

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340129

研究課題名（和文）沈み込みプレート境界地震発生帯の速度物性分布と物性獲得プロセスの解明

研究課題名（英文）Distribution of elastic properties and processes of change in physical properties along seismogenic subduction plate interface

研究代表者

橋本 善孝 (Hashimoto Yoshitaka)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号：40346698

研究成果の概要（和文）：陸上に露出している過去の沈み込みプレート境界の堆積物を対象に、その固さを弾性波速度で定量化し、その分布と岩石化プロセスを検討した。調査地域は四国白亜系四万十帯である。手法として、弾性波速度測定器の開発と、野外調査とサンプル採取、弾性波速度の測定を行った。その結果、現在の南海地震断層には高圧の流体の存在、地震発生深度における岩相による岩石化プロセスの相違、深部における粘土鉱物の脱水による流体の集中過程などが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined distribution of elastic properties of sediments and the processes of the change in physical properties in ancient seismogenic plate interface exposed on-land. The study area is the Cretaceous Shimanto Belt, Shikoku. Methods are making equipment for velocity measurements, fieldwork and sampling, and velocity measurements of the sediments. In the results, existence of high fluid pressure along seismogenic fault in Nankai plate interface, differences in lithification processes between lithologies, and fluid concentration in the seismogenic depth due to clay mineral dehydration are revealed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：内部変動・物性・沈み込みプレート境界地震発生帯

## 1. 研究開始当初の背景

1) 陸上付加体の地質学、2) 反射法による現世付加体の地球物理的観測、3) 地震発生帯の物質科学という3分野はこれまで個別に発展してきた。地質学により沈み込みプレート境界の変形構造が区分され、より精度の低い反射法断面の構造との対比が可能となっ

てきている。また、地震発生帯の岩石を定量的な物理量で理解しようとする物質科学が発展してきた。このような背景を経て、本研究ではこの地質学・地球物理学的観測・岩石物質科学の3つを速度物性という物理量で有機的に結びつけて地震断層および周辺の堆積物を定量的に理解しようとする。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は沈み込みプレート境界地震発生帯における速度物性分布を天然の岩石から取得することである。そこから地震断層に境される岩石の岩石化度および断層強度を定量的に理解し、その変化に関わる物質的メカニズムを明らかにする。地質学・地球物理学的観測・岩石物質科学の3分野を速度物性で統合することでこの目的を実現する。

## 3. 研究の方法

本研究は大きく4つに分けられる。1. 速度物性測定機器の開発、2. 四国白亜系四万十帯における速度物性測定とその分布の検討、3. 三次元反射法データとの比較、4. 物質科学的データ(変形組織、セメント物質量、粘土鉱物組成、間隙率など)との比較である。

## 4. 研究成果

(1) 弾性波速度測定器の開発を行った。圧力容器はTEMCO製で、15000psi(約103MPa)までの耐圧性能を持つ。この圧力容器は流体圧を加えた圧密を行う試験機で、弾性波速度を測定する能力を有していない。そこでパーツの図面を引き、地元の金属加工業者にパーツ製作を依頼し、弾性波速度を測定できるように改造した。流体圧・封圧をコントロールするためにISCO社製のシリンジポンプを二台購入した。予算の都合から10000psi(約67MPa)の圧力まで加えることができるものにした。これはコントローラーで精密に圧力を制御することが可能である。さらに電圧式の変位計を付けた。弾性波波形の取得にはオシロスコープを用いる。ポンプの状態、流体圧、封圧、変位計データ、弾性波波形をコンピュータで記録することができるようにした。

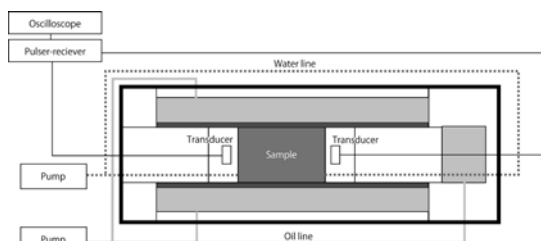


図1 弾性波速度測定器の模式図

(2) 陸上付加体内に見られる地震断層の化石に境される弾性波速度物性の分布を明らかにし、その物性を利用して現世南海トラフ反射断面の反射係数との比較を行ったところ、非常に高い間隙水圧が推定された。

研究対象地域は徳島県牟岐町牟岐メランジュ北縁断層で、メランジュ帯北縁と北のコヒーレント相(日和佐層)との境界断層である。この断層からシュードタキライトが発見されており、過去の最高被熱構造を切断して

いないことから、過去の沈み込みプレート境界地震断層と認定されている。上盤の日和佐層は砂岩主体で、下盤の牟岐メランジュは面構造の発達した泥岩である。この上盤下盤の岩石の弾性波速度を測定した。弾性波速度の測定は流体圧のコントロール下で有効圧が5-65MPaの範囲を5MPaステップで行った。その結果、上盤の砂岩ではPは速度がおよそ4500-5000m/s、S波速度がおよそ2400-2750m/s、下盤の泥岩ではPは速度がおよそ4100-4500m/s、S波速度がおよそ2000-2250m/sであった(図1)。室戸沖南海トラフの反射断面に見られる深度約4.5kmの沈み込みプレート境界が本研究地域と同等であると考えられる。先行研究でこの反射面の反射係数から物理パラメータが得られており、今回測定した弾性波速度から計算される同じ物理パラメータと一致する上盤と下盤の有効圧を推定したところ、上盤では有効圧が10-20MPa、下盤では8-10MPaとなった。これは間隙流体圧比にして0.8-0.9の異常に高い流体圧の存在を示唆している。このとき断層の摩擦係数は0.1程度となることが計算される。先般の東北地方太平洋沖地震では海溝から約50km海側のプレート境界が50mも変位したことが指摘されており、非常に低い摩擦係数が推定されている。本研究は南海トラフにおいても東北日本と同様の場所で高間隙流体圧による摩擦係数の低下が具体的に示された例であり、次の地震が津波型になることを示唆するものである可能性がある。また、世界中の他の沈み込み帯においても同様の検討を広く行う必要がある。

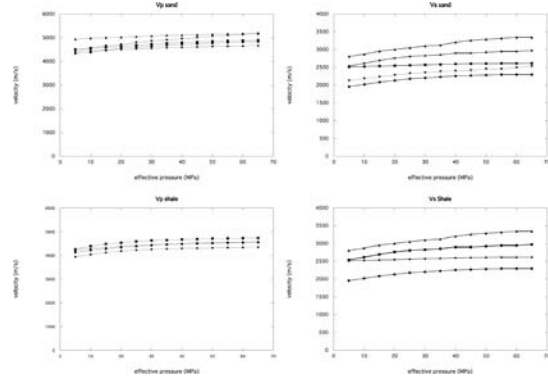


図2 弾性波速度測定結果。左が上盤のP波およびS波、右が下盤のP波およびS波

(3) 西土佐湾海岸線に露出する付加体を対象に弾性波速度マッピングを行った。中土佐町内で北は田ノ浦から南は小鶴津までおよそ25kmの範囲を対象にした。本地域は先行研究でビトリナイト反射率(VR)による過去の最高被熱の分布が明らかとなっており、北から南へ14kmほどのところまで単調に温度が増加し、アウトオブシークエンス断層によって切断され、急激に温度が減少し、そこからま

た南へ温度が増加するという傾向がある。その温度範囲はおよそ 150–230°C で、いわゆる地震発生帯深度に相当する。本研究では、過去の最高被熱を最大埋没深度とし、弾性波速度と対比することによって深度方向の物性変化を明らかにする。また、アウトオブシークエンス断層に境される物性差も明らかにする。

サンプルは上盤から砂岩 11 個、泥岩 5 個、下盤から砂岩 6 個、泥岩 4 個を測定した。

弾性波速度の測定は(2)で行った方法と同様である。ビトリナイト反射率(VR)と対比するために最大有効圧時の最大弾性波速度( $V_{max}$ )と、実験応力変化範囲(5–65MPa)での弾性波速度変化( $\Delta V$ )のパラメータを用いる。

弾性波速度は砂岩においてP波速度がおよそ 4700–5000m/s、S波速度がおよそ 2600–2700m/s、泥岩ではP波速度がおよそ 4200–4500m/s、S波速度が 2400–2500m/sであった。

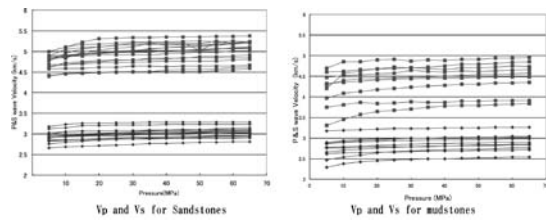
$V_{max}$  と VR の関係については砂岩ではP波、S波ともに相関は見られなかった一方、泥岩ではP波、S波ともに正の相関が見られた。 $V_{max}$  は最大有効圧時の間隙率を見ていると考えられ、砂岩では深度とともに間隙率は変化せず、泥岩では間隙率が減少するというを示している。つまり泥岩は地震発生帯深度においても続成過程が完了しておらず、より深部へむけて続成過程が進行することを示している。

$\Delta V$  と VR の相関については砂岩はP波、S波ともに正の相関が見られた一方、泥岩ではP波、S波ともに相関が見られなかった。 $\Delta V$  は異方的なクラックの量をみていると考えられ、砂岩では深度とともにより異方的なクラックが増加しており、泥岩はもともと強い異方性を持ち、深度とともに変化しないことを示唆している。

以上のことは砂岩において先に岩石化が進行し、泥岩においては砂岩に遅れて岩石化が進行するというこれまでの定説を定量的に示すものであるが、この岩相による物性差が地震発生帯深度においても残存していることが新たな知見と言える。

アウトオブシークエンス断層における弾性波速度差は砂岩においてはほとんど見られず、泥岩においてはP波でおよそ 1000m/s、S波でおよそ 400m/s の差が見られた。海洋付加体の反射断面ではアウトオブシークエンス断層の反射面は断続的であり、正負の極性も多様である。単に流体圧の影響だけでなく、岩相の違いもそのような反射面の物性をコントロールしていることを強く示唆している。

図3 弾性波速度測定結果。左が砂岩、右が泥



岩を示している。

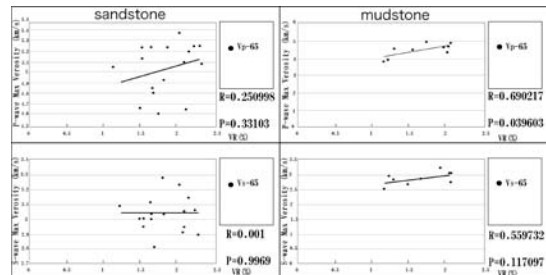


図4  $V_{max}$  と VR の相関。左が砂岩、右が泥岩、上が  $V_p$ 、下が  $V_s$  を示す。R は相関係数、P は危険率。

(4) 沈み込みプレート境界地震発生帯のセメント量および流体量の推定を行った。対象地域は高知県土佐市横浪メランジュで、マップスケールの小断層の分布と付随する鉱物脈の厚さの測定を行った。その結果、南北およそ 600m の調査地域において、1mにつき平均 10mm の鉱物脈が濃集していることが明らかとなった。

その鉱物脈を沈殿させるのに必要な流体量を推定するために流体包有物マイクロサーモメトリによる温度圧力の推定を行った。推定された温度圧力はおよそ 175–225°C および 143–215MPa であった。鉱物脈はほぼ石英からなるので、石英の溶解度の温度圧力依存性から、溶解するのに必要な流体量を推定したところ、岩石全体の 106 倍の流体量が最低限必要であるという結果を得た。

この温度圧力は地震発生帯中深度であり、流体の起源は粘土鉱物の脱水が考えられる。スメクタイトおよびサポナイトの脱水は 150–200°C で起こり、この脱水が中深度域での莫大な流体共有を担っていると考えられる。この現象と陸上付加体で見られる鉱物脈の分布とがよく一致していることを本研究は占めている。

先の(2)で見られた地震発生帯深度における泥岩の続成過程の進行は、この脱水過程に起因している可能性がある。また、(1)の牟岐メランジュの例では、メランジュ帯北縁断層に地震断層が発達することを示している。メランジュ帯は多くの流体を通過させている一方、上盤のコヒーレント相はほとんど砂岩で続成過程は先に進行し、流体をほとんど通さない。このような水文的コントラストが高間隙流体圧を生み、地震断層がその北縁に規定されることに影響を与えている可能性

がある。

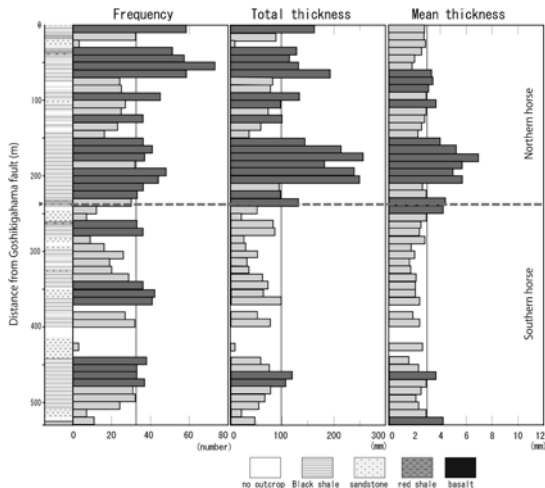


図5 横浪メランジュにおける鉱物脈の分布

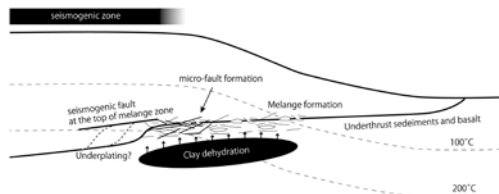


図6 沈み込みプレート境界地震発生帯深度における変形及び脱水過程の模式図

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携 研究者には下線)

[雑誌論文] (計32件)

- ① Hashimoto, Y., Eida, M., Kirikawa, T., Iida, R., Takagi, M., Furuya, N., Nikaizo, A, Kikuchi, T. and Yoshimitsu, T., A large amount of fluid migration around shallow seismogenic depth preserved in tectonic melange, the Cretaceous Shimanto Belt, Kochi, Southwest Japan, Island arc, 査読あり, 1, 2012, 53-56.
- ② Takeshi Tsuji, Ryota Hino, Yoshinori Sanada, Kiyohiko Yamamoto, Jin-Oh Park, Tetsuo No, Eiichiro Araki, Nathan Bangs, Roland von Huene, Gregory Moore, and Masataka Kinoshita, In situ stress state from walkaround VSP anisotropy in the Kumano basin southeast of the Kii Peninsula, Japan, Geochem. Geophys. Geosyst. 査読あり, 12, 2011, doi: 10.1029 /2011GC002583.
- ③ Takeshi Tsuji, Yoshihiro Ito, Motoyuki Kido, Yukihiro Osada, Hiromi Fujimoto, Juichiro Ashi, Masataka

Kinoshita, and Toshifumi Matsuoka, Potential tsunamigenic faults of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Plants and Space, 査読あり, 63, 2011, 831-834.

- ④ Hashimoto, Y., Tobin, H. J., Knuth, M., and Harada, A., Data report: Compressional and shear wave velocity measurements on sediments in the hanging wall and footwall of megasplay fault, NantroSEIZE Stage 1, Proceedings of Integrated Ocean Drilling Program, 査読あり, 2011, doi:10.2204/iodp.proc.314315316.217.2011.
  - ⑤ Takeshi Tsuji, Jack Dvorkin, Gary Mavko, Norimitsu Nakata, Toshifumi, Matsuoka, Ayako Nakanishi, Shuichi Kodaira, and Osamu Nishizawa, Vp/Vs ratio and shear-wave splitting in the Nankai Trough seismogenic zone: Insights into effective stress, pore pressure and sediment consolidation, Geophysics, 査読あり, 76, 2011, doi: 10.1190/ 1.3560018.
  - ⑥ Sakaguchi Arito et al. (12人中1番目), Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NantroSEIZE cores, Geology, 査読あり, 39, 2011, 395-399.
  - ⑦ Hashimoto, Y., Tobin, H. J., Knuth, M., Velocity-porosity relationships for slope apron and accreted sediments in the Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NantroSEIZE), Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 315 Site C0001, Geochem. Geophys. Geosyst, 査読あり, 11, 2010, doi:10.1029/2010GC003217.
- [学会発表] (計98件)
- ① Yoshitaka Hashimoto, Noriaki Doi, Takeshi Tsuji, Differences in Vp and Vs at a seismogenic subduction interface: application to fluid pressure estimation by AVO analysis with Nankai seismic profile, AGU fall meeting, 2011.12.5-9, San Francisco, USA.
  - ② Yoshitaka Hashimoto, Natsuko Yamano, Mika Yamaguchi, Mio Eida, Change in deformation mechanisms from pressure solution to brittle faulting at shallow subduction interfaces: lithification or seismic cycle, Asia Oceania Geoscience Society Meeting, 2011.8.8-12, Taipei,

Taiwan.

- ③ Hashimoto Y., Tobin, H. J. and Knuth, M. W., P and S wave velocity measurements on sediments from the hanging-wall of megasplay fault, NantroSEIZE Stage 1, AGU Fall Meeting, 2010.12.13-17, San Francisco, USA.
- ④ T. Tsuji, R. Hino, Y. Sanada et al. (10人中1番目), Seismic anisotropy from walk-around VSP data in the Kumano basin south of Kii Peninsula (IODP Site C0009A), AGU Fall Meeting, 2010.12.13-17, San Francisco, USA.
- ⑤ Arito Sakaguchi, Frederick Chester, Daniel Curewitz et al. (12人中1番目), Frictional high heat at shallow portion of the mega-splay fault and frontal thrust: Core analysis of IODP NanTroSEIZE stage 1, AGU Fall Meeting, 2010.12.13-17, San Francisco, USA.
- ⑥ T. Tsuji, N. Nakata, T. Matsuoka, J. Dvorkin, A. Nakanishi, S. Kodaira, Vp/Vs and shear-wave splitting at the seismogenic plate subduction zone: Insight into effective-stress and pore pressure distribution, SEG annual meeting, 2010.10.20, Denver.
- ⑦ Arito Sakaguchi, Frederick Chester, Daniel Curewitz et al. (12人中1番目), Evidence for high frictional heat at a shallow portion of the faults, Tonankai earthquake rupture area, Western Pacific Geophysical Meeting(WPGM), 2010.6.22-24, Taipei, Taiwan.
- ⑧ Hashimoto, Y., Kunth, M W, Tobin, H, Harada, A, P and S-wave velocity measurements and textures of sediments for hanging wall of the Megasplay fault: NantroSEIZE Stage 1, Western Pacific Geophysical Meeting(WPGM), 2010.6.22-24, Taipei, Taiwan.
- ⑨ Arito Sakaguchi, Paleo-thermal condition of the shallow mega-splay fault based on vitrinite reflectance: Core analysis of IODP NanTroSEIZE stage 1, AGU fall meeting, 2009.12.15, San Francisco, USA.
- ⑩ Hashimoto, Y., Stress inversion analysis for micro-faults in an on-land accretionary complex, the Yokonami melange, Shikoku, SW Japan: an implication in seismic cycle, AGU fall meeting, 2009.12.15, San Francisco, USA.

[図書] (計1件)

- ① Hashimoto, Y. and Kaji, U., Intech,

Rock-fluid interaction along seismogenic faults inferred from clay minerals in Okitsu melange, the Cretaceous Shimanto Belt, SW Japan, in "Earthquake Research and Analysis / Book 1, 2012, pp. 13.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 善孝 (HASHIMOTO YOSHITAKA)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授  
研究者番号: 40346698

### (2) 研究分担者

坂口 有人 (SAKAGUCHI ARITO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
変動研究センター・技術研究主任  
研究者番号: 80304666

辻 健 (TSUJI TAKESHI)

京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 60455491

### (3) 連携研究者

なし