

霧島火山群における人工地震の広帯域地震観測

前田実利¹⁾・鶴我佳代子¹⁾・及川純²⁾・松島健³⁾・馬越孝道³⁾・奥村貴史³⁾

¹⁾ 広島大学理学部, ²⁾ 東京大学地震研究所, ³⁾ 九州大学理学部

(1995年10月6日受理)

Broadband Seismic Observations of Artificial Sources in the Kirishima volcanic area, Japan

Mitoshi Maeda¹⁾, Kayoko Tsuruga¹⁾, Jun Oikawa²⁾, Takeshi Matsushima³⁾,
Kodo Umakoshi³⁾ and Takashi Okumura³⁾

¹⁾ Faculty of Science, Hiroshima University

²⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

³⁾ Faculty of Science, Kyushu University

(Received October 6, 1995)

Abstract

We conducted broadband seismic observations of artificial explosions on December 1, 1994, in the Kirishima volcanic area, southern Kyushu, Japan. We clarified the dominant characteristics of wave-propagating paths in this area and the potential of broadband seismic observations for artificial sources. We analyzed seismograms at three sites located around one of the shot points (near Karakuni Dake) at distances shorter than 1.3 km. Apparent P-wave velocity and temporal decaying factor of P-coda wave (Q_p^{-1}) in the frequency range of 1-16 Hz are estimated to be from 2.6 to 3.2 km/s and from 0.03 to 0.1, respectively. Differences among the three sites suggest strong heterogeneous geological structures in this area. Seismograms recorded by a broadband seismometer (STS-2) are found to be different from those recorded by a short-period vertical seismometer (L-22D, with a natural period of 0.5 s). This appears to be due to waves in a low frequency range around 1 Hz. In conclusion, broadband seismic observations of artificial sources in a volcanic area provide more informations on the difference in geological structure and heterogeneities of subsurface materials than those obtained using conventional short-period seismometers.

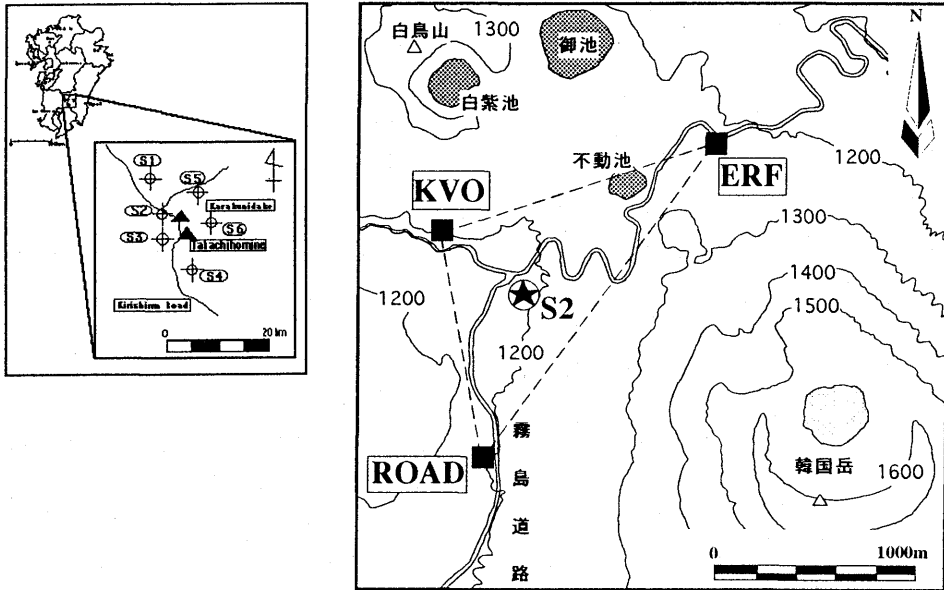


Fig.1 Location of six shot points (S1-S6) and three STS-2 observation sites. The circled stars and squares denote the shot point (S2) and observation points (KVO, ROAD, and ERF), respectively.

Table.1 Summary of three observation sites and shot point (S2).

Observation point	Location (Latitude, Longitude)	Distance (km)	Altitude (m)	Azimuth
KVO	Kirishima Volcanic Observatory (31° 56'37.32" ,130° 50'29.52")	0.588	1190	314.0°
ROAD	Asphalt of the Kirishima Road (31° 56'3.14" ,130° 50'42.11')	0.875	1200	191.5°
ERF	Cabin of an open-air bathing point (31° 56'53.66" ,130° 51'26.29")	1.305	1210	49.5°

Shot point	Latitude	Longitude	Altitude(m)
S2	31° 56'27.91"	130° 50'47.74"	1190

1.はじめに

九州の霧島火山群の内部構造の調査を目的とした人工地震観測が、1994年12月1日に行われた。遠隔地での人工地震を霧島火山群の観測所で観測した例はこれまでもあるが(宮崎他, 1978),

それと同等の規模でかつ爆破点そのものを火山地帯に設置する観測は今回が初めてである。また、今回の人工地震の観測では、固有周波数約2Hzの上下動地震計(L-22D)を測線上に合計163点設置すると同時に、広帯域地震計(STS-2)も設置して行われた。人工地震による地殻構造の観測は、日本でも1950年に石淵ダム建設の際の大規模な爆破を利用した地下構造調査が行われ、これを契機に結成された「爆破地震動研究グループ」を中心に現在に至るまで全国の各地で数多く行われている(吉井, 1994)。ただし、これまでに人工地震に対して広帯域地震計を用いた観測例はほとんどない。

主にグローバルな地震学で用いられてきたSTS-2地震計は、広い周波数応答域(約0.02-120秒)と広ダイナミックレンジ(140db)を持った水平動2成分、上下動1成分の計3成分を同時に観測できるサーボ式速度地震計である。この地震計は軽量・可搬型(直径235mm, 高さ260mm, 重量13kg)であるため、野外での移動観測にも容易に用いることが出来る。Kawakatsu et al. (1992)では火山地帯での最初の広帯域自然地震観測が行われた。

最近では、周波数依存性のある減衰や観測点のサイト特性の測定も重要となり、上下成分だけでなく水平成分の観測も必要となってきた。本研究では、広帯域地震計STS-2を用いた観測から、ダイナマイトによる爆破で生じた地震波の周波数領域等を調査した結果を報告する。

2. 観測の概略

爆破点は宮崎県えびの市, 同小林市, 同都城市, 鹿児島県牧園町, 同霧島町にわたる南北25km, 東西15kmの範囲内に合計6箇所設置された(Fig. 1)。爆破は1994年12月1日2時2分のS1点を最初に、以後5分間隔で行われた。我々はS2点を取り囲む半径約1.3km内の3地点に、STS-2を設置した(Table. 1)。なお、S2点の爆破時刻は2時7分5.258秒で、爆破孔の深度は40.55m, 爆薬量は200kgである。

宮崎他(1978)によると、火山地帯では300-500kgの爆薬量で半径約50kmくらいまでは1Hz地震計による地震観測が可能とされている。

3. 広帯域地震波形

Fig. 2に各観測点におけるS2点の爆破による地震波の、3成分の速度波形、すなわちラディアル(radial), トランスバース(transverse)及び上下(vertical)成分を示す。水平2成分(南北成分, 東西成分)をS2点からの地震波の伝播方向に合わせて回転させて、ラディアル成分とトランスバース成分とした。ERFでは上下成分が地震計のトラブルにより記録できなかった。

波形全体については、近地での観測のために初動から大きく波形が立ち上がり、その後急速に減衰している。また人工地震では、一般に構造地震に見られるようなS波を確認することは難しいが、今回の観測でもS波は見られなかった。KVOとROADの水平2成分に初動から約0.8秒後に5-10Hz位の後続波らしきものが見えた。しかしERFにはそのような波形は見られなかった。

3-1. P波の見かけ速度

3観測点のS2点からの直線距離がいずれも1.3km以内と短いことと、震源がほぼ地表にあることから、各点で観測される初動は地表面にほぼ沿って伝わる直達のP波であると仮定でき、この場合伝播距離は震源と観測点の直線距離に近似できる。よって、今回の観測でのP波の見かけ速度は(距離÷時間)の単純な計算で求められる。ここではラディアル成分の地震波形からP波の見かけ速度をFig. 3より求め、その結果をTable. 2に示した。

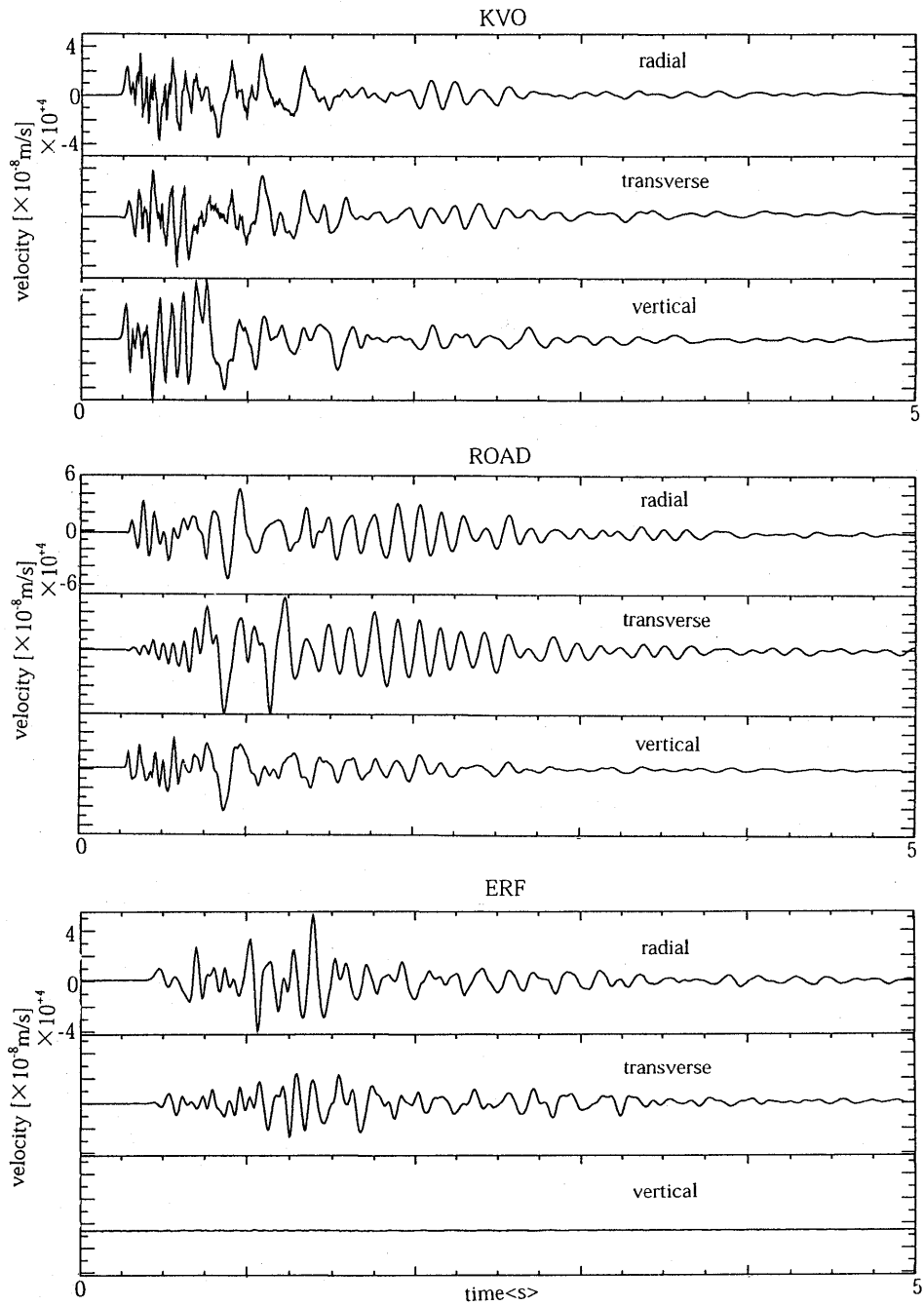


Fig.2 Three-component (radial, transverse, and vertical) velocity seismograms recorded at KVO, ROAD and ERF for shot S2 on December 1, 1994. The initial time of each seismogram represents shot time of S2.

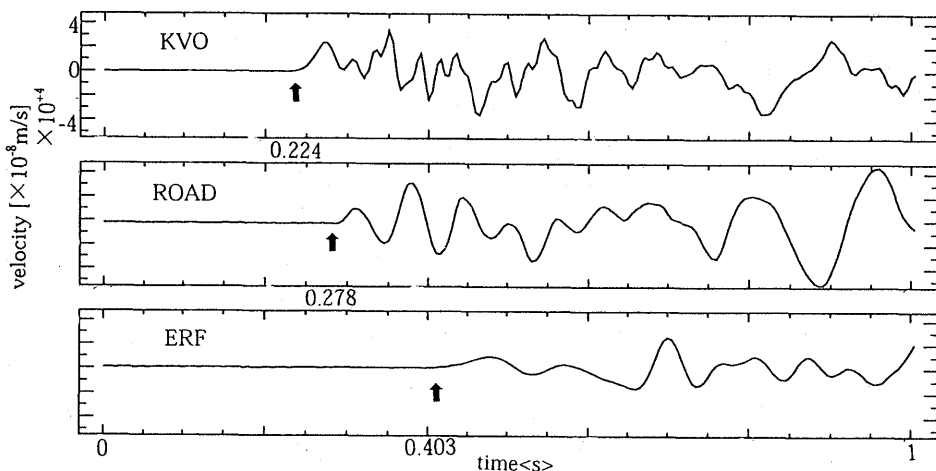


Fig.3 Arrival time (arrow) of each record (radial component).

Table.2 Apparent velocity of P-wave .

Observation point	Distance (km)	Travel time (s)	Apparent P-wave velocity (km/s)
KVO	0.588	0.224	2.625
ROAD	0.875	0.278	3.147
ERF	1.305	0.403	3.238

各点における見かけ速度の値を比較すると、ROAD、ERFでの値は3.2km/s前後であるが、KVOでは約2.6km/sで他の2点の値と比べて約30%も小さい。宮崎他(1978)によると加久藤カルデラ内に発生したえびの群発地震の観測によるP波の速度は、表層部から5kmの深さまでの平均で4.3km/sであるが、今回得られた値はその約74%程度の大きさである。また今回の観測で得られた3観測点の速度差は、伝播距離の差が1km以内の観測で得られる値(約0.01-0.05km/s(宮崎他, 1978))よりも一桁以上大きい。このことは3つの観測点下の地質構造(いずれも新期火山群(井村, 1994)の表層部の溶岩や火山灰等)が、震源からの距離が約1.3km以内の小さいスケールにおいても、かなり不均質であることを示唆している。

3-2. スペクトル

各観測点の波形のスペクトルをFig.4に示す。まず、どの観測点の全ての成分においても1-20Hzの振幅が卓越している。各観測点ごとの特徴は以下の通りである。

KVO・・・他の2点に比べて卓越周波数帯域が3-8Hzと数Hz程度低周波側にずれている。

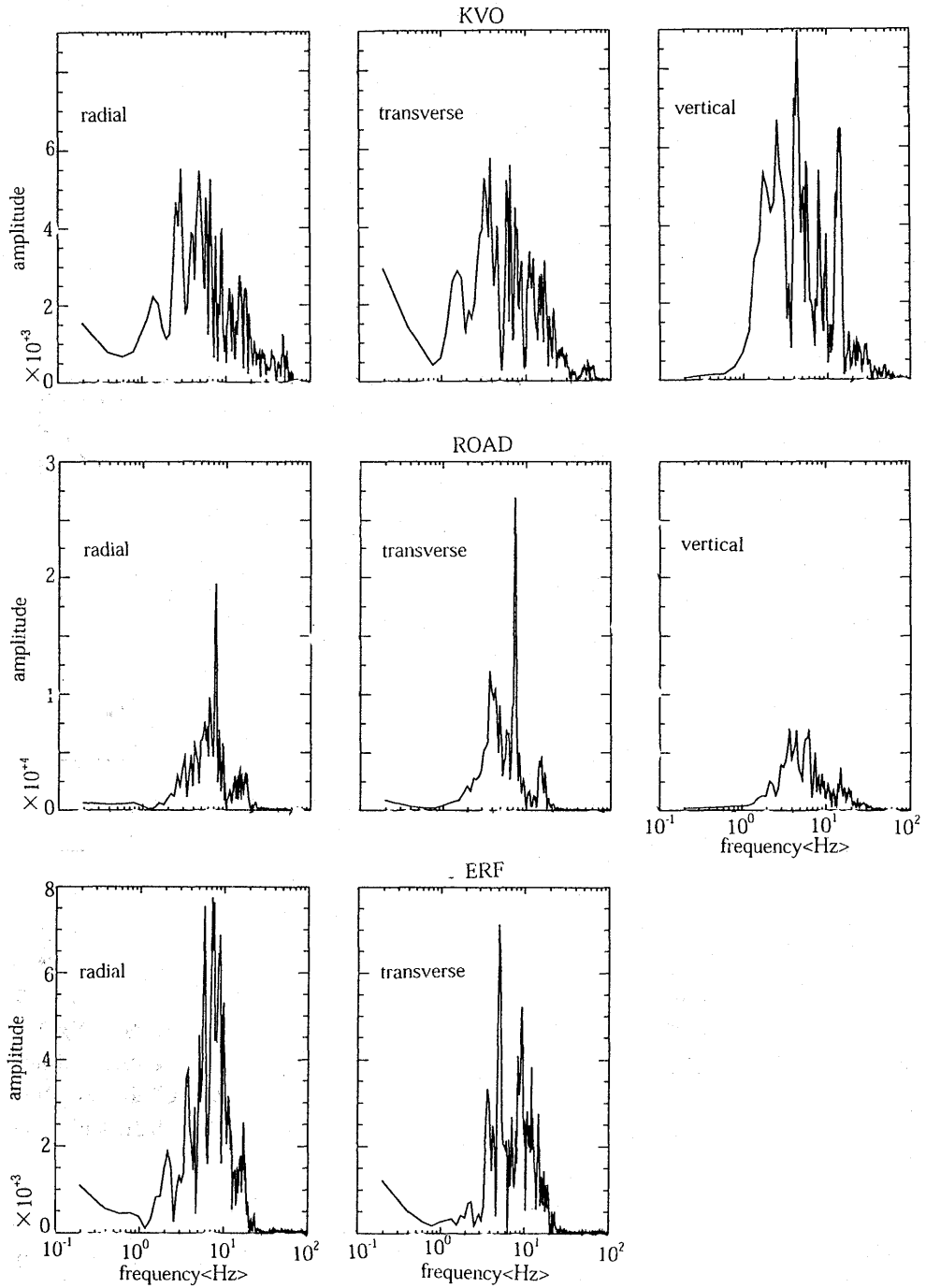


Fig.4 Spectra of three-component seismograms recorded at three observation sites.

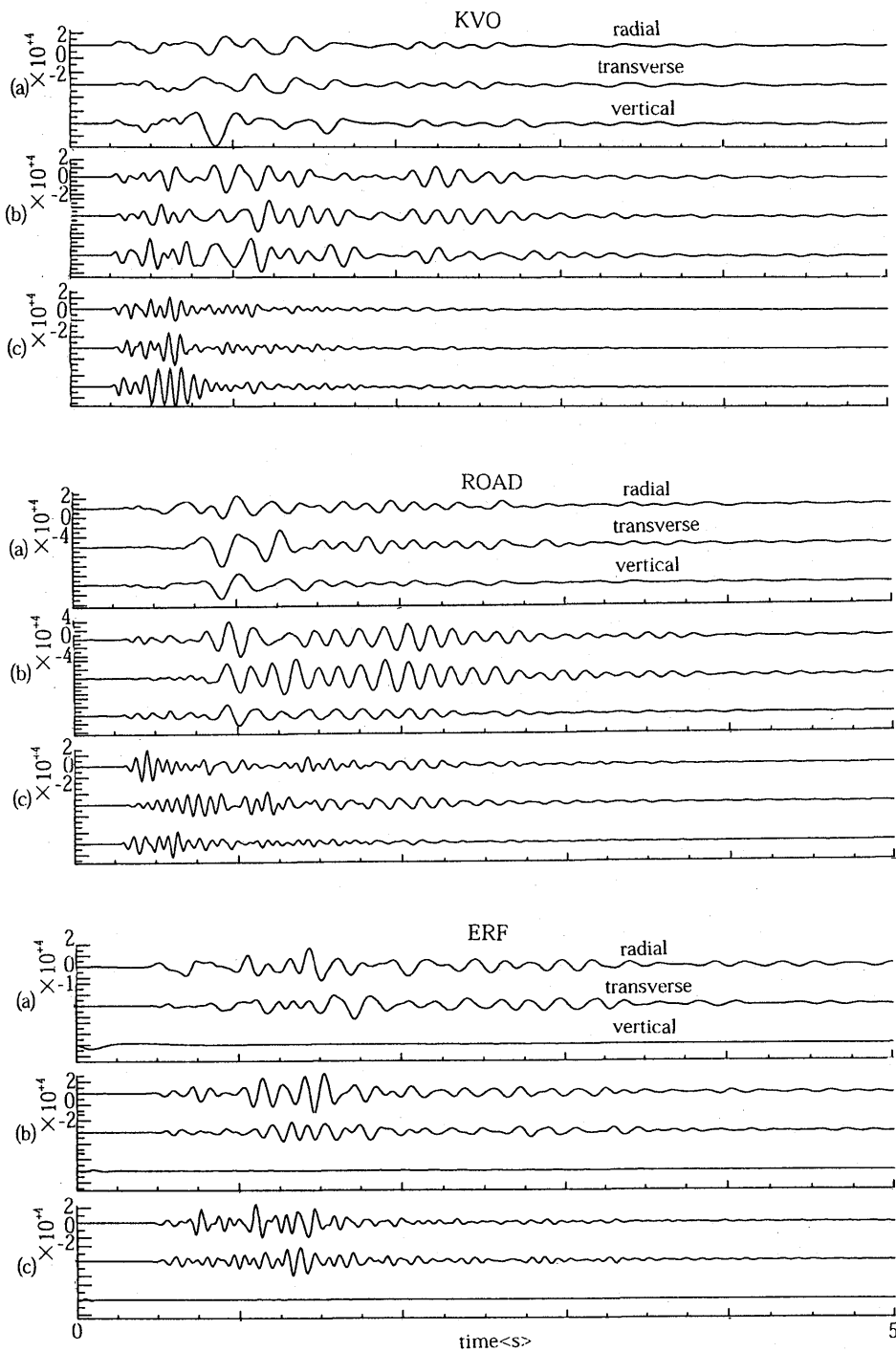


Fig.5 Three-component bandpassed waveforms at three observation sites: (a) 1-5Hz, (b) 5-10Hz and (c) 10-20Hz.

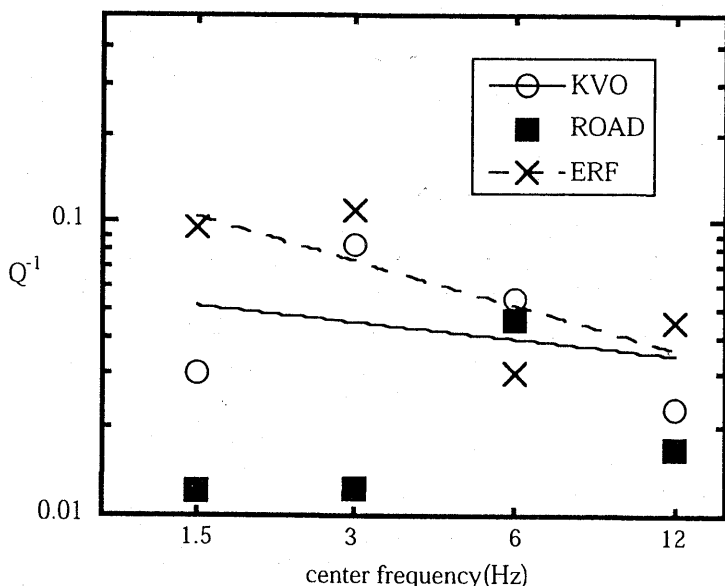


Fig.6 Plot of Q^{-1} in logarithmic scale versus frequency with linear regression lines at each observation site.

ROAD・・・水平2成分の7-8Hz間に大きな卓越周波数帯域があり，上下成分以外は最大振幅の値が他の2点に比べて2倍以上大きい。

ERF・・・6-10Hzの間に卓越周波数帯域がある。

Fig.4で見られる卓越周波数帯域を1-5Hz, 5-10Hz, 10-20Hzの3つの周波数帯域に分けてバンドパスフィルターをかけた波形をFig.5に示す。これらの図から，まず，人工地震でも低周波数成分が十分に励起されていることが分かる。KVOでは10-20Hzの高周波数成分が爆破時間から3秒位他の2点では継続しているのに対して，KVOでは約1秒でほとんど見えなくなっている。ROADの水平成分は5-10Hz域では，2秒後位に7-8Hz位の波が特に目立つ。ERFは各周波数帯域ごとの大きな特徴は見られず，様々な周波数の波が入り交じっているようである。

4. Pコード波

3-1.でも述べたように，今回の人工地震の観測点及びS2点付近には強い不均質性があることが考えられる。そこで，不均質性を定量化するためコード波の時間減衰 Q^{-1} を用いて，観測点付近の差異を概算する。

一般にコード波の時間減衰 Q^{-1} の解析には，Takahara and Yomogida (1992)などに見られるようにS波が使われているが，今回の場合，S波をはっきりと確認できない。そこで，波のコードをPコード波とみなして解析をする。また一般にSコード波の Q^{-1} の周波数依存性は，10Hz以上の高周波では $Q^{-1} \propto f^1$ ，つまり $Q^{-1} \cdot f$ の値はほぼ一定で地域差もなく，低周波になればなるほどこの値は大きく（減衰が大きく）なり地域差もそれと共に大きくなる（Wu, 1989）ことが知られているが，今回は火山地帯におけるコード波の時間減衰 Q^{-1} の解析であるため，上述のような

特徴とは違った特徴が現れる可能性もある。

4-1. 解析方法

今回の解析には、各観測点のラディアル成分のデータを用いて、Pコード波における Q^1 を求める。 Q^1 は1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hzの4つの周波数帯域において、波形データにバンドパスフィルターをまずかけ、そしてHilbert変換をとり、 Q^1 を求めるのに必要な包絡線を求める。コード部分の起点はP波走時の3倍の時刻とした。また終点は爆破時間から5秒とした。その結果、解析に用いられたコード継続時間は平均約4秒前後になった。なお Q^1 の計算方法には、Takahara and Yomogida (1992)と同様にMaximum Likelihood Methodを用いた。

4-2. 解析結果

1-2Hz帯から8-16Hz帯までの Q^1 の各観測点における値をFig.6に示す。ROADの1-5Hz帯を除いて、 Q^1 の値はほぼ0.03-0.1の間に存在する。 Q^1 の周波数依存性は各観測点ごとに以下のようになる(f:周波数)。

$$\text{KVO} \quad Q^1 = 0.072406 \times f^{-0.32543}$$

$$\text{ERF} \quad Q^1 = 0.11396 \times f^{-0.45918}$$

ただし、ROADは1-5Hz帯と5Hz帯以上のトレンドが著しく異なるので直線に近似することができなかった。Fig.6に示されるように、6Hz以上、つまり波長が約0.5km以下のスケールでは散乱、非弾性減衰による不均質はあまり差はみられない。しかし2Hz(波長が約1km)程度のスケールになると、KVOとERFでの Q^1 値に比べて、ROADでの Q^1 値は小さいので、S2点とROADを結ぶ地域はPコード波減衰の解釈によるが、他の2つに比べて非弾性減衰が小さくなっていると考えられる。

S2点とROADを結ぶ地域全体の減衰特性は以下のように説明できる。現在、硫黄山や新燃岳における周辺の噴気や熱水活動が活発なことより、韓国岳付近にマグマやマグマに由来する水蒸気などの火山ガスの上昇経路がこの地域では他の2点と比べて多く、地下浅部での地震波減衰をもたらす不均質構造を形成していると考えられる(及川・他, 1994)。

5. STS-2と2Hz上下動地震計との記録の比較

観測点ROADでは5-6m程度離れた地点で2Hz上下動地震計L-22Dによる同時観測を行っておりL-22Dの記録とSTS-2の上下成分の記録を比較した。Fig.7にROADの上下成分において、STS-2とL-22Dで記録された波形を示す。波形を比べると、全体的によく対応しているが、S2点の爆破時間から約0.8-1.5秒位までの比較的低周波の成分がわずかに異なっている。スペクトルデータを比較してみる(Fig.8)と、L-22Dのデータに7-8Hzに卓越周波数帯域があるなど高周波の方には両地震計による大きな違いはみられない。しかしFig.8の5Hz以下のデータに注目すると、STS-2の方では周波数が低くなるにつれて滑らかに減少しているのに対して、L-22Dの方では2Hz以下に大きな振幅の低下が見られる。また1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz及び8-16Hzのバンドパスフィルターに通した波形(Fig.9)を比較すると、特に1-2Hz帯の波形データの約0.8-1.5秒間にSTS-2とL-22Dの波形に違いが見られる。このような見かけ上の違いが生じた原因として、2Hz以下においてSTS-2はリスポンスが低周波数領域までフラットであるのに対してL-22Dはそうではないという、地震計の特性によることが考えられる。今回の比較で、STS-2とL-22Dの波形の、特に低周波数側の波形に若干の違いがみられたことで、人工地震においても低周波の波が存在し、波形を用いた調査においては広帯域地震観測も有用であると考えられる。

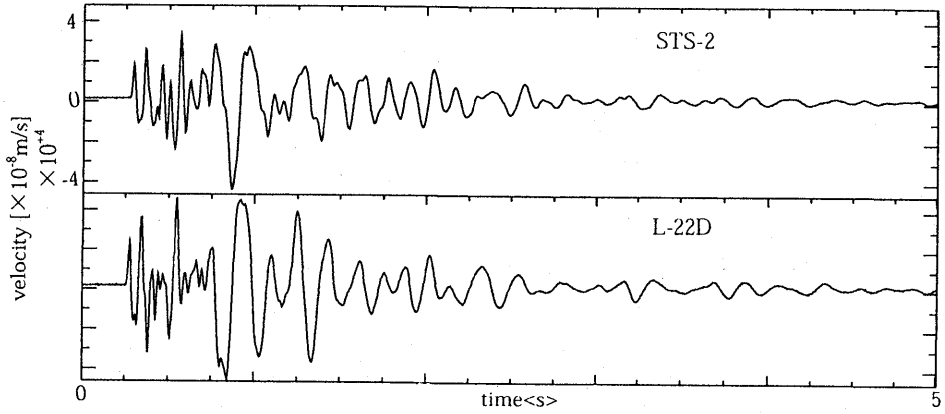


Fig.7 Comparison of vertical-component velocity seismgram at ROAD recorded by two different types of seismometer (top: STS-2 and bottom: L-22D) for the shot at 2:05 on December 1,1994.

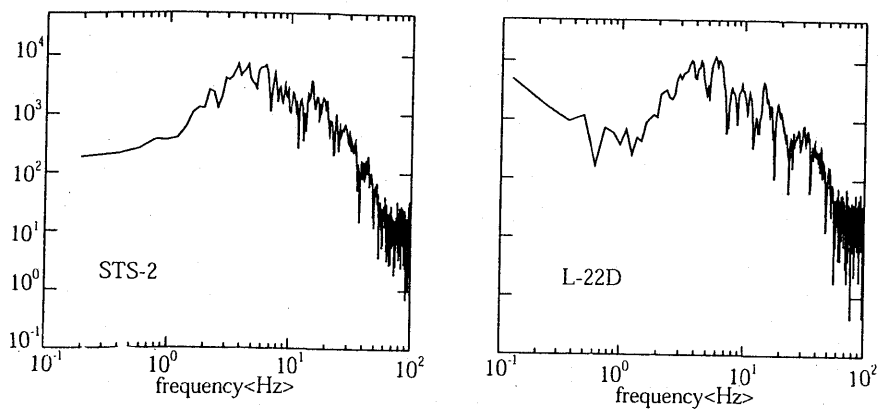


Fig.8 Vertical-component spectra at ROAD recorded by STS-2 (left) and L-22D (right).

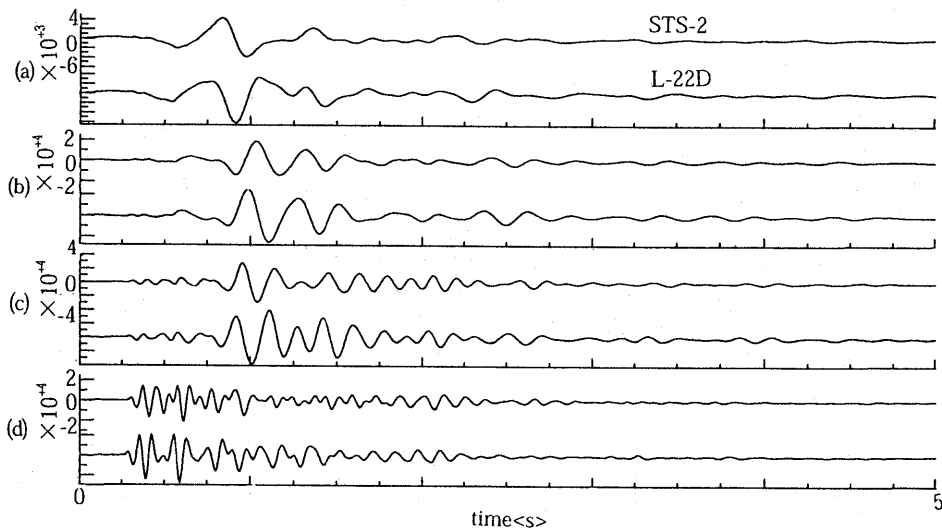


Fig.9 Comparison of bandpassed vertical-component waveforms at ROAD recorded by STS-2 (top) and L-22D (bottom): (a)1-2 Hz, (b) 2-4 Hz, (c)4-8 Hz and (d)8-16 Hz.

6.まとめ

本研究の結果は次のようになった。

- (1) 3点の観測点のP波の見かけ速度において、KVOと他の2点との間に顕著な違いが見られた。この速度の差が生じた理由として、ROADとERFの地域の地表面に近い比較的浅い部分に溶岩が広がっており、表面を通る地震波の速度がKVOのそれより速いことが考えられる。
- (2) コーダ波の時間減衰 Q^1 を調べることで、観測地域に周波数依存性が異なる領域が存在することが明らかになった。
- (3) 広帯域地震計 (STS-2) と2Hz上下動地震計 (L-22D) でそれぞれ得られたデータの比較の結果、STS-2でのみ見られる波が確認された。

爆破点-観測点間の距離がいずれも1km前後の局地的な観測であるにも関わらず、(1)や(2)のような結果が得られたことより、韓国岳周辺は地表面や表層部において数100m以下のスケールで強い不均質性が存在することが分かる。また今回得られた波形データの卓越周波数帯域は7-8Hzであるため、従来通りの1-5Hz程度の固有周波数の地震計による人工地震の観測は、観測地域の地下構造を探る研究として十分適していると言える。しかし、本研究では低周波数領域において広帯域地震計と2Hz上下動地震計で得られる波形データに違いがみられたことより、爆破で生じる地震波に、2Hz上下動地震計では捕らえきれない低周波成分が含まれていることが明らかになった。これは、広帯域地震計を用いれば、今まで見逃してきた低周波成分の波を捕らえることができ、これらを用いた新しい解析ができる可能性を示唆している。

謝辞

九州大学の清水洋助教授及び広島大学の蓬田清助教授には、本研究を行うに当たり、様々なアドバイスを頂いた。また白山工業(株)には、データ収録機(データロガー・LS800VF)を2台お借りした。さらに、東京大学霧島火山観測所、えびの市市営露天風呂の皆様には、地震計等の設置場所をご提供いただいた。ここに記して深く感謝する。

なお、本研究は平成6年度科学研究費(研究課題名「霧島火山群の深部構造に関する地震学的・電磁気学的・測地学的研究」、代表者鍵山恒臣)により実施された。

参考文献

- 井村隆介, 1994, 霧島火山の地質, 地震研究所彙報(別冊), 69, 189-209.
- Kawakatsu, H., Ohminato, T., Ito, H., Kuwahara, Y., Kato, T., Tsuruga, K., Honda, S., and Yomogida, K., 1992. Broadband seismic observation at the Sakurajima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1959-1962.
- 宮崎務・山口勝・増谷文雄・寺尾弘子, 1978, 霧島火山下部のP波速度構造, *火山*, 2, 23, 213-225.
- 及川純・山本圭吾・井田喜明, 1994, 霧島火山における地震波減衰領域, 地震研究所彙報(別冊), 69, 291-307.
- 高原元昭・小原一成, 1994, 富士・箱根地域の Q_c^{-1} , *地震* 2, 47, 85-88.
- Takahara, M. and Yomogida, K., 1992. Estimation of coda Q using the maximum likelihood method. *Pure and Appl. Geophys.*, 139: 255-268.
- Wu, R. S., 1989, Seismic wave scattering, in *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, ed. by D. E. James, Van Nostrand Reinhold, New York, 1167-1187.
- 吉井敏烈, 1994, 人工地震による日本列島の地殻構造, *地震*, 46, 479-491.