

## 始良カルデラの地盤の再隆起

—1991年12月～1996年10月—

江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad HENDRASTO\*・  
味喜大介・園田忠臣・松島 健\*\*・内田和也\*\*・  
八木原寛\*\*\*・王 彦賓\*\*\*・木股文昭\*\*\*\*・宮島力雄\*\*\*\*・小林和典\*\*\*\*\*

\*現, インドネシア火山調査所

\*\*九州大学理学部附属島原地震火山観測所

\*\*\*九州大学大学院理学研究科

\*\*\*\*名古屋大学理学部附属地震火山観測地域センター

\*\*\*\*\*現, 名古屋大学大学院理学研究科

### 要 旨

山頂噴火活動に伴う桜島周辺の地盤の上下変動量を測定するため, 第9回桜島火山の集中総合観測の一環として, 1996年10月に1等水準測量の再測量を実施した。前回の桜島火山の集中総合観測時の水準測量は1991年12月に行われたが, その後1995年8月と1996年3月にも桜島内の一部の路線の測量が実施されている。1995年と1996年の測量によって, 1974年以来継続して沈降していた始良カルデラの地盤が再び隆起を始めたことが測定された。これは, 始良カルデラ地下に想定されているマグマ溜りに, 再びマグマの貯溜が始まったことを示す現象と解釈される。

キーワード: 始良カルデラ, 上下変動, 隆起, マグマ, 供給, 貯溜

#### 1. はじめに

はじめに, これまでに研究された桜島及び始良カルデラ周辺の地盤の上下変動とその特徴について, 概観する。

##### 1-1. 噴火活動に伴う始良カルデラの上下変動

始良カルデラ周辺の水準測量は, 国土地理院の前身である陸地測量部によって, 1891年に開始された。水準点 (Bench Mark: BM) 2469 (鹿児島市山下町)

を不動点として, カルデラ西縁にあるBM. 2474 (& BM. J: 大崎ノ鼻) の1996年迄の比高変化をFig. 1に示した。1963年以降には, 京都大学桜島火山観測所による頻繁な再測量の資料も含まれている (江頭, 1989)。なお, BM. 2474はカルデラ周辺の水準点のなかでも過去に最大の上下変動量が測定されてきた水準点でもある。この水準路線の方位は, ほぼカルデラの中央部を指向しているため, 同図は桜島の噴火活動に伴う始良カルデラのinflationとdeflationを表現したものと考えられる。溶岩流出を伴った1914年と1946

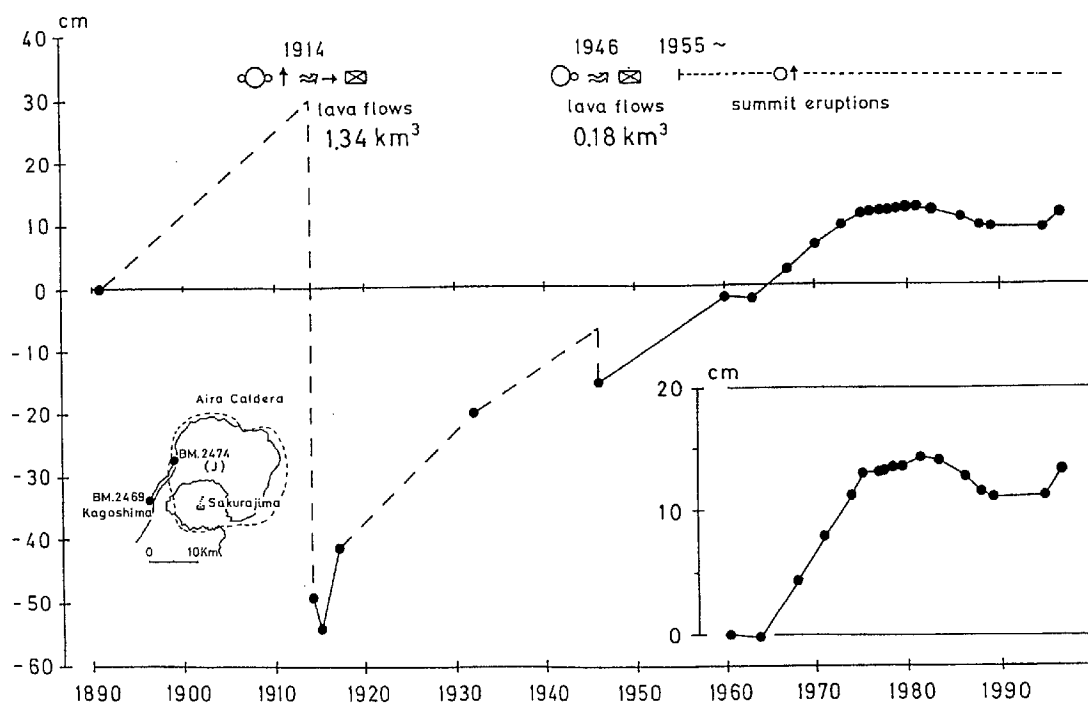


Fig. 1 Secular changes of relative heights of BM.2474 referred to BM.2469 and volcanic activity at Sakurajima.

年の山腹噴火時には、急激な沈降を伴い、噴火活動の静穏期には隆起回復する地盤変動の特徴が理解できよう。

## 1-2. 山頂噴火活動の盛衰に伴う桜島の上下変動量

桜島南岳火口の最近の山頂噴火活動は1955年に始まった。桜島内の水準測量は1957年に開始され、現在に至るまで再測量が継続されている (Yoshikawa, 1961)。山頂噴火活動静穏期の1964・65・68年～1974・75年迄の隆起時期と、山頂噴火活動最盛期の1974・75年～1988年迄の沈降時期の、始良カルデラと桜島内の上下変動量分布をFig. 2に比較して示した (石原・江頭, 1978; 江頭, 1967, 1971)。同図では、カルデラ中央部の北北東約28 kmのBM. 2786 (末吉町) を不動点としている。噴火活動静穏期の約10年間には、桜島北岸において約25cmの隆起があり、噴火活動最盛期の約14年間には、島の北東部から内部にかけて約23 cmの沈降が測定されている。山頂噴火活動に伴う桜島周辺の上下変動の特徴は、噴火活動静穏期の隆起と、噴火活動最盛期の緩やかな沈降である。

## 2. 桜島周辺における1991年～1996年間の上下変動量

### 2-1. 1995年8月、1996年3月および1996年10月の水準測量

1995年8月には、桜島西岸のBM. S. 17 (袴腰検潮室) から島の西海岸沿いに桜島北部のBM. S. 30 (高免) まで

の測量を行った。また、1996年3月にはBM. S. 17 (袴腰検潮室) から島の南海岸沿いに桜島南東部のBM. 2500 (桜島口) までの測量を実施した。

1996年10月に水準測量を実施した路線は、桜島一周道路、島内西部山腹の引ノ平および赤水登山ルート、BM. 2500 (桜島口) からBM. J. 2797 (亀割峠) 間の鹿児島湾東岸ルート、BM. 2469 (鹿児島市山下町) からBM. 2474 (大崎ノ鼻) までの鹿児島湾西岸ルートの4路線である。鹿児島湾東岸ルートの再測量は、1988年11月以来8年ぶりの測量であった (江頭, 1989, 1995)。総延長約92 kmの水準路線の測量作業は、名古屋大学理学部、元信州大学理学部、九州大学理学部および京都大学防災研究所から参加した13名によって3測量班を構成し、それぞれの路線を分担して実施した。使用した測量器材は、2台のWild自動水準儀NAK2 (Ser. No. 541458, Ser. No. 541482)、2台の外付け10 mm GPM3マイクロメーター (Ser. No. 71618, Ser. No. 71630)、2組のインバール水準標尺 GPLE3 (6440A, Bおよび6455 A, B)、Wildデジタル水準儀NA3003 (名古屋大学理学部)、1組のインバール・バーコード水準標尺GPCL3 (京都大学理学部) である。測量の補助器材としては、温度計、5 kgの鉄製の標尺台、コンクリート釘を装着した竹の標尺支持棒、マーキングチョークおよび中間点マーカー等を使用した。

測量開始前には、京都大学桜島火山観測所構内において、セオドライトを用いてインバール水準標尺

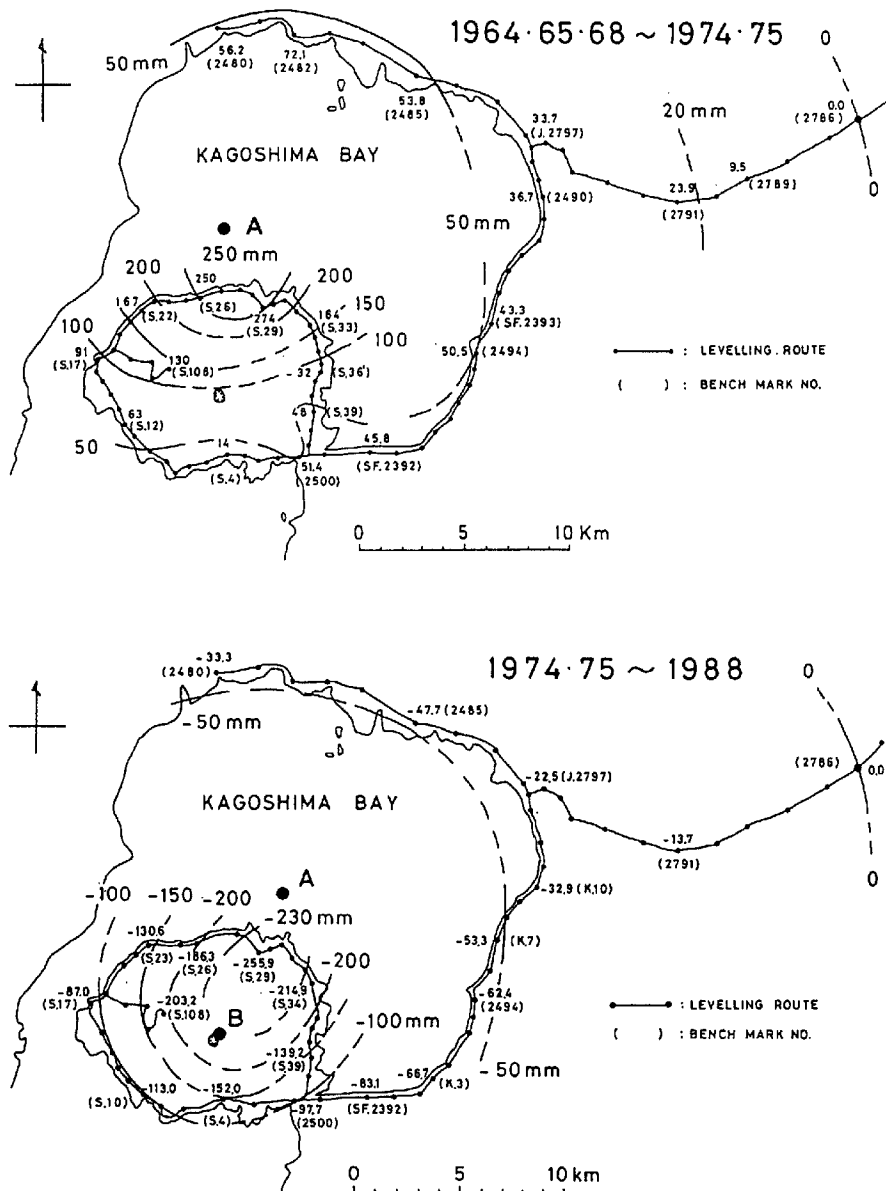


Fig. 2 Distribution of vertical displacements referred to BM.2786 during the period from 1964·65·68 to 1974·75 (upper) and during the period from 1974·75 to 1988 (lower).

の直立性を検査し、水準儀の視線と水平線との差を前視と後視の距離差が15 mの場合に0.2 mm以下に調整した。測量方法は各水準点間 (L km) の往復測量である。その測量誤差は1等水準測量の許容誤差である  $2.5\sqrt{L}$  mm以内であった。4路線の1 km当りの平均自乗誤差は  $\pm 0.26 \sim 0.42$  mm/kmの範囲内であった。桜島一周37 km (S km) の水準環閉塞誤差は、時計回りに +3.3 mm (許容誤差:  $2.0\sqrt{S}$  mm = 12.1mm) であり、高精度の一等水準測量といえよう。測量開始前に水準標尺と水準儀の検定を確実に行ったことがその理由である。

## 2-2. 水準測量結果、上下変動量とその分布の特徴

桜島西岸のBM. S. 17 (袴腰検潮室) を不動点とし、前回 (1991年12月)、前回以降 (1995年8月と1996年3月) および今回 (1996年10月) の桜島一周道路と島内西部の引ノ平・赤水登山ルート沿いの各水準点の比高値を比較した。Fig. 3に、その結果求められた各期間内の路線沿いの水準点の上下変動量を示した。同図には比較のために、1988年11月から1991年12月までの桜島一周道路と登山ルート沿いの上下変動量も併せて示した。桜島北東部から内部にかけての地盤は、活発な噴火活動にともない1974年12月以降継続して沈降していた。しかし、1991年12月以降逆転して隆起に

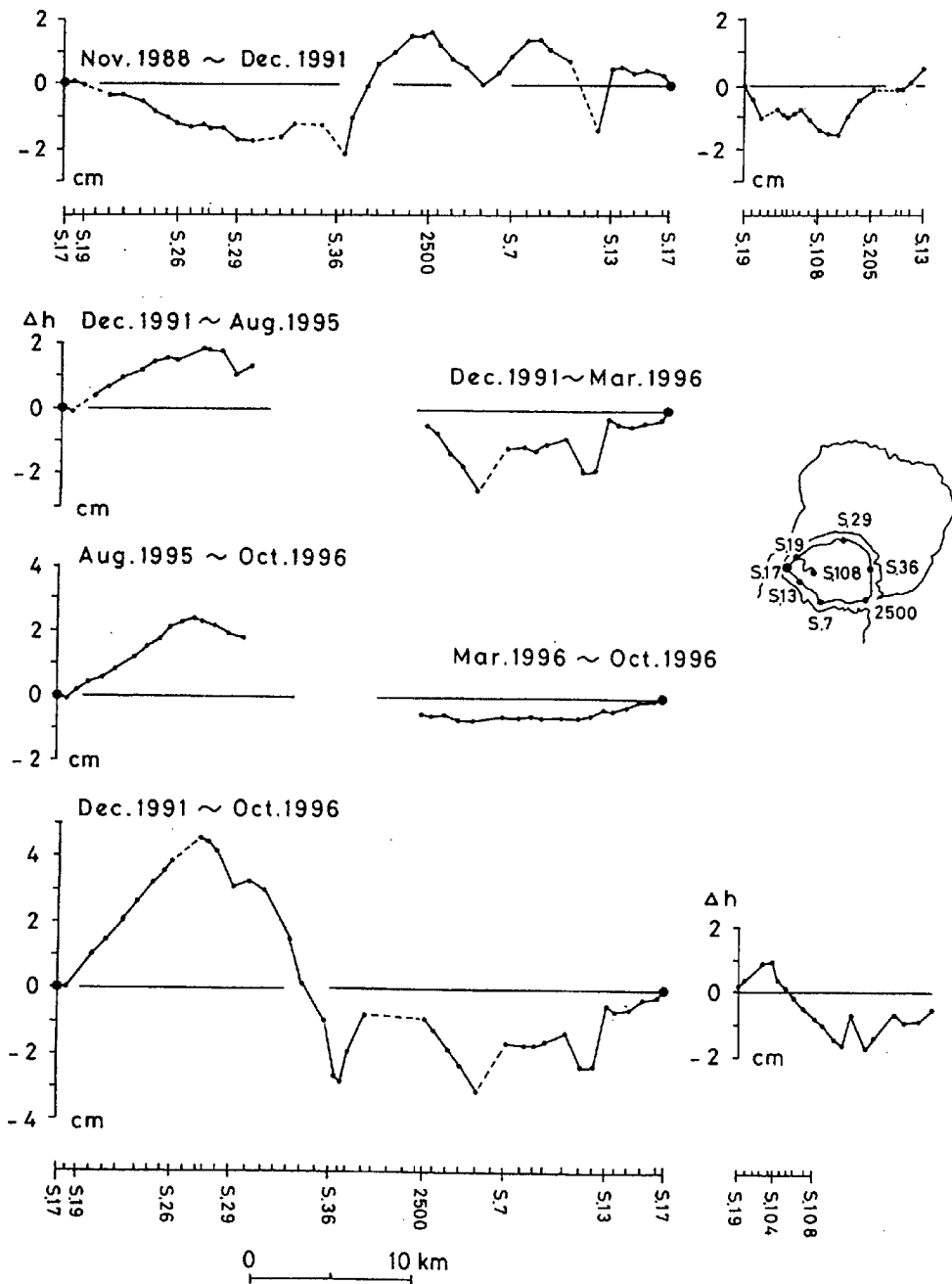


Fig. 3 Vertical displacements of bench marks around Sakurajima and along the western slope referred to B.M.S.17.

転じたことが今回の測量によって確認された。過去5年間における最大の隆起量は、桜島北部のBM. S. 27(西白浜)で測定された44.8 mmであった。なお、BM. S. 36(東部, 黒神)およびBM. S. 4(南部, 有村), BM. S. 12(南西部, 赤水礫原)付近で毎回認められる局地的な地盤沈降の原因は、それぞれ東部昭和溶岩流, 南部昭和溶岩流および野尻川土石流堆積物を除去して積み上げた人工的な堆積丘の荷重による地盤の圧密沈下であると考えられる。

Fig. 4は1988年11月から1991年12月までの上下変動

量の分布図である。桜島北東部から内部にかけては、1974年12月以降継続して沈降してきたが、同図には同様の沈降が認められる。Fig. 5は1991年12月から1996年10月までの上下変動量の分布図である。桜島北方約4 kmの始良カルデラ中央部に、隆起の中心のあることが推定される。始良カルデラ周辺の地盤は、この期間内に沈降から隆起に転じたものとみられる。カルデラ北東部のBM. J. 2797(亀割峠)からBM. 2500(桜島に至る鹿児島湾東岸ルート)の測量は、1988年以来8年ぶりの再測量であった。Fig. 6は鹿児島湾西岸ルート

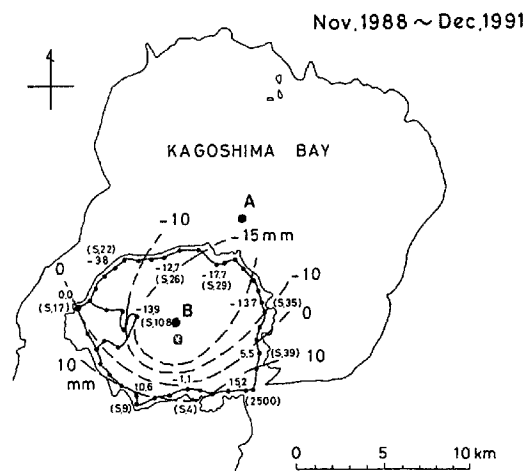


Fig. 4 Distributions of vertical displacements during the period from November 1988 to December 1991.

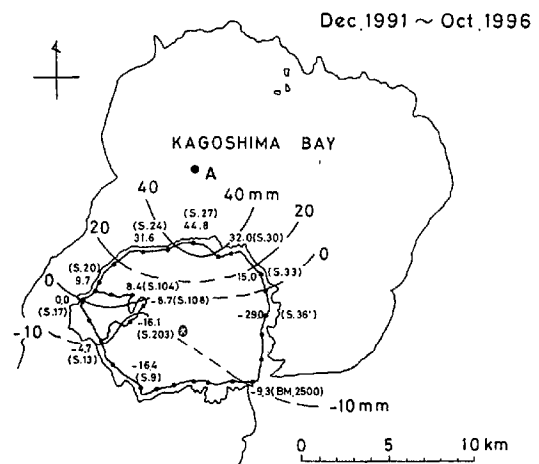


Fig. 5 Distributions of vertical displacements during the period from December 1991 to October 1996.

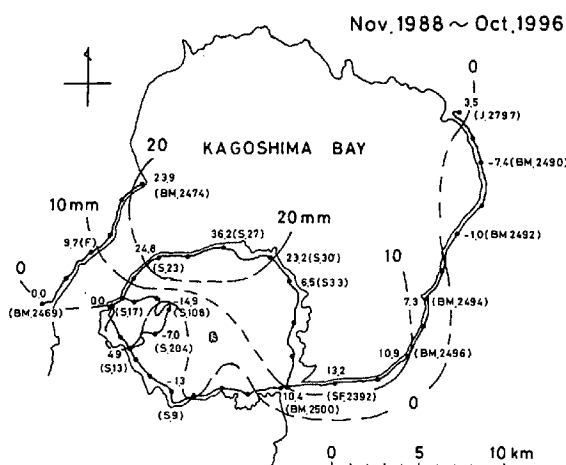


Fig. 6 Distributions of vertical displacements during the period from November 1988 to October 1996.

の変動量も含めた1988年11月から1996年10月までの上下変動量の分布図である。始良カルデラ内部の隆起は、カルデラ西縁のBM. 2469 (鹿児島市山下町) からBM. 2474 (大崎ノ鼻) に至る西岸ルートでも確認された。

Table 1, Table 2およびTable 3に、各測量時期の各水準点の比高を示した。

### 3. 解析

#### 3-1. 弾性変形モデルによる解析

Mogi (1958) は、活火山周辺の上下変動量とその分に弾性論を適用して説明した。ここでは、茂木の球

状圧力源モデルを用いて桜島と始良カルデラ周辺の上下変動量とその分布を解析する。

地殻を半無限弾性体と仮定すると、地下にある半径  $a$  の球状圧力源内部の静水圧変化  $\Delta P$  による地表面の上下変動量  $U_z$  は次式で表される。

$$U_z = \frac{\lambda + \mu}{2\mu(\lambda + \mu)} \cdot \frac{a^3 \Delta P \cdot D}{(D^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  と  $\mu$  は Lamé の定数、 $D$  は球状圧力源の深さ、 $r$  は圧力源直上からの水平距離である。

(1)式で  $r=0$  とおくと、圧力源直上の上下変動量  $U_{z0}$  は、

$$U_{z0} = \frac{\lambda + \mu}{2\mu(\lambda + \mu)} \cdot \frac{a^3 \Delta P}{(1 - \nu) a^3 \Delta P} = \frac{G}{D^2} \cdot \frac{D^3}{D^2} \quad (2)$$

ここで、 $G (= \mu)$  は剛性率、 $\nu$  は Poisson 比である。

(2)式を用いると(1)式は、次式で表わされる。

$$U_z = U_{z0} \cdot \frac{D^3}{(D^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$= U_{z0} \cdot f(D, r)$$

$$f(D, r) = \frac{D^3}{(D^2 + r^2)^{3/2}}$$

である。

上下変動量  $U_z$  による地表面の変形容積  $\Delta V$  は、次式で表わされる。

Table 1 Relative heights of bench marks around Sakurajima referred to BM.S.17 at the western coast of Sakurajima. Asterisk shows replaced bench mark.

Bench Mark No.	Nov. 1988	Dec. 1991	Aug. 1995	Mar. 1996	Oct. 1996
	m	m	m	m	m
S.17	00.0000	(00.0045)	00.0000	00.0000	00.0000
S.18	00.6996	00.7039	00.7041		00.7032
S.19	02.9327	02.9363	04.0257*		04.0279
S.20	01.7211	01.8678*	01.8730		01.8775
S.21	01.8832	01.8840	01.8921		01.8977
S.22	01.0776	01.0783	01.0893		01.0981
S.23	02.0551	02.0540	02.0676		02.0799
S.24	03.5817*	03.5772	03.5934		03.6088
S.25	06.0753	06.0693	06.0871		06.1047
S.26	01.6097	01.6015	01.6180		01.6396
S.26'	01.7614	01.7522	01.7837*		01.8066
S.27	01.8827	01.8741	01.8949		01.9189
S.28	11.8882	11.8785	11.8987		11.9220
S.28'	62.1664	62.1567	62.1755		62.1976
S.29	82.3637	82.3505	82.3610		82.4796*
S.30	77.7678*	77.7545	77.7681		77.7865
S.31	30.5666	28.4508*			28.4804
S.32	10.6132	10.6006			11.0537*
S.33	35.8946	35.8861			35.9011
S.34	19.7633	19.0285*			19.0294
S.35	43.7487	43.7395			43.5418*
S.36	26.1682	27.1424*			27.1143
S.36'	48.6227*	48.6046			48.5756
S.37	33.5417*	33.5347			33.5149
S.38	72.6370	72.6401			72.6313
S.39	54.6475	54.6575			54.7829*
S.40	35.6905	35.7034			37.1372*
S.41	43.0744	43.0926			42.3667*
S.42	22.2043	22.2226			22.3964*
BM.2500	21.2762	21.2959		21.2922	21.2866
S.1	40.5691	40.5847		40.5782	40.5719
S.2	47.8644	47.8759		47.8630	47.8571
S.3	54.0390	54.0480		54.0318	54.0248
S.4	28.9804	28.9838		28.9599	28.3832*
S.6	22.2797	22.2878		23.4367*	23.4307
S.7	32.7875	32.8006		32.7898	32.7837
S.7'	51.2868	51.3051		51.2944	51.2878
S.8	65.3253	65.3436		65.3317	65.3261
S.9	44.2313	44.2464		44.2364	44.2300
S.10	37.4018	37.4134		37.4060	37.3999
S.11	13.0365	15.7620*		15.7441	15.7381
S.12	18.6297	18.6203		18.6021	18.5969
S.13	08.2835	08.2931		08.2920	08.2884

Bench Mark No.	Nov. 1988	Dec. 1991	Aug. 1995	Mar. 1996	Oct. 1996
	m	m		m	m
S.13-1	30.0190	30.0292		30.0256	30.0219
S.14-1	34.3171	34.3253		34.3211	34.3190
S.15-1	18.3730	18.3818		18.3790	18.3784
S.16	02.8078	02.8155		02.8133	02.8128
Closed error	1.5 mm	2.6 mm			3.3 mm
S.D.(± mm / km)	±0.50	±0.38	±0.40	±0.32	±0.42

Table 2 Relative heights of bench marks at the western slope of Sakurajima and along the eastern rim of the Aira caldera referred to BM.S.17 at the western coast of Sakurajima. Asterisk shows replaced bench mark.

BM. No.	Nov. 1988	Dec. 1991	Oct. 1996	BM. No.	Oct. 1988	Oct. 1996
	m	m	m		m	m
S.17	00.0000	00.0000	00.0000	BM.2500	21.2762	21.2866
S.101	27.9609	27.9609	27.9637	S.42	22.2043	22.3964*
S.102	57.8527	57.8470	57.7800*	K.01	08.2071	08.2184
S.103	92.0863	92.0358*	92.0438	BM.2499	09.1932	-
S.103 <sup>7</sup>	145.8434	145.8401	144.2747*	SF.2392	02.8138	02.8273
S.104	182.7233	182.7187	182.7271	BM.2498	02.5992	02.6083
S.105	214.3459	214.3406	214.3436	K.02	03.3964	03.4103
S.105 <sup>7</sup>	250.8300	250.8256	252.0172*	BM.2497	03.9231	03.9284
S.106	281.2321	281.2292	281.2270	K.03	06.2273	06.5320*
S.107	334.6353	334.6286	334.6235	BM.2496	06.1932	06.2044
S.108	384.4034	384.5531*	384.5444	K.04	04.1261	04.1333
BM.OBS	405.3077	405.2992	405.2928	BM.2495	01.6788	02.2835*
S.201	344.0685	344.0580	344.0480	K.05	04.6806	04.6872
S.202	295.0446	295.0340	295.0192	BM.2494	02.6542	02.6618
S.203	260.9759	260.9710	256.5005*	K.06	-	06.3701
S.204	221.2409	221.2407	218.0175*	SF.2393	-	06.2713
S.205	189.3657	189.3683	189.1707*	BM.2493	03.0744	03.0787
S.206	161.2552	163.9176*	163.9043	K.07	02.7431	-
S.207	115.7743*	115.7772	115.7708	K.08	04.0003	04.3014*
S.208	81.4355	81.4386	81.4293	BM.2492	06.0751	06.0744
S.209	46.5531	46.5579	46.5493	K.09	04.0799	04.0764
Closed error	2.5 mm	6.1 mm	8.4 mm	BM.2491	03.8617	03.8596
S.D.	±0.50	±0.38	±0.26	K.10	01.1308	-
(± km / mm)				K.11	01.1898	01.1813
				BM.2490	01.8276	01.8205
				K.12	00.7214	00.7045
				BM.2489	00.3800	00.3723
				K.13	17.6117	18.2796*
				K.14	67.2340	67.2375
				BM.2488	56.3872	56.3901
				J.2797	86.1199	86.1229
				S.D.	±0.60	±0.36
				(± km / mm)		

Table 3 Relative heights of bench marks along the western rim of the Aira caldera referred to BM.2469 in Kagoshima city. Asterisk shows replaced bench mark.

Bench Mark No.	Dec. 1985 SVO	Sep. 1987 GSI	Nov. 1988 SVO	May. 1995 SVO	Oct. 1996 SVO
	m	m	m	m	m
BM.2469	00.0000	00.0000	00.0000	00.0000	00.0000
BM. C	- 00.9218	-	- 00.9265	- 00.6269*	- 00.6251
BM. D	00.2945*	00.2917	-	00.6649*	00.6681
BM.2470	04.6985	04.6922	04.6917	04.6873	04.6905
BM. E	- 00.0304	- 00.0374	- 00.0380	- 00.0397	- 00.0329
BM.2471	-	06.8369*	06.8355	-	-
BM. F	08.1355*	08.1268	08.1259	08.1253	08.1356
BM. G	06.1202*	06.1078	06.1071	06.1018	06.1150
BM.2472	06.4843	06.4686	06.4657	-	-
BM.Mifune	-	-	-	06.5634*	06.5790
BM. H	07.3449	07.3282	07.3241	07.3081	07.3247
BM.2473	02.6085	02.5944	02.5920	02.5872	02.6062
BM. I	04.7250	04.7122	04.7088	04.7079	04.7284
BM.2474	05.3603	05.3466	05.3414	05.3403	05.3631
BM. J	07.8016	07.7886	07.7834	07.7846	07.8072
S.D. (± mm / km)	±0.71		±0.62	±1.27	±0.29

$$\Delta V = \int_0^{\infty} 2\pi r \cdot U_z \cdot dr$$

$$= \frac{(1-\nu) a^3 \Delta P}{G D^2} \cdot 2\pi D^2$$

$$= U_{z0} \cdot 2\pi D^2 \quad (4)$$

球状圧力源内の静水圧変化 $\Delta P$ による圧力源の半径の変化分 $\Delta a$ は、萩原 (1977) によると、

$$\Delta a = a \Delta P / 4G$$

静水圧変化のない初期状態の圧力源の容積 $V_0$ は、

$$V_0 = (4/3) \cdot \pi a^3$$

静水圧変化が加わった状態の圧力源の容積 $V_a$ は、

$$V_a = (4/3) \cdot \pi (a + \Delta a)^3$$

$$= (4/3) \cdot \pi a^3 (1 + 3\Delta a/a + \dots)$$

従って圧力源の変形容積 $\Delta V_F$ は、次式(5)によって計算できる (Delaney and McTigue, 1994)。

$$\Delta V_F = V_a - V_0$$

$$= \pi a^3 \Delta P / G$$

$$= \pi \cdot U_{z0} \cdot D^2 / (1-\nu) \quad (5)$$

$$= \Delta V / 2 (1-\nu) \quad (6)$$

始良カルデラ地下の物質の Poisson 比( $\nu$ )を 0.25 とすれば、

$$\Delta V_F = 1.33 \cdot \pi \cdot U_{z0} \cdot D^2 \quad (7)$$

### 3-2. 最小自乗法による圧力源モデルの計算

水準測量によって測定される各水準点の上下変動量は、不動点とした水準点を基準にした相対的上下変動量である。基準にした水準点の変動量を $U_{ref}$ とし、BM.  $i$ の相対的上下変動量を $\Delta h_i$ とすれば、

$$U_z = \Delta h_i + U_{ref}$$

したがって、

$$\Delta h_i = U_{z0} \cdot f(D, r) - U_{ref} \quad (8)$$

となる。 $U_{z0}$ と $U_{ref}$ は、未知数である。圧力源の位置( $x_p, y_p, D$ )を繰り返し変化させて、 $\Delta h_i$ と $f(D, r)$ との間の相関係数( $Co$ )が最良となる圧力源の位置と深さを最小自乗法で求めた。それと同時に $U_{z0}$ と $U_{ref}$ も決定される。このような方法で計算した圧力源の諸要素をTable 4に示した。

## 4. 解析結果と議論

### 4-1. 圧力源の諸要素

1988年11月～1991年12月と、1991年12月～1996年10月の圧力源の諸要素を比較してTable 4に示した。前者は、始良カルデラ中央部地下(桜島北東沖)の主



Table 4. Parameters of the pressure source A and B during each survey intervals. Pressure source A: Pressure source beneath the center of the Aira caldera. Pressure source B: Pressure source beneath the center of Sakurajima. The origin of the X,Y co-ordinates is at the center of Minami-dake active crater.  $\sigma$  mm is the standard deviation of the residual  $U_z - (\Delta h + U_{ref})$ .

Leveling survey intervals	Nov.1988 ~ Dec.1991	Dec.1991 ~ Oct.1996
* Position of the pressure source A(X,Y), B(X,Y) Depth (km)	A: 3.7 km, 6.5 km B: - 0.1 km, 1.0 km A: 9.0 km, B: 4.0 km	A: 0.4 km, 9.0 km B: can not found A: 9.5 km
* Reference bench mark	BM.S.17	BM.S.17
* Uref (mm)	- 12.8 mm	+ 37.5 mm
* Uzo (mm)	A: - 34.6 mm, B: - 35.1mm	A: + 102.7 mm
* Correlation coefficient (Co)	A: - 0.8458, B: - 0.6875	A: + 0.9921
* Standard deviation ( $\sigma$ mm)	4.5 mm	2.3 mm
* Deformation volume at the pressure source ( $\Delta V_p$ )	- $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$	+ $3.9 \times 10^7 \text{ m}^3$
* Volume of magma discharge in DRE. ( $\Delta T_p$ )	$1.56 \times 10^7 \text{ m}^3$	$1.14 \times 10^7 \text{ m}^3$

圧力源 A (深さ9.0 km) と桜島中央部地下に副圧力源 B (深さ4.0 km) を持つ2圧力源モデル (江頭・中村, 1986) による解析結果である。主と副の圧力源直上の上下変動量 ( $U_{zo}$ ) は -34.6 mm と -35.1 mm であり, 2圧力源とも減圧状態であった。これは, Fig. 4 に示したように, 桜島北東沖から桜島中央部にかけて測定された15 mm以上の沈降の原因である。

後者は, 始良カルデラ中央部地下 (桜島北方沖) の主圧力源 A (深さ9.5 km) のみの1圧力源モデルである。この場合, 桜島中央部地下の副圧力源 Bは見いだせなかった。主圧力源直上の上下変動量 ( $U_{zo}$ ) は +102.7 mm であり, 主圧力源が増圧状態にあることがわかる。Fig. 7に同期間内の測量値にもっとも適合する1圧力源モデルの理論値を実線で図示した。1991年12月~1996年10月の主圧力源の位置と上下変動の分布は (Fig. 5)は, Fig. 2の上部に示した1964・65・68年~1974・75年のそれによく近似している。桜島北部の隆起速度は, 両期間とも約25 mm/yearである。

#### 4-2. マグマ溜りの変形容積と噴出物量

マグマ溜り (圧力源) の容積変動量 ( $\Delta V_p$ ) は, (5)式により計算できる。1988年11月~1991年12月の容積減少量は $1,400 \text{ 万 m}^3$ と推定される。鹿児島県が実施している桜島から噴出した降下火山灰の観測資料に基づく降下火砕堆積物総量の推定方法 (Eto, 1988) によると, 上記期間中の降下火砕堆積物量を密度 $2.5 \text{ gr/cm}^3$ のDense Rock Equivalent (DRE: マグマ相当の

岩石) に換算すると,  $1,560 \text{ 万 m}^3$ のマグマ放出量となる。したがって, 上記の噴火活動最盛期においては, マグマ溜りの容積減少量とほぼ同量のマグマが噴火活動によって地表に放出されたものと考えられる。

1991年12月~1996年10月のマグマ溜りの容積増加量 (マグマの貯溜量) は $3,900 \text{ 万 m}^3$ と推定される。同期間中のマグマの放出量 (DRE) は降下火山灰量に基づき約 $1,140 \text{ 万 m}^3$ と推定されるので, 両者を合計して約 $5,000 \text{ 万 m}^3$ のマグマがマグマ溜りに供給されたものとみられる。年間約 $1,000 \text{ 万 m}^3$ のマグマの供給率となる。このマグマ供給率は, Ishihara (1981)の指摘した噴火活動静穏期のマグマ供給率約 $1,000 \text{ 万 m}^3/\text{year}$ に等しい。1991年12月から1996年10月迄の間の何時か, 噴出物量の変化からみておそらく1993年頃から始良カルデラ地下のマグマ溜りにマグマの供給が再開して, 桜島北部の隆起が再開したものと考えられる。

#### 4-3. 再隆起について

BM. S. 17 (桜島西岸) を基準にして, 桜島北部のBM. S. 29 (仁田河原) の1957年以降の比高変化, 1955年に始まった桜島南岳火口の年間の爆発的噴火回数, 南岳火口から放出された降下火山灰の推定年間総量をFig. 8に示した。桜島および始良カルデラ周辺の噴火活動に伴う地盤変動の過程は, カルデラ中央部地下約10 kmに推定される主圧力源 A (マグマ溜り) と, 桜島中

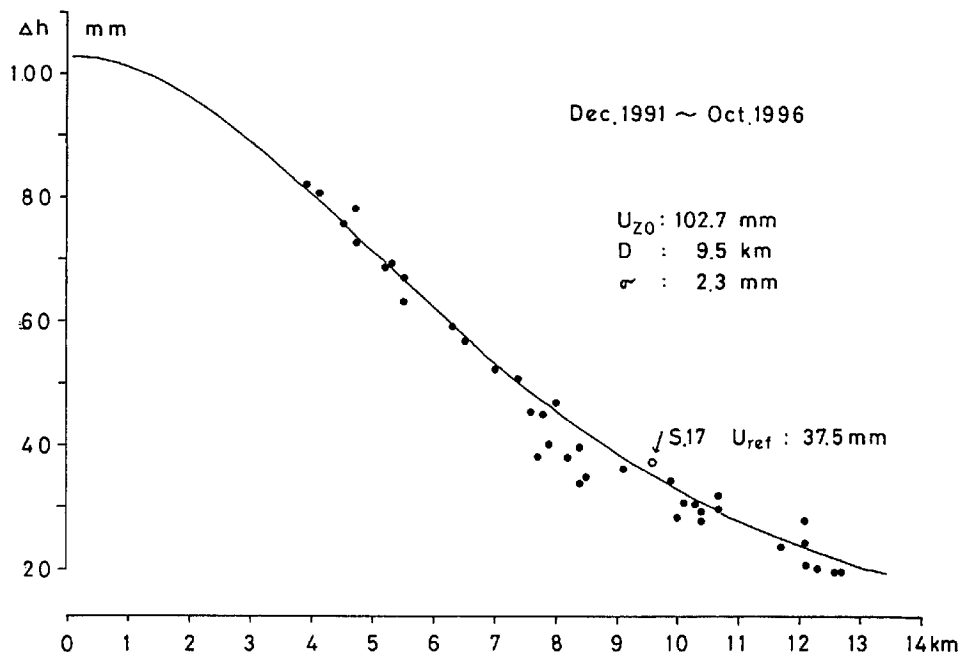


Fig. 7 Comparison between measured vertical displacements (solid circles) and theoretical vertical displacements (solid line) vs. radial distances from the pressure source A.

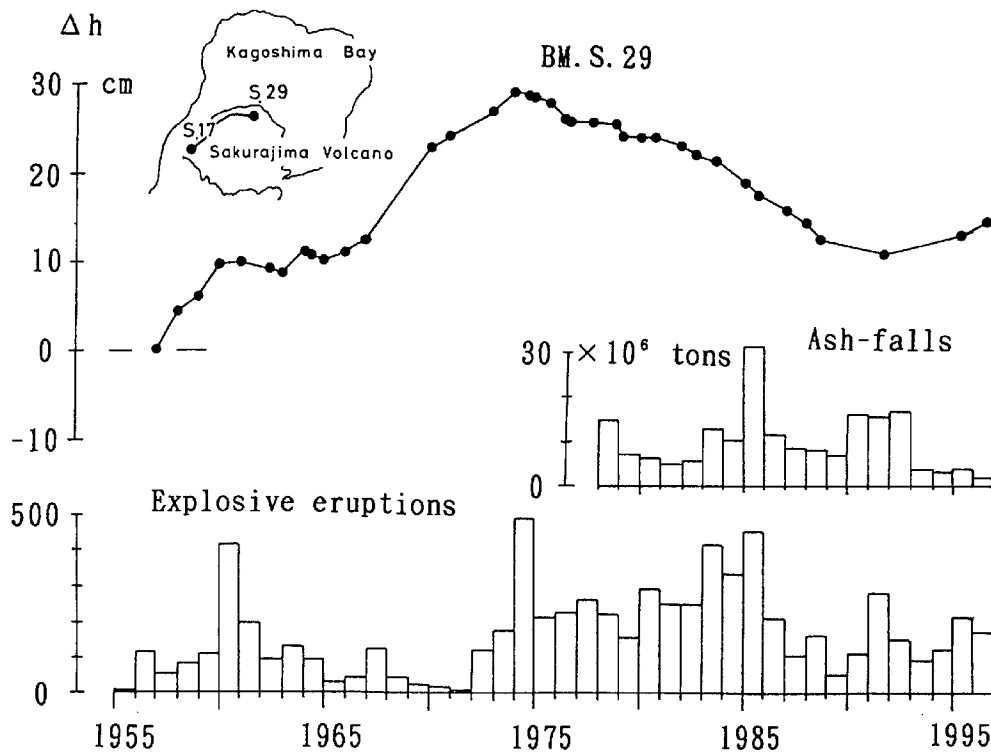


Fig. 8 Relations among secular changes of relative heights of BM.S.29, yearly weights of estimated volcanic ash-fall deposits and yearly frequency of explosive eruptions at the active crater of Sakurajima.

中央部地下約3 kmに推定される副圧力源 B 内のマグマの貯溜と放出に伴う現象として説明されている (SV0, 1988; 江頭, 1989)。1967年頃から噴火活動が静穏化すると、主圧力源内の増圧 (マグマの貯溜) により桜島の北側が隆起を始めている。1973・74年以降の活発な噴火活動によってマグマの放出量が増加すると、主圧力源と副圧力源内の減圧によって桜島の北東部から内部にかけての地盤の沈降が継続していた。

1995年5月～8月および1996年10月の水準測量によって測定された桜島北側の再隆起現象は、1993年頃からの噴火活動の静穏化に伴い、主圧力源内において再びマグマの貯溜が始まったことを示す現象と解釈される。桜島北部と南部における最近の上下変動速度が、それぞれ+25 mm/yearと-10 mm/yearであることを考慮すると、最近の桜島周辺の上下変動は1965年～1971年頃の上下変動に類似している (江頭・石原, 1977)。

## 6. 結論

- (1) 桜島北部付近の地盤は、1974年12月以降の活発な噴火活動にともない継続して沈降してきた。しかし、1991年12月以降に逆転して、隆起に転じたことが今回の測量によって確認された。1995年8月から1996年10月迄の、桜島北部の隆起速度は約25 mm/yearであり、桜島南部の沈降速度は約10 mm/yearである。この上下変動速度は、1965年～1971年頃に測定された桜島北部の隆起速度に類似している。
- (2) 始良カルデラ内部の隆起は、カルデラ西縁のBM. 2469 (鹿児島市山下町) からBM. 2474 (大崎ノ鼻) に至る水準路線でも認められた。
- (3) 茂木の弾性モデルに基づき、1991年12月から1996年10月迄の隆起量の地理的分布から圧力源の位置を求めると、桜島北方約4 kmの始良カルデラ中央部地下約9.5 kmに増圧力源のあることが推定される。
- (4) 1995年と1996年の水準測量によって測定された桜島北側の再隆起現象は、1993年頃からの噴出物量 (マグマの放出量) の減少化にともない、始良カルデラ中央部地下の主圧力源内 (Main magma reservoir) において、再びマグマの貯溜が始まったことを示す現象と解釈される。

謝辞： 鹿児島県総務部消防防災課および三船園特別養護老人ホームには、測量器材の保管と駐車について御協力を頂いた。京都大学理学部附属火山研究施設からは、インバール・バーコード水準標尺をお借りした。京都大学防災研究所附属火山活動研究セ

ンターの石原和弘教授および各位には、水準測量中に御助力を頂き、変動について討論していただいた。あわせて、心より厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- 石原和弘・江頭庸夫(1978)：桜島火山近傍の垂直地盤変動と山頂噴火活動の関係について、京都大学防災研究所年報, 21, B-1, 153-162.
- 江頭庸夫(1967)：火山性地殻変動 (Ⅲ) 始良カルデラ周辺の地殻変動と桜島の火山活動, 火山第2集, 12-2, 80-88.
- 江頭庸夫(1971)：火山性地殻変動 (Ⅴ) 桜島火山における地殻変動観測, 京都大学防災研究所年報, 14-A, 97-106.
- 江頭庸夫・石原和弘(1977)：桜島火山周辺の地盤変動と山頂噴火活動, 第2回桜島火山の集中総合観測 (昭和51年11月～12月), 21-27.
- 江頭庸夫・中村貞美(1986)：桜島火山周辺における地盤変動 -1974年～1982年-, 第5回桜島火山の集中総合観測 (昭和57年10月～12月), 11-21.
- 江頭庸夫(1989)：噴火活動に伴う桜島火山および始良カルデラ周辺の地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 32, B1, 29-39.
- 江頭庸夫(1995)：桜島火山周辺における地盤変動 -1988年～1991・92年-, 第8回桜島火山の集中総合観測 (平成3年10月～平成4年3月), 15-21.
- 萩原幸男 (1977)：複合茂木モデルとしての松代地殻隆起, 測地学会誌, 23-1, 25-35.
- Delaney, P.T. and McTigue, D.F.(1994): Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea Volcano, Bull. Volcanolo., 56, 417-424.
- Eto, T. (1988): An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, 448-451.
- Ishihara, K. (1981): A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic material ejected, Abstract, 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism -, 143.
- Mogi, K.(1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, 36, 99-134.

Sakurajima Volcanological Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (1988): Ground deformation at Sakurajima and around Aira Caldera associated with the volcanic activity, Proceedings, Kagoshima International

Conference on Volcanoes 1988, 292-295.  
Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the Volcano Sakurajima (part 1), Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 48.

**Re-upheaval of the ground surface at the Aira caldera  
— December 1991 ~ October 1996 —**

Tsuneco ETO, Tetsuro TAKAYAMA, Keigo YAMAMOTO, Muhamad HENDRASTO \*,  
Daisuke MIKI, Tadaomi SONODA, Takeshi MATSUSHIMA \*\*, Kazunari UCHIDA \*\*,  
Hiroshi YAKIWARA \*\*\*, WAN Yenbin \*\*\*, Fumiaki KIMATA \*\*\*\*, Rikio MIYAZIMA \*\*\*\*,  
and Kazunori KOBAYASHI \*\*\*\*\*

\* Volcanological Survey of Indonesia

\*\* Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Faculty of Science, Kyushu University

\*\*\* Graduate School of Science, Kyushu University

\*\*\*\* Research Center for Seismology and Volcanology, School of Science, Nagoya University

\*\*\*\*\* Graduate School of Science, Nagoya University

**Synopsis**

To study vertical deformations associated with the eruptive activity, revised leveling surveys were conducted on May, August 1995 and October 1996 at Sakurajima and a part of leveling route around the Aira caldera. Comparing relative heights of each bench marks in 1991 and 1996, ground uplifts of about 4 cm were measured at the northern part of Sakurajima. Since 1993, eruptive activity has gradually declined and the Aira caldera resumed upheaval movements. This vertical displacement suggests that magma storage begins again at the magma reservoir beneath the center of the Aira caldera.

**Keywords:** Aira caldera; vertical displacement; uplift; magma; supply; storage