

日本列島下の地殻内地震発生層の地域的变化

越智富美子・趙 大鵬

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

Lateral variations in the seismogenic layer beneath the Japan Islands

Fumiko Ochi and Dapeng Zhao

Geodynamics Research Center, Ehime University

Abstract

To better understand the earthquake dynamics of the Japan subduction zone, we investigated the lateral variations of the seismogenic layer in the crust beneath the Japan Islands using about 30,000 well-located crustal earthquakes (M 1-5). These shallow events (0-20 km depths) were selected from the Japan University Network Earthquake Catalog (1985-1993) and the aftershocks of the 1995 Kobe earthquake (M 7.2). The hypocenters were relocated precisely using a 3-D ray tracing method [Zhao *et al.*, 1992] and a 3-D velocity model [Ochi, Asamori and Zhao, 1999]. From the hypocentral distribution of these events we estimated the depth distributions of the upper and lower boundaries and the thickness of the seismogenic layer in Japan. Then we examined the relationships among the thickness of the seismogenic layer, active faults, volcanoes, tomography, and large crustal earthquakes ($M > 5.7$) from 1885 to 1999. We obtained the following results. (1) There are large variations in depth range and thickness of the seismogenic layer. There is a trend that large crustal earthquakes occur in areas where the seismogenic layer changes abruptly. Those areas may represent weak sections of the crust and so are subject to tectonic stress and are prone to large earthquakes. (2) The upper and lower boundaries of the seismogenic layer become shallow toward volcanoes, indicating that the seismogenic layer is controlled by the geothermal regime. (3) The seismogenic layer exhibits large variations across and along the fault zones. (4) A correlation is visible between the thickness of the seismogenic layer and seismic tomography, suggesting that tomographic images of the crust contain the effects of lateral material heterogeneities, as well as thickness changes of the seismogenic layer. These results may improve our understanding of the earthquake dynamics and contribute to the assessment and the mitigation of seismic hazards of the Japan Islands.

Key words: seismogenic layer, crustal heterogeneity, crustal earthquakes, fault zones, seismic tomography

1. はじめに

上部地殻における地震発生層を詳細に調べることは、地殻内大地震の発生機構やその発生予測に対して、非常に重要なことであると考えられる。これまでは、日本列島における地殻の地震発生層の地域的变化が調べられてきた (e.g. Ito, 1990, 1992, 1999; Ito *et al.*, 1995)。しかし、それらは火山地域や西南日本など特定の地域に限られていた。中村・伊藤 (1998) は、日本列島全域における地

殻内地震発生層の分布を求めた。しかし、中村・伊藤 (1998) では地震発生層の決定に用いた地震の震源再決定を行っていない。そこで、今回我々は、3次元速度構造 (越智・他, 1999) と3次元波線追跡法 (Zhao *et al.*, 1992) を用いて震源再決定を行い、日本列島全域にわたる地殻内地震発生層の厚さ、上面・下面の深さの推定を試みた。地震発生層の推定に使用した地震は、精密に震源決定された約 3 万個の地殻内地震 ($1 < M < 5$) であ

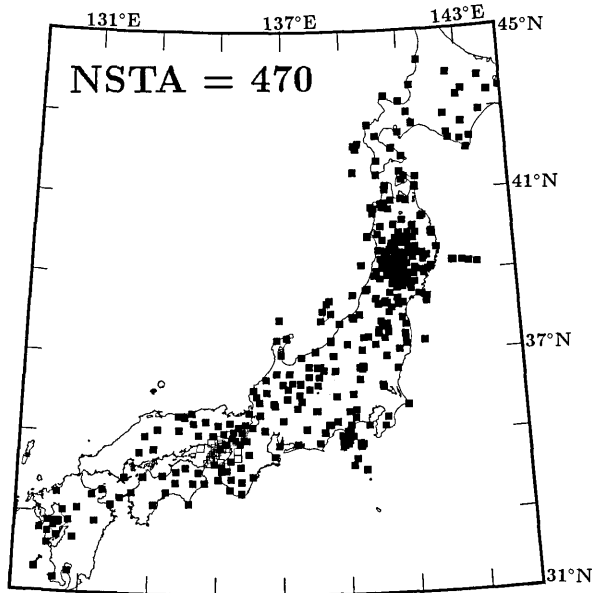


Fig. 1. Distribution of seismic stations of the Japan University Seismic Network (solid squares). Open squares show the temporary stations installed following the January 17, 1995, Kobe earthquake (M 7.2) in southwest Japan (Hirata *et al.*, 1996). NSTA, number of seismic stations.

る。また、得られた結果と内陸大地震（深さ<20 km, $M > 5.7$ ）、活断層、火山の分布及び地震波トモグラフィ（Zhao *et al.*, 1992, 1994, 2000 a）との相関について議論する。

2. データ及び解析法

本解析で使用した地震は、「国立大学観測網地震カタログ」（東京大学地震研究所；坪井・他，1989）に掲載されている1985年から1993年の間に発生した地震と、1995年兵庫県南部地震（M 7.2）後に設置された臨時地震観測網（Hirata *et al.*, 1996）による余震から選出した。これらの地震は、震源の深さが20 km以浅の地殻内地震である。

まず、震源決定精度の良い地震を選別するために、これらのカタログに含まれる地震の震源再決定を行った。震源再決定は、越智・他（1999）によって求められた日本列島全域下の3次元P波速度構造を用い、3次元波線追跡法（Zhao *et al.*, 1992）を使用して行った。震源再決定に使用された観測点の分布をFig. 1に示す。これらの観測点は、兵庫県南部地震後に設置された臨時観測点33個（Hirata *et al.*, 1996）を含む地震予知情報ネットワークを構成する大学の地域センター・観測所の470個の観

NEQ = 27438

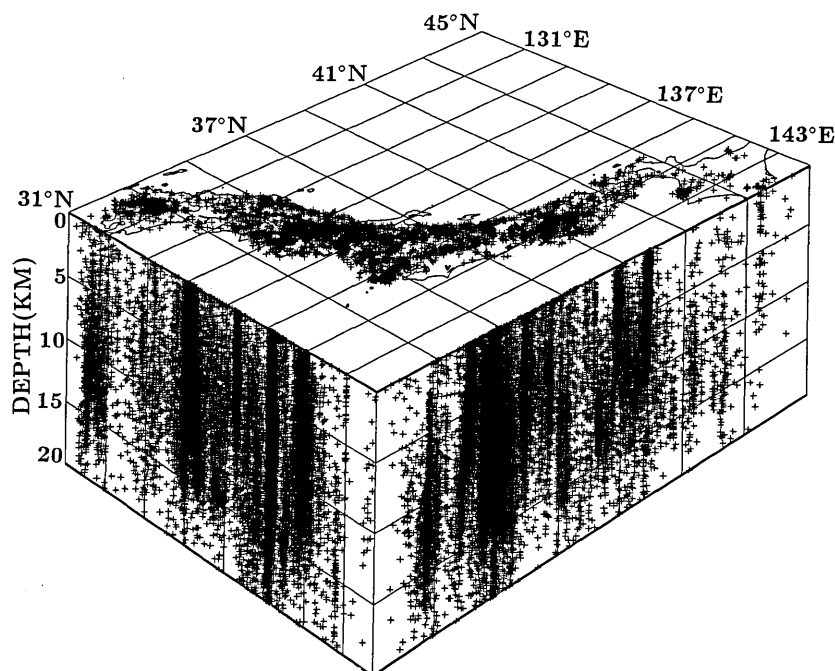


Fig. 2. 3-D distribution of 27,438 earthquakes used in this study.

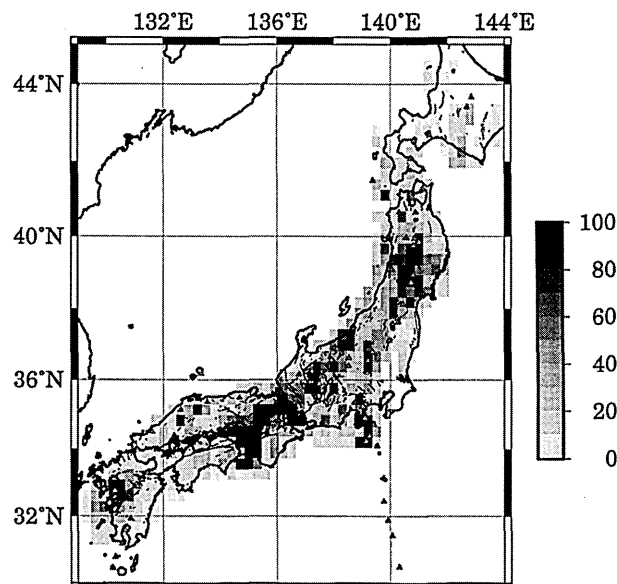


Fig. 3. The number of events per block. The number scale of earthquakes is shown to the right.

測点から構成される。

次に、以下の基準に基づいて震源決定精度の良い地震の選別を行った。

(1) 本解析領域内（北緯31度から北緯45度，東経129度から東経145度）に発生した，震源の深さ20 km以下で浅い地殻内地震である。

(2) 震源再決定に使用したP波とS波の走時データを，あわせて10個以上持つ地震である。

(3) 震源の深さ誤差が4 km未満の地震である。

これらの基準を満たした地震の総数は27,438個である。また，震源再決定に使用したP波及びS波走時データの総数は1,297,513個である。このようにして選出された地震の分布をFig. 2に示す。最後に，これらの地震から日本列島下の上部地殻における地震発生層の厚さ，上面・下面の深さ分布を推定した。その際，まず日本列島全域を水平方向に0.3度間隔のブロックに分ける。そのブロック内の地震の数が200個以下の場合にはブロック内の地震の90%が地震発生層に存在するように，もっとも浅い及び深い地震からそれぞれ5%の地震を除いた。地震の数が200個以上の場合には，最も浅い及び深い地震10個をそれぞれ除いた残りの地震が，地震発生層に存在するように地震発生層の上面・下面の深さを決定した。また，ブロック内の地震の数が，10個以下の場合には地震発生層の決定は行っていない。Fig. 3は各ブロックに含まれる地震の個数を示したものである。図中において，ブロック内の地震の個数が10個以下のものはプロットしていない。また，地震の数が100個以上のブロックは

地震の個数を100個としてプロットしている。この図から，地震発生層の決定に使用した地震が，どの地域に多く，或いは，少ないかが理解できる。例えば，東北地方の火山地域や琵琶湖から紀伊半島西部にかけての地域では地震数が多く，北海道や四国西部や九州東部などの地域では地震数が少ないことがわかる。全体的に，火山地域や活断層帯では，地震が多く発生している。

3. 結 果

求められた地震発生層の上面の深さ分布を，地域別にFig. 4に示す。図中の黒三角は活火山，白三角は中国地方に存在する第四紀火山の位置を，実線は地表における活断層を表す。また同時に，1885年から1999年の115年間に発生した地殻内大地震（深さ<20 km， $M>5.7$ ）を示した（白丸）。1885年から1980年の地殻内大地震の震源位置とマグニチュードは宇津（1982）によって決められたものを使用した。1980年以降の大地震は「地震」（第33-42巻）及び「日本地震学会ニュースレター」に掲載された値を使用した。震源位置の誤差は1960年以前の地震については約10 km，それ以後の地震については約5 kmである。今回の解析で地震発生層の推定に用いたブロックの大きさは，水平方向に約30 kmであるので，地殻内大地震の震央の位置は以下に述べる関係を論ずるのに十分な精度を持っていると思われる。

地震発生層の上面の深さは0 kmから8 kmの範囲に分布している。日本列島では，東日本と九州に活火山，中国地方の日本海側に第四紀火山が分布しており，これらの火山地域及びその周辺域で，地震発生層の上面の深さが周囲に比べて浅くなる傾向が見られる。また，地殻内大地震の多くは，その深さが急に変化する地域に発生しており，地震発生層の上面の深さの変化が，地表の活断層に沿って見られることがある。

地殻内地震発生層の下面の深さ分布を，地域別にFig. 5に示す。図中の記号はすべてFig. 4と同じである。地震発生層の下面の深さは，10 kmから18 kmの範囲に分布している。地震発生層の下面の深さは，上面の深さの空間変化に対応して地域的に変化している。火山地域及びその周辺域で，地震発生層の下面の深さは周辺に比べて浅くなっており，地殻内大地震の多くは，その変化が見られる地域に発生している。しかし，その深さ変化の程度は下面のほうが上面に比べて著しいように思われる。

地震発生層の厚さ分布を，地域別にFig. 6に示す。図中の記号はすべてFig. 4と同じである。地震発生層の厚さは，4 kmから16 kmの範囲で変化している。地震発

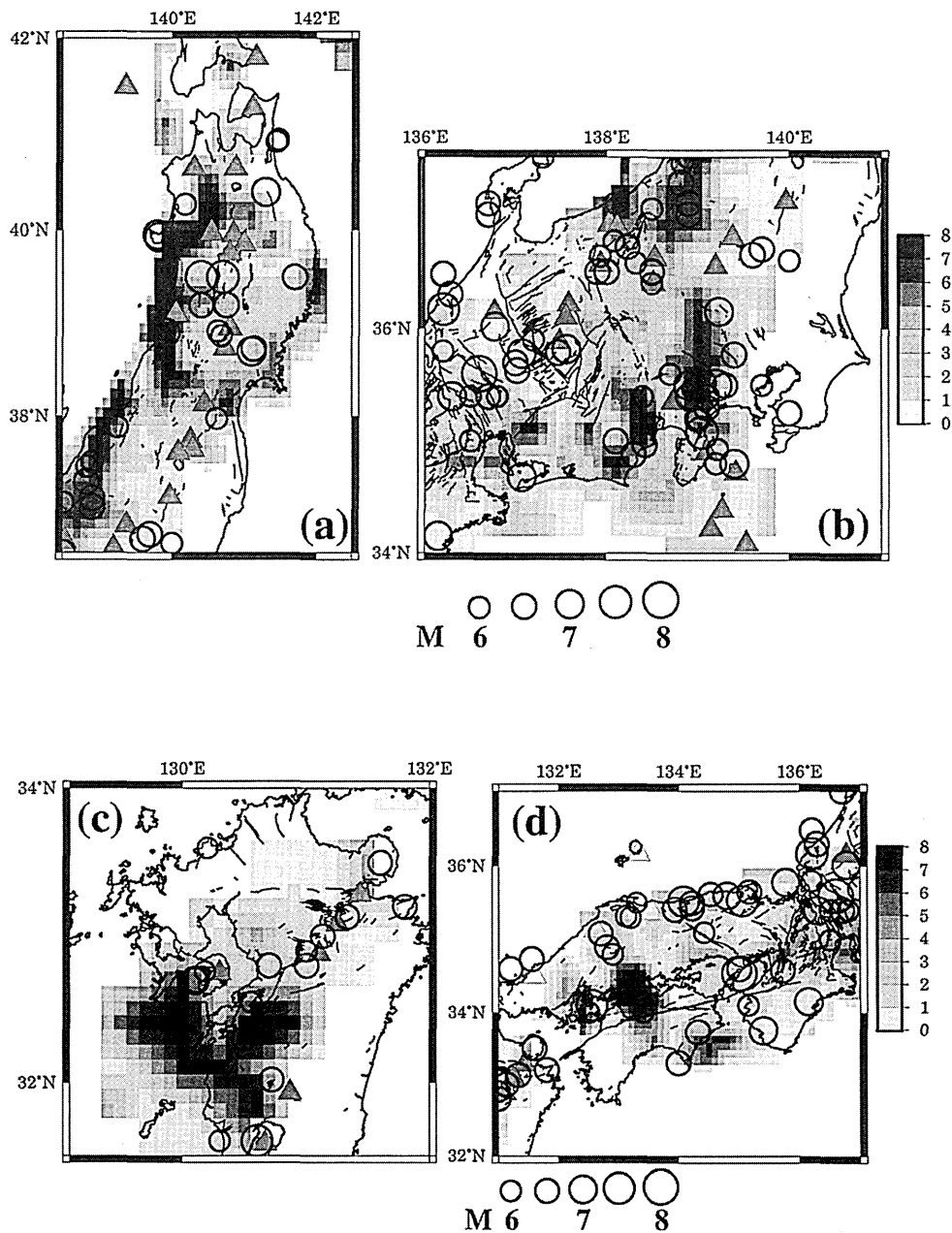


Fig. 4. Upper boundary of the seismogenic layer beneath (a) Tohoku, (b) Kanto and central Honshu, (c) Kyushu, (d) Shikoku and Chugoku. Light and dark colors denote shallow and deep areas, respectively. Open circles denote earthquakes (M 5.7-8.0, depths 0-20 km) that occurred during a period of 115 years from 1885 through 1999. Solid and open triangles denote active and Quaternary volcanoes, respectively. Active faults are shown by thick lines. The depth ranges of the upper boundary and the earthquake magnitude scale are shown to the right and at the bottom, respectively.

生層の厚さは、火山とその周辺域で薄くなる傾向が見られる。また、中部地方の跡津川断層から阿寺断層に沿って見られるように、地震発生層の厚さが、活断層に沿って変化する地域がある。

4. 議 論

4-1 火山と地震発生層

地震発生層の空間変化は、火山の分布と密接な関係があると考えられる。地震発生層の上面・下面とも火山地域周辺で浅くなり、その厚さは薄くなる傾向が見られる (Figs. 4, 5, 6). Fig. 7 に日本列島の熱流量 (heat flow) と地温勾配の分布 (湯原, 1973; 大久保, 1993) を示す。この図から分かるように、火山地域では地表面での熱流量 (heat flow) と地温勾配は共に高い。このことから、

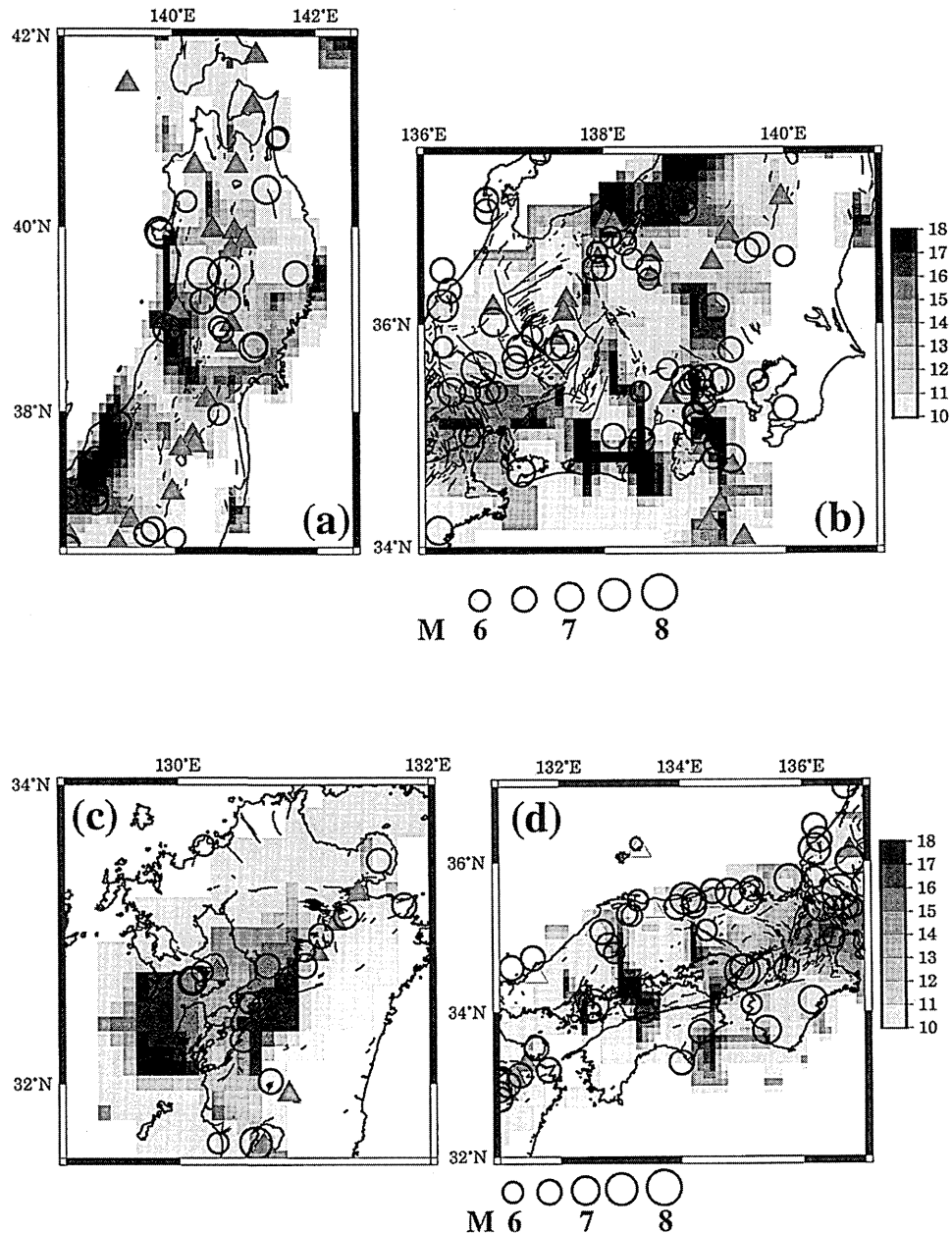


Fig. 5. Lower boundary of the seismogenic layer. Other labelings are the same as in Fig. 4.

地震発生層の上面・下面の深さと厚さは、熱の影響を受けやすいと思われる。地震発生層の上面と下面の深さは同様の空間変化を示しているが、その変化の程度は上面より、下面の深さのほうが著しいように思われる。これは、下面の方が上面よりも、上部マントルを起源とする熱の影響を受けやすいためではないかと考えられる。また、火山地域ほどではないが紀伊半島においても地温が高くなっている地域が見られる。この紀伊半島に見られる地温の高い地域でも、地震発生層の上面・下面が浅く、厚さが薄くなっていることが分かる (Figs. 4, 5, 6)。

4-2 地殻内大地震と地震発生層

Figs. 4, 5, 6 から地震発生層の深さが急激に変化している地域に地殻内大地震の多くが発生していることが分かる。この特徴は火山地域とその周辺域、活断層に沿って見られることが多い。Fig. 8 に火山地域における地殻内大地震の発生のメカニズムを模式的に示す (Hasegawa and Zhao, 1994)。火山地域では、マグマ溜りなどの高温物質がその直上の地殻の強度を低下させ地震発生層を押し上げる。その結果、地震発生層の深さ及び厚さが急激に変化する場所に応力が集中し、地殻内大地震が発生しやすくなっていると考えられる。

また、火山がない四国と中国地方の南部でも、地震発

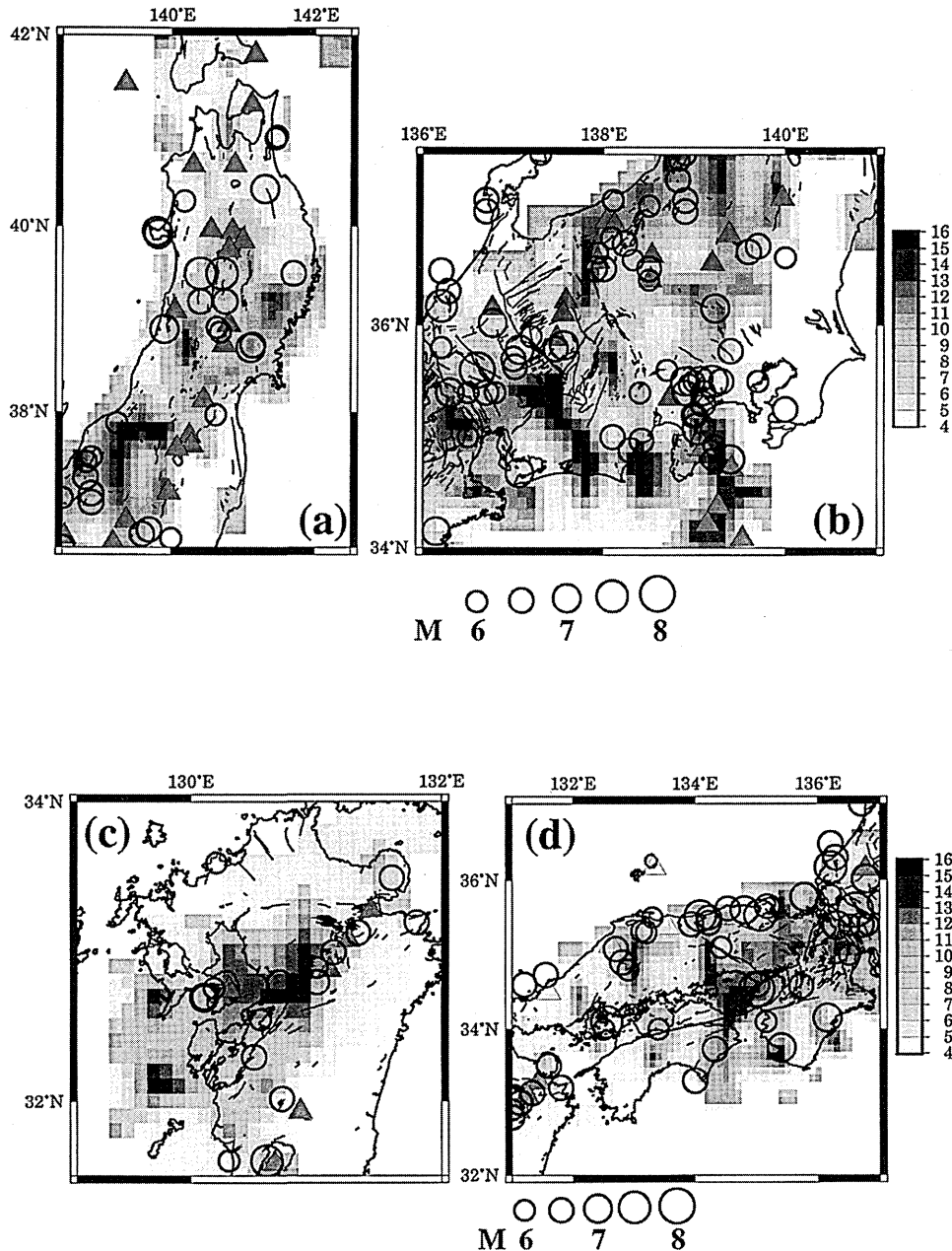


Fig. 6. Thickness of the seismogenic layer. Other labelings are the same as in Fig. 4.

生層の深さや厚さが変化する地域や活断層に沿って、地殻内大地震が発生している。これらの地域は、沈み込み帯の前弧側に位置している。また、Fig. 7から、この地域の heat flow と地温勾配は小さく、地温が低いことが分かる。地表には火山が見られない。これらのことから、この地域の地殻内地震発生層の空間変化は、熱によるものとは考えにくい。この地域下には、比較的年齢の若いフィリピン海スラブが沈み込んでいる。年齢の若いスラブの場合、前弧地域でも脱水が起こることが知られている (Iwamori, 1998; Zhao *et al.*, 2000 b)。この地域の地殻内地震発生層の空間変化は、この地域下に沈み込んで

いるフィリピン海スラブの脱水様式に関係しているかもしれない。このことについては、次の節で詳しく述べる。

4-3 地震発生層と地震波トモグラフィ

P波トモグラフィと、地殻内地震発生層の深さ分布との比較を行った。深さ 40 km の P 波トモグラフィ (Zhao *et al.*, 1992, 1994) を Fig. 9 に示す。これらの図に見られるように、地殻内大地震は地震波低速度域周辺で発生することが知られている (Zhao *et al.*, 2000 a)。また、本研究においては、地震発生層が急に変化する地域に地殻内大地震が発生している (Figs. 4, 5, 6)。このことから、地震発生層の急激な変化と地震波低速度体との

間には、何らかの関係があると思われる。これについて、火山地域・非火山地域において以下のことが考えられる。

火山地域においては次のように解釈することができ

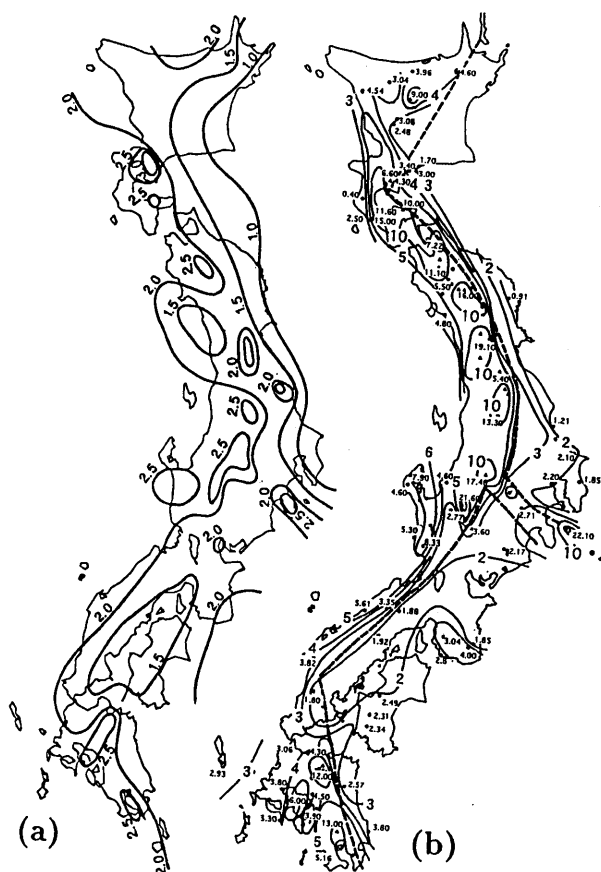


Fig. 7. (a) Contour map of heat flow on the Japan Islands (after Yuhara, 1973). Values are in heat flow unit ($10^{-3} \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). (b) Vertical geothermal gradient (in $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) on the Japan Islands (after Okubo, 1993).

る。火山周辺では、熱による高温異常体が低速度域を形成し、その直上の地殻を加熱する。その結果、地殻の強度が低下し、地震発生層が押し上げられる。このようにしてできた地震発生層の急変部に応力が集中し、地殻内大地震が発生しやすくなると考えられる (Fig. 8)。

四国地方や中国地方南部の非火山地域では、その直下に比較的若いフィリピン海スラブが沈み込んでいる。この地域には、1995年に兵庫県南部地震 (M7.2) が発生した。この地殻内大地震の発生は、この直下に存在する流体に起因することが地震波トモグラフィーの研究 (Zhao *et al.*, 1996; Zhao and Negishi, 1998) や他の地震学、地質学、地球物理学、地下水学の研究から分かっている。また、その流体はフィリピン海スラブの脱水によるものである可能性が、詳細な地殻・上部マントルの地震波トモグラフィーの研究から示されている (越智・趙, 1998; Zhao *et al.*, 2000 a)。沈み込み帯前弧地域の下部地殻とマントル最上部には流体が広く存在するものと考えられている (Tatsumi, 1989; Peacock, 1990; Iwamori, 1998)。その流体が地震波低速度域を形成し、上部地殻の地震発生層にある断層帯の強度、応力場に変化を及ぼし、地殻内大地震が発生しやすくなっているのではないかと考えられる。これらのことから、地震波トモグラフィーは地震発生層の変化など地殻内部の水平方向の不均質をよく反映していると思われる。

5. 結 論

本解析では、日本列島全域における地殻内地震発生層の上面・下面の深さ及びその厚さの地域的变化の推定を行い、その変化と地殻内大地震、火山・活断層及び地震波トモグラフィーとの関係を議論した。その結果から以下のことが分かった。

(1) 内陸大地震は、地震発生層の厚さが急激に変化する

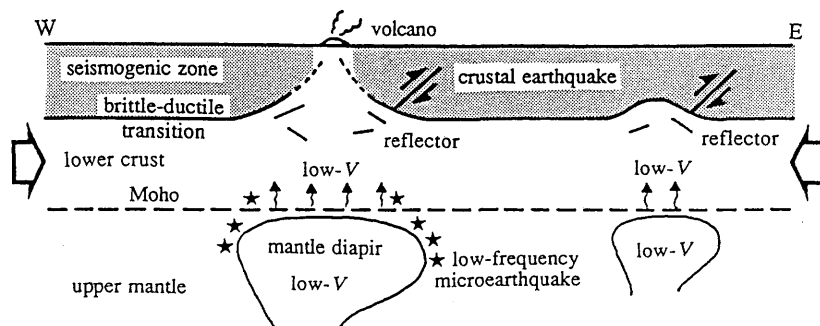


Fig. 8. Schematic illustration of across-arc vertical cross-section of the crust and uppermost mantle in volcanic areas of Japan, showing the cause of large crustal earthquakes and its relation to low-velocity zones and magma chambers in the uppermost mantle (after Hasegawa and Zhao, 1994).

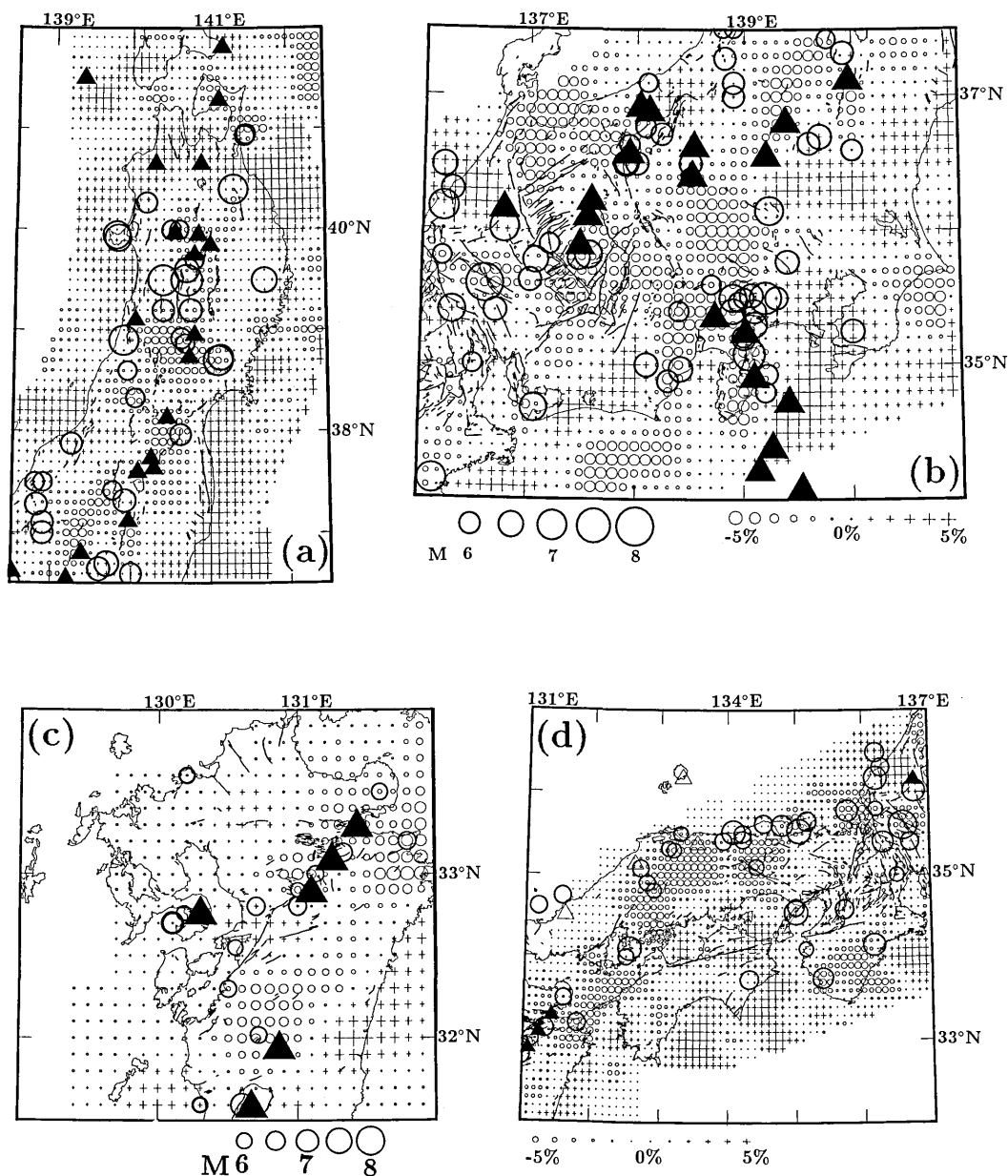


Fig. 9. P-wave tomography image at a depth of 40 km beneath (a) Tohoku, (b) Kanto and central Honshu, (c) Kyushu, (d) Shikoku and Chugoku. Crosses and circles denote fast and slow velocities, respectively. Solid and open triangles represent the active and the Quaternary volcanoes, respectively. Large circles denote earthquakes (M 5.7–8.0, depths 0–20 km) that occurred during a period of 115 years from 1885 through 1999. Active faults are shown by thick lines.

る地域に多く発生している。このような地域では、地殻の強度が低下し、応力集中が起きるために、内陸大地震が発生しやすいと考えられる。

(2) 地震発生層の上面・下面の深さは、火山地域やその周辺で浅くなっている。このことから、地震発生層は温度による影響を受けやすいと思われる。

(3) 地震発生層の厚さが急に变化する地域は、活断層に沿って、或いはその周辺でも見られる。

(4) 地震発生層の厚さと地震波トモグラフィは非常

により相関を示す。このことから、地震発生層の厚さの地域的变化は、地殻内部の水平方向の不均質構造と共にトモグラフィに映し出されると思われる。

謝 辞

東京大学地震研究所の額根一起氏と鷹野澄氏に「国立大学観測網地震カタログ」のデータを提供して頂き、深く感謝致します。また、本稿を査読し、有益なコメントを頂いた伊藤 潔氏と中村綾子氏には深く感謝の意を表

します。

参考文献

- Hasegawa, A. and D. Zhao, 1994, Deep structure of island arc magmatic regions as inferred from seismic observations, in *Magmatic Systems*, edited by M.P. Ryan, pp. 179-193, *Academic, San Diego, Calif.*, 1994.
- Hirata, N. and the Urgent Observation Group for 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, 1996, Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 317-328.
- Ito, K., 1990, 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.
- Ito, K., 1992, Cutoff depth of seismicity and large inland earthquakes near volcanoes in Japan, *Tectonophysics*, **217**, 11-21.
- Ito, K., Matsumura, K., Wada, H., Hirano, N., Nakao, S., Shibutani, T., Nishigami, K., Katao, H., Takeuchi, F., Watanabe, K., Watanabe, H. and Negishi, H., 1995, Seismogenic layer of the crust in the inner zone of south-west Japan. *Ann. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.* **38** (B-1), 209-219.
- Ito, K., 1999, Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, *Tectonophysics*, **306**, 423-433.
- Iwamori, H., 1998, Transportation of H₂O and melting in subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65-80.
- 活断層研究グループ, 1997, 日本の活断層, 東京大学出版社.
- 中村修一・伊藤 潔, 1998, 地殻内地震発生層の活断層, 大地震, 熱構造との関連, 地球惑星科学関連学会予稿集, SL-p 018, P371.
- 大久保泰邦, 1993, 日本列島の温度勾配図, 日本地熱学会誌, **15**, 1-21.
- 越智富美子・趙 大鵬, 1998, 四国地方下に沈み込むフィリピン海プレートの形状及び中国地方の第四紀火山と兵庫県南部地震との関係, 日本地震学会秋季大会予稿集, P 102.
- 越智富美子・浅森浩一・趙 大鵬, 1999, J-array 遠地地震データから推定した日本列島の深部構造, 日本地震学会秋季大会予稿集, B 30, B 29.
- Peacock, S., 1990, Fluid processes in subduction zones, *Science*, **248**, 329-345.
- Tatsumi, Y., 1989, Migration of fluid phases and genesis of basaltic magmas in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707.
- 坪井誠司・額綱一起・鷹野 澄・宮武 隆・阿部勝征・萩原幸男, 1989, 国立大学観測網地震カタログの震源決定処理, 地震Ⅱ **42**, 277-284.
- 宇津徳治, 1982, 日本付近の M 6.0 以上の地震および被害地震の表: 1885 年-1980 年, 東京大学地震研究所彙報, **57**, 401-463.
- 湯原浩三, 1973, 地殻熱流量におよぼす熱水系の影響, 火山, **18**, 12-141.
- Zhao, D., A. Hasegawa and S. Horiuchi, 1992, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, **97**, 19909-19928.
- 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**, 22,313-22,329.
- Zhao, D., H. Kanamori, H. Negishi and D. Wiens, 1996, Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter? *Science*, **274**, 1891-1894.
- Zhao, D. and H. Negishi, 1998, The 1995 Kobe earthquake: Seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, *J. Geophys. Res.*, **103**, 9967-9986.
- Zhao, D., F. Ochi, A. Hasegawa and A. Yamamoto, 2000 a, Evidence for the location and cause of large crustal earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.* **105**, 13, 579-13, 594.
- Zhao, D., K. Asamori and H. Iwamori, 2000 b, Seismic structure and magmatism of the young Kyushu subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2057-2060.

(Received September 27, 2000)

(Accepted February 21, 2001)