

白山火山周辺の三次元地震波速度構造

高橋直季* **・根岸弘明***・平松良浩*

(2004年4月28日受付, 2004年10月14日受理)

Three-Dimensional Seismic Wave Velocity Structure around the Hakusan Volcano

Naoki TAKAHASHI* **, Hiroaki NEGISHI*** and Yoshihiro HIRAMATSU*

We determine the three-dimensional P- and S-waves velocity structures around the Hakusan volcano in the Ryohaku mountains area, where there are some Quaternary volcanoes, using the travel-time tomography method. We use 104,764 P- and 97,232 S-waves arrival time data observed at 521 seismic stations from 3,930 earthquakes in and around this region. The initial model, hypocenters and one-dimensional velocity structure, for the three-dimensional inversion are simultaneously determined by the Joint Hypocenter Determination method. Since dumping parameters and iteration number affect the absolute value of velocity perturbation, we determine these values quantitatively by applying "Cross Validation Technique". A checkerboard resolution test is applied to the dataset to examine the resolution scale of this dataset.

We find a velocity anomaly zone with low- V_P , low- V_S and high- V_P/V_S beneath the Hakusan volcano at the depth of 10 to 14 km, while there is no such a region beneath other volcanoes in the Ryohaku mountains area. Seismicity is shallower beneath the Hakusan volcano than beneath the surrounding areas and no earthquake occurs within the velocity anomaly zone beneath the Hakusan volcano. These features support that the velocity anomaly is a partially melting rock matrix with high temperature. The Hakusan volcano is one and only active volcano in recent 0.2 Ma in the Ryohaku mountain area. This geological feature is consistent with our tomographic result. The existence of magma body, which can be shown as low-velocity body, may indicate that Mt. Hakusan is still noteworthy active volcano.

Key words: tomography, Quaternary volcanoes, Hakusan volcano, V_P/V_S

1. はじめに

中部地方は第四紀火山が分布する飛騨山脈や両白山地, 跡津川断層をはじめとする第四紀の活断層が数多く存在する, テクトニクス的に非常に活発な地域である. この地域を対象としてこれまで数多くの地球物理学的, 地質学的研究が行われてきた. 火山下や断層帯では不均質構造が存在することは明らかであり, 特に活火山の深部構造を知ることは, その火山の現在の活動度を示すものとして, 火山学にとっても重要な研究の一つである.

地球内部の不均質構造を推定する解析手法の一つに, 地震波走時を使って三次元的に地震波速度構造, 震源パ

ラメータを決定する地震(走時)トモグラフィーがある. 中部地方において, この地震トモグラフィー法を用いて三次元速度構造を推定した研究例はいくつかある. 例えば Hirahara *et al.* (1989) では, P波到達時刻を用いて中部地方を水平方向に約 50 km, 深さ方向に約 33 km のブロックに分けてインバージョンを行っている. その結果, 中部山岳下に低速度領域を検出し, この要因として地殻の厚化や低速度物質の存在を挙げている. また Mikumo *et al.* (1995) は, P波到達時刻を用いて飛騨山脈・両白山地に挟まれた飛騨地域の深さ 10 km までの三次元速度構造を推定した. 彼らは水平方向に 20 km, 深

* 〒920-1192 石川県金沢市角間町
金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa,
Ishikawa 920-1192, Japan.

** 現在: 〒392-8511 長野県諏訪市高島 1-22-30
諏訪市役所
Present: Suwa City Office, Takashima 1-22-30, Suwa,

Nagano 392-8511, Japan.

*** 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1
防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention, Tennodai 3-1, Tsukuba, Ibaraki
305-0006, Japan.

Corresponding author: Hiroaki Negishi
e-mail: negishi@bosai.go.jp

さ方向に 3 km 間隔のグリッド点での速度を計算し、跡津川・茂住・牛首断層周辺で高速度領域、飛騨山脈・白山下で深さ 7 km まで低速度領域が広がることを報告した。彼らは跡津川断層周辺の高速度異常は変成岩の影響であると示唆している。最近の研究では、Matsubara *et al.* (2000) が飛騨山脈周辺に 2 ヶ月半の間展開された臨時テレメータ観測点で得られた自然地震データを解析し、立山の地下 4 km と 15 km 付近に低速度領域が存在することを明らかにしており、Watanabe (1993) を参照し、この低速度領域の要因をメルトであると推定している。近年、地震観測網の高密度化、高精度なデータの蓄積、さらには計算機処理能力の飛躍的な向上に伴い、さらに微細な構造(中部地方: 水平方向 0.25 度、深さ方向 5~15 km) が推定可能になりつつある(松原・根岸, 2003)。

金沢大学では 2000 年より石川県と岐阜県の県境に位置する第四紀の火山である白山(標高 2,702 m) 直下の地震活動を調べるために臨時地震観測(高橋・他, 2003) を毎年行っている。白山火山の活動は今から約 30~40 万年前に始まっており、歴史資料に残る主なものとしては、706 年、1042 年、1547 年、1554 年、1579 年、1640 年、1659 年に噴火活動の記載が見られる(山崎, 1980; 震災予防調査会, 1982)。これらの歴史資料および火山層序学的研究から、守屋(2000) は白山の火山活動には約 450 年(活動期 100~150 年、休止 300 年)の周期性があると報告している。歴史資料の最後の噴火が 1659 年であり、現在既に休止期間の 300 年を越えて火山活動が無い状態が続いており、白山は次のサイクルに移行しつつある可能性がある。白山を含めた中部山岳地域の広域的な地殻・上部マントルを対象とした地球物理学的研究はこれまでにもいくつかなされており、スラブの形状と上部マントルからのマグマ供給システムについての関係などが議論されている(例えば Honda and Nakanishi, 2003)。しかし、焼岳・御岳山(根岸, 1996) や立山(Matsubara *et al.*, 2000) でされているような、マグマ溜まりのイメージング等、地殻内の比較的小さなスケールを対象とした微細速度構造の研究は、白山についてはまだなされていない。本研究では、地震トモグラフィー解析により白山周辺の深さ 50 km 付近までの三次元速度構造を推定し、活火山としての白山の下が現在どのようになっているかを考察する。また、速度構造と白山を含む両白山地の第四紀火山との関係についても報告する。

2. データ

白山臨時観測期間中の地震については、既存観測点のデータと臨時観測点のデータを統合し、WIN システム(卜部・東田, 1992) を用いて P 波、S 波の読み取りを

行った。ここで P 波については 3 観測点、S 波については 1 観測点以上で読み取りが行われた地震に対し、Hirata and Matsu'ura (1987) のプログラムを用いて震源決定を行った。本研究では波線分布を考えた上で 2001、2002 年の臨時観測期間中に臨時観測点で読み取り値のある地震 89 個を選別した。なお、2000 年の臨時観測は試験的に行われたものであるため本解析では使用しなかった。89 個の地震の内訳は、白山直下(山頂より水平方向に半径 5 km 以内)の地震が 26 個、周辺の地震(深さ 500 km 以浅で臨時観測点からの震央距離が 100 km 以内)が 63 個である。読み取り精度は P 波、S 波それぞれ 0.02~0.05 秒、0.04~0.1 秒程度であり、その震源決定誤差は水平、鉛直方向それぞれ 0.5 km、0.3 km 程度である。ただし 50 km よりも深い地震に対しては、P 波、S 波の読み取りデータを気象庁の一元化観測値データに加え、震源位置は気象庁の震源データの値をそのまま用いた。この臨時観測データを用いることにより、白山周辺で波線分布が密になり、地震トモグラフィー解析時に白山周辺での分解能が向上する。

さらにデータ数を増やすために気象庁の一元化観測値データも用いた。データ取得期間は 1997 年 10 月 1 日~2002 年 9 月 31 日の計 5 年間とした。データ範囲は緯度 34.5~37.5 度、経度 135.5~139 度、深さ 500 km 以浅であり、この範囲で発生した地震の P 波、S 波観測値を取り出した。次にこれらの地震に対して波線分布がなるべく均一になるよう解析領域を 0.05 度×0.05 度×5 km のブロックに分割し、その中で観測数が最大の地震を 1 つ選別した。さらにこの中から 15 観測点以上で読み取りがある地震のみを選別し、計 3,841 イベントの気象庁観測データを用いた。

このようにして選別された地震の総数は 3,930 個(白山臨時地震観測と気象庁)であり、P 波、S 波の読み取り数はそれぞれ 104,764 個、97,232 個となっている。気象庁の観測値データでは読み取り精度も明示されており、観測波形の立ち上がりが明瞭(フラグ I-impulsive)、通常(フラグなし)、不明瞭(フラグ E-emergent)と 3 つに分類されている。地震トモグラフィー解析ではこの読み取り精度に準じた誤差を与えた。P 波の読み取り精度はそれぞれ 0.02 秒、0.05 秒、0.1 秒とし、S 波については 0.04 秒、0.1 秒、0.2 秒とした。また臨時地震観測のデータの読み取り精度は、P 波、S 波それぞれ 0.02 秒、0.04 秒とし、50 km 以深のデータについては 0.05 秒、0.1 秒とした。本研究で用いた地震の震源分布を Fig. 1 に示す。

本研究では、臨時観測点(8 点)を含め 521 観測点のデータを使用した。白山周辺領域の下部地殻や最上部マントルを通る波線を増やすために、白山周辺領域より広

い範囲を解析領域とした。なお、臨時観測点設置範囲(白山周辺 30 km 四方)での観測点間隔は平均 10 km 程度であり、それ以外では平均 20 km 程度となっている。使用した地震観測点の分布を Fig. 2 で示す。この図には

白山周辺の第四紀火山も示されている。

3. 初期モデルの構築

気象庁で使用している一次元速度構造 JMA2001 (上

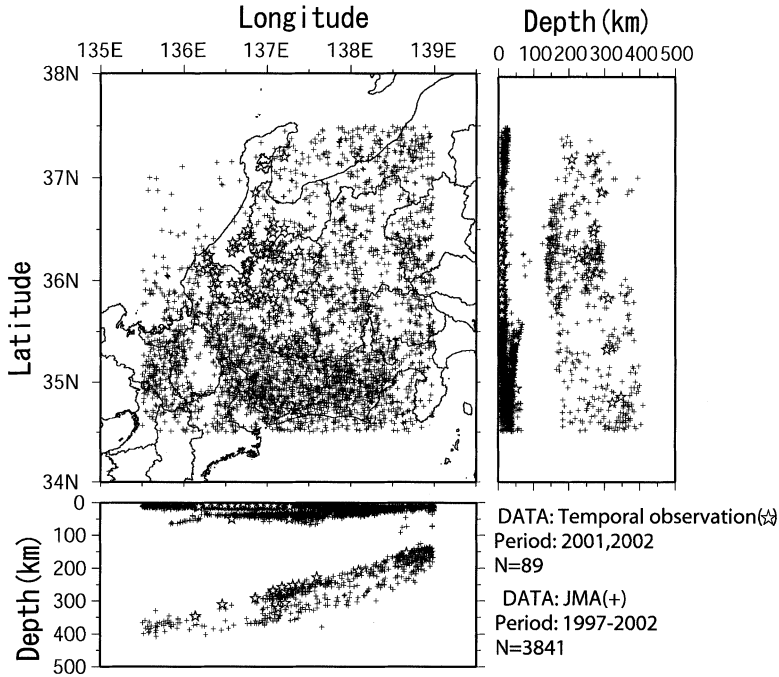


Fig. 1. Distribution of the 3930 earthquakes used in this study. Stars (☆) indicate the hypocenters observed at the temporal seismic stations around the Hakusan volcano. Pluses (+) indicate the hypocenters reported by Japan Meteorological Agency (JMA).

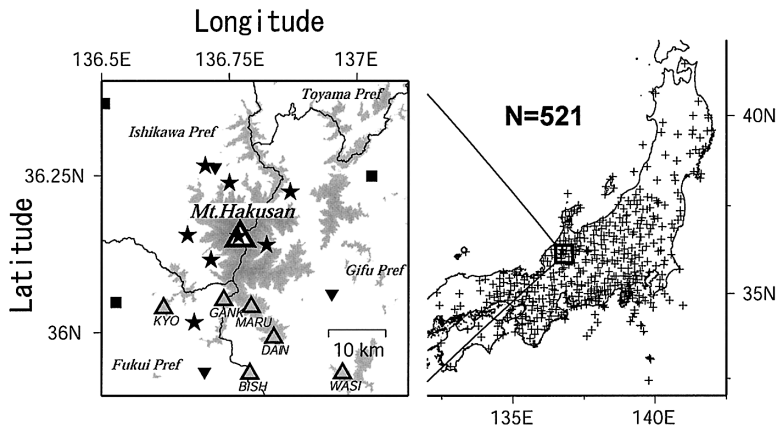


Fig. 2. Distribution of the seismic stations used in this study. Stars (☆) indicate the temporal stations installed around the Hakusan volcano. Solid squares (■) show the permanent seismic stations operated by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Inverse triangles (▼) show the seismic stations operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. The total number of stations is 521. Shaded part in the left figure shows the highland area higher than 1300 m. Open triangles (△) show the Quaternary volcanoes in this area (KYO; Kyoga-dake, GANK; Gankyoji-san, MARU; Maru-yama, DAIN; Dainichiga-dake, BISH; Bishamon-dake, WASI; Washiga-dake).

野・他, 2002) は, JMA83A (日本列島の地殻速度構造を平均化) を改良したもので, 不連続面のない連続的な構造となっている. 一方, 白山臨時地震観測の震源決定で用いられている一次元速度構造は竹内 (1978) による水平成層構造である. この構造は解析地域周辺で過去に行われた渥美〜能登沖測線 (Aoki *et al.*, 1972), 倉吉〜花房測線 (Yoshii *et al.*, 1974) などの人工地震観測結果を参考にして決められている. 一元化データの震源と白山臨時観測で得られたデータによる震源では使用した速度構造が異なるため, トモグラフィー解析で初期値として与える一次元速度構造及び震源を改めて正確に決定する必要がある. トモグラフィー解析では, 解が初期値に依存する傾向があるため, この作業を慎重に行わなければならない.

本研究では連係震源決定 (JHD) 法により一次元速度構造を決定する. この手法は一次元速度構造, 震源および観測点補正値を逐次的に補正する同時インバージョン法であり, 計算には Kissling *et al.* (1994) のプログラム VELEST を用いた. ここでの観測点補正値は, 観測点近傍の地質による影響等によって生じる各観測点に固有な時間のずれを示す. インバージョンの際に与える初期値として, JMA2001 (上野・他, 2002) を多層構造で近似した一次元速度構造を用い, 深さ 300 km までの構造を求めた. JHD 法では構造と震源を同時に決定するために, ダンピングパラメータの与え方により, それぞれの解の間にトレードオフが発生する. 今回は解析に使用するデータセットにより事前に震源再決定をしており, 初期データとして与える震源はかなり正確であると考えてよい. そのため, JHD 法の適用においては, 震源再決定よりも構造決定に重みを置くようにダンピングパラメータを与えた.

走時残差の RMS (root mean square) は 3 回のイタレーション後に 0.34 秒から 0.23 秒と減少した. ここで得られた一次元速度構造と V_P/V_S を Fig. 3 (a) に示す. 初期値を点線, 構造の標準偏差をエラーバーで示す. 50 km 以浅の構造の標準偏差はすべて 0.1 km/s 以内であり, 解の分解能を示すリゾリューション行列の対角項は, ほとんどの深さで 0.9 を超える値となった. 50 km 以深については, データ量が急激に少なくなることもあり, 初期値からの変化量はごく小さい結果となったため, ここでは示していない. 得られた構造は上部地殻で V_P/V_S が低く, 下部地殻で高くなっている. また, 解析前後の震源位置に顕著な変化は確認されなかった. なお, 得られた P 波と S 波の観測点補正値は傾き約 1.7 (標準的な V_P/V_S に相当) のきれいな正相関を示し, 絶対値もほぼ ± 2 秒の範囲内に収まる結果となった (Fig. 3 (b)).

この観測点補正値については, 地震トモグラフィー解析時に観測点最近傍グリッドの速度異常として解かれるため, この後の解析には使用しない. 得られた震源及び一次元速度構造を初期モデルとし, 地震トモグラフィー解析を行った.

4. 地震トモグラフィー解析

本研究では, Zhao *et al.* (1992) を改良した Negishi *et al.* (2002) による方法を用い P 波, S 波の三次元速度構造を推定した. 波線追跡には三次元波線追跡法である Koketsu and Sekine (1998) による *pseudo-bending* 法を用いている. これは 2 点間の最短走時を決定する Um and Thurber (1987) のアルゴリズムを極座標系に拡張したも

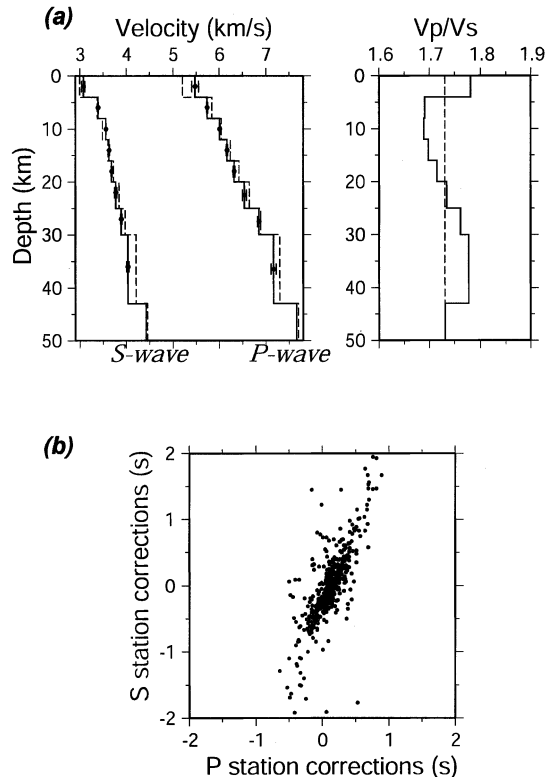


Fig. 3. (a) One-dimensional velocity structure of P-wave velocity (V_P) and S-wave velocity (V_S) (left) and the V_P/V_S structure (right) as the initial model of the tomographic study determined by the JHD method. Dashed and solid lines show the P- and S-waves velocity before and after the JHD inversion, respectively.

The error of the velocity at each layer is plotted on the grid node represented by solid circle. (b) Correlation between the resultant P-wave station corrections and S-wave ones.

のであり、本プログラムでは低速度層を考慮しても三次元波線追跡が発散せずうまく実行できるよう改良されている。本研究では速度不連続面を考慮していないため、屈折波が初動となるデータについては正しい波線追跡ができない可能性がある。そのため地殻内の地震については震央距離が120 kmより遠いデータを取り除いた。またグリッド間隔は白山周辺で水平方向に0.05度、それより外側で0.1度~0.2度とした (Fig. 4)。ここでは研究対象領域についてののみ示しているが、実際には使用した観測点を含む全領域についてグリッドを配置し、解析に含めている。深さ方向のグリッドについては一次元速度構造の各層の中間点に配置してある (Fig. 3 (a))。行列解法としては共役勾配法を改良したLSQR法を用いている。この行列解法は収束が比較的速度いため、地震トモグラフィ解析に用いられることが多い。

得られた結果に対しては解の信頼性を確かめるためにチェッカーボードテストと呼ばれる分解能テストを行った (例えば Inoue *et al.*, 1990)。グリッド間隔は水平方向に0.1度とした。レゾリューション行列を用いた解の評価では、対角項が0.5以上のモデルパラメータを議論するようになっており、この対角項0.5というのはいわばマジックナンバーのようにになっている (平原, 1990)。本研究でもチェッカーボードテストの結果が真の構造の半分以上、つまり±5%の速度偏差を与えた構造が±2.5%以上復元している地域については信頼性があると解釈して議論を進める。

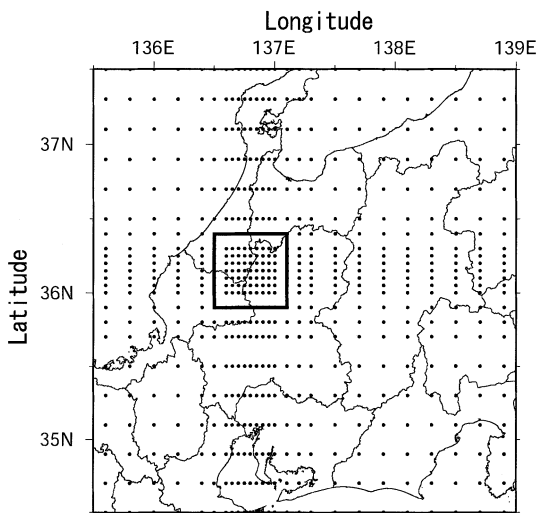


Fig. 4. Configuration of grid nodes in horizontal view. The grid spacing is 0.05 degrees around the Hakusan volcano, and 0.1~0.2 degrees for surrounding areas.

5. ダンピングパラメータ及びイタレーション回数

本解析でのダンピングパラメータ及びイタレーション回数を、*Cross Validation method* (Inoue *et al.*, 1990; Negishi *et al.*, 2002; 根岸・松原, 2003) により決定した。これまでの研究ではイタレーション数及びダンピングパラメータを経験的かつ主観的に決定する機会が多かったが、この方法を用いることでイタレーション数およびダンピングパラメータを客観的に与えることが可能となる。P波、S波速度の絶対値や V_p/V_s 構造は、ダンピングパラメータおよびイタレーション数により変化するため、これらのパラメータを定量的に決定することは重要である。

Cross Validation method の考え方は非常に簡単で「最適の超パラメータによって得られた解は、用いたデータとは独立にサンプリングされたデータを最もよく予測する」というものであり、モデル評価の手法として、経済学や社会科学等を含む広い分野で一般的に使われている方法である。この方法は情報量基準 (ABIC など) と同様試行錯誤であるが、一回の予測誤差の計算にかかる労力が解を求めるときと同程度であるため、トモグラフィなどの大きな問題に対しても適応可能である。本研究では実際に解析に使用したデータセットを、乱数表を元に3:1に分割し、前者のデータセットについて、あるダンピング・イタレーション回数で構造を求め、その構造で後者のデータセットを予測する、という手順をとった。 V_p 、 V_s 、イタレーション回数の最適値を得るために、P波、S波のダンピングパラメータについては1, 2, 3, 4... 10%、イタレーション数については1, 2, 3, 4... 10回の範囲で、総計1,000通りの組み合わせでグリッドサーチを行い、ダンピングおよびイタレーションの最適値を求めた。

結果を Fig. 5 に示す。予測誤差の最小値を与える最適なP波、S波のダンピングパラメータ及びイタレーション数は、それぞれ2%、3%、8回となった。本研究では、このダンピングパラメータとイタレーション数を用いて地震トモグラフィ解析を行った。

6. 結果・議論

6-1 水平断面

各深さにおける水平断面のP波、S波の速度異常の結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。地震トモグラフィ解析前後で走時残差のRMSは0.27秒から0.15秒に減少し、Variance reductionは61.44%となった。白山周辺のグリッド間隔を0.05度から0.1度にした場合の計算も行ったが、結果として速度偏差パターンにあまり変化は見られなかった。本研究では、地震トモグラフィ解

析のグリッド間隔を水平方向に0.05度間隔とした方がより微細な構造が得られているため、この結果を用いて議論を進める。

Fig. 6, Fig. 7にチェッカーボードテストの結果も同時に示す。チェッカーボードテストではグリッド間隔を10 km以浅で水平方向に0.1度、14 km以深で水平方向0.2度とした。これを見ると白山周辺に関しては、深さ10 km以浅で水平方向0.1度の分解能があることが分かる。白山臨時地震観測データを用いることにより波線分布が密になり、分解能向上に繋がっている。しかし表層0 kmでは波線数が多いにもかかわらず、チェッカーボードパターンの回復が他に比べあまり良くない。この原因としては、観測点に近いグリッドでは波線が鉛直方向に偏り、波線の交差が十分に行われていないことが考えられる。また深さ14 kmでは水平方向0.2度の分解能があるが、それ以深では分解能が悪くなる。グリッド間隔を水平方向に0.05度とした場合には、臨時観測点付近の深さ10 km以浅ではチェッカーボードパターンが比較的良く回復する。しかし臨時観測点の設置されていない所では、チェッカーボードパターンの回復が悪い。したがって本研究では深さ10 km以浅で水平方向に0.1度、深さ10~14 kmで水平方向に0.1~0.2度よりも大きな構造に関しては信頼性があると解釈し議論を進める。

白山火山表層部では南東に手取層、北に濃飛流紋岩が分布しており、それらの分布に対応して深さ0 kmでP波、S波共に低速度(-5%程度)を示している(Fig. 6,

Fig. 7)。白山下の低速度領域は深さ6 km付近で水平方向の規模は小さくなるが、深さ10~14 kmになると東西方向に大きく広がっている。深さ10~14 kmの低速度領域の大きさは、水平方向に20×30 km程度である。また深さ18 kmでも規模は小さくなるものの低速度を示し、深さ27.5~36.5 kmにかけても特にS波で低速度領域を示している。ただし深さ18 km以深では分解能が悪いため上記の低速度領域の存在について断定はできない。しかし白山下の深さ0~14 kmでは低速度領域が連続しており、分解能も良いため信頼性は高いと判断できる。

白山山系には、白山以外に経ヶ岳(KYO)、丸山(MARU)、願教寺山(GANK)、毘沙門岳(BISH)、大日ヶ岳(DAIN)、鷲ヶ岳(WASI)、戸室山など多くの火山がある(Fig. 2)。これらの火山を形成年代で分類すると、経ヶ岳、願教寺山、大日ヶ岳、鷲ヶ岳と戸室山、白山、丸山、毘沙門岳とに分かれる。前者は90~360万年前に誕生した火山で、北西-南東方向に並び九頭竜火山列と呼ばれており、後者は60万年以降に形成された火山であり、南北方向に並び白山火山列と呼ばれている。これらの火山と速度異常(Fig. 6, Fig. 7)との対応を見ると、まず九頭竜火山列下の深さ6~10 kmではP波、S波共に高速度領域となっている。ただし深さ6 kmでは経ヶ岳の西方に水平方向10×10 km程の比較的大きなP波、S波の低速度領域(-3%程度)がある。白山火山列については、南北の火山列に沿った顕著な速度構造は確認されない。九頭竜火山列と白山山系で火山下に低速度領域

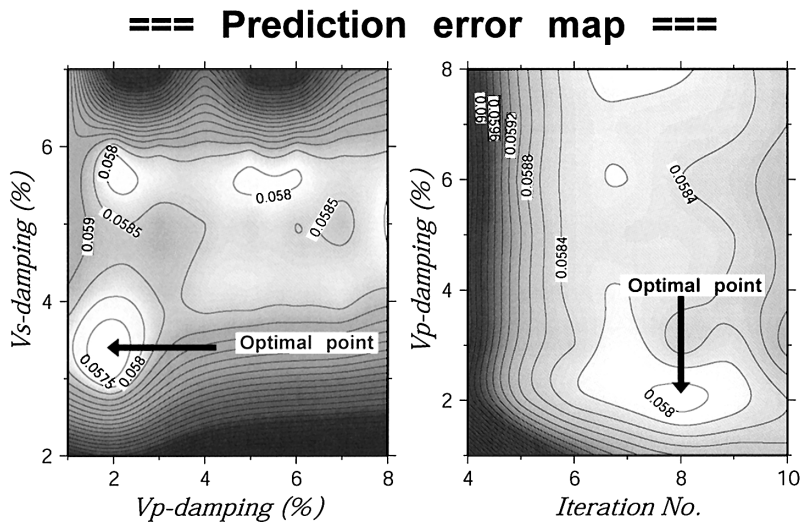


Fig. 5. The prediction error obtained from the Cross Validation method. The optimum values of V_p and V_s damping and the iteration number are found at the minimum score, 2% of V_p damping, 3% of V_s damping, and 8 times of iteration number.

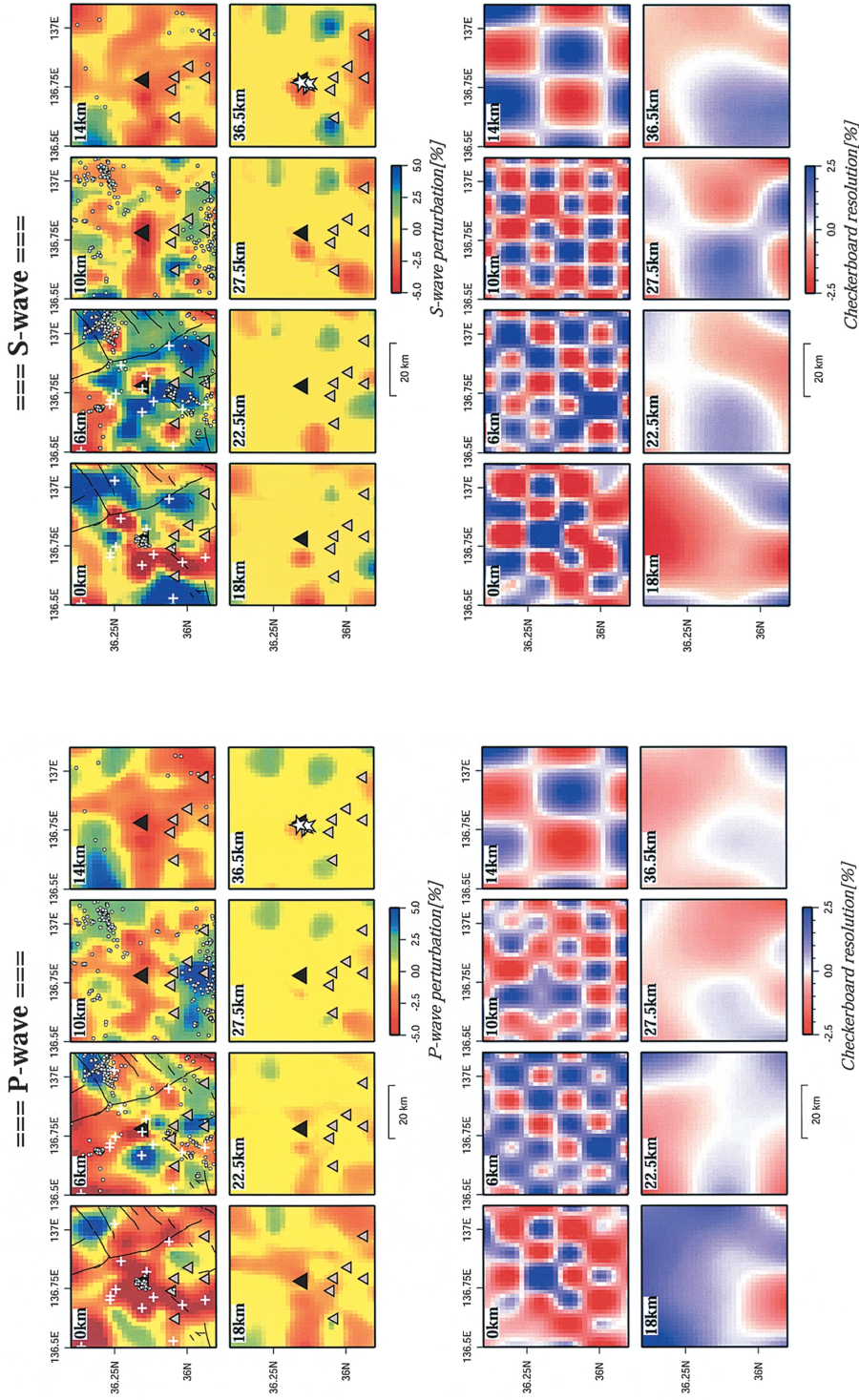


Fig. 6. P-wave velocity perturbation (upper) and the checkerboard resolution pattern (lower) on the eight sections in depth. Note that the perturbations are measured from the average velocity at each depth. The Hakusan volcano is indicated by a solid triangle (▲). Open triangles (△) show the Quaternary volcanoes. White pluses (+) show seismic stations used in this study. Seismicity is also shown with open circles.

Fig. 7. S-wave velocity perturbation (upper) and the checkerboard resolution pattern (lower). All symbols are the same as those in Fig. 6.

が存在するのは白山のみである。これらの山系の中で歴史時代以降に噴火の記録が残っているのは白山だけであり、九頭竜火山列では約 80 万年前以降の、白山を除く白山火山列では約 30 万年前以降の火山活動は確認されていない(例えば Shimizu and Itaya, 1993)。このことから、この低速度領域は近年の噴火の元となったマグマの存在を示唆するものと思われる。白山以外の火山については、マグマ溜まりの冷却が進みトモグラフィー解析では見えなくなっていると考えられる。

比較のため、この地域の震源分布(各深さ断面の±2 km 以内に震源決定された地震)を Fig. 6, Fig. 7 に同時に示す。なお、以降議論の中で使用する震源分布として、本解析による再決定震源ではなく、元々の一元化震源と白山臨時観測結果の震源(解析に使用していない地震を含む)がプロットされている。これは、本研究の構造解析に使用する際に地域ごとに地震数を限定しているために(第 2 章参照)、本研究内で再決定された震源分布では地震活動としての議論が難しいためであるのと、第 3 章でも述べたように連係震源決定法で再決定した震源と初期震源とで顕著な差異が確認されなかったためである。

これを見ると白山下の地震は深さ 0 km では、P 波の低速度領域で発生しているのがわかる。さらに深部では、白山の低速度領域を囲むように地震が発生している。また深さ 36.5 km の図に示した星印(☆)は、これまで気象庁の一次元震源データで低周波地震とされたものであり、いずれも白山直下のモホ面付近で発生している。またこの低周波地震と S 波の低速度領域が重なっているのが分かる。なお、速度構造と地震活動との関連についての議論は後述する。

6-2 南北断面

白山を横切る南北断面を Fig. 8 に示す。南北断面に示した火山は、南から毘沙門岳(BISH)、願教寺山(GANK)、白山である。まず白山に注目すると、表層(深さ 0~6 km)では P 波が低速度でかつ V_p/V_s が低くなっている。このような傾向は、岩石内にクラックが存在し、中に水や水蒸気などを含む場合に見られる特徴であり(Watanabe, 1993)、そのような脆くて弱い層の存在を示している可能性がある。さらに深部では特に顕著な P 波、S 波の低速度(-5%程度)が深さ 10~14 km に存在し、ここでの V_p/V_s は他に比べ高くなっている。この低速度領域の大きさは水平方向に 20~30 km、深さ方向に 5~7 km であり、この深さのチェッカーボードテストの結果(Fig. 6, Fig. 7)を見ても水平方向 20 km、深さ方向 5 km 程度の分解能はあるため信頼性は高い。

地震活動と V_p/V_s との比較(Fig. 8)より、白山直下の深さ 0~5 km 付近で発生する地震(A-A'断面の±0.05 度

以内に震源決定された地震)は、 V_p/V_s が低い地域に集中していることが分かる。これらの地震活動が顕著な低速度領域(深さ 10~14 km)よりも浅い場所で発生しているのは、この低速度領域が高温のために地震の脆性破壊を阻害しているためと考えられる。これは水平断面(Fig. 6, Fig. 7)の深さ 10~14 km の地震活動が白山下の低速度領域を囲むように発生していることから解釈できる。

以上の事を踏まえ、白山が活火山であることを考慮すると、深さ 10~14 km の低速度かつ高 V_p/V_s の領域は、上部地殻と下部地殻の境界に相当する深さに存在する、火成活動に起因するマグマであると考えるのが妥当である。

さらに深部に着目してみる。Fig. 8 の星印(☆)は Fig. 6, Fig. 7 と同様の低周波地震であるが、これらのモホ面付近で発生する低周波地震は、南北断面(Fig. 8)でも特に S 波の低速度領域と重なっている。また、 V_p/V_s がモホ面付近で高くなっている傾向も見られる。このような火山近傍のモホ面付近で発生する低周波地震と速度構造との関係については過去に多くの研究がなされており、その特徴から流体の移動によるものであるとの推測がなされている(例えば Nakajima *et al.*, 2001; Honda and Nakanishi, 2003)。本研究結果で見られる低周波地震と速度構造(S 波が低速度で、かつ V_p/V_s が高い)との関係も、これら過去の研究と同様であり、白山直下にも何らかの流体が存在している可能性が高い。しかし、本研究ではモホ面付近の分解能が悪いため断定はできない。モホ面付近の分解能を向上させるためにも、今後さらにデータを蓄積し、より多くの周辺地震を用いたデータセットでの解析が必要である。

6-3 東西断面

白山周辺の第四紀火山に沿った東西断面を Fig. 9 に示す。図示した火山は東から丸山(MARU)、願教寺山(GANK)、経ヶ岳(KYO)である。願教寺山と経ヶ岳の間の表層では比較的 low 速度(3%程度)を示している。深さ 14 km 付近では、白山下から連続すると考えられる低速度領域が丸山の下で確認できるが、白山を横切る南北断面に比較すると顕著ではない。

この図で特徴的な地震活動として、願教寺山(Fig. 2 参照)直下の活動がある。この地震活動は定常的なものではなく、2001 年の白山臨時観測で検知されたものがほとんどである。実際、2002 年に行われた同様の臨時観測(酒井・他, 2003)では、このような集中した地震活動は検知されておらず、群発的な活動であるといえる。この地震活動域の速度構造を見ると、S 波速度が速く、 V_p/V_s は白山下の南北断面(Fig. 8)と同様に低い値を示してい

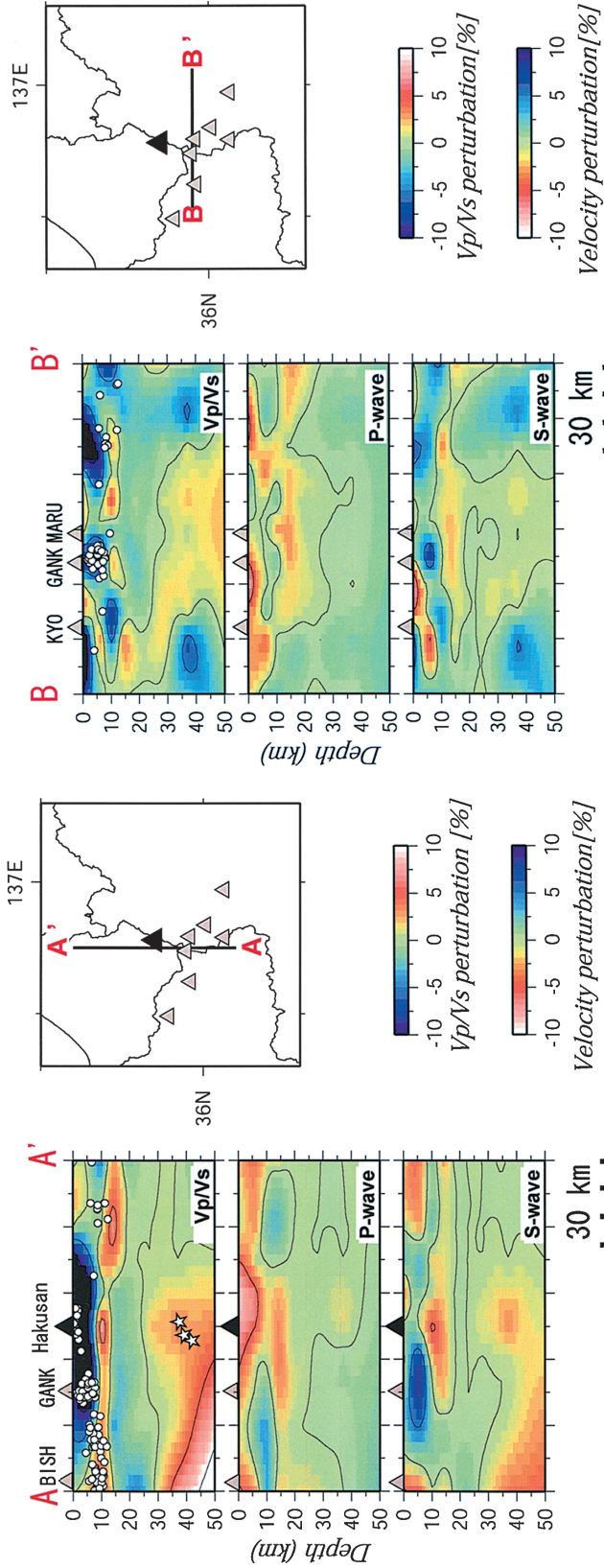


Fig. 8. The perturbations of V_P , V_S and V_P/V_S on the north-south cross section across the Hakusan volcano (along A-A' in the index map). Red and blue indicate slower (higher) and faster (smaller) velocity (V_P/V_S) of seismic wave, respectively. Seismicity is shown as open circles. Low-frequency earthquakes identified by JMA are also shown as open stars (\star). Mt. Hakusan and the other volcanoes in this area are shown as a solid triangle and gray triangles, respectively.

Fig. 9. The perturbations of V_P , V_S and V_P/V_S on the east-west cross section along B-B' in the index map. All symbols are the same as those in Fig. 8.

る。このような速度構造からはマグマ等の流体が広く存在することは考えにくく、いわゆる火山活動に関連するものではないといえる。しかし、今回の解析からはこの地震活動の要因を知ることは困難である。

以上のように、ここでも先に述べたように両白山地の白山以外の火山では火成活動を示唆するような構造は見られなかった。

7. ま と め

2001～2002年に行われた白山臨時観測で観測された地震データ及び気象庁の一元化観測値データを用いて白山周辺の三次元速度構造の解析を行った。得られた分解能は20 km以浅で水平方向に0.1～0.2度、深さ方向に5 km程度である。白山下では10～14 kmに顕著な低速度領域が存在し、 V_p/V_s も高いという結果が得られた。この領域を避けるようにして地震活動があることおよび白山が活火山であることから、この低速度領域は火成活動に起因するマグマであると考えられる。このようなマグマの存在を示唆するような構造は白山以外の火山では確認されなかった。これは、九頭竜、白山両火山列において有史以降の活動が確認されているのは白山のみであるという地質学的・歴史的調査結果と調和的であり、両白山地の第四紀火山群の中では特に白山が活火山としての特徴を持っていることが構造解析の面からも明らかになった。

謝 辞

本研究には気象庁及び文部科学省によりまとめられた一元化観測値データを使用させて頂いた。関係機関（北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人産業総合技術研究所、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、海洋科学技術センターおよび気象庁）には記して感謝申し上げます。また、査読者の中西一郎氏と平原和朗氏、編集委員の大倉敬宏氏には、多くの有益なコメントをいただき、本論文の改善に有益であった。以上の方々に深く感謝いたします。

引用文献

Aoki, H., Tada, T., Sasaki, Y., Ooida, T., Muramatsu, I., Shimamura, H. and Furuya, I. (1972) Crustal structure in the profile across Central Japan as derived from explosion seismic observation. *J. Phys. Earth*, **20**, 197–223.
 Hirahara, K., Ikami, A., Ishida, M. and Mikumo, T. (1989) Three-dimensional P-wave velocity structure be-

neath Central Japan: low-velocity bodies in the wedge portion of the upper mantle above high-velocity subduction plates. *Tectonophysics*, **163**, 63–73.
 平原和朗 (1990) 実体波データによる地球構造の3次元インバージョン法. *地震*, **43**, 291–306.
 Hirata, K. and Matsu'ura, M. (1987) Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique. *Phys. Earth Planet. Interiors*, **47**, 50–61.
 Honda, S. and Nakanishi, I. (2003) Seismic tomography of the uppermost mantle beneath southwestern Japan: seismological constraints on modeling subduction and magmatism for the Philippine Sea slab. *Earth Planets Space*, **55**, 443–462.
 Inoue, H., Fukao, Y., Tanabe, K. and Ogata, Y. (1990) Whole mantle P-wave travel time tomography. *Phys. Earth Planet. Interiors*, **59**, 294–328.
 Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D. and Karadolfer, U. (1994) Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.*, **99**, 19635–19646.
 Koketsu, K. and Sekine, S. (1998) Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities. *Geophys. J. Int.*, **132**, 339–346.
 Matsubara, M., Hirata, N., Sakai, S. and Kawasaki, I. (2000) A low velocity zone beneath the Hida Mountains derived from dense array observation and tomographic method. *Earth Planet Space*, **52**, 143–154.
 松原 誠・根岸弘明 (2003) 中部地方の地殻・最上部マントルトモグラフィと飛騨山脈下の詳細トモグラフィ. *月刊地球*, **25**, 938–944.
 Mikumo, T., Hirahara, K., Takeuchi, F., Wada, H., Tsukada, T., Fujii, I. and Nishizawa, K. (1995) Three-dimensional velocity structure of the upper crust in the Hida region, Central Honshu, Japan, and its relation to local seismicity, Quaternary active volcanoes and faults. *J. Phys. Earth*, **43**, 59–78.
 守屋以智雄 (2000) 白山火山の噴火の予知とその防災体制. *金沢大学自然科学研究科地球環境専攻紀要*, **6**, 44–56.
 Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D. (2001) Three-dimensional structure of V_p , V_s and V_p/V_s beneath northeastern Japan: implications for arc magmatism and fluids. *J. Geophys. Res.*, **106**, 21843–21857.
 根岸弘明 (1996) 中部山岳地域の地殻内速度構造. *月刊地球*, **18**, 85–91.
 Negishi, H., Kumar, S., Mori, J., Sato, T., Bodin, P. and Rastogi, B. K. (2002) Tomographic velocity model for the aftershock region of the 2001 Gujarat, India earthquake. In *Proceedings of 12th Symposium on Earthquake Engineering*, 29–37.
 根岸弘明・松原 誠 (2003) トモグラフィ計算における先験的パラメータの客観的決定と評価—中部地方上部マントル速度構造への適用—. *月刊地球*, **25**, 961–966.
 酒井主計・高橋直季・三宅 学・平松良浩・古本宗充・

- 平田 直 (2003) 白山における地震観測. 日本地震学会 2003 年度秋季大会講演予稿集, A055.
- Shimizu, S. and Itaya, T. (1993) Plio-Pleistocene arc-volcanism controlled by two overlapping subducted plates, central Japan. *Tectonophysics*, **225**, 139–154.
- 震災予防調査会 (1982) 日本噴火誌. 五月書房, 129–130.
- 高橋直季・平松良浩・古本宗充・三宅 学・平田 直 (2003) 白山火山近傍での微小地震観測. 地震 **2**, **56**, 89–94.
- 竹内文朗 (1978) 北陸地方の微小地震の特徴について (その 2). 京都大学防災研究所年報, **26**, 145–151.
- 上野 寛・畠山信一・明田川保・船崎 淳・浜田信生 (2002) 気象庁の震源決定法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良. 験震時報, **65**, 123–134.
- Um, J. and Thurber, C. H. (1987) A fast algorithm for two point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**, 792–786.
- 卜部 卓・東田進也 (1992) WIN—微小地震観測網波形 検測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版). 地震学会講演予稿集 1992 年度秋季大会, 331.
- Watanabe, T. (1993) Effects of water and melt on seismic velocities and their application to characterization of seismic reflectors. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2933–2936.
- 山崎正男 (1980) 歴史に残された白山火山の噴火. はくさん, **8**, 8–10.
- Yoshii, T., Sasaki, Y., Tada, T., Okada, H., Asano, S., Muramatsu, I., Hashizume, M. and Morita, T. (1974) The third Kurayoshi explosion and the crustal structure in the western part of Japan. *J. Phys. Earth*, **22**, 109–121.
- 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.

(編集担当 大倉敬宏)