

薩摩硫黄島火山における最近の火山活動

1975年～2001年

京都大学防災研究所 井口 正人

1. はじめに

薩摩硫黄島火山は九州薩摩半島の南端から45kmの距離にある活火山である。九州の4大カルデラのひとつに数えられ、6300年前に大噴火が発生した鬼界カルデラの縁に位置する(Matsumoto, 1943)¹⁾。薩摩硫黄島は硫黄岳、稲村岳、矢筈岳などの火山からなる。海底噴火が発生することもあり、1934年9月には、硫黄岳の山頂東1.5kmの海底から噴火が発生し、溶岩ドームを形成することにより3ヵ月後には新島が海上に現れた。最近1000年間は、硫黄岳からの火山ガス放出が継続していると考えられている(Shinohara et al., 2002)²⁾。

薩摩硫黄島に限らず、離島における火山観測の歴史は浅い。1934年の海底噴火発生前には、鹿児島でも有感地震が多数観測されており(田中館, 1935)³⁾、地震観測は薩摩硫黄島においても火山活動を評価する上で有効な方法のひとつである。薩摩硫黄島における最初の本格的な地震観測は、新エネルギーの開発を目的としたサンシャイン計画にもとづく地震観測であろう。このプロジェクトでは、硫黄岳の北西1.5km付近に展開された三点観測網により、火山性地震活動と震源決定を目的とした観測が、1975年から1978年まで続けられた(加茂, 1976; 1977; 1978)^{4,5,6)}。その後、1988年1月には硫黄岳の山頂火口内で何回かの崩落が発生し、噴煙が立ち昇るのが目撃され、鹿児島地方気象台は臨時火山情報を発表した(気象庁, 1988)⁷⁾。桜島火山観測所は火山性地震観測を硫黄岳から3km離れた集落において再開し、パソコンを利用したダイアルアップシステムによりテレメータし火山性地震波形が容易に観測できるような態勢を整えた(Iguchi, 1991)⁸⁾。途中、事故による観測の中断があったが、1995年6月からは硫黄岳の北西山麓での観測を継続している。また、福岡管区気象台も1997年9月以降機動観測を継続している(Uchida and Sakai, 2002)⁹⁾。本稿では、1975年～1978年と1995年以降の火山性地震活動を比較することにより、最近25年間の活動の評価を試みた。

2. 観測

地震観測点の位置を図1に示す。観測点Cは1975年に設置された三点観測網の観測点の1つである。固有周期1秒の上下動地震計が設置された。観測点IWOは1995年6月に設置さ

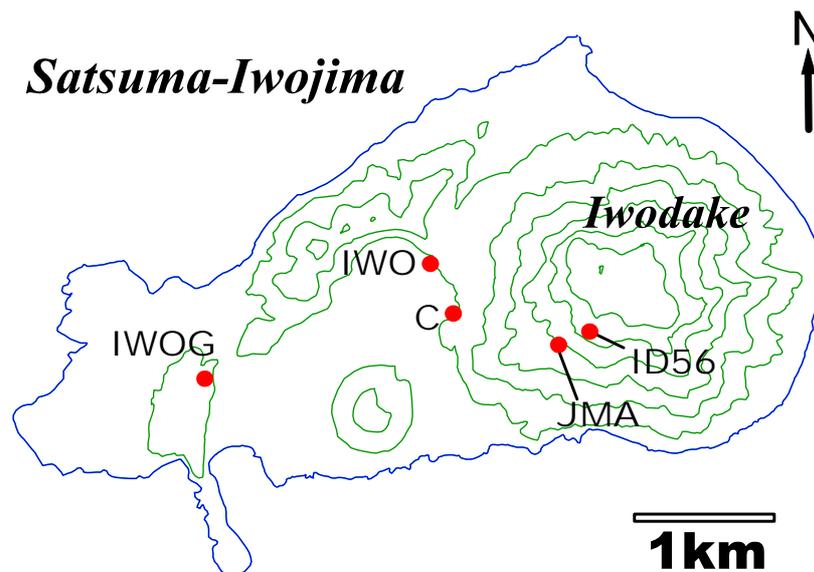


図 1. 薩摩硫黄島における観測点位置図。黒丸は長期間設置された観測点を示す。観測点 IWO は 1995 年 6 月に火山活動研究センターにより設置された。観測点 JMA は 1997 年 9 月に福岡管区気象台により設置された。観測点 C は 1975 年 6 月から 1978 年 1 月まで稼動した。ID56 は、2000 年 11 月以降、常設の観測点となって稼動中である。IWOG は、GPS 連続観測点であり、テレメータの中継局を兼ねる。低周波マイクロホンは、この局舎に設置されている。等高線の間隔は 100m である。

れ、現在も稼動している観測点であり、固有周期 1 秒の 3 成分地震計が設置されている。地震計からの信号は無線テレメータ装置により GPS 観測室 IWOG まで搬送された後、パソコンにより AD 変換されてトリガー収録され、加入回線とモデムにより、地震波形ファイルが火山活動研究センターへ伝送される (Iguchi, 1991)⁸⁾。福岡管区気象台は、1997 年 9 月に機動観測を実施し、観測の撤去、増設を繰り返してきたが (Uchida and Sakai, 2002)⁹⁾、硫黄岳の山頂火口から 1km はなれた場所 (JMA, 図 1) での観測は現在も継続されている。この地震計からの信号は 1998 年 6 月から 1999 年 11 月まで、パソコンに同時収録し、センターへ伝送した。2000 年 11 月には、地質調査所により、硫黄岳火口から 250m の距離のある ID56 に広帯域地震計 CMG-40T が設置され、2001 年 3 月にはそのデータを無線伝送し、パソコンに同時に収録した。2001 年 7 月以降はダイヤルアップ方式をデジタル専用線による常時伝送方式に変更し、現在に至っている。また、2001 年 8 月には低周波マイクロホンを IWOG に設置し、火山ガス放出に伴う空気振動観測も行っている。

3. 1975 - 78 年と 1995 年以降の地震活動の比較

薩摩硫黄島火山において発生する火山性地震は A 型、B 型、C 型などに分類される (井口・他, 1999)¹⁰⁾。A 型地震は高周波振動が卓越し、P、S 波の位相の同定が可能なもの、B 型地震

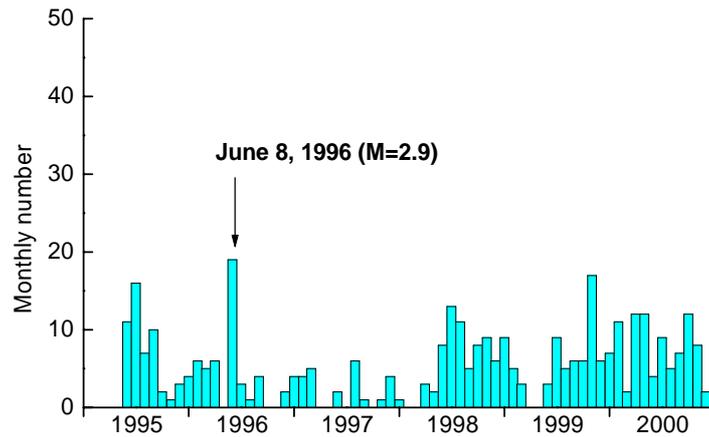


図 2. 1995 年 6 月以降の火山性地震の月別発生回数。観測点 IWO において最大振幅(p-p)が $>16 \mu\text{m/s}$ となる地震の発生回数を示す。

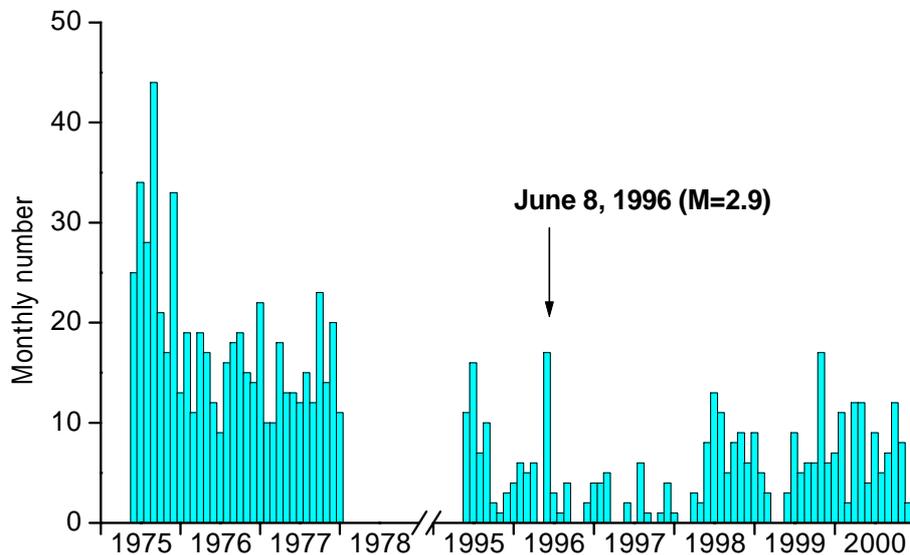


図 3. 1975 年～1978 年と 1995 年 6 月以降の火山性地震の月別発生回数の比較。観測点 IWO において最大振幅(p-p)が $>16 \mu\text{m/s}$ となる地震の発生回数を示す。1975 年～1978 年の地震は観測点 C において観測されているので、実体波の幾何減衰を考慮して、観測点 IWO における振幅に換算して地震回数を計数した。

は 1-5Hz の低周波振動が卓越する。また、C 型地震は、モノクロマティックな振動である。それ以外にも周期 15 秒の長周期パルス (Ohminato and Ereditato, 1997)¹¹⁾ や数秒の初期微動を伴う振動 (Uchida et al., 2002)⁹⁾ などが知られているが、振幅は A 型地震が他の種類の火山性地震よりも圧倒的に大きい。図 2 に観測点 IWO において最大振幅(p-p)が $16 \mu\text{m/s}$ 以上で、S-P 時間が 2 秒以下の地震の月別発生頻度を 1995 年以降について示した。最大振幅が $16 \mu\text{m/s}$ 以上に達する地震はすべて A 型地震であった。1995 年 6 月以降、1 月に約 10 個の火山性地震が発生している。この地震活動を 1975 年～1978 年の活動と比較してみる。加茂 (1976; 1977; 1978)^{4, 5, 6)} は、観測点 C における最大振幅が $10 \mu\text{m/s}$ 以上で、S-P 時間が 2 秒以下の地震をイベントとし

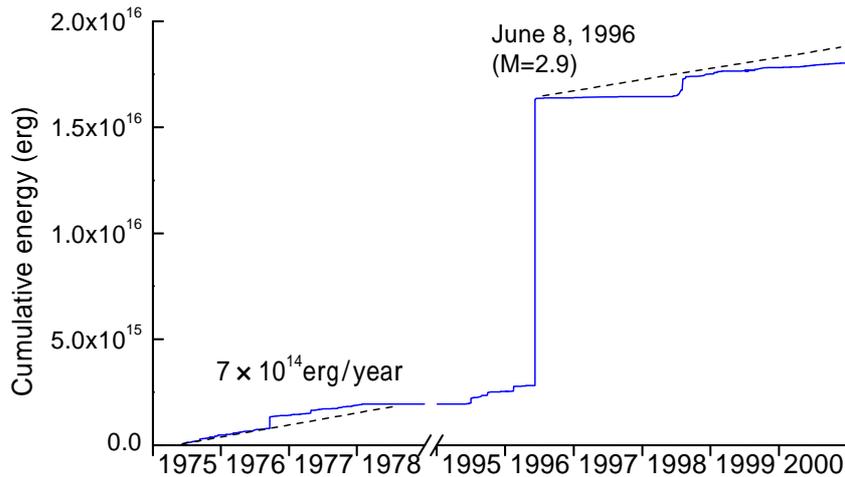


図 4. 火山性地震のマグニチュードと地震波放出エネルギーの積算曲線。観測点 IWO において最大振幅(p-p)が $>16 \mu\text{m/s}$ となる地震について調べた。破線は、地震波のエネルギー放出率 7×10^{14} erg/年を示す。

て抽出している。イベントとして抽出されたのはすべて A 型地震であった。それによると 1975 年 9 月には地震回数は 80 回であったが、それ以外では 10 ~ 30 回であった。この期間の火山性地震は硫黄岳の山体内部深さ 1km に決められているが、観測点 C は、1995 年以降の観測点 IWO よりも硫黄岳に近接しているために、振幅が大きく観測されていると思われる。そこで、実体波の振幅の距離による減衰を考慮して IWO において最大振幅が $16 \mu\text{m/s}$ 以上となる地震を再計数してみた。その結果を図 3 に示す。1975 年には 20 ~ 40 個 / 月の地震が発生していたが、1976 年、1977 年では 10 ~ 20 個 / 月の地震発生頻度であった。1995 年以降の発生回数はおおむね 10 個 / 月以下である。

発生頻度の変化は、震源位置が変わったことによる見かけ上のものである可能性がある。そこで、地震波の放出エネルギーをこれらの期間について調べてみた。観測点 C と IWO はどちらも固有周期 1 秒の同じ周波数特性を持つ地震計が設置されており、場所も硫黄岳の北西山麓とそれほど離れているわけではない。気象庁発表のマグニチュード (M) とこれらの観測点における振動継続時間 (T) の関係は、次のように近似される。

$$M = 4.25 \log_{10} T - 0.4.$$

地震波の放出エネルギーは Gutenberg-Richter の公式 (Gutenberg and Richter, 1956)¹²⁾ によりマグニチュードから求めた。1975 ~ 1978 年および 1995 年以降の火山性地震のマグニチュードおよび地震波の放出エネルギーを図 4 に示した。1996 年 6 月 8 日に発生したマグニチュード 2.9 の有感地震を除くと、マグニチュードは 2 以下であり、大多数の地震のマグニチュードは 1 以下である。地震波エネルギーの放出率は 1975 年 ~ 1978 年において 7×10^{14} erg/年と求められる。1995 年以降では、1996 年 6 月の有感地震の発生により顕著な放出エネルギーの増加が認めら

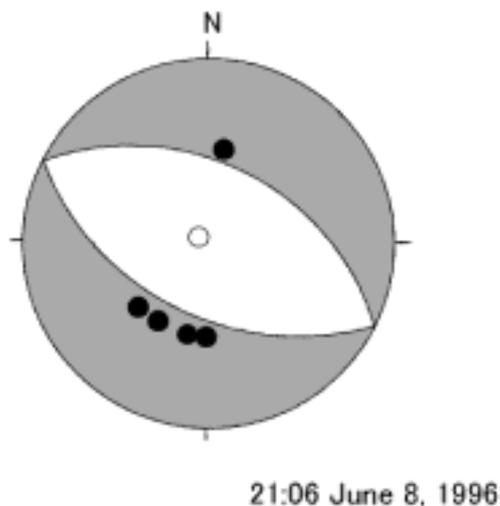


図 5. 1996 年 6 月 8 日 21:06 に発生した火山性地震のメカニズム解。P 波初動の押し引きを下半球等積投影した。黒丸が押し、白丸が引きを表す。

れるが、その前後では、1975 年～1978 年のエネルギー放出率とほぼ同じである。1978 年から 1995 年の間には継続的な地震観測は行われていないが、有感地震が発生したという報告はないことから、1996 年 6 月 8 日の地震クラスの地震波放出エネルギーの増加はなく、地震波エネルギーの放出率はほぼ同様であったことが推定される。1975 年以降の地震活動は、1996 年 6 月 8 日の有感地震を除いてほぼ定常的であったといえる。

4. 1996 年 6 月 8 日の有感地震

1996 年 6 月 8 日に発生した地震は、1975 年以降の定常的な地震活動の中で唯一の有感地震である。この地震について詳しく述べ、その前後に観察された火口内の状況の変化や地盤変動、火山ガスの平衡温度の変化などからこの地震の発生した 1996 年ごろの硫黄岳浅部の状態について考察を加える。

この地震は、1996 年 6 月 8 日の 21:06 に発生した。硫黄岳の西 3km にある集落での震度は気象庁スケールで 程度である。福岡管区気象台よればマグニチュードは 2.9 であり、同気象台の観測システムでも震源は薩摩硫黄島の北西 10km 付近に震源決定されている。より正確な震源位置を求めるため、京都大学防災研究所の薩摩硫黄島の IWO 観測点、口永良部島、屋久島など周辺の観測点と広域地震観測網の 6 点における P 波および S 波の着震時を用い、桜島火山観測所のルーチン震源決定に用いられている速度構造(西・井口, 1983)¹³⁾を仮定して震源位置を求めてみた。震源は硫黄岳の東約 1km の海域の深さ 5km に求められ、硫黄岳あるいはその周辺であると考えられる。観測点 IWO における S-P 時間は 0.5 秒であり、これまでに硫黄岳の直下に震源決定されている地震とほぼ同じである。また、初動の振動軌跡からは、地震波は東から到来しているように見える。以上のことをあわせ考えるとこの地震は硫黄岳の直下に

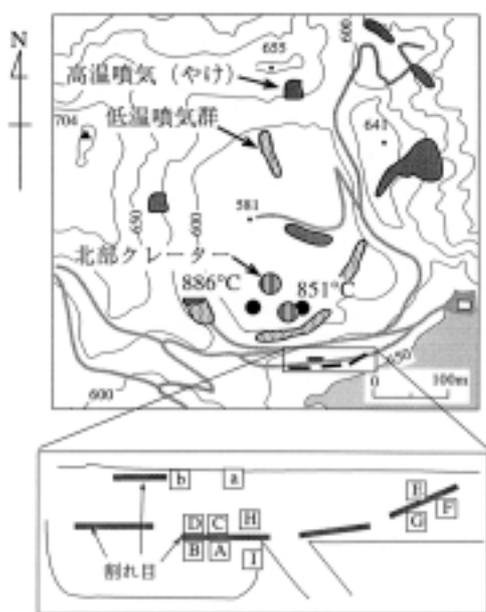


図 6. 硫黄岳火口周辺の地形変化(地質調査所, 1997)

において発生したものと思われる。

この地震の P 波初動の押し引き分布を下半球等積投影したものを図 5 に示した。薩摩硫黄島の IWO 観測点では初動は引きであるが、40km 以上はなれたその他の観測点ではすべて押しである。一意的なメカニズム解を決めるのは困難であるが、正断層型の解が得られる。正断層型は薩摩硫黄島においてしばしばみられるメカニズムである (Iguchi et al., 2002)¹⁴⁾。

1996 年 6 月 8 日の地震は、火口周辺の地形変化や地盤変動と関係しているように思われる。1990 年以降における硫黄岳の山頂火口内及びその周辺における地形の変化および噴気の温度・状態の変化は次のようにまとめられている (地質調査所, 1997; 地質調査所・火山活動研究センター, 1997; 1998)^{15, 16, 17)}。1990 年頃は硫黄岳山頂火口内の縁部に近い火口斜面に高温噴気が分布していたが、1994 年以降は、火口縁部よりも中心部の火口底における噴気活動が活発化した。1996 年 10 月にはジェット音が放出されている新火孔が火口底に形成されているのが目視された。火口底の火孔は、その後も拡大傾向を続け、1998 年 7 月の観測時には火口底部の火孔は、30m 程度に拡大し、火山ガスと火山灰が間欠的に放出されているのが確認された(図 6)。また、1996 年 10 月には山頂火口外側の南東部の道路上に北東 - 南西方向(走向は N60 ~ 90 ° E)の開口性割れ目が確認されている。この割れ目から火山ガスが放出されている。この割れ目は、1997 年 11 月の観測時まで拡大傾向を続けている。また、この割れ目には、北落ち(火口側が落ち)の段差があり、1996 年 10 月には 10cm 以下であったが、1997 年 1 月には 20cm、2 月には 30cm に拡大した。これらの観察は、1994 年から 1996 年 10 月までの間に硫黄岳火口付近で大きな地形変化があったことを意味する。また、山頂火口の縁にあるベンチマーク IWDK では、1995 年 6 月から 1997 年 4 月までに東南東に約 6cm 変位したことが GPS 観測によりわかっている(Iguchi et al., 2002)¹⁴⁾。このベンチマークは 1996 年 10 月に発見された新しい割れ目に近接しており、また、1997 年 4 月以降顕著な変位が検出されていないことから、IWDK 観測点における地盤変動は、火口の南東の割れ目の形成により引き起こされたものと推定される。更に、割れ目は 1996 年 10 月に発見されたが、割れ目が形成されたのはそれ以

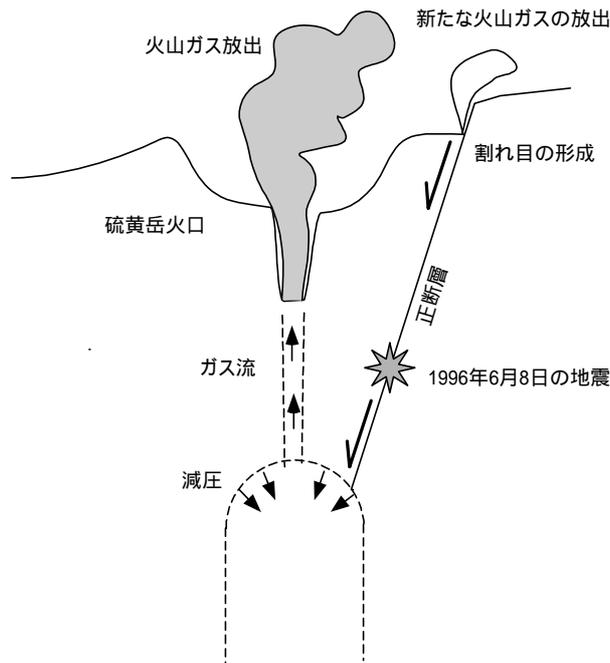


図7. 1996年6月8日の火山性地震と火口南東の割れ目の形成に関するモデル。割れ目は、地震発生後の1996年10月に確認された。火口直下の圧力は、火山ガスの放出により減少し、その結果、火口内の地盤が沈降することによって、正断層型の地震が発生した。断層は地表に達し、火口の南東に割れ目を形成した。火山ガスは、この断層および割れ目を通して、放出された。

前であり、1996年6月8日の有感地震発生は、この割れ目の形成と密接な関係があることが推定される。割れ目の火口側の地盤が沈降しているが(地質調査所, 1997)¹⁵⁾、このことは、1996年6月8日の地震が正断層型のメカニズムをもつことと符合している。この割れ目が正断層であることから IWDK 観測点でも顕著な上下変動が検出されることが期待される。GPS 観測では一般に上下方向の精度は水平方向にくらべてよくないが、上下変動はほとんど検出されていない。このことは、正断層成分をもつ割れ目の形成が狭い範囲の浅い部分に限られていることを示唆するものである。また、この割れ目は30cmの開口を伴っている(地質調査所, 1997)¹⁵⁾。すなわち、上下変動は割れ目の狭い範囲に集中しており、割れ目の端から200mの距離にあるIWDK観測点は水平変動だけの影響を受けたものと解釈される。1996年6月8日の地震は音を伴ったとの報告もあり、震源が浅いために破碎領域が地表に達して、火口南東部の割れ目を形成し、その際に音波を発生させたのかもしれない。

以上のことを考慮して、1996年6月8日の有感地震を発生させた硫黄岳火口浅部の状態を推定してみた(図7)。Shinohara et al.(2002)²⁾は、1990年代中ごろの硫黄岳からのSO₂の噴出量、噴気ガスの最高温度および平衡温度の上昇は、硫黄岳直下の火道内のマグマ頭の上昇によって引き起こされたと解釈している。マグマ頭の上昇により硫黄岳火口直下の火道内の圧力は一時的に上昇したものと考えられるが、多量の火山ガスが放出されると、逆に火道内では減

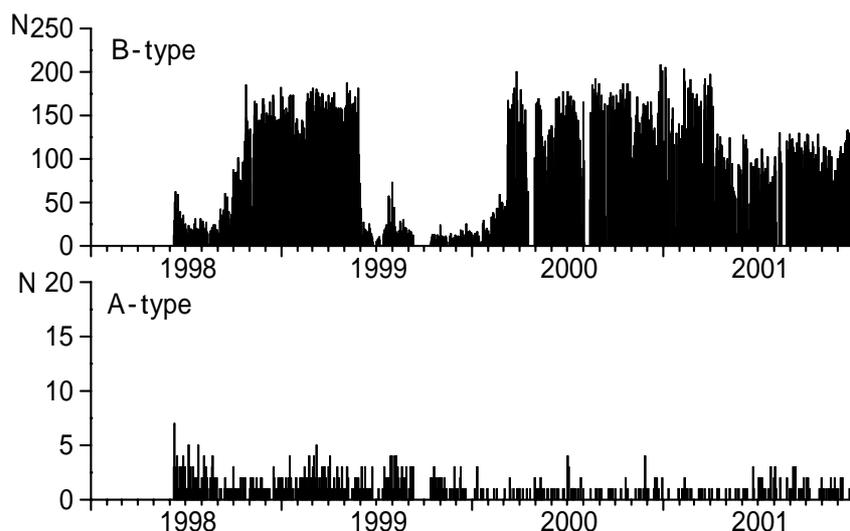


図8. 1998年6月以降のA型およびB型地震の日別発生頻度。観測点JMAにおいて最大振幅(p-p)が $>16 \mu\text{m/s}$ になる地震について示した。

圧していくはずである。正断層型のメカニズムをもつ1996年6月8日の有感地震は、火道内が減圧することにより火口内の地盤が急激に沈降し、引き起こされたものと解釈される。この地震の発生により、断層は火口南東の地表に達し、割れ目を形成し、そこから多量の火山ガスを噴出させたものと思われる。

lio(1986)¹⁸⁾によれば、微小地震のマグニチュード M とモーメント M_0 の間には、次のような関係がある。

$$\text{Log } M_0 = 1.37M + 16.2$$

1996年6月8日の地震のマグニチュードは2.9であり、モーメントは $5 \times 10^{20} \text{ dyn}\cdot\text{cm}$ と推定される。Harr et al. (1984)¹⁹⁾は、いくつかの地震についてモーメントと震源半径の関係を調べているが、それによるとこの地震の震源半径は 10^2 m 程度であるものと思われる。このことは、マグニチュード2.9の6月8日の地震が、火口南東の長さ100mの割れ目を形成しうることを示唆する。

一方、この有感地震を除いて1995年から1998年の地震活動は地震エネルギーの放出率が示すように安定している。また、1975年から1978年の地震エネルギーの放出率もほぼ同じである(図4)。1978年から1995年までは、継続的な薩摩硫黄島島内で行われていないが、有感地震の報告がないことから、この間の地震活動も同様で、薩摩硫黄島火山における地震活動は最近少なくとも20年間は定常的であったと思われる。Shinohara et al. (2002)は、噴気ガスの組成分析や温度測定からみても、同様に、1990年中ごろに一時的な活発化は認められるものの全般的には定常的な火山ガス噴出が続いているものとしている。

1998年6月以降のJMA観測点における火山性地震の日別発生回数をA型およびB型に分類して図8に示す。ここでは、最大振幅が $10 \mu\text{m/s}$ (p-p)以上の地震の発生回数を数えた。

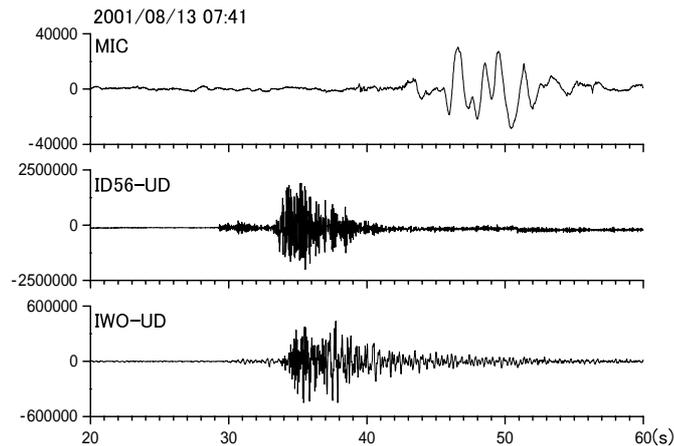


図9. 2001年8月13日, 7:41の噴火に伴う地震動および空気振動. IWOおよびID56は地震動, MICは空気振動を示す.

1998年9月ごろからB型地震の日別発生回数が150~200個に著しく増加している。1999年6月から2000年2月まで発生回数は50回以下に減少したが, 2000年2月の下旬から再び, 150~200個に増加し, 現在に至っている。B型地震は, 最大振幅は10 $\mu\text{m/s}$ (p-p)以下であり, 火口から離れたIWO観測点では1 $\mu\text{m/s}$ (p-p)以下に減衰するので, ここで取り扱っているA型地震よりも振幅が小さい。B型地震の発生回数の変化は, その地震波放出エネルギーは図6に示した地震波エネルギー積算曲線に大きな影響を与えないものと思われる。1998年9月以降の地震回数が増加した期間に薩摩硫黄島島内や硫黄岳から東に10km離れた竹島でしばしば降灰が観測された。しかし, 火山性地震の発生回数が少なかった1998年7月や1999年6月~2000年2月にも火山灰や火山ガスが放出されているのが確認されており, ほぼ定常的な現象と思われる。Shinohara et al. (2002)²⁾は, 硫黄岳の火口から放出されている火山灰は新鮮ではなく, 強い火山ガスの流れが, 火口底に堆積していた過去の噴出物を吹き上げていることを指摘している。1998年9月以降のB型地震を主体とする火山性地震発生頻度の増加は, SO_2 放出量の増加, 噴火ガス温度や組成から見た平衡温度の増加などの火山活動の活発化を意味する現象を伴っていない。また, 地盤変動の急激な変化も発生していない。B型地震はガスポケットの膨張に起因する体積変化力源によって発生すると考えられ(井口・他, 1999)¹⁰⁾, 火山ガスに満たされた火道内の状態の微小な変化が, B型地震を増加させたと判断される。

5. 2001年7月 - 8月の活動

2001年7月中ごろから, 多量の白色の火山灰が放出された。特に, 7月20日の22:10分のB型地震(顕著な噴火を伴う地震である可能性があるが, 低周波振動が卓越しているためB型地震とした)の発生以降, 連続的な火山性微動が発生するようになった。7月26日の16時ごろ硫

黄岳の火口内の観察を行った。1994年に確認された硫黄岳の山頂火口内の火孔は、この時点では約100mに拡大しており、そこから多量の白色の火山灰を放出していた。火口の南東の縁では、火山灰の厚さは約15cmに達していた。また、火口内からは間歇的に爆発音が聞かれた。火山性微動は火山灰の放出によって発生したものと考えられる。8月13日7:41には、明瞭な空気振動を伴うイベントが観測された。観測点IWO, ID56における火山性地震および空気振動の波形を図9に示す。地震動はID56およびIWOにおいて840および68 $\mu\text{m/s}$ (p-p), 空気振動は0.92Paであった。このイベントにより、硫黄岳から3kmはなれた集落でも80g/m²の降灰が観測された。火山灰の放出は、これまでも頻繁に観測されたが、爆発音は聞かれたことはなく、今後の活動の変化に注意していく必要がある。

6. 結論

薩摩硫黄島火山における地震活動から判断すると、硫黄岳火山は少なくとも最近25年間は定常的な活動を続けてきた。活動の高まりは、1996年6月8日のマグニチュード2.9の有感地震であり、この地震の発生によって硫黄岳火口南東部に割れ目が生じ、顕著な地盤変動を伴ったものと推定される。1994年に形成された硫黄岳火口底の火孔は拡大を続け、2001年には直径100m以上に達し、火山灰混じりの火山ガスを放出し続けてときおり空気振動を伴う噴火形態も見られるようになった。

謝辞

地震観測点の設置にあたり、三島村役場総務課にはお世話になりました。また、硫黄島在住の徳田和良氏、折田氏、硫黄島駐在所からは火山活動に関する有用な情報を多々いただきました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Matsumoto, T. (1943): The four giantic caldera volcanoes of Kyushu, Jap. Jour. Geol. Geogra, 19, 57.
- 2) Shinohara, H., Kazahaya, K., Saito, G., Matsushima, M., and Kawabe, Y. (2002): Degassing activity from Iwodake rhyolitic cone of Satsuma-Iwojima volcano, Japan during 1990-1999: Gas eruptions and formation of a new degassing, Earth Planets Space, 54, 175-185.
- 3) 田中館秀三(1935): 鹿児島縣下硫黄島噴火概報, 火山, 第2巻, 188 - 209.
- 4) 加茂幸介(1976): 地震観測・火山発電方式に関するフィジビリティスタディ(サンシャイン計画委託調査研究成果報告書), 38-59.

- 5) 加茂幸介(1977):地震計の設置. 火山発電方式に関するフィジビリティスタディ(サンシャイン計画委託調査研究成果報告書), 25-39.
- 6) 加茂幸介(1978):地震計の設置. 火山発電方式に関するフィジビリティスタディ(サンシャイン計画委託調査研究成果報告書), 17-31.
- 7) 気象庁(1988):1988年1月地震火山概況, p10.
- 8) Iguchi, M. (1991): Geophysical data collection using an interactive personal computer system (part 1) -Experimental monitoring at Suwanosejima Volcano-, Bull. Volcanol. Soc. Jpn., 36, 335-343.
- 9) Uchida, N., and Sakai T. (2002): Analysis of peculiar volcanic earthquakes at Satsuma-Iojima volcano, Earth Planets Space, 54, 211-216.
- 10) 井口正人・石原和弘・高山鐵朗・為栗健・篠原宏志・斎藤英二 (1999)薩摩硫黄島の火山活動 1995年～1998年, 京都大学防災研究所年報, 42B-1, 1-10.
- 11) Ohminato, T. and Ereditato D. (1997): Broadband seismic observations at Satsuma-Iwojima volcano, Japan. Geophys. Res. Lett., 24, 2845-2848.
- 12) Gutenberg, B. and C. F. Richter, Magnitude and energy of earthquakes (1956): Ann. Geofis., 9, 1-15.
- 13) 西 潔・井口正人(1983):南九州の地震活動の予察, 京都大学防災研究所年報, 26B-1, 23-29.
- 14) Iguchi, M., Saito, E., Nishi, Y. and Tameguri, T. (2002): Evaluation of recent activity at Satsuma-Iwojima - Felt earthquake on June 8, 1996 -, Earth Planets Space, 54, 187-195.
- 15) 地質調査所(1997):薩摩硫黄島火山の硫黄岳の活動状況, 火山噴火予知連絡会会報, 67, 79-82.
- 16) 地質調査所・火山活動研究センター(1997):1997年4月までの薩摩硫黄島火山の硫黄岳の活動状況, 火山噴火予知連絡会会報, 68, 97-99.
- 17) 地質調査所・火山活動研究センター(1998):1997年11月までの薩摩硫黄島火山の硫黄岳の活動状況, 火山噴火予知連絡会会報, 70, 59-60.
- 18) Iio, Y. (1986): Scaling relation between earthquake size and duration of faulting for shallow earthquakes in seismic moment between 10^{10} and 10^{25} dyne•cm, J. Phys. Earth, 34, 127-169.
- 19) Harr, L., Fletcher, J.B. and Mueller, C.S. (1984): The 1982 Enola, Arkansas, swarm and scaling of ground motion in the eastern United States, Bull. Seism. Soc. Am., 74, 2463-2482.

(Received on March 20, 2002)