# 遠地地震により遠隔誘発された硫黄島火山の微小地震活動

# 鵜川 元 雄\* 藤田 英 輔\* 熊 谷 貞 治\*\*

## Remote Triggering of Microearthquakes at the Iwo-jima Volcano

Motoo UKAWA  $^*$  , Eisuke FUJITA  $^*$  and Teiji KUMAGAI  $^{**}$ 

## Abstract

Continuous seismic observations at Iwo-jima, an active volcanic island belonging to the Izu-Ogasawara island arc, have detected remote triggering of microearthquakes in and around the island. The remote triggering at Iwo-jima is a phenomenon of an abrupt increase of microearthquake activity at the time of a passage of seismic waves from a distant large earthquake. We examined seismograms of a total of 21 earthquakes with magnitude larger than 7 and within an epicenter distance of 3000 km from Iwo-jima. Remote triggering phenomena were found at four events during the period from 1980 to 1993: the 1983 west off Tohoku earthquake, the 1984 southeast off Kyushu earthquake. The largest epicenter distance among them was 2009 km. The initial times of triggering coincide with the theoretical arrival times of surface waves and successive occurrences of earthquakes continued for 6 to 15 min, suggesting that dynamic stress or strain caused the remote triggering phenomena at Iwo-jima. As a well-developed hydrothermal system is suggested in shallow depths beneath Iwo-jima, volcanic fluids presumably play an important role in remote triggering.

**Key words**: Iwo-jima volcano, remote triggering, microearthquakes キーワード: 硫黄島火山,遠隔誘発現象, 微小地震活動

## I.はじめに

硫黄島は東京から南に約 1250 km 離れた伊豆 小笠原弧に属する粗面安山岩(SiO<sub>2</sub> 58 ~ 61%) を産する火山島である。海底地形をみると,海底 面からの高さが2000 m以上の成層火山で,その山 頂部がカルデラ地形を形成し,カルデラ中央部か ら外輪南西にかけての部分が海面上にあることが わかる。島の長径は約8km,面積は23km<sup>2</sup>で, 硫黄島火山の中心に相当する島の中央部は平坦な 台地状を呈している。島内で最も標高の高い摺鉢 山(標高161m)は島の南西端に位置し,カルデ ラ外輪の側火山と考えられている(Kaizuka, 1992)。

硫黄島は大規模な地殻変動が継続していること で知られている(例えば, Newhall and Dzurisin,

<sup>\*</sup> 防災科学技術研究所

<sup>\*\*</sup> 地震予知総合研究振興会

<sup>\*</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

<sup>\*\*</sup> Association for the Development of Earthquake Prediction

1988; Kaizuka, 1992)。島の中央部の標高 110 mの地点で採取された珊瑚のC14年代が500 800 年であったことから,この間の隆起率は年間 150 200 mmと推定された(Kaizuka, 1992)。また 最近約 20 年間の水準測量でも,年間 10 cm 以上 の隆起沈降運動が観測されていて,変動速度が異 常に大きい地殻変動が現在も進行中であることが 実測されている(熊谷・高橋,1985;Ukawa et al.,1998)。硫黄島では大規模な地殻変動ととも に地熱活動も活発である。島内には地熱地帯が散 在し,噴気地域が多数ある。江原(1985)は熱映 像画像から放熱量を約 10<sup>8</sup> cal/s と推定している。 Newhall and Dzurisin(1988)は,長期的に高 い隆起率をもとに硫黄島をカルデラ内の再生火口 丘と考えた。

防災科学技術研究所では 1970 年代後半より硫 黄島で地震観測を実施してきた。硫黄島の地震モ ニター記録をもとに遠地地震の際の地震活動を調 査したところ,遠地地震の地震波到着に同期して, 硫黄島周辺の微小地震活動が活発化する現象がわ かった。この現象は,1992 年の Landers 地震直 後に米国西部の地熱地域を中心に地震活動が活発 化した「遠隔誘発現象(リモートトリガリング)」 (例えば Hill et al.,1993)と呼ばれるものと同様 の現象と考えられる。本論説では硫黄島の遠隔誘 発現象の特徴を紹介し,さらに硫黄島の微小地震 が遠地地震の表面波によって誘発されていること を示す。

#### II. 硫黄島の地震観測と調査方法

硫黄島では,防災科学技術研究所が3カ所(天山,眼鏡岩,摺鉢山観測点)で,また防衛庁が1 カ所(南方空観測点)で地震観測を実施している。 図1に硫黄島の地震観測点の配置を示す。防災科 学技術研究所では1999年から2001年にかけて, 地震計の3成分化やテレメータ伝送方式のディジ タル化等,地震観測システムの改修を行っている が,今回の研究ではそれ以前の観測装置により得 られたデータを用いた。

防災科学技術研究所の地震計は,1980年から 1982年にかけて設置された上下動成分地震計で,



図 1 硫黄島の地震観測点の位置. 南方空観測点は 1994 年に移設されるまでの位置を 示した.

Fig. 1 Map showing the locations of the seismic observation sites at Iwo-jima.

その固有周波数は3Hzである。防衛庁の地震計は 3成分 固有周波数1Hzである。これらの地震デー タは,硫黄島島内を無線テレメータで伝送され, 海上自衛隊硫黄島航空基地内の建物で記録されて いる。地震データは振幅によるトリガーによって, 記録紙とMTに保存される。また防災科学技術研 究所の1観測点の上下動成分と防衛庁による1観 測点の3成分については連続的にモニター記録さ れている。

今回の調査では,遠地地震と硫黄島島内の地震 活動の関連を調べるために,主にモニター用連続 記録を調査した。硫黄島での地震観測は,太陽電 池と無線テレメータに依存していることや自然環 境が厳しいため4カ所すべての観測点が稼働して いる時期は少ない。このため連続モニター記録を 行っている2観測点に障害がある期間もあるので, 連続モニター記録が存在しない期間については, トリガー記録紙を調べた。また誘発地震の時刻同 定にはトリガー地震記録も用いた。

硫黄島での遠地地震による地震誘発現象の有無 を調査するために,調査対象とする遠地地震をま ず選択した。調査対象とした地震は,表1に示す ように1980年から1993年までに発生した硫黄島 からの震央距離が3000km以内,マグニチュード 7以上の地震21個である。マグニチュードが最大

				-				
No.	Date	Time	Latitude ( N)	Longitude ( °E)	Depth ( km )	М	Distance ( km )	Region
1	1980/12/31	19:32	46.233	152.367	70	7.1	2,579	Kurile Is.
2	1981/01/19	03:17	38.600	142.967	0	7.0	1,543	E off Mid-Tohoku
3	1981/01/23	13:58	42.417	142.200	130	7.1	1,961	S Coast of Hokkaido
4	1982/03/21	11:32	42.067	142.600	40	7.1	1,924	S off Hokkaido
5	1982/07/04	10:20	27.800	137.233	560	7.0	527	S off Honshu
6	1982/07/23	23:23	36.183	141.950	30	7.0	1,268	E off Kanto
7	1982/09/06	10:47	29.383	140.967	180	7.0	511	Near Torishima
8	1983/05/26	11:59	40.355	139.077	14	7.7	1,743	W off N Tohoku
9	1983/06/21	15:25	41.260	139.002	6	7.1	1,843	W off N Tohoku
10	1984/01/01	18:03	33.618	136.842	388	7.3	1,073	S off Kinki
11	1984/03/06	11:17	29.338	139.205	452	7.9	547	Near Torishima
12	1984/08/07	04:06	32.380	132.155	33	7.1	1,228	SE off Kyushu
13	1987/01/14	20:03	42.533	142.932	119	7.0	1,978	Hidaka Mts. Region
14	1987/05/18	12:07	48.783	149.048	497	7.0	2,751	Southern Sea of Okhotsk
15	1989/11/02	03:25	39.855	143.057	0	7.1	1,682	Far E off Sanriku
16	1990/05/12	13:50	49.262	142.228	594	7.8	2,722	South Sakhalim
17	1990/07/16	16:26	15.675	121.257	36	7.7	2,321	Philippines, Luzon
18	1993/01/15	20:06	42.850	144.383	107	7.8	2,027	E off Hokkaido
19	1993/07/12	22:17	42.780	139.183	35	7.8	2,009	SE off Hokkaido
20	1993/08/08	17:34	12.971	144.744	61	8.0	1,363	Mariana Is.
21	1993/10/12	00:54	32.025	138.243	391	7.1	858	Far east Tokai

表 1 調査した遠地地震.

Table 1 List of earthquakes examined in this study.

No.17 と No.20 は USGS による震源,他は気象庁地震月報による.震央距離は硫黄島眼鏡岩観測点を基準とした.

の地震は 1993 年 8 月 8 日のマリアナ諸島の地震 (*M*<sub>8</sub>8.0)である。また選択した地震のうち 10 個 の地震は,震源が 100 km 以深の深発地震である。 硫黄島の地震活動が遠地地震に誘発されたか否

かを判定するためには,通常の活動レベルを知る 必要がある。硫黄島の地震活動には活動期と静穏 期が見られ,静穏期は1日数個以内であるが,活 動期には1日10~数十個以上の地震が群発的に発 生する。特に火山活動が活発化した1982年11月 の群発地震期には,1日1000回以上の地震発生が 記録された(熊谷,1985)。特に活発な群発地震 期を除くと,1日の平均地震発生数は熊谷(1985) による1976年から1985年には3~4回,また 1995年以降では1~2回である。

このような平均的な地震発生頻度を考慮し,対 象とする地震のP波が硫黄島に到着後1時間以内 に5個以上の地震が発生したものを,遠地地震に より誘発された現象と判定した。P波到着時刻は, J-B 走時を基準とした。なお,対象とした遠地地 震の発生時期が硫黄島の群発地震期に重なってい ないことを確認している。

# III. 硫黄島での遠地地震による 誘発地震活動の特徴

#### 1)誘発現象の見られた地震

連続モニター記録あるいはトリガー地震記録紙 にさかのぼって地震発生数を調査した結果,1980 年から1993年まで4個の地震に遠隔誘発現象が 確認された。遠隔誘発現象が見られた地震には表 1に丸印を付した。また図2に調査した地震の震 央を遠隔誘発現象の有無を区別して示した。遠隔 誘発現象の見られた地震のマグニチュード範囲は



図 2 今回調査の対象とした地震. 塗りつぶした記号により,遠隔誘発現象が見られた 地震を示した.

Fig. 2 Epicenter distribution of the earthquakes examined in this study. The events causing remote triggering at Iwo-jima are indicated with solid symbols.

7.1 から 8.0, 硫黄島のほぼ中央の観測点である眼 鏡岩観測点からの震央距離範囲は 1228 km から 2009 km である(表1参照)。

遠隔誘発現象の見られた地震は,1983年5月26 日日本海中部地震(No.8),1984年8月7日の九 州南東沖の地震(No.12),1993年7月12日の北 海道南西沖地震(No.19),1993年8月8日マリ アナの地震(No.20)である。このなかで最小の マグニチュードである九州南西沖の地震は,誘発 地震の見られた地震としては最も硫黄島から近い 地震であった。誘発現象の見られた4地震の地震 記象を図3(a)~(d)に示す。遠地地震の地震 波初動が到着して,暫くしてから地震活動が活発 化していることがわかる。

一方,100 km 以深の深発地震では,今回の判定 条件に当てはまる誘発現象は見られなかった。こ の中には比較的近距離で発生した深発大地震であ る震央距離452 km,マグニチュード7.8 の鳥島付 近の地震(No.11)が含まれている。またNo.15 の三陸はるか沖地震(M7.1)とNo.18 の釧路沖 地震(M7.8)は明瞭に同定できる地震の数が今回 の基準に満たないので遠隔誘発現象の見られた地 震には含めなかったが,非常に小さい地震が発生 しているようにも見え,遠隔誘発現象が発現した 可能性は残っている。

なお,今回調査した期間においては,硫黄島の 地震回数のみモニターされ,定常的な震源決定は なされていなかった。硫黄島で震源決定される地 震は,島中央から北部に集中する傾向がある(熊谷, 1985;防災科学技術研究所,2000)。この分布傾 向は島の南西側の地震観測点が1カ所しかないこ と(図1),島南西部で発生した地震の地震波は中 央部の観測点では減衰が大きく,検知できないこ とが多いことも影響しているので,地震は硫黄島 島内と周辺の広範囲で発生していると考えられる。 今回誘発が確認された連続的に発生する地震にお いても,トリガー記録を見ると島内3観測点での 初動到着時刻差に違いがあるので,活発化した地 震の震源は1カ所でない。

誘発された地震の規模は、震央距離が3km程度 と仮定すると、マグニチュードは-1~1程度と なる。振動継続時間も10秒程度の地震が大半で、 マグニチュードは大きくても1クラスの微小地震 である。

# 2)遠地地震と硫黄島の地震活動活発化の時間 的関係

活火山である硫黄島では,火山地域でしばしば 観測されるような地震の続発的な発生が時折見ら れる。そこで硫黄島の地震活動活発化が偶然,遠 地地震の発生と同期した可能性について,簡単に 評価する。

遠隔誘発現象の見られた4地震について,地震 の前後それぞれ1カ月の2カ月間について今回の



図 3 遠隔誘発現象が認められた地震の記象例.

- (a) 1983 年 5 月日本海中部地震 (M7.7)のコーダ波部分のトリガー記録による地震記象 . A と A', B と B' は記録 紙上でつながる .
- (b) 1984 年 8 月九州南東沖の地震(M7.1)の連続記録による地震記象 . A と A', B と B' は記録紙上でつながる . 矢印は誘発地震を示す .
- (c) 1993 年 7 月北海道南西沖地震(M7.8)の連続記録による地震記象.
- (d) 1993 年 8 月マリアナ諸島の地震(Ms8.0)の連続記録による地震記象(上)と上図の脇に太線で示した部分の トリガー地震記録(下).上図の矢印は P 波到着の約 20 分後から散発的に発生した微小地震を示す.[]で示 した区間には,連続的な震動が見られる.

Fig. 3 Examples of seismograms, in which remote triggering phenomenon is recognized.

- ( a ) Seismogram of coda waves of the W. off Tohoku earthquake (M7.7) of 1983 May. The seismogram is cut at the line A-B (A'-B').
- ( b ) Seismogram of the SE off Kyushu earthquake ( M7.1 ) of 1984 August. The seismogram is cut at the line A- B ( A'-B' ).
- ( c ) Seismogram of the SE off Hokkaido earthquake ( M7.8 ) of 1993 July.
- (d) Seismograms of the Mariana Island earthquake ( $M_{s}8.0$ ) of 1993 August. At top is a continuous monitor chart and at bottom is a triggering monitor chart of a portion indicated by thick lines on the top figure. The arrows in the top figure show microearthquakes that occurred several minutes after the initial successive occurrence of microearthquakes. The squared parentheses in the top figure indicate the interval of continuous seismic signals.



図 4 遠隔誘発現象の見られた地震の前後それぞれ1カ月の硫黄島での時間別地震数の分布. No.8とNo.12については地震発生の前後それぞれ1カ月間, No.19とNo.20については, No.19の発生前1カ月からNo.20の発生後,約1カ月を図示した.

Fig. 4 Distribution of hourly number of earthquakes at Iwo-jima. The plotted period is from one month before the event to one month after it for No. 8 and No.12. For No. 19 and No. 20, the plotted period is one month before No. 19 to about one month after No. 20.

評価基準とした1時間に5個以上の地震が発生した事象(ここでは続発地震事象と呼ぶ)の回数を 調べた。No.19とNo.20については時間的に近接して発生しているので,期間をNo.19の発生1 カ月前からNo.20の発生後約1カ月の90日間とし,2事象を同時に扱う。続発地震事象の回数は, 図4に示すように,No.8は4回,No.12は1回, No.19とNo.20では12回あった。

それぞれの続発地震事象がランダムに発生して いるとすると、遠地地震の発生と続発地震事象が 偶然重なる確率は、ほぼ特定の1時間に続発地震 事象の発生する確率となる。この確率は、No.8で は0.0027、No.12では0.0007となる。またNo. 19とNo.20では、12回の続発地震事象が2回の 遠地地震と偶然重なる確率を評価すると、 0.000029となる。このようにいずれの場合も偶然 に遠地地震と続発地震事象が重なる確率は極めて 低く,偶然ではないと結論できる。

遠隔誘発現象の見られた4地震について遠地地 震と遠隔誘発地震の時間的な関係を調べるため、 P 波到着後の硫黄島の地震発生時刻を時間軸上に 示した(図5)。No.12以外の3地震については, トリガー地震記録が保存されていたので,連続地 震記録とトリガー地震記録から地震発生時刻を読 み取った。No.8とNo.19では最初の誘発地震が 発生してから 10 分以内に微小地震活動は終了し ている。No.12 では最初の誘発地震から9分以内 に6個の微小地震が確認でき,さらに約2時間後 に1個地震が発生している(図3b)。No.20では 最初の誘発地震の発生後,15分間に23個の微小 地震が連続的に発生したことが確認できる(図5)。 その後数分間の微小地震が確認できない時間帯を 挟んで,25分間に数個の微小地震が散発的に発生 している (図 3d の上図に矢印で示す)。さらに引



図 5 誘発された地震の発生時刻と遠地地震の波動到着時刻の関係.



き続いて、数分間継続する小振動が確認できる(図 3dの上図鍵括弧で示す)。

No. 12 と No. 19 は連続モニター記録とトリ ガー記録から最初の誘発地震が計算走時による S 波到着の1~2分後に発生していることが明瞭で ある。No. 8 については連続モニター記録がない こと,また No. 20 については連続モニター記録上 で地震波動が重なっていて最初の地震の判読が困 難である。このためこれら2つの地震については モニター記録を基に誘発地震開始時刻を同定しな ければならないが,最初にトリガーされた地震は 上記の2 地震と同様に計算走時によるS 波到着時 刻の1~2分後である。

遠隔誘発現象を引き起こした遠地地震の震源時 と震央距離から,最初の地震が発生した時刻に到 達した波動の見かけ速度を求めると,図5に示す ように3.0~3.8 km/sの範囲にある。この波動の 速度は,表面波の速度とほぼ等しいので,硫黄島 の遠地地震による遠隔誘発現象は,S波ではなく, 表面波の到着後に始まっていることがわかる。

遠隔誘発現象の見られた4地震のなかでNo.20 ではその後も散発的な地震発生が見られ,また No.12では約2時間後に1地震が発生している。 しかし誘発地震の集中的発生の時間帯は,図5か らわかるように,最初の誘発地震後6分間から15 分間という比較的短時間である。すなわち大地震 の表面波の振動が継続している時間帯に誘発地震 の発生が特に集中している。連続モニター記録が ある3地震の地震記象を見ると,地震計の固有周 期が1Hzあるいは3Hzと短周期のため表面波の 振幅は小さいが,誘発された地震が表面波と考え られる長周期振動に重なって発生していることが わかる。

#### IV. 遠隔誘発現象の原因

遠隔誘発現象は,1992年6月28日に発生した CaliforniaのLanders地震に関連して観測された 周辺の火山地域での地震活動活発化で地震関係者



図 6 ノーマルモードの重ね合わせにより計算された遠地地震の硫黄島での最大上下動変位と遠隔誘 発現象の有無.

遠隔誘発現象が認められた地震を黒丸で表示.

Fig. 6 Diagram showing the maximum vertical displacement at Iwo-jima calculated by normal mode theory. The events causing the remote triggering phenomena are indicated by solid symbols.

の注目を集めるようになった(例えば Hill et al., 1993; Stark and Davis, 1996)。遠隔誘発現象 のメカニズムにはまだ定説がなく,いくつかの可 能性が提案されている段階であるが,地震による 静的な変位による応力変化の可能性は,地球潮汐 による応力変化より1桁以上小さい静的変位の地 震でも遠隔誘発現象が見られることから否定され ている(Hill et al., 1993)。

硫黄島の遠隔誘発現象は表面波の到着後に発現 し,活発な期間は最長でも15分間で終了している。 この期間はまだ表面波の振動が継続しているので, 動的な歪みが原因で発生していると結論できる。 ただし No. 20のマリアナ諸島の地震については, 表面波通過後にも散発的な地震発生が見られるこ とから,地震の発生する条件として表面波の動的 な歪みによる直接的な影響以外の要因が働いてい る可能性が示唆される。

遠隔誘発現象と地震の規模の関係を調べるため, 周期 30 秒以上のノーマルモードの重ね合わせに よる理論記象から,硫黄島での動的な上下動変 位の最大値を計算した。各地震のモーメントテン ソルは Dziewonski らの一連の研究(例えば, Dziewonski and Woodhouse, 1983)あるいは気 象庁により発表された断層解をもとにした。図6 に各地震の上下動成分の大きさと遠隔誘発現象の 有無を示した。最大上下動変位が1 cm 程度かそれ 以上の7地震の内 A 地震については明確な遠隔誘 発現象が見られたことがわかる。このことは動的 な変位あるいはそれによる動的な歪みが遠隔誘発 現象の主要因であることを支持している。動的な 変位が大きいにも関わらず,遠隔誘発現象が発現 しなかった事象(No. 15 や No. 18)では,硫黄島 の地殻の状態が地震を引き起こす状態から遠かっ たということも考えられる。

遠隔誘発現象の具体的なメカニズムとしては, S 波や Love 波による剪断応力の増加, Rayleigh 波による体積変化またそれによる地殻流体の間隙 圧上昇,地震波の振動によるマグマ溜まりや熱水 溜まり内での気泡の発生,断層面の接触状態の変 化等が検討されている。Landers 地震では遠隔誘 発現象が観測された地域の大半が地熱地域である ことから,熱水やマグマの存在が重要な役割を果 たしていることは確実と考えられている(例えば Hill *et al.*, 1993; Johnston *et al.*, 1995)。

硫黄島の遠隔誘発現象は遠地地震の表面波によ る動的な変位が主要因の可能性が強いが,まだそ の具体的なメカニズムを特定することはできてい ない。地磁気異常の研究から,硫黄島の中心部, 深さ約2kmには直径約10kmの非磁性の部分が あり,地下に高温域は拡がっていることがわかっ ている(大島ほか,1985)。地球化学的な研究は, 地下に熱水溜まりが存在することを示している (例えば,Yoshida and Kakiuchi,1997)。また 長期的に継続している大規模な隆起活動と活発な 地熱活動から地下深部にマグマが存在している可 能性は極めて高い(例えば,江原,1985;Ukawa *et al.*,1998)。

硫黄島の遠隔誘発現象で発生する地震は,通常 硫黄島で発生している微小地震と同様の波形であ る。このような硫黄島の微小地震が通常発生して いる深さは2~3km 程度かそれ以浅が主で,熱 水溜まり直上である。この熱水の存在による間隙 水圧が,遠隔誘発現象と深く関わっていると考え るのが自然である。その関わり合いのメカニズム としては, 普段から高い間隙水圧のために岩盤の 破壊強度が低い状態に保たれ,遠地地震の表面波 による歪みによって破壊が生じる可能性,あるい は遠地地震による表面波の動的歪のために間隙水 圧が上昇し,岩盤の破壊強度がさらに小さくなっ て破壊が生じる可能性が考えられる。硫黄島の火 山性地震の発生原因の解明を通して,遠隔誘発現 象のメカニズムが明らかになることが期待される。 表面波による熱水溜まりの応答は,火山地域の遠 隔誘発現象解明のために,今後検討しなければな らない課題である。

## V.おわりに

硫黄島での1980年から1993年の連続地震観測 データをもとに,硫黄島で遠地地震による硫黄島 の地震活動の遠隔誘発現象が4地震に見られるこ とを明らかにした。誘発地震の発生時刻がほぼ表 面波の到着時刻と同じであることから,遠地地震 の表面波により硫黄島の地震が誘発されたことは 確実である。しかしその具体的なメカニズムにつ いては特定できていない。

我々は,硫黄島に STS-2 型地震計を 1995 年末 に設置し,数年間,長周期地震波を観測している。 この間に 1996 年 2 月のインドネシアの Irian Jaya 地震では、震央距離が約 2700 km とこれまで で最も遠方の地震による誘発現象が観測できた。 さらにこの地震では長周期地震計により表面波の 振動に重なって硫黄島の地震が発生していること を実際の地震記象で確認できた。遠隔誘発現象の メカニズムの特定は簡単ではないと考えられるが, 本報告以後の地震の調査に加えて,現地の観測機 器の充実を図りながら,そのメカニズムを解明し ていきたい。

#### 謝辞

防災科学技術研究所の堀博士には,遠地地震の理論記 象作成方法を教えていただいた。また京都大学の橋本博 士には,本研究の発表の機会を与えていただいた。匿名 査読者の方々の指摘は,本論文の改善に役立った。これ らの方々に感謝します。

#### 文 献

- 防災科学技術研究所(2000)硫黄島の地震活動.火山 噴火予知連絡会会報,75,9596.
- Dziewonski, A.M. and Woodhouse, J.H. (1983). An experiment in the systematic study of global seismicity: Centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981. *J. Geophys. Res.*, **88**, 3247–3271.
- 江原幸雄(1985)硫黄島の地熱活動.地学雑誌,94, 114 125.
- Hill, D.P., Reasenberg, P.A., Michael, A., Arabaz, W.J., Beroza, G., Brumbaugh, D., Brune, N.J., Castro, R., Davis, S., dePolo, D., Ellsworth, W.L., Gomberg, J., Harmsen, S., House, L., Jackson, S.M., Johnston, M.J.S., Jones, L., Keller, R., Malone, S., Mungia, L., Pechmann, J.C., Sanford, A., Simpson, P.W., Smith, R.B., Stark, M., Stickney, M., Vidal, A., Walter, S., Wong, V. and Zollweg, J. (1993) Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. Science, **260**, 1617 1623.
- Johnston, M.L.S., Hill, D.P., Linde, A.T., Langbein, J. and Bilham, R. (1995) Transient deformation during triggered seismicity from the 28 June

1992 Mw=7.3 Landers earthquake at Long Valley volcanic caldera, California. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **85**, 787 795.

- Kaizuka, S. (1992). Coastal evolution at a rapidly uplifting volcanic island: Iwo-jima, western Pacific ocean. *Quaternary International*, 15/16, 7 16.
- 熊谷貞治(1985)硫黄島の火山活動と地震活動.地学 雑誌,94,53 61.
- 熊谷貞治・高橋 博(1985) 硫黄島の地殻変動.地学 雑誌,94,7785.
- Newhall, C.G. and Dzurisin, D. (1988) Histrical Unrest at Large Calderas of the World, Volume 1. U.S. Geological Survey Bulletin, 1855.

大島章一・兼子俊朗・小野寺健英・中川久穂・登崎隆

志・三品正明・小坂丈与(1985) 硫黄島の地磁気異 常分布.地学雑誌,94,100 113.

- Stark, M.A. and Davis, S.D. (1996). Remotely triggered micro-earthquakes at the Geysers geothermal field, California. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 945 948.
- Ukawa, M., Fujita, E., Ohkura H. and Kumagai, T. (1998). Crustal deformation and seismicity at Iwo-jima caldera, Japan. *AGU Fall Meeting*, F950.
- Yoshida, N. and Kakiuchi, M. (1997). Volcanic phenomena in the Iwo-jima island. *Proc. 30th Int'l. Geol. Congr.*, 5, 163 169.

(2001年12月3日受付,2002年2月25日受理)