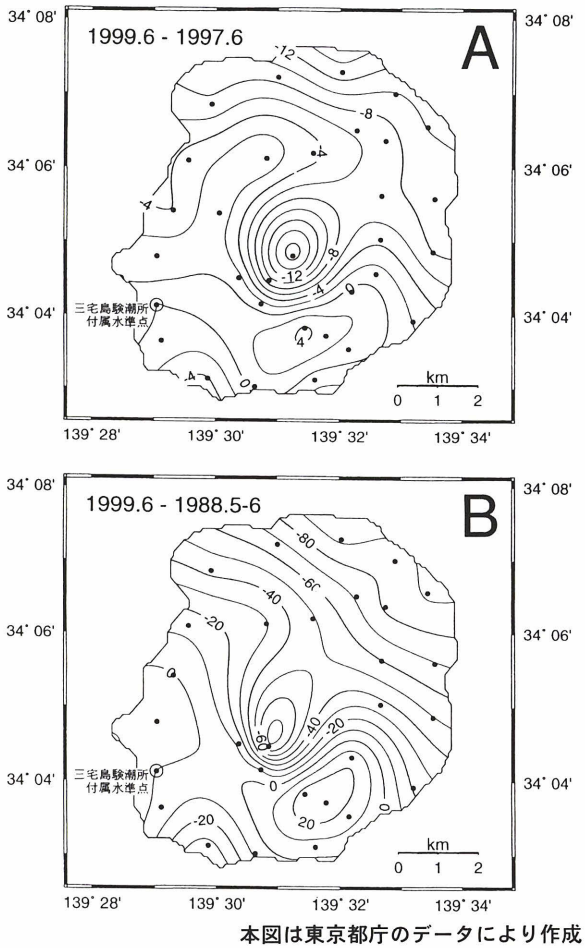
以上のような解析結果から，三宅島のマグマ溜まりは，少なくとも1983年頃からは島の南西部付近の地下5－10km付近にあったと考えられるが，地殻変動は，変化量し



Inflation Source(茂木モデル，図中の●)
N34.065±0.006 E139.513±0.003 Depth 9.4±3.3km ΔV　$6.2\pm5.5\times10^{6}m^{3}$/yr

使用データ
水平変動　GPS 4点(1997/7-1999/12の平均速度)
上下変動　GPS 4点(1997/7-1999/12の平均速度)
　　水準測量30点(1997/6-1999/6)
水準測量は，東京都庁のデータを使用

図－5
水準測量による三宅島の上下変動。三宅島験潮場付属水準点（図中の二重丸）を不動と仮定し，水準測量結果から三宅島島内の上下変動を1996.6－1997.6（図5－A）および1996.6－1988.5－6（図5－B）の2期間について求めた。上下変動の単位はmm，等高線間隔は2mmである。三宅島北東部に対する南西部の隆起，カルデラ部の沈降，1983年の側噴火火口（山頂から南西方向に伸びる線上に開いた）の両側の隆起の目玉が特徴である。原データは東京都による。

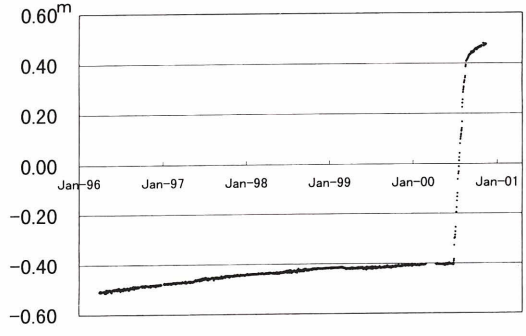


図－6
1997－1999年間の三宅島の膨張モデル。GPSによる水平変動，上下変動及び水準測量結果（図5）を用い，茂木モデルを仮定して1997－1999年間の膨張源の位置及び体積増加量を推定した。水平変動ベクトルおよび上下変動（GPSおよび水準測量）についてそれぞれ観測値（実線）および計算値（白抜き）が示されている。黒丸が推定された茂木モデルの位置。深さは約6－12kmに求まった。一年当たりの体積増加は1－10＊$10^6 m^3$である。この推定でも茂木モデルの位置は三宅島の南西部に求まっている。

か議論できないため，残念ながらマグマ溜まりの総量については，現在の所知ることができない。また，2000年噴火では大規模なカルデラの陥没が発生したが，カルデラ部分の沈降は今回の噴火以前から継続していたらしく，興味深い。ただ，今回の陥没との直接的な因果関係は，今のところ不明である。

5. 2000年活動以前の神津島、式根島、新島の地殻変動

1994年のGPS連続観測の開始以来，神津島付近において顕著な地殻変動が継続していたことが注目されていた。この変動は，この3島の顕著な隆起と相互の距離の急速な伸びで特徴づけられる。神津島の隆起は験潮結果からも支持される。験潮結果は，この隆起が1980年代の後半から始まっていることを示している。一方，GPS結果は、フィリピン海プレートの北西進の影響によるもののほかに，この三島の付近では，プレート運動に重畳して式根島周辺に力源があり，それが膨張していることを示唆する成分があることを示している。残念ながらGPS観測点は陸上に限られ，点在する島にしか配置されていないため，観測網の分布は不均一で，力源をユニークには求めることは難しいものの，この付近において何らかの地殻活動が進行していた可能性が高い。また，1998年からは、神津



図－7
GPS連続観測による神津島－新島間の距離の変化（1996／04／01－2000／11／15）。2000年のイベント以前にもこの基線は開いていた。1999年に入って基線の伸びが鈍化した後，2000年夏の大規模な地殻活動を迎えている。

島にはGPS連続観測点が3点となったが，天上山をはさんで顕著な距離の伸びが観測されており，2000年の一連の活動以前から神津島周辺でも，かなり活発な活動が発生していたことがうかがえる。また，図7はGPSによる神津島と新島の距離変化であるが，今回の活動以前の変化のスピードも一様ではなく，変動が1999年頃から鈍化していたことが見て取れる。今回の活動との関連はよくわからない。

2000年以前の地殻変動のパターンは神津島，式根島，新島の三島の隆起と新島-神津島の距離の開きによって特徴づけられ，式根島周辺における茂木モデル的膨張源の活動を示唆するが，一方，神津島島内でもローカルな地殻変動が進行していたことが報告されている［Kimataほか 2000］。あえて，単純化して，式根島付近に膨張源があると考える場合でも，その位置がダイクからみて北西に若干離れているため，その関連を説明するためにはこれらの連結のメカニズムを明らかにする必要があるが，未検討である。しかしながら，今回の活動以前の3島の隆起とその沈静化の後，2000年になって大規模な地殻活動が発

生しており，空間的・時間的に近接しておきた現象であるため何らかの関連性を連想させる。

これらの，事実は現在の所それぞれ断片であり，統一した説明を構築できていないものの，今回の活動がおそらく広範囲にそれぞれ関連して起こっており，それらの間には何らかの物理的な関係があるという立場で統一的な説明を試みるべきであると考える。観測は十分になされており，今後の我々の挑戦を待っている貴重なデータが豊富に揃っているといえよう。

5. まとめ

三宅島神津島周辺において2000年に発生した地震・火山活動に関連して地殻変動データを簡単に紹介した。個々の現象についてはそれぞれ，モデルが推定されうるが，全体を貫く大きな統一的な描像を構築するにはほど遠い状態にある。しかしながら，三宅島ではマグマ溜まりが一貫して南西部にあったこと，ダイクがそこから西方に伸びていったことなど，今回の活動の様子が，少しずつ分かりはじめている。今回の活動は，その全体を通じて，GPSなど最新の観測手法によって詳細にモニターされており，また，活動開始以前からのデータも豊富に揃っている。それらのデータを総合的に解析することによって，一見，無関係に見える現象の集積が統一的に説明できる可能性を秘めている。地殻変動データは今回の活動を理解するための重要な観測データの一つであり，今後も様々な観点から解析がなされ，今回の活動の詳しいメカニズムが明らかにされてゆくであろう。

参考文献

菊地正幸・山中佳子，三宅島近傍の一連の長周期地震,EIC地震学ノート No.85, 2000

Japan Meteorological Agency, Recent seismic activity in the Miyakejima and Niijima-Kozushima region, Japan - the largest earthquake swarm ever recored, Earth Planets Space, 52, i-viii, 2000.

Kimata, F., S. Kariya, M. Fujita, K. Matsumoto, T. Tabei, J. Segawa, and A. Yamada.
Estimated pressure source on Kozu Island volcano, South Central Japan, from GPS measurements (July 1996-August 1999) EPS, 52, 975-978, 2000

熊谷博之，大湊隆雄，中野優，大井昌弘，久保篤規，井上公，長周期地震波から推定される三宅島火山の活動モデル(1) 50秒パルスの発生プロセス，日本地震学会2000年度秋季大会講演予稿集, A21, 2000

大湊隆雄，熊谷博之，長周期地震波から推定される三宅島火山の活動モデル(2) 山頂陥没における50秒パルスの意味，日本地震学会2000年度秋季大会講演予稿集, A22, 2000

小沢慎三郎、宮崎真一、西村卓也、村上亮、鷺谷威、矢来博司、多田尭、海津優、伊豆諸島群発地震に伴う地殻変動データの時間発展インバージョン解析、日本地震学会2000年度秋季大会講演予稿集,、講演番号：P166, 2000

Nishimura, T, S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu and M. Ukawa, Crustal Defromations caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan, Geophisical Research Letters, submitted, 2001.

多田堯、中村一明、1983年三宅島噴火に関連した地殻変動とその解釈、－INFLATION・DEFLATION モデル－、火山第２集、第33巻、第３号、173－184、1988.

津久井雅志、鈴木裕一、三宅島火山最近7000年間の噴火史、火山、Vol. 43、No. 4，149－166, 1998.

Ukawa, M., E. Fujita, E. Yamamoto, Y. Okada, and M. Kikuchi, The 2000 Miyakejima eruption : Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network, EPS, 52, xix-xxvi, 2000.