

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21107007

研究課題名(和文)海溝型巨大地震の準備・発生過程のモデル構築

研究課題名(英文)Comprehensive modeling of pre- and co-seismic processes

研究代表者

井出 哲(Ide, Satoshi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90292713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 97,500,000円、(間接経費) 29,250,000円

研究成果の概要(和文)：海溝型巨大地震の準備・発生過程のうち、(A)沈み込み帯浅部の付加体形成と低速変形、(B)地震の動的破壊伝播とプレート境界面形状、(C)地震準備過程を含む地震サイクルに焦点を絞って数値計算、データ解析研究を行った。特にプレート境界における「ゆっくり地震」についてのモデル化と2011年東北地方太平洋沖地震を含む超巨大地震のモデル化を通して、広い周波数帯域における地震現象の新しい描像を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We studied inter-, pre-, and co-seismic process of mega-quake in the Nankai subduction zone. The main topics are (A) slow deformation on the shallow plate interface around accretionary prism, (B) dynamic rupture in geometrically complex fault system, and (C) earthquake cycle including preparation stage of a mega-quake. We successfully constructed a new comprehensive model for physical processes of mega-earthquakes in subduction zone, in a wide frequency range, through the modeling of slow earthquakes and the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：南海沈み込み帯 海溝型巨大地震 ゆっくり地震 動的破壊過程 応力場 東北地方太平洋沖地震 地震サイクル

1. 研究開始当初の背景

全世界的に近代的な観測によって、プレート沈み込みの詳細なイメージが明らかになるとともに、2000年ごろから「低周波地震」や「深部微動」、「スロースリップイベント」など全く新しい地震的現象が発見されつつあった。特に南海沈み込み帯ではこれらの新発見現象と将来起こるであろう巨大地震の関連に大きな注目が集まっていた。ちょうど南海トラフ地震発生帯掘削が始まるころであり、掘削及び本学術領域の他計画研究によってこの地域での詳細な構造(物性、温度、応力、断層構造など)が明らかになる予定であった。海溝型巨大地震の新しい描像を得るための最適な研究地域において、最適な時期に研究を始めることになった。

2. 研究の目的

(1) 沈み込み浅部の付加体形成と低速変形について、以下の問題を検討する。堆積物がどのように集積し付加体が形成されるのか? 付加体の発達に伴いどのような強度や応力場の変化が起きるのか? 形成された付加体内部の歪み・応力場はどうなっているか? 超低周波地震・微動はどのような応力場を反映しているか? 水や熱の拡散は超低周波地震・微動の発生にどのように関わるか?

(2) プレート境界には分岐断層が多数あり、深部で開始した破壊が浅部にどのように伝播していくかが強震動や津波の励起に影響する。地震の動的破壊とプレート境界面形状について、以下の問題を検討する。断層分岐構造、堆積層等の異なる媒質は破壊の伝播にどのような効果があるか? 小さな破壊が成長する際に、特徴的なサイズが存在するか?

(3) 地震準備過程を含む地震サイクルについて以下の問題を検討する。プレート境界周辺の温度・応力はどのようになっているか? 地震間、地震前後の間隙水圧の変動がすべりにどのように影響するか? 深部・浅部のゆっくり地震と巨大地震の準備過程にはどのような関係が存在するか?

(4) 上記の問題にアプローチできる数値計算モデルを開発し、パラメータ研究によってそれぞれの問題に一定の制約を与える。5年の研究期間に並行して進む統合国際深海掘削計画(IODP)及び領域内の他計画研究から次々に現実的な設定に関する情報が提供される。それぞれのモデルと現実的な設定の不確定性を考慮して地震プロセスの予測可能性を評価する。

(5) 上記の目標に加えて、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに関連した沈み込み帯の変形プロセスの解明を新たに目的に加えた(2011年度以降)。

3. 研究の方法

(1) 沈み込み浅部の付加体形成と低速変形について、以下の研究を行う。

付加体変形を計算するためのコードを開発し、付加体とデコルマ生成に必要な応力条件を推定する。

海底地震地殻変動観測により、浅部の変形プロセスを明らかにする。浅部超低周波地震から沈み込み帯浅部における現在の応力状態を推定するとともに、未知の低速変形を探る。

微動、超低周波地震、スロースリップの繰り返しを数値モデルによって再現し、プレート境界の物性と地震現象の多様性の関連を解明する。

アナログ実験によって沈み込み帯浅部の塑性変形が巨大地震発生に及ぼす影響を定量化する。

(2) 地震の動的破壊伝播とプレート境界面形状について以下の研究を行う

自由表面を含む複雑な断層の構造に対して、高精度の破壊伝播計算を実行する。現実的な断層構造を用いて動的破壊を再現可能か調べる。

東北地方太平洋沖地震の詳細な破壊プロセスを解明し、M9の破壊を引き起こした主要な原因を明らかにする。

沈み込み帯の分岐断層の2次元、3次元動的破壊計算コードを開発し、東北地方太平洋沖地震に適用する。

(3) 地震準備過程を含む地震サイクルについて以下の研究を行う。

海底地震計観測データを用いて南海地域のプレート境界構造と現在の応力場を明らかにする。

岩石実験の最新の知見を取り入れた摩擦構成則を用いた地震サイクルのシミュレーションコードを開発し、前駆すべりの検出可能性を検討する。

プレート境界の大規模変形を地殻変動データを用いて分析し、長期のローディングの不均質を定量化する。

プレート境界の現実的な物性を反映した長期地震サイクルシミュレーションを実行し、ゆっくり地震から巨大地震までを統一モデルで説明する。

(4) それぞれのモデル研究の成果を総括し、南海地域における巨大地震発生プロセスの新しい描像を求め、現実的な設定およびその不確定性を考慮し、地震プロセスの予測可能性を評価する。

4. 研究成果

(1) 沈み込み浅部の付加体形成と低速変形について、以下の成果が得られた。

個別要素法の数値計算コードを開発し付加体形成プロセスを再現した。付加体内に形

成される逆断層群とその下に形成されるデコルマとの力学的な関係が、従来考えられていたものと逆の場合があることを示した。より詳細な応力の時間変化を分析することで、付加体内のデコルマの活動変化が沈み込みに伴う応力と強度の変化によって起きることを明らかにした。これは沈み込み帯の多様性を説明するうえで重要な知見である。

南海地域において浅部低周波地震のメカニズムを推定し、その情報をもとに現在の付加体内部の応力場を求めた。これは実際にC01班によって推定されたボアホール周辺の応力場と調和的であることが確認され、研究結果の信頼性向上に大きく貢献した。また東北沖では東北地方太平洋沖地震の前に顕著なスロースリップや微動が起きていたことを海底地殻変動計測によって明らかにした。これは超巨大地震に先行する地殻変動プロセスの検出という点で、世界的、画期的な発見である。

南海沈み込み帯において深部微動カタログを整備した。一方で深部微動の統計的性質の多様性が確率モデルによって説明できることを明らかにした。同様の多様性は断層面上に粘性と脆性の不均質を与えた決定論的破壊進展モデルによっても説明できることを明らかにした。具体的に南海において、統計的性質の不均質性が線状に変化していることを発見し、その原因が長期のプレート運動にあるという仮説を立てた。この成果はネイチャー誌に掲載され、国際的に高く評価された(図1)。

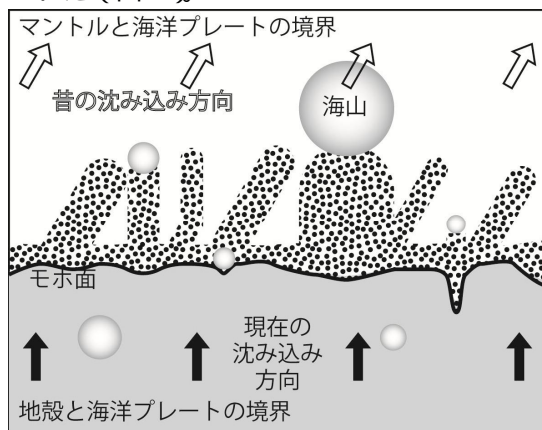


図1：微動の性質の空間変化とその原因 (Ide, 2010, Nature より改変)

スライムを用いたアナログ実験を行い、塑性変形が支配的なプレート境界でも地震的なすべりが起きることを説明した。東北地方太平洋沖地震の発生後、その発生間隔がプレート運動から予測される間隔より非常に長いことが問題となっていたが、この矛盾は、プレート境界上盤側、特に沈み込み帯浅部が非弾性変形していると考えれば説明できる。これは長期の地震発生リスク評価に重要な知見を与える研究であった。

(2) 地震の動的破壊伝播とプレート境界面

形状について以下の成果が得られた。

複雑な断層の構造に対して、動的断層分岐モデルの計算結果と天然で観察される断層の微細構造とを系統的に比較できるように、従来より広いパラメタスペースで数値解析を行った。九州の四万十付加体の露頭で発見された微小な分岐断層群の形成過程を動的な破壊伝播過程を考慮して物理的にモデル化した結果、破壊条件にはクーロン条件より法線応力のみが適切という結果を得た。

東北地方太平洋沖地震の詳細な破壊プロセスを解明し、M9の破壊が、少なくとも4段階の異なるフェーズによって説明できることを示した。プレート境界の深部と浅部が異なる振る舞いを示すという「東北沖地震の二面性」、また浅部のすべりを引き起こした「ダイナミックオーバーシュート」を説明した論文はサイエンス誌に掲載され、国内外の研究者の注目を集めた(図2)。

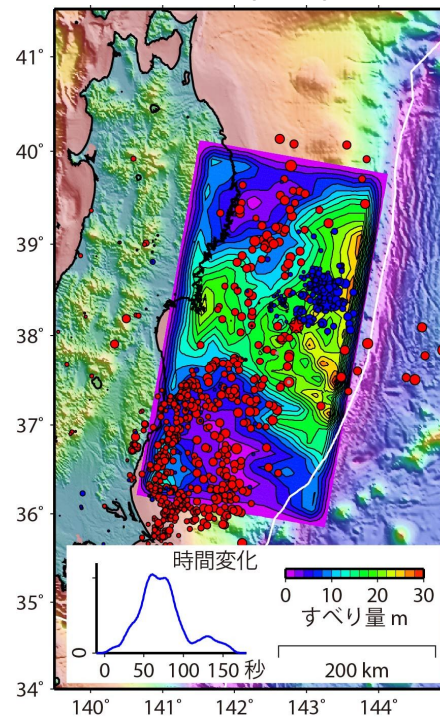


図2：東北沖地震のすべり分布 (Ide, et al., 2011, Science より改変)

沈み込み帯の分岐断層の2次元、3次元動的破壊計算コードを開発し、東北地方太平洋沖地震に適用した。東北沖地震プレート境界が破壊することで海溝近傍に大きな変位が生じることを明らかにした。これはの結果を数理モデルで裏付ける結果である。

(3) 地震準備過程を含む地震サイクルについて以下の成果が得られた。

海底地震計観測データを用いて紀伊半島沖のプレート境界の速度構造を推定した。紀伊半島沖では構造が大きく変化しており、地震の発生様式にも顕著な違いがみられる。さらに内陸での構造推定結果を合わせることで、日本列島下に沈み込むフィリピン海プレ

ートは紀伊半島と四国の間で断裂しているという結果を得た。プレート形状のこのような大きな不均質性は南海地域に発生する巨大地震の破壊プロセスにとって重大な影響を与えるものであり、この驚くべき成果は各種マスコミで広く報道された。

最新の摩擦構成則を用いた地震サイクルのシミュレーションにより前駆すべりの検出可能性を検討した。天然断層において強度低下を地震波モニタリングすることで前駆すべりが検出できる可能性があることを確認した。これは将来の観測研究にとって期待を持たせる成果である。

プレート境界の大規模変形を地殻変動データを用いて分析した。豊後水道の繰り返すスロースリップとその間の地殻変動を総合的に評価する、長期のローディングに空間的不均質性があることが明らかになった。このような不均質性は今後のモデルに取り入れる必要がある。

プレート境界の現実的な物性を反映した長期地震サイクルシミュレーションを実行した。プレート境界の深部で微動やスロースリップを、浅部で巨大地震を説明する統一モデルを構築した。モデルは南海沈み込み帯だけでなく、東北沖やメキシコ沖においても作成され、沈み込みプロセスの多様性を検討するための枠組みを提供する。またプレートの深部と浅部の現象の関連を調べるうえで重要な知見である。

(4) プレート境界を浅部の低速変形と、動的破壊過程、長期変形と地震サイクルに分けて行った上記の研究活動によって、極めて豊富な成果が得られた。研究代表者・分担者による査読学術誌に掲載された論文は 72 編を数える。研究開始以前に抱いていた比較的単純な地震のイメージは、研究の進展により次々と明らかになる不均質性によって変化していった。さらには研究期間中に発生した東北地方太平洋沖地震によって根本的な変更を余儀なくされた。しかしこの超巨大地震を注意深く検討することで、地震が階層的に発生をしたこと、何らかの前駆プロセスを伴ったことが明らかになった。これはプレート境界の地震に伴う低速変形(微動・スロースリップ)などを観察することで、確率的ではあるが地震の発生を定量的に予測できること、そしてある程度の確率ゲインを持って地震リスクを評価できることを示唆している。まさに新しい海溝型巨大地震の描像といえるだろう。

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 72 件)

以下すべて査読有

Namiki, A., T. Yamaguchi, I. Sumita,

T. Suzuki, and S. Ide (2014), Earthquake model experiments in a viscoelastic fluid: A scaling of decreasing magnitudes of earthquakes with depth, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 3169-3181, doi:10.1002/2014JB011135.

Ide, S. (2013), The proportionality between relative plate velocity and seismicity in subduction zones, *Nature Geoscience*, 6, 780-784, doi:10.1038/ngeo1901.

Yoshioka, S., and Y. Matsuoka, (2013). Interplate coupling along the Nankai Trough, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data: Effects of subducting plate geometry and spacing of hypothetical ocean-bottom GPS stations. *Tectonophysics*, 600, 165-174, doi: 10.1029/2011GL049308.

Kame, N., S. Fujita, M. Nakatani, and & T. Kusakabe, (2013). Effects of a revised rate-and state-dependent friction law on aftershock triggering model. *Tectonophysics*, 600, 187-195, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.028.

Akuhara, T., K. Mochizuki, K. Nakahigashi, T. Yamada, M. Shinohara, S. Sakai, T. Kanazawa, K. Uehira, and H. Shimizu (2013), Segmentation of the Vp/Vs ratio and low-frequency earthquake distribution around the fault boundary of the Tonankai and Nankai earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1306-1310, doi:10.1002/grl.50223.

Ide, S. (2012), Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor worldwide, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B03302, doi:10.1029/2011JB008840.

Shibazaki, B., K. Obara, T. Matsuzawa, and H. Hirose (2012), Modeling of slow slip events along the deep subduction zone in the Kii Peninsula and Tokai regions, southwest Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B06311, doi:10.1029/2011JB009083.

Ito, Y., and K. Shiomi (2012), Seismic scatterers within subducting slab revealed from ambient noise autocorrelation, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19303, doi:10.1029/2012GL053321.

Ito, Y., T. Tsuji, Y. Osada, M. Kido, D. Inazu, Y. Hayashi, H. Tsushima, R. Hino, and H. Fujimoto (2011), Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki

earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355.

Hori, T. and H. Sakaguchi, (2011), Mechanism of décollement formation in subduction zones. *Geophys. J. Int.*, 187, 1089-1100, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05204.x

Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza, (2011), Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332, 1426-1429, doi:10.1126/science.1207020.

Shibazaki, B., T., Matsuzawa, A., Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and, Y. Ito, (2011). 3D modeling of the cycle of a great Tohokoki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308.

Nakata, R., R. Ando, T. Hori, and S. Ide (2011), Generation mechanism of slow earthquakes: Numerical analysis based on a dynamic model with brittle-ductile mixed fault heterogeneity, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 116, B08308, doi:10.1029/2010JB008188.

Tamura, S., and S. Ide (2011), Numerical study of splay faults in subduction zones: The effects of bimaterial interface and free surface, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 116, B10309, doi:10.1029/2011JB008283.

Shibazaki, B., S. Bu, T. Matsuzawa, and H. Hirose (2010), Modeling the activity of short-term slow slip events along deep subduction interfaces beneath Shikoku, southwest Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 115, B00A19, doi:10.1029/2008JB006057.

Uchide, T., and S. Ide (2010), Scaling of earthquake rupture growth in the Parkfield area: Self-similar growth and suppression by the finite seismogenic layer, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 115, B11302, doi:10.1029/2009JB007122.

Ando, R., R. Nakata, and T. Hori (2010), A slip pulse model with fault heterogeneity for low-frequency earthquakes and tremor along plate interfaces, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10310, doi:10.1029/2010GL043056.

Ide, S., K. Shiomi, K. Mochizuki, T. Tonegawa, and G. Kimura (2010), Split Philippine Sea plate beneath Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L21304,

doi:10.1029/2010GL044585.

Ide, S. (2010), Striations, duration, migration and tidal response in deep tremor, *Nature*, 466, 356-359, doi:10.1038/nature09251.

Ito, Y., Y. Asano, and K. Obara (2009), Very-low-frequency earthquakes indicate a transpressional stress regime in the Nankai accretionary prism, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20309, doi:10.1029/2009GL039332.

[学会発表](計 155 件)

鈴木岳人, 数理物理的視野に立った動的地震破壊過程の包括的理解, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 7 日, 横浜市国際会議場(神奈川県)

伊藤喜宏, スロー地震: 高間隙水圧下にある断層のゆっくり破壊, 日本地質学会第 120 年学術大会, 2013 年 9 月 15 日, 東北大学(宮城県).

Ide, S., Modeling scale-independent heterogeneities of earthquake dynamic rupture, IAHS- IASPO- IASPEI Joint Assembly, 2013 年 7 月 25 日, Gothenburg (スウェーデン).

Shibazaki, B., 3D Quasi-dynamic Modeling of the Cycle of Megathrust Earthquakes along the Southern Kuril Trench Subduction Zone, Considering High Speed Friction, AOGS 10th Annual Meeting, 2013 年 6 月 28 日, Brisbane (オーストラリア).

芝崎文一郎・野田博之, 高速摩擦を考慮した千島海溝南部で発生する超巨大地震の発生サイクルモデル, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 22 日, 幕張メッセ(千葉県).

Ide, S., Global perspective on controls on megathrust slip behaviour, GeoPRISM Workshop, 2013 年 4 月 15 日, Wellington (ニュージーランド).

伊藤喜宏, 2011 年東北地方太平洋沖地震発生前のスロースリップイベント, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日, 幕張メッセ(千葉県).

井出哲, 地震のスケーリングと不均質性, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西大学(兵庫県).

Ito, Y., Tsuji, T., Osada, Y., Kido, M., Inazu, D., Hayashi, Y., Tsushima, H., Hino, R., Fujimoto, H., Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, AGU 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 5 日, San Francisco (アメリカ).

井出哲, 深部微動は確率的地震予測にどう役立つか?, 日本地震学会秋季大会, 2011 年 10 月 14 日, グランシップ

(静岡県).

井出哲・汐見勝彦・望月公廣・利根川貴志・木村学, 西南日本下の断裂したフィリピン海プレート, 日本地球惑星科学連合, 2011年5月26日, 幕張メッセ(千葉県).

Ide, S., Geometrical constraints on world deep tremor, JpGU Meeting 2011, 2011年5月25日, 幕張メッセ(千葉県).
Ide, S., Striations and tremor duration controlling diverse tremor behavior: from western Shikoku to world tremor zones, AGU 2010 Fall Meeting, 2010年12月13日, San Francisco (アメリカ).

井出哲, 深部微動の線状構造・継続時間・移動様式・潮汐応答, 日本地震学会秋季大会, 2010年10月28日, 国際会議場(広島県).

井出哲・汐見勝彦・望月公廣・利根川貴志・木村学, 西南日本下の断裂したフィリピン海プレート, 日本地質学会第117年学術大会, 2010年9月19日, 富山大学(富山県).

[図書](計 1件)

木村学・他(堀高峰), 付加体と巨大地震発生帯, 2009, 292.

[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

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/nantoro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井出 哲 (IDE, Satoshi)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 90292713

(2) 研究分担者

堀 高峰 (HORI, Takane)
海洋研究開発機構・地震津波防災プロジェクト・サブリーダー
研究者番号: 00359176

吉岡 祥一 (YOSHIOKA, Shoichi)
神戸大学・都市安全研究センター・教授
研究者番号: 20222391

芝崎 文一郎 (SHIBAZAKI, Bunichiro)
建築研究所・国際地震工学センター・上席研究員
研究者番号: 20344012

伊藤 喜宏 (ITO, Yoshihiro)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 30435581

亀 伸樹 (KAME, Nobuki)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 90304724

(3) 連携研究者

望月 公廣 (MOCHIZUKI, Kimihiro)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 80292861

安藤 亮輔 (ANDO, Ryosuke)
産業技術総合研究所・地質分野研究企画室・企画主幹
研究者番号: 10455256

鈴木 岳人 (SUZUKI, Takehito)
東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
研究者番号: 10451874