

九重火山とその周辺の地熱地帯における地震波速度構造

吉川美由紀*・須藤靖明*・John M. Londono**・増田秀晴*

* 京都大学大学院理学研究科

** INGEOMINAS, Volcanological and Seismological Observatory, Manizales, Colombia

要旨

九重火山とその周辺においてP波速度構造の決定を行った。その結果、深さ0km(海拔1km)では地質構造に対応したP波速度異常がみられた。深さ1km(海拔0km)以深では、八丁原・赤川地域で高速度、黒川地域で低速度となる領域が見出され、それぞれの領域は九重火山周辺に分布する地熱・温泉地域に一致した。

キーワード：九重火山・地熱地域・温泉・3次元P波速度構造

1. はじめに

九重火山は別府から島原へと延びる別府-島原地溝(松本, 1979)内に位置する安山岩質の火山である。その活動は約50万年以降に始まり特に30万年前から活発化したとされ(鎌田, 1997)、最近では1995年10月に星生山の北東斜面にある硫黄山で水蒸気爆発を起こした(Sudo et al. 1998 など)。この九重火山周辺には多数の温泉および地熱地域がみられ、星生山の南には赤川温泉、湧蓋山の北西には岳湯温泉、一目山の南西部には黒川温泉があり、泉水山と湧蓋山の間に大岳・八丁原地熱地域が位置する。中でも大岳・八丁原地熱地域には地熱発電所が存在し、日本でも有数の出力を誇る。また水蒸気爆発を起こした硫黄山では、現在も噴気活動が活発である。

地表において地熱活動が確認できる九重火山周辺では地熱資源探査として重力測定が行われており、重力異常領域と九重火山周辺に分布する温泉・地熱活動地域とが対応付けられている。駒沢・鎌田(1985)は大岳・八丁原地熱地域が高重力異常地域に当ること、また花岡・高倉(1987)は高重力異常地域と低重力異常地域の境界が断層の分布とほぼ一致すること、高島(1985)は九重火山周辺でみられる温泉および地熱地域のいくつ

かは低重力域と高重力域の境界に位置することを示した。このように、重力測定から九重火山およびその周辺の温泉・地熱地域における構造が議論されるが、地熱活動の熱源や貯留層の位置を特定するような議論は少ない。

火山周辺の熱源や貯留層を議論する手法として、しばしば地震波速度構造が用いられる。O'Connell and Johnson (1991)はGeysersにおけるP波速度(V_p)およびS波速度(V_s)構造を推定し、その比 V_p/V_s の小さい領域が蒸気の生産領域であり、大きい領域が地熱貯留層に対応することを示した。Wu and Lee (1999)はCosoで V_p および V_s を推定し、わずかにlow V_s を示すhigh V_p 領域が温泉地域に見出され、そのhigh V_p 領域は地熱流体で満たされていると考えた。

これまで、九州および中部九州では自然地震を用いた3次元地震波速度構造が求められ、地殻構造が議論されている。Zhao et al. (2000)は、表層において九州北部の火山フロントの前弧側に低速度の領域が広がることを示した。八木原ほか(2001)はモホ面近傍の最上部マントルにおいて、阿蘇火山の北西部から九重火山の西に低速度領域が広がることを示した。Sudo and Matsumoto (1998)は九重火山の北部と南部に低速度領域が存在し、九重火山の北西部に高速度領域が存在す

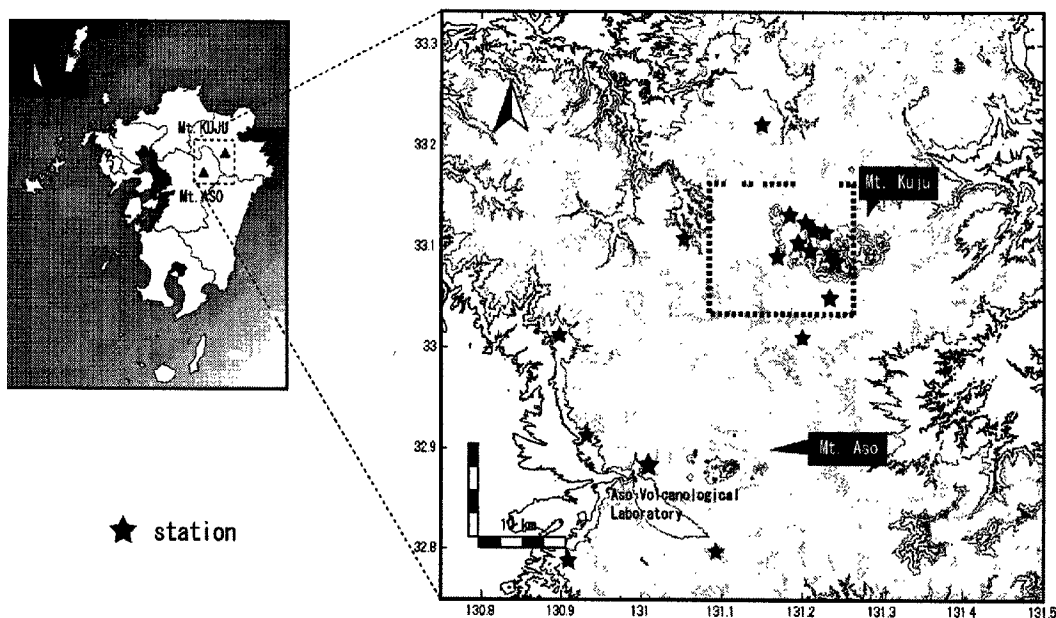


Fig. 1 Map of Kyushu island and distribution of seismic stations. The study area is closed with the broken line. Stars and triangles indicate seismic stations and tops of mountains, respectively. Many geothermal activity are observed around Kujū Volcano. A phreatic explosion occurred on October 1995 at Iwoyama in Kujū Volcano. Otake and Hatchobaru area is the distinguished geothermal area in Japan and geothermal power stations have been operating there.

ることを示し、九重火山との関係を述べている。本報告ではこれらの結果をふまえた上で、地熱・温泉地域と地殻構造の関係を明らかにすることを目的とし、Sudo and Matsumoto(1998)よりもやや小さな観測網を用いて3次元速度構造の決定を行った。

2. データ

1995年の水蒸気爆発以降、京都大学火山研究センターは九重火山とその北西部に地震観測網を設置した(Fig.1)。また、同センターでは阿蘇カルデラ内外の地震を観測するために、カルデラ内及びその周辺にも観測点を設置している。解析にはこれらの観測網で1995年10月から2001年10月までに得られたデータを用いている。

速度構造の初期モデルは、須藤(1981)の阿蘇火山の速度構造およびSudo and Matsumoto(1998)の速度構造と大岳・八丁原地域の地質構造(真鍋・江島, 1984)から6つのモデルを立て、Kissling(1994)によるVELESTからRMSが最も小さく求めたmodel5を選択した(Table 1.)。この速度構造と観測データからHYPO71により震源決定を行い、震源決定精度の指標となるRMSが0.2以下のものを選んだ。その結果、978個の地震、6439個のP波到来時刻を使うことが出来た(Fig.2)。

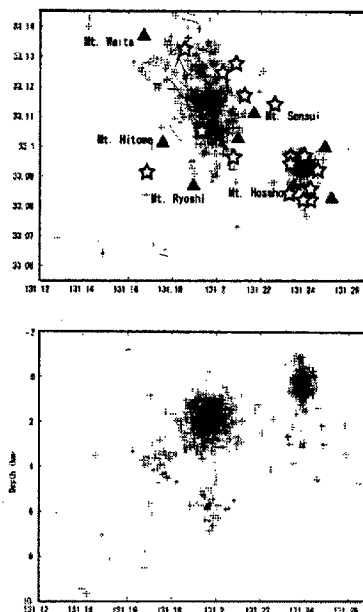


Fig. 2 Hypocenter distribution in this study area. 6439 P wave arrival times from 978 earthquakes observed during the period from October 1995 to October 2001 were applied to the tomographic inversion.

Table 1 Starting model of P wave velocity at Kuju area

depth	P velocity(km/sec)
0	2.68
0.2	3.01
0.4	3.33
0.6	3.65
1	4.29
1.5	4.77
2	4.89
2.5	5.03
3	5.16
3.5	5.27
4	5.35
5	5.54
6	5.73
7	5.91
8	6.02
9	6.06
10	6.1
11	6.14
49.45	7.7
412.45	8.97

Sudo(1981)

Sudo and Matsumoto(1998)

RMS

start model1	result	start model2	result	start model3	result	start model4	result	start model5	result	start model6	result
3.800	3.956	3.392	3.530	3.392	3.400	3.622	3.769	3.956	4.074	3.653	3.709
		"0-1"		"0-1"							
		4.830	4.740	4.963	4.728	"0-1.5"				"0-1.3"	
"depth=0-2km"		"1-2"				5.027	4.874			4.966	4.812
5.100	5.009	5.270	4.980					5.410	5.213		
"depth=2-3km"				"1-3"		"1.5-3"				"1.3-3.2"	
5.390	5.382			5.387	5.404	5.387	5.409			5.701	5.601
"depth=3-5km"		"2-5"		"3-5"		"3-5"					
6.580	6.180	6.237	6.070	6.237	6.016	6.237	5.947	6.237	6.140		
								6.322	6.140		
										"3.2-9"	
"depth=5-30km"		"5-30"		"5-30"		"5-30"		6.300		7.021	6.977
7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700	7.700		"9-30"	
										7.700	7.700
	0.105		0.079		0.080		0.079		0.076		0.078

reference depth = 1km

3. 結果

解析から得られた3次元P波速度構造の妥当性を判断するために、チェッカーボードテストを行った。地表から深さ5km(海面下4km)までのチェッカーボードテストの結果をFig.3に示す。九重火山とその西部を含む13km×9km×5kmの範囲を1km×1km×1kmのグ

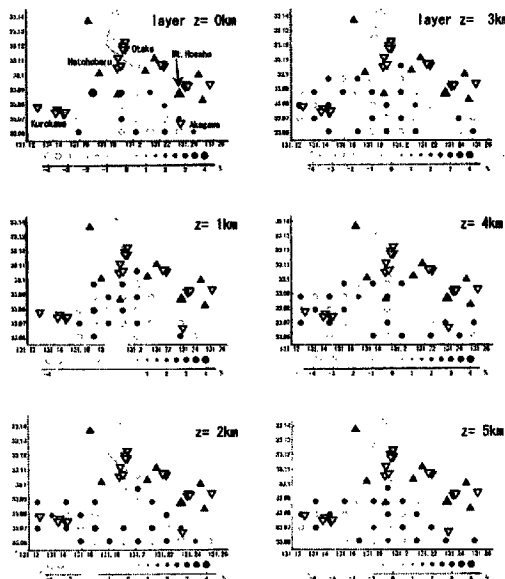


Fig. 3 The result of the checkerboard test for the study area. Good resolution can be obtained from 0km (surface) to 5 km depth.

リットで区切り、各ブロックに±3%のパータベーションを与えている。Fig.3には、破線が通らない箇所の結果は表示していない。チェッカーボードテストの結果から、解析対象の地域は深さ5kmに至るまで比較的再現性が良いことがわかった。したがって、この範囲を解析の対象とした。

3次元トモグラフィにはZhao et al.(1992)の方法を用いた。Fig.4とFig.5にその結果を示す。上向きの三角形は山頂を示し、下向きの三角形は温泉もしくは噴気がみられる位置を示す。深さ0kmでは星生山の南1kmと八丁原の東1kmの位置にそれぞれ4.3km/secと4.4km/secのhigh Vpがみられる。一方、八丁原の南西約3kmの位置に3.9km/secのlow Vpがみられる。深さ1kmでは赤川付近に4.3km/secのhigh Vpがみられる。深さ3kmではちょうど大岳の位置に4.9km/secのhigh Vpがみられる。また、黒川の東1kmの位置に4.3km/secのlow Vpを示す領域が現れ、その領域は深さを増すにつれ大きくなり、深さ5kmではその範囲がより大きくなる傾向がみられる。

4. 考察

九重火山は久住山、星生山、三俣山などの溶岩ドームから形成されており、この九重火山の南部および西部には扇状地堆積物が分布する(鎌田, 1997)。Fig.5に示した深さ0kmの速度構造をみると、High Vpの分布はちょうど溶岩の分布する位置にあたる。

そして八丁原の南西約3kmのlow Vpを示す位置には扇状地堆積物が分布している。これらのことから、深さ0kmの結果は地表付近の地質構造を反映したものと考えられる。

深さ1kmで赤川にみられたhigh Vp領域は久住低

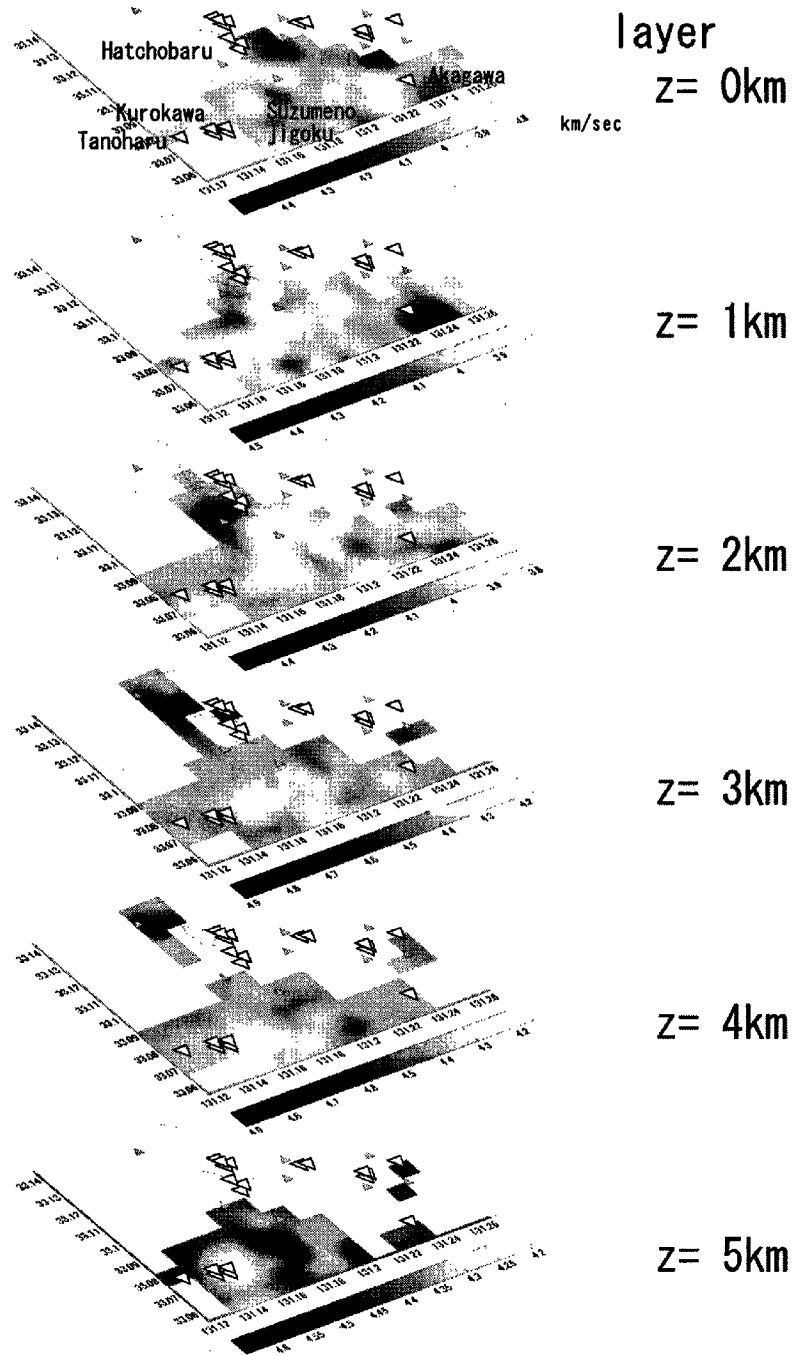


Fig. 4 Three-dimensional P-wave velocity model in the 6 layers (0, 1, 2, 3, 4 and 5 km depth from surface). Triangles and inverted triangles indicate tops of mountains and hot springs including fumaroles, respectively. The layer at 0km depth is explained in Fig.5. High P-wave velocity zones are recognized at the Akagawa area at 1km depth (4.3km/sec) and the Otake geothermal area at 3km depth (4.9km/sec). Low P-wave velocity zone is located around the Kurokawa area (4.3km/sec) from 3km to 5km depth. These anomalies of velocity can be found at the geothermal areas and hot springs around Kuju Volcano.

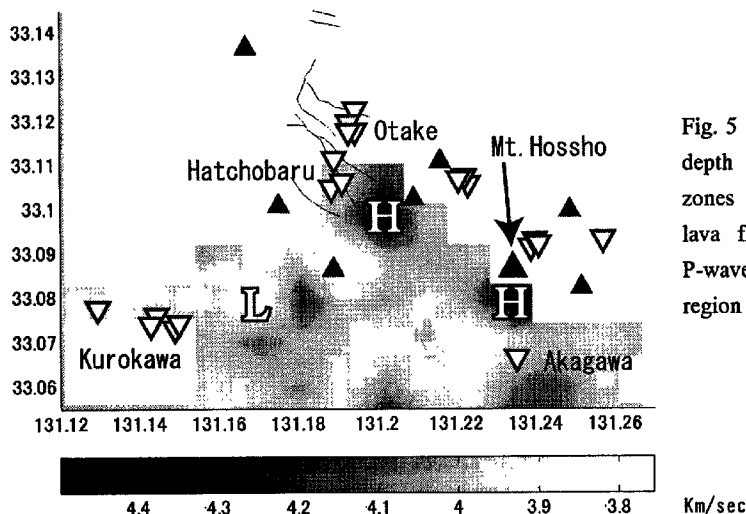


Fig. 5 P-wave velocity structure at the depth of 0km. High P-wave velocity zones are located at regions observing lava flow from Kuju Volcano. Low P-wave velocity zone is located at the region observing volcanic fan deposit

重力異常地域(駒沢・鎌田, 1985, 花岡・高倉, 1987)のほぼ西北端にあたる。花岡・高倉(1987)は久住低重力異常がひとまとまりの河川系に対応することを述べている。また、駒沢・鎌田(1985)はブルアパート構造の表れとしている。一般的にP波速度はその領域に流体が含まれると増大することが知られている。ブルアパート構造によって構造的に脆くなっている領域に流体が流れ込むことによって、赤川に high Vp がみられた可能性がある。

深さ 3km においては大岳地域で high Vp がみられた。大岳・八丁原地域には噴気地帯や温泉などが存在し(山崎ほか, 1968), 地熱生産井からは蒸気と熱水の混合流体が生産される(Hayashi, 1973)。この地域の基盤出現深度は地表から約 1900m (海面下 0.7km) と報告されており、この基盤深度は周辺に比べ 300~500m 浅いといわれている(真鍋・江島, 1984)。Sudo and Matsumoto(1998)は深さ 5 km で大岳・八丁原の辺りに high Vp 領域を見出し、重力異常域を参考にこれを九重火山のドームの一つと考察した。以上のことから、深さ 3km で八丁原にみられた high Vp は地熱流体や浅部に位置する基盤の影響であると考えられる。

深さ 3km では黒川の東、約 1km の位置に low Vp の領域がみられる。この地域は雀の地獄と呼ばれており、熱水変質帯がみられている。雀の地獄下の low Vp 領域は深くなるにつれ大きさを増し、深さ 5km になるとその領域は黒川を中心とした半径約 1km の大きさになる。Sudo and Matsumoto(1998)に示される深さ 3km でみられた low Vp 領域の「LB」が、また Zhao(2000)が北部九州の活火山下部にあるとする low Vp 領域の一部、八木原ほか(2001)が示す別府一島原地溝帯に対応する帯状の低速度領域の一部が、黒川下でみられた low Vp 領域に相当すると示唆される。

地震波速度は温度の上昇とともに遅くなることが知られており(Murase and McBirney, 1973), 例えば阿

蘇では, Sudo and Kong(2001)が杵島岳・烏帽子岳・中岳のほぼ中心で海面下 6km にみられた低速度領域をマグマ溜まりと考えている。Sudo and Matsumoto(1998)は「LB」の解釈を重力異常(低重力異常)と関連付け、地殻が低密度領域になっていることからP波速度が遅く見積もられたと考察しているが、low Vp になる領域には田の原から雀の地獄にかけてほぼ東西の方向に熱水変質帯が分布し(鎌田, 1997), 地下温度が高いとされる地域である(川村, 1984)。また深部熱水の流れは、雀の地獄下部(海拔 0.4km)から始まり、地表へ向かうに従って黒川、田の原へと広がると考えられている(檜崎, 2002)。

これらのことから、黒川下部でみられた low Vp 領域は黒川温泉の熱源を示すとも考えられる。

5. まとめ

九重火山周辺のP波速度構造を決定し検討した。その結果、P波速度異常は八丁原地熱地域・赤川温泉・黒川温泉など、九重火山を取り囲むように分布する地熱または温泉地域で確認された。それぞれの地熱・温泉地域でみられる異常の深さやセンスは異なっており、地熱系もしくは地熱系の生成条件がそれぞれ異なることがP波速度構造の結果から推測された。

参考文献

- 鎌田浩毅(1997): 宮の原地域の地質, 地質調査所, 127p.
- 川村政和(1984): 九州中央部・湧蓋山周辺地域における地下熱構造(1)浅部地温分布と放熱量, 地熱学会誌, Vol. 6, No. 4, pp. 217-241.
- 駒沢正夫・鎌田浩毅(1985): 豊肥地域の重力基盤構造, 地質調査所報告, No. 264, pp. 305-333.

- 須藤靖明(1981) : 阿蘇カルデラ西部地域の地震活動, 火山, Vol. 26, No. 4, pp. 263-279.
- 高島 勲(1985) : 北部九州八丁原—野矢及び周辺地域の広域地熱変質と熱水系, 地熱学会誌, Vol. 7, No. 4, pp.19-40.
- 植崎千夏子(2002) : 黒川温泉における地化学的研究, 福岡大学理学部卒業論文(手記).
- 花岡尚之・高倉伸一(1987) : 豊肥地熱地域の重力異常の地質的意義, 地熱学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 1-18.
- 松本征雄(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, No.16, pp. 127-139.
- 真鍋 孝・江島康彦(1984) : 八丁原地熱地帯における裂か型貯留層の地質構造特性および熱水系, 地熱, Vol. 21, No. 2, pp. 101-118.
- 八木原寛・清水 洋・後藤和彦・角田寿喜(2001) : 近地地震データによる九州の地殻および最上部マントルの3次元地震波速度構造, 月刊地球, Vol. 23, No. 8, pp. 583-588.
- 山崎達雄・松本征夫・林正雄(1996) : 大岳地熱地帯の地質と熱水変質, 地熱, Vol. 14, pp. 12-23.
- Hayashi, M(1973) : Hydrothermal alteration in the Otake geothermal area, Kyushu, Chinetsu(地熱), Vol. 10, No.3, pp. 9-46.
- Kissling, E., W. L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips, U. Kradolfer(1994) : Initial reference models in local earthquake tomography, J. Geophys. Res., 99, 19635-19646
- Murase, T. and McBirney, A. R. (1973) : Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures. Geol. Soc. Am. Bull., 84, 3563-3592.
- O'Connell, D. R. H. and Johnson, L. R. (1991) : Progressive inversion for hypocenters and P wave and S wave velocity structure : Application to the Geysers, California, Geothermal Field, J. Geophys. Res., 96, B4, 6223-6336.
- Sudo, Y. and Kong, L. S. L.(2001) : Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan. Bull. Volcanol., 63, 326-344.
- Sudo, Y and Matsumoto, Y. (1998) : Three-dimensional P-wave velocity structure in the upper crust beneath Kuju Volcano, central Kyushu, Japan. Bull. Volcanol., 60, 147-159.
- 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. and Kikuchi, S. (1998) : Seismic activity and ground deformation associated with 1995 phreatic eruption of Kuju Volcano, Kyushu, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 81,245-267.
- Wu, H. and Lees, J. M. (1999) : Three-dimensional P and S wave velocity structures of the Coso Geothermal Area, California, from microseismic travel time data, J. Geophys. Res., 104, B6 13217-13233.
- Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi, S. (1992) : Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res., 97, 19909-19928.
- Zhao, D. and Asamori, K. (2000) : Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone. Geophys. Res. Lett., 23, 685-688.

Three-dimensional P-wave Velocity Structure around Kuju Volcano, Kyushu, Japan

Miyuki YOSHIKAWA, Yasuaki Sudo*, John M. Londono**, Hideharu Masuda*

* Graduate School of Science, Kyoto University

** INGEOMINAS, Volcanological and Seismological Observatory. Manizales, Colombia

Synopsis

P-wave velocity structure around Kuju Volcano was obtained with 3-D seismic tomography. 6439 P arrival times were inverted in order to find a 3-D P wave velocity structure by using the method of Zhao et al. (1994). A good correlation with the surface geology was found for layer Z=0km (1km above sea level). Vp anomaly zones below Z=1km were found at some geothermal areas.

Keywords : Kuju Volcano; geothermal area; hot springs; 3-D P-wave velocity