HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	中部地方のフィリピン海スラブの形状と火山活動との関係
Author(s)	本多, 茂喜; 中西, 一郎
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 167-177
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.167
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14311
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p167-177.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 65, March 2002, pp. 167−177

中部地方のフィリピン海スラブの形状と火山活動との関係

本多　茂喜・中西　一郎
京都大学大学院理学研究科地球物理学教室

(2001年12月25日受理)

Shape of the Philippine Sea Slab in the Mantle and Volcanism in the Chubu Region, Central Japan

Shigeki HONDA and Ichiro NAKANISHI
Department of Geophysics, Kyoto University

(Received December 25, 2001)

We obtained a three-dimensional P-wave velocity structure of the uppermost mantle beneath the Chubu region by means of travel time tomography. We used 454,035 arrival time data from 13,758 earthquakes in and around the Japanese Islands observed at 921 stations of Japan Meteorological Agency, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, and Japanese universities. The tomography model uses 0.25° horizontal and 10-33km vertical grid spacing. The obtained tomographic image shows the shape of the aseismic Philippine Sea slab, which bends and subducts with a high dip angle beneath the south end of the Norikura volcanic belt, but subducts nearly horizontally beneath the Hakusan volcanic belt. These results may suggest that the aseismic Philippine Sea slab does not play the major role in the magmatism of the Quaternary volcanoes in the Chubu region, and that it is mainly caused by dehydration of serpentinized part of the Pacific slab and induced flow in mantle wedge.

I. はじめに

中部地方ではユーラシアプレートの下に南東方向からはフィリピン海スラブが，さらにその下方には東から太平洋スラブが沈み込んでいて，複雑なテクトニック場になっている (Fig. 1)．

フィリピン海スラブについての研究は最近数多くあり，おおよその形状は明らかになりつつある．まず地殻下地震の震源分布により，サイスミックなスラブの上面の形状が推定されている(山崎・大井田，1985)．中部地方ではサイスミックスラブは太平洋スラブと比較して低角に沈み込んでいて(15°～25°)，その北限はおおよそN 35.5°であり，深さは約80 kmまでである．またSp変

換波の解析によって，アサイスミックなスラブに関してもその上面の形状を推定することができる．山岡・西原（1997）はこの手法で中部地方のフィリピン海スラブの上面の形状を求めた．それによりサイスミックスラブの北限を越えてアサイスミックスラブの存在が示された．さらに第四紀活火山が存在している地域ではSp変換面（～スラブ上面）の存在が確認できなかったと指摘している．ただしこの手法では高角に沈み込むスラブを検出できない．3次元トモグラフィーでは，スラブ上面だけでなく，スラブ全体の形状を求めることができる．

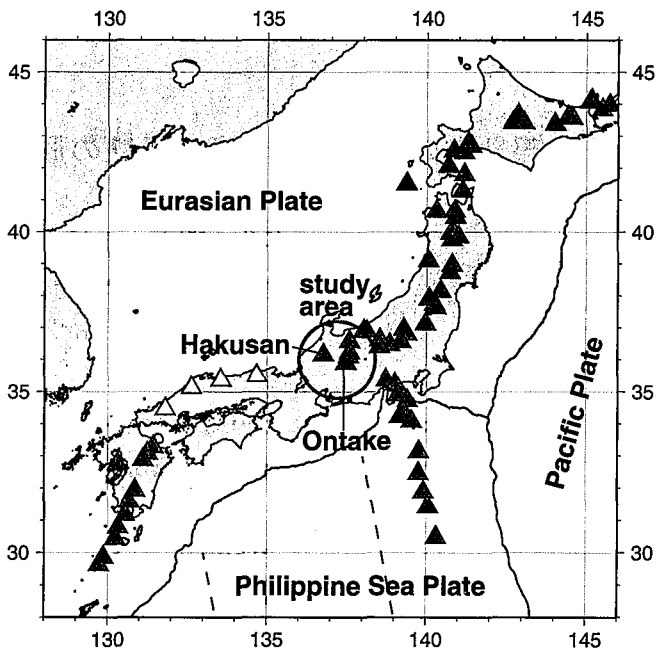


Fig. 1. Volcanoes and plates in and around the Japanese Islands. Triangles denote Quaternary volcanoes. Solid ones are presently active.

Hirahara et al.（1989）は中部地方下の3次元P波速度構造を求め，フィリピン海スラブの形状を推定した．フィリピン海スラブは深さ約150 kmに到達し，また第四紀活火山下のマントルウェッジには北に傾斜した低速度体が見られると指摘している．

島弧における火山分布は，沈み込むスラブの形状に大きく関連している．東北地方では東から太平洋スラブが沈み込んでいて，その深発地震面の約110 kmの等深線上に明瞭な火山フロントが形成されている(Fig. 1)．九州地方における火山分布と南東方向から沈み込むフィリピン海スラブに関しても同様である．本論文で述べる中部地方に於いては，火山分布は第四紀火山から構成され，南端の御嶽山から北に連なる乗鞍火山列が挙げられる．またその西側には白山などの火山が分布している．これらの中部地方の火山を太平洋スラブによるその他の火山と同等なものとみなした場合，他の地域の火山フロントと比較して背弧側に寄っているという位置的な相違点がある．これは南方から沈み込むフィリピン海スラブが上方に存在し影響しているからと考えられ，この地域では太平洋スラブによる東北地方と同様な沈み込み帯の火山形成メカニズムが成立していない可能性がある(Iwamori, 2000)．また，そのメカニズムを解明するためにはフィリピン海スラブの詳細な形状を含む上部マントル構造を把握することが必要不可欠である．

本研究では対象領域を小さなグリッドで細分化し，多量の精度の高いP波走時データを用いて3次元トモグラフィーを行い，上部マントルの速度構造を求めた．また，その結果よりフィリピン海スラブの形状を推定し，他の地域の沈み込み帯に関する研究結果と比較することにより，中

部地方の火山形成のメカニズムについて考察した（本多・中西，2001）．

II．データと解析手法

本研究では中部地方を調査領域としているが，速度構造の解析領域自体は日本列島全体を含む範囲で行った．震源・走時データとして気象庁地震月報を3年間分（1994/10/1－1997/9/30），気象庁と科学技術庁が協力して処理した結果（いわゆる1元化データ）を3年間分（1997/10/1－2000/9/30），国立大学観測網地震カタログを約10年間分（1985/7/1－1995/12/31）使用した．これらのうち，以下の選定基準で使用する震源データを選んだ．

(1)　北緯25°～48°，東経125°～148°，深さ33.5 km以深に震源があるもの

(2)　P波初動の報告が20個以上あるもの，またS波初動の報告が1個以上あるもの

また，以下の選定基準で使用する走時データを選んだ．

(1)　震央と観測点の間の角距離が10°以下のもの

(2)　走時残差が5秒以内のもの

以上の条件を満たした震源データは13,758個（Fig. 2(a)），走時データは454,035個である．また，使用した観測点数は921点である（Fig. 2(b)）．

データ解析の方法として山根・他（2000）に改良を加えた方法を用いた．山根・他（2000）と同じ1次元P波初期構造モデル（浜田，1984）を使用し，P波のスローネス偏差と震源パラメーター偏差，観測点補正偏差を未知モデルパラメーターとし観測方程式を解いた．スローネス偏差の表現にはグリッドを使用した．グリッドの間隔は，水平方向に0.25°×0.25°，鉛直方向には10 km－33 kmである．また，checkerboard resolution test（Inoue et al., 1990）を，求められた

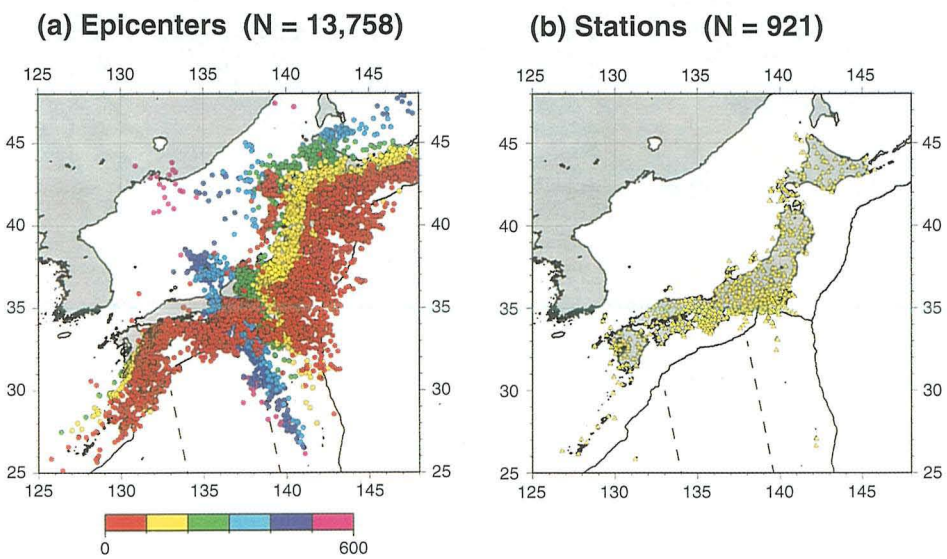


Fig. 2.　(a) Epicentral distribution of the earthquakes used in this study. (b) Distribution of the stations used in this study.

解の信頼性の評価に使用している．

III. 結　　果

本研究で求めた未知モデルパラメーターは，46,916グリッドのスローネス偏差，13,758×4個の震源パラメーター偏差，および921個の観測点補正偏差である．インバージョン前に0.851 sあった理論走時と観測走時のRMS残差はインバージョン後には0.334 sとなった．本研究ではランダムノイズを除去するため，あるグリッドとその周りの隣り合う6グリッドの重み付き平均を取ることによって，インバージョンによって求められた結果にスムージングをかけた．

Fig. 3(a)は求められたスローネス偏差の，深さ80 kmにおける水平断面図である．図中，青色の領域は初期モデルに対しての高速度領域を示し，赤色の領域は低速度領域を示している．また，日本周辺の第四紀活火山も三角で示してある．この深さでは高速度領域は，東北地方では沈み込む太平洋スラブを，西南日本では沈み込むフィリピン海スラブを示しているものと考えられる．スラブは東北地方では日本海沿岸まで，西南日本では四国地方や九州地方沿岸まで到達していて，その様子は過去の研究とおおまかに一致している（例えばZhao et al., 1994；山根・他，2000）．中部地方に於いては，御嶽山を含む乗鞍火山列付近（場所についてはFig. 1を参照）では比較的低速度領域になっていて，この深さにフィリピン海スラブは到達していない．また，その西側の白山火山列（同様にFig. 1参照）が分布している領域では明瞭な速度異常は見られないが，その

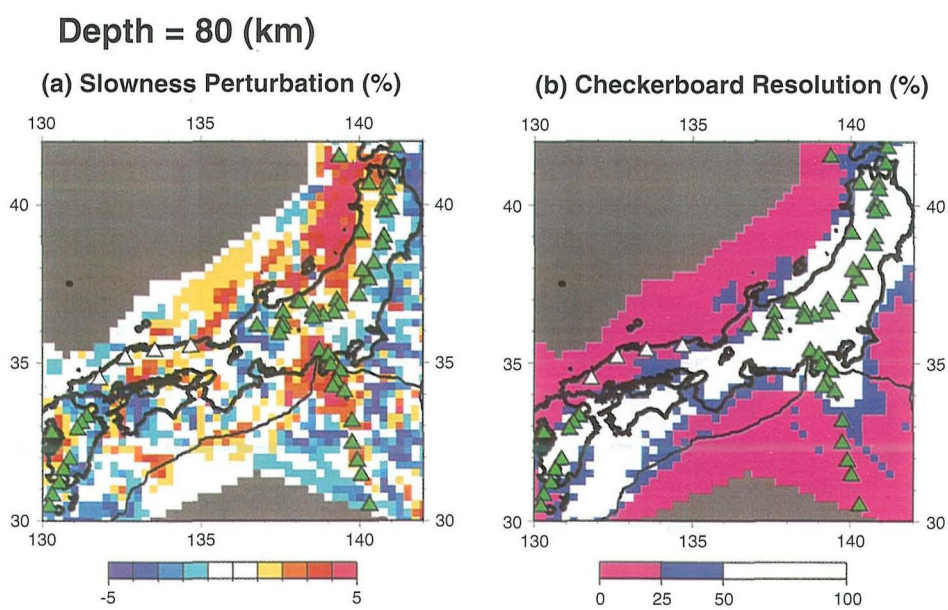


Fig. 3. (a) Horizontal distribution of P-wave slowness perturbations at depth of 80km. Red and blue colors denote low and high velocities, respectively. Green and white triangles denote presently active and inactive Quaternary volcanoes, respectively. (b) Horizontal distribution of normalized checkerboard resolutions at depth of 80km. Resolution is good in white regions.

周辺部，特に南側において高速度領域となり，これらの領域にはフィリピン海スラブが到達しているものと考えられる．Sp 変換波の解析によるフィリピン海スラブ上面の形状（山岡・西原，1997）と比較すると，おおまかな様子は類似している．

Fig. 3(b)は先程の深さ 80 km の水平断面の checkerboard resolution test の結果である．与えた仮想スローネス偏差構造は±3％のチェッカーボード状のものであり，それぞれのグリッドに割り振った．この構造を用いて仮想走時データを計算し，そのデータに対してインバージョンを行い，再現されたスローネス偏差構造の割合を符合つきで100％に規格化したものがこの図である．色が付けられていない領域は与えた仮想構造の50％以上が再現された領域であり，トモグラフィーの結果の信頼性が高いと考えることができる．例えば Fig. 3(a)の中で見られた東北地方の太平洋スラブや西南日本のフィリピン海スラブが存在すると思われる領域での checkerboard resolution test の結果は 50％を越えており，信頼性は高い．中部地方では，フィリピン海スラブに相当する高速度領域が見られない乗鞍火山列付近では信頼性は高いが，白山火山列付近では resolution の値が低く，高速度領域の存在という結果はやや信頼性が低いと言えるが，中部地方の resolution は全体的には良い．

次に沈み込むスラブの形状を調べるため，求めた速度構造の鉛直断面図を作成した．鉛直断面図の位置を Fig. 4 に示す．この断面図の位置は中部地方の第四紀活火山の分布と山岡・西原（1997）のスラブ等深線を参考に決定した．その結果である Fig. 5 には各断面において Fig. 4 中の長方形に含まれる，気象庁地震月報（1994/10/1－1997/9/30）と 1 元化データ（1997/10/1－2000/9/30）で報告された全ての地震の震源を投影してプロットした．

Fig. 5(a)（A－A′断面）は乗鞍火山列が連なり，またフィリピン海スラブ等深線の最大傾斜の方向に切った鉛直断面図である．まず震源分布から分かることであるが，フィリピン海スラブは低角に沈み込んでいて，サイスミックなスラブは御嶽山の手前まで深さ約 80 km にまで到達している．しかも単純に低

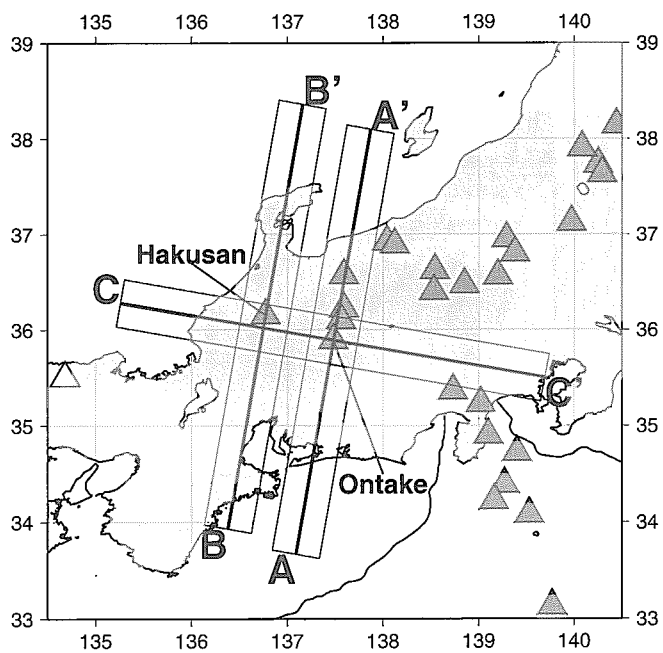


Fig. 4. The thick lines indicate the location of vertical cross sections shown in Fig. 5. Sections A-A′ and B-B′ are taken perpendicular to C-C′. Solid and open triangles denote presently active and inactive Quaternary volcanoes, respectively.

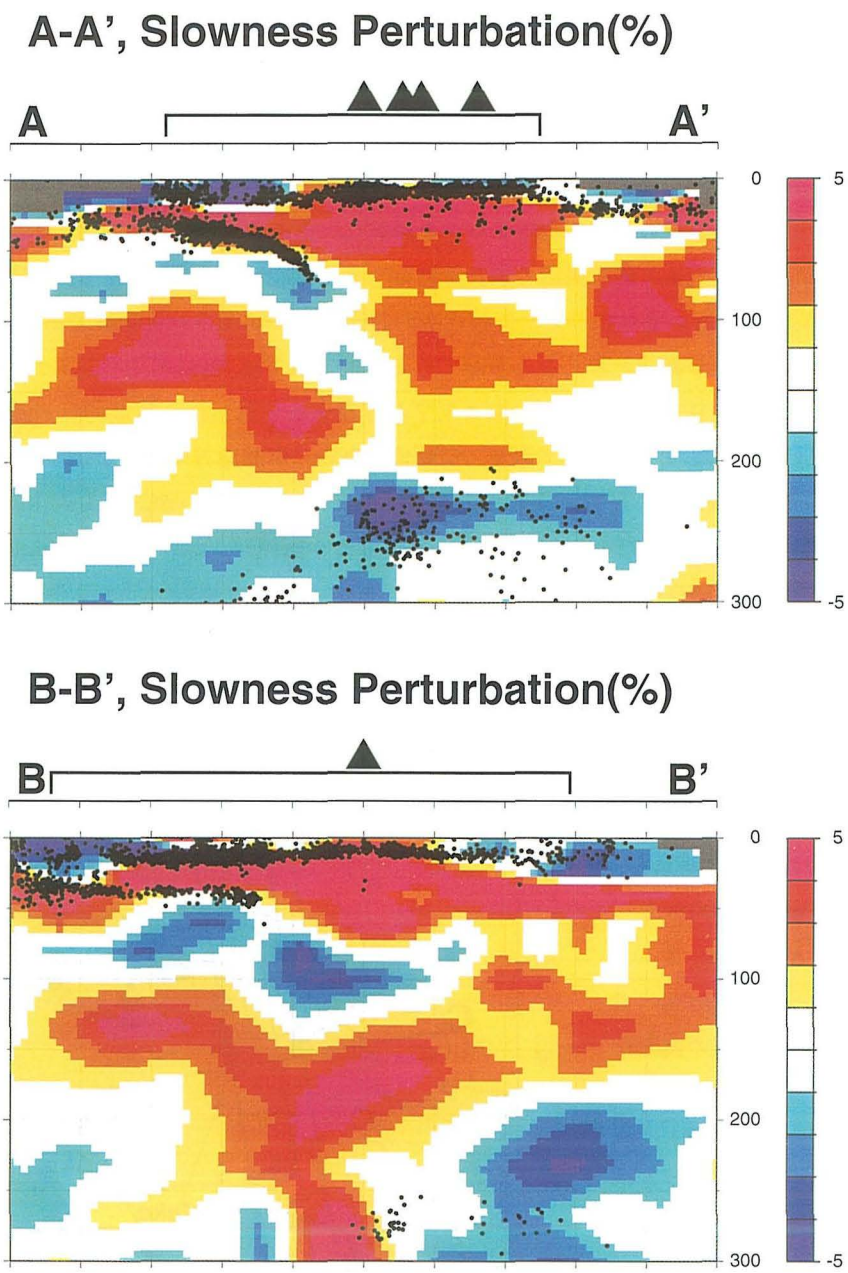
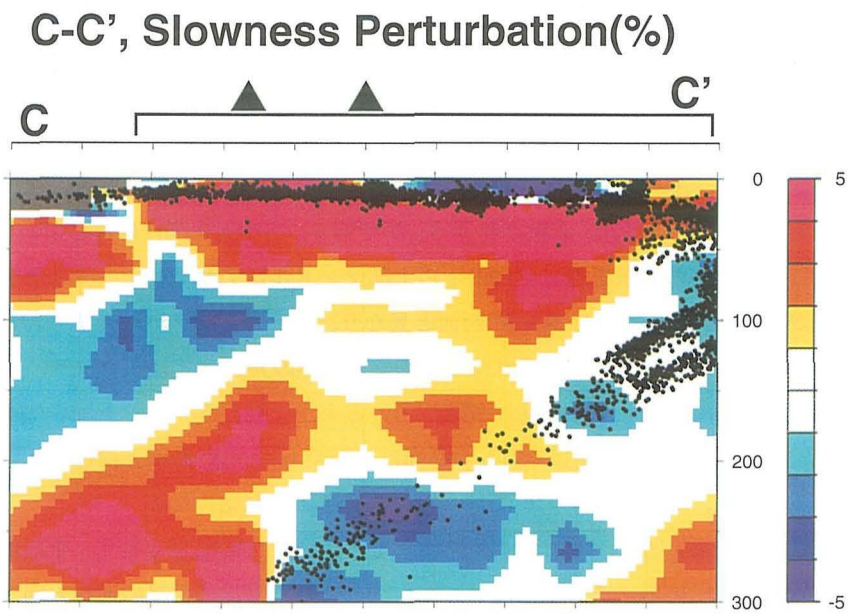


Fig. 5. Vertical cross sections of P-wave slowness perturbations obtained for the three profiles indicated in Fig. 4. Values of slowness perturbations are interpolated from the values obtained for the grids by tomography. Red and blue colors denote low and high velocities, respectively. Dots indicate the hypocenters of the earthquakes reported by Japan Meteorological Agency in the period from October 1994 to September 2000 in the rectangular regions along the thick lines in Fig. 4. The land area and presently active Quaternary volcanoes are shown at the top of each figure by the line and solid triangles, respectively.



角に沈み込んでいるわけではなく，浅い方にやや凸になっている．そしてトモグラフィーの結果にはその直下にやや高速度な領域が見られ，沈み込むフィリピン海スラブを示していると考えられる．スラブは明瞭な高速度領域として検出されなかったが，その原因としては例えば中部地方は火山活動の活発な地域であり，その高温異常により若く（15－25 Ma）（Okino et al., 1994）高温のフィリピン海スラブが温められてスラブとしての特徴が弱まっている，ということが考えられる．また他の原因として，中部地方は他の地域と比べて全体的に低速度であることが推測され，使用した１次元初期速度構造モデル（山根・他，2000；浜田，1984）が最適ではなかったことも考えられる．

Fig. 5(a)の震源分布の下向きの曲がりを延長した位置にやや高速度（約２－３％）な領域が存在し，先程と同様な考察によりこの高速度異常はフィリピン海スラブであると推測され，フィリピン海スラブがサイスミックな部分より北にそして深さ 80 km 以深 150 km までアサイスミックなスラブとして続いていると考えられる．低角なサイスミックスラブとは様子が異なり，サイスミックからアサイスミックにスラブの物性が変化している深さ約 60－80 km 付近から沈み込みは高角に変わり，水平方向に関しては御嶽山の直下まで，鉛直方向に関しては深さ約 130－150 km に到達している．しかし東北地方に沈み込んでいる太平洋スラブが火山の存在している領域下に於いてサイスミックのまま存在しているのに対し，中部地方におけるフィリピン海スラブに関してはサイスミックなスラブは火山域下に到達していなく，アサイスミックスラブに関しても一部の火山下に到達している程度である．マントルウェッジには明瞭な低速度領域（約３－４％）が見られ，火山地帯下の地殻・上部マントルの高温異常を示している．しかし全体的に低速度異常を帯びているので，高温異常領域の形状を詳細に知ることは出来ていない．またフィリピン海

スラブ下にも低速度領域が見られる．この低速度領域はこの直下に存在する太平洋スラブによってもたらされた高温異常領域であると考えられ，直上のフィリピン海スラブの延性化に影響しているものと考えられる．

Fig. 5(b)（B－B′断面）はFig. 5(a)と同じ走向で，白山を通過するように切った鉛直断面図である．震源分布から，A－A′断面と比較してフィリピン海スラブが非常に低角に沈み込んでいる様子が分かる．深さは約50 km，北限は約N 35.5°であり，白山火山列には達していない．図から，サイスミックスラブの北限を越えて白山下の上部マントルにアサイスミックスラブと思われる高速度領域が検出された．ただしA－A′断面と異なり，サイスミックからアサイスミックにスラブの物性が変化する領域においてもそれほど急激な沈み込み角の変化は見られず，比較的低角に沈み込んで白山もしくはそれよりも北に到達しているように見える．スラブ上面の深さは約80 kmである．周囲の低速度領域に関してはこの断面についてもA－A′断面と同様でスラブ上方のマントルウェッジにも，下方のマントルにおいても低速度領域が見られる．

Fig. 5(c)（C－C′断面）はA－A′，B－B′断面に垂直に取った断面図であり，中部地方の火山分布の南端付近を通っている．この断面は東方から沈み込む太平洋スラブの進行方向とほぼ同じ方向を向いており，震源分布においてもトモグラフィーの結果においても明瞭に太平洋スラブの形状を見ることが出来る．フィリピン海スラブより深くまでほぼ一様の角度でサイスミックなスラブが沈み込んでいる．またそのマントルウェッジに明瞭な低速度領域が存在している様子も見られる．フィリピン海スラブに関しては，この断面ではもはや地殻下地震は発生しておらず，アサイスミックなスラブが白山直下およびその西方に見える．A－A′，B－B′断面の時に指摘した通り，乗鞍火山列付近では約130 kmでやや高速度な領域が存在し，また白山火山列下では約80 kmに高速度な領域が存在していて，フィリピン海スラブの上面の深さの地域差が見られる．

IV. 議　　論

前述のトモグラフィーの結果から得られた中部地方に沈み込むフィリピン海スラブに関する情報をまとめると以下の通りである．乗鞍火山列付近では火山域の直前の深さ約80 kmで地震活動がなくなり，その前後で折れ曲がり沈み込み角が急になり，その先のアサイスミックなスラブは乗鞍火山列の一部の火山下の深さ約130 kmに到達している．また白山付近では地震活動は火山域の手前の深さ約50 kmでなくなり，その先のアサイスミックなスラブも比較的低角なままで白山よりさらに北に深さ約80 kmに到達している．

島弧火山下のマグマ供給メカニズムについて考察する．マグマ供給メカニズムに関してはいくつかのモデルが提唱されている．ここではIwamori and Zhao (2000) およびZhao et al. (2000) のモデルを参考にする．彼らはマントルウェッジにおける流体の分布に関する数値シミュレーションを行いこれを元にP波速度構造を推定し，観測走時のトモグラフィーによって求められたP波速度構造と比較し，マントルウェッジのモデルを評価した．このモデルでは，島弧におけるマグマ活動は主にスラブ沈み込みに伴うマントルウェッジ内の誘発対流と，スラブ沈み込みによ

る脱水分解反応によるとしている．古く冷たい太平洋スラブ（約 130 Ma）が沈み込む東北地方では，海洋地殻から放出された H_2O がスラブ直上のマントルウェッジで蛇紋石や緑泥石を形成してそこに固定され，冷たいスラブの沈み込みに沿って深さ 150－200 km にまで運ばれそこで脱水反応を起こす．その大量の流体が上昇しマントルウェッジの中心部付近で溶融条件を満たすとメルトが生成され，マントルウェッジ内の誘発対流に乗って火山フロントに運ばれる，というモデルである（Iwamori and Zhao, 2000）．ここで，深さ 150－200 km ということは火山フロントを越えて背弧側で脱水反応とメルトの生成が起こっていることになる．これは冷たい太平洋スラブの場合であり，九州地方ではそれと比べて若くて暖かいフィリピン海スラブが沈み込んでいるため，様子が異なっている（Zhao et al., 2000）．暖かいスラブでは脱水反応とメルトの生成が前弧または火山フロント直下で起こる．東北地方・九州地方のいずれの場合においてもマントルウェッジ内の誘発対流とスラブ沈み込みによる脱水分解反応の必要性が指摘されている．

中部地方の火山活動のマグマ供給源に関しては太平洋スラブとフィリピン海スラブの二種類の可能性が考えられる．トモグラフィーの結果から推測されるフィリピン海スラブの形状と前述のモデルを参考に，中部地方の火山活動に対してフィリピン海スラブが与える影響について考察する．

乗鞍火山列の南端に位置する御嶽山付近までフィリピン海スラブは到達しているが，火山列全域を覆うには至っていない（Fig. 5(a)）．従って島弧マグマ活動の主要なプロセスである，脱水反応による流体の供給が火山列全域にはできないと考えられる．また誘発対流の引き起こす影響に関しても同様で，火山列全域には及ばないと考えられる．火山列全域下の上部マントルには低速度領域が広がっているが，上記の理由によりその低速度領域の主要な発生源はフィリピン海スラブではないと考えられる．太平洋スラブ起源であろう．フィリピン海スラブはこの付近での主要なマグマ供給源とは成り得ないが，それは必ずしも火山活動に全く影響を与えていないということを意味するわけではない．低角なスラブが折れ曲がるという特徴は，同じフィリピン海スラブが沈み込んでいる九州地方においても見られる特徴である（例えば後藤・他，2001）．火山フロントもしくはその前弧付近において震源分布に明瞭な折れ曲がりを見ることができる．九州地方ではフィリピン海スラブがマグマ供給源であり，それと類似した形状をしているということは，中部地方のフィリピン海スラブも火山活動に何らかの影響を与えている可能性がある．スラブが折れ曲がっているということは，そこでスラブに密度変化が起きていると推測することもできる．例えば単純に折れ曲がりの付近で脱水反応が起きていると仮定すると，九州地方の前弧付近でのフィリピン海スラブの密度変化にともなう折れ曲がりに対しても，またその上方の低速度領域の存在に対しても矛盾なく説明することができる．もしその仮定が正しければ，生成された流体が中部地方の火山活動に影響を与える可能性が高く，乗鞍火山列付近では太平洋スラブとフィリピン海スラブの複合的な作用によって火山活動が行なわれていると考えることもできる．

白山付近ではフィリピン海スラブの上面は火山下で深さ約 80 km にしか達しておらず，島弧系火山に対して一般的に考えられている，深発地震面の深さ約 110 km 上に火山フロントが位置す

るという関係に当てはまらない(Fig. 5(b)). おそらく 110 km という深さは，深さ依存性の強い脱水反応のプロセスから出てくる結果であると思われ，スラブが深さ 110 km に達していないということは白山付近においてもフィリピン海スラブがマグマ供給源となり得ないことを意味している．Isacks and Barazangi (1977) や高橋 (2000) は，中部アンデスにおいて沈み込むスラブが傾斜している領域（チリ北部および南部）では火山が存在する（マグマが生成されている）のに対し，水平に沈み込んでいる領域（チリ中部）では火山が存在しない（マグマが生成されていない）という事実をもとに，誘発対流によるマントルウェッジと高温状態の深部マントル間での物質および熱の移流の重要性を指摘している．

乗鞍火山列の南端と白山，いずれの上部マントルにおいても到達しているのはアサイスミックなスラブである．東北地方における太平洋スラブは古くて冷たいスラブであり，地震活動は深さ約 600 km まで続いている．それより若い九州地方のフィリピン海スラブについても，地震活動は折れ曲がりを越えて深さ約 200 km まで続いている．形状のみから判断すると九州地方と中部地方におけるフィリピン海スラブは類似している．しかし，火山下においてはスラブの物性が異なっていることになり，火山活動に関して必ずしも同じ役割を果たしているとは結論できない．例えば主要な二つのプロセスである脱水反応と誘発対流を引き起こすことに対して同じ働きをするのか，はっきりしない．今回のトモグラフィーの結果のみではその違いについて言及することはできず，今後のさらなる研究が必要である．

以上の考察から，中部地方の主たるマグマ供給源としてはフィリピン海スラブではなく太平洋スラブが本質的な役割を果たしていると考えられる．ただしその場合，中部地方の火山が他の地域の火山フロントと比較して背弧側に寄っているという位置的な相違を説明できないことになるが，これはマグマ発生の主要な二つのプロセスである脱水反応と誘発対流という着眼点から説明することができる(Iwamori, 2000)．今回の研究対象領域ではないが，相模トラフからも南方からフィリピン海スラブが太平洋スラブの上方に沈み込んでいる(Fig. 1)．このフィリピン海スラブは太平洋スラブが沈み込み始める付近に存在し，太平洋スラブのマントルウェッジのコーナーの部分を占めることになる．沈み込む太平洋スラブによって引き起こされるマントルウェッジの誘発対流は，コーナーの部分をフィリピン海スラブに占められているのでそこでは対流が起こらず，相対的に対流活動は背弧側に寄ることになる．よってコーナーの部分に熱い物質が流れ込まない．また太平洋スラブの沈み込み始めにおいて周囲のマントルより低温であるフィリピン海スラブが上方に存在している．これらの作用により太平洋スラブの温度上昇が他の地域より遅れ，その影響で脱水反応がより深部へ移動することが推測される．以上のプロセスにより中部地方の火山が背弧側に寄っているという位置的な相違を説明することが可能である．

V. 結　　論

中部地方の第四紀火山活動のマグマ供給源について考察するために，3 次元走時トモグラフィーの手法を用いて中部地方の最上部マントルの P 波速度構造を求め，沈み込むフィリピン海

スラブの形状を推定した．中部地方の火山域下においてアサイスミックなフィリピン海スラブが検出されたが，第四紀火山活動の主要なマグマ供給源とは成り得ず，火山活動はおそらく太平洋スラブに起因するものであろう．

謝辞　本谷義信博士が地球内部構造研究に関心と理解を示されたことに感謝します．気象庁から，本研究で用いた地震月報データの最新のものを提供して頂いた．東京大学地震研究所によってまとめられた国立大学観測網地震カタログのデータを使用させて頂いた．財団法人倉田記念科学技術振興会から，研究費の助成をして頂いた（南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの先端はどこまで達しているか？）．研究結果のまとめの段階においては地震調査研究推進業務庁費（文部科学本省）（「平成13年度芸予地震の発生機構に関する調査」）を用いた．

文　献

後藤和彦・本田貴子・八木原寛・角田寿喜・清水洋，2001．南九州における稍深発地震面の形状と発震機構，月刊地球，**268**，664－668．

浜田信生，1984．近地地震用走時表の再検討，気象研究所研究報告，**35**，109－167．

Hirahara, K., A. Ikami, M. Ishida and T. Mikumo, 1989. Three-dimensional P-wave velocity structure beneath Central Japan: low-velocity bodies in the wedge portion of the upper mantle above high-velocity subducting plates, *Tectonophysics,* **163**, 63－73.

本多茂喜・中西一郎，2001．中部地方のフィリピン海スラブの形状と火山活動との関係，日本地震学会講演予稿集，2001年度秋季大会，B 17．

Inoue, H., Y. Fukao, K. Tanabe and Y. Ogata, 1990. Whole mantle P-wave travel time tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.,* **59**, 294－328.

Isacks, B. L. and M. Barazangi, 1977. Geometry of Benioff zones: lateral segmentation and downward bending of the subducted lithosphere, *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins,* eds.Talwani, M. and W. C. Pitman III, AGU, 99－114.

Iwamori, H., 2000. Deep subduction of H_2O and deflection of volcanic chain towards backarc near triple junction due to lower temperature, *Earth Planet. Sci. Lett.,* **181**, 41－46.

Iwamori, H. and D. Zhao, 2000. Melting and seismic structure beneath the northeast Japan arc, *Geophys. Res. Lett.,* **27**, 425－428.

Okino, K., Y. Shimakawa and S. Nagaoka, 1994. Evolution of the Shikoku Basin, *J. Geomag. Geoelectr.,* **46**, 463－479.

高橋正樹，2000．島弧・マグマ・テクトニクス，東京大学出版会，322 pp.

山根隆弘・中西一郎・神谷眞一郎，2000．南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートのP波速度構造と西南・中部日本の地震活動および火山活動，東京大学地震研究所彙報，**75**，335－374．

山岡耕春・西原真仁，1997．中部地方の火山活動と沈み込んだフィリピン海プレートの形状，火山，**42**，S 131－S 138．

山崎文人・大井田徹，1985．中部地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状，地震2，**38**，193－201．

Zhao, D., A. Hasegawa and H. Kanamori, 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events, *J. Geophys. Res.,* **99**, 22313－22329.

Zhao, D., K. Asamori and H. Iwamori, 2000. Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone, *Geophys. Res. Lett.,* **27**, 2057－2060.