12-19東海における長期的 SSE・微動と地下構造Fine-scale seismic structures correlating with slow earthquakes in Tokai district

加藤愛太郎(東京大学地震研究所)

Aitaro Kato (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1. はじめに

沈み込み帯のプレート境界付近に存在する高圧流体が,ゆっくり地震の発生に大きな影響を及ぼ していることが,近年の先行研究によって示唆されている¹⁻⁵⁾.しかしながら,高圧流体の起源や, その詳細な分布に関する研究例は限られている.さらに,高圧流体の分布と低周波地震・微動を含 む地震活動との対応関係も未解明であり,ゆっくり地震発生場の地質学的環境条件の把握が困難な 状況である.

そこで我々は、東海地震の固着域深部から長期的 SSE・微動域を横断する直線状の測線において、 高密度な臨時地震観測点を展開し、約5ヵ月間(2008年4月~8月)にわたり連続波形記録を収録 した⁶⁾. 臨時観測点数の総数は 80 点、観測点間隔は約1~1.5 km であり、測線長は約 100 km に達 する(第1図). 観測期間中に測線近傍で発生し、気象庁一元化処理震源 782 個に対応する地震の P 波・S 波の初動走時を読み取った. さらに、波形相関法による二重相対走時差データも作成し、ト モグラフィー解析⁷⁾をおこなった. 観測期間中に、P 波・S 波の明瞭な立ち上がりで特徴づけられる 17 個の低周波地震を検出することに成功し、高精度な低周波地震の震源が得られた. これらの低周 波地震の震源は、本研究によって推定されたプレート境界に沿って平行に分布し、先行研究によっ て得られていた四国西部の特徴と調和的である²⁾. さらに、遠地地震の波形を用いて、スペクトル division 法⁸⁾を用いて、レシーバー関数解析も実施した.(詳細については⁶⁾を参照)

2. 沈み込む海洋性地殻の特徴

レシーバー関数解析により,地下の不連続面の検出が可能となる.第2図より,沈み込む海洋性 地殻の上面と下面を特徴づける不連続面(負と正の振幅)が,北西方向に低角度(約15度)に傾 斜していることがわかる.さらに,深さ約28kmに,陸のモホ面に対応する不連続面(正の振幅) が存在し,海洋性地殻の上面とX=?km付近で接触する.沈み込む海洋性地殻内の速度構造に注 目してみると,海洋性地殻は,平均的に低速度・高ポアッソン比の帯として特徴づけられるものの, 速度低下・高ポアッソン比の異常の大きさは深さ方向に変化を示すことがわかる(第2図).

長期的 SSE によるモーメント解放量の最も大きな領域では,海洋性地殻内に顕著な低速度・高 ポアッソン比の異常域が現れる.この異常域の弾性波速度は,通常の海洋性地殻の速度に比べて有 意に低下する.室内実験で得られた弾性波速度の測定結果⁹⁰を参考にすると,この領域には高圧流 体,もしくは大量の流体の存在が示唆される.実際,沈み込んだリッジの存在が,制御震源探査¹¹ によって示されている.

長期的 SSE 域に対してより深部に位置する低周波地震・微動域では,海洋性地殻内に低速度・ 高ポアッソン比の異常域が依然として存在するものの,その大きさが長期的 SSE 域にくらべて明 らかに低下する.上述の速度構造の深さ変化は,低周波地震・微動域の海洋性地殻内では,流体圧 の低下,もしくは,流体量の減少が生じている可能性を示す.この原因として,海洋性地殻内の高 圧流体の一部が,微動域直上のマントル・ウェッジ内へ漏れていることが考えられる. 3. マントル・ウェッジの特徴

マントル・ウェッジ内の P 波・S 波速度は,乾いた橄欖岩に比べて有意に低い値を示し,海洋性 地殻から漏れた流体によって橄欖岩の蛇紋岩化が進行していると考えられる.マントル・ウェッジ 内の平均弾性波速度を計算すると,P 波速度 7.2 km/s,S 波速度は 4.0 km/s となる.室内実験で 計測された高温型蛇紋岩アンチゴライトの弾性波速度¹⁰⁾をもとに蛇紋岩化率を推定すると,橄欖 岩のおよそ 60%近くが蛇紋化している必要がある.

低周波地震・微動の上限は、プレート境界の等深度線にほぼ平行で、空間的にシャープな境界と して特徴づけられる.これは、マントル・ウェッジと海洋性地殻が接する線を境に、それよりも深 部のマントル・ウェッジの先端直下で、低周波地震・微動が発生していることを意味する(第3図).

長期的 SSE による滑りの多くは、前弧側の上盤プレートと沈み込む海洋性地殻が接する境界で 主に発生する.一方,低周波地震・微動は、蛇紋岩化したマントル・ウェッジと海洋性地殻が接す る境界で発生する(第3図).このように、長期的 SSE と低周波地震・微動によるゆっくりすべり 域は、プレート境界面上に位置するものの、上盤物質の構成岩石種が大きく異なることが明らかと なった、本研究によって抽出された詳細な地下構造により、ゆっくり地震と関連性の高い異常構造 が存在することが明らかとなり、ゆっくり地震の発生過程を理解する上で重要な知見が得られた.

参考文献

- 1. Kodaira, S., T. Iidaka, A. Kato, J.-O. Park, T. Iwassaki, and Y. Kaneda (2004), High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai Trough, *Science*, 304, 1295–1298.
- 2. Shelly, D. R., G. C. Beroza, and S. Ide (2007), Non-volcanic tremor and low frequency earthquake swarms, *Nature*, 446, 305–307.
- 3. Liu, Y., and J. R. Rice (2007), Spontaneous and triggered aseismic deformation transients in a subduction fault model, *J. Geophys. Res.*, 112, B09404, doi:10.1029/2007JB004930.
- 4. Audet, P., M. G. Bostock, N. I. Christensen, and S. M. Peacock (2009), Seismic evidence for overpressured subducted oceanic crust and megathrust fault sealing, *Nature*, 457, 76–78.
- Song, T.-R.A, D.V. Helmberger, M.R. Brudzinski, R.W. Clayton, P. Davis, X. Perez-Campos, S.K. Singh (2009), Subducting slab ultra-slow velocity layer coincident with silent earthquakes in southern Mexico, *Science*, 324, 502–506.
- Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, N. Hirata (2010), Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, Geophys. Res. Lett., 37, L14310, doi:10.1029/2010GL043723.
- 7. Zhang, H., and C. H. Thurber (2003), Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 1875-1889.
- Ammon, C. J. (1991), The isolation of receiver function effect from teleseismic P waveforms, Bull. Seismol. Soc. Am., 81(6), 2504–2510.
- 9. Christensen, N. I. (1984), Pore pressure and oceanic crustal seismic structure, Geophys. J. R.

Astron. Soc., 79, 411-423.

- 10. Christensen, N. I. (2004), Serpentinites, peridotites, and seismology. Int. Geol. Rev. 46, 795-816.
- 11. Suito, H., and T. Ozawa (2009), Transient crustal deformation in the Tokai district, *Zisin*, 2, 61, 113-135.
- 12. Hirose, H., and K. Obara (2006), Short-term slow slip and correlated tremor episodes in the Tokai region, central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17311, doi:10.1029/2006GL026579.



- 第1図 アレイ地震観測点の分布図⁶⁾, すべり欠損速度(赤実線)¹¹⁾, 長期的 SSE のすべり速度(青実線)¹¹⁾, 気象庁一元化処理震源による深部低周波地震の震央分布(点), 短期的 SSE の震源断層を 示す(紫色)¹²⁾.
- Fig. 1 Seismotectonic setting of central Japan and locations of linear seismic array. The linear seismic array subparallel to the convergence direction of the Philippine Sea plate (PSP) is denoted as a bold green line. Blue contour lines and arrows represent slip rate and slip direction of the long-term slow slip from 2000 to 2005, and red ones indicate slip deficit rate from 1997 to 1999¹¹). Contour lines for rates larger than 20 mm/yr are drawn with an interval of 10 mm/yr. Dots are LFE locations determined by the Japan Meteorological Agency (JMA). Purple rectangles show fault slip models of short term slow slip events¹². The dashed rectangle indicates the regional location of Figs. 1b and 1c



- 第2図 (a) 長期的 SSE のすべり速度, (b)-(d) 地震波速度構造とレシーバー関数の深さ断面図を示す. 灰色の丸印は,再決定された通常の地震の震源,赤色の星印は,高精度に推定された低周波地震 の震源を表す.
- Fig. 2 Depth sections of seismic velocities and receiver functions beneath the linear seismic array (along the section Y = 0). (a) Profile of slip rate of the long-term slow slip event (LTSS). (b) P-wave velocity perturbation $\delta Vp/Vp$. (c) S-wave velocity perturbation $\delta Vs/Vs$. (d) Vp/Vs ratio. (e) Receiver function results. Relocated hypocenters are plotted for events within 10 km of each cross-section with gray circles indicating regular earthquakes and red stars indicating LFEs. Gray-masked areas represent regions of poor resolution. Our interpretation of seismic structure is superimposed on each section.



- 第3図 地下構造の解釈図.(a)予想される沈み込む海洋性地殻内の流体圧分布を色の濃度で表わす.緑 色の矢印は,予想される流体の移動経路.(b)沈み込む海洋性地殻内のS波速度構造の偏差と Vp/Vs比の深さ変化.
- Fig. 3 Schematic interpretations of seismic structures. (a) Fluid pressures P_f within the subducting oceanic crust are color coded to magnitude. Green arrows denote potential fluid pathways in the subduction zone. Gray circles are relocated earthquakes observed by the linear array. Crosses represent earthquakes from 2003 to 2007 relocated in the final velocity model. (b) Variations of $\delta V_S/V_S$ and V_P/V_S ratio within the subducting oceanic crust.