

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340122

研究課題名(和文) 南海プレート境界の不均質すべりと前弧テクトニクスの相関抽出

研究課題名(英文) Examination of tectonic relationships between heterogeneous slow slip behaviors and forearc deformation in the Nankai subduction zone

研究代表者

水上 知行 (Mizukami, Tomoyuki)

金沢大学・自然システム学系・助教

研究者番号：80396811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：南海沈み込み境界の巨大地震発生域周縁に観測されるゆっくり滑りの不均質の地質学的実態と成因を理解するため、上盤マンツルの蛇紋岩化の岩石学的モデルに基づき、構造地質学と地球物理学と地形年代学による多角的アプローチから検証に取り組んだ。その結果(1)ゆっくり滑りに伴う深部低周波微動と天然蛇紋岩構造がサイズ分布において対比できること、(2)四国西部の重力異常の東西変化や深部低周波微動の特徴的な長さの東西変化が蛇紋岩化の違いで説明できる可能性、(3)四国の河川の離水年代からプレート界面不均質への地殻応答が制約できる可能性が見えた。プレート境界深部の歪み解消過程の定量化へ一つの道筋をつける成果と言える。

研究成果の概要(英文)：Slow slips at subduction boundaries are considered to be critical in stress build-up on the megathrust zones. We examine petrological controls on the mechanism and heterogeneous distribution of slip sources using multidisciplinary approaches including structural geology, geophysics and geomorphological chronology. The following results on the Nankai subduction zone will be an important step for practical understanding of slow slip phenomena: Layered structures of antigorite serpentinite formed through open system crust-mantle interaction show an exponential scaling relationship similar to deep low frequency tremors (DLFTs); The lateral variation in gravitational anomaly and scaling relationship between duration and amplitude of DLFTs can be explained by variable extents of serpentinization consistent with the present thermal structure of the Nankai region; Water separation ages successfully constrain the development of the Shimanto River system in response to the plate coupling.

研究分野：構造地質学

キーワード：プレート境界 スロースリップ 地殻変動 蛇紋岩

1. 研究開始当初の背景

近年の高感度・高精度の観測により、プレート境界上の不均質なすべり分布が詳細に描き出されている(図1)。西南日本の巨大地震発生域は東海・東南海・南海の3つのセグメントから成り、独立にすべて地震を生ずることもあれば、連動して超巨大地震を引き起こす場合もある。また、これらの震源域の深部で発生する、数力月から数年の間隔のゆっくりとした非地震性のすべり(スロースリップイベント、以下SSE)の分布にも不均質が見られる(Obara, 2011)。例えば、南海震源域西端の豊後水道のようなセグメント境界では、約8~10年周期の長期的SSEが発生し、局所的にひずみを解消している(Hirose and Obara, 2006)。このようなSSEによるひずみ解消は、より浅部の巨大地震震源域への応力集中プロセスであるため、SSE発生域のすべり特性とその成因の解明が重要である。

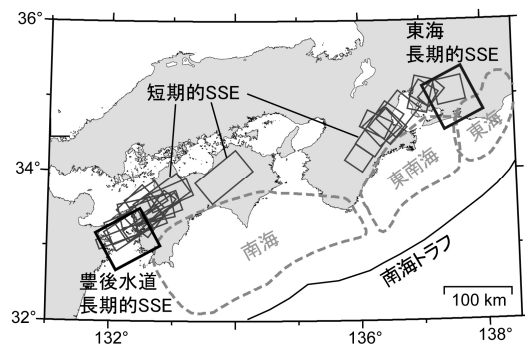


図1 西南日本プレート境界のすべり分布

SSEの周期の違いと分布を決定づける要因は何だろうか? SSEが1カ月や数年程度で蓄積される小さな応力を開放すること、潮汐などのわずかな応力変化にトリガーされることから、すべり面における高い流体圧が現象に本質的であるとみられている(Ozawa *et al.*, 2002S; Shelly *et al.*, 2006)。そこで、沈み込み帯の熱モデリングによりSSEへのスラブ流体の寄与が検討されたが、沈み込み帯の熱構造から推定される脱水深度はSSEの発生深度と合致しなかった(Peacock, 2009)。そのため、ゆっくりすべり挙動を説明できる新たな物質科学的視点が求められていた。

2. 研究の目的

上記の状況を受けて本研究では、吸水効率の異なる2種類のアンチゴライト蛇紋岩化作用が起こるという岩石学的な視点から、「すべり面の上盤に位置するマントルウェッジの性質の変化がゆっくり滑りの特徴を支配している」という仮説を立てた。その検証には、(1)天然の蛇紋岩から吸水反応の違いを読み取れるか、(2)現在観測される長期的・短期的SSEや付随する深部低周波微動の特徴が、天然の蛇紋岩のなす構造や変形挙

動と整合的であるか否か、(3)2種類の蛇紋岩に想定される吸水反応速度の違い(蛇紋岩化率の違い)が現在のSSE分布に対応する形で観測できるか、(4)沈み込み帯の温度構造の発達に応じたゆっくり滑り挙動の変化が読み取れるか、といった点が重要である。

本研究では、プレート境界のすべり挙動への岩石学的視点から持ち上がったこれらの新たな問題に対して、適切なアプローチを模索し、マントルウェッジの蛇紋岩化とその前弧のひずみ解消システムにおける役割(テクトニックな表出)について定量的な情報を得ることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、5つの個別の課題を設定して研究に取り組んだ。その方法について記す。

(1)アンチゴライト蛇紋岩の岩石学と構造地質学：沈み込み型変成帯である三波川帯に産する2種のアンチゴライト蛇紋岩(東赤石岩体と白髪山岩体)において、剪断構造の発達と鉱物共生に焦点を当ててフィールド調査と微細構造の観察を行ない、アンチゴライトとブルース石の産状の実態を記載した。

(2)アンチゴライト蛇紋岩の層構造解析：深部低周波微動の震源構造と対比するため蛇紋岩層構造のサイズ分布のメートルスケール(フィールドでの観察)からマイクロスケール(顕微ラマン分光法)の解析を行なった。全岩化学組成(XRF)、鉱物化学組成(EPMA)の分析から解放系での反応を制約した。

(3)深部低周波微動の地震学的解析：東海-四国地域のHi-net観測点(防災科学技術研究所)において記録された微動の解析を行なった。地震モーメント、サイズ-継続時間相関を求め、解放エネルギーと歪みを定量化し、特徴的なスケール長の空間分布を描いた。

(4)重力異常による密度構造不均質：既存の重力異常データに加えて補間的な測定を行ない、四国下のプレート境界の傾斜方向を含む解析測線において、最新の地震学的データ(Katsumata *et al.*, 2010; Shiomi *et al.*, 2008)に基づきリソスフェア密度構造モデルを精密化した上で蛇紋岩の影響を検討した。

(5)四万十川発達史の地形年代学：四国西部のSSE域の西方を流域とする四万十川のテクトニクス応答を地形学的に定量化するために宇宙線生成核種(Si由来の¹⁰Be)を用いた河成段丘の離水年代測定に取り組んだ。河床堆積物断面において石英含有試料を採取し、東京大学工学系のタンデム加速器研究施設において質量分析を行なった。またGISソフトを用いてDEMデータから対象流域の地形指標を算出し、地形発達とテクトニクスの関係を考察した。

4. 研究成果

(1) 2種類のアンチゴライト蛇紋岩

深部で鍵を握ると考えられるアンチゴライト蛇紋岩について三波川帯の例を取扱い、鉱物共生と構造の関係について解析を行なった。研究当初にあったアイデアを四国東赤石岩体と白髪山岩体の観察結果から補強して、四国西部の短期的および長期的 SSE の分布と2種類のアンチゴライト蛇紋岩の推定分布域の相関を示して、ゆっくり滑りに関する岩石学的モデルを提示した。

蛇紋岩化反応を大きく左右する流体中の SiO_2 活動度について天然の反応物の産状を詳しく記載した。ブルース石が残存する低 SiO_2 のケース（白髪山岩体）と高温高压でアンチゴライトの代わりに斜方輝石を生ずるケース（西五良津岩体）については論文として公表した。流体中の SiO_2 とかんらん石が反応してアンチゴライトを生ずるケースは層構造の解析と合わせて研究を進めた。その結果は次項で示す。

(2) アンチゴライト蛇紋岩の層状構造の発達

東赤石岩体におけるアンチゴライトを含む蛇紋岩中の構造発達を化学反応解析と構造地質学の観点で追求し、構造発達の素過程について明らかにした。まず、2段階の蛇紋岩化を経ていることが組織と化学組成変化から示された。2つの蛇紋岩化ステージにおける反応の進行は異なっており、それぞれ全岩化学組成から見ると閉鎖系と開放系に近い。それぞれ指数関数的なサイズ分布を示しているが、スケール関係は両者で異なっている。構造のサイズと空間分布は、前者は核形成によって、後者は反応と物質移動によって支配されると考えられる。

多くの研究者によって提案されているように深部低周波微動が高間隙水圧を有するクラックに起因するとすれば、その推定域に分布が予想されるアンチゴライト蛇紋岩中の層構造に指数関数的なサイズ分布が見出された点は興味深い。特に SiO_2 を含む流体の付加がある開放系における蛇紋岩化はメートルスケールの層状構造を発達させており、微動源のスケールまで連続的する可能性がある。今後は層構造に平行な高流体圧ドメインの解析方法を検討して、深部低周波微動の本質に迫っていく研究が求められる。

(3) 深部低周波微動の解析

西南日本の深部低周波微動の振幅・活動期間および開放エネルギーのスケール関係の地域的な変化を見た。その結果、温度構造に応じた微動源の構造変化があることが明らかとなった。アンチゴライト+かんらん石蛇紋岩の推定分布域に、スケール長が大きく、解放エネルギーが小さな構造が推定される観測結果は、このタイプの蛇紋岩に高い間隙水圧を推定する上記の岩石学的モデルと

整合的である。ゆっくり滑りの物質科学を進める上で重要な結果である。

並行して微動のエネルギーを歪み解消量に変換する解析を進めてきた。微動のエネルギーから算出されるゆっくり滑りに伴う歪み解消量にも東西変化が検出されているが、データの解釈は現在検討中である。

(4) 四国下マンツルの蛇紋岩化度

本研究で更新した重力異常データセットを用いて推定したマンツルの蛇紋岩化率は厚さ 5km としたとき最大 20-40%であった。本研究も含めて、四国下のマンツルでは S 波分裂などの地震学的な観測で蛇紋岩層が検出されていない。九州や紀伊半島西部に比べて蛇紋岩化度が低いという実態が重力異常のデータからも示された。また今回得られた蛇紋岩化率は、本研究で解析した天然のアンチゴライト+かんらん石蛇紋岩の蛇紋岩化率と同程度であった。

長期的 SSE 領域に近い四国西部で相対的に高いという結果となった。この点は、西部が低温条件をより長期に渡って経験しており、蛇紋岩化しやすいアンチゴライト+ブルース石条件に近いという、熱モデリングからの推定と整合的である。

(5) 四万十川の地形年代学的解析

本研究では蛇行核に着目して調査を行ない、四万十川の中流から上流の幅広い地域で旧河床堆積物の記載と試料採取に成功した。そのうち三か所について ^{10}Be の質量分析を行なって、日本の河川で初めての宇宙線生成核種による離水年代を得た。これまで同時期面と認識されてきた中位段丘に 6万~15万年の年代幅があり、流域内で下刻速度の変化が検出できた。DEM の解析から最も高い下刻速度を示した中流域の河川地形に河口に類似する特徴が見出された。河川縦断形においても中流域の平衡からのずれが顕著であり、テクトニックな変化が記録されていると考えられる。

今回の成功は地形年代学の第四紀テクトニクスへの応用という観点からみて大きな一歩と言える。地形解析から四国西部にも旧河口と推定される領域が見つかり、さらなる年代データを加えた総合的な解析が期待される。

<引用文献>

Obara, K. (2011) Characteristics and interactions between non-volcanic tremor and related slow earthquakes in the Nankai subduction zone, southwest Japan. *J. Geodyn.*, **52**, 229-248.

Hirose, H. and Obara, K. (2006) Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region,

southwest Japan. *Earth Planets Space*, **57**, 961-972.

Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yurai, H. and Nishimura, T. (2002) Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan. *Science*, **298**, 1009-1012.

Shelly, D. R., Beroza, G. C., Ide, S. and Nakamura, S. (2006) Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip. *Nature*, **442**, 188-191.

Peacock, S. M. (2009) Thermal and metamorphic environment of subduction zone episodic tremor and slip. *J. Geophys. Res.*, **114**, B00A07, doi10.1029/2008JB005978

Katsumata, A. (2010) Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by travelttime analysis *J. Geophys. Res.*, **115**, B04303

Shiomi, K., Matsubara, M., Ito, Y. and Obara, K. (2008) Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, **173**, 1018-1029.

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6件)

Kawahara, H., Endo, S., Wallis, S. R., Nagaya T., Mori, H., and Asahara, Y. (2016) Brucite as an important phase of the shallow mantle wedge: Evidence from the Shiraga unit of the Sanbagawa subduction zone, SW Japan. *Lithos*, **254-255**, 53-66. (査読有)

Endo, S., Mizukami, T., Wallis, S. R., Tamura, A. and Arai, S. (2015) Orthopyroxene-rich rocks from the Sanbagawa belt (SW Japan): Fluid-rock interaction in the forearc slab-mantle wedge interface. *Journal of Petrology*, **56**, 1113-1137. (査読有)

Mizukami, T., Yokoyama, H., Hiramatsu, Y., Arai, S., Kawahara, H., Nagaya, T. and Wallis, S. R. (2014) Two types of antigorite serpentinite controlling heterogeneous slow-slip behaviours of slab-mantle interface. *Earth and Planetary Science Letters*,

401, 148-158. (査読有)

Nagaya, T., Wallis, S. R., Kobayashi, H., Michibayashi, K., Mizukami, T., Seto, Y., Miyake, A. and Matsumoto, M. (2014) Dehydration breakdown of antigorite and the formation of B-type olivine CPO. *Earth and Planetary Science Letters*, **387**, 67-76. (査読有)

Terada, T., Hiramatsu, Y. and Mizukami, T. (2013) Shear wave anisotropy beneath the volcanic front in South Kyushu area, Japan: Development of C-type olivine CPO under H₂O-rich conditions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 4253-4264. (査読有)

Ishida, R., Hiramatsu, T., Matsuzawa, T. and Obara, K. (2013) Average slip rate at the transition zone on the plate interface beneath the Kii Peninsula, Japan, estimated from deep low-frequency tremors. *Earth Planets Space*, **65**, 1047-1051. (査読有)

[学会発表](計17件)

岩城 祐次、澤田 明宏、平松 良浩、水上知行(2016) 重力異常解析から推定した西南日本下の地下密度構造とマントルウェッジの蛇紋岩化率 日本惑星地球科学連合 2016 年会. 幕張メッセ(千葉県) 2016年5月22-26日

ウォリス サイモン、水上知行、遠藤 俊祐、永冶 方敬、青矢 睦月、河原 弘和 (2015) 蛇紋岩化したウェッジマントルにおける固体流動と流体浸透 日本地質学会 2015 年会. 信州大長野キャンパス (長野県). 2015年9月11-13日

新井 翔、水上知行、永冶 方敬、ウォリス サイモン、森下 知晃、曾田 祐介 (2015) 含水条件でのクロムスピネルの組成改変とクラック形成 日本地質学会 2015 年会. 信州大長野キャンパス (長野県). 2015年9月11-13日

小林 仁弥、水上知行、曾田 祐介、草野 有紀、荒井 章司 (2015) 2種類のアンチゴライトが作る層構造と生成メカニズム 日本地質学会 2015 年会(信州大長野キャンパス). 2015年9月11-13日

曾田 祐介、横山 寛紀、水上知行、森下 知晃 (2015) アンチゴライト化過程における酸化還元状態の変化 日本地質学会 2015 年会. 信州大長野キャンパス (長野県). 2015年9月11-13日

Horino, K., Hiramatsu, Y., Mizukami, T., Obara, K. and Matsuzawa, T. (2014) Scaled energy of deep low-frequency

tremor in southwest Japan. 2014 AGU Fall Meeting. San Francisco (USA) 2014年12月15-19日

遠藤 徳孝、松四 雄騎、水上 知行、松崎浩之(2014) 宇宙線生成核種を用いた四万十川流域での旧河床離水年代測定の試み、日本地質学連合 2014 年秋季大会. 奈良大学(奈良県). 2014年10月11-12日

水上 知行、林 竜太郎、石神 慎太郎、大柳 良介、岡本 敦、福土 圭介、奥野 正幸、荒井 章司(2014) 蛇紋岩から流体の化学的性質を読み取る岩石学的試み、日本地球化学会 2014 年会. 富山大(富山県). 2014年9月16日

水上 知行、横山 寛紀、平松 良浩、荒井章司、河原 弘和、永治 方敬、ウォリス サイモン(2014) スラブ-マントル境界の不均質なスロースリップ挙動を支配する2種類のアンチゴライト蛇紋岩、日本地質学 2014 年会. 鹿児島大(鹿児島県). 2014年9月13日

Horino, K., Hiramatsu, Y., Mizukami, T., Obara, K. and Matsuzawa, T.(2014) Spatial variation in scale length of deep low-frequency tremor inferred from duration-amplitude scaling in western Shikoku. 日本惑星地球科学連合 2014 年会. パシフィコ横浜(横浜). 2014年4月28日

Mizukami, T., Soda, Y., Yokoyama, H. and Hiramatsu, Y.(2014) Serpentinite structure above subduction surface: Analysis of a natural example in Sanbagawa metamorphic belt. 日本惑星地球科学連合 2014 年会. パシフィコ横浜(横浜). 2014年4月28日

堀野 一樹、平松 良浩、小原 一成、松澤孝紀(2013) 西南日本における深部低周波微動のスケーリング関係、日本地震学会秋季大会 2013年10月3日

水上 知行、平松 良浩(2013) 日本の沈み込み帯におけるゆっくり滑りとマントルウェッジ蛇紋岩の深さ分布、日本地質学 2013 年会. 東北大(宮城県). 2013年9月15日

曾田 祐介、横山 寛紀、水上 知行(2013) シリカ付加によるアンチゴライト蛇紋岩化過程、日本地質学 2013 年会. 東北大(宮城県). 2013年9月15日

横山 寛紀、水上 知行、曾田 祐介(2013) 三波川帯東赤石超マフィック岩体のアンチゴライト蛇紋岩化の反応と構造形成、日本惑星地球科学連合 2013 年会. 幕張メッセ(千葉県). 2013年5月24日

平松 良浩、澤田 明宏、水上 知行、浦野駿、堀野 一樹(2013) 四国西部地域の重力異常と密度構造、日本惑星地球科学連合 2013 年会. 幕張メッセ(千葉県). 2013年5月21日

水上 知行、岡崎 友、荒井 章司、針金 由美子、道林 克禎、榎並 正樹、Simon Wallis(2012) スラブ物質とマントル物質の物理化学相互作用の痕跡:三波川帯泥質片岩へ多角的なアプローチ. 日本地質学 2012 年会. 大阪府大(大阪府). 2012年9月15日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水上 知行 (MIZUKAMI, Tomoyuki)
金沢大学・自然システム学系・助教
研究者番号: 80396811

(2) 研究分担者

平松 良浩 (HIRAMATSU, Yoshihiro)
金沢大学・自然システム学系・教授
研究者番号: 80283092

遠藤 徳孝 (ENDO, Noritaka)
金沢大学・自然システム学系・助教
研究者番号: 60314358

ウォリス サイモン (WALLIS R. Simon)
名古屋大学・環境学研究所・教授
研究者番号: 30263065

(3) 連携研究者

松四 雄騎 (MATSUSHI, Yuki)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 90506438

荒井 章司 (ARAI, Shoji)

金沢大学・自然システム学系・教授
研究者番号： 20107684