

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

沈み込み帯のマグマ発生と地殻変動のダイナミクス

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

イ. 上部マントルとマグマの発生場

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ア. 列島及び周辺域のプレート運動, 広域応力場

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

沈み込むプレートは、一般に著しい熱的及び物質的な不均質を地球内部に持ち込み、その結果として地震や火山活動を引き起こす。これらの活動は、地質学的時間スケールにおける、広域変成作用、造山運動、大陸地殻の消長、地球内部の熱・物質の大循環など、地球の変動現象及び進化と密接に関わる。本研究は、これら一連の現象の起こる場として沈み込み帯を捉え、プレートの沈み込みと諸現象をつなぐ具体的メカニズムを明らかにすることを目的とする。そのために、以下の理論的、観測的、実験的な基礎研究を行う。(1) 地殻変動を、測地データ、反射法地震探査データ、地質構造、地表変形データなどから多角的に捉え、変位の食い違い理論に基づく数値シミュレーションによるモデル化やインバージョン解析を通して、ひずみ・応力状態及びテクトニクスとの関連性の推定を行う、(2) 火成活動の実体を、日本列島に分布する岩石と熱水の調査、サンプリング、文献調査、分析によって物質科学的に捉え、沈み込み帯の温度場、流れ場、物質輸送のカップリング数値モデルと比較対照することによって、火成作用のメカニズムを明らかにする、(3) 含水マントル及び地殻物質の高温高圧変形実験を行い、 H_2O 流体が沈み込むスラブやウェッジマントルの地震学的特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、スラブ起源流体の発生・浸透過程を制約する、(4) (1) から (3) を合わせて、沈み込み帯の温度構造、流動・変形、物質循環に関する統合モデルを構築する。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、おおむね上記計画の準備(数値モデルのデザイン、野外調査・サンプリング、実験装置の開発・テスト)を行う。以下の計画を実施予定である

地殻変動：地表変形データ及び既存反射法地震探査データの再解析によって、東北日本における鮮新世以降の島弧リソスフェアの変形領域と、中新世におけるリソスフェア伸張領域とが、どの様に対

応するかを検討する。弾性 - 粘弾性多層構造媒質中のモーメントテンソルによるひずみ場及び応力場の導出を解析的に行い、その結果を利用してプレートの沈み込みによりどのような応力場が島弧内に形成されるのか数値シミュレーションにより明らかにすると共に、インバージョン解析の理論的研究も進める。

火成活動：東北日本の新生代火山の調査、岩石試料採取、西南日本の中生代 - 新生代火成活動の調査、岩石及び熱水試料採取と化学分析、年代決定を行う。沈み込み帯の温度場、流れ場、物質輸送のカップリング数値モデルの構築に向けて、素過程を理論的に洗い出す。

変形実験：1GPa までの圧力で含水マントルを構成する蛇紋岩の脱水変形実験を行ない、スラブ内地震のメカニズムを調べる。東京大学に新たに開発した固体圧式変形試験機によって、更に広い圧力領域 (2GPa、地下 60 km 相当) で実験ができるようにするため、各種キャリブレーションテストを行う。

平成 22 年度以降においては、以下の研究を実施予定である (平成 21 年 8 月に、研究者の移動があり、これに伴って平成 22 年度以降の計画に変更が予定されているため、『平成 22 年度以降』として一括記載する)

地殻変動：地表変形データ及び既存反射法地震探査データの再解析によって、東北日本における鮮新世以降の上部地殻の短縮量と、中新世における上部地殻の伸張量とを推定することを試みる。また、これらの結果と、島弧の広域的な隆起・沈降データ及びシミュレーション・インバージョン解析とを比較し、島弧リソスフェアの変形仮定を考察する。

火成活動：火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づき、日本列島全域をカバーする空間規模で、沈み込むプレート由来 (スラブ流体) の量と組成を、化学組成あるいは同位体システムティクス (特に、Pb, Nd, Sr の 5 同位体比) に基づいて制約し、テクトニックセッティングとスラブ流体の起源の関係性を明らかにする。流体量の制約と、数値シミュレーションを合わせて、沈み込み帯のマグマ生成過程の定量的モデル化を行う。これらのマグマ生成場は、過去の東アジア一帯のテクトニクスとその歴史を強く反映する。中生代以降の火成・変成作用の時空分布・成因を、年代測定、化学・同位体分析によって解明し、対流の数値モデルと合わせることで、東アジアのテクトニクス発達史と、現在のセッティングの関係性を明らかにする。

変形実験：固体圧式変形試験機 (東京大学・理) によって、蛇紋岩の高温高压変形実験を 2GPa (地下 60km 相当) までの条件で行ない、沈み込むスラブにおける脱水反応・流体発生時の地震発生過程を明らかにする。また含水ウェッジマントルの脆性-延性転移挙動を明らかにし、スロー地震がカンラン岩の蛇紋岩化に起因するという説を検証する。

(7) 計画期間中 (平成 21 年度 ~ 25 年度) の成果の概要：

(1) 地殻変動：沈み込みに伴う山脈形成において、背弧域における地殻水平短縮が重要な役割を果たしていることが近年の研究によって明らかになってきた。本研究では先ず、反射法地震探査から得られる地下の地質構造から、東北日本弧の背弧域 (羽越褶曲帯 ~ 北部フォッサマグナ) における地殻変形過程を検討した。その結果、当該地域には中新世の日本海拡大時において非対称リフトが形成され、その構造が鮮新世 ~ 現在に至るこの地域の变形様式を強く支配していることが分かった。鮮新世以降の圧縮変形を引き戻す事によってこの非対称リフトの形状を復元した。その結果、この構造は羽越 - 北部フォッサマグナ堆積盆西縁から盆地下へ西傾斜で延びるリストリック断層とその深部延長に存在すると推定される水平な detachment 断層上での滑りによって生じたと解釈された (Okada and Ikeda, 2012)。屈折法地震探査のデータによれば東北日本背弧側では広範囲に下部地殻の薄化が起きているので、上記 detachment 断層を介して上部地殻と下部地殻とで全く異なる様式の変形が生じていると推定される。上記の成果に基づき東北日本弧の地殻水平短縮速度を求めた。この地域の鮮新世以降における地殻短縮量は 10 ~ 15 km であるから (Okada and Ikeda, 2012)、東北日本弧における短縮変動の始まりを 3.5 ~ 5 Ma (Sato, 1994; 守屋ほか, 2008) とすれば、背弧域での水平短縮速度は 2 ~ 4 mm/yr となる。前弧域の短縮速度をおよそ 1 mm/yr 程度とすれば、東北日本弧全体で水平短縮速度は 3 ~ 5 mm/yr と推定される。この結果は (1) 東北日本弧における非弾性ひずみの蓄積速度が、測地的に観測さ

れるひずみ速度に比べておよそ一桁小さく(2)したがって過去100年間以上にわたって東北日本弧に蓄積された大きなひずみの大部分が弾性ひずみであること、および(3)その弾性ひずみはプレート境界状で起こる巨大な decoupling event にともなって解消されるという従来の予想(池田, 1996, 2003 など)を裏付けた(池田, 2011; 池田・岡田, 2011; Ikeda, 2012; 池田・岡田・田力, 2012)。超巨大地震を伴う島弧の弾性ひずみ蓄積/解放過程について、東北日本弧と世界の他の沈み込み帯とを比較した(図1)。東北日本では幅広い固着領域の浅部のみが地震時に滑り、割れ残った深部固着域で余効滑りがおこるらしい(池田, 2011 ほか)。このような深部固着は、他の超巨大地震発生帯には存在しない可能性が高い。日本海溝に沈み込んでいるプレートの年齢は極めて古く従って低温であるから、このように深い固着域が存在するのは熱的な原因によると考えられる(池田ほか, 2012; Ikeda, 2012)。平成25年度には過去4年間の成果に基づき、日本の原子力関連施設の耐震安全性、とくに海溝型巨大地震ハザード評価に関わる問題を検討した。また、地震災害を含む自然災害一般と原子力災害との本質的な違いを検討した。さらに、理学としての地震学が自然災害の軽減に対してどのような貢献をすべきかを考えた(池田, 2014, 投稿中)。

島弧のひずみ・応力状態について、以下の定量的研究も推進した。地震波形のインバージョン解析や地震前後のメカニズム解の変化等から、東北沖地震では通常の地震と違って例外的にプレート境界面上に蓄えられたほとんど全てのひずみが解放されたと考えられるため(深畑他, 2012)、応力降下量の見積もりなどから絶対応力レベルの推定が可能である。但し、そのためには、まず滑り分布を正確に推定すること、およびより正確な滑り応答関数が必要である。より正確に地震時の滑り分布を推定するため、ここ数年ほど観測データに不可避的に存在する誤差の相関を取り入れたインバージョン解析手法を開発してきた(例えば, Yagi & Fukahata, 2011)。異種のデータを同時インバージョンする際に、その最適な重みを ABIC で客観的に決定する方法の定式化およびその実効性を示した研究(Funning et al., 2014)もインバージョン解析法の開発の一環である。また近年、Back Projection と呼ばれるインバージョンによらずに単に観測地震波形をスタックすることにより地震破壊過程をイメージする方法が流行しているが、それとインバージョン解析との理論的關係を明らかにすることに成功した(Fukahata et al., 2014)。その結果、Back Projection は地震波(P波)が 関数で近似できる場合には問題ないものの、通常の浅い地震の場合には、インバージョン解析と比べ明らかに解像度が落ちることを示した(図2)。応答関数については、履歴積分の考えを用いることにより、食い違い源に対する粘弾性層内のひずみ・応力を半解析的に求めることに成功した(Hashima et al., 2013)。粘弾性層内の応力は、弾性ではなく粘弾性の構成関係に従うため、従来導出が困難だったものである。また、平成25年度には、点食い違い源に対する多層弾性内部変形場の計算プログラムを新たに作成した(従来、内部変形については2層のみ)。開発した弾性および粘弾性の計算コードは、内陸部における変形や応力状態の議論に用いられている(例えば, Shikakura et al., 2014; Hamling et al., 2013)。

(2) 火成・熱水活動: 火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに加え、広域変成帯の岩石に記録された流体過程に基づき、沈み込むプレート由来(スラブ流体)の量と組成を日本列島全体のスケールで明らかにすることに成功し、そこからマンツルの温度構造を制約可能であることを示した(Nakamura and Iwamori, 2009; 2013; Kusuda et al., 2014, in revision)。さらに平成25年度には、地殻内部を流動し周囲の岩石と反応したと考えられる流体との比較を行った。その結果、西南日本の三波川変成帯の広い変成相領域において、地殻深部の条件下で流体と岩石が著しく反応し(特に、降温期における溶解-加水反応)、微量元素とともに、主成分元素も大きく運搬し、岩石変形自体にも大きな影響を及ぼしている可能性が示唆された(Uno et al., 2014)。これは下部地殻の変形やそれに伴う地殻変動・地震現象とも本質的に関連し、重要である。

(3) 変形実験: 沈み込むスラブの脱水反応とスラブ内地震の発生メカニズムの關係を調べるため、スラブマンツルに存在する可能性のあるアンチゴライト蛇紋岩の高温高压下で圧縮試験を行ない、低封圧での脱水脆性と高封圧での脱水軟化という挙動の変化を明らかにした。またガウジの摩擦実験では脱水反応が剪断面で促進されることが脱水硬化の一因となることを見いだした。5カ年計画の半ばで発生した2011年の東北沖M9巨大地震を受け、計画後半では沈み込みプレート境界断層の摩擦特性の

解明に重点をおき，レオロジーモデル構築や，沈み込み帯岩石の応力解析のための顕微ラマン分光手法の開発も行なった．地下深部で間隙圧が摩擦強度に与える影響を明らかにするために，含水マントル物質の摩擦実験をおこなった．平成 25 年度には，油圧式 3 軸変形試験機（東京大学地震研）によるアンチゴライト蛇紋岩のプレカット試料をもちいた摩擦実験をさらに発展させ，前年度まで常温下での実験にひきつづき，高温（300℃）高封圧（封圧 380 MPa）での実験を行ない，摩擦挙動が有効圧の法則からずれる傾向が明らかになってきた．またガス圧変形試験機によるトルクの応力ステップ実験（室温・封圧 110 MPa）の結果を解析し，石英ガウジなどで報告されているものとは大きく異なる挙動を見いだした．

（4）統合モデル：沈み込み帯スケールでの水循環のモデルに，レオロジー，溶融を組み込んだモデルの構築を進め，スラブ流体の発生と移動 - 固相との反応と流れ場変化 - 温度場変化を通してのスラブ流体の発生と移動へのフィードバックを整合的に解くことに成功した（Horiuchi and Iwamori, in prep）．前弧領域下における蛇紋岩化作用とその空間的広がり，及びその結果としての温度構造・溶融領域を実際の地殻熱流量分布・火山帯の位置と比較することにより，蛇紋石のレオロジーや広がりについて制約も得られた．また，平成 25 年度には，沈み込み帯スケールでの水循環のモデルに，微量元素や同位体輸送を組み込むことに成功し，地球物理学的な制約（地震波トモグラフィーや温度・流れ場構造）と，地球化学的な制約（火山岩，変成岩，熱水，鉱床などの組成）を具体的に結び付けることが可能となりつつある（図 4，Ikemoto and Iwamori, 2014, in revision）．

- （8）平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
池田安隆，2014，変動帯に立地する原子力関連施設の耐震安全性評価に関わる地質学的問題，日本地震学会モノグラフ 3．（投稿中；査読なし）
Fukahata, Y., Yagi, Y. and Rivera, L., 2014. Theoretical relationship between back-projection imaging and classical linear inverse solutions, submitted to *Geophys. J. Int.*, 196, 552-559, doi: 10.1093/gji/ggt392.（査読あり）
Shikakura, Y., Fukahata, Y. & Hirahara, K., 2014. Long-term changes in the Coulomb failure function on inland active faults in southwest Japan due to east-west compression and interplate earthquakes, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, doi:10.1002/2013JB010156.（査読あり）
Funning, G., Fukahata, Y., Yagi, Y. and Parsons, B., 2014. A method for the joint inversion of geodetic and seismic waveform data using ABIC: application to the 1997 Manyi, Tibet earthquake, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt406.（査読あり）
Hashima, A., Fukahata, Y., Hashimoto, C. & Matsuura, M., 2013. Quasi-static strain and stress fields due to a moment tensor in elastic-viscoelastic layered half-space, *Pure Appl. Geophys.* in press.（査読あり）
Hamling, I.J., Wright, T.J., Calais, E., Lewi, E. and Fukahata, Y., 2013. InSAR observations of post-rifting deformation around the Dabbahu rift segment, Afar, Ethiopia, *Geophys. J. Int.*, in press.（査読あり）
Noguchi N., Abduriyim A., Shimizu, I., Kamegata, N., Odake, S. and Kagi, H., 2013, Imaging of internal stress around a mineral inclusion in a sapphire crystal: Application of micro-Raman and photoluminescence spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy*, 44, 147-154, doi: 10.1002/jrs.4161.（査読あり）
清水 以知子・上原 真一（2013）沈み込み帯の破壊摩擦過程に対する間隙圧の影響．地殻流体 Newsletter, vol 11&12, p. 7.（査読なし）
Shimizu, I., Rheological profile across the NE Japan interplate megathrust in the source region of the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet and Science*, in revision.（査読あり）
Shimizu, I., Rheological structure of the NE Japan subduction zone megathrust across the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0), *Geofluid* 3, 2014.2.28-3.2, Tokyo Inst. Technology, Tokyo. (Invited)

Uehara, S., I. Shimizu, K. Okazaki and M. Nakatani, Effect of pore pore pressure on frictional properties of talc and serpentinite under high normal stress, Geofluid 3, 2014.2.28-3.2, Tokyo Inst. Technology, Tokyo.

Uno, M., H. Iwamori, H. Nakamura, T. Yokoyama, T. Ishikawa, M. Tanimizu, 2014, Elemental transport upon hydration of basic schists during regional metamorphism: Geochemical evidence from the Sanbagawa metamorphic belt, Japan, Geochem. J., 48, 29-49. (査読有)

Ikemoto, A., H. Iwamori, Numerical modeling of trace element transportation in subduction zones: implications for geofluid processes, Earth Planet Space, in revision. (査読有)

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

岩森光、及び研究員・学生 (東京工業大学)

他機関との共同研究の有無 : 有

池田安隆、清水以知子、及び研究員・学生 (東京大学大学院理学系研究科)

深畑幸俊 (京都大学防災研究所)

東京大学地震研究所、静岡大学、広島大学、産業技術総合研究所、JAMSTEC

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京工業大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

電話 : 03-5734-2339

e-mail :

URL : <http://www.geo.titech.ac.jp/index.php>

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 岩森光

所属 : 東京工業大学大学院理工学研究科

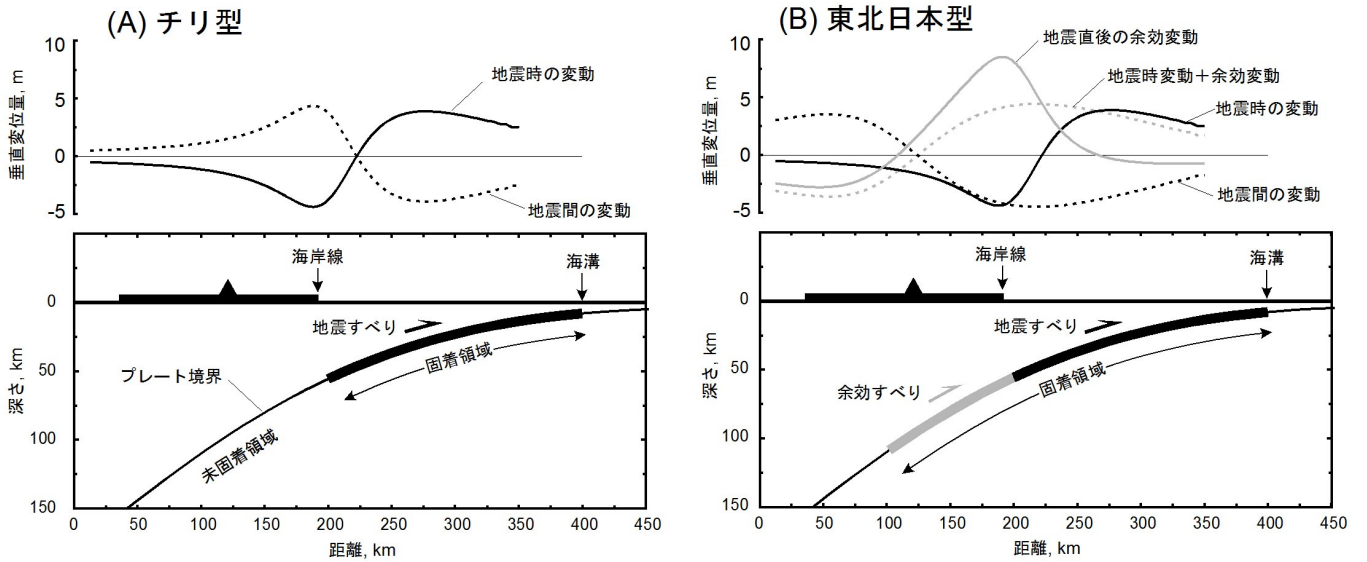


図 1

超巨大地震が発生する沈み込み帯には 2 つのタイプが存在する (池田ほか, 2012) (A) チリ型 . 1960 年チリ地震 (Mw 9.5) , 1964 年アラスカ地震 (Mw 9.2) , 1700 年カスカディア地震 (Mw 9.0) などがこのタイプに含まれる . 下図はプレート境界の形状 ; 上図は , 地震時 (実線) と地震間 (破線) における隆起・沈降パターン (B) 東北日本型 . 下図はプレート境界の形状 ; 上図は , 地震時 (黒実線) 地震直後 (灰色の実線) と地震間 (黒破線) における隆起・沈降パターン . 地震時の変動はプレート境界浅部 (下図の黒太線) の滑りで , 地震直後の余効変動はプレート境界深部 (下図の灰色太線) の滑りで生じる . 地震間の変動はプレート境界の浅部から深部まで固着することによる . A, B 両図とも弾性変形のみを示している事に注意 ; 地震サイクルの過程で生じる緩慢な造山運動 (= 非弾性変形) は , この図に表現されていない .

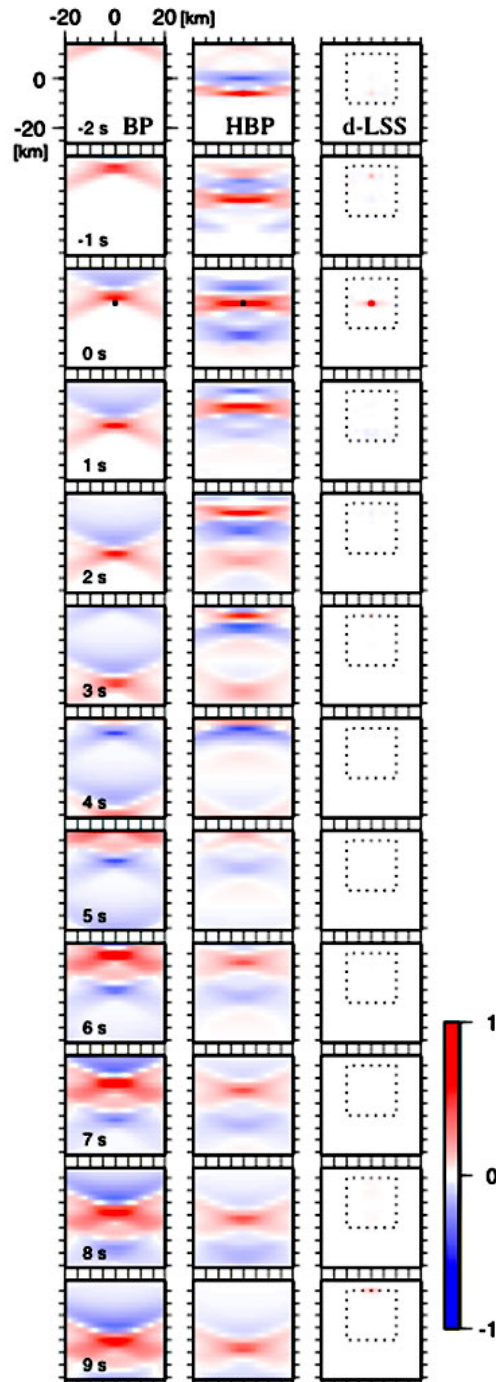


図 2

Back projection (BP), Hybrid back projection (HBP), およびダンプ付き最小二乗法 (d-LSS) による点震源のイメージ (Fukahata et al., 2014 より)。地震は時刻ゼロに原点 (深さ 15 km) において垂直な横ずれ断層上で発生したと仮定している (左および中コラムの黒点が仮定した点震源を表す)。観測点は、角距離 $30 \sim 90^\circ$ の範囲で全方位に 10 毎に一様に分布させている。観測波形に誤差は与えていないため、図のイメージがそのまま、インバージョン解析における model resolution matrix に対応する。誤差なしを反映して最小二乗法におけるダンプの値は極めて小さくとっている。ダンプを無限に大きくした場合に、ダンプ付き最小二乗法の解と HBP の解が一致する。図に示されているように、破壊過程の解像度は、 $d\text{-LSS} \gg \text{HBP} > \text{BP}$ となっている。但し、グリーン関数の精度が落ちる場合には、d-LSS と HBP においてより顕著な影響を受ける。

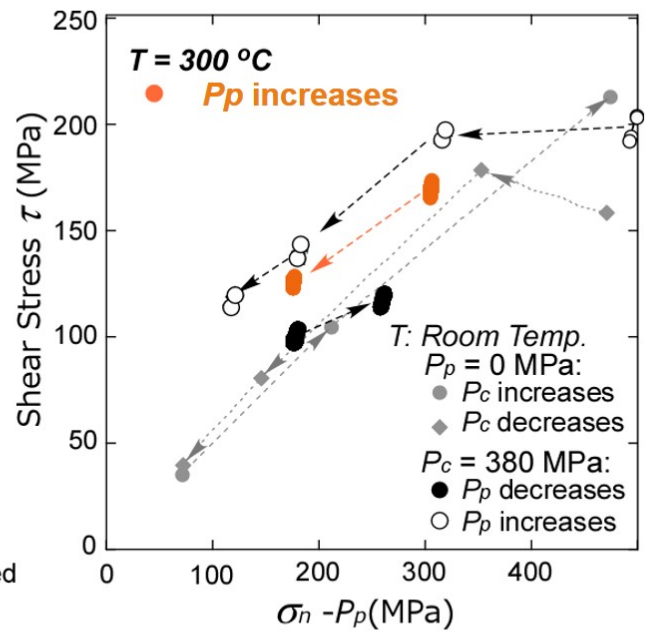
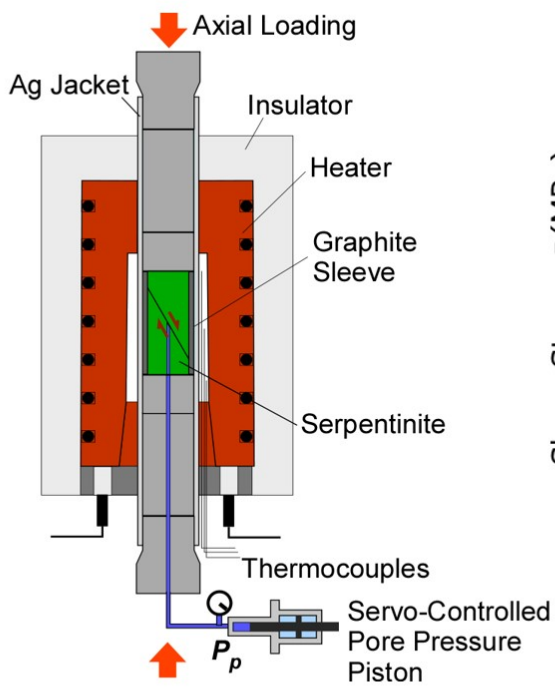


図 3

蛇紋岩の摩擦実験．左：高温高圧アセンブリ．右：応力および間隙圧ステップ試験における剪断応力履歴．

(a) Pb in solid

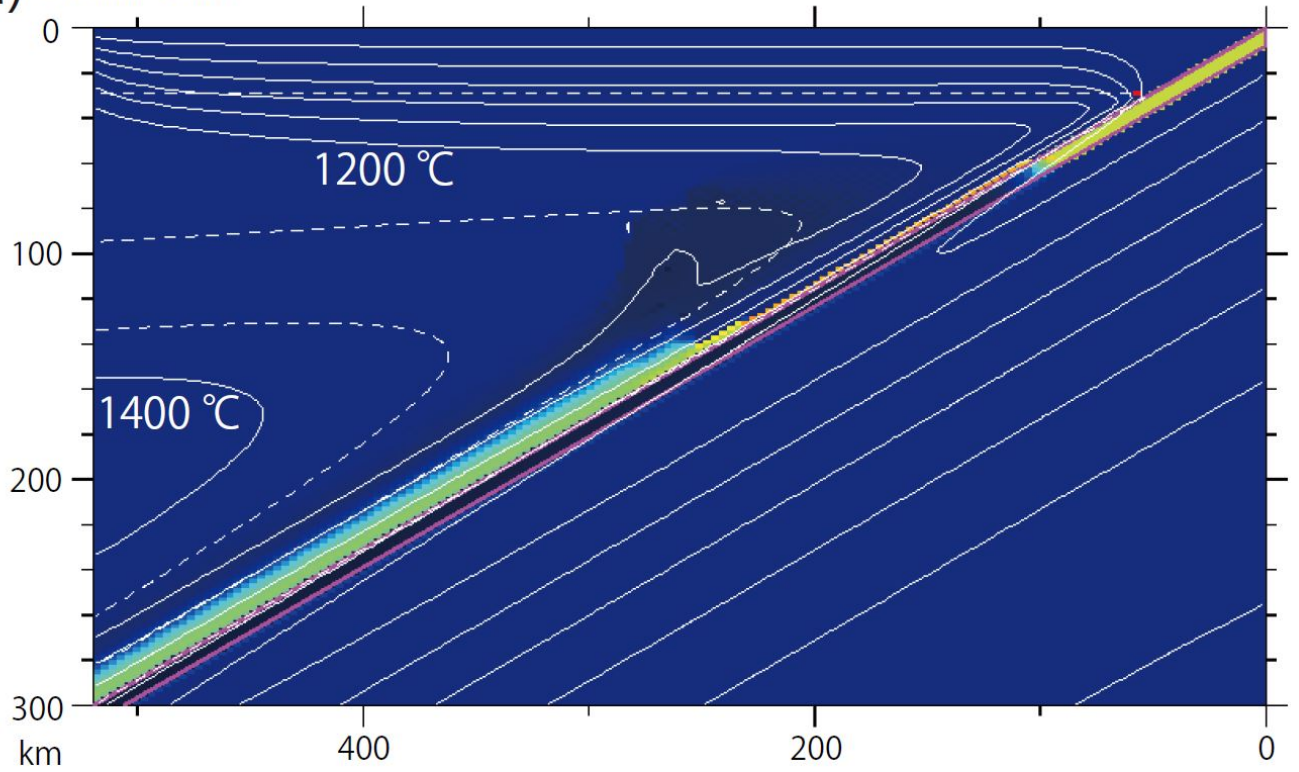


図4

沈み込み帯の水循環とそれに伴うPbの輸送モデル。沈み込むスラブの運動とマンテルウエッジの対流，対応する温度構造と脱水反応，水-岩石反応と溶融，およびそれらに伴う微量元素の分配が組み込まれた初めてのモデルである。Pbは「化学平衡モデル」では，沈み込んだほぼ全量が，マンテル深部に沈み込んでしまうことが分かった (Ikemoto and Iwamori, 2014, in revision)。