

(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) 平成 24 年度成果の概要：

(1) 地殻変動：超巨大地震を伴う島弧のひずみ蓄積 / 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)。東北日本弧においては、測地学的観測で検出された水平短縮ひずみ速度が地質学的に観測されるひずみ速度よりおよそ一桁大きい。同様の不一致は垂直変動速度に関しても存在する；太平洋岸で急速な沈降が観測される一方で、第四紀後期の旧汀線高度は緩慢な隆起を示す。これは現在急速に蓄積している地殻ひずみの大部分が弾性ひずみであり、プレート境界の固着部分が滑ることで解消されるということを示している。しかし、過去 100 年間に起こった Mw 7.8 級の海溝型地震はひずみ解放に寄与していない。したがって、プレート境界の固着面全体がすべる巨大ひずみ解放イベントが存在するはずであり、2011 年東北地方太平洋沖地震はこのような固着解放イベントであると考えられる。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起こるらしい。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)。

これら島弧の変形の直接的な原因は、沈み込みプレート境界にかかる圧縮応力であると考えられる。つまり、プレート境界の応力状態やその地震サイクルに伴う変化は、島弧の変形を考える上で基本的に重要なインプット・パラメータである。2011 年東北地方太平洋沖地震 (東北沖地震) は甚大な被害

を日本列島にもたらしたが、プレート境界のひずみ・応力状態を探る上で極めて貴重な機会をも提供している。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(深畑他, 2012)。従って、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り、海溝から震源付近まで約 10MPa という値が得られた(図 2)。プレート境界面上ではほぼ全てのひずみを解放するには摩擦力を極端に下げる何らかのメカニズムが必要であり、摩擦発熱による間隙流体圧の上昇(thermal pressurization)の効果について検討した(Mitsui et al., 2012a, b)。東北沖地震ではいくつもの滑りモデルが提出されているが、未だコンセンサスにはほど遠く、これもインプット・パラメータを定める上での障害となる。そこで、地震開始初期の 1 Hz GPS データ、震源 - 海溝間のメカニズム解分布という特徴のあるデータに的を絞って解析し、最初の大きなモーメント解放が地震発生約 20 秒後から気象庁震源の約 35 km 西で始まったこと(Fukahata et al., 2012; 図 3)、モーメント解放の立場でみればそのピークは海溝寄りではなく、むしろ震源付近であること(Chiba et al., 2012)をそれぞれ明らかにした。インバージョン解析における手法開発も、最近は共分散成分に注目しつつ、着実に進めている(Duputel et al., 2012; Noda et al., 2013)。

(2) 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、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した。特に中部地方に産出する火山岩について、流体量の制約と、数値シミュレーションを合わせて、太平洋プレートとフィリピン海プレートの二重のスラブ沈み込み帯でのマグマ生成過程の定量的モデル化に成功した(Nakamura and Iwamori, 2013)。その結果、中部地方の下では、ソースマントルが二重のスラブからもたらされた液相濃集元素に富むこと、かつ主にガーネット橄欖岩がソリダス近傍の低温で融解するために、アダカイトとよばれる高 Sr/Y 比を有する岩石を産出することが分かった(図 4)。従来、アダカイトはスラブ溶融を伴う高温沈み込み帯で産出するという説があったが、中部日本のような極めて低温の場において、むしろそのようなマグマが生成されることが分かった。一方、中国地方の白亜紀花崗岩のジルコン年代及び同位体分析結果に基づき、スラブ溶融を伴う火成活動の機構に制約を与えつつある。これらの研究結果は、沈み込み帯の物質循環の多様性を、沈み込むスラブ、ウエッジ対流、テクトニックセッティングに関わる基本パラメータの組合せで再現できることを意味しており、一般化に成功しつつあると言える。

(3) 変形実験：昨年度に引き続き、タルクと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行なった。タルクの実験はガス圧変形試験機(広島大学)によって、室温・封圧 110 MPa までの条件で封圧ステップ試験及び間隙圧ステップ試験を行なった。剪断応力は単純に有効圧の法則に従うのではなく、変形履歴やガウジの生成による摩擦面の変化が影響していることが示唆された。同様に蛇紋岩は油圧式 3 軸変形試験機(東京大学地震研)によって、室温・封圧 380 MPa までの条件で実験を行なったが、試験機の故障により本年度は十分なデータが得られなかった。2011 年の東北沖 M9 巨大地震の発生を受け、沈み込みプレート境界断層の強度をモデリングした(清水, 2012, JpGU)。震源となった宮城県沖においては蛇紋岩化の影響は小さく、断層強度は海洋地殻を構成する wet な石英岩の脆性・延性挙動に大きく左右されることが予想される。そこで研究対象を広げ、石英岩における速度弱メカニズムとしての非晶質化・ゲル化の素過程(Nakamura et al., 2012)や、動的再結晶粒徑を用いた沈み込み帯深部の応力計の開発(Shimizu, 2012)、顕微ラマン分光法を用いた結晶内部応力の検出法についての基礎研究(Noguchi et al., 2013)も行なった。

(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た結果、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, 2012)。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。これらの成果は、現在発表準備中である。

- (8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- Chiba, K., Iio, Y. and Fukahata, Y., 2012. Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake -Implication for the distribution of moment release-, *Earth Planets Space*, 64, 1157-1165. (査読あり)
- Duputel, Z., Rivera, L., Fukahata, Y. and Kanamori, H., 2012. Error estimations for seismic source inversions, *Geophys. J. Int.*, 190, 1243-1256. (査読あり)
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「経度問題」とのアナロジーから地震予知の将来について考える, 京大防災研年報, 55B, 149-153. (査読なし)
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「地震予知」に挑む, 地震学の今を問う, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 76-80. (査読なし)
- Fukahata, Y., Yagi, Y. and Miyazaki, S., 2012. Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data, *Earth Planets Space*, 64, 1093-1099. (査読あり)
- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太, 2012. 2011 年東北地方太平洋沖地震による絶対歪みの解放: 遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱体化, *地質学雑誌*, 118, (7), 396-409. (査読あり)
- Goldfinger, C., Y. Ikeda, R.S. Yeats, and J. Ren, 2013, Superquakes and supercycles, *Seism. Res. Lett.* 84, 24-32, doi: 10.1785/0220110135. (査読あり)
- Ikeda, Y., 2012, Long-term strain buildup in the northeast Japan arc-trench system and its implications for the gigantic subduction earthquake of March 11, 2011, In: *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, 238-253. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Text/201204246>. (査読あり)
- 池田安隆, 2012, 下北半島沖の大陸棚外縁断層: 地下に横たわる巨大な断層を原発安全審査はどうあつかったのか, *科学*, 82, 644-650. (査読なし)
- 池田安隆, 2012, 東北地方太平洋沖地震を地質学的時間スケールでみると何が見えるか? *milsil*, 5 (No. 5), 14-19, 国立科学博物館. (査読なし)
- 池田安隆・岡田真介・田力正好, 2012, 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪解放イベント, *地質学雑誌*, 118, 294-312. (査読あり)
- 岩森光, 固体地球の構造: 地殻-マントル-コア, *宇宙と地球の科学事典*, 朝倉書店, 230-231, 2012. (著書)
- 岩森光, 地殻熱流量と地球の熱源, *宇宙と地球の科学事典*, 朝倉書店, 246, 2012. (著書)
- Iwamori, H., and Nakamura, H., East-west mantle geochemical hemispheres constrained from Independent Component Analysis of basalt isotopic compositions. *Geochem. J.* 46, e39-e46, 2012. (査読有)
- 岩森光, 中村仁美, 沈み込み帯での地殻流体の発生と移動のダイナミクス. *地学雑誌*, 121, 118-127, 2012.(査読有)
- Iwamori, H., and Nakakuki, T., Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle. In: *Physics and Chemistry of the Deep Earth* (ed. S. Karato), in press.(査読有)
- Mitsui, Y., Kato, N., Fukahata, Y. and Hirahara, K., 2012. Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325-326, 21-26. (査読あり)
- Mitsui, Y., Iio, Y. and Fukahata, Y., 2012. A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, *Earth Planets Space*, 64, 1177-1187, 2012. (査読あり)
- Nakamura, H., and Iwamori, H., Generation of adakites in a cold subduction zone due to double subducting plates. *Contrib. Mineral. Petrol.*, DOI 10.1007/s00410-013-0850-0, 2013.(査読有)
- 中村仁美, 岩森光, 沈み込み帯の物質循環とスラブ流体, *宇宙と地球の科学事典*, 朝倉書店, 228-229, 2012. (著書)
- Nakamura Y., Muto J., Nagahama H., Shimizu I., Miura T., Arakawa, I., 2012, Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces, *Geophysical Research Letter*, 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228.

- Noda, A., Hashimoto, C., Fukahata, Y. and Matsu'ura, M., 2013. Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: Application to the Kanto region, central Japan, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggs129. (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. Published online at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4161/full>
- Okada, S., and Y. Ikeda, 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of North-east Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B01404, doi: 10.1029/2011JB008355. (査読あり)
- Shimizu, I., 2012, Steady-state grain size in dynamic recrystallization of minerals, In: "Recrystallization", edited by Krzysztof Sztwiertnia, InTech, ISBN 978-953-51-0122-2, pp. 371-386. Published online at <http://www.intechopen.com/articles/show/title/steady-state-grain-size-in-dynamic-recrystallization-of-minerals>
- Ueki, K., and H. Iwamori, Thermodynamic model for partial melting of peridotite by system energy minimization, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2012GC004143, 2013.(査読有)

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

(1) 地殻変動 : 前年度までの結果と、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過程を考察する。また、インバージョン解析の手法開発についても着実に進める。

(2) 火成活動 : 今年度までの結果を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。

(3) 変形実験 : 沈み込みプレート境界断層の断層強度を定量化するため、引き続き高圧変形実験を行う。油圧式 3 軸変形試験機 (東京大学地震研) の修理が完了したので、H24 年度に行う予定であった蛇紋岩のプレカット試料を用いた摩擦実験を高間隙圧下で行う。また高温下の変形・摩擦実験に着手する。

(4) 統合モデル : 前年度までに構築した数値モデルにより、流体圧 - 地震発生のシミュレーション、温度構造と火山の分布・組成の再現を行い、観測と比較することにより統合モデルの構築と検証を進める。

(10) 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

(11) 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>

(12) 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

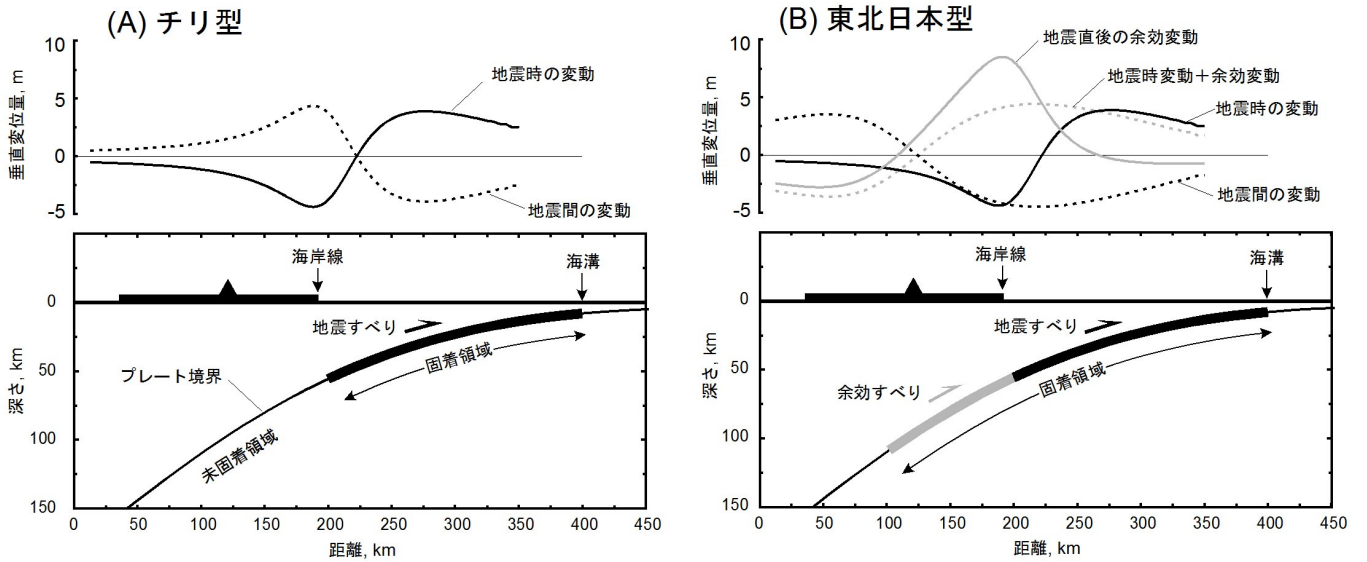


図 1

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) のすべりで , 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 .

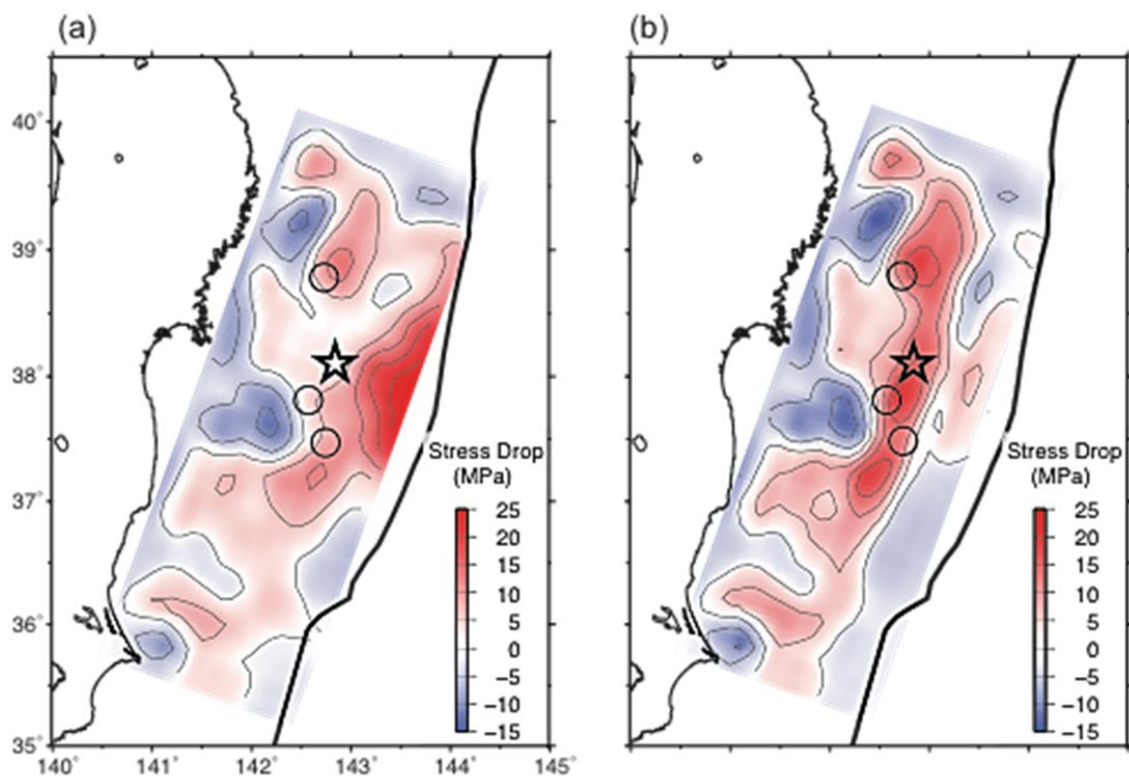


図 2

東北地方太平洋沖地震における応力降下量の見積もり（深畑他，2012）。計算手法上の制約から二つの見積もりを並記した。(a)は、インバージョン解析の結果得られた滑り分布を一様な半無限弾性体の仮定の下で応力変化に直した。(b)は得られた滑り分布をインバージョン解析の際に用いた弾性率変化に基づいてモーメント解放量に変換し、それを元に応力降下量を求めた。深部では(b)が正しく、震源から浅部では(a)と(b)の間でやや(b)に近いと考えられる。

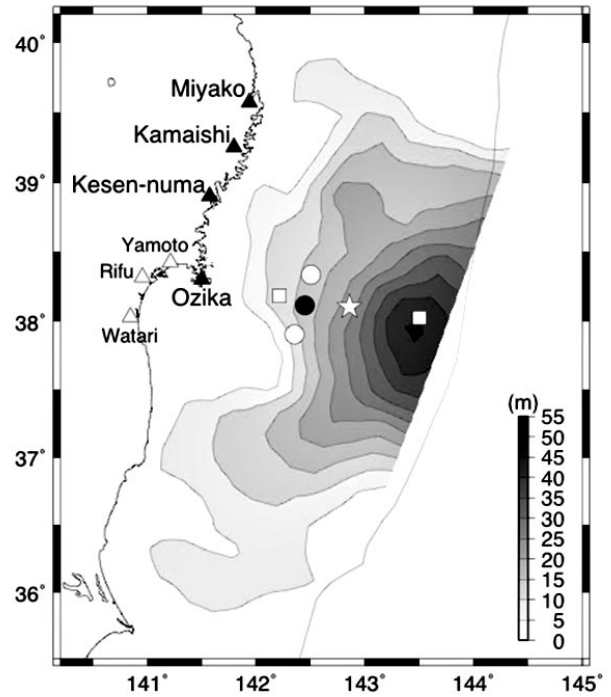
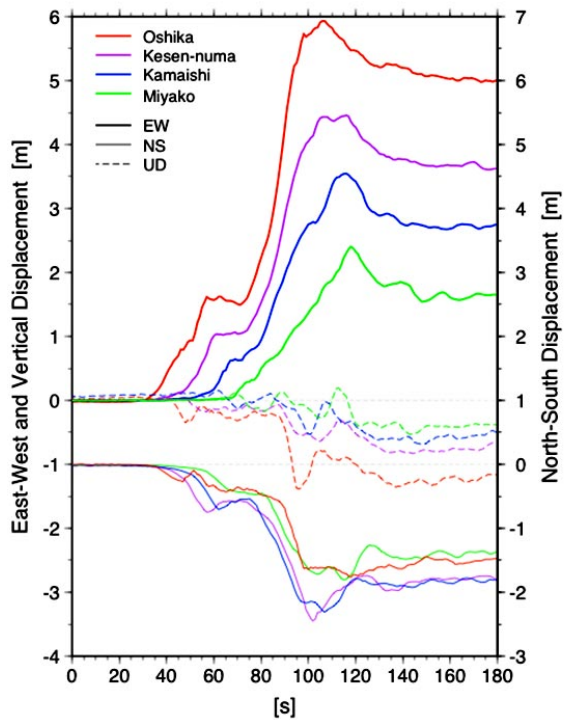
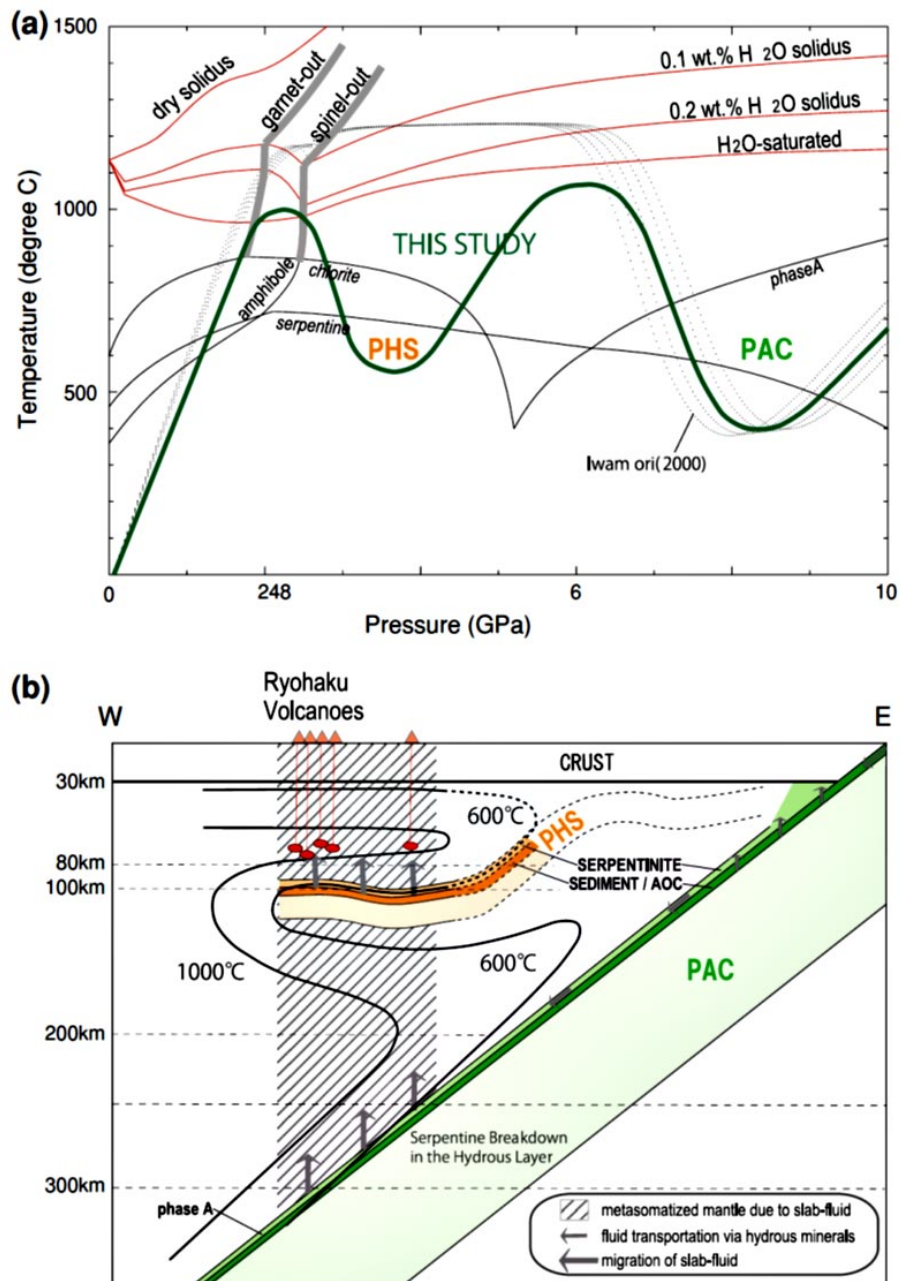


図 3

1Hz GPS データに基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の最初の大きなモーメント解放場所の推定 (Fukahata et al., 2012)。1Hz GPS データ (左図) の東西成分の立ち上がりは、牡鹿に比べ宮古・釜石では大きく遅れる。そのことから震源 (右図星印) よりも陸側に可能性が絞られる。さらに、牡鹿で東西成分が南北成分の数倍程度であること、上下成分の動き出しが遅れることから右図の黒丸付近に推定された。



4

(a) The geotherm estimated in this study (green bold line) together with solidus curves for dry to H₂O-saturated peridotite and the stability fields of spinel, garnet, amphibole, chlorite, serpentine and phase A, after Iwamori (2000). The two minima along the geotherm correspond to PHS and PAC as labeled. The dotted lines represent the thermal structure beneath Ryohaku Volcanoes estimated by numerical modeling of Iwamori (2000). (b) The two-dimensional thermal structure along the EW section of central Japan. Depths and thicknesses for the PAC and PHS slabs are based on the seismic studies (Hirose et al. 2008). The migration paths of the PAC- and PHS-fluids along the two subducting slabs, and subsequent hydrous melting in the studied area (red region) are shown. The small arrows indicate the fluid transportation via hydrous minerals along the subducting slabs, while the large gray arrows indicate migration of the 'slab-fluid' released from the subducting slab to the mantle wedge as a result of breakdown of serpentinite just above the slabs, based on Iwamori (2000) and Nakamura and Iwamori (2009). Note that the subduction direction of PAC is from east and that of PHS is nearly perpendicular to the section. After Nakamura and Iwamori (2013).