

九重火山周辺部地熱地域における地震活動

吉川美由紀・須藤靖明*・筒井智樹**・田口幸洋***

* 京都大学大学院理学研究科

** 秋田大学工学資源学部

*** 福岡大学理学部

要旨

中部九州に位置する九重火山の北西部は、断層や割れ目が発達し、温泉・噴気地帯など、地熱兆候が多く見られる地熱地域である。また、地震活動の特徴として、震源が比較的浅いこと（海面下 5km 以浅）と群発的な地震の発生があげられる。

本地熱地域で発生する地震について、和達ダイアグラムにより求められる速度比 V_p/V_s の解析を行った。その結果、速度比 V_p/V_s は、群発地震の前後に特徴的な変化を示すこと、また、速度比 V_p/V_s は時間的に変化し、震源の位置に依存することがわかった。

キーワード：速度比 V_p/V_s 、地熱地域、九重火山、中部九州

1. はじめに

九重火山は、九州をほぼ東西に走る別府一島原地溝（松本，1979）内に位置し、1995 年 10 月 11 日に水蒸気爆発をした現在も活動中の火山である（Fig.1）。九重火山北西部に位置する大岳・八丁原地域は、NW 方向に走行をもつ断層が多数存在し、断層に沿って酸性変質帯や噴気活動などの地熱兆候が見られ（山崎他，1968）、日本でも最大規模を誇る地熱発電所が存在する地熱活動の活発な地域である（Fig.2）。

九重火山地域における地震活動や地下構造については、多くの研究報告がある。地震活動として、三浪他（1981）や久保寺（1988）、須藤（1993）は、九重火山西部地域の地震活動の大きな特徴として群発地震の発生を指摘し、Sudo et al.（1998）は、その震源域が、九重硫黄山、八丁原、筋湯、大岳、湯坪地域にあると報告している。一方、地下構造については、久保寺他（1982）は爆破地震を用いて海面下約 2km までの速度構造を求め、須藤他（1996）は自然地震の解析から九重火山北部に地震波の強い減衰領域があることを示した。Sudo and Matsumoto

（1998）は、三次元 P 波速度構造をインバージョン手法から求め、九重火山の下に低速度領域があることを示した。

八丁原地域では、真鍋・江島（1986）は、水の循環が基盤深度（海面下 700m 以深）まで達していると指摘し、Taguchi and Nakamura（1991）は、深さ約 1000m（海拔 0m）の位置に高温の流体が分布していることを明らかにしている。このような水の存在

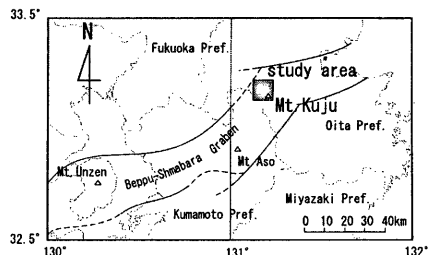


Fig.1 Map of the central Kyushu island. The study area is the rectangular shadow area, the north-western part of Kuju Volcano.

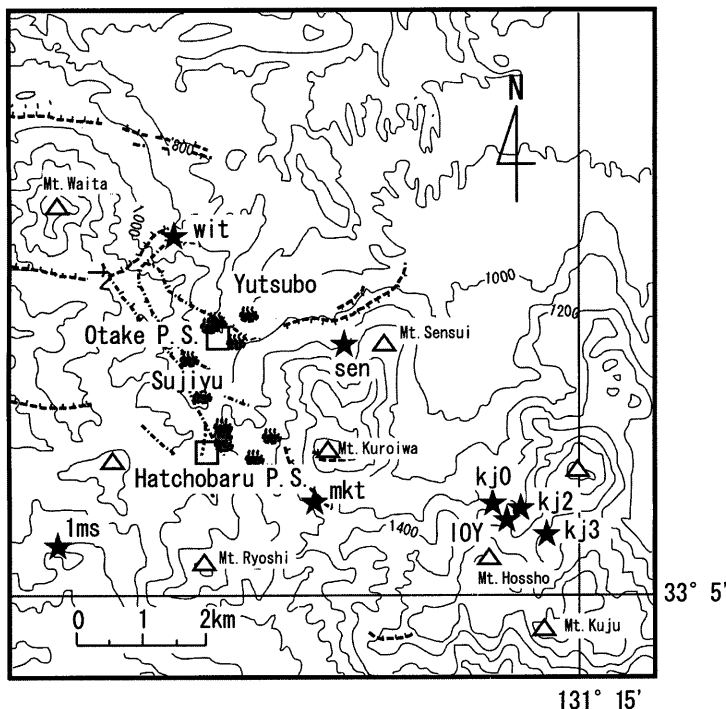


Fig.2 Distribution of seismic stations. ★:seismic station, △:mountain, □:geothermal power station. Broken lines are faults adapted from Yamasaki et al (1986) and The Research Group for Active Tectonics in Kyushu (1989).

や熱水変質帯の存在する地域では、地震波もしくは地震活動にも何らかの影響があると考えられる。H.O'Connell and R.Johnson (1991) は、カリフォルニアの地熱地域において標高 0km から-1km 付近に速度比 V_p/V_s の異常な高まりを見出し、流体との関連を指摘した。G. De Luca et al. (1997) は、エトナ火山において速度比 V_p/V_s の高い地域が破碎帯にあたると考えている。また、速度比 V_p/V_s は、時間的に変化することも知られている。例えば、飯塚 (1976) は、1968 年の十勝沖地震前に速度比 V_p/V_s が異常な減少を示したと報告し、速度比 V_p/V_s の変化と地下流体とが関連する可能性を述べた。

九重火山北西部は、流体の存在、熱水変質帯、破碎帯などの地熱兆候が見られる地域であり、地震活動も活発な地域である。本報告は、このような特徴を持つ九重火山北西部地域において発生する地震を速度比 V_p/V_s について解析し、その結果をまとめたものである。

2. 観測、地震活動

京都大学火山研究センターでは、1995 年の九重火山の水蒸気爆発以降、地震観測網を展開し、現在も観測を継続している。Fig.2 に、今回の解析に用いた観測点を示す。観測点 IOY は、50Hz サンプリングのテレメータ連続観測方式で、また観測点 kj0, kj3, sen, 1ms, mkt, wit は、200Hz サンプリングのイベントトリガーによる現地収録方式で、地震波を記録している。地震計は、観測点 IOY, wit は固有周期 1Hz、観測点 kj0, kj3, sen, 1ms, mkt は、固有周期 2Hz のそれぞれ速度型地震計を用いている。なお、観測点 wit は 1997 年 8 月以降の設置である。

1995 年 11 月から 1998 年 3 月にかけて、九重火山北西部に発生した地震の日別発生頻度を示したものが Fig.3 である。これまでの研究報告 (例えば、須藤(1993)) のように、今回の解析期間中において

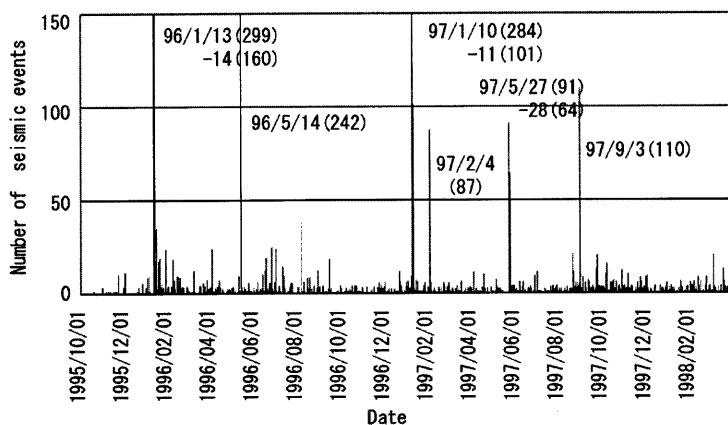


Fig.3 Histogram of observed seismic events during the period from November 1995 to March 1998. Each date in this figure shows the time of swarm and each number in parenthesis is the number of events on that time.

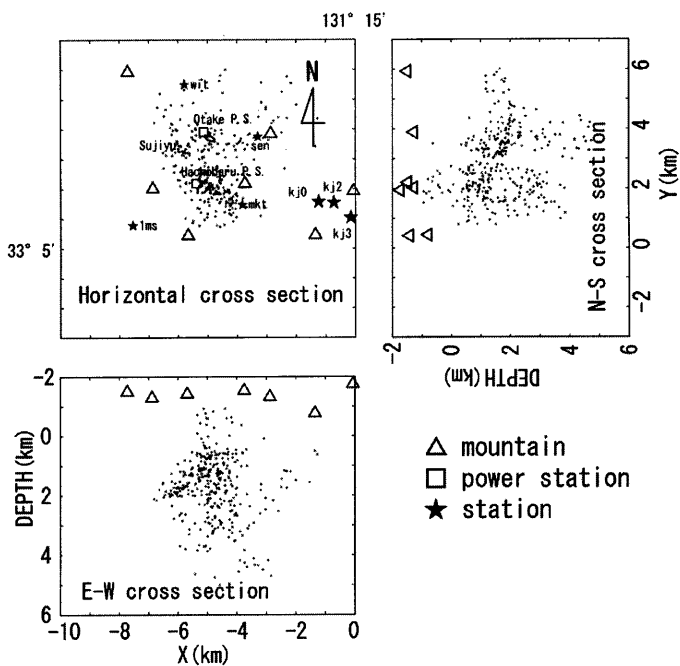


Fig.4 Distribution of hypocenters (359 events), of which Vp/Vs ratios were able to calculated during the period from November 1995 to March 1998.

も、九重火山北西部では地震活動は活発であり、群発的な活動がみられる。1995年11月から1998年3月の期間、1日の発生頻度が50を超える群発的地震活動は、1996年1月13日-14日(震源域:大岳・筋湯, 発生頻度: $N > 400$, 最大マグニチュード: $M2.9$), 1996年5月14日(湯坪, $N > 200$, $M2.4$), 1997年1月10日-11日(湯坪, $N > 300$, $M2.5$), 1997年2月4日(八丁原, $N > 80$, $M2.5$), 1997年5月27日-28日(湯坪, $N > 150$, $M2.7$), 1997年9月3日(大岳, $N > 100$, $M2.6$)の6回発生している。

このうち、1996年1月13日-14日、1996年5月14日、1997年9月3日の3回の群発的地震活動については、現地収録方式の観測点でも観測され、震源が求められたが、他の3回の活動については、現地収録方式の観測点が一時的に不調なため、データが得られなかった。

1995年10月の水蒸気爆発から1997年3月までの九重火山およびその周辺地域で発生した地震については、Sudo et al.(1998)にあるように九重硫黄山をはじめ九重火山北西部地域で多数発生している。Fig.4では、1995年11月から1998年3月までの観測で、速度比 V_p/V_s が決定された地震の震源分布(359個)を示す。これまで報告されてきたように、震源域の集中が見られ、大岳地域、八丁原地域、筋湯地域に震源が集中していることがわかる。また、震源の深さは、海面下5km以浅のものが大半であり、比較的浅いことがわかる。

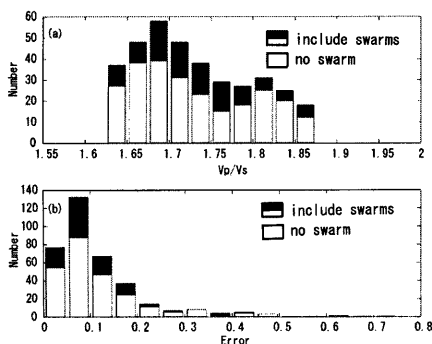


Fig.5 (a) Histogram of V_p/V_s ratio and (b) histogram of one's error. Black bars are including swarms and white bars are no swarm.

3. 速度比 V_p/V_s

速度比 V_p/V_s は、和達ダイアグラムより求めた。速度比 V_p/V_s のとり範囲は、1.633 から 1.871 の間で、平均値は、1.730 である。これは、一般的な地殻上部における速度比 V_p/V_s の値 $\sqrt{3}$ にほぼ等しい。

Fig.5 は、速度比 V_p/V_s とその誤差、それぞれの頻度分布図である。また、同図は、群発地震を含む場合と含まない場合とに分けて示している。速度比 V_p/V_s は、1.75 付近を境に2つのピーク(1.68と1.82)を持つ分布をしている(Fig.5(a))。また、群発地震を含む場合を見ると、群発地震では、速度比 V_p/V_s が比較的低い値を示していることが伺える。G De Luca et al.(1997)は、3次元トモグラフィーを用いてエトナ火山における速度比 V_p/V_s 構造を推定しているが、その速度比 V_p/V_s 構造の解釈を述べる上で、比較的低い速度比 V_p/V_s 構造が見られる地域が地熱流体の上昇地域に当たるとを示した。このことから、群発地震は、動的な流体、すなわち、外部からの流体の浸入に依存している可能性が考えられる。

Fig.5(b)は、誤差の頻度分布を示す。 ± 0.2 の範囲に誤差の90.0%が含まれるため、速度比 V_p/V_s の大半は、 ± 0.2 以内の誤差をもつ。ここで、速度比 V_p/V_s のとり範囲は、1.633 から 1.871 で、最小値と最大値の差は、0.238 である。この差に対して、 ± 0.2 の誤差は大きすぎる。この点に関しては、次章において述べる。

Fig.6 は、震央位置と速度比 V_p/V_s の関係を示したもので、速度比 V_p/V_s を(a)1.625-1.675, (b)1.675-1.725, (c)1.725-1.775, (d)1.775-1.825, (e)1.825-1.875の5段階に区分し、それぞれの震央位置をプロットしたものである。速度比 V_p/V_s が1.625-1.725 (a)と(b)までの値をもつ地震は、大岳、筋湯、八丁原の全ての震源域で現れる。特に、1.675-1.725 (b)の範囲では、震源域が大岳地域、筋湯地域、及び八丁原地域の3つに分かれる特徴を示している。1.725-1.825 (c)と(d)の範囲に含まれる地震は、大岳、筋湯、八丁原、全ての震源域で発生しているが、特に八丁原での発生が目立つ。1.825-1.875 (e)の範囲になると、震源は、筋湯には分布せず、大岳、八丁原に集中して分布している。

震源の深さと速度比 V_p/V_s の関係を Fig.7 に示す。震源が浅くなるほど、速度比 V_p/V_s の分布範囲は広くなる。すなわち、最小値はどの深さにおいてもほとんど変化しないが、最大値が浅くなるにつれて増大する様相を示す。特に、海面下2km付近

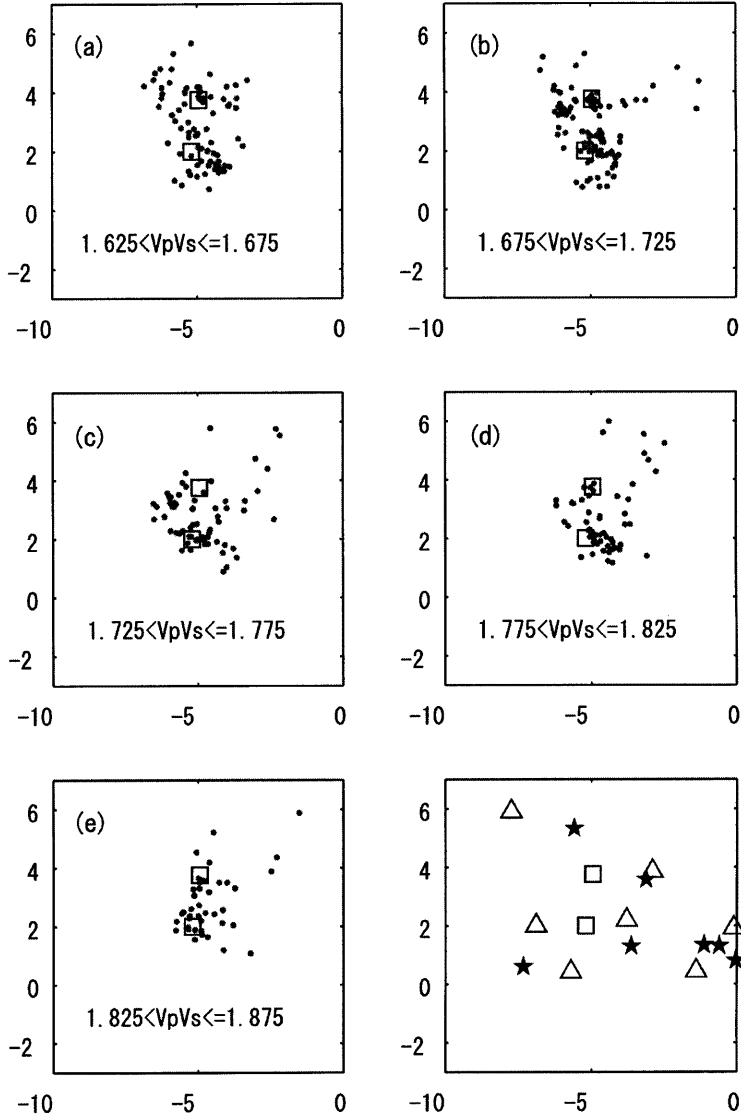


Fig.6 The relation between epicenters and Vp/Vs ratio. The lower right map shows positions of geothermal power station($\square$), seismic station($\star$) and mountain($\triangle$).

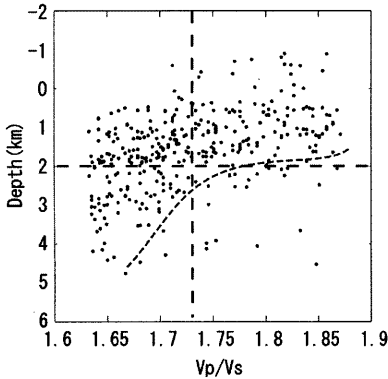


Fig.7 The relation between hypocenter's depth and V_p/V_s ratio.

を境にして速度比 V_p/V_s の最大値が急激に増大する。

次に、速度比 V_p/V_s の時間的変化を検討したものが、Fig.8 である。Fig.8 は、標本数を地震数 15 個、移動数を地震数 1 個として、速度比 V_p/V_s の時間的な変化を見たものである。解析期間中に発生した 6 回の群発地震の中で、3 回の群発地震データが欠損しているため、群発地震を含む場合（実線）と、含まない場合（破線）とに分けて図示している。図中の日付は、群発地震の発生日を示す。Fig.8 から、速度比 V_p/V_s は、時間的に変化していることがわかり、また、群発地震を含む場合の速度比 V_p/V_s の時間的変化を見ると、特に、1996 年 5 月 14 日と 1997 年 9 月 3 日の群発地震の発生前後で大きな変動を示している。群発地震の発生前に速度比 V_p/V_s が減少しはじめ、群発地震発生以降は、速度比 V_p/V_s が増加している。群発地震を含むものと含まないものとを比較すると、含群発地震は群発地

震発生日にパルス的な変化をするのに対し、含まないものでは速度比 V_p/V_s は緩やかな変化をする。しかし、どちらにおいても、群発地震前後の速度比 V_p/V_s の変動の特徴は見られる。

5. 誤差について

前章において、速度比 V_p/V_s を求める際の誤差が非常に大きいことを述べた。この理由の 1 つに、少数の観測点で速度比 V_p/V_s を決定したことが考えられる。速度比 V_p/V_s は、各観測点における P-S time/P time から、最小二乗法で求められる。したがって、観測点が少数であれば、各観測点における P-S time/P time のばらつきが、誤差に反映される。

そこで、各観測点毎に速度比 V_p/V_s を求め、その時間変化を検討してみた (Fig9)。通常、和達ダイアグラムを作成するには、同一地震における、多数の観測点において読み取られた P arrival time と P-S time のセットが必要であり、1 点の観測点のデータでは、速度比 V_p/V_s を求めることができない。そこで、震源決定時に求められた origin time を利用し、travel time から速度比 V_p/V_s を求めた。各観測点毎に travel time と P-S time を求め、速度比 V_p/V_s を得る。なお、Fig.9 には、速度比 V_p/V_s が 1.414 以下のものも表示している。本来ならば、速度比 V_p/V_s が 1.414 以下を示すことはありえない。しかしながら、和達ダイアグラムから得られる速度比 V_p/V_s は、Fig.9 を作成する際に使用した各観測点での P-S time を用いて計算されたものである。したがって、Fig.9 には、あえて速度比 V_p/V_s が 1.414 以下のものを示している。

ここで得られた各観測点の速度比 V_p/V_s も時間的に変化しているが、観測点毎の変化の様相は様々である。変化のばらつきを考える指標として、各観

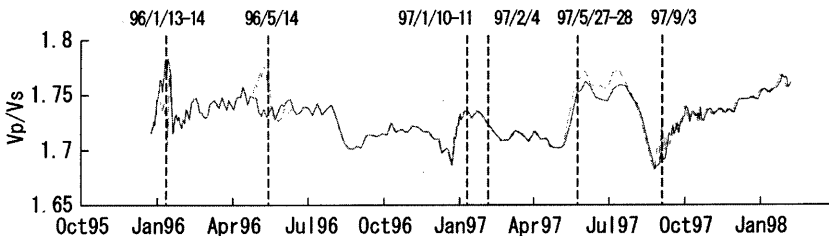


Fig.8 Temporal change of V_p/V_s ratio. Lines show the means for a running time window of 15 events stepped by 1 event. Solid line; no swarm. Broken line; including swarms.

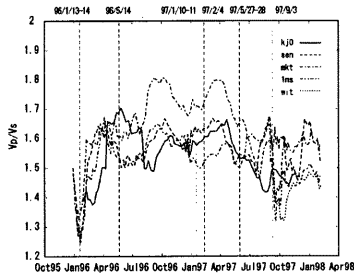


Fig.9 Temporal change of Vp/Vs ratio at each seismic station. These lines include no swarm.

測点毎に速度比 V_p/V_s の平均値と分散を求めた。平均値、分散はそれぞれの観測点において、kj0; 1.536, 0.0734; kj3; 1.612, 0.0731; sen; 1.551, 0.0763; mkt; 1.620, 0.0715; lms; 1.508, 0.0646; wit; 1.509, 0.0385 であった。この様な数値のばらつきからも、速度比 V_p/V_s の誤差が大きくなる理由が伺える。

V_p/V_s 構造をトモグラフィーを用いて求める場合、P arrival time から origine time を差し引いた P travel time を t_p , S arrival time から origine time を差し引いた S travel time を t_s とすると、それらの値と速度比 V_p/V_s との関係は、次式のように表されることが知られている (Walck, 1988)。

$$\Delta t_s - (V_p/V_s)_0 t_p = \sum_{j=1}^n l_j (s_{0p} + \Delta s_{pj}) \Delta (V_p/V_s)_j$$

ここで、 s は P 波のスローネス、 l は波線、 0 は初期値、 i は観測点を示す。また、トモグラフィーを実行する際に対象地域をいくつかの cell に分割するが、 j はそのうちの j 番目の cell を示している。和達ダイアグラムより求められる速度比 V_p/V_s は、読み取った P arrival time と S arrival time から得られる。つまり、ここで求めた速度比 V_p/V_s は、地震波線の通過する震源から各観測点までの V_p/V_s 構造に関係した値であると考えられる。したがって、大岳・八丁原地域の V_p/V_s 構造に不均質性が見られるのであれば、各観測点毎の速度比 V_p/V_s の平均値及び分散のばらつきも考えられ、観測点が少ない事を考慮に入ると、和達ダイアグラムによる速度比 V_p/V_s の誤差が大きくなることも理解できる。しかしながら、本研究地域における速度比 V_p/V_s 構造は、求められていないため、この点に関しては、推測の域を脱しない。

5. 速度比 V_p/V_s と震源位置

一般に、速度比 V_p/V_s は、速度構造と同時に V_p/V_s 構造として、しばしば地殻内部を表す指標に用いられ、速度比 V_p/Vs が場所によって異なる場合は、不均質構造であることが多い。このことから、速度比 V_p/Vs は、場所、すなわち位置に関係した値と考え、速度比 V_p/Vs と震源位置との比較を試みた。

速度比 V_p/Vs と震源位置の時間的な変化を示した図が Fig.10, Fig.11, Fig.12 の各図である。上から、 V_p/Vs 、震源の深さ分布及び水平分布それぞれの時間変化を示す。水平分布は NS 断面についての震央分布を用いている。これら全ての図においては、震源の時間変化を示す図があり、同図には点と曲線が描かれている。点で示されたものは震源の時空間分布を、曲線は標本数が地震数 15 個、移動数が地震数 1 個とした移動平均の値を示している。また、位置の指標として大岳地熱発電所、八丁原地熱発電所を示しているが、これらは震源の時空間分布における指標である。

Fig.10 から、速度比 V_p/Vs と震源は、時間的に変化していることがわかる。しかしながら、それらの変化の様子は様々であり、Fig.10 からは、速度比 V_p/Vs と震源位置との関連性を見出すのは困難である。

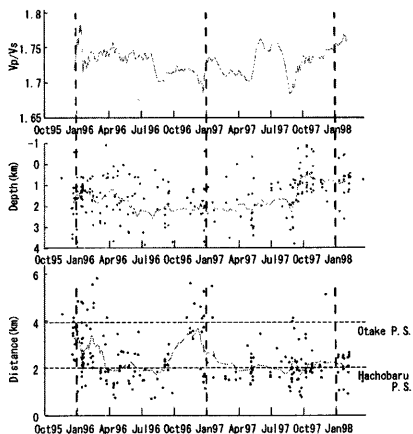


Fig.10 (a)Temporal change of V_p/Vs ratio, (b)temporal change of hypocenter's depth and (c)temporal change of epicenter.

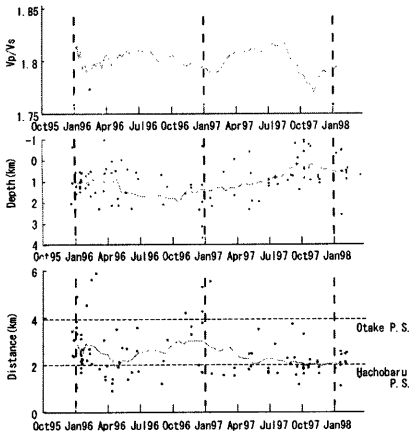


Fig.11 (a)Temporal change of high V_p/V_s ratio, (b)temporal change of hypocenter's depth and (c)temporal change of epicenter.

ところで、大岳・八丁原で得られた地震の速度比 V_p/V_s 平均値は、1.730 であった。また、速度比 V_p/V_s のとる範囲は、深さに対応した広がりを見せ、深さ 2km より浅くなると、範囲の広がりは、極端に増大した。増大した速度比 V_p/V_s は、1.730 以上の値であった。これらのことから、速度比 V_p/V_s の平均値 1.730 は、大岳・八丁原の地震活動において何らかの意味を持つ値と考え、1.730 以上とそれ未満に二分し、それらと震源位置の時系列変化を見ることを試みた。ここで 1.730 以上を high V_p/V_s 、未満を low V_p/V_s と表記する。

Fig.11 は、上から high V_p/V_s 、それに対応する震源の深さ分布、及び水平分布の時間変化を示す。high V_p/V_s の時間変化を見ると、夏ごろ極大値を取り、冬ごろ極小値を取る、ちょうど年周期的な変化をしている。震源の時間的な変化を見ると、水平面での震源位置、すなわち震央が、年周期性に近い変化をする。

Fig.12 には、上から low V_p/V_s 、それに対応する震源の深さ分布、及び水平分布の時間変化を示す。1995 年 11 月から low V_p/V_s は、 V_p/V_s が徐々に減少しつつ、1997 年 8 月あたりで急激に上昇する。震源位置の変化と比較すると、震源の深さが、1995 年 11 月から 1997 年 8 月まで緩やかに震源位置が深くなり、その後急激に浅くなり、この変化の様子は、low V_p/V_s の変化の様子と類似している。

すなわち、high V_p/V_s は、震央位置、low V_p/V_s は、震源の深さに関係した値であることがわかり、速度比 V_p/V_s は、震源位置に依存すると考えられ

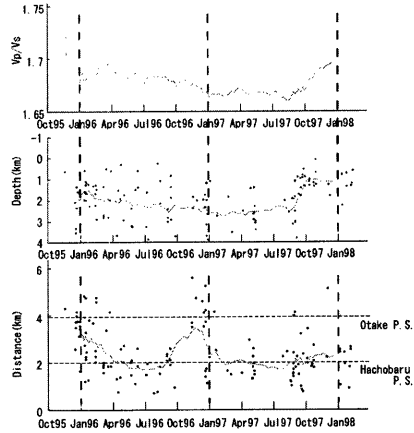


Fig.12 (a)Temporal change of low V_p/V_s ratio, (b)temporal change of hypocenter's depth and (c)temporal change of epicenter.

る。

6. まとめ

九重火山北西部で発生する地震について、速度比 V_p/V_s を検討した結果、次のことがわかった。①速度比 V_p/V_s のとる範囲は、深さに対応した広がりを見せ、震源が浅くなるほど、範囲の広がりは大きい。②速度比 V_p/V_s は、時間的な変化をし、群発地震発生前に減少、発生後に増加する傾向が見られる。③速度比 V_p/V_s と震源の深さ、震央の時間的な変化の様相は、必ずしも一致しない。しかしながら、high V_p/V_s 、low V_p/V_s とに分割し、震源位置との比較を試みた結果、時間的な変化に相関が見られた。

今回得られた一連の特徴は、地熱地域における地殻構造の不均質性、静的・動的な流体の存在が大きく関係すると考えられる。九重火山北西部における速度比 V_p/V_s の特徴を、さらに解明するためには、本地域における速度比 V_p/V_s と地殻構造の不均質性や静的・動的な流体の存在との関連性を明確にする必要がある。

謝辞

京都大学火山研究センターの増田秀晴氏、吉川慎氏にはデータの回収、観測点の維持に御協力を頂きました。

京都大学理学研究科院生の森健彦氏には本研究において有益な討論、御意見、御指摘を頂き、また本論文を書く際に図の提供をして頂きました。筒井麻貴氏にはデータ回収において御協力頂き、また有益な御意見、御指摘を頂きました。京都大学理学研究科の小野博尉、田中良和、橋本武志の各先生、及び、京都大学理学研究科院生の中坊真氏、長谷英昭氏には有益な御意見、御指摘を頂きました。

福岡大学理学研究科の石橋澄、松山哲男、鮎沢潤、奥野 充の各先生には有益な御意見、御指摘を頂きました。

以上の方々に謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 飯塚進 (1976) 1968年十勝沖地震前後におけるVp/Vsの時間的变化. 地震, 29, 247-263
- 久保寺章・伊藤潔・村上寛史・三波俊夫 (1982) 爆破地震動から求めた九重火山群の深部構造—Time-Term 法による—. 火山, 27, 81-95.
- 久保寺章 (1988) 地熱地帯における地震活動. 日本温泉科学学会誌, 38, 23-29
- 九州活構造研究会編(1989)九州の活構造. 東京大学出版会, 553p.
- 須藤靖明 (1993) 中部九州地域の火山周辺の地震活動とそのテクトニクス. 地質学論集, 第41号, 19-34.
- 須藤靖明・岡本茂・筒井智樹 (1996) 九重火山地域における地震波減衰構造. 火山, 41, 11-22.
- 松本征夫 (1979) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, 第16号, 127-139.
- 真鍋孝・江島康彦 (1986) 八丁原地熱地帯の貯留層構造およびその評価. 地熱, 23, 197-205.
- 三浪俊夫・久保寺章・表俊一郎・木下保美 (1981) 豊肥地熱地域における地震活動. 日本地熱学会, 第3巻, 第1号, 43-53.
- 山崎達雄・松本征夫・林正雄 (1968) 大岳地熱地帯の地質と熱水変質. 地熱, No.14, 12-23.
- Daniel R.H.O Connel and Lane R.Johnson (1991) Progressive inversion for hypocenters and P wave and S wave velocity structure : application to the Geysers, California, geothermal field. J.Geophys.Res., 96, 6223-6236
- G. De Luca., L. Filippi., G. Patane., R. Scarpa., S. Vinciguerra. (1997) Three-dimensional velocity structure and seismicity of Mt. Etna volcano, Italy. J. Volcanol. Geotherm. Res. 79, 123-138
- Sudo, Y., Ono, H., Hurst, A.W., Tsutsui, T., Mori, T., Nakaboh, M., Matsumoto, Y., Sako, M., Yoshikawa, S., Tanaka, M., Kobayashi, Y., Hashimoto, T., Hoka, T., Yamada, T., Masuda, H., Kikuchi, S. (1998) Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu, Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 81, 245-267.
- Sudo, Y., Matsumoto, Y. (1998) Three-dimensional Pwave velocity structure in the upper crust beneath Kuju Volcano, central Kyushu, Japan. Bull. Volcanol., 60, 147-159
- Taguchi, S. and Nakamura, M. (1991) Subsurface thermal structure of the Hatchobaru geothermal system, Japan, determined by fluid inclusion study. Geochem. J., Vol.25, 301-314.
- Walck, M. C. (1988) Three-dimensional Vp/Vs variations for the Coso Region, California. J. Geophys. Res. 93, 2047-2052

Seismic Activity at Kuju Geothermal area, Kyushu, Japan

Miyuki YOSHIKAWA, Yasuaki SUDO*, Tomoki TSUTSUI**, Sachihito TAGUCHI***

* Graduate School of Science, Kyoto University

** Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

*** Faculty of Science, Fukuoka University

Synopsis

The northwestern area of Kuju Volcano is one of the most active geothermal fields in Japan, where seismic activities including seismic swarms are very strong. From November 1995 to May 1998 a Vp/Vs ratio study for microearthquakes was carried out in this area. From these results we conclude that Vp/Vs ratio changed with time. These Vp/Vs changes are associated probably with changes in the seismic activity of such area. In this area, Vp/Vs ratios were obtained to be low, but near the geothermal power stations Vp/Vs ratios were comparatively higher. We suggest that Vp/Vs ratios are affected by the presence of water, because the study area are rich in fructures and geothermal fluid.

Keywords : Vp/Vs ratio; geothermal area; Kuju Volcano; central Kyusyu in Japan