

( 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、一般に著しい熱的およ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、地球の変動現象およ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とらえ、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、歪・応力状態およ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 ) 含水マントルおよび地殻物質の高温高压変形実験を行い、H<sub>2</sub>O 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、概ね上記計画の準備(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：地表変形データおよ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歪み場およ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、岩石およ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、さらに広い圧力領域（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なう。

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：地表変形データおよ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・沈降データおよ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：火山岩および地下水・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により、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 23 年度成果の概要：

昨年度までの研究に基づき、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）における地殻水平短縮量を求めた；その結果この地域の鮮新世以降における地殻短縮量は 10～15 km であることがわかった（図 1；Okada and Ikeda, 2012, JGR in press）。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歪みの蓄積速度が、測地的に観測される歪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歪みの大部分が弾性歪みであること、および（ 3 ）その弾性歪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）。グリーン関数の誤差を明示的に取り入れた Yagi and Fukahata (2011a) の方法を用いて、遠地実体波データから 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源過程を推定した（図 2; Yagi and Fukahata, 2011b）。その結果、大きな滑り（50 m）、異常に長い滑り時間（90 s）、比較的大きな応力降下量（海溝付近で約 20 MPa、平均で 6 MPa）が推定された。異常に長い滑り時間は、摩擦強度の極端な低下を示唆するものであり、

比較的大きな応力降下はその示唆と調和的である。更に、正断層型余震の多発などから、2011年東北地方太平洋沖地震は、断層上にこれまでに蓄積された弾性歪みをおよそ全て解放する極めて例外的な地震だったと考えられる (Yagi and Fukahata, 2011b; 深畑他, 2011)。摩擦強度の極端な低下の原因としては、摩擦発熱による間隙流体圧の上昇 (thermal pressurization, TP) が有力な候補であり、東北沖における TP を取り入れた地震サイクルシミュレーション (Mitsui et al., 2012) や動的破壊モデルの構築 (Mitsui et al., 2011) を行った。また、東北地方太平洋沖地震の震源過程は、研究者間の差異が大きく、今後の研究の障害となる。そこで、1HzGPS (Fukahata et al., 2011) や地震のメカニズム解 (Chiba et al., 2011) のデータに注目した解析を行うことにより、最初の大きなモーメント解放は、地震開始約 20 秒後から気象庁の震源の約 35km 西で生じたこと、震源付近および海溝寄りでの顕著なモーメント解放は早くともそれぞれ 25 秒後、35 秒後であること、モーメント解放の総量は海溝近傍よりもむしろ震源寄りの領域で大きいことなどを明らかにした。なお、インバージョン解析における先験的拘束条件 (深畑, 2012) や誤差 (Duputel, et al., 2011) に関する考察、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粘弾性層も含む歪み場および応力場の解析的な導出 (Hashima et al., 2011)、山地の地形発達と流水浸食パラメタとの関係 (Shikakura et al., 2012) など理論的な研究も合わせて進めている。火成活動については、物質移動、特に、水の移動と化学反応が、沈み込み帯スケールの流れ場・温度場におよぼす影響を評価した。重要点は、流体が化学反応を通して岩石の実効粘性を低下させ、流れ場・温度場、更には流体自身の分布を変えろという非線形相互作用が存在する点である。沈み込むスラブから放出された流体はその直上 (マントルウェッジの底部) に厚さ数キロメートルの蛇紋岩層を形成し、スラブとウェッジの力学的カップリングを弱める。この効果を数値モデルを構築して再現した (Horiuchi and Iwamori, in prep.)。モデル計算の結果、沈み込む流体が蛇紋岩を形成 蛇紋岩が沈み込むスラブとマントルウェッジの力学的カップリングを弱める スラブ沿いの温度が低下し、さらに流体の沈み込みと蛇紋岩の形成が進むという正のフィードバックが起こり、「水和侵食」が起こることが分かった (図 3、Horiuchi and Iwamori, in prep.)。一方、蛇紋岩層も脱水分解し、最終的にはマントルウェッジ全体に流体が上昇する。この時の流体の上昇様式は、上昇速度、流体と周囲の岩石との化学反応効率、ひいては火山の分布・噴出量・組成に影響を及ぼす。流体の上昇様式を流体力学的なスケーリング、地震波速度構造とフォワードモデルの再現、および化学的スケーリング (クロマトグラフィ効果の評価) によって見積もったところ、マントルウェッジ内では水溶液とメルトが共存し、かつ浸透流とチャンネル流れも共存している可能性があることが分かった (岩森・中村, 2012; Iwamori and Nakakuki, in revision)。

蛇紋岩の脱水不安定性がスラブ内地震を誘発するのであれば、震源分布から沈み込み帯の温度条件や流体生成場について大きな制約条件を与えることが可能になる。そこで本年度は、ガス圧式変形試験機をもちいて蛇紋岩の脱水反応 (図 4) に伴う力学物性の変化を調べた。これまで高封圧 (800 MPa) でみられた脱水軟化現象 (Shimizu et al., 2011) とは異なり、封圧 200 MPa では脆性破壊が起こり、圧力によって反応の効果に変化が起きることが明らかになってきた。またガウジの摩擦実験では剪断面で反応が促進され、摩擦強度があがるという挙動が確認された (Takahashi et al., 2011)。蛇紋岩は沈み込みプレート境界のカップリングを弱めると考えられているので、その摩擦挙動も重要である。本年度は常温でタルクを模擬物質とした摩擦実験を行ない、間隙圧の効果調べた (Uehara et al., 2012)。

- (8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Chiba, K., Y. Iio and Y. Fukahata, 2011, Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ?Implication for the distribution of moment release?, submitted to EPS special issue.
  - Duputel, Z., L. Rivera, Y. Fukahata and H. Kanamori, 2011, Error estimations for seismic source inversions, submitted to Geophys. J. Int.
  - 深畑幸俊, 2012, ABIC を用いたインバージョン解析 : 先験的拘束条件がフルランクでない場合の取り扱い, 地震 2, 64, 91-95.

- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太，2011，2011年東北地方太平洋沖地震による絶対弾性歪みの解放：遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化，地質学雑誌，投稿中。
- Fukahata, Y., Y. Yagi and S. Miyazaki, 2011, Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data, submitted to EPS special issue.
- Hashima, A., Y. Fukahata, C. Hashimoto and M. Matsu'ura, 2011, Quasi-static strain and stress fields due to a moment tensor in elastic-viscoelastic layered half-space, submitted to Geophys. J. Int.
- 池田安隆，2011，東北日本島弧・海溝系における歪みの蓄積・解放過程と超巨大歪解放イベントの可能性，地震予知連絡会会報 86，687-697。
- 池田安隆・岡田真介，2011，島弧・海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大地震．科学，81，1071-1076。
- 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（投稿中）。
- 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, "One Year after 2011 Great East Japan Earthquake", Proceedings of International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, March 3-4, 2012, Tokyo (in press).
- Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata and K. Hirahara, 2012, Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, Earth Planet. Sci. Lett., in press.
- Mitsui, Y., Y. Iio and Y. Fukahata, 2011, A scenario for the generation process of the 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, submitted to EPS special issue.
- Okada S., and Ikeda Y., 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, Jour. Geophys. Res. (in press), doi:10.1029/2011JB008355.
- Iwamori, H., and Nakakuki, T., 2012, Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle, Physics and Chemistry of the Deep Earth (ed. S. Karato), in revision.
- 岩森光・中村仁美，2012，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，in press.
- Shikakura, Y., Y. Fukahata and M. Matsu'ura, 2012. Spatial relationship between topography and rock uplift patterns in asymmetric mountain ranges based on a stream erosion model, Geomorphology, 138, 162-170.
- Yagi, Y. and Fukahata, Y., 2011a. Introduction of uncertainty of Green's function into waveform inversion for seismic source processes, Geophys. J. Int., 186, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05043.x.
- Yagi, Y. and Fukahata, Y., 2011b. Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute 1 elastic strain release, Geophys. Res. Lett., 38, L19307, doi:10.1029/2011GL048701.
- Tatahashi, M., Uehara, S., Mizoguchi, K., Shimizu, I., Okazaki, K. and Masuda, K., 2011, On the transient response of serpentine (antigorite) gouge to stepwise changes in slip velocity under high-temperature conditions, J. Geophys. Res., 116, B10405, doi:10.1029/2010JB008062.
- Shimizu I., Watanabe Y., Michibayashi K., Takahashi, M. Uehara, S. and Katsuta, N., 2011, Dehydration softening of serpentinite and its roles in the intermediate-depth earthquakes. Abstract of First International Symposium on Geofluids, "Geofluid Processes in Subduction Zones and Mantle Dynamics", Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, March 17-19.
- Uehara, S., Shimizu I., and Okazaki K., 2012, Effects of pore pressure on fault mechanics at brittle-plastic transition zones. Abstract of Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluids-2Misasa, Japan, March 17-21.

( 9 ) 平成 24 年度実施計画の概要：

- (1) 地殻変動：地表変形および既存地震探査データの再解析により、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。また、モデル誤差を初めとしたデータ解析の理論的研究を進め、必要に応じて東北地方太平洋沖地震など実際の観測データに適用し、開発した理論の有効性を示す。(2) 火成活動：火山岩および地下水・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マティクス(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、文献調査、および補助的な年代測定、化学・同位体分析によって制約する。(3) 変形実験：蛇紋岩の高温高压変形実験を継続する。脱水変形実験では、異方性のない蛇紋岩試料をもちいた脱水実験を行ない、これまでの異方性の顕著な試料の結果と比較して変形メカニズムを探る。また蛇紋岩のプレカット試料をもちいた摩擦実験を行ない、高間隙圧下の蛇紋岩の強度を定量化する。実験には東京大学の有する固体圧変形試験機のほか、東大地震研の岩石破壊実験装置、東邦大学の油圧式変形試験機、産総研および広島大学のガス圧式変形試験機を使用するため、各研究機関の研究者と緊密に協力して行なう。実験試料を走査型電子顕微鏡(SEM)、顕微ラマン装置、透過型電子顕微鏡(TEM)などをもちいて解析する。(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る。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

岩森光、および研究員・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、および研究員・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

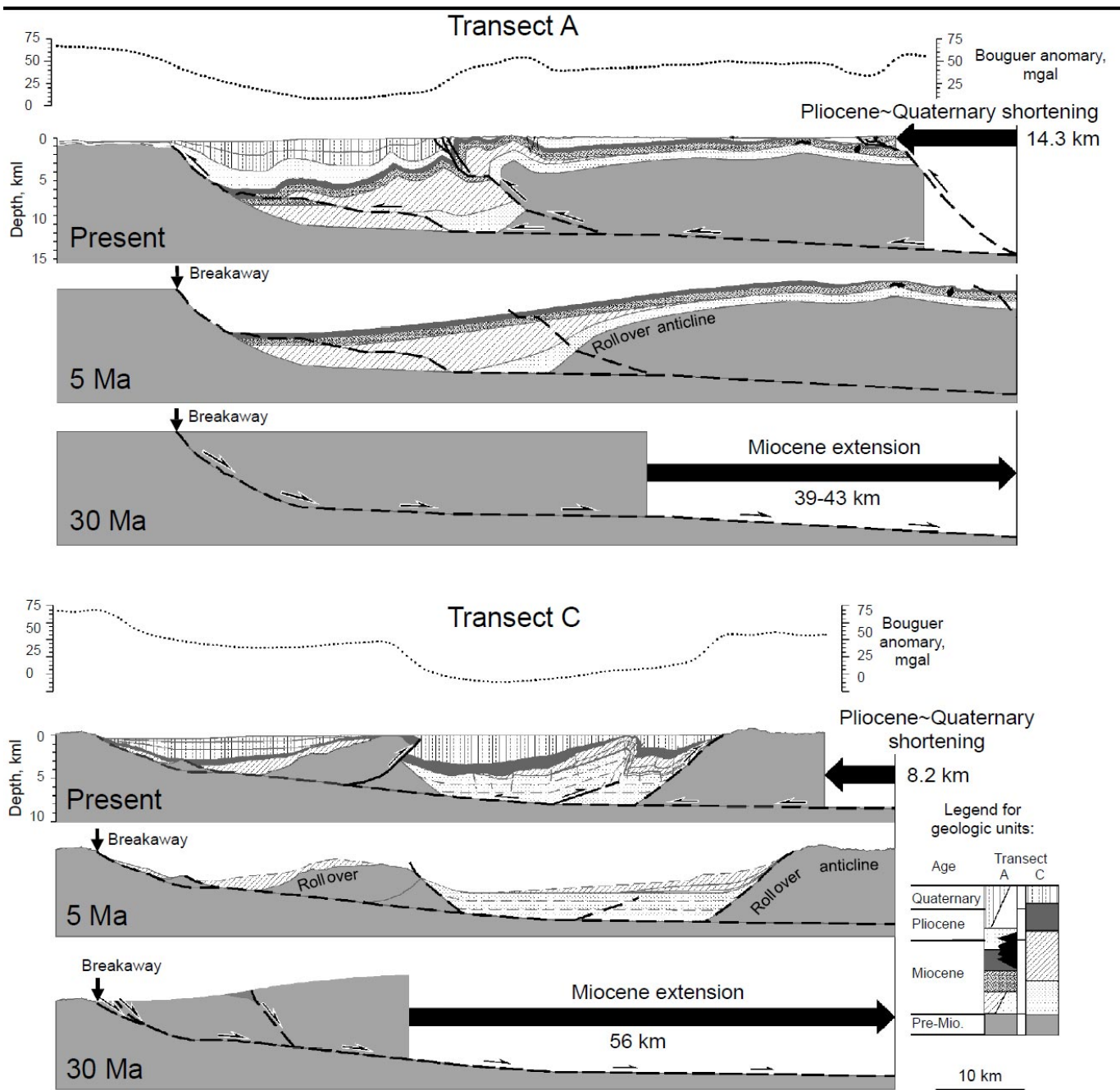


図 1

東北日本背弧側における強変形領域を横切る代表的な地質構造断面．A は本荘沖～横手を，B は佐渡～新津を通る断面．各図は上から，ブーグ異常，現在の地質構造，中新世中期の地質構造（鮮新世 現在までに起こった短縮変形を引き戻した状態），およびリフティング前の地質構造（さらに，中新世前期 中期に起こった引張変形を引き戻した状態）． Okada & Ikeda (2012) による．

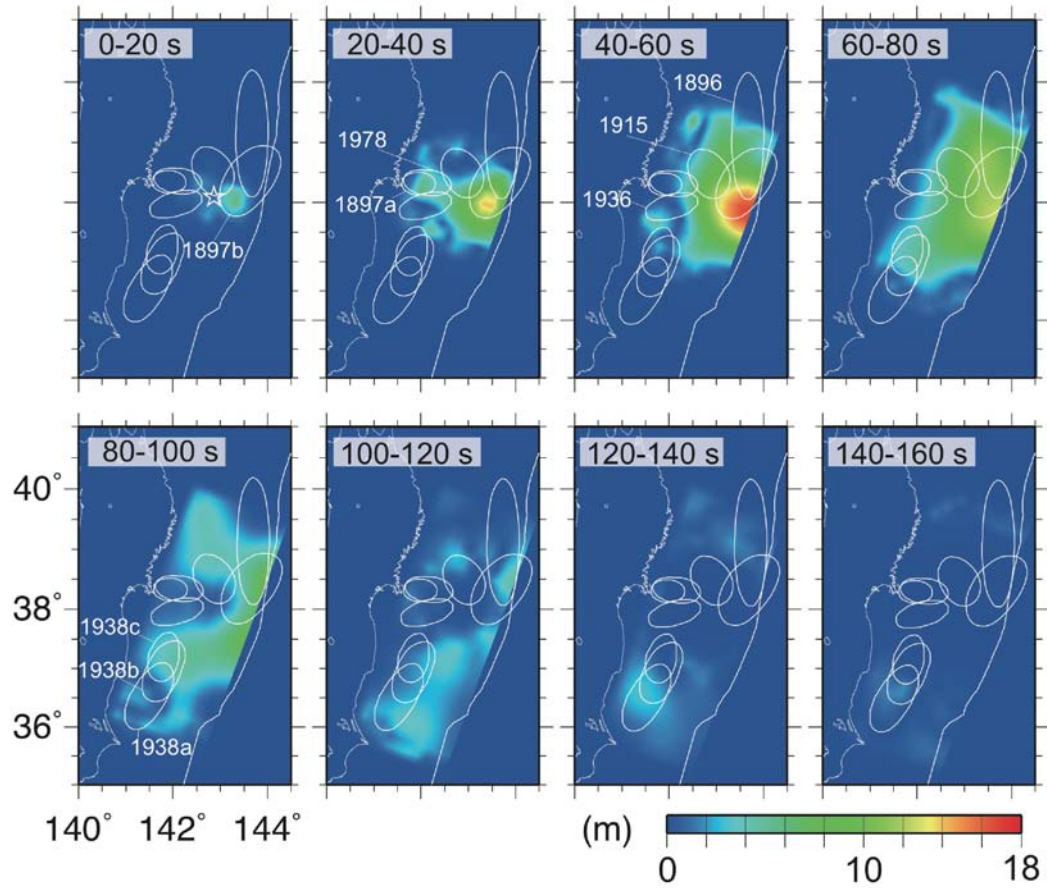


図 2

2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊の進展．各時間間隔毎のすべり量を表している．グリーン関数の誤差の誤差を明示的に取り入れる Yagi and Fukahata (2011a) の方法で遠地実体波をインバージョン解析した．Yagi and Fukahata (2011b) による．

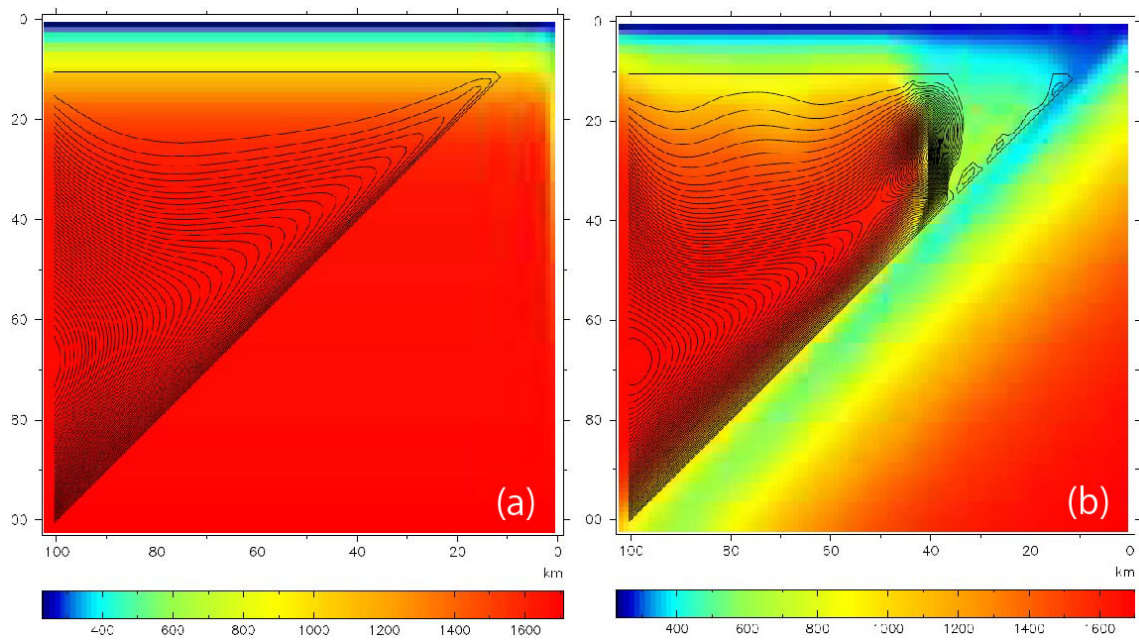


図 3

沈み込み帯の温度構造（色スケール [図下の絶対温度スケール] で表示）と流線構造（実線）。図 3a は初期温度と流線、右図はおよそ定常的な状態に達した場合に対応する。座標に付した空間スケールは 3 倍すると km に対応する。図 3b では、前弧の深さ 120km（メモリでは「40」）付近まで、蛇紋岩による力学的デカップリングが及び、低温度のコーナーウエッジ領域が形成されていることが分かる。

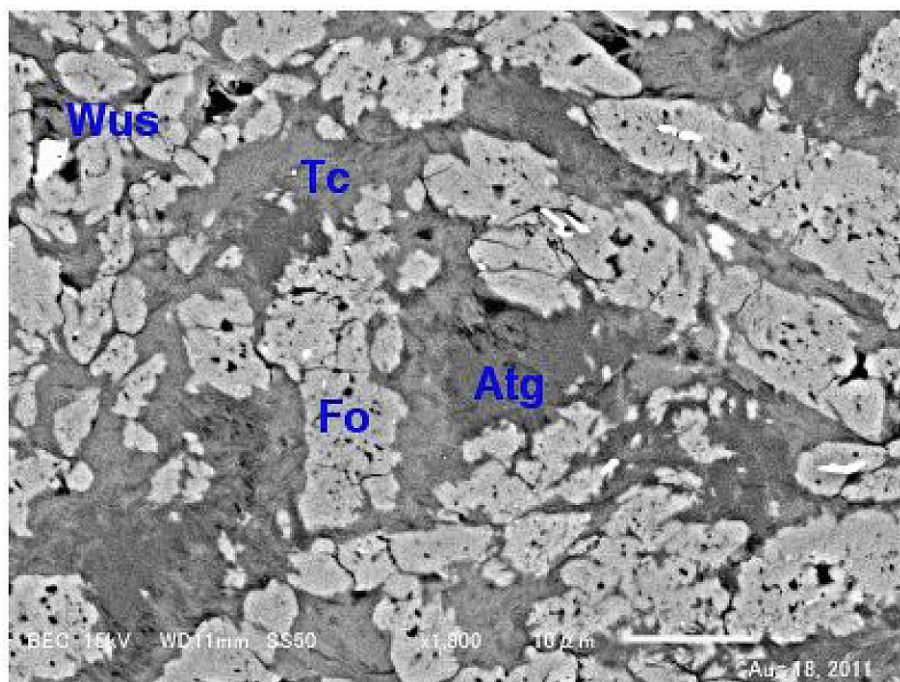


図 4

蛇紋岩の脱水反応組織．SEM の組成像．封圧 800 MPa、温度 700℃．高温型蛇紋石 (Atg) が脱水してオリビン (Fo) とタルク (Tc) が生じている．Wus は酸化鉄．