

火山体内部の貯溜水における『高周波水中振動』と 火山活動との関係について

井 口 正 人

ON THE RELATION BETWEEN "HIGH-FREQUENCY ACOUSTIC WAVES" IN THE GROUNDWATER AND VOLCANIC ACTIVITY OF SAKURAJIMA VOLCANO

By Masato IGUCHI

Synopsis

A borehole with the depth of 405m was drilled in the lava dome, which is 2.8km northwest of the active crater of Minami-dake, Sakurajima Volcano. A hydrophone was installed in the groundwater at the bottom of the borehole to observe acoustic waves associated with the volcanic activity.

The acoustic waves observed by the hydrophone are classified into two types by the waveforms. One is a low-frequency acoustic wave of which dominant frequency is 8.8Hz. The acoustic waves of this type are inferred to be caused by seismic waves. The other is a high-frequency acoustic wave (HAW) of which dominant frequencies are both 25Hz and 8.8Hz. No significant seismic events are observed at the time of the occurrence of HAW.

Examining the relationship among the numbers of occurrence of HAW, seismic activity and the concentration of hydrogen gas monitored in Mochiki borehole-C which is 4.0km southwest of the active crater, the following results were obtained.

- 1) The increases in numbers of occurrence of HAW are observed after the significant increases in the concentration of hydrogen gas.
- 2) The increases in numbers of occurrence of HAW are observed at the almost same time when A-type earthquakes occurred beneath the active crater.
- 3) The change of numbers of the occurrence of the HAW is similar to that of B-type earthquakes. The increases in numbers of HAW are observed before B-type earthquake swarms and eruptions occur.

1. は じ め に

マグマの上昇やマグマ溜まり内の状態変化を反映していると考えられる火山体内の地下水の温度上昇・水位変化や地中ガスの成分の変化が、噴火に先行した事例は多い。例えば、桜島の安永噴火や大正噴火など、巨大山腹噴火の前には、海水の変色や井戸の温度上昇および急激な水位変化が観察された^{1) 2)}。山頂噴火の場合でも、太田ら³⁾は、山頂爆発の2～30時間前に温泉水の温度上昇が観測された事例を報告しており、山頂爆発直前の火山体内部における流体圧の上昇を反映しているものと考えている。また、Hirabayashi et al.⁴⁾は、温泉ガス中の水素ガス濃度が、噴火活動の活発化に先行して著しく高くなる現象を捕えた。

桜島火山観測所では火山体内部の地下水における音響や地下水の水位、温度および地中のガス成分の変化

を活動火口に近い場所において観測することを目的とし、桜島の西側山腹にあるハルタ山に深度 405 m の複合観測井を掘削した。現在、この観測井において水中音響の観測、地下水位、温度および地中ガスの測定を実施している。

今回はこのうち水中音響の観測結果について報告する。ハイドロフォンに捕捉された水中振動は、その卓越周波数から 2 つに分類される。1 つは、8.8 Hz 付近の周波数成分が卓越する水中振動 (LAW) であり、地震動によって引き起こされると考えられる。もう 1 つは、25 Hz 付近の高周波成分が 8.8 Hz 付近の周波数成分と同程度に含まれる振動 (HAW) であり、地震計には、その水中振動に対応するような顕著な地震動は観測されない。本稿においては、この HAW の発生頻度と火山活動との関係について述べる。

なお、本稿は研究発表講演会においては『火山体深部の貯留水における水中音響の解析』と題して発表されたものである。

2. 観測井と観測装置

ハルタ山は桜島南岳山頂火口から北西へ 2.8 km の距離にある (Fig. 1)。ハルタ山の地質構造および観測井の構造・観測計器の配置を Fig. 2 にまとめて示した。ハルタ山は、表面は火山灰と軽石に覆われているが、大部分は厚さ約 300 m の溶岩層である。また、標高 50 m 以下は角レキ凝灰岩層となっており、その地層内に地下水が貯留されている。地下水の水位は、標高約 25 m の位置にあり、温度は 41.2°C である。

複合観測を実施している観測井は、深度 405 m であり、岩片の崩落防止のために、全深度にわたって、ケーシングパイプを挿入した。ただし、地中ガスや地下水の流通のために、破碎帯のある深度 220 m~247 m と 378 m~405 m はストレーナーパイプである。

観測計器の検出部は、観測井内の地下水部分、地下水の直上部分、中間部分 (深度 200 m 付近) の 3 か所に分けて設置した。地下水部分は、ハイドロフォン、水位計、温度計を設置した。地下水の直上部分と中間部分には、温度計と火山ガス吸入口 (テフロンパイプ) を設置した。地上に吸い上げられた火山ガスは自動ガスクロマトグラフ装置により 6 時間毎に分析される。これらの観測計器の設置深度と性能を Table 1 にまとめて示した。

このうち、ハイドロフォンの出力信号は、トリガー方式により、アナログデータレコーダに記録した。ハイドロフォンに観測された水中振動が地震動によって引き起こされたものかどうかを判定するために、複合観測井から 200 m の距離にある別の観測井の孔底 (深度 290 m) に設置した地中地震計の出力信号を同一データレコーダにあって記録した。ハイドロフォンと地震計の総合周波数特性は、それぞれ、3~30 Hz および 1~30 Hz が、0~-6db の範囲内において平坦である。

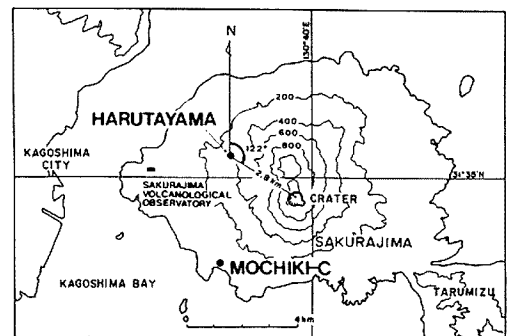


Fig. 1. Locations of boreholes

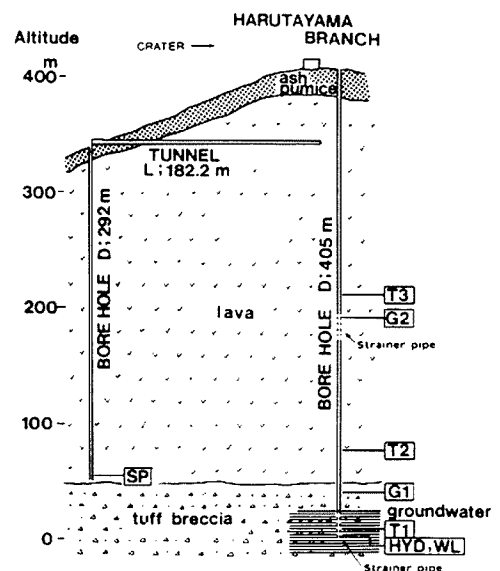


Fig. 2. Geological structure of Harutayama lava dome and the arrangement of the instruments in the borehole.

Table 1. Specification and depth of instruments in the borehole

Instruments	Abbrev.	Specification	Depth
Hydrophone	HYD	sensitivity: 25 V/bar	400 m
Water level gauge	WL	resolution: 1 cm (0-50 m)	400 m
Thermometer	T1	resolution: 0.01 degrees	395 m
Thermometer	T2	resolution: 0.1 degrees	323 m
Thermometer	T3	resolution: 0.1 degrees	191 m
Teflon tube	G1	outside diameter 12 mm	0-368 m
Teflon tube	G2	outside diameter 10 mm	0-210 m
Seismometer	SP	sensitivity: 2.5 V/kine	290 m

持木地区観測井C孔の水素ガス濃度は、山頂噴火活動の活発化に先行して増加することが知られているので⁴⁾、HAWの発生頻度と水素ガス濃度との関係もあわせて調べた。持木地区観測井C孔は、山頂火口から南西へ4.0 kmの距離にある深度10 mの観測井である(Fig. 1)。孔内には温度が40°C前後の温泉水があり、その水位は、海岸付近にあるため、海水面とほぼ同じ高さである。この観測井においては、温泉からの火山ガス、温泉の温度および電気伝導度の連続測定が行われている。なお、温泉からの火山ガスは、ハルタ山複合観測井と同様に、自動ガスクロマトグラフ装置によって6時間毎に分析されている⁵⁾。

3. 水中振動の波形について

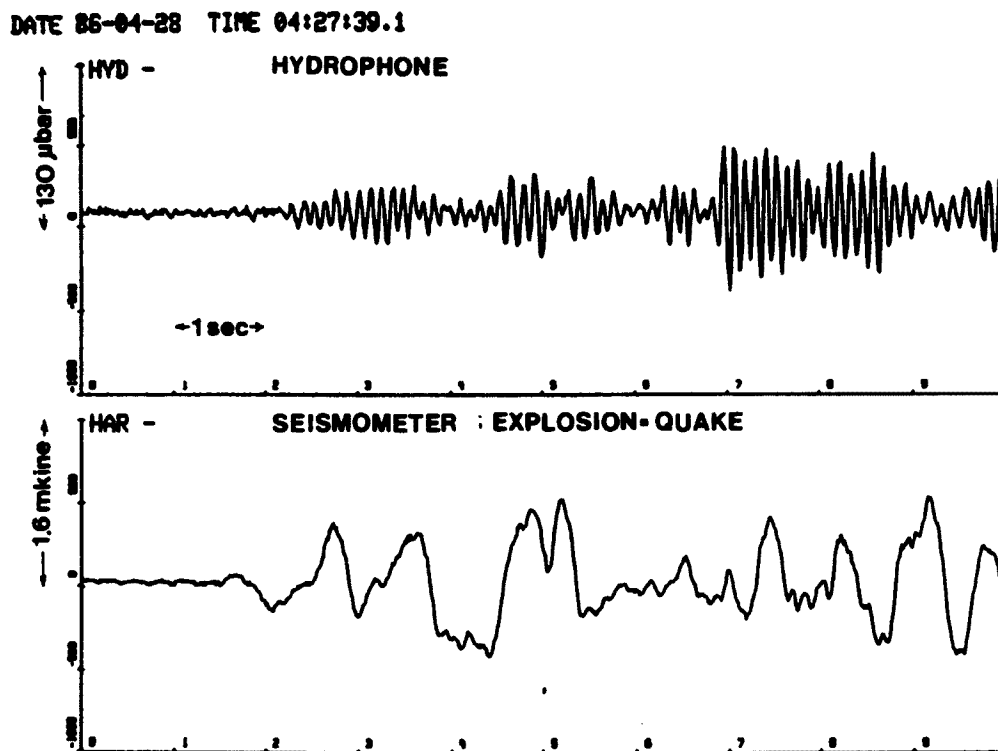


Fig. 3. An example of the record of a low-frequency acoustic waves by the hydrophone and the seismogram of the explosion-quake observed at the same time.

ハイドロフォンに観測される水中振動はその卓越周波数から2種類に分類されることを、最初に述べたが、本章においては、それらの違いをFFTによるスペクトルと地震動との関係について示し、比較・検討した結果について述べる。LAWとHAWの記録例を同時に得られた地震動の記録とあわせて、それぞれ、Fig. 3とFig. 4に示した。

3.1 スペクトル

LAWのスペクトルの例をFig. 5に示した。スペクトルは初動から10.24秒の波形を用いて求めた。スペクトルからは、8.8 Hz付近の極めて狭い周波数帯域の成分が卓越することがわかる。

一方、HAWのスペクトルは、Fig. 6に示したように、25 Hz付近の高周波成分が8.8 Hz付近の成分とほぼ同程度に含まれている。この例では25 Hz付近のpeakの振幅は、8.8 Hz付近のpeakの振幅の約3/4であるが、25 Hz付近のpeakの振幅の方が大きい場合もある。なお、スペクトルはHAWの初動から1.28秒の振動波形を用いて計算した。

3.2 地震動との関係

次に、LAWと地震動の関係について述べる。Fig. 3に示した例では、同時に爆発地震が観測されており、その地震動は、水中振動よりも約0.6秒先行して始まっている。

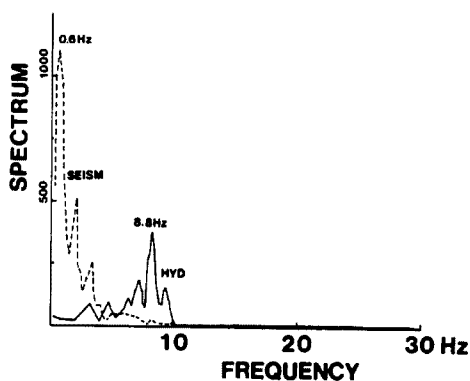


Fig. 5. Spectrum of the low-frequency acoustic waves and the explosion-quake shown in Fig. 3.

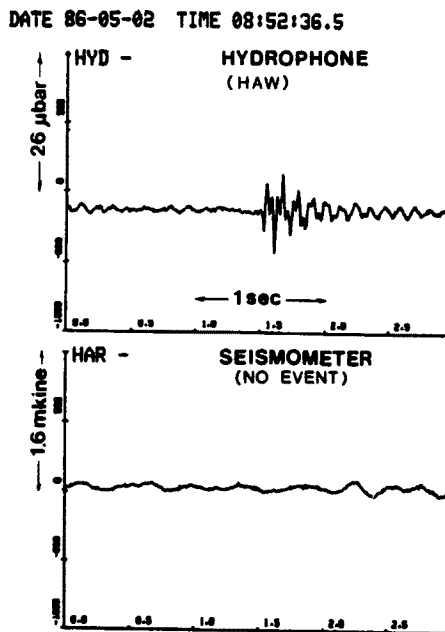


Fig. 4. An example of the record of a "High-frequency acoustic waves" by the hydrophone and the seismogram in which no significant events are observed.

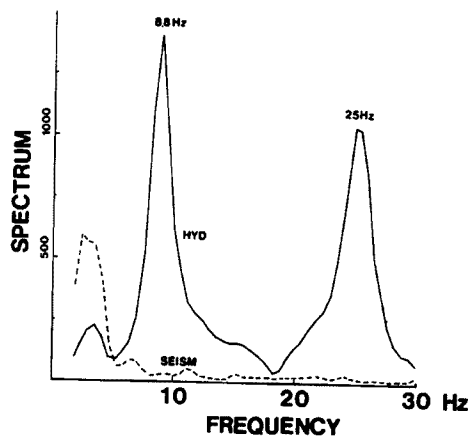


Fig. 6. Spectrum of the "High-frequency acoustic waves" and the seismogram shown in Fig. 4.

このように、ハイドロフォンにLAWが観測される場合は、必ず、火山性地震、火山性微動、近地地震、砕石発破などの顕著な地震動が観測されている。また、その水中振動の継続時間は、地震動の継続時間にほぼ等しい。ただし、短周期成分の減衰が著しい地震動のコード部においては、LAWの振動がみられない場合

がある。これらのことから考えて、LAW は地震動によって引き起こされたものと推定される。

一方、Fig. 5 に示したように、HAW の振動継続時間は2秒以下と短く、振動が継続している間は、それに対応するような顕著な地震動の発生はみられない。

なお、観測された HAW のうち、最大のものは初動振幅が $33\mu\text{bar}$ であった。また、初動振幅が $5.2\mu\text{bar}$ から $9.1\mu\text{bar}$ 未満である HAW の発生頻度が最も高かった。

4. HAW の発生頻度と火山活動

桜島火山においては A 型地震の発生と B 型地震の多発および持木地区観測井 C 孔における水素ガス濃度の増加は山頂噴火活動の活発化と密接な関連があることが従来から指摘されている^{4), 6)}。初動振幅が $3.9\mu\text{bar}$ 以上の HAW の発生頻度と A 型地震、B 型地震、山頂爆発、持木地区観測井 C 孔の水素ガス濃度との関係を調べた。期間は1986年10月18日から1987年1月31日までである。

HAW、山頂爆発および B 型地震の日別発生頻度の積算値と火口直下における A 型地震の発生、持木地区観測井 C 孔における水素ガス濃度を Fig. 7 に示した。HAW の発生頻度の推移は、B 型地震の発生頻度の推移に非常に似ている。すなわち、HAW の発生頻度は1986年の11月末から顕著な増加を示したが、B 型地震の発生頻度も12月中旬から増加した。また、1987年1月6日以降において、HAW の発生頻度が急激に減少

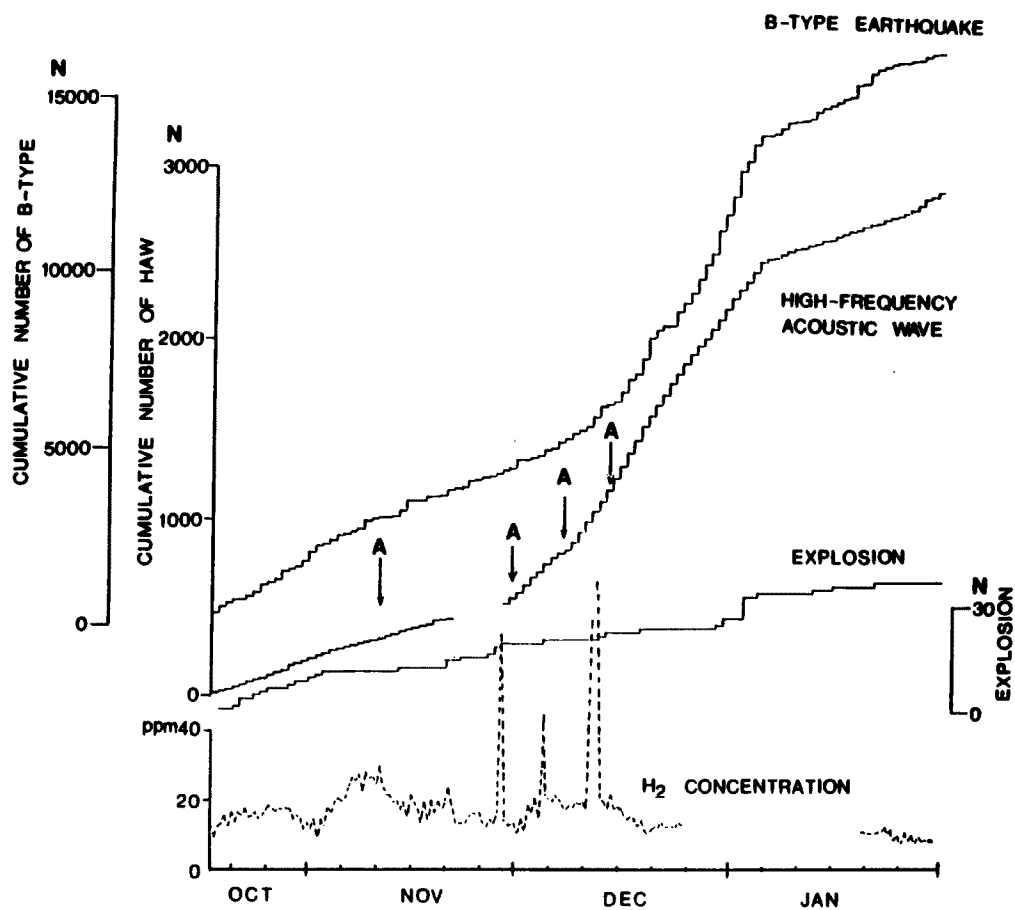


Fig. 7. Relation among daily cumulative numbers of "High-frequency acoustic waves", explosive eruptions and B-type earthquakes, occurrence of A-type earthquakes (A) and concentration of hydrogen gas.

した時は、B型地震の発生頻度も同様に減少した。ただし、HAW と B型地震の発生頻度の変化は、減少時にはほぼ同じ時期であったが、増加時は、HAW がB型地震に先行している。

1986年11月30日から12月21日にかけての HAW の発生頻度の増加は、11月28~29日、12月5日、12月12日の持木地区観測井C孔の水素ガス濃度のスパイク状の増加と11月30日、12月7日、12月14日の火口直下におけるA型地震の発生と関連があるようである。

そこで、HAW の顕著な増加現象がみられる期間についてその発生頻度と火山性地震の発生頻度および水素ガス濃度との関連をさらに詳しく調べた。1986年11月23日から12月16日までの HAW の1時間毎の発生頻度の積算値と、B型地震の1時間毎の発生頻度、火口直下におけるA型地震と山頂噴火の発生時刻、持木地区観測井C孔の6時間毎の水素ガス濃度を Fig. 8 に示した。B型地震については1時間の発生頻度が10回未満のものは省略した。

この期間の HAW の発生頻度の変化についてまとめると次のようになる。11月21日から29日までは、欠測なのでどの時点において HAW の発生頻度が増加したかは不明であるが、11月29日に観測を再開した時には、HAW の発生頻度は、11月20日以前の11回/日から39回/日に増加していた。続いて HAW の発生頻度は、12月10日の0時頃には59回/日、さらに、12月14日の22時頃には71回/日に増加した。

このような HAW の顕著な発生頻度の増加と水素ガス濃度のスパイク状の増加およびA型地震の発生の時間的な関係についてみてみると次のようになる。

11月28~29日、12月5日、12月12日に持木地区観測井C孔の水素ガス濃度はスパイク状に増加した。この時の水素ガス濃度の peak 値は、それぞれ、最大 68 ppm, 44 ppm, 87 ppm であった。この水素ガス濃度

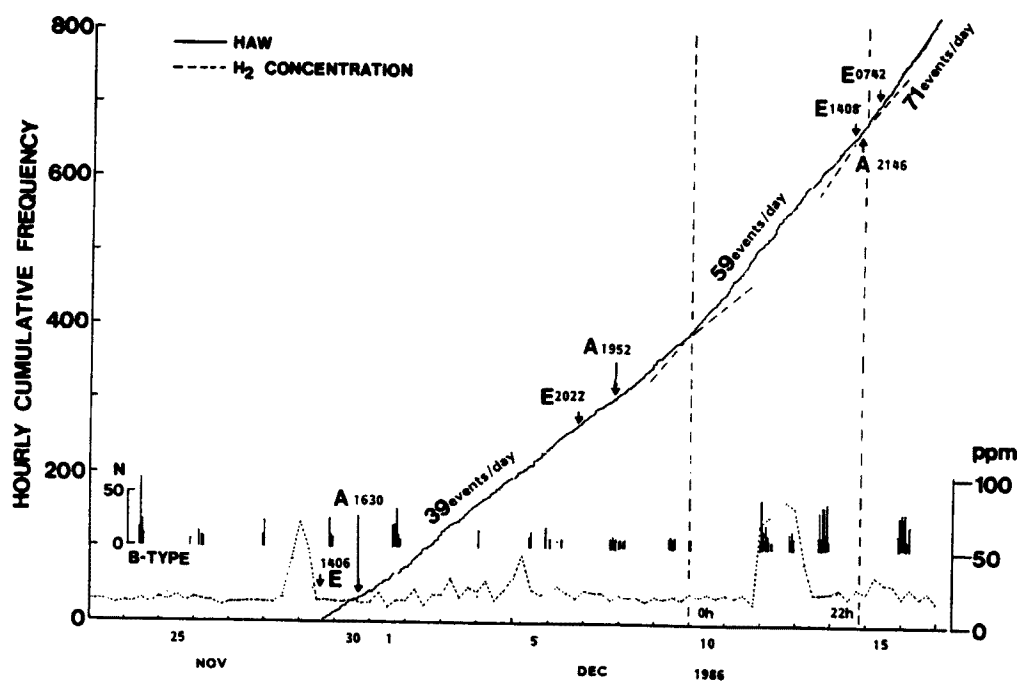


Fig. 8. Relation among hourly cumulative numbers of "High-frequency acoustic waves", A-type earthquakes, explosive eruptions, hourly numbers of B-type earthquakes, concentration of hydrogen gas during the period from November 23 to December 16, 1986. The numerals with arrows denote the origin times of A-type earthquakes (with symbol "A") and explosive eruptions (with symbol "E").

の増加現象は、それぞれ、11月30日、12月10日、12月14日における HAW の発生頻度の増加現象に2～5日先行している。

また、A型地震は11月29日の16時30分、12月7日の19時52分さらに、12月14日の21時46分に火口直下において発生した。これは、それぞれ、11月30日、12月10日、12月14日における HAW の発生頻度の増加とはほぼ同じ時期である。

なお、1986年11月12日にも火口直下においてA型地震が発生したが、この時は HAW の発生頻度の顕著な変化はみられなかった。

初動振幅の大きい HAW と火山性地震および水素ガス濃度との関係も調べてみたが、明瞭な関係をみいだすことはできなかった。

HAW の発生機構についてはこれまでの観測および解析だけではよくわからないが、以上述べたように HAW は、山頂噴火の前駆現象と考えられている水素ガス濃度の増加⁴⁾、火口直下におけるA型地震の発生およびB型地震の多発⁶⁾と関連が認められることから火山活動を反映した現象である可能性が高い。

5. お わ り に

活動火口から2.8 kmの距離にあるハルタ山複合観測井において水中音響観測を行った。1986年10月18日から1987年1月31日までの HAW の発生頻度と火山性地震の発生頻度及び水素ガス濃度との関連を調べ、次の結果を得た。

- 1) この期間の HAW の発生頻度は、B型地震の発生頻度によく似た推移を示した。
- 2) HAW の発生頻度の増加は、水素ガス濃度のスパイク状の増加から2～5日後、A型地震の発生とはほぼ同じ時期であり、B型地震の多発には先行した。

本稿を終わるにあたり、御助言を頂いた加茂幸介教授に御礼申し上げます。観測装置の保守点検は桜島火山観測所職員があたっている。また、東京工業大学の平林順一博士には、ハルタ山複合観測井および持木地区観測井C孔における水素ガス濃度のデータを借用させて頂きました。記して、感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 大森房吉：日本噴火志，1918，pp. 191-200
- 2) 鹿児島県：桜島大正噴火誌，1927，pp. 41-45
- 3) 太田一也・露木利貞：地下水・温泉の観測結果，第2回桜島火山の集中総合観測，1977，pp. 81-87
- 4) Hirabayashi J., J. Osaka and T. Ozawa: Geochemical Study on Volcanic Gases at Sakurajima Volcano, Japan, J.G.R., Vol. 91, No. B12, 1986, pp. 12,167-12,176
- 5) 小坂丈予：火山ガス測定による噴火予測に関する基礎研究，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，1984，pp. 26-34
- 6) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知，火山第2集，第23巻，第1号，1978，pp. 53-64