

## 阿蘇中岳で発生した土砂噴出現象に伴う震動波形について

森 健彦・須藤 靖明・筒井 智樹・吉川 慎・  
小野 博尉

### SEISMIC EVENTS ACCOMPANING A SERIES OF MEDIUM SIZE PHREATIC EXPLOSION IN ASO VOLCANO

By *Takehiko MORI, Yasuaki SUDO, Tomoki TSUTSUI,*  
*Shin YOSHIKAWA and Hiroyasu ONO*

#### Synopsis

A dense seismic array network has been spread around the active crater of Aso Volcano, and a train of seismic events were observed accompanying a series of medium size phreatic explosions, "dosya-funshutu". This type of seismic motions had been classified as a special kind of volcanic tremors accompanying phreatic explosions. We found that the volcanic tremors contains a train of small seismic events with approximately eight seconds intervals.

#### 1. はじめに

阿蘇山中岳第1火口は、1993年8月頃に湯だまりが火口底全面に広がり、表面の色が緑色を呈し、静穏な状態が続いていたが、1994年3月末頃より第1火口南側の火口壁直下で噴湯現象がはじまり、5月には小規模の土砂噴出現象が確認されるようになった。噴湯現象のはじまりとともに、湯だまりは白濁し、湯面が波打つようになってきた<sup>1)</sup>。

ここにでてくる土砂噴出とは、火口底が湯だまり状態の時に底にたまっている土砂を湯水と共に吹き上げる現象で一種の水蒸気爆発である。この現象は数mから数10mの高さで断続的に吹き上げることもあり、激しいものなると人頭程度の噴石を土砂とともに火口縁を越えて火口の外まで(火口縁は火口底から約150m)飛散させることもある。

1994年6月に入ると、火山性微動の振幅の急激な変動を観測した(Fig. 1)。この期間中、噴湯現象はたびたび観測されたが、土砂噴出現象は確認されなかった。7月から8月にかけては比較的静穏な活動で推移したが、9月6日ごろより微動の振幅が漸増し(Fig. 2)、9月11日11時29分には火口から西に1kmの阿蘇山測候所で震度1を記録する火山性微動を2年ぶりに記録した。この火山性微動の際には、火口から南西約1kmにある火山研究施設本堂観測所(HND)において、空振を伴った継続時間約6分の火山性微動が観測された。その後大規模な土砂噴出現象は、10月末まで断続的に観測され、土砂噴出に伴う噴石(本質物質は含まない)が第1火口縁を越えて火口東方向および西方向へ飛散し、大きいものでは半身大のものも含まれていた。

筆者らは、このような土砂噴出に連動した火山性微動の発生様式と発生源を解明すべく、第1火口に極めて接近した高密度地震観測網(Fig. 3)を構築していた。その結果、9月11日17時42分の空振を伴う

土砂噴出現象に連動した火山性微動（震度1）を記録することができた。この時、筆者らは観測のため火口縁に滞在していたので、火口底から火口縁付近まで土砂と噴石を吹き上げる比較的規模の大きな土砂噴出現象を確認できた。このように火口の極めて近傍にはりめぐらされた観測網で土砂噴出に伴う地震動を観測した例は、いままでほとんど報告されていない。本稿ではこの時に得られた記録を示し、若干の解析結果を報告する。

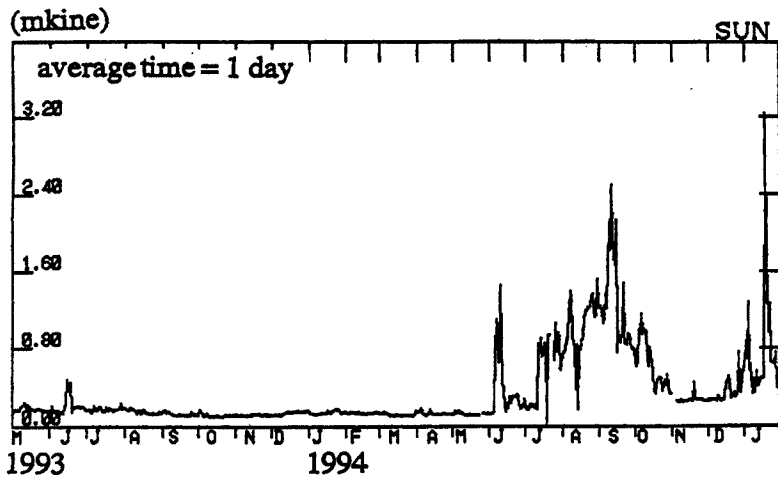


Fig. 1. Amplitude variation of volcanic tremors (Mar. 1993–Jan. 1995)

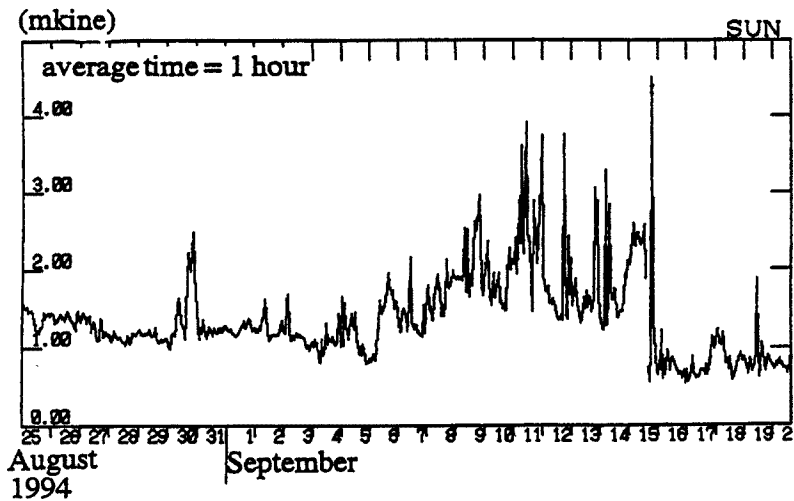


Fig. 2. Amplitude variations of volcanic tremors (25 Aug. 1994–20 Sep. 1994)



Fig. 3. A dense seismic array network used in this study of Aso Volcano around active crater (■: The dense network, ●: permanent station)

## 2. 観測概要

今回の観測で用いた観測網は、第 1 火口の北側をほぼ 4 分の 3 周している。地震計はすべて固有周期 4.5 Hz の上下動で、おおむね火口を中心とする半径 250 m の円周上に約 20 m 間隔で 48 台設置されている。記録計には、IFP アンプを内蔵した地震探鉱器 (米国 BISON 社製 9048 A) を使用した。地震計と記録計の間は、25 m 間隔の接続口をもつ CDP ケーブルで接続されている (Fig. 4)。また、データは手動トリガー方式で、最大収録時間は 250 Hz でサンプリングされて 124 秒である。本稿ではこの高密度地震観測網を「高密度ネット」と呼び、他の常設観測網と区別することにする。

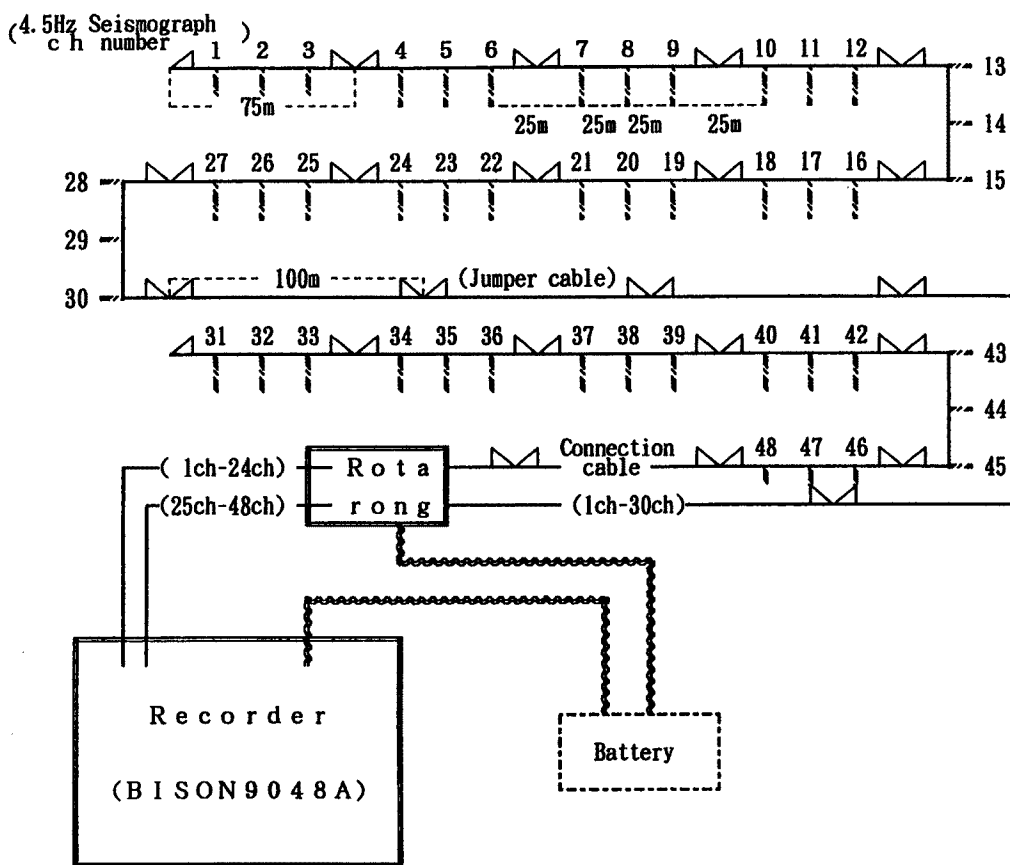


Fig. 4. Observation system of the dense network

## 3. 1994 年 9 月 11 日 17 時 42 分の土砂噴出現象

### 3.1 波形記録

この土砂噴出発生時に「高密度ネット」で観測された記録波形を Fig. 5 に示す。この記録は 17 時 42 分 00 秒から 124 秒間記録したものである。この記録では、動物による食害で一部のケーブルが破損していたために、合計 30 チャンネル分の記録しか得られていない。

この記録で特徴的なのは、収録開始後 10 秒付近から約 8 秒間隔で、比較的是っきりしたイベントが約 2 分間に A~R までの合計 18 回認められることである。また、33~53 秒付近までの約 20 秒間は比較的

DATE: 11, Sep. 1994 17:42:00

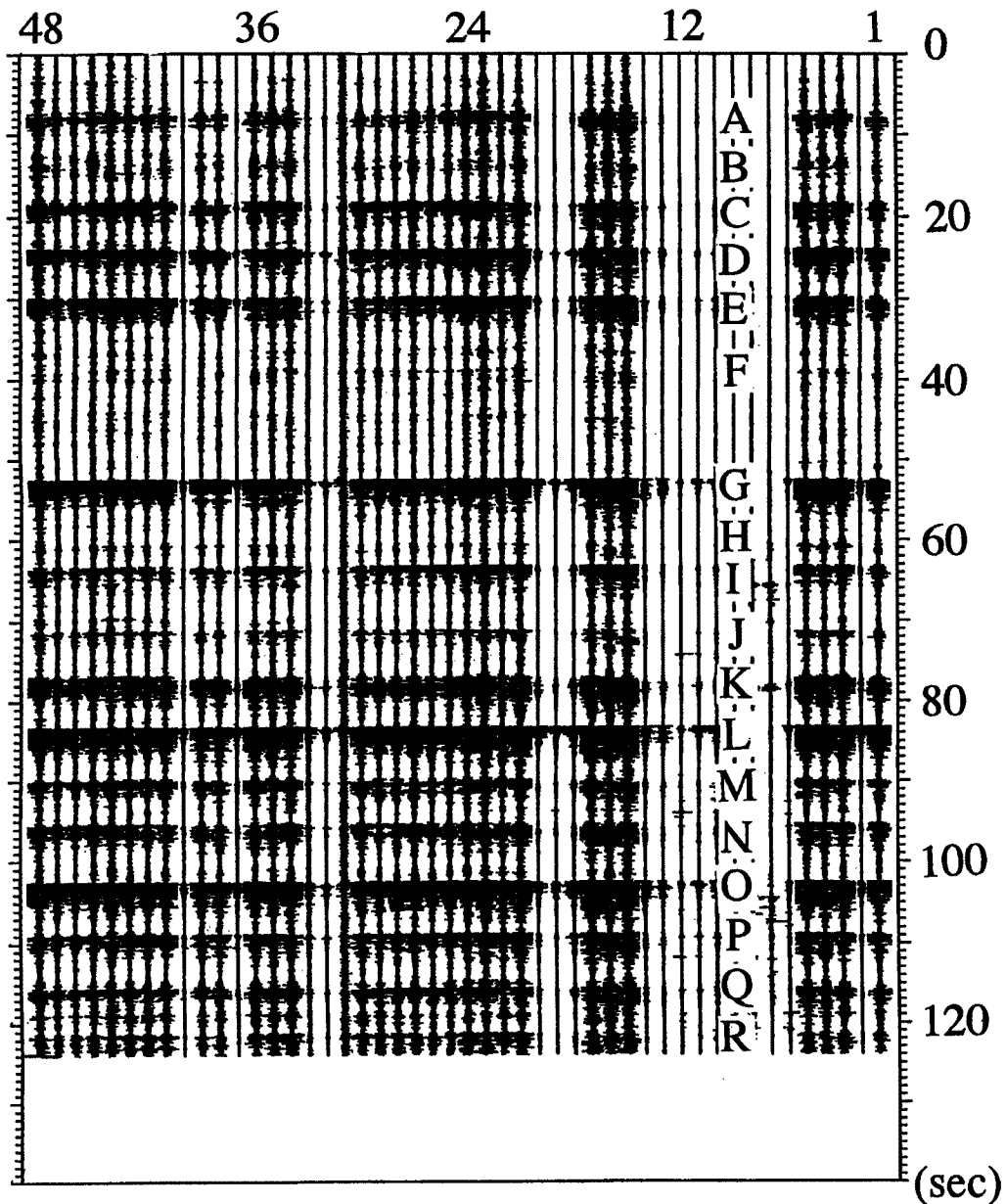


Fig. 5. The record of volcanic tremor on the dense network after 17:42 JST, 11, Sep. 1994

静穏となっていることも注目される。さらに、それぞれのイベントのうち、52秒(G)・83秒(L)・103秒(O)付近で発生しているイベントは、立ち上がりが他のそれに比べてはっきりしている特徴がある。Fig. 6には17番観測点でえられた、イベントG・Iを示す。どちらも波形は振り切れているが、比較的高周波の波が卓越していることがみられる。

ここで、火山研究施設の常設観測点で得られた連続記録と「高密度ネット」の記録を比較する。常設観測点の配置図を Fig. 7に示す。土砂噴出が発生した時刻前後の「高密度ネット」で得られた記録と常設観

### No.17

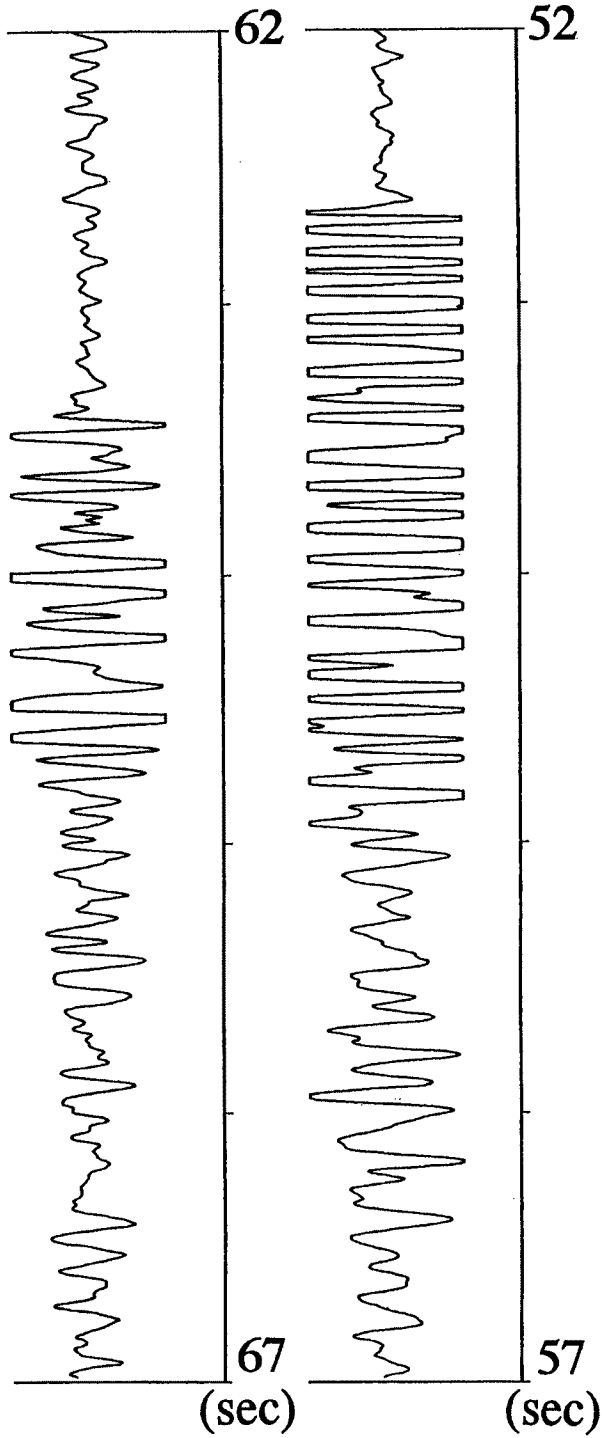


Fig. 6. Zoomed up displays of events G and I in the 17 th station

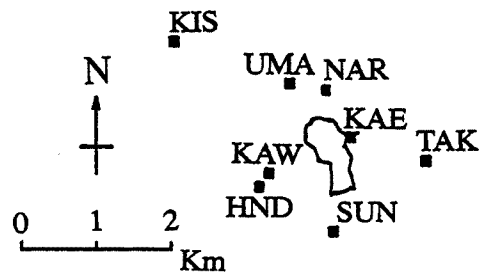


Fig. 7. Location of AVL permanent stations

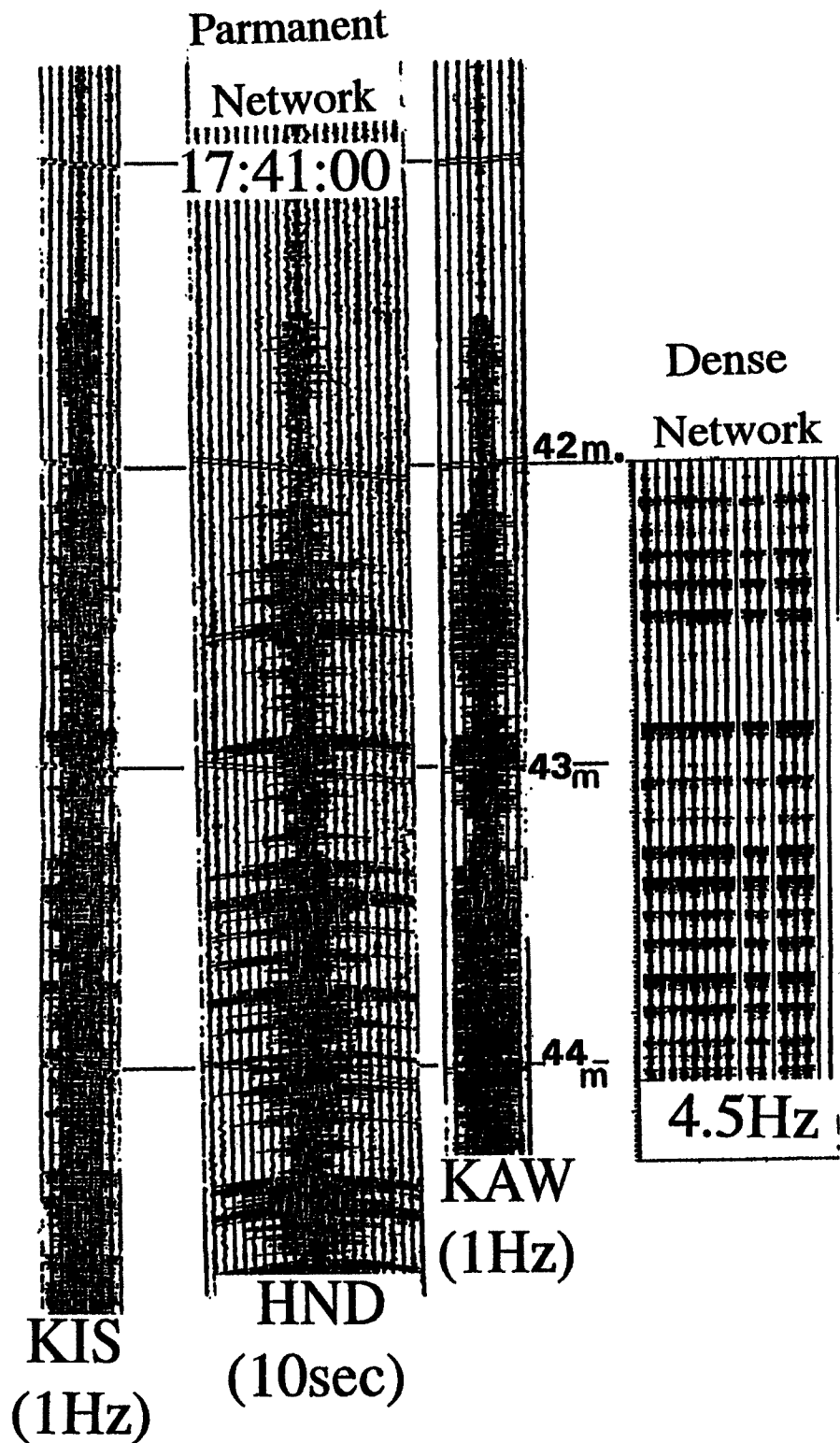


Fig. 8. A comparison of records of AVL permanent network and by the dense network

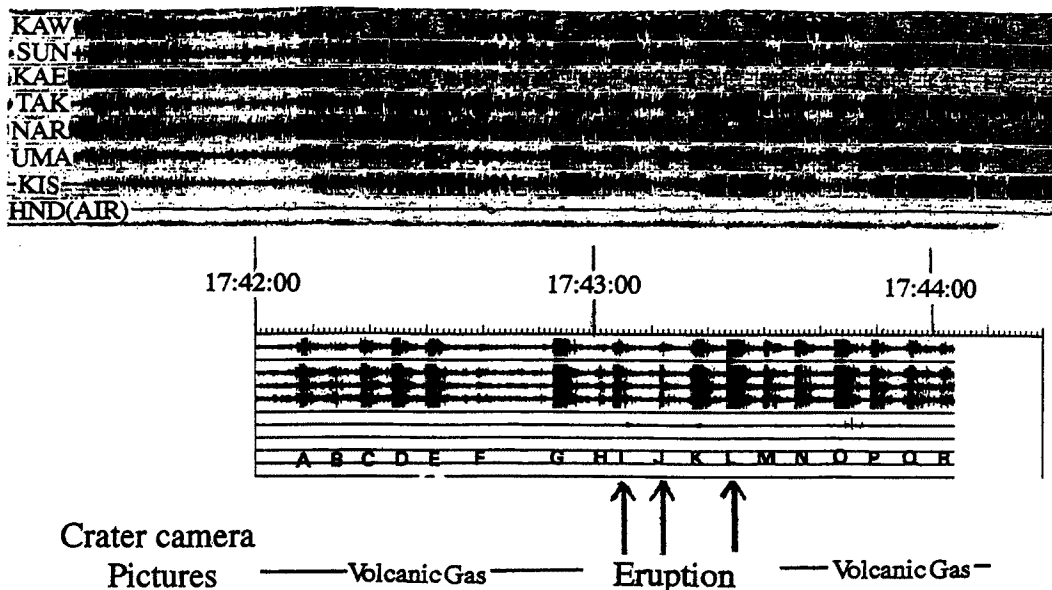


Fig. 9. A correspondence between visual evidences and seismic as well as barometer records

測点で連続記録された記録を Fig. 8 に示す。KAW・KIS の各観測点における 1 秒計の記録では、「高密度ネット」でみられるように、個々のイベントを分離して確認することはできないが、HND で観測している 10 秒計 (PELS) の記録では、「高密度ネット」と同様に個々のイベントを分離して確認することができる。

つぎに、イベントトリガー方式によって火口周辺の常設観測点 (固有周期 1 秒) で記録された波形と HND で観測されたペローズ気圧計の空振波の記録 (HND (AIR)) との比較を Fig. 9 に示す。イベントトリガーの記録は連続記録の波形よりも個々のイベントの立ち上がりが明瞭であるが、「高密度ネット」でのデータほど明瞭に分離することができない。一方、ペローズ気圧計での空振波の記録で最大振幅を記録している時刻は 17 時 42 分 38 秒頃である。仮に、この空振源を第 1 火口と仮定すると、本堂観測所と第 1 火口との距離が約 1 km であることから、空振の発生時刻は空振波を記録する約 3 秒前 (42 分 35 秒頃) ということになる。注目すべきことは、この時刻が「高密度ネット」の記録では静穏な時間帯であるということで、空振の発生時が地動の揺れと必ずしも一致していないことを示している。

Fig. 10 に 9 月 11 日 17 時 36 分 00 秒からの「高密度ネット」の記録を示す。この記録は土砂噴出の始まる約 6 分前で、連続的な火山性微動が発生していた時間帯である。「高密度ネット」においても連続的な火山性微動を記録しており、Fig. 5 に見られるような地震らしいイベントの波形は見えない。このことから、17 時 42 分 00 秒からの「高密度ネット」で記録された波形は、土砂噴出現象にともなって発生した特殊な火山性微動の記録であるといえる。

### 3.2 土砂噴出現象

阿蘇中岳第 1 火口には、阿蘇火山博物館がビデオカメラを設置しており、火口内における噴出活動の様子を記録している。その映像から、9 月 11 日 17 時 42 分頃からの表面活動の様子を調べることができた。

映像で、土砂噴出の現象がはっきりと確認することができたのは、「高密度ネット」における 65・72・84 秒付近である。Fig. 9 には Eruption として記入してある時刻である。ペローズ気圧計の記録で最大振幅が現れた 35 秒付近は、火口内に火山ガスが多く立ちこめていたため、対応した噴出があったかどうかの視認はできなかった。



DATE : 11, Sep. 94 17:36:00

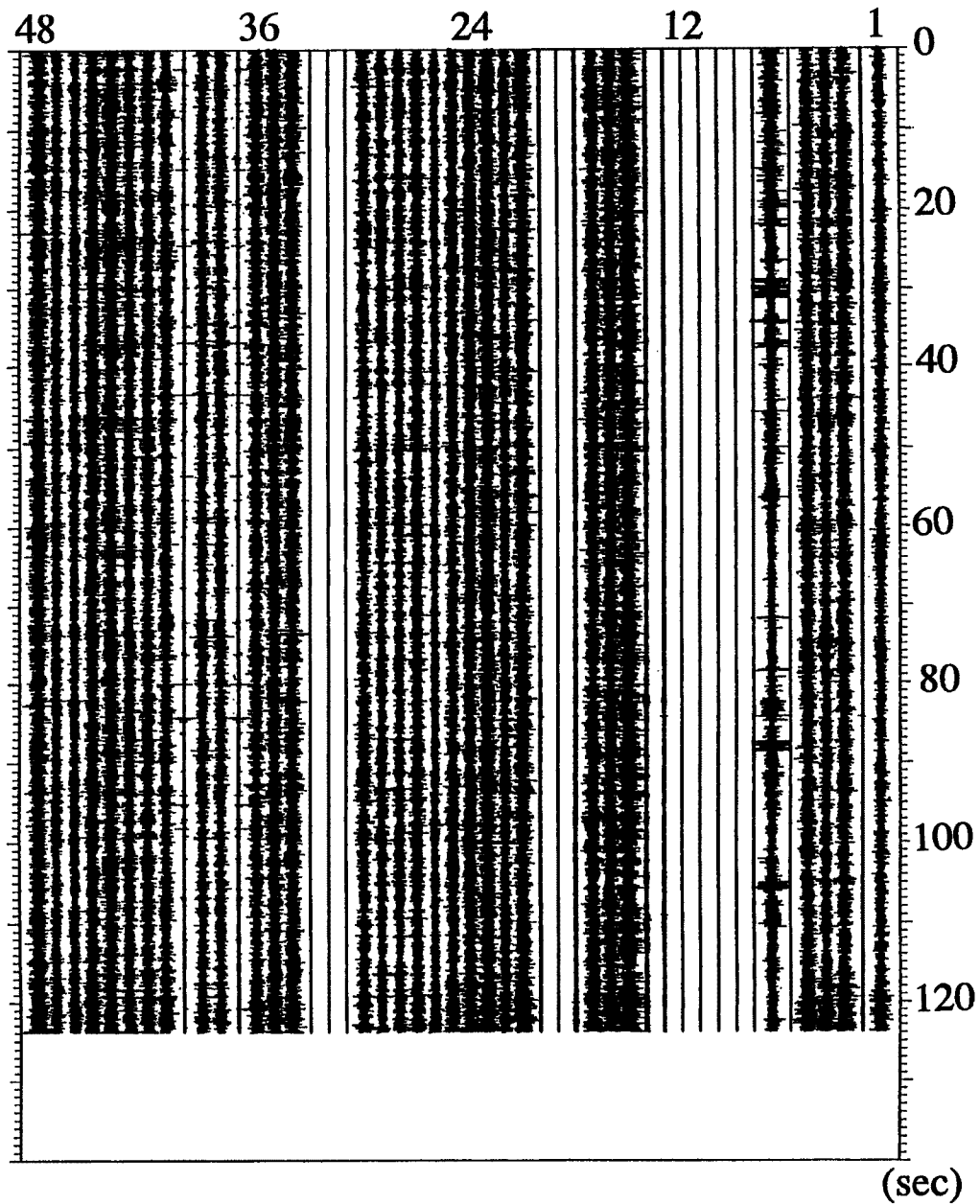


Fig. 10. The record of volcanic tremor on the dense network after 17:36 JST, 11, Sep. 1994

### 3.3 記録されたイベントの震源

「高密度ネット」で観測されたそれぞれのイベントの初動到来時刻からその震源を求めてみた。ここで用いた地震波速度構造は、地震計を火山灰の堆積している表層に設置しているため、吉川ほか<sup>2)</sup>の人工地震により求められた深さ 300 m までの P 波構造と、常設観測点で用いられている速度構造とを参考にして、表層部に低速度層を持つ水平 4 層構造 (Fig. 11) を仮定した。

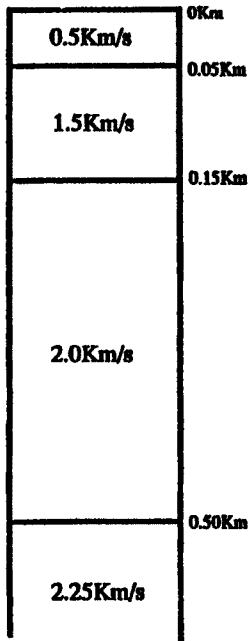


Fig. 11. Velocity structure for determination of hypocenter

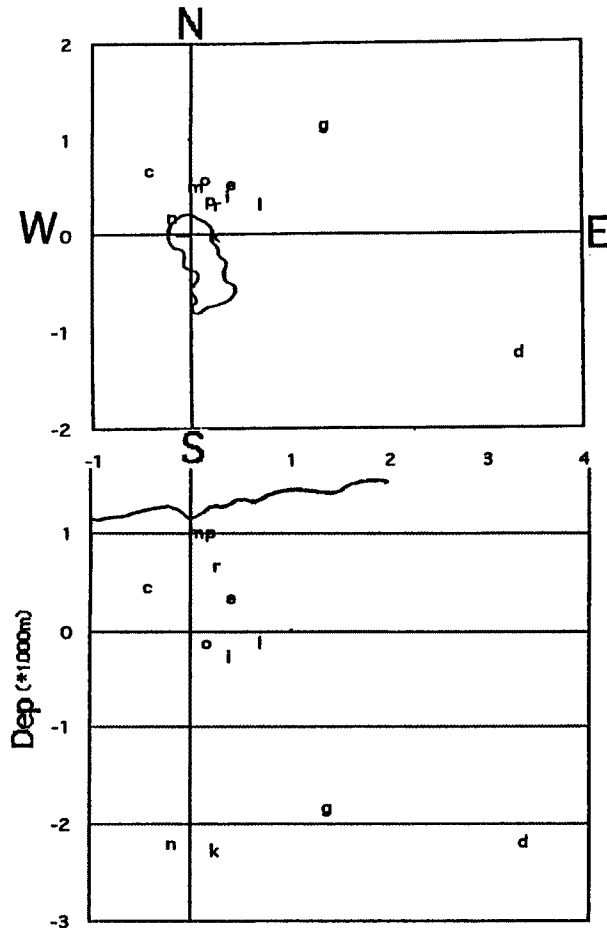


Fig. 12. Distribution of hypocenters for each seismic event in the tremor

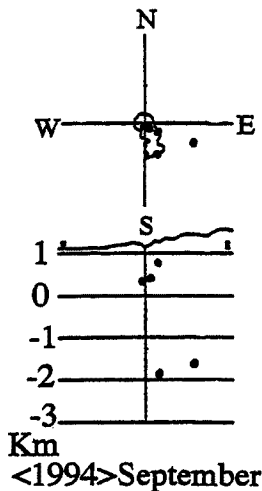


Fig. 13. Distribution of volcanic earthquakes in September 1994

なお、今回の震源決定には、「高密度ネット」の観測システムが他の常設観測点と相対的な時間精度を保っていないことと、常設観測点で記録された個々のイベントの初動読みとりが不可能であることから、データの併合処理はしていない。

Fig. 12 は、18 個のイベントのうち、全観測点にわたって初動の読みとりが可能であった 12 個のイベント (C・D・E・G・I・K・L・M・N・O・P・R) の震源の位置を示す。

震源の深さ分布の様子を見ると、大きく 2 つのグループに分けることができる。一つは海拔 0 km より浅い領域で発生しているタイプ (C・E・I・L・M・O・P・R) ともう一つは深さ 2

km にある深い震源を持つタイプ (D・G・K・N) である。この 2 つのグループの震源分布は、常設点から決定されている 1994 年 9 月の火山性地震の震源の深さ分布の傾向 (Fig. 13) と一致していることがわかる。

注目したいことは、震源が第 1 火口北北東に偏っていることである。この北北東に震源が集まるという傾向は、常設点で決定している火山性地震の震源が、火口より南側に集まるという結果と比べると明らか

に異なった結果である。しかし、和田・須藤によって火山活動の最盛期に火山性地震の震源は第1火口東北部に局在すること<sup>3)</sup>が指摘されている。震源の位置が火口東北部と北北東とで若干違っているが、和田・須藤はP波速度2 km/sの一層構造を仮定しており、速度構造が違うことを考慮すれば、土砂噴出に伴う特殊なイベントの震源が火口より北側に偏ることもあったと考えて良いであろう。

### 3.4 初動方向

今回観測されたイベントのうち、震源が決定できたのは12個で、さらにそれらの中で、初動方向を確認することが出来たのはG・L・Oの三つのイベントのみであった。これらの初動方向は全ての観測点で“引き”である (Fig. 14)。今回の土砂噴出に伴う特殊なイベントの発生した時期が火山活動レベルの上昇している時期であることを考えれば、和田・須藤が指摘している、活動の初期段階では火口周辺の観測点で“引き”を記録している<sup>3)</sup>という結果と一致している。しかし、初動方向を読みとることの出来なかったイベントのほうが多数あり、今回記録された18回のイベント全てが“引き”であったとは断言できない。

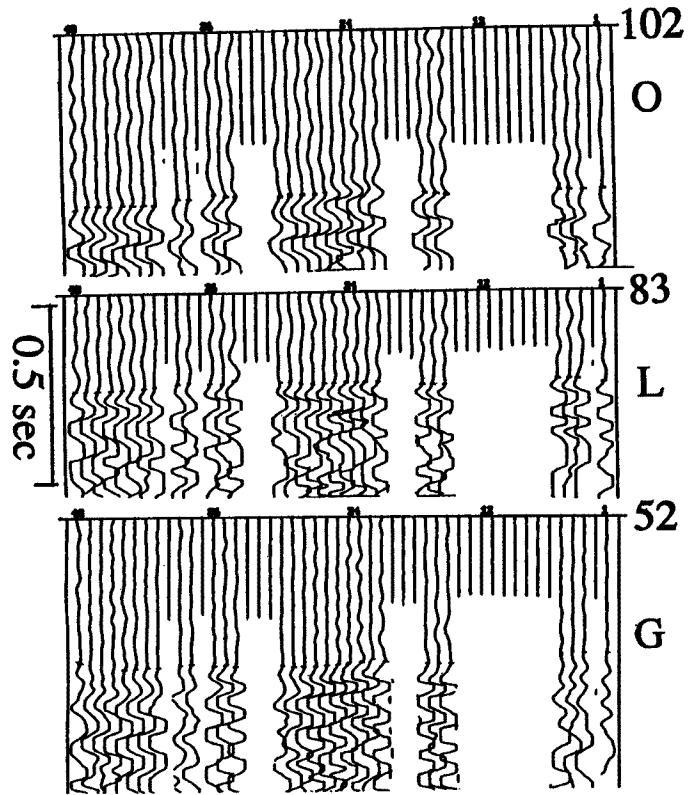


Fig. 14. Zoomed up displays around the first arrivals of events G, L and O

## 4. 土砂噴出に連動する火山性微動についての解釈

いままですら土砂噴出に連動する微動は、振幅の大きい継続的な火山性微動であると考えられていた。しかし、今回の「高密度ネット」での記録から、土砂噴出に連動して発生する火山性微動は数分間継続する微動ではなく、継続時間の非常に短い微小な地震が連なって発生していることが明らかになった。

このことを明らかにできた理由は、「高密度ネット」に使用した地震計の周波数特性が常設観測点に用いられている地震計と異なっていたためと考える。Fig. 15の1 Hz (A)と4.5 Hzの周波数応答曲線に示すように、常設観測点の連続記録に用いられている短周期の地震計(1 Hz)による記録と、今回用いた4.5 Hz地震計の記録では、周波数の帯域が異なっている。また、「高密度ネット」と常設観測点の連続記録で使用しているレコーダーの記録飽和レベルの違いは0.005 Kineしかない。このことから、常設観測点の連続記録で微小な地震を認識できないのは、レコーダーの記録飽和レベルが小さいためではなく、記録している周波数帯域の問題から生じていると考える。

一方、HNDの10秒計(PELS)の記録と常設観測点のイベントトリガー記録が、連続記録よりも地震をより認識することができたのは、10秒計(PELS)とイベントトリガー記録の周波数帯域が、「高密度ネット」の周波数帯域と重複する帯域を記録していたことによる。また、10秒計(PELS)の記録がイベントト

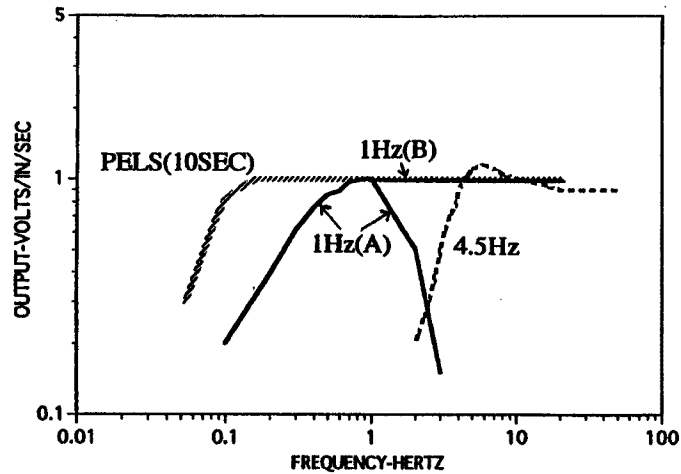


Fig. 15. Instrumental response curves of the permanent network system (1 Hz (A) : continuous record, 1 Hz (B) : event record, PELS (10 sec) : long period record) and the dense network system (4.5 Hz)

リガー記録よりも明瞭に地震を認識できるのは記録飽和レベルが1 Hzの記録計よりも数倍大きいことに起因していると考えられる。

これらの事実から、土砂噴出に連動して発生する特殊な微動は、高周波帯域が比較的卓越している連発した地震の集まりで成り立っていると解釈できるのではないかと考えている。

## 5. おわりに

今回の火口縁周辺における観測で、土砂噴出に連動して、数分間継続する火山性微動が、実は継続時間の短い微小な地震が次々に発生している現象であることがわかった。しかし、収録機器に手でトリガーをかけねばならないため、この観測記録以外に「高密度ネット」で土砂噴出と連動する火山性微動をとらえることはできなかった。そこで、今後は、再度、土砂噴出に連動する微動を観測できるように観測システムを改めて、今回の記録と同様の結果が得られるかどうかの検証を行う必要がある。また、今後の観測網展開では土砂噴出にともなう地震の震源が本当に火口北東部に偏るのか、震源の深さ分布が2局分化するのか、という点を明らかにするために、より正確な震源を求められるように観測点の配置に留意した観測網を構築していきたいと考えている。

最近、長周期地震計の観測から、ベローズ気圧計で空振が記録された時刻を境として（土砂噴出現象の発生と仮定している）、土砂噴出発生前に超長周期変位がはじまり、発生後にもどるとい現象<sup>4)</sup>が報告されている。今後、この長周期変位の過程と今回観測されているような地震の発生との関係も解明して、土砂噴出の現象そのもののメカニズムを明らかにしていきたいと考えている。

この観測を行うにあたり、京都大学理学部附属火山研究施設の迫幹雄氏・外輝明氏、地球物理学教室の岡本茂氏（現：石油資源開発株式会社）・松本良浩氏・戸田茂氏には大変お世話になりました。阿蘇火山博物館の池辺伸一郎氏には火口映像を提供していただきました。火山研究施設の小林芳正氏・田中良和氏からは指導・助言を賜りました。ここに記して、お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 京都大学理学部火山研究施設：阿蘇火山の最近の活動（1994年5月-10月），火山噴火予知連会報，60，pp.44-54，1994.
- 2) 吉川宗治・加茂幸介・狐崎長琅：阿蘇火山中岳火口周辺における地震探査，火山，第2集，4，1959，pp.20-32.
- 3) 和田卓彦・須藤靖明：阿蘇火山の火山性地震の発震機構，火山，第2集，12，1967，pp.61-69.
- 4) 松林弘智：阿蘇火山の長周期微動と土砂噴出に先行する長周期地震波の発生源，東京大学大学院修士論文，1995.