

爆発的噴火に伴う地震動・空気振動の比較研究 —桜島火山と諏訪之瀬島火山の比較—

井口 正人・石原 和弘

COMPARISON OF EARTHQUAKES AND AIR-SHOCKS ACCOMPANIED WITH EXPLOSIVE ERUPTIONS AT SAKURAJIMA AND SUWANOSEJIMA VOLCANOES

By *Masato* IGUCHI and *Kazuhiro* ISHIHARA

Synopsis

Some characteristics of earthquakes and air-shocks are compared among three styles of explosive eruption, those are, explosion and successive minor eruption at Sakurajima, and explosion at Suwanosejima. The following results are obtained.

1) The maximum amplitudes of vertical component are 3–30 m_{kine} in explosion earthquakes at Sakurajima, less than 13 m_{kine} in eruption earthquakes at Suwanosejima and less than 7 m_{kine} in BL-type earthquakes at Sakurajima. The epicentral distances are around 3 km. The amplitudes of compressional phase of air-shocks are 0.2–5 mb in explosions at Sakurajima, less than 2 mb in explosions at Suwanosejima and less than 0.1 mb in successive minor eruptions at Sakurajima. The infrasonic microphones are 6 km and 3.3 km apart from the craters at Sakurajima and Suwanosejima, respectively.

2) Comparing the three styles of eruptions in the same amplitude-range of eruption earthquakes (5–7 m_{kine}), the amplitudes of air-shock by explosions at Suwanosejima are larger than those by successive minor eruptions at Sakurajima, but are smaller than those by explosions at Sakurajima. This result suggests that the ratio of seismic energy to infrasonic one changes with these eruption styles.

3) The intensity of the explosions in the active period during 1988–1989 at Mt. Tokachi was as large as that of the strongest explosions at Suwanosejima in 1989. However, the volume of pyroclastic materials, the time interval of eruption and the duration of compressional phase of air-shock at Mt. Tokachi are closer to those at Sakurajima.

1. はじめに

桜島は南岳山頂火口において、1955年以来5800回以上 Vulcano 式の爆発を繰り返している。この爆発的噴火には、爆発地震と強い空気振動を伴う¹⁾。また、爆発的噴火に先行してB型地震(BL型地震)が多発することがある。その時は、火山灰の連続放出、Stromboli 式噴火に似た噴石の放出、弱い空気振動などいわゆる爆発とは様子が異なった噴火現象が観測される²⁾。

桜島と同じく霧島火山帯に属する諏訪之瀬島は、Stromboli 式と呼ばれる間欠的な爆発を御岳山頂火口において繰り返している^{3),4)}。桜島火山観測所では、1989年5月から諏訪之瀬島において地震計と低周波マイ

クロフォンを設置し観測を続けている。同年6月、9-11月に小規模な爆発が発生し、これに伴う地震動と空気振動の記録が得られている。

これまでのところ、浅間山、桜島など個々の火山については爆発地震の規模や特性が調べられた例は多いが⁵⁾⁻⁷⁾、地震計の種類や特性、火口からの距離が異なるため、複数の火山における爆発の地震動・空気振動の規模や波形の特性の比較研究はほとんどなされていない。

そこで、同じ特性をもった地震計および低周波マイクロフォンにより観測された桜島の爆発的噴火と BL型地震の群発を伴う連続的な噴火、諏訪之瀬島の小規模な爆発に伴う地震動の最大振幅とスペクトルおよび空気振動の圧縮相の継続時間と振幅を調べ、これら3つの噴火様式においてどのようなちがいがあるか検討した。

2. 観 測

Fig. 1 および **Fig. 2** に桜島、諏訪之瀬島の位置およびこれらの火山における地震と空振の観測点の位置を示す。諏訪之瀬島は鹿児島市から南南西へ 240 km の位置にあり、南北 8 km、東西 5 km、面積は 30 km² であり、桜島の約 2/5 の大きさである。

諏訪之瀬島においては、1989年5月に噴火活動のみられる御岳の新火口から南南西 3.3 km の地点 (SU-W) に固有周期 1 秒の地震計 3 成分と 0.1-100 Hz の周波数に対して平坦な特性を持つ低周波マイクロフォンを設置した。地震および空振の波形はパーソナルコンピュータにより収録され、加入回線を利用して桜島火山観測所に伝送される^{8),9)}。

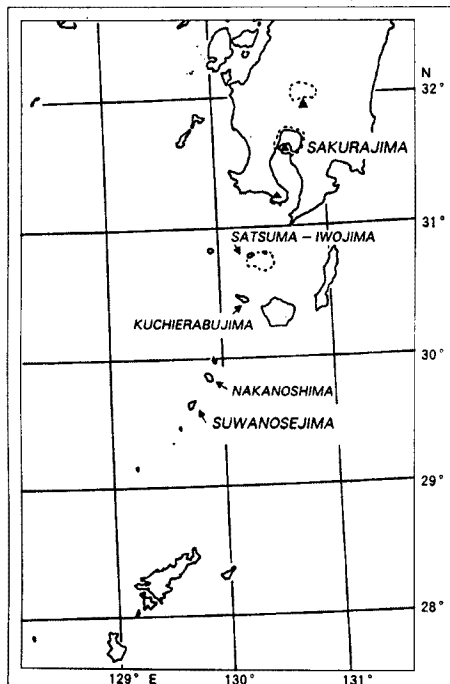


Fig. 1. Locations of Sakurajima and Suwanosejima.

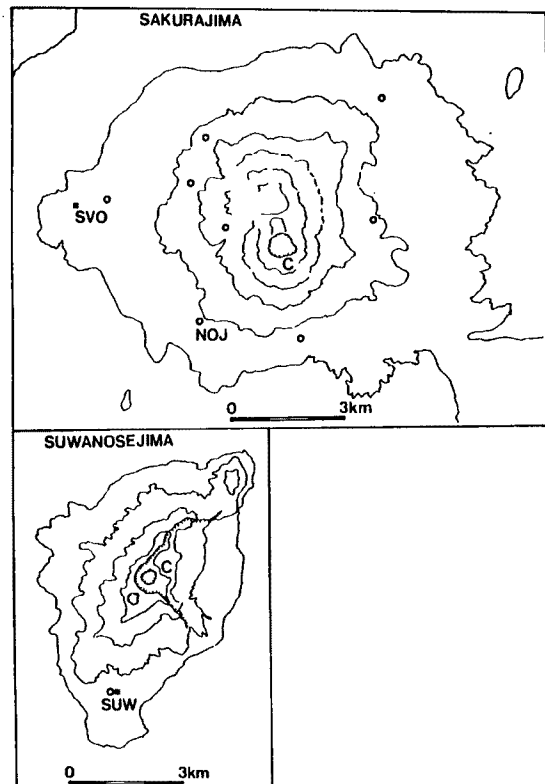


Fig. 2. Locations of instruments at Sakurajima and Suwanosejima. Open circles, solid squares and symbols "C" represent seismometers, infrasonic microphones and active craters, respectively.

桜島においては、8観測点に固有周期1秒の地震計が設置されている。諏訪之瀬島における活動火口と観測点間の距離を考慮して、今回の解析には、南岳山頂火口から2.9 kmの距離にある野尻観測点(NoJ)の記録を用いた。また、低周波マイクロフォンは火口から5.6 kmの距離にある桜島火山観測所(SVO)に設置されている。

3. 噴火の特徴

3.1 表面現象

桜島火山は安山岩質(SiO_2 ; 57–67%¹⁰⁾)の成層火山であり、山腹噴火と山頂噴火を繰り返してきている。1955年以降は、南岳山頂火口における噴火活動を継続中である。桜島の爆発的噴火はVulcano式噴火と呼ばれ、多量の火山灰、噴石を放出し、強い空振と爆発地震を伴う¹⁾。桜島火山観測所では、火口から2.7 kmにあるハルタ山観測室に設置されているS-1000型機械式地震計に 10μ 以上の地震動と微気圧計に0.1 mb以上の空振が観測された噴火を「爆発」と定義している。噴煙柱は通常、山頂から1–2 km、最大では4 kmの高度まで達し、水平方向にも1 km程度拡大する。1回の爆発により放出される火山灰の量は、 10^4 – 10^5 m^3 と見積もられている¹¹⁾。また、噴石の放出速度は、実測されたもので113–157 m/s^{11), 12)}、最大では推定240 m/sに達する¹³⁾。

爆発的噴火活動が活発になる前には「B型」と呼ばれる火山性地震が多数発生する¹⁴⁾。B型地震はその卓越周波数からBL型地震(1–3 Hz)とBH型地震(5–8 Hz)に分類される¹⁵⁾。BH型地震の発生には顕著な噴火活動を伴わないが、BL型地震が群発するときは火山灰が連続的に放出される。また、Stromboli式噴火に似た連続的な噴石の放出が観測されることもある。ただし、その放出速度は60 m/s以下と²⁾、爆発時の噴石の放出速度に比べ小さい。

なお、ここではBL型地震を伴って発生する噴火活動を「連続小噴火」と呼ぶことにする。

諏訪之瀬島火山は、桜島と同じく安山岩質の成層火山(SiO_2 ; 56–60%¹⁶⁾)である。1813年と1884年には、それぞれ島の西岸および東岸まで達する溶岩の流出を伴う活動を行ない¹⁷⁾、その後も山頂の御岳新火口内においてStromboli式噴火を繰り返している^{15), 16)}。ここでは、地震動と空気振動の振幅から桜島の「爆発」が定義されたのにならう、観測点SUWにおいて0.5 m_{kine}以上の地震動と検出限界の0.01 mb以上の空振を伴ったものを「小規模爆発」と定義する。地震計と低周波マイクロフォンを設置した1989年5月から12月までの小規模爆発の日別の発生回数をFig. 3に示す。この期間では、6月22日–27日、9月16日–20日、10月5日–11月6日に小規模爆発が多数回発生し、特に10月20日には272回に達した。1989年10月の同島における小規模爆発の表面現象の観察によれば、噴煙の高度は、火口から1 km以下、水平方向のひろ

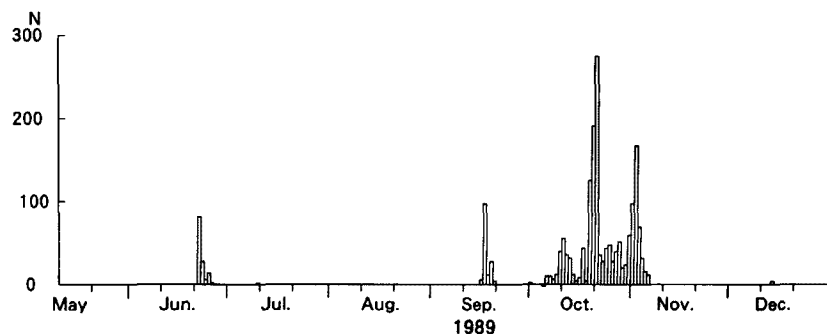


Fig. 3. Daily frequency of explosive eruptions at Suwanosejima during May 20–December 31, 1989.

がりは数百 m 以内である。小規模爆発の中には、噴煙の放出がほとんどみられないものもあり、1回の小規模爆発により放出される火山灰量は桜島の爆発に比べ1桁以上小さいと思われる。また、1989年10月20日と22日に放出された噴石の到達距離は0.6 km であり、その放出速度は120 m/s 程度と見積られる。諏訪之瀬島の小規模爆発による噴石の放出速度は桜島の爆発と連続小噴火の中間に位置する。つまり、噴石の放出速度からみると諏訪之瀬島の小規模爆発の圧力は、桜島の連続小噴火より大きく、爆発よりは小さいといえる。

3.2 噴火の発生間隔

桜島の爆発と諏訪之瀬島の小規模爆発についてその発生の時間間隔の頻度分布を調べた。桜島の爆発については1時間単位で、諏訪之瀬島の小規模爆発については1分単位で発生時間間隔の頻度分布を Fig. 4 に示した。諏訪之瀬島の小規模爆発の89%は1時間以内(1-60分)の時間間隔で発生しており、1分以上10分未満の間隔で発生したものが全体の52%を占める。それに対して桜島の爆発は1時間以内に発生したものは全体の6.5%にすぎず、明らかに諏訪之瀬島の小規模爆発の方が短い時間間隔で発生するといえる。また、桜島の連続小噴火では、Fig. 5 に示すように噴火の最盛期では10秒以内、発生時間間隔が大きい時でも数10秒以内に BL 型地震と空振が繰り返し観測される。これらの3つの噴火様式の発生時間間隔には、約1桁あるいはそれ以上のひらきがある。

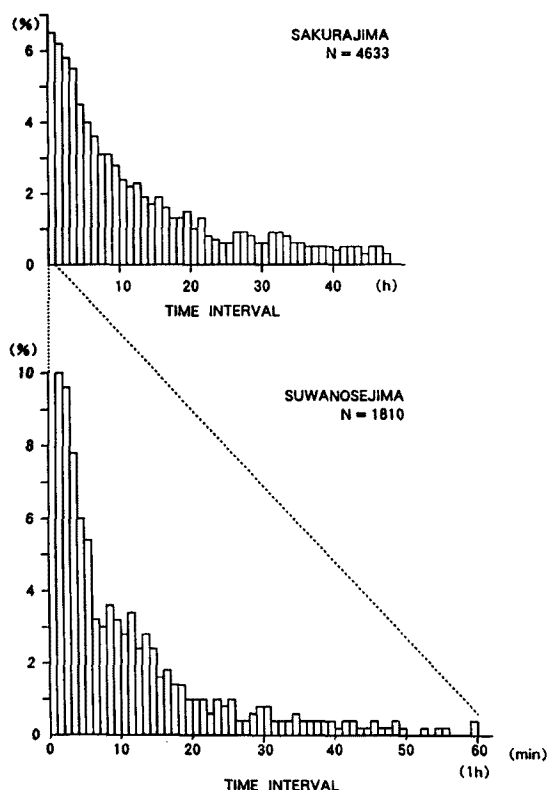


Fig. 4. Time intervals of occurrences of explosive eruptions at Sakurajima and Suwanosejima.

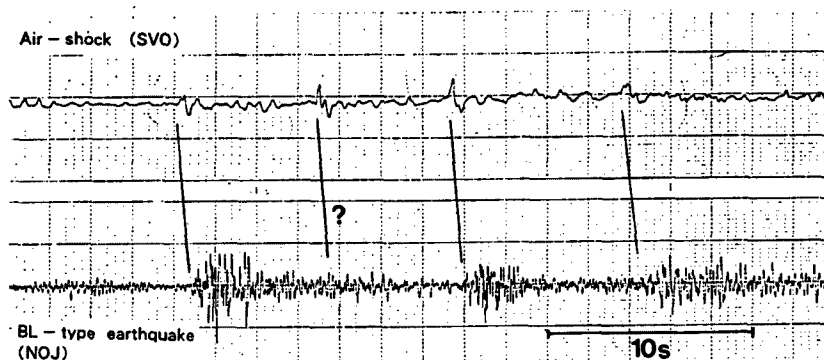


Fig. 5. An example of records of BL-type earthquakes (NOJ) and air-shocks (SVO) accompanied by successive emission of volcanic ash at Sakurajima. The trace of BL-type earthquake are delayed by 15.36s.

4. 地震動・空振の比較

4.1 地震動の比較

桜島の爆発地震、BL 型地震および諏訪之瀬島の小規模爆発に伴う地震動の波形の例を Fig. 6 に示す。

まず、地震動の規模を比較するために、Fig. 7 に上下動の最大振幅（片振幅）の頻度分布を示す。桜島の爆発地震のうち、観測点 NOJ において振り切れているものについては、火口から 2.7 km の距離にあるハルタ山観測室に設置してある S-1000 型機械式地震計の最大振幅から換算してある。桜島の爆発地震の最大振幅は 3—30 mkine の範囲にあり、10—15 mkine に振幅頻度の peak がある。BL 型地震の最大振幅は解析した範囲では 7 mkine までであり、振幅が小さいものほど頻度が高い傾向がある。諏訪之瀬島の小規模爆発に伴う地震動の最大振幅はこれまでのところ 13 mkine を越えるものはない。諏訪之瀬島の小規模爆発に伴う地震動は桜島の爆発地震より小さく、BL 型地震と同じかやや大きい。

次に、スペクトルを比較する。桜島の NOJ においては、地震波の到達から 7—8 秒後、諏訪之瀬島の SUW においては、8—9 秒後に空振が到達し、地震動が乱されるのでスペクトルは、空振が到達する時刻以前の 10.24 秒間の波形について FFT により計算し

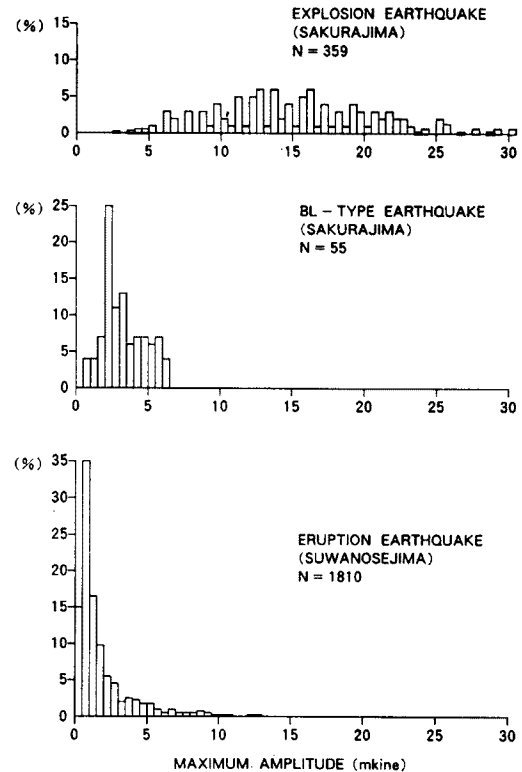


Fig. 7. Histograms of maximum amplitudes of the earthquakes related to three styles of eruption.

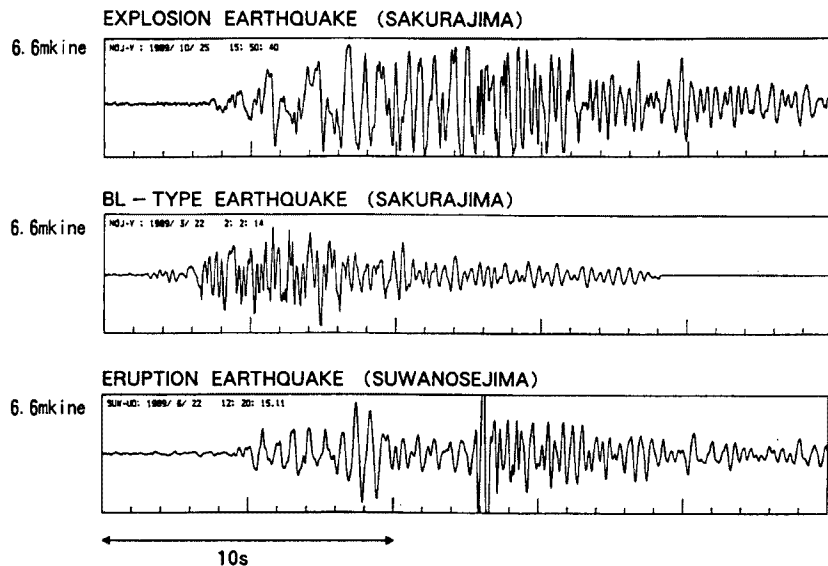


Fig. 6. The comparison of the waveforms of the earthquakes related to three styles of eruption.

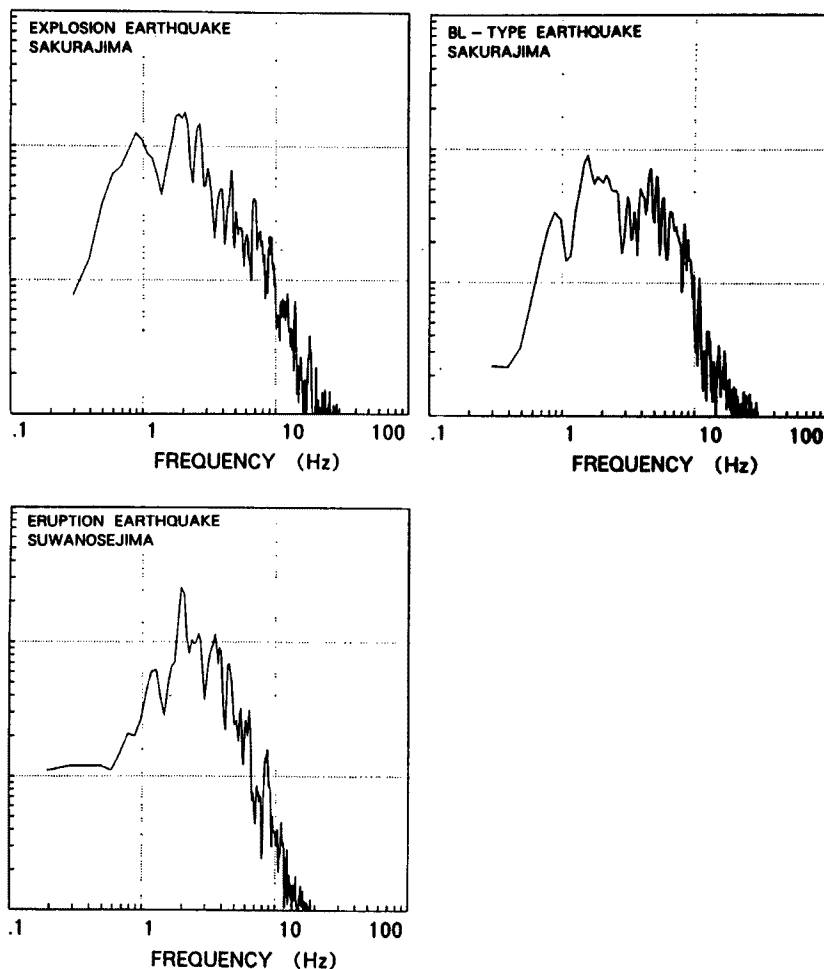


Fig. 8. Spectra of the earthquakes related to three styles of eruption.

た。スペクトルの例を Fig. 8 に示す。桜島の爆発では、スペクトルの peak が 2 Hz 以下にあり、1 Hz 以下の低周波成分の占める割合も大きい。BL 型地震では、1—3 Hz 付近に peak があるが、1 Hz 以下の低周波成分の占める割合は爆発地震に比べると小さい。諏訪之瀬島の小規模爆発に伴う地震動では、スペクトルの peak が 2—3 Hz 付近にあり、桜島の爆発地震と比較すると高周波成分が卓越している。

4.2 空振の比較

噴火に伴って発生する空振を比較するために、Fig. 9 に波形の記録を示す。ここに示す空振は Fig. 6 に示した地震動と同じ噴火により発生したもので時間軸を合わせてある。

まず、空振の規模を比較するために、圧縮相の振幅の頻度分布を Fig. 10 に示す。桜島の爆発に伴う空振は 0.2 mb 以上であり、そのうち74%は 1 mb を越え、2%は 5 mb 以上である。連続小噴火に伴い発生する空振は、0.1 mb 以下である。諏訪之瀬島の小規模爆発によって発生する空振の振幅は 2 mb 以下であり、0.1 mb を越えるものも22%ある。

桜島内の2地点における空振の比較観測によれば、空振は火口から 3 km 以上離れると衝撃波の性質をほとんど失い、音速で伝播することが示されている²³⁾。そこで、空振を点音源から放出された音波とみなし、その振幅は距離に反比例して減衰すると仮定すれば、桜島に設置してあるマイクロフォンの火口からの距離

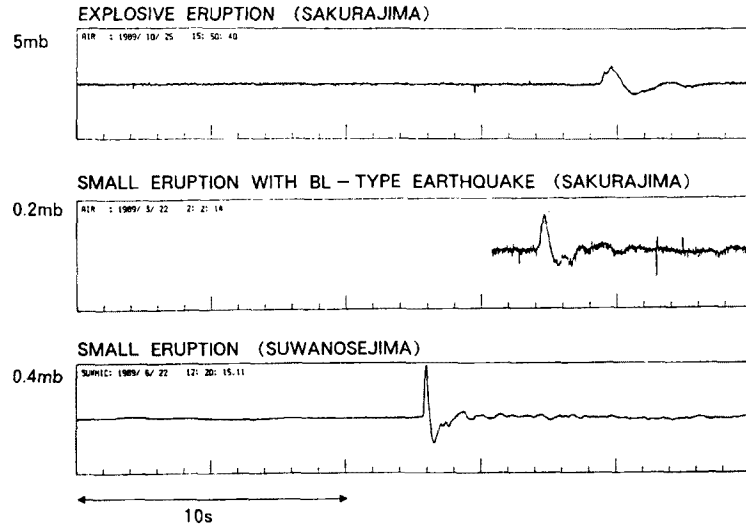


Fig. 9. The comparison of the waveforms of air-shocks associated with three styles of eruption.

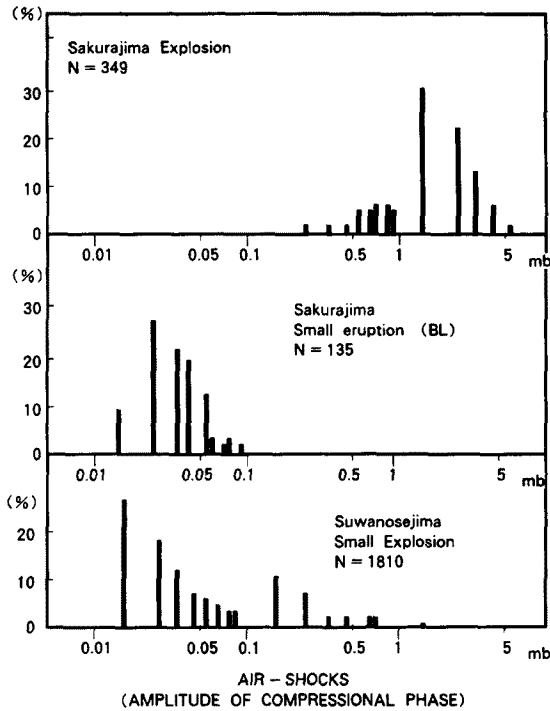


Fig. 10. Histograms of amplitudes of compressional phase in air-shocks associated with three styles of eruption.

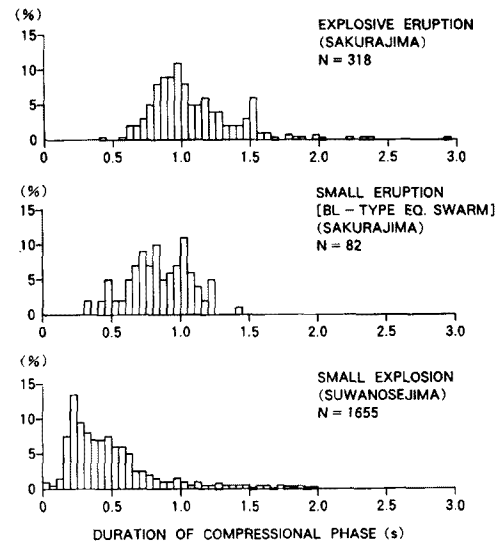


Fig. 11. Histograms of durations of compressional phase in air-shocks associated with three styles of eruption.

に相当する 5.6 km の距離において、諏訪之瀬島の小規模爆発による空振の振幅は 1 mb 以下と見積もられる。そのうち、14%の小規模爆発の空振は 0.1 mb 以上と推定される。諏訪之瀬島の小規模爆発による空振は桜島の爆発よりも弱い、連続小噴火よりは強いといえる。空振の強度の違いは、前述の噴石の放出速度の大きさの違いに対応している。

Table 1. Comparison of eruption

	Explosion Sakuramima	Explosion Suwanosejima	Successive eruption Sakurajima
Eruption type	Vulcanian	?	similar to Strombolian
Time interval of eruption	hours	minutes	seconds
Ejection velocity of volcanic bombs	100~240 m/s	> ~120 m/s	> ~60 m/s
Eruption earthquake			
Maximum amplitude	3~30 mkine	> ~13 mkine	≧ ~7 mkine
Predominant frequency	~2Hz	2~3Hz	1~3Hz
Compressional phase of air-shock			
Amplitude	0.2~5 mb	> ~2 mb	≧ ~0.1 mb
Typical duration	0.6~1.5s	0.1~0.7s	0.4~1.2s
Period of events for analysis	1985-1988	1989	1987-1988

次に、空振の圧縮相の継続時間の頻度分布を **Fig. 11** に示す。桜島の爆発に伴う空振の圧縮相の継続時間は、0.6s—1.5s であり、1.0s 付近に peak がある。連続小噴火によって発生する空振では、圧縮相の継続時間が 0.4s—1.2s であり、爆発による空振に比べやや短くなる傾向が認められる。諏訪之瀬島の小規模爆発によって発生する空振の圧縮相の継続時間は 0.6s 以下が82%を占め、0.2s 付近に peak がある。諏訪之瀬島の小規模爆発に伴う空振の方が桜島の爆発および連続小噴火よりも高周波成分が卓越しているといえる。1989年10月に東京工業大学の平林助教授によって撮影された諏訪之瀬島の御岳新火口内における噴出直後の噴煙柱の太さから vent の大きさを推定すると、vent の直径は 20 m 以下であり、桜島の南岳の火口内の vent の直径 50—60 m¹⁾ と比べると小さい。空振の圧縮相の継続時間のちがいは、vent (火道上端部) の直径のちがいに由来するものかもしれない。

以上3つの様式の異なる噴火に伴う地震動と空振の振幅・スペクトル等を比較した結果を **Table 1** にまとめた。

5. 議 論

5.1 地震動と空振の振幅の関係

桜島の爆発的噴火と BL 群発を伴う連続小噴火、諏訪之瀬島の小規模爆発について、地震動の最大振幅と空振の振幅の関係を **Fig. 12** に示す。まず、個々の噴火についてみると、桜島の爆発、連続小噴火、諏訪之瀬島の小規模爆発のいずれの場合も地震動と空振の振幅の間には明瞭な相関は認められない。このことは、噴火に伴う地震動の source と空振を発生させる source が異なることを示唆する。桜島の爆発の場合、空振は火口内の lava dome の直下 0.5 km 以浅に形成されるガス溜まりの爆発圧力を反映している^{1),9)}のに対し、爆発地震は火道内の深さ 1—3 km において発生し¹⁾、火口底における爆発に対してはトリガーとして作用すると考えられている¹²⁾。

次に、桜島の爆発と連続小噴火、諏訪之瀬島の小規模爆発の間では、地震動と空振の振幅の比がどう異なるかみてみる。**Fig. 12** において地震動の最大振幅が 5—7 mkine の噴火に注目すると、空振の圧縮相の振幅は、桜島の爆発では 0.2—4 mb、諏訪之瀬島の小規模爆発では 0.04—1 mb、桜島の連続小噴火では 0.1 mb 以下である。先に述べたように、空振の振幅が距離に反比例して小さくなるとすれば、諏訪之瀬島の小規模爆発による空振は桜島の火口とマイクロフォンの間の距離に相当する 5.6 km において、0.02—0.6 mb に

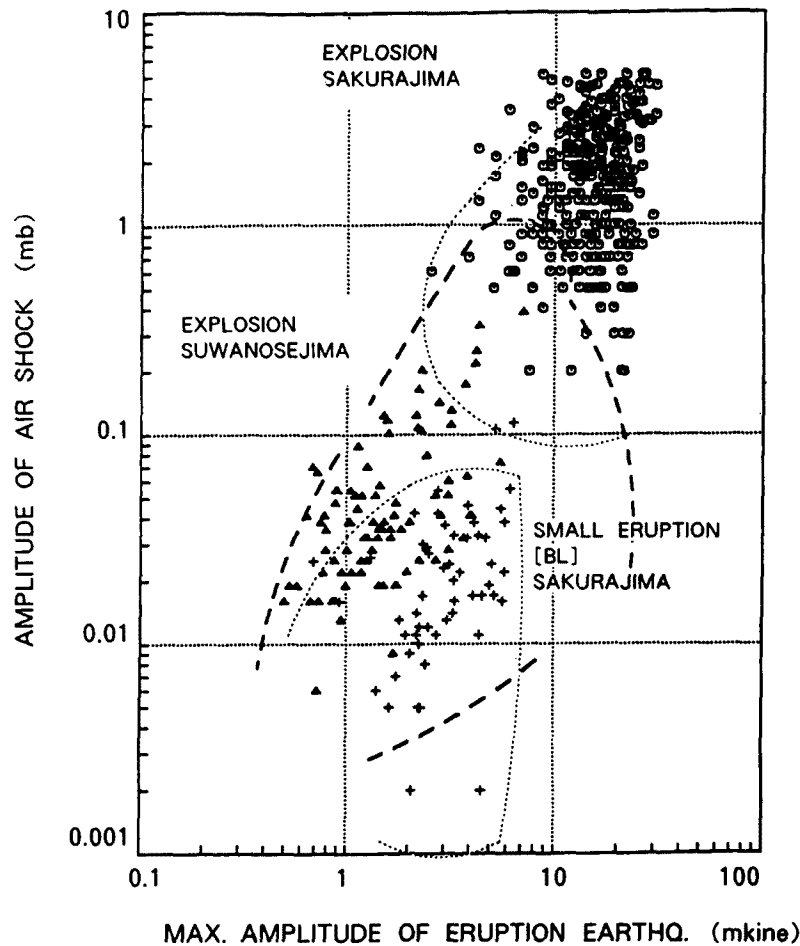


Fig. 12. Relationship between maximum amplitudes of earthquakes and those of compressional phase in air-shocks associated with three styles of eruptions.

なると推定される。したがって、同程度の規模の地震動を伴う爆発について

桜島の連続小噴火 ≦ 諏訪之瀬島の小規模爆発 < 桜島の爆発

の順に空振の振幅が大きくなるといえる。エネルギーに換算するには波動の種類・スペクトル等を考慮する必要があるが、このことは、地震動と空振による放出エネルギーの配分の割合がこれら3つの噴火様式の間で異なっていることを示唆する。噴火の総エネルギーを見積もる場合、放出エネルギーの形態毎の配分比を明らかにしておく必要がある。

5.2 十勝岳の爆発強度の評価

最後に、1988年12月—1989年2月に発生した十勝岳の空振の振幅を桜島の爆発と連続小噴火、諏訪之瀬島の小規模爆発と比較し、山頂爆発の強度を評価してみる。空振の振幅の範囲を Fig. 13 にまとめた。今回の十勝岳噴火では空振の振幅は $0.04\text{--}3.75\text{ mb (p-p)}^{20)}$ であることから圧縮相の振幅は $0.02\text{--}2\text{ mb}$ と考えられる。マイクロフォンは活動火口から 3.5 km の距離に設置されており、諏訪之瀬島の場合とほぼ同じであることから、最大値 2 mb は諏訪之瀬島の小規模爆発の空振の最大値 (1.8 mb) とほぼ等しいとみなせる。したがって、空振の振幅から爆発の強度を評価すると、1988—1989年十勝岳噴火における最大級の爆発





VOLCANO	INTENSITY OF INFRASONIC WAVES (AMPLITUDE OF COMPRESSIONAL PHASE)			
	0.01	0.1	1	10mb
SAKURAJIMA * 1 (EXPLOSION)			(Δ t : a few hours)  V = 100 - 240m/s	
Mt. TOKACHI * 2 (EXPLOSION)		 V < 120m/s		
SUWANOSEJIMA * 3 (SMALL EXPLOSION)				(Δ t : a few minutes)
SAKURAJIMA * 4 (SMALL ERUPTION)	 V < 60m/s		(Δ t : several seconds)	

Fig. 13. Comparison of intensity of air-shocks. The symbols "V" and "Δt" denote ejection velocity of volcanic bomb and time interval of volcanic eruption, respectively.
 *1 Δ=5.6 km, summit explosion at Minamidake, *2 Δ=3.5 km, explosive eruptions during December 1988-February 1989, *3 Δ=3.3 km, small explosions during 22-26 June and September 16-November 6, 1989, *4 Δ=5.6 km

は、諏訪之瀬島の最大級の小規模爆発と同程度といえる。このことは、爆発によって放出された噴石の飛散範囲が十勝岳において 0.7 km²¹⁾、諏訪之瀬島において 0.6 km であり、また推定される噴石の放出速度が十勝岳において 120-140 m/s²²⁾、諏訪之瀬島において 120 m/s とほぼ同じであることに対応する。ただし、十勝岳の爆発は噴出物量、空振の圧縮相の継続時間、発生時間間隔において諏訪之瀬島の小規模爆発とはかなり異なる。十勝岳における 1 回の爆発の噴出物量は、降下火山灰が 10³-10⁴ m³、火砕流・火砕サージが 10⁴-10⁵ m³²¹⁾ であり、諏訪之瀬島の小規模爆発の噴出物量より 1 桁以上大きいと思われる。また、十勝岳の空振の圧縮相の継続時間を記録²⁰⁾から読み取ると 0.5-1.0 s であり、爆発の発生時間間隔は最も短い場合で 49 分²⁰⁾であった。これらの特徴からみると十勝岳の爆発はむしろ桜島の爆発に類似している。

6. ま と め

1) 桜島の爆発的噴火および BL 群発を伴う連的小噴火と諏訪之瀬島の小規模爆発について地震動と空振の振幅およびスペクトルを比較した。その結果、地震動、空振とも

桜島の連続小噴火 ≤ 諏訪之瀬島の小規模爆発 < 桜島の爆発
 の順に振幅が大きくなっている。

2) 地震動の最大振幅が同程度 (5-7 m_{kine}) の爆発では、

桜島の連続小噴火 ≤ 諏訪之瀬島の小規模爆発 < 桜島の爆発
 の順に空振の振幅が大きくなっている。このことは、地震動と空振による放出エネルギーの割合が 3 つの噴火様式の間で異なっていることを示唆する。

3) 1988—89年十勝岳の山頂爆発の強度の評価を試みた。十勝岳の爆発的噴火の強度は、空振の振幅および噴石の放出速度からみると諏訪之瀬島における小規模爆発と同程度であると考えられる。しかし、噴出物量等からみると桜島の爆発に類似している。

なお、諏訪之瀬島において地震計および低周波マイクロフォンによって観測された噴火を、桜島の爆発と連続小噴火のような異なる噴火様式に分類するには、観測期間が短く表面現象の観察が十分ではないため、すべて小規模爆発として取り扱った。この点については今後さらに観測データの積み重ねが必要である。また、今回は3つのタイプの噴火を地震動・空気振動の振幅とスペクトルから比較したが、今後は地震動・空振の波動エネルギーの見積方法を確立して噴火様式によるエネルギー配分比のちがいを検討していく計画である。

本研究にあたっては京都大学防災研究所の加茂幸介教授に御助言いただきました。諏訪之瀬島における観測装置の設置作業にあたり、東京工業大学草津白根火山観測所の平林順一助教授、当観測所の高山鉄朗技官、十島村役場、伊東義一駐在員をはじめ諏訪之瀬島在住の方々に御協力いただきました。また、桜島および諏訪之瀬島における観測は桜島火山観測所職員によって維持されている。併せてお礼申し上げます。なお本研究の経費の一部は文部省科学研究費（課題番号：63540303）によってまかなわれた。

参 考 文 献

- 1) Ishihara, K.: Dynamical analysis of volcanic explosion, *Jour. Geodynamics*, 3, 1985, pp.327-349.
- 2) 石原和弘・井口正人：火山体の変形，表面活動と火山性地震発生の関係(1)―微小地震の群発現象について―，京都大学防災研究所年報，第32号 B-1，1989，pp. 1-11.
- 3) 平沢晃一・松本幡郎：鹿児島県トカラ列島諏訪之瀬島の火山地質，*火山*，第28巻，1983，pp. 101-116.
- 4) 村内必典：諏訪之瀬島火山の地球物理学的研究（第一報），国立科学博物館研究報告，第1巻，第2号，1954，pp.13-29.
- 5) Minakami, T., S. Utibori, S. Hiraga, T. Miyazaki, N. Gyoda and T. Utsunomiya: Seismometrical Study of Volcano Asama Part 1. Seismic and Volcanic Activities of Asama during 1934-1969, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 1970, pp. 235-301.
- 6) 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・松本時子・長田 昇・寺尾弘子：1973年浅間山噴火活動について，*地震研究所集報*，Vol. 50，1975，pp. 115-151.
- 7) 西 潔：火山性地震のスペクトル的研究（1）―爆発地震―，京都大学防災研究所年報，第23号 B-1，1980，pp. 29-35.
- 8) 加茂幸介・石原和弘・井口正人：桜島火山観測所における最近の研究成果，第7回桜島火山の集中総合観測報告書，1989，pp.103-115.
- 9) 井口正人：遠隔火山観測用多成分データ集録・伝送・集中管理システム，*火山*，第34巻，1989，p. 156.
- 10) 荒牧重雄：地質・噴出物，桜島火山の総合調査報告，1975，pp. 79-88.
- 11) 加茂幸介・石原和弘：地盤変動からみた桜島の火山活動，*桜島地域学術調査協議会調査研究報告*，1980，pp.19-28.
- 12) 井口正人・石原和弘・加茂幸介：火山弾の飛跡の解析―放出速度と爆発圧力について―，京都大学防災研究所年報，第26号 B-1，1983，pp. 9-21.
- 13) 井口正人：桜島火山の爆発によって放出された火山弾および火山レキの到達範囲，*鹿児島国際火山会*

- 議論文集, 1989, pp. 580—583.
- 14) 加茂幸介: 桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第23巻, 1978, pp. 53-64.
 - 15) 井口正人: 火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布, 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-1, 1989, pp. 13-22.
 - 16) 松本幡郎: 鹿児島県トカラ諸島諏訪之瀬島御岳火山の1960年活動について, 火山, 第9巻, 1964, pp. 57-62.
 - 17) 大森房吉: 日本噴火史上編, 震災予防調査会報告, 1918, pp. 209-211.
 - 18) Ishihara, K.: Pressure Sources and Induced Ground Deformation Associated with Explosive Eruptions at an Andesitic Volcano: Sakurajima Volcano, Japan, Magma Transport and Storage (ed. Ryan, M.P.), John Wiley and Sons, Ltd., 1990, (in press).
 - 19) 石原和弘: 地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜りおよび火道の推定, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-1, 1988, pp. 59-73.
 - 20) 岡田 弘・宮町宏樹・西村裕一・森 濟・前川徳光・鈴木敦生・岡山宗夫・本谷義信・笠原 稔・植木貞人・西村太志・浜口博之・山科健一郎・渡辺秀文・鎌山恒臣・井田喜明・清水 洋・大見士朗・須藤靖明・久保寺章・石原和弘・井口正人・西 潔: 物理計測による十勝岳の爆発的噴火活動の研究, 文部省科学研究費報告書 (No. 63115054), 1988年十勝岳火山噴火の推移, 発生機構および社会への影響に関する調査研究, 1989, pp. 31-56.
 - 21) 勝井義雄・河内普平・荒牧重雄・近堂祐弘: 1988—89年十勝岳噴火の推移, 文部省科学研究費報告書 (No. 63115054), 1988年十勝岳火山噴火の推移, 発生機構および社会への影響に関する調査研究, 1989, pp. 3-29.
 - 22) 松島喜雄・大島弘光: 1988年12月19日十勝岳噴火時に放出された火山岩塊について, 火山, 第34巻, 1989, p. 360.
 - 23) 石原和弘・井口正人・田平 誠: 火山爆発に伴う空気振動の観測, 第5回桜島火山の集中総合観測報告書, 1986, pp. 131-138.