

三宅島火山活動の発端となった岩脈貫入のシナリオ

藤田英輔*・鶴川元雄・山本英二・岡田義光

防災科学技術研究所

Scenarios of dike intrusions at the beginning of the Miyakejima volcano activities

Eisuke Fujita*, Motoo Ukawa, Eiji Yamamoto and Yoshimitsu Okada

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Abstract

The initial stage of the 2000 Miyakejima volcano activities started at about 1800 LT, Jun. 26 with seismic swarms and crustal deformation, and continued until June 27. These phenomena are interpreted to be due to dike intrusions and their migrations from the south-eastern to the western parts of the volcano. Our analyses of tilt data, which were observed at five bore-hole stations, focused on their temporal and spatial changes, and revealed that the magma began to intrude toward the south of the summit area from a magma reservoir beneath the south-eastern part of the volcano. The head of the intruded magma was as shallow as 200 m beneath sea level, but the volcano did not erupt at that time. After that the magma moved to the western region and intruded toward a depth of 500 m beneath sea-level, causing an extraordinary tilt change as large as $170\mu\text{rad}$ at MKA by 0100, Jun. 27. The magma system established during this initial stage is a key to recognizing the many following phenomena such as spasmodic eruptions, tilt-step, and volcanic gas emissions. Volcanic activities continued for more than one year.

Key words: Miyakejima volcano, tilt changes, dike intrusions, tensile crack, magma migrations

1. はじめに

2000年6月26日18時すぎに始まった三宅島の火山活動は、翌27日の午前中に三宅島西方沖での海底噴火が発生したものの、島内での噴火の危険性はないとして6月29日には安全宣言が出され、終息にむかっていくものと思われた。しかし、その後6月29日ごろから島内を震源とする低周波地震が小規模ながら発生しはじめ、7月4日から5日にかけては火山性地震(VT=Volcanic Tectonic地震)の群発活動も発生し、7月8日18時41分には今回の活動ではじめての山頂噴火が発生した。その後、7月14日、15日、8月10日と噴火が発生し、8月18日には最大規模の噴火となった。8月29日には低温の火砕流をともなう噴火が発生した。その後大規模な噴火は伴わないものの、大量の火山ガスを放出する活動が

続いている。最初の山頂噴火(7月8日)から8月18日の間には、山頂で陥没が進行し、カルデラが形成された。また同時期に山頂からやや南西部を中心とした膨張を示す傾斜ステップおよび50-sパルス波も観測されている(藤田ほか, 2001a; Fujita *et al.*, 2002)。これら一連の現象は、6月26日から27日にかけての活動にかかわったマグマ供給システムとそその中のマグマの活動によって支配されていると考えられる。しかし、この活動初期に何がおこったのか、どのような空間分布でどのような形状のシステムが関与しているかについては未だに解明されていない。本稿では、この点を傾斜変動の時間変化をもとに明らかにする。傾斜変動はGPS(Global Positioning System: 汎地球測位システム)と比較して時間分解能に優れ、より詳細な時間変化を調べることが可能

*e-mail: fujita@bosai.go.jp (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

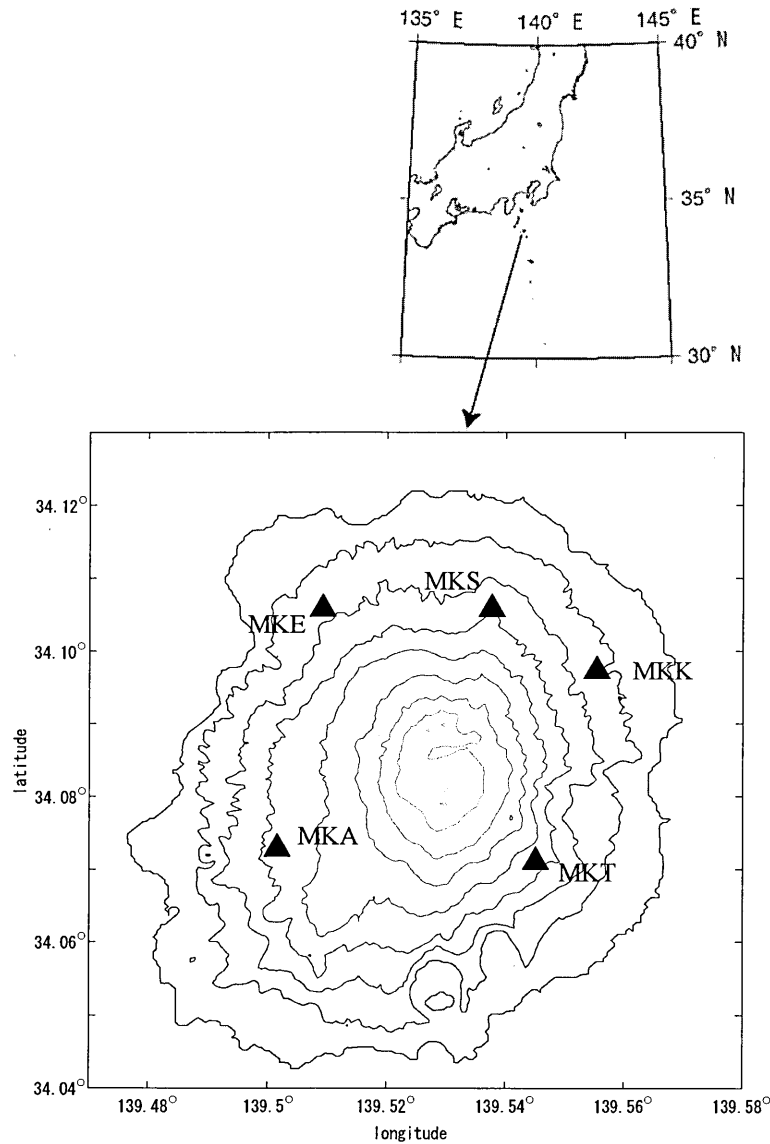


Fig. 1. NIED Miyakejima volcano observation network

である。

2. 傾斜変動の概要とデータ解析手法

防災科学技術研究所（防災科研）では、島内5ヶ所（Fig. 1）においてそれぞれ地下約100mに設置したボアホール式傾斜計（アカシ JTS33型）により傾斜観測を行っており、データをつくばの防災科研へテレメータし、オンラインおよびオフラインデータ処理を行っている（藤田ほか，2001b）。Fig. 2は、2000年6月26日11時から翌27日11時まで24時間分の傾斜計の記録である。なおデータは分値（1分間の中央値）である。6月26日18時30分ごろから、島南東部にある観測点MKT（Fig. 1）の傾斜計が北東下りの傾斜変動をとらえた

（山本ほか，2001）。その後、MKTの傾斜変化量が次第に大きくなっていくとともに、21時ごろからは次第に島南西部のMKA（Fig. 1）の傾斜計が急激に南下がりの傾斜変動を示し始め、6月27日0時30分ごろまでに約170 μrad の変動となった。MKAの傾斜変動はここをピークとして南東下りから北東下りへ変化し、その変化率は次第に小さくなった。この間、山頂から西側にかけての島内直下を震源とする群発地震が続き、同日6時ごろからはその中心は三宅島西方沖へ移動した（藤田ほか，2001a）。

この間、傾斜変動の向きがどのように時間変化したかを把握するため、Fig. 3に6/26 18時～6/27 10時までのそれぞれ1時間毎の傾斜ベクトル図を示す。これを見る

三宅島火山活動の発端となった岩脈貫入のシナリオ

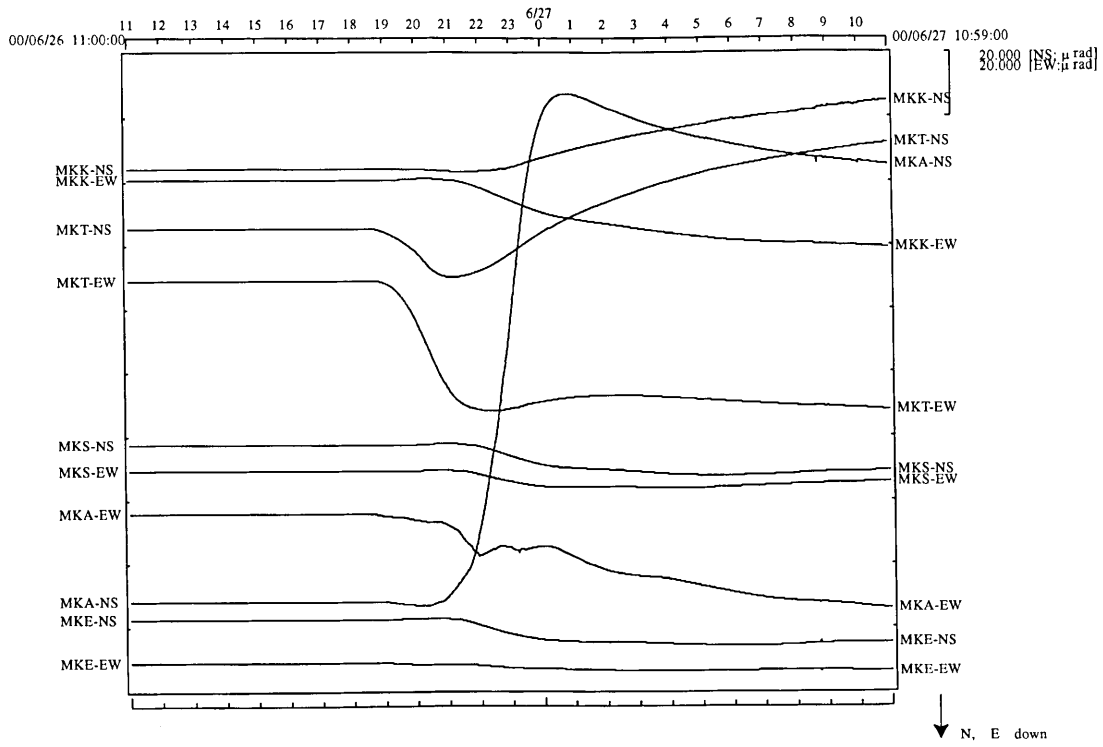


Fig. 2. Tilting records from 1100 LT, Jun. 26 to 1100 LT Jun. 27 observed at the NIED Miyakejima volcano observation network.

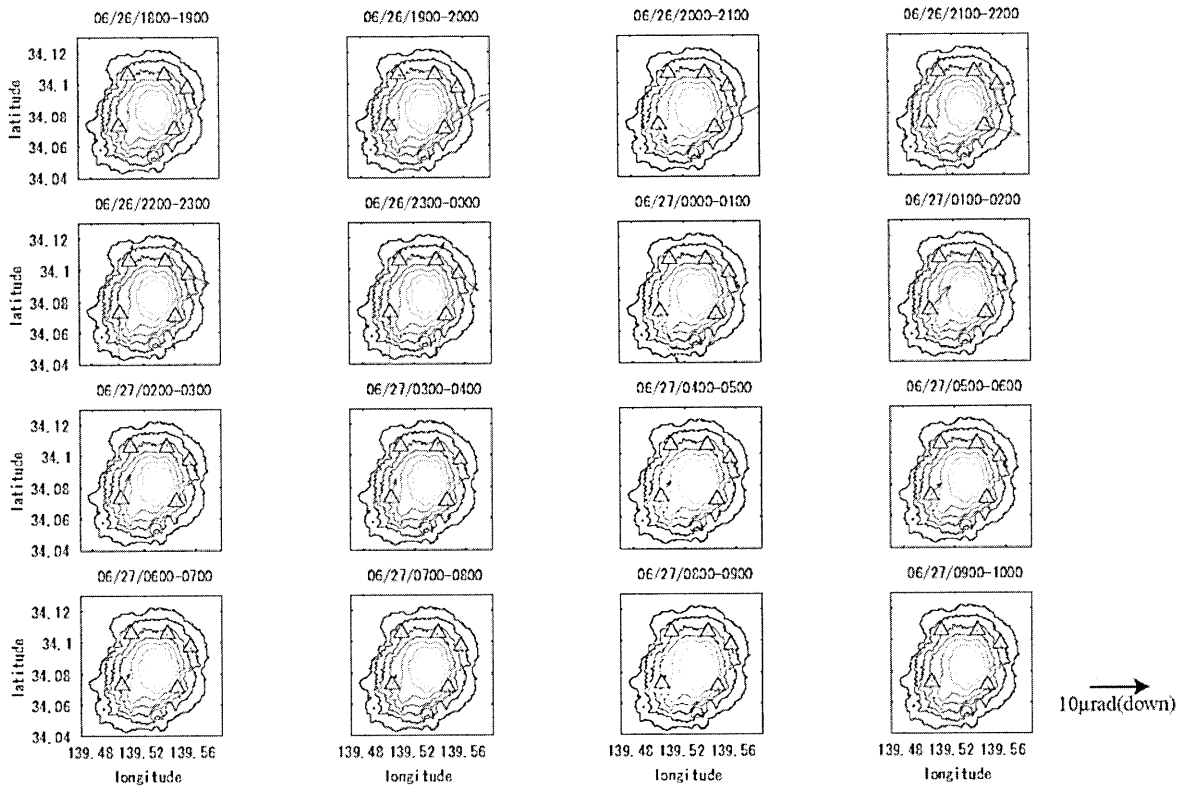


Fig. 3. Tilting vectors for each one hour from 1800 LT, Jun. 26 to 1000 LT, Jun. 27.

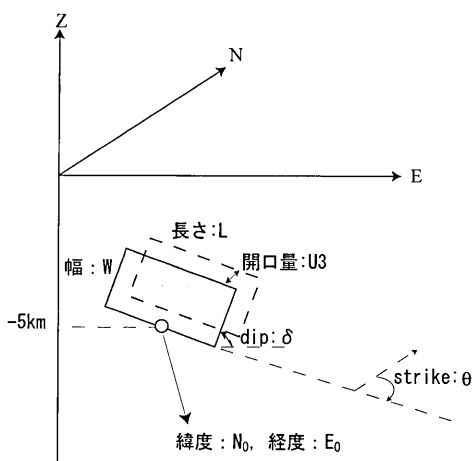


Fig. 4. The definition of tensile fault parameters. The location of the tensile fault is characterized by the latitude: N_0 and longitude E_0 of its bottom center position. L , W , δ , θ and U_3 are the length, width, dip angle, strike angle, and opening of the fault, respectively. The bottom of the fault is conventionally assumed to be at 5 km beneath sea level.

と、活動初期には MKT の傾斜変動が最も大きく、南東部（坪田地区）に変動源があることが推測される。その後 21 時頃からは変動の中心が MKA の方へ移動して、2 時ごろ以降は MKA, MKE, MKS では西側下がり、MKT, MKK では南南東下がりの傾向がゆっくりと継続している。

本稿では Okada (1985) により定式化された開口断層による地表での傾斜変動、および Mogi (1958) による球状収縮源（茂木ソース）による傾斜変動の表現を用い、これら 1 時間毎の傾斜変動を説明する最適解をもとめた。まず、最初の 1 時間（18～19 時）について、最適な球状収縮源と開口割れ目を決定した。開口割れ目の体積増加分は球状収縮源の体積減少量と相殺するものと仮定している。19 時以降の各 1 時間については球状収縮源を 18～19 時で求められた場所に固定し、その収縮量と開口割れ目の体積が等しいとして最適解を求めている。開口割れ目の各パラメータは Fig. 4 に示す通りである。最適解はグリッドサーチにより、観測量との残差が最も少ないものを採用している。計算をおこなった空間領域は北緯 $34.05 \sim 34.10^\circ$ および東経 $139.47 \sim 139.56^\circ$ で、断層の位置の緯度: N_0 ・経度: E_0 は 0.001° 毎とした。また深さ方向に対しては、断層の下面を 5 km から 500 m 刻みで求めている。断層パラメータとして、長さ: L は 100 m から 10 km までを 100 m 毎、幅: W は 100 m から 5 km までを 100 m 毎、dip: δ , strike: θ はそれぞれ 10° 刻みで

開口量: U_3 は 10 cm から 1 m まで 10 cm 刻みとしている。なお、傾斜計が設置されている高度は観測点により異なるが簡単のためすべて海拔 0 km の地表面にあるものとし、地形効果の補正は行っていない。また傾斜計は全観測点でそれぞれ地表面より約 100 m 地下の孔底に設置されているため、孔底での傾斜量を求めるモデル (Okada, 1992) を用いる方が適当であるが、同様に簡便のため、地表での傾斜量を計算した。なお、地形効果および孔底設置の効果による補正量は最大 10% 程度である。各観測点での 1 時間毎の傾斜変動量と今回のモデル化による計算値を Table 1 に示した。モデルによる傾斜量の計算値は開口割れ目 (sill) と球状収縮源 (mogi) の二つによる傾斜量の和として求められている。また、得られた 1 時間毎の開口割れ目の最適解を Table 2 に示す。

3. 山頂方向へのマグマ貫入 (6/26 18:00～20:00)

6/26 18～19 時の傾斜変動は MKT で北北東下がり $1.4 \mu\text{rad}$, MKA で東北東下がり $0.7 \mu\text{rad}$ である。また島北部の観測点ではいずれも $0.2 \mu\text{rad}$ 以下である (Table 1)。この傾斜パターンを示す開口割れ目および球状収縮源のモデルは Table 2 および Fig. 5a のように求められた。最適な球状収縮源は MKT のやや南西 (34.062°N , 139.533°E) の深さ 5 km に求められた。ここからの岩脈の貫入は島南東部の MKT のやや南西付近から $\text{dip} 50^\circ$ で山頂方向へ向って始まった。19 時頃には山頂の南側、開口量 10 cm で深さ約 1.2 km まで上昇してきたものと推測される。岩脈の水平方向の長さは 2.2 km である。MKT で大きめの傾斜変動量となったのは、この観測点が傾いた開口割れ目の上盤側、上下変位分布のピークから北東側の斜面に位置しているためであると解釈される。MKA は MKT よりも貫入岩脈に近いもの、下盤側に位置していて上下変位が小さいため、傾斜量も MKT に比較して小さくなっている。

その後 19～20 時には、全体の傾向はほぼ同じで傾斜量が大きくなった。MKT では 18～19 時と比較して約 48° 東に向きを変え、変動量は $12.7 \mu\text{rad}$, MKA で約 34° 東へ向きを変えて、 $1.8 \mu\text{rad}$ となった。これは 18～19 時に貫入した断層の南東側を下端として山頂へ向って、 dip 約 40° で貫入したことによる。岩脈の水平方向の長さは 3.4 km で、地下約 1 km まで到達したと思われる。また、開口量は 20 cm であった (Fig. 5b)。

このように 18～20 時までには山頂のやや南側へ向かっての岩脈貫入が進んでいたと考えられる。いずれの時間帯でもマグマの上昇は南東部のほぼ同じ位置から始まっ

三宅島火山活動の発端となった岩脈貫入のシナリオ

Table 1. Observed and calculated tilt changes of each one hour at five stations of NIED Miyakejima observation network. Positive values suggest east and north downward, in EW and NS components, respectively. Calculated tilt changes are the sums of those by sill and mogi sources.

	MKA							
	EW, μrad				NS, μrad			
	obs	cal	(sill)	(mogi)	obs	cal	(sill)	(mogi)
6/26 18-19	0.657	0.632	0.564	0.068	0.15	0.161	0.18	-0.019
6/26 19-20	1.291	1.101	0.742	0.359	1.193	1.508	1.609	-0.101
6/26 20-21	1.724	1.543	1.042	0.501	-3.226	-3.274	-3.133	-0.141
6/26 21-21	9.48	8.355	7.44	0.915	-21.353	-21.094	-20.836	-0.258
6/26 22-23	-2.195	-0.127	-0.819	0.692	-65.019	-64.247	-64.052	-0.195
6/26 23-00	-0.463	0.128	-0.484	0.612	-62.738	-61.329	-61.157	-0.172
6/27 00-01	3.411	3.758	3.622	0.136	-8.178	-6.593	-6.554	-0.038
MKK								
6/26 18-19	-0.098	-0.052	-0.013	-0.039	-0.015	-0.003	0.048	-0.051
6/26 19-20	-0.505	-0.15	0.057	-0.207	0.03	0.215	0.482	-0.267
6/26 20-21	0.369	-0.137	0.153	-0.289	0.749	0.063	0.436	-0.373
6/26 21-22	2.637	1.012	1.541	-0.529	0.133	0.711	1.393	-0.682
6/26 22-23	4.128	0.498	0.898	-0.4	-1.453	0.718	1.234	-0.516
6/26 23-00	3.797	0.54	0.894	-0.354	-2.795	0.683	1.139	-0.456
6/27 00-01	2.207	3.00	3.078	-0.079	-2.624	-2.379	-2.277	-0.101
MKT								
6/26 18-19	0.625	0.749	0.808	-0.059	1.027	0.989	1.025	-0.036
6/26 19-20	11.254	11.173	11.487	-0.314	5.954	6.363	6.553	-0.191
6/26 20-21	21.54	21.053	21.491	-0.438	8.321	7.842	8.108	-0.267
6/26 21-22	7.063	6.099	6.899	-0.8	-1.615	-1.837	-1.35	-0.487
6/26 22-23	-0.231	-0.966	-0.361	-0.606	-5.448	-4.585	-4.216	-0.369
6/26 23-00	-2.032	-3.397	-2.862	-0.535	-6.624	-6.297	-5.972	-0.326
6/27 00-01	-1.37	-1.644	-1.525	-0.119	-5.374	-6.443	-6.37	-0.072
MKS								
6/26 18-19	-0.03	-0.036	-0.027	-0.008	-0.038	-0.082	-0.017	-0.064
6/26 19-20	-0.246	-0.374	-0.329	-0.044	-0.24	-0.317	0.022	-0.339
6/26 20-21	-0.209	-0.107	-0.045	-0.062	-0.45	0.231	0.704	-0.473
6/26 21-22	1.582	1.298	1.412	-0.113	1.35	1.993	2.858	-0.865
6/26 22-23	2.262	0.678	0.764	-0.086	3.099	1.978	2.633	-0.654
6/26 23-00	1.642	0.589	0.665	-0.076	2.859	1.838	2.416	-0.578
6/27 00-01	0.194	0.374	0.39	-0.017	1.14	0.016	0.145	-0.129
MKE								
6/26 18-19	0.124	0.034	0.005	0.029	-0.065	-0.05	-0.006	-0.044
6/26 19-20	0.524	0.2	0.046	0.154	-0.29	-0.529	-0.297	-0.232
6/26 20-21	0.059	-0.035	-0.251	0.215	0.077	0.358	0.683	-0.324
6/26 21-22	0.236	-0.692	-1.085	0.393	2.37	2.936	3.528	-0.592
6/26 22-23	0.73	0.204	-0.094	0.298	2.796	3.788	4.237	-0.448
6/26 23-00	0.283	0.247	-0.016	0.263	1.854	3.274	3.67	-0.396
6/27 00-01	0.241	1.135	1.076	0.058	0.575	1.353	1.441	-0.088

Table 2. The estimated tensile crack parameters for tilt change of each one hour.

期間	緯度 °N	経度 °E	深さ d(km)	長さ L(km)	幅 W(km)	strike θ	dip δ	開口量 U3(cm)	体積 $\times 10^5 \text{m}^3$
6/26 18 - 19	34.061	139.519	2.0	2.2	1.0	N70°E	50°	10	0.22
6/26 19 - 20	34.058	139.521	2.5	3.4	1.7	N60°E	40°	20	1.16
6/26 20 - 21	34.057	139.518	2.5	6.0	2.7	N70°E	60°	10	1.62
6/26 21 - 22	34.058	139.518	3.0	3.8	2.6	N110°E	80°	30	2.96
6/26 22 - 23	34.065	139.512	1.5	5.6	1.0	N90°E	80°	40	2.24
6/26 23 - 00	34.066	139.510	1.5	6.6	1.0	N90°E	80°	30	1.98
6/27 00 - 01	34.073	139.486	2.0	3.2	0.7	N40°W	90°	20	0.45

球状収縮源: 34.062°N, 139.533°E, 深さ 5km

Miyakejima Volcano tilt-change

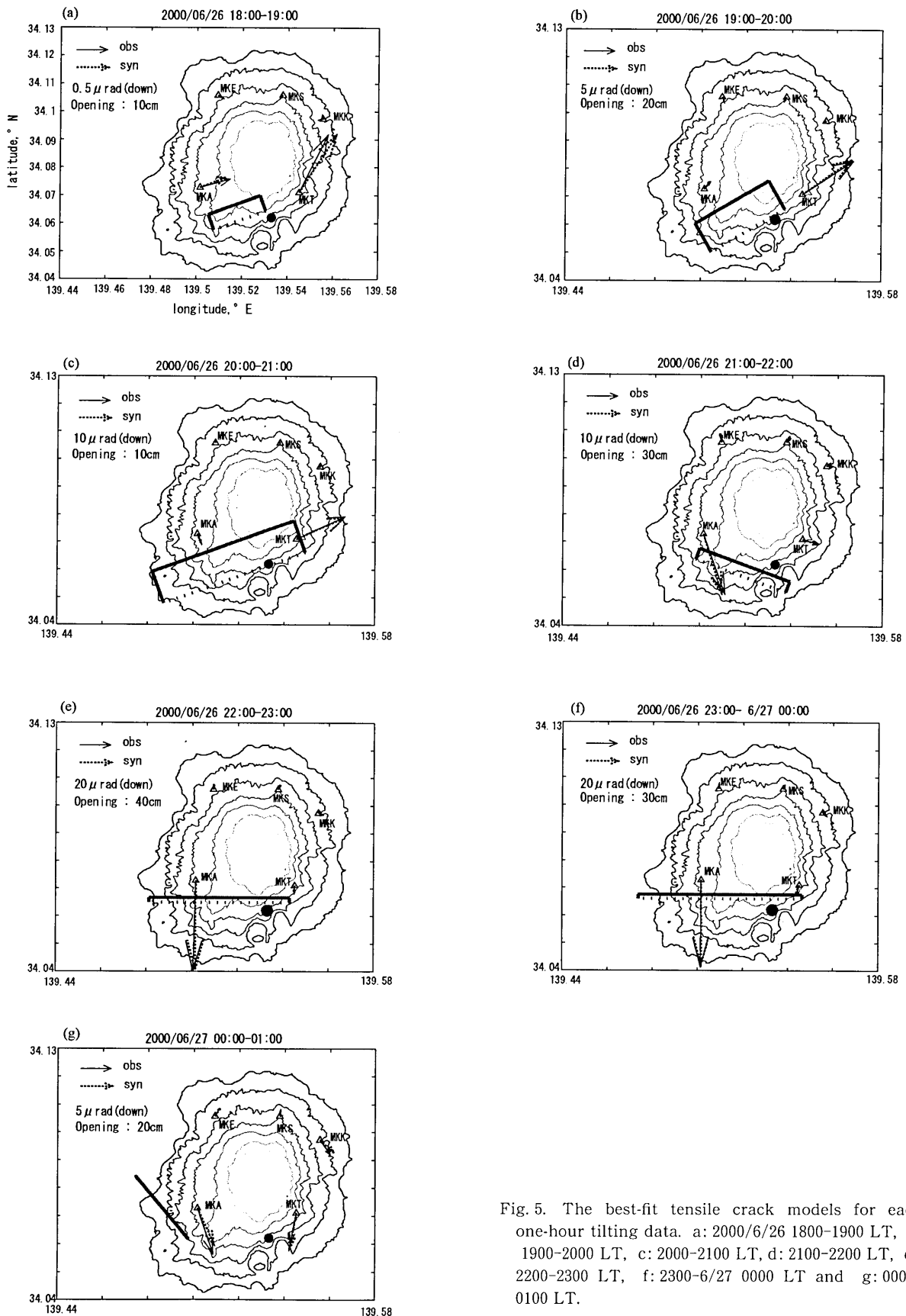


Fig. 5. The best-fit tensile crack models for each one-hour tilting data. a: 2000/6/26 1800-1900 LT, b: 1900-2000 LT, c: 2000-2100 LT, d: 2100-2200 LT, e: 2200-2300 LT, f: 2300-6/27 0000 LT and g: 0000-0100 LT.

ており、この付近に今回の活動の契機となったマグマ供給源（マグマ溜り）が存在しているものと推測される。

4. 岩脈の西方移動（6/26 20:00～6/27 1:00）

20～21時にはMKAの傾斜ベクトルがそれまでの東北東下がりから南東下がりへと向きを変えている（Fig. 5c）。これはマグマの移動の様相に変化があったことを示している。この時期の傾斜データから推定される岩脈は、それまでの断層の下端とほぼ同じ方向でMKA南西までdip約60°で伸びた開口割れ目が、観測データをもっとも説明できる。開口割れ目のstrikeはN70°E、水平方向の長さは6km、開口量10cmで地下200mまで貫入は進化した。

21時頃からは傾斜ベクトルが全般的に変化した（Fig. 5d）。まず、これまでMKTが最大傾斜量だったのがMKAが最大となり、活動の中心が山頂から西方へと変化した。MKTでは東北東下がりから東南東下がりに向きが変わり、傾斜変動量は $7.2\mu\text{rad}$ 、MKAでは急激に大きくなり、 $23.4\mu\text{rad}$ もの南東下がりの変化となった（Table 1）。最適解は南東部からstrike N110°Eに3.8kmの長さでdip80°で貫入した開口割れ目で、開口量30cm、深さ400mまで達している。22時～6/27 0時には一連の活動で最大規模の貫入となり、MKAでは2時間で約 $130\mu\text{rad}$ の南下がりの傾斜変動が観測されている。この間の貫入は、ほぼMKA西方からMKTまで東西方向に延長5.6～6.6km、地下500mまで到達した開口割れ目で、2時間で計70cm開口している（Figs. 5e, f）。MKAで観測された南下がりの傾斜変動は、MKAのほぼ直下、やや南側に貫入があり、MKAは鉛直方向の変位分布が南に向かって急速に減少する地点にあったためと解釈される。

6/27 0～1時ではMKAの傾斜量も小さくなり、南東下り $8.8\mu\text{rad}$ となった（Table 1）。この貫入はMKAの西方の海岸付近で長さ3.2km、上端の深さ1.3km、開口量20cmと推定された（Fig. 5g）。

5. 議 論

以上、傾斜データの解析から、6月26日から27日にかけて三宅島の地下で進行した岩脈貫入の時間変化とその詳細な分布から以下のようなシナリオで活動が進行していたと考えられる。マグマの供給源は島南東部に存在しており、まずここから山頂やや南側へ向かって上昇したものの、何らかの理由により山頂から噴出するに致らず、西方への貫入へと変化し、更に三宅島西方沖へと活動の中心を移していった。今回は活動の各1時間毎にお

いて開口割れ目および固定した球状収縮源によりモデル化を行ったが、複数の開口割れ目やそれまでに発達した開口割れ目が逆に収縮するといった効果も考慮する必要もあろう。また、各1時間毎に貫入した岩脈の体積を南東部の球状収縮源の体積減少は相殺するものと仮定したが、より深部からのマグマの大規模な供給が継続している場合など、岩脈と球状収縮源それぞれが独立に変形している可能性もある。しかし、この期間における活動の経過を大局的に把握する上では、固定した南東部の球状収縮源と順次マグマの貫入が成長していく今回のモデルでも問題ないものと考えられる。

今回の活動の源となった島南東部（坪田地区）のマグマ供給源は、Sasai *et al.* (2000) が熱消磁の観測結果により1996年ごろからマグマの蓄積が進行していたと推定した位置とほぼ一致している。また笹井ほか（2001）では、6月26日から大池池地域の全磁力が減少をはじめていたことを指摘しており、活動の始まりが南東部とする見解と調和している。18～20時の南東部から山頂方向へのマグマ貫入は、この時期の地震活動が南東部からほぼ山頂付近（藤田ほか、2001a）や山頂から南西方向（酒井ほか、2001）に震源分布が集中していることから裏付けられ、これらの地震活動は貫入岩脈の周辺部やマグマ溜り周辺部で発生したものと考えられる。山頂方向へのマグマの貫入の解釈として、一つはこの部分に新たな岩脈が形成されたことによると考えられるが、もう一つの可能性として、マグマが既存の山頂火道をつかって上昇して来たことも考えられる。山頂火道の具体的な位置はこれまでわかっていなかったが、今回推定した18～20時に開口した領域が既存の山頂火道に相当しており、新たなマグマがこの火道を拡大して上昇したのものとしても解釈できる。

また、21時頃から始まったと推定されるマグマの西方移動は、震源の移動（藤田ほか、2001a；酒井ほか、2001、JMA、2000）からも指摘されており、傾斜データの解析からも裏付けられた。ただ、地震の震源分布だけからはこれらマグマの分布について震源決定精度上の問題から詳細な位置を把握するには至っていなかったが、今回の傾斜データの解析により明らかになった。特に21～22時の傾斜データを説明する南東部からMKAのやや南側へ西北西～東南東の走向をもつ開口割れ目は、18～20時に山頂方向へ向かったルートから西方へ伸びたのではなく、新たに南東部のマグマ溜りから発達していったことを示唆している。22時以降はそれまで貫入が進んだ山頂方向から阿古地区一体にわたってマグマが大規模に貫入した。MKAの傾斜データが約 $170\mu\text{rad}$ もの南下が

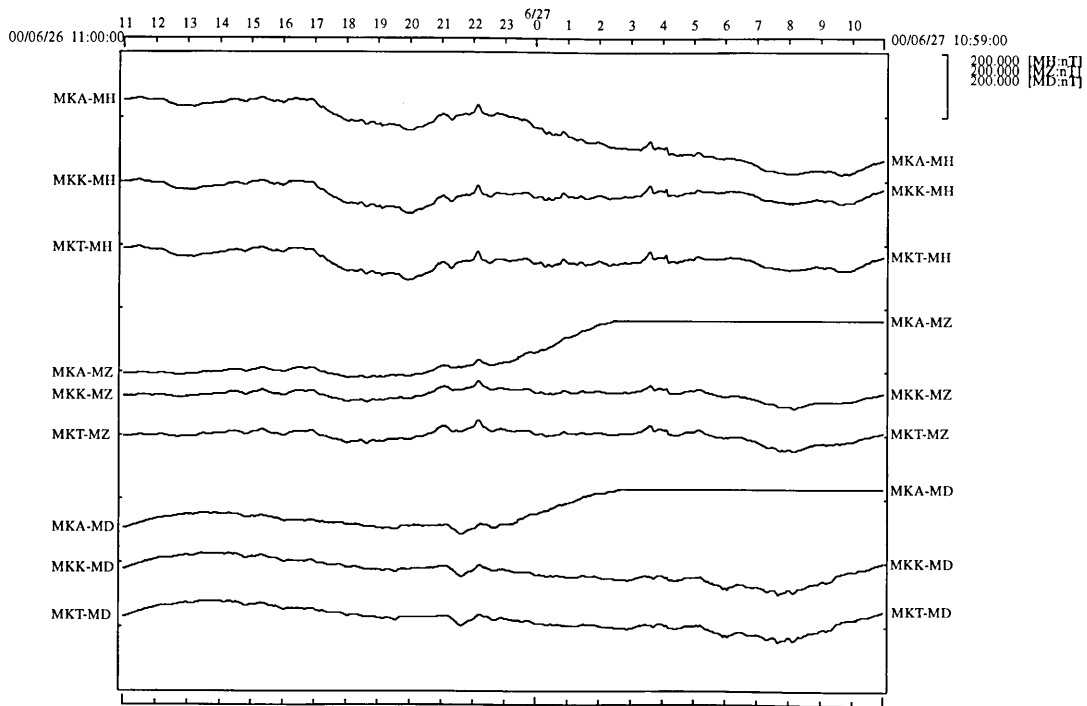


Fig. 6. The records of the three-components magnetometer at MKA

りを示していることから、詳細な位置としてMKAのほぼ直下やや南側であることがわかった。また、ほぼ地下500 mまでは上昇していたと推定され、山腹割れ目噴火が発生していてもおかしくない状況であった。

マグマが地表直下まで上昇したことは、MKAに設置されていた3成分磁力計の記録からも裏付けられる(Fig. 6)。22時頃から地磁気データに異常が見られ、残念ながらオーバースケールして正確な値は不明だが、27日2時過ぎまでに200 nT以上の変化となっている。阿古地区の榎沢(ENK)に設置されたプロトン磁力計、夕景浜(YKH)の自然電位の電極には異常がない(笹井ほか, 2001)との事実と併せて、より詳細なマグマ貫入分布をおさえることが出来るであろう。今回は、幸いにも山腹割れ目噴火にいたらなかったものの、このような詳細なマグマの位置の同定は、山腹割れ目噴火が何処で発生するか、また噴出した場合に溶岩流がどのように流れるかの推移予測のためにも重要な情報である。

この間のGPSデータの解析(中尾ほか, 2000)によると、変動源は同様に南東側から始まり、西方へと変動が移動していくことが指摘されており調和的である。今後、傾斜データとGPSデータを併せて定量的に解釈する予定である。

この活動の後、2000年7月以降の傾斜計が示す長期的

なトレンドは島南東部(MKT, MKK)で南南東下がりである(Ukawa *et al.*, 2000)。これは南東部のマグマ溜りがマグマを放出したことによりゆっくりとした収縮をしていることを示していたものと解釈される。

6. まとめ

三宅島2000年噴火の契機となった2000年6月26日18時から6月27日1時の活動について、傾斜データの時間変化をもとに岩脈貫入のシナリオを明らかにした。

(1) マグマの供給源(マグマ溜まり)は島南東部(坪田地区)の地下にあった。(2) 6月26日18時過ぎより、この南東部のマグマ溜まりから山頂方向やや南側へ向かって約40~50°の傾斜角でマグマが上昇した。19時頃には深さ1.2 km、20時頃に深さ1.0 kmまで上昇していたものと思われる。(3) 20時頃から22時頃にかけて、南東部のマグマ溜まりから西北西方向へマグマの貫入が進んだ。(4) 22時頃から6月27日0時頃には、最初に貫入した山頂南側から阿古地区へと東西約6.6 kmの大規模なマグマの貫入がおこった。貫入した位置はMKAのほぼ直下、やや南側である。(5) 6月27日0時以降、西方海域へ向かってマグマの貫入が進行した。

謝 辞

本稿作成にあたり、名古屋大学木股文昭氏、Irwan 氏、東京大学地震研究所中尾茂氏には GPS データについて特に有益な情報を頂きました。また、査読者に感謝致します。本稿を作成する機会を与えてくださった東京大学地震研究所渡辺秀文氏に感謝致します。

引用文献

- 藤田英輔・鶴川元雄・山本英二・岡田義光・菊池昌江, 2001 a, 三宅島 2000 年噴火に伴う火山性地震・火山性微動, 地学雑誌, **110**, 191-203.
- 藤田英輔・鶴川元雄・山本英二, 2001 b, 防災科学技術研究所における火山活動観測データ処理・解析システム—三宅島のデータ処理について—, 防災科学技術研究所研究報告, **61**, 83-91.
- Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E. and Okada, Y., 2002, Cyclic jerky opening of magma sheet and caldera formation during the 2000 Miyakejima volcano eruption, *Geophys. Res. Lett.*, (in press).
- Japan Meteorological Agency, 2000, Recent seismic activity in the Miyakejima and Niijima-Kozushima region, Japan—the largest earthquake swarm ever recorded—, *Earth Planets Space*, **52**, i-viii.
- Mogi, K., 1958, Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them., *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99-134.
- 中尾 茂・及川 純・渡辺秀文・仮屋新一・木股文昭・鶴川元雄・藤田英輔・中禮正明・村上 亮・河合晃司, 2000, 三宅島における地殻変動—大学, 国土地理院, 防災科学技術研究所, 気象庁, 水路部の GPS データ統一解析—, 日本地震学会 2000 年秋季大会講演予稿集, A15.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 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, 2001, 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**, 145-155.
- Sasai, Y., Zlotnicki, J., Nishida, Y., Uyeshima, M., Yvetot, P., Tanaka, Y., Watanabe, H., and Takahashi, Y., 2000, Evaluation of electric and magnetic field monitoring of Miyake-jima volcano (Central Japan), 1995-1999, *Annali di Geofisica*, **43**, in press.
- 笹井洋一・上嶋 誠・歌田久司・鍵山恒臣・Zlotnicki, Jacques・橋本武志・高橋優志, 2001, 地磁気・地電位観測から推定される三宅島火山の 2000 年活動, 地学雑誌, **110**, 226-244.
- Ukawa, M., Fujita, E., Yamamoto, E., Okada, Y., and Kikuchi, M., 2000, The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakejima observation network. *Earth Planets Space*, **52**, xix-xxvi.
- 山本英二・鶴川元雄・藤田英輔・岡田義光・菊池昌江, 2001, 2000 年の三宅島火山活動におけるカルデラ形成期に発生したステップ, 地学雑誌, **110**, 181-190.

(Received September 5, 2001)

(Accepted March 7, 2002)