

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

宮城県沖プレート境界の多項目・高精度モニタリングによる大地震発生過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

(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

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア. アスペリティの実体

イ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

下記の 4 小課題を実施し、相互に連携させることにより、プレート境界のモニタリング手法を高度化させる。

1. 海底微小地震観測により、プレート間すべり・応力場の時空間変化の把握のための技術開発を行う、また海底地殻変動観測により、プレート間すべり分布の時空間分布の推定を行う。

2. GPS 連続観測データの日座標値解に含まれる季節変動成分や気圧応答、水蒸気分布の非一様性による電波伝搬遅延誤差といった誤差要因の除去法の高度化をすすめ、データに含まれるより小さなシグナルを検出可能にする。これにより、これまでノイズに埋もれていたプレート境界上の非地震性すべりを検出できるようにする。

3. 相似地震データ解析によって、プレート間準静的すべり状況を把握し、GPS データとの比較を行う。また、個々の相似地震の詳細な震源分布、活動履歴、プレート境界付近の小地震の活動、小地震の応力降下量等とプレート間すべりの状況を比較し、プレート間の固着状況とこれらの観測量との関係を調べる。

4. 上述の科学研究費補助金基盤で構築した深層地下水変動観測 + 遠隔自動受信システムを本研究計画の 5 年間継続稼働させ、データを蓄積しつつ来るべき宮城県沖大地震に備える。この間、各観測サイトの水理学的個性を理解し、前駆的シグナルの判別法を整備する。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、以下の計画に基づいて研究を遂行する。

1. 海底諸観測：宮城県沖海域において、自己浮上式海底地震計を用いた繰り返し観測を実施し、特に小地震に注目してその発震機構解を推定し、その空間分布パターンからアスペリティ周辺における

応力場の解明を進める。また、GPS/音響ならびに海底圧力観測による地殻変動観測を実施し、陸上測地データとの総合解析により、非地震性すべりの検知を試みる。

2. GPS 連続観測網：GPS 連続観測データ解析のより一層の高度化をはかる。具体的には、基線解析の戦略や採用する天頂大気遅延量のマッピング関数の比較等を行って、ノイズの軽減に努め、微小な非地震性すべりの検出をめざす。また、測地インバージョン法の改良を行い、解析結果の安定化と信頼性の向上をはかる。

3. 相似地震データ解析：宮城県沖を含む領域で、相似地震によるプレート間準静的すべり状況の把握を行い、GPS データとの比較を行うとともに、宮城県沖のプレート間の固着状況や過去の大地震の活動域との関係を調べる。

4. 地下水位観測：「深層地下水変動観測システム」により、地下水の温度、水位、ラドン濃度の連続観測を継続し、地震活動との関係を解析しつつ、宮城県沖地震に備える。

平成 22 年度以降は、海底諸観測については微小地震活動の発震機構解を用いて応力場の時間変化と、相似地震・GPS 観測から明らかとなるプレート間すべりの時空間分布との対応関係を明らかにし、固着・すべり状態のモニタリングの高度化を図る。GPS 連続観測・地下水位観測については、蓄積されるデータに基づいて同様の解析をすすめて、必要に応じて新たな解析手法を導入し、解析結果の精度向上に努める。相似地震解析については、プレート間準静的すべり状況の把握を続けるとともに、プレート境界付近の小地震の応力降下量の推定を行う。さらに得られた応力降下量の空間分布をアスペリティやプレート間すべりの分布と比較し、関係を調べる。

(7) 平成 23 年度成果の概要：

本課題では、近い将来発生することが懸念されていた宮城県沖地震の震源域周辺における総合的なモニタリングを進めてきた。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の破壊の開始点は、こうした重点観測が行われている宮城県沖の海底下にあったため、本震 2 日前の 3 月 9 日に発生した M7.3 の前震を含め、本震とそれに至る過程を克明に記録することができた。

図 1 は海底地震計のデータを加えることにより再決定された、3 月 9 日の前震とその余震および 3 月 11 日の本震の震源分布である。本震に至るまでの地震活動の中心は、その破壊の開始点より海溝側に広がっている。この領域は通常から地震活動が活発な地域であり、2005 年に発生した宮城県沖の地震の発生直後や 2008 年に、M6 程度の地震を含む群発的な地震活動が見られている。今回の前震活動の震央分布を、海底地震観測のデータを用いて決定された 2002～2009 年の震央分布と比較すると、良い一致を示しており、定常的な地震活動と前震活動の分布パターン間に明瞭な差異を見いだすことはできない。

前震による地震時地殻変動は、陸上の GPS 観測網とともに宮城県沖の海域に設置された海底圧力計によって観測されている (図 2)。すべり一定の矩形断層を仮定して、これらのデータから前震の断層モデルを推定すると図 1 のようになる。前震の震央分布の広がりは、推定された断層の東側では大局的に一致しているが、破壊の開始点より陸側では、断層が推定された範囲の余震活動が低調である。しばしば指摘されているような、地震時すべり量と余震活動の相補的関係を仮定すれば、この余震活動が低調な領域はすべり量が特に大きかった領域に対応するのかもしれない。また、3 月 9 日の前震後にも余効すべりが認められた (図 2)。海底圧力計においては、M7.3 の地震の震央より西側で沈降、逆に東側では隆起の傾向がみられ、前震の震源付近で顕著な余効すべりがあったことがわかる。海底水圧計で観測された本震発生までの 2 日間の余効変動による上下変動量をもとに解析を行った結果、余効すべりは M7.3 の地震時すべり域に比べて南側で発生しており、地震時すべりと比べて 50%程度のモーメントを解放したことが明らかとなった。3 月 9 日の前震後の地震活動が南側に拡大する傾向にあったことが指摘されており、こうした地震活動の空間変化は余効すべりの拡大に伴ったものであると考えられる。

本震の破壊開始直後には 3 秒間程度の初期破壊フェーズがあったことが指摘されているが、この初期破壊フェーズから大振幅の主破壊に移行する様子は、海底地震計の波形記録でも認めることができ

る。初期フェーズの継続時間は観測点ごとに異なっており、主破壊の開始点が初期破壊の開始点（初動走時から決定される震源）と一致しないことがわかる。そこで、震源と主破壊の開始点との相対的な位置関係を推定したところ、主破壊の開始点は震源の 5.2 km 東側にあつて、初期破壊開始との時間差が 3.3 秒であつたことがわかつた（図 1）。

本震の破壊によるすべり量は平均でも 20m を超えており、それに伴う大規模な地殻変動が海陸で観測されている。宮城県沖の海底では、GPS/音響結合式（GPS/A）地殻変動観測によって最大 31 m の水平変位が観測された他、海底圧力計によって最大 5 m の隆起が観測されている。こうした海底地殻変動観測の結果と陸上 GPS 観測の結果をあわせて断層すべり分布を推定した結果を図 3 に示す。これによれば、地震時すべりが特に大きいのは震源よりも海溝側の領域であつて、50 m を超えるような非常に大きなすべりがあつたと推定される。一方で、M7.5 程度の地震の発生が想定されていた宮城県沖においても 15 m 程度の地震時すべりがあつた。宮城県沖においては 40 年程度で繰り返し発生する地震ですべり欠損の一部が解消されてきた一方で、海溝近傍では数百年間程度の長期にわたつてすべり欠損が蓄積され、今回の地震でそれらが一度に解消されたために、このようなすべり分布となつたと解釈される。

海底圧力観測によると、本震発生後宮城県沖付近で沈降の余効変動が観測される一方で、海溝近くでは隆起が認められる。陸上の GPS 観測によると宮城県の内陸部分では隆起が見られている。こうした地殻上下変動の複雑な空間変化は、余効すべりの分布が示す空間変化が非常に大きいことを示唆する。特に、宮城県沿岸の隆起と宮城県沖の沈降は、想定宮城県沖地震の震源域に相当する領域での余効すべりが非常に小さいことで説明される。この領域で低角逆断層型の発震機構解をもつ余震が少ないのは、余効すべりが小さいことによるものと考えられる。

2011 年東北地方太平洋沖地震では、本課題の対象領域である宮城県沖の海溝近傍に最大すべりが位置した。このような大きなすべり欠損が、これまでの繰り返し地震を用いたすべりモニタリング結果から事前に推測できたかどうかについて検討した。図 4 は東北、北海道地方の小繰り返し地震分布とそれから推定したカップリング率分布を示す。その結果、1) 広域での高カップリング率、2) プレート境界型地震発生域下限付近までの高カップリング、3) プレート境界型地震発生域下限近くでの M7 規模の地震の繰り返し、4) 海溝近傍での低地震活動と無相似地震活動、という巨大地震の発生と関連がある可能性のある特徴が宮城県沖にあることがわかつた。なお同様の特徴は 500 年間隔の巨大地震が知られている北海道東方沖にも当てはまる。

こうした地震・測地学的な観測に基づく研究の他、地球化学的なモニタリングも進めている。福島県立医科大学（福島市）の通気式電離箱のデータを用いて、東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動を解析した。屋外空気中のラドン濃度に関係する通気式電離箱での測定値は、年周期変動しながら経年的に減少する傾向にあつたが、2010 年 6 月頃から年周期変動のパターンが崩れるとともに増加傾向に転じた。同年 12 月初旬から指示値は減少を始めたが、その後東北地方太平洋沖地震の本震時までほぼ一定の値で推移していたことが明らかとなつた。

- (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）：
日野亮太・稲津大祐・伊藤喜宏・飯沼卓史・太田雄策・鈴木秀市・長田幸仁・木戸元之・藤本博己・篠原雅尚・金田義行、海底圧力観測で捉えられた 2011 年東北地方太平洋沖地震とその前震による地殻変動、日本地震学会 2011 年秋季大会、A22-04、静岡、2011。

Hino, R., Y. Ito, K. Suzuki, S. Suzuki, D. Inazu, T. Inuma, Y. Ohta, H. Fujimoto, M. Shinohara and Y. Kaneda, Foreshocks and Mainshock of the 2011 Tohoku Earthquake Observed by Ocean Bottom Seismic/Geodetic Monitoring, Abstract U51B-0008 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.

Hino, R., D. Inazu, Y. Ito, T. Inuma, Y. Ohta, M. Ohzono, K. Suzuki, Y. Osada, M. Kido, S. Suzuki, H. Fujimoto and Y. Kaneda, Coseismic and postseismic vertical seafloor deformation associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake and its large foreshock, Geophys. Res. Lett., in revision.

- Iinuma, T., M. Ohzono, Y. Ohta and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) estimated based on GPS data - Was the asperity in Miyagi-oki ruptured?, *Earth Planets Space*, 63, 643-648, doi:10.5047/eps.2011.06.013, 2011.
- 飯沼卓史・木戸元之・長田幸仁・稲津大祐・日野亮太・太田雄策・鈴木秀市・藤本博己・大園真子・対馬弘晃・三浦哲・篠原雅尚, 海陸測地観測データに基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布, 日本地震学会 2011 年秋季大会, A22-02, 静岡, 2011.
- Iinuma, T., M. Kido, Y. Osada, D. Inazu, M. Ohzono, H. Tsushima, R. Hino, Y. Ohta, S. Suzuki, H. Fujimoto, S. Miura and M. Shinohara, Coseismic Slip Distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Deduced from Land and Seafloor Geodesy, Abstract G51A-0853 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.
- Iinuma, T., R. Hino, M. Kido, D. Inazu, Y. Osada, Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, *J. Geophys. Res.*, in review.
- 稲津大祐・日野亮太・鈴木秀市・長田幸仁・太田雄策・飯沼卓史・対馬弘晃・伊藤喜宏・木戸元之・藤本博己, 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源近傍での海底圧力観測, 2011 年日本地震学会秋季大会, P2-10, 静岡, 2011.
- Inazu, D., R. Hino, S. Suzuki, Y. Osada, Y. Ohta, T. Iinuma, H. Tsushima, Y. Ito, M. Kido and H. Fujimoto, Ocean bottom pressure observations near the source of the 2011 Tohoku earthquake, Abstract G51A-0868 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.
- Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, T. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.
- 鹿島雄介・南須原美恵・中村隆志・山内常生・大槻憲四郎, 宮城県沖大地震の前兆を捉えるための深層地下水変動研究: 2009 年 2 月 ~ 2009 年 12 月の観測結果, *地質学雑誌*, 117, 451-467, 2011.
- 片岡賢英・安岡由美・鈴木俊幸・本間 好・長濱裕幸 RI 排気モニターがとらえた東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動 RI 排気モニターがとらえた東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動, 平成 23 年度主任者部会年次大会 (第 52 回放射線管理研修会) 11 月 1 日, 山形, 最優秀ポスター賞.
- Kido, M, Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino and Y. Ito, Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L24303, doi: 10.1029/2011GL050057, 2011.
- 宮本莊子・安岡由美・鈴木俊幸・本間 好・長濱裕幸・向 高弘, RI 廃棄モニターによる大気中ラドン濃度測定: 東北地方太平洋沖地震の場合, 3A1-5, 12 月 2 日, 日本放射線安全管理学会, 東京工業大学すずかけ台キャンパス.
- 長濱裕幸, 東北地方太平洋沖地震前の大気中ラドン濃度変動, 成 23 年東北地方太平洋沖地震に関する成果報告シンポジウム, 主催: 地震・火山噴火予知研究計画シンポジウム実行委員会, 共催: 地震・火山噴火予知研究協議会, 後援: 文部科学, 2011 年 8 月 20 日, 仙台.
- 長濱裕幸・安岡由美・鈴木俊幸・本間 好, 東北地方太平洋沖地震 (Mw = 9.0) 前の大気中ラドン濃度変動について, A32-09, 10 月 14 日, 日本地震学会 2011 年度秋季大会, 静岡.
- 太田雄策・稲津大祐・大園真子・日野亮太・三品正明・中島淳一・伊藤喜宏・飯沼卓史・佐藤忠弘・田村良明・藤本博己・立花憲司・出町知嗣・長田幸仁・篠原雅尚・三浦哲, 複合測地観測による M7.3(3 月 9 日) 地震時・地震後地殻変動, 日本地震学会 2011 年秋季大会, A22-05, 静岡, 2011.
- Ohta, Y., D. Inazu, M. Ohzono, R. Hino, M. Mishina, J. Nakajima, Y. Ito, T. Iinuma, T. Sato, Y. Tamura, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, Y. Osada, M. Shinohara and S. Miura, Co- and post-seismic deformation of the M7.3 foreshock triggering the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, Abstract G51A-0858 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.

- 大槻憲四郎, 2011年4月11日福島県いわき市付近で発生した地震(M7)の余震に伴う地下水位変動, 地質学雑誌, 査読中.
- 鈴木健介・日野亮太・伊藤喜宏・鈴木秀市・稲津大祐・飯沼卓史・藤本博己・篠原雅尚・金田義行, 海底地震観測による2011年東北地方太平洋沖地震の震源近傍の地震活動, 日本地震学会2011年秋季大会, B31-03, 静岡, 2011.
- Suzuki, K., R. Hino, Y. Ito, S. Suzuki, D. Inazu, T. Iinuma, H. Fujimoto, M. Shinohara and Y. Kaneda, Seismicity near the hypocenter of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake deduced by using Ocean Bottom Seismographic data, Abstract U51B-0012 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.
- Suzuki, S., R. Hino, Y. Ito, K. Suzuki, M. Shinohara, T. Yamada, T. Kanazawa and Y. Kaneda, Spatio-temporal variation of microseismicity near the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake detected by ocean-bottom seismic observation, Abstract U51B-0013 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.
- Uchida, N., and T. Matsuzawa, Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, Earth Planets Space, 63 (No. 7), 675-679, doi:10.5047/eps.2011.07.006, 2011
- Uchida, N., and T. Matsuzawa, Quasi-static Slip Before and After the 2011 Tohoku Earthquake Estimated from Small Repeating Earthquakes, Abstract U51B-0015 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec, 2011.
- Yasuoka, Y., H. Nagahama and T. Ishikawa, Anomalous Radon Concentration Prior to an Earthquake: A Case Study on the 1995 Kobe Earthquake, Japan., Collected Papers. LAP Lambert Academic Publishing, ISBN 978-3-8433-8451-3, paperback, 148pp., 2011.
- Yasuoka, Y., T. Ishikawa, Y. Omori, Y. Kawada, H. Nagahama, S., Tokonami, and M., Shinogi, Handbook of Radon: Properties, Applications and Health, Editors: Zachary Li and Christopher Feng, Anomalous Atmospheric Radon Variation before an Earthquake: A Case Study of 1995 Kobe Earthquake, Japan, Nova Science Publishers, NY, USA., 2011.
- Yasuoka, Y., Y. Kawada, Y. Omori, H. Nagahama, T., Ishikawa, S., Tokonami, M., Hosoda, T., Hashimoto, M., Shinogi, Anomalous change in atmospheric radon concentration sourced from broad crustal deformation: A case study of the 1995 Kobe earthquake, Applied Geochemistry, in press, 2012.
- 安岡由美, 石川徹夫, 長濱裕幸, 川田祐介, 大森康孝, 床次眞司, 志野木正樹, 地震とラドン濃度異常, 地震予知研究の最前線 - 地震予知工学・耐震工学・地震学の融和をめさして -, 早川正士(監修), 日本専門図書出版, 2012.
- 安岡由美・長濱裕幸・鈴木俊幸・本間 好, 排気モニターによる広域大気中ラドン濃度測定提案 巨大地震前後の地殻変動解析に挑戦してみませんか Isotope News, 1月号, No.693, 17-19, 2012.

(9)平成24年度実施計画の概要:

本課題は超巨大地震に関する当面推進すべき研究に申請した新課題「東北地方太平洋沖地震震源域周辺における多項目・高精度モニタリングによる超巨大地震発生過程の解明」に完全に移行する。

1. 東北地方太平洋沖地震の震源像の解明

・地震時にえられた地震・測地学的データ(特に,震源域およびその周辺で取得されたもの)の再解析を通して,この地震の震源モデルの再検討を行う。

2. 東北地方太平洋沖地震発生に至る過程の詳細解明

・東北地方太平洋沖地震が発生するまでの小繰り返し地震と海陸測地データの再解析から,1で得られた震源モデルに従うような超巨大地震の発生につながると解釈できるようなプレート間固着・すべり過程があったか検討する。

- ・地震発生直前に海陸の観測データで捉えられた微小地震活動・地殻変動に着目し，超巨大地震が発生するに至った過程を詳細に明らかにする．
 - ・東北地方太平洋沖地震の前震とそれに伴う余効すべりの特徴を，過去のプレート境界型地震とその余効すべりと比較することにより，超巨大地震発生に至る場合とそうでない場合とで，非地震性すべりの活動に相違が見られるかを検討する．
 - ・地震発生前後での大気中ラドン濃度に関するデータの収集・再解析から地震発生に伴う異常とその特徴の抽出から原因となる素過程の解明を図る．
- 3．余効すべりの時空間分布とそれに起因する地殻活動状況の総合モニタリング
- ・小繰り返し地震と海陸測地データの解析にもとづいてプレート間すべり速度の時空間変化を推定する．
 - ・地震時すべりの空間分布と余効すべり・余震活動の時空間変化の対応を調べ，断層の強度回復過程の解明を目指す．
 - ・深層地下水変動と大気中ラドン濃度の観測を継続し，大地震に先行するあるいは発生に伴う異常現象の検出を試みるとともに，東北地方太平洋沖地震の発生時の変動との共通点・相違点の検討を行い，地球化学的異常の発生過程の理解を図る．

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

日野亮太，長濱裕幸，内田直希，太田雄策，他計 10 名程度

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所，海洋研究開発機構，海上保安庁，気象庁地震火山部，仙台管区气象台（海底観測）

(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：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti@aob.gp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：日野亮太

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

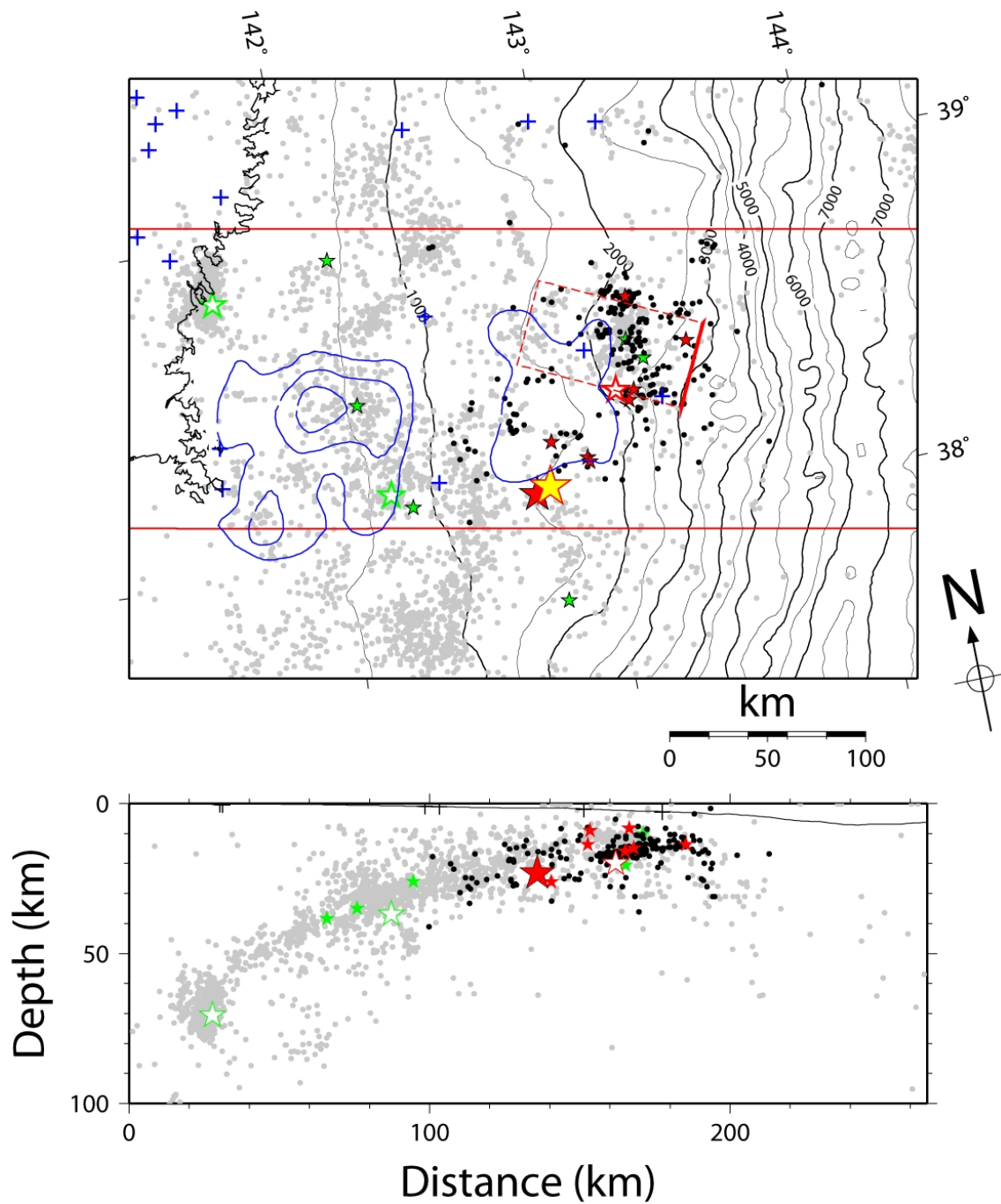


図 1

2011年3月9日に発生したM7.3の前震(赤白抜星)から3月11日のM9.0の本震(赤大星)までに発生した地震の震源分布(黒丸)。小赤星はこの間に発生した地震のうちM6級のもの。灰色丸は2002年から2009年までの地震のうち、OBSのデータを使って走時残差0.5秒以下で決定されたもので、そのうち、M6以上のものを緑星でM7以上のものを緑白抜星で示した。震央分布中の黄色星は観測波形にみられる大振幅位相の立ち上がりと初動との走時差から推定した主破壊の開始点。赤色矩形は前震に対する断層モデル。

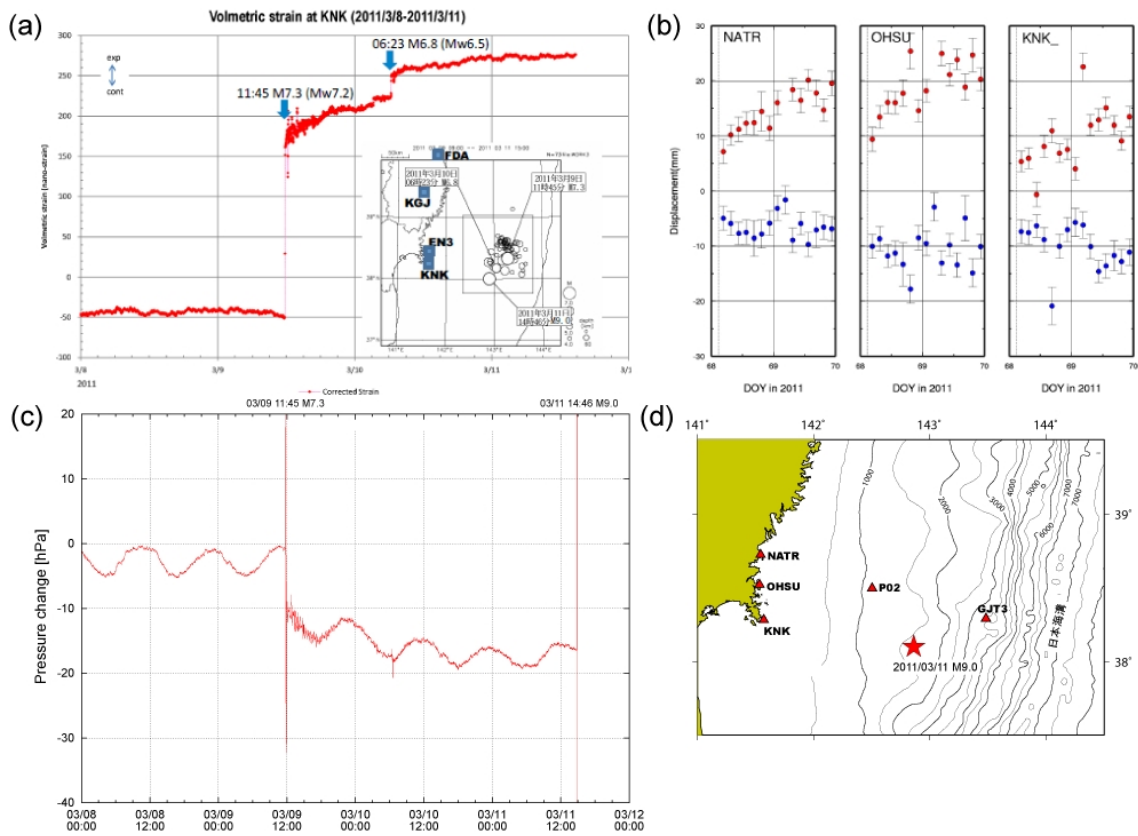


図 2

(a)3/9 の前震前後における KNK 観測点における体積歪の変化。(b)宮城県沿岸域の GPS 観測点における東西(赤)および南北(青)各成分の変位時系列。誤差棒は 3 σ の信頼区間。(c)海底圧力の時間変化。GJT3 と P02 観測点の圧力差を示した。(d)観測点配置。

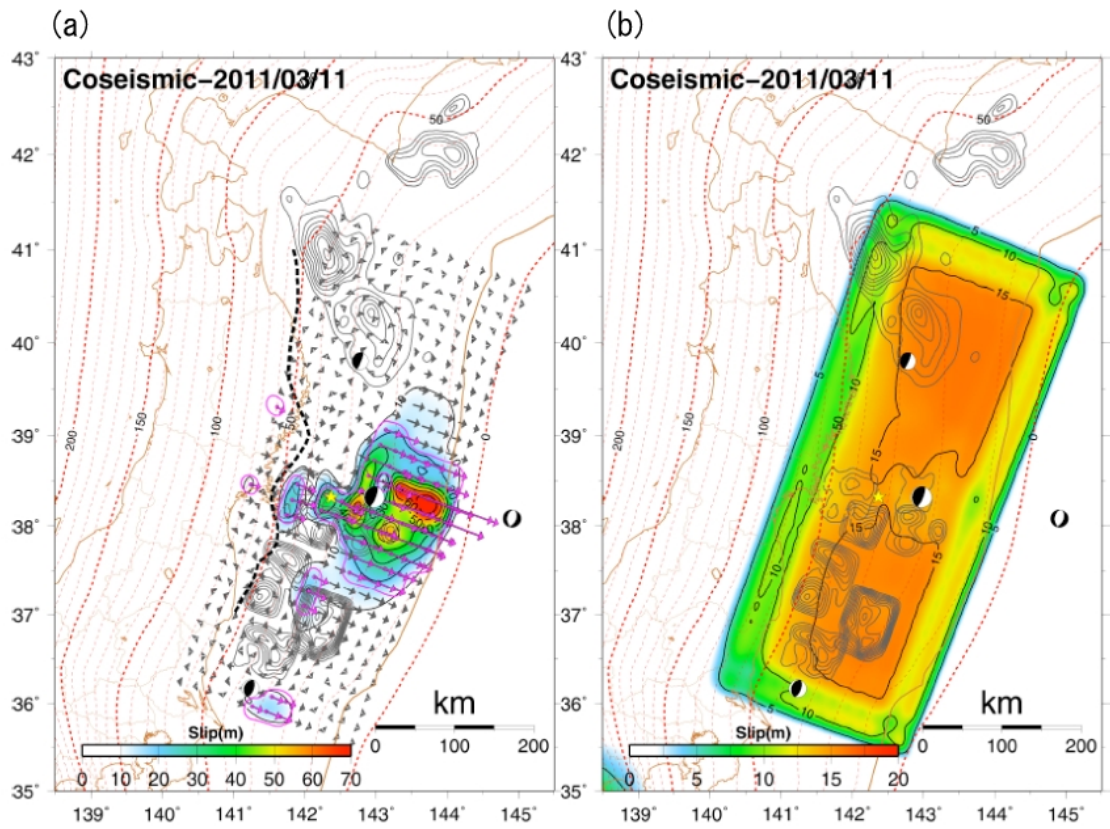


図 3

(a) 海陸の地殻変動観測データを用いて推定された地震時変位分布．すべり分布の等値線間隔は 10m．(b) 推定誤差の空間分布．等値線間隔は 5m．

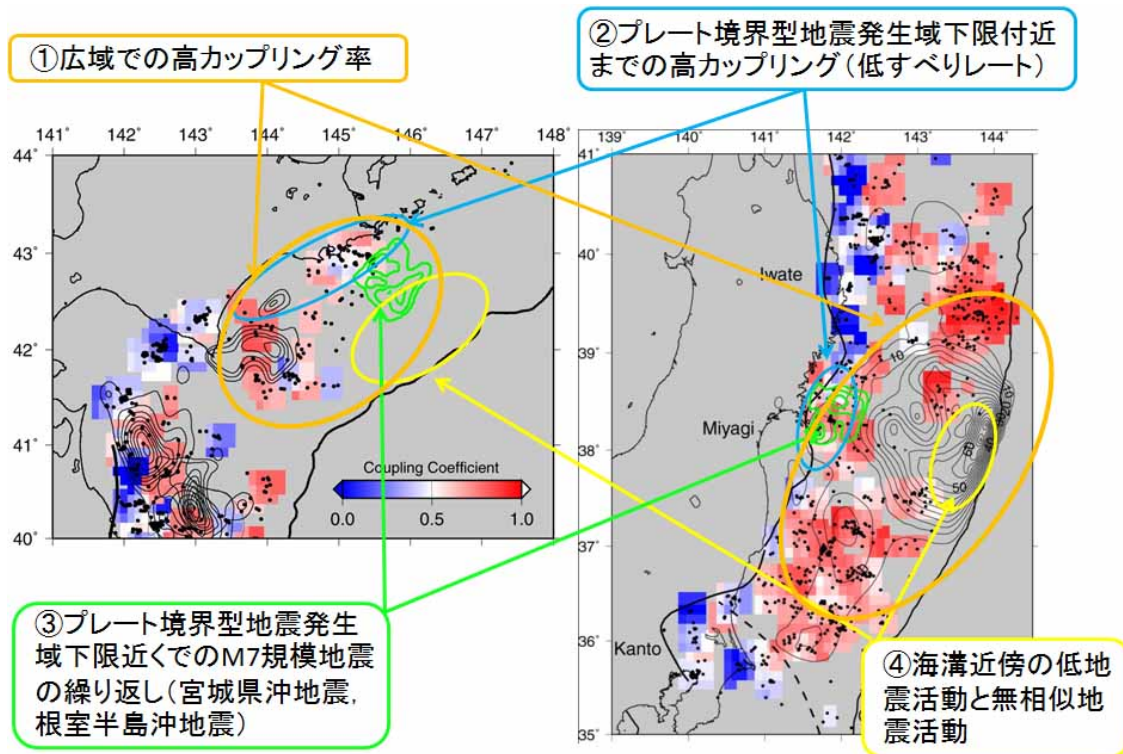


図 4

1993-2007年の繰り返し地震の積算すべりから推定したプレート間カップリングの分布(カラー, Uchida et al., 2011 に加筆修正). 黒丸は繰り返し地震グループの位置, コンターは, Yamanaka and Kikuchi, 2003, 2004, Inuma et al, 2011による大地震のすべり量分布.