中央構造線沿いは熱いか？

吉田 明夫^{*1}・高山 博之^{*2}・細野 耕司^{*3}

Is the zone along the Median Tectonic Line hot?

Akio YOSHIDA^{*1}, Hiroyuki TAKAYAMA^{*2} and Kohji HOSONO^{*3}

Abstract

The seismogenic layer in the zone on the southern side of the Median Tectonic Line that runs in the east-west direction crossing the Kii Peninsula and Shikoku is abnormally shallow. It is “abnormal” because the shallowness of the depth is not concordant with the generally observed feature that the higher the altitude of the area, the shallower the seismogenic layer. The depth of the seismogenic layer is as shallow as that in the mountainous zone along the Volcanic Front in northeastern Japan, nevertheless such low altitude areas as Wakayama and Tokushima plains exist in the zone on the southern side of the Median Tectonic Line. If it is postulated that the depth of the seismogenic layer is regulated by the brittle-ductile transition temperature of the crustal materials, the shallowness of the seismogenic layer means that the temperature in the crust is relatively high. Then, why is the temperature in the zone along the Median Tectonic Line high? We think it is not unreasonable to consider that thermal fluids are rising from the subducted slab there, if it is reminded that hot waters are estimated to exist beneath the Wakayama swarm region that belongs to the zone.

Key words: The Median Tectonic Line, seismogenic layer, Wakayama swarm activity, thermal structure of the crust, thermal fluids from the subducted slab

I. はじめに

Hi-net導入後（2002年以後）の気象庁一元化地震カタログを用いて、日本列島内陸及び沿岸域の地殻内地震発生層の深さ分布を調べた高山ほか（2004; 2007）は、次のような地域の特徴を指摘している。

1. 北海道では、火山フロント沿いで浅く、天塩山地と日高山地を結ぶゾーンで相対的に深い。
2. 東北日本では太平洋岸及び日本海沿岸で深

い。

3. 東北脊梁山地から中部山岳地域を通して山陰地方へと続く地殻内地震発生層の浅いゾーンが存在する。
4. 関東から東海、紀伊半島及び四国の太平洋岸で深い。ただし、伊豆半島域は浅い。
5. 紀伊半島から四国にかけての中央構造線沿いは浅い。また、その延長にあたる九州の別府–島原地溝帯も浅い。
6. 山岳部に比べて、関東平野や濃尾平野、新潟平野、瀬戸内海沿岸等の低地で深くなってい

*1 神奈川県温泉地学研究所 Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

*2 気象庁精密地震観測室 Matsushiro Seismological Observatory of the Japan Meteorological Agency

*3 気象庁地震火山部 Seismological and Volcanological Department of the Japan Meteorological Agency

る。

7. 大地震が最近発生したところでは周辺よりも浅いところまで地震が起きている様子が認められる。

ここでは、これらの特徴のうち、5の紀伊半島から四国を東西に貫く中央構造線の直ぐ南側で地震発生層が異常に浅くなっていることを取り上げて、その意義を考察する。それと関連して、上で6番目の特徴として挙げた、地殻内の地震発生層は、山岳地域で浅く、それと相対的に平野部で深い傾向があることを示す。中央構造線の地震発生層の浅さは、この一般的な特徴からはずれるという点において異常である。なお、1と3の特徴は、後で言及するように、火山フロント沿い及び山岳地域で地震発生層が浅いということと関係している。また、2と4の特徴は、冷たい海洋プレートの沈み込みによって地殻が冷やされているためと考えられ、陸から海に向かって次第に深くなる傾向が見られる。海洋プレートの沈み込みがマントル・ウェッジや地殻の温度構造にどのような影響を与えているかを議論する上で興味深いのが、本小論の主題からはずれるので、詳細は省く。伊豆半島域が浅いのは、東伊豆など、火山と関連した活動が活発なためである。そして、7の特徴は、ゆっくりした応力変化に対しては粘弾性的に応答する地殻物質も急激な応力の増加を受けたときには脆性的な破壊を起こし得ることを示していると考えられる。この特徴の詳細については、細野ほか(2006)を参照されたい。

II. 地震発生層の深さと地形高度

Fig. 1は四国・紀伊半島以外の、北海道から九州までの、日本の内陸の地震発生層の90%の深さと地形高度の関係を示したものである。調査範囲としては、前述のように、太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みの影響が見られる太平洋沿岸域は入れず、また、火山地域を除いた。火山地域だけを取り出して同様な関係を示すとFig. 2のようになる。ここで、地震発生層の

Fig. 1 Relationship between the depth of the seismogenic layer and topographic altitude except the regions of Shikoku and Kii Peninsula as well as volcanic areas. D_{90} on the ordinate means the depth above which 90% of earthquakes occur.

Fig. 2 Relationship between the depth of the seismogenic layer and topographic altitude for volcanic areas.

90%の深さとは、0.1度四方のメッシュ毎に地震を震源の浅い方から数えていって、その数がメッシュ内の地震数の90%になる深さをいう。また、それとの相関をとった地形高度は、国土地理院のデジタル・データを0.1度のメッシュ内で平均した値を用いている。なお、地震発生層の90%の深さは、震源の深さの平均値と中央値が非常に異なっているような特異な区域を除けば、10%, 50%, になる深さとよく相関している。したがって、地震発生層の深さの地域的な特徴を議論する際に、これらのどの深さを使ってもかまわない

が、地震が起きなくなる深さというのは、地殻物質が脆性から粘弾性に移り変わるところにほぼ相当すると考えられるところから、内陸における地震発生層の深さの議論では、地震数が90%になる深さがよく用いられている。以下では、地震発生層の90%の深さというべきところを、単に地震発生層の深さと記述しているところがあるが、それは、地殻内の温度構造を詳細に議論するような場合を除いて、地震発生層の深さの空間的な特徴を論じる際には、90%の深さ、即、地震発生層の深さとみなしても差支えないことによる。

Fig. 1から、地震発生層の90%の深さと地形高度の間には、高度が大きくなるほど発生層が浅くなるという相関関係が見られることがわかる。この相関関係の勾配は、地域ごとに若干異なる。後で中部地方北部から関東地方についての場合を例示する (Fig. 5) が、相関関係は実は線形ではなく、Fig. 1でも若干認められるように、標高の低いところで傾きが大きく、標高が高くなると頭打ちとなる傾向がある。

火山地域で地震発生層が浅いことは、すでにIto (1992) によって指摘されているが、Fig. 2でも、高度によらずに多くの地点で10 km以下となっていることが見てとれる。中に25 km近い値を示す地点もあるが、これは火山近傍の地殻下部で発生する低周波地震が混入してしまっているためと考えられる (気象庁震源ファイルで低周波地震と認定されているものは除いている)。なお、ここで火山地域とは、0.1度四方のメッシュ内に活火山が含まれる場合をいう。

Fig. 1で何故、四国・紀伊半島地域を除いたか。それは、これら両地域では、地震発生層の深さと地形高度の関係が、他地域とまったく異なった様相を示すからである。その様相がどのようなものかはFig. 3で明らかであろう。すなわち、地震発生層の深さと地形高度との間には他地域で見られるような相関がまったく認められない。特に地形高度が低いところで、地震発生層の非常に浅いところがあることに注意したい。この特徴は、本小論の主題、すなわち、中央構造線沿いは熱い

Fig. 3 Relationship between the depth of the seismogenic layer and topographic altitude for Shikoku and Kii Peninsula.

かという問題と密接に関係している。

Ⅲ. 中央構造線沿いの地震発生層の深さ

Fig. 4aは、近畿・中国・四国地方における、深さ0–6 kmの地震の震央分布図、また、Fig. 4bは、深さ12–20 kmの地震の震央分布図である。Fig. 4aから、中央構造線の直ぐ南側のゾーンで浅い地震がたくさん発生していることが見てとれる。このゾーンでは、Fig. 4bに見るように、深さ12 kmを超える地震はほとんど発生していない。すなわち、地震発生層全体が他地域と比べて浅い側にずれている。そのゾーンの地震発生層がどれだけ浅いかは、火山フロントが通る東北地方脊梁山地沿いの地震発生層の浅さに、それがほぼ匹敵する (高山ほか, 2007) ことから想像されよう。

山陰地方にも浅い地震の分布するゾーンが見られるが、ここは大山から三瓶山、阿武火山群に続く火山フロントが通るところであり、また、2000年鳥取県西部地震が発生した影響もある (第1節に挙げた特徴の7番目を参照)。

中央構造線の南側のゾーンには、和歌山平野や徳島平野が広がっている。その標高の低い平野部で震源の浅い地震がたくさん発生し、地震発生層が浅くなっているのは、前節で示した、標高と地震発生層の深さとの間の相関関係と合致しない。

Fig. 4a Epicentral distribution of earthquakes in the depth range of 0–6 km.

Fig. 4b Epicentral distribution of earthquakes in the depth range of 12–20 km.

特に紀伊半島の和歌山付近に浅い地震が密集しているところがあるが、ここは1930年代初めにすでにその存在が知られていた和歌山群発地震活動域である (Imamura et al., 1932)。Yoshida et al. (2011) は、GPS地殻変動データからそこに

膨張域の存在が示されること、水準測量で隆起が観測されていること、また、それらの領域の直下の地震活動のb値 (横軸にマグニチュード、縦軸に地震数の対数をとってプロットすると、ほぼ直線上に点が並ぶが、その回帰直線の傾きをb値と

いい、それが大きいことは熱いマグマ物質または流体が存在することを示すと考えられていて、火山地域について多くの研究が行われ、マグマの場所の推定に活用されている）が顕著に大きいことから、その深部に熱い物質、おそらく熱水が存在しているのではないかと推定している。

IV. 考察とまとめ

紀伊半島から四国にかけての中央構造線に沿って、その南側のゾーンの地震発生層は異常に浅い。“異常に”という意味は、内陸地殻内の地震発生層の深さと地形高度との間に一般的に認められる相関関係から大きくはずれることである。その浅さは、東北地方の火山フロント沿いの地震発生層の浅さに匹敵する。

Ito (1990) は、地震発生層の深さと、地殻熱流量の大きさあるいは地殻内温度がキュリー点に達する深さとの間に関係が見られることから、地震発生層の下限の深さは、地殻物質が脆性から粘弾性になる温度によって規定されていると考え、地殻熱流量と地殻内の温度分布との間の簡単な関係式を基に地震発生層の下限における温度を300～350℃と見積もっている。下限の温度の正確な数値はともかく、地震発生層が浅いところは

地殻内の温度が相対的に高く、地殻は浅いところまで粘弾性的な性質を帯びていると考えられる。

Fig. 5の左は関東北部及び中部地方北部における地震発生層の深さと地形高度の関係を示したものであり、右は地殻熱流量と地殻内温度の関係から地震発生層の下限の温度分布を推定した図(Ito, 1990)である。地震発生層の深さと地形高度の相関関係は、地殻熱流量と地殻内温度との間の関係図における等温度曲線と似ていることが見てとれる。このことは、地形高度の高いところは地殻内温度が相対的に高くなっていることを示していると考えて良いだろう。何故そうなのか？標高の高いところは火山の近くに相当しているからではないかという問いに対しては、確かにFig. 2に見るように、活火山を含むメッシュでは発生層が浅くなっている傾向がみられるものの、メッシュ・サイズの0.1度ほど火口から離れれば地震発生層の深さに対する火山の影響はまったくないと言ってよいので(Ito, 1992), Fig. 1に認められる発生層の深さと地形高度の間の相関性を、活火山の存在によって説明することはできない。この問いに答えるには、地盤の隆起はどのようにして生じたのかという問題に立ち返る必要がある。一つの可能性として、隆起域の下部には、地表にマグマを噴出しなかったものの、火山物質が大量

Fig. 5 Left panel: Relationship between the depth of the seismogenic layer and topographic altitude for the northern Kanto and Chubu Districts. Right panel: Depth of seismic-aseismic boundaries and surface heat-flow (Ito, 1990).

に付加・蓄積していると想定するなら、その火山物質からの熱放出が今も続いているということが考えられる。また、もし、アイススタシーが成り立っていて、標高の高いところは地殻が厚くなっているのであれば、放射性元素の崩壊熱も地殻熱流量にいくらかは寄与しているかもしれない。

中央構造線沿いの南側で、地震発生層の下限が異常に浅いことについては、同ゾーン内の和歌山の群発活動域において熱水の存在が推定されていることが参考になると思われる。恐らくこのゾーンには地下深部から、マグマではない高温の流体が上昇しているとみてよいのではなかろうか。この地域には比較的若いフィリピン海プレートが沈み込んでいることに着目すると、この沈み込みによって大量の海水が深部に運び込まれ、その水を吸収して蛇紋岩化したマントル・ウェッジ物質が更に深部で高压変成を受けて再び大量の水を放出し、その水がプレート上面付近まで続く地殻内の弱面をつくっている中央構造線に沿って上昇してきていると考えるのも、まったくの的外れとは思われない。

謝 辞

駒澤大学の鈴木秀和博士と匿名の二人の査読者のコメントは、論旨を明解にする上で有益でした。記して厚く感謝します。

参考文献

高山博之・細野耕司・吉田明夫 (2004) 気象庁

震源データによる地殻内地震の深さ分布, 日本地球惑星科学連合 2004 年大会, **S045**–P003.

高山博之・細野耕司・吉田明夫 (2007): 地震発生層の深さと地形高度, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, **S144**–005.

細野耕司・西 政樹・吉田明夫 (2006): 内陸大地震の余震活動域の深さの時間変化, 地震 **2**, **59**, 29–37.

Imamura, A., T. Kodaira, H. Imamura (1932): The earthquake swarm of Nagusa and vicinity, *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, **10**, 636–648.

Ito, K. (1990): Cutoff depth of seismicity and large inland earthquakes near volcanoes in Japan, *Tectonophysics*, **217**, 11–21.

Ito, K. (1992): Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes, *J. Phys. Earth*, **38**, 223–250.

Yoshida, A., K. Hosono, H. Takayama, A. Kobayashi and K. Maeda (2011): Seismic and geodetic evidence for the existence of hot materials beneath the Wakayama swarm activity, southwestern Japan, *Tectonophysics*, **510**, 124–131, doi:10.1016/j.tecto.2011.06.023.

(原稿受付: 2013 年 4 月 11 日)

(原稿受理: 2013 年 6 月 26 日)

この論文に対する「討論」を 2014 年 5 月 31 日まで受け付けます。

中央構造線沿いは熱いか？

吉田 明夫・高山 博之・細野 耕司

要 旨

紀伊半島から四国にかけて東西に走る中央構造線の南側ゾーンの地震発生層は異常に浅い。ここで“異常に”と言ったのは、一般に地形高度と地殻内の地震発生層の深さとの間には、標高が高いほど浅くなるという相関関係が認められるが、このゾーンには和歌山平野や徳島平野等の低地が存在するにもかかわらず、火山フロント沿いの山地の地震発生層と同じくらいに浅いということを表わしている。地震発生層の下限の深さは、地殻物質が脆性から粘弾性に変わる温度によって規定されていると考え、地震発生層が浅いということは地殻内の温度が相対的に高くなっていることを示す。なぜ、中央構造線の南側のゾーンは高温になっているのか。これについては、同ゾーン内の和歌山の群発活動域において熱水の上昇が推定されていることを参考にすると、そこには地下深部から高温の流体が上昇していることが考えられる。

キーワード：中央構造線、地震発生層、和歌山群発地震活動、地殻内温度構造、スラブからの熱水