



国立研究開発法人

海洋研究開発機構



東北大学

2016年11月16日

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立大学法人東北大学大学院理学研究科

国立大学法人東北大学災害科学国際研究所

海底地殻変動データを用いて
東北地方太平洋沖地震に引き続くゆっくりすべりを高分解能で検出
—巨大地震の発生過程の理解に重要な知見—

1. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 平 朝彦、以下「JAMSTEC」という）地震津波海域観測研究開発センターの飯沼卓史研究員は、東北大学（総長 里見 進）大学院理学研究科の日野亮太教授、内田直希准教授及び東北大学災害科学国際研究所の木戸元之教授らとともに、東日本大震災をもたらした2011年東北地方太平洋沖地震（以下、「東北沖地震」という）の震源域周辺で得られた海陸の地殻変動データを解析した結果、東北地方の沖合のプレート境界断層において、東北沖地震の際にすべりを起こした領域の周辺でのみ余効すべり（※1）が発生しており、地震波を放出するような速いすべりを起こす領域と、余効すべりのように人間には感じられないゆっくりとしたすべりを起こす領域とが、プレート境界面上で重なっていないことを見出しました。

また、東北地方太平洋沖地震では破壊が及ばなかった三陸沖北部では、1968年の十勝沖地震のようなマグニチュード8弱の地震が100年弱の間隔で繰り返し発生していますが、この領域には余効すべりが及んでおらず、依然として強く固着して次の地震への準備が着実に進んでいることを、地震活動データの解析と比較することで確認しました。さらには、その周囲のすべりが東北沖地震以前よりも速くなっていることから、次の三陸沖北部の地震は平均よりも短い発生間隔で起こることが予想されます。

こうした結果は、マグニチュード9の巨大地震の発生メカニズムも、断層面の摩擦状態によって規定されるすべり様式に支配されていることを示すもので、プレート境界型地震の発生過程の包括的な理解のために重要な知見を与えるものであると同時に、地震サイクルシミュレーションにおいて再現すべき現象の一つを提示することで長期的な地震発生予測にも貢献すると期待されます。

本研究は、JSPS 科研費 JP20244070、JP15K05260、JP26000002、JP26109007 の助成を受けて実施されたものです。この研究成果は、英科学誌「Nature Communications」電子版に2016年11月17日付（日本時間）で掲載される予定です。

タイトル: Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku Earthquake

著者: 飯沼卓史¹、日野亮太²、内田直希²、中村 航^{2*}、木戸元之³、長田幸仁^{2#}、三浦 哲²

1. 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 東北大学災害科学国際研究所

*現気象庁、#現測位衛星技術株式会社

2. 背景

東日本大震災をもたらした東北沖地震や2003年十勝沖地震のような巨大地震を発生させるプレート境界断層では、地震波を放出して地面を激しく揺さぶることになるような急激な断層すべり（地震性のすべり）のほかに、人間には感じられないゆっくりとしたすべり（余効すべり）も発生することが知られています。こうしたすべりの様式の違いは、プレート境界断層上のそれぞれの場所の摩擦特性の違いに対応しており、基本的には、地震性のすべりを起こす場所と、余効すべりを起こす場所とは空間的に重なっていないことが想定されています。実際、これまでに発生した地震（例えば、2003年十勝沖地震やカリフォルニア州の2004年パークフィールド地震など）では地震性のすべりを起こした領域の外側で余効すべりが発生していることが確認されています。しかしながら、東北沖地震のような、海底下に震源域が大きく広がっているような地震では、余効すべりがどこで起きているのか、陸上のデータのみを用いた解析からは細かく分かりません。すでに行われたいくつかの研究では、GPS観測によって求められる陸上の地殻変動データのみを用いて余効すべりの分布を推定していますが、その空間分解能は十分であるとはいえ、東北沖地震の際に地震性のすべりを起こした領域が余効すべりをも起こしている、という結果が得られています。さらに、東北沖地震の後に生じている地殻変動には、プレート境界断層で生じている余効すべりによるものだけでなく、プレートの下側の領域の粘性緩和（※2）によるものも含まれており、それらを適切に分離する必要があります。

そこで、本研究では、GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測によるデータや海底水圧観測によって得られた海底面の上下変位のデータを、陸上GPS観測によって得られた地殻変動データとともに解析することで、①地震後の地殻変動データから、粘性緩和による地殻変動を適切に分離して余効すべりによる変動を抽出したうえで、②プレート境界断層で生じる余効すべり分布を高い空間分解能で推定し、③地震学的データ解析から推定された余効すべり分布と定量的に比較する、という手順により、東北沖地震において地震性のすべりを起こした領域と余効すべりを起こしている領域とが重なっているのか否かを検証しました。

3. 方法

本研究では、地殻変動の検出のため、陸上GPS観測データに加えて二種類の海底観測データを用

いています。一つは、GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測と呼ばれ、海底にある基準点の位置を音波によって測量するとともに、測量に用いた船（またはブイ）の位置を GPS 衛星によって決定することで、海底基準点の位置を精密に決定する技術です。東北沖地震の震源域の直上及び周辺には東北大学及び海上保安庁が設置した海底基準点があり、東北沖地震の地震時の地殻変動とともに、地震後の経時的な地殻変動が観測されています。もう一つは海底水圧観測データで、海底での水圧値がその地点の水深に比例することを利用して、海底面の上下変位を圧力変動から求めることができます。宮城県の沖合には、東北大学が東北沖地震以前に設置していた水圧計があり、地震後しばらくしてからこれらの水圧計を回収したところ、地震時の大きな変位に伴う水圧変動に加えて、それに続く経時的な変動が捉えられていました。

このようにして得られた地殻変動データから、数値計算によって粘性緩和成分を除去し、余効すべりによる地殻変動を抽出します。日本列島の下に沈み込んでいる太平洋プレートのような大局的な構造を反映した有限要素法モデルを用いて粘性緩和による変位を計算し、それを観測された変位から差し引いたものを余効すべりによる変位（地殻変動）とみなします。ここで問題となるのは、プレート境界断層で生じる余効すべりでは、東向き（海溝向き）の運動は説明できますが、西向き（陸向き）の運動は作ることができず、粘性緩和でしか西向きの運動は説明できない、という点です。海底地殻変動観測点の中には、西向き（陸向き）の運動、すなわち地震時とは逆の方向に動いている点があります。Sun et al. [2014, Nature]は、この動きを説明し、かつ、陸上 GPS 観測点での東向きの運動を過大評価しない、という条件を課すことで、最も妥当なレオロジー構造モデルを構築しました。もし陸上の東向きの動きを過大評価してしまうなら、観測された変位から粘性緩和による変位を引いた際に、余効すべりで説明できない西向きの運動が残ってしまうため、この条件が必要となります。こうして得られた余効すべりによるものと考えられる変位を用いて、プレート境界断層における余効すべりの分布を推定しました。

本研究では地震観測データの解析で検出された小繰り返し地震データも余効すべりの分布と量を見積もるために採用しています。小繰り返し地震とは、波形の相似性が極めて高い地震群を指し、余効すべりが起きているプレート境界断層中に存在する小さな固着域（アスペリティ）（※3）が繰り返しすべることによって発生していると考えられています。これらの小繰り返し地震はその周りの余効すべりに追いつくように発生しているため、小繰り返し地震のすべりを積算することにより、プレート境界での余効すべりの量・分布を直接知ることができます。ただ、アスペリティが全くない場所ではこのような小繰り返し地震は発生しないため、小繰り返し地震が起きていないことが余効すべりがないことを示しているわけではないことに注意が必要です。

4. 結果

プレート境界断層で発生する余効すべりの分布を推定したところ、東北沖地震の際に地震性のすべりを起こした領域とはほとんど重なることがなく、空間的に分かれていたことが確認されまし

た(図1)。特に、東北沖地震のすべりが及んでいたと考えられる、宮城県沖地震(※4)の震源域では余効すべりが生じておらず、地震後の早い時期にプレート間の固着が回復していることが示唆されます。また、余効すべりが最も大きいのは岩手県の沿岸直下のプレート境界(図1の領域1)ですが、この領域でのすべり量は1m弱と求まり、これまで他の研究で推定されていた量の4分の1以下になっています。この差は、粘性緩和による変位の見積の違いに起因するものです。過去の研究では、粘性緩和を考慮していなかったり、考慮していても、採用している粘性構造モデルが、現実的な構造を考慮していない単なる層構造モデルを採用していたりして、海底地殻変動観測で得られている西向き運動を説明できないモデルであったため、領域1の直上のGPS観測点において観測された東向きの変位のほとんどが余効すべりによるものとみなしてしまい、プレート境界断層での余効すべりを過大評価していました。小繰返し地震の解析から求められたすべり量(図2)と比較すれば、1m弱のすべり量であるのがもっともらしいと考えられます。海底の地殻変動データも説明可能な、現実的な構造を反映した構造モデルを用いて粘性緩和による変位を求めることが、余効すべり分布の推定において非常に重要であることが分かります。

領域1の北から北北東にかけての三陸沖北部地域は、1968年の十勝沖地震をはじめとしたマグニチュード8弱の地震が100年弱の周期で繰返し発生している領域です。図1及び2に見られる通り、地殻変動データ及び小繰返し地震データの解析結果からは、1968年の十勝沖地震の震源域の中では大きな余効すべりは起こっていません。しかしながら、この周辺には海底観測点がないため地殻変動データの解析は解像度が高くなく、小繰返し地震は、前述の通り、アスペリティがない場所では発生しないため、余効すべりが三陸沖北部の大地震震源域内で発生しているのかいないのか、断定することができません。そこで、プレート境界で発生していると思われるすべての(波形の相似性がないものも含めた)地震の発生数に着目し、東北沖地震以前と以後それぞれの期間における発生数レートを比較してみたところ、三陸沖北部の特に北側の大地震震源域内においては発生レートが有意に増加してはいないことが分かりました(図3)。このことは、東北沖地震の余効すべりが生じているのは三陸沖北部の繰返し地震の震源域周辺であって、内部ではないことを意味しており、それによって震源域への負荷が高まっているため、次の地震の発生は平均的な再来周期よりも早まることが予想されます。

5. 本研究の意義・今後の展開

本研究では、東北沖地震に関連して取得された海陸の地殻変動データを用い、さらに、地震観測データに基づく解析結果と定量的に比較することによって、プレート境界型の巨大地震の地震時すべりと余効すべりについても、これまでに考えられていたように、地震時すべり域と余効すべり域がプレート境界面の摩擦状態を反映してすみ分けているということを明らかにしました。この成果は、プレート境界型地震の発生過程の理解のために重要な知見を与えるものであり、地震サイクルシミュレーションにおいて再現すべき現象の一つを提示することで、長期的な地震発生予測にも貢献す

るものであると期待されます。

一方で、今回用いた海底地殻変動データは、宮城県沖を中心とした限られた領域に東北沖地震以前から設置されていた観測点のもののみであるため、東北沖地震後に日本海溝沿いの広域に展開された新たな海底地殻変動観測網や、国立研究開発法人防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網（S-net）で今後得られるデータを活用することで、継続的なデータの取得及び解析が可能となり、東北沖地震の震源域の北側及び南側での地震発生リスク評価の高精度化が期待されます。

また、先行研究との大きな違いをもたらしたのが粘性緩和成分の見積りの差であることは、プレート境界断層における固着域やすべり域の分布の推定には、粘性緩和による地殻変動を適切に見積らなければならないこと、そのためには海域における地殻変動データを考慮に入れることが不可欠であるということを示唆しており、今後南海トラフ沈み込み帯で発生が懸念されている地震についても、その準備・発生過程を調べるためには海底地殻変動観測を継続していくことが求められます。

※1 余効すべり：地震が発生した後に、地震時にすべりを起こした断層が、人間が感じるような地震波を放出せずに、さらにゆっくりとずれ動き続ける現象。地震の際にすべった領域の端に生じる応力が駆動力となって生じ、時として断層面を伝播して行き、100km以上も離れた場所で別の大地震を誘発することもある。

※2 粘性緩和：力を加えている間には変形が増大し、力を取り除いても元に戻らないような性質を粘性と言い、地震時に発生した大変動によって震源周辺にもたらされる応力が、地下の流動変形によって失われていく（熱エネルギーへと変換される）現象を粘性緩和と呼ぶ。

※3 アスペリティ：断層上で、普段はくっついていて地震時に急激なすべりを起こす場所。

※4 宮城県沖地震：1978年に発生したマグニチュード7.5の地震を典型とする、約40年の周期で繰り返し発生していた牡鹿半島のすぐ沖合を震源として起こる地震を指す。

お問い合わせ先:

(本研究について)

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 地震津波予測研究グループ

研究員 飯沼 卓史

電話：045-778-5822 E-mail：iinuma@jamstec.go.jp

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

教授 日野 亮太

電話：022-225-1950 E-mail：hino@m.tohoku.ac.jp

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

准教授 内田 直希

電話：022-795-3917 E-mail：naoki.uchida.b6@tohoku.ac.jp

東北大学災害科学国際研究所 災害理学研究部門

教授 木戸 元之

電話：022-752-2063 E-mail：kido@irides.tohoku.ac.jp

(報道担当)

国立研究開発法人海洋研究開発機構

広報部 報道課長 野口 剛 電話:046-867-9198

国立大学法人東北大学大学院理学研究科

特任助教 高橋 亮 電話:022-795-5572

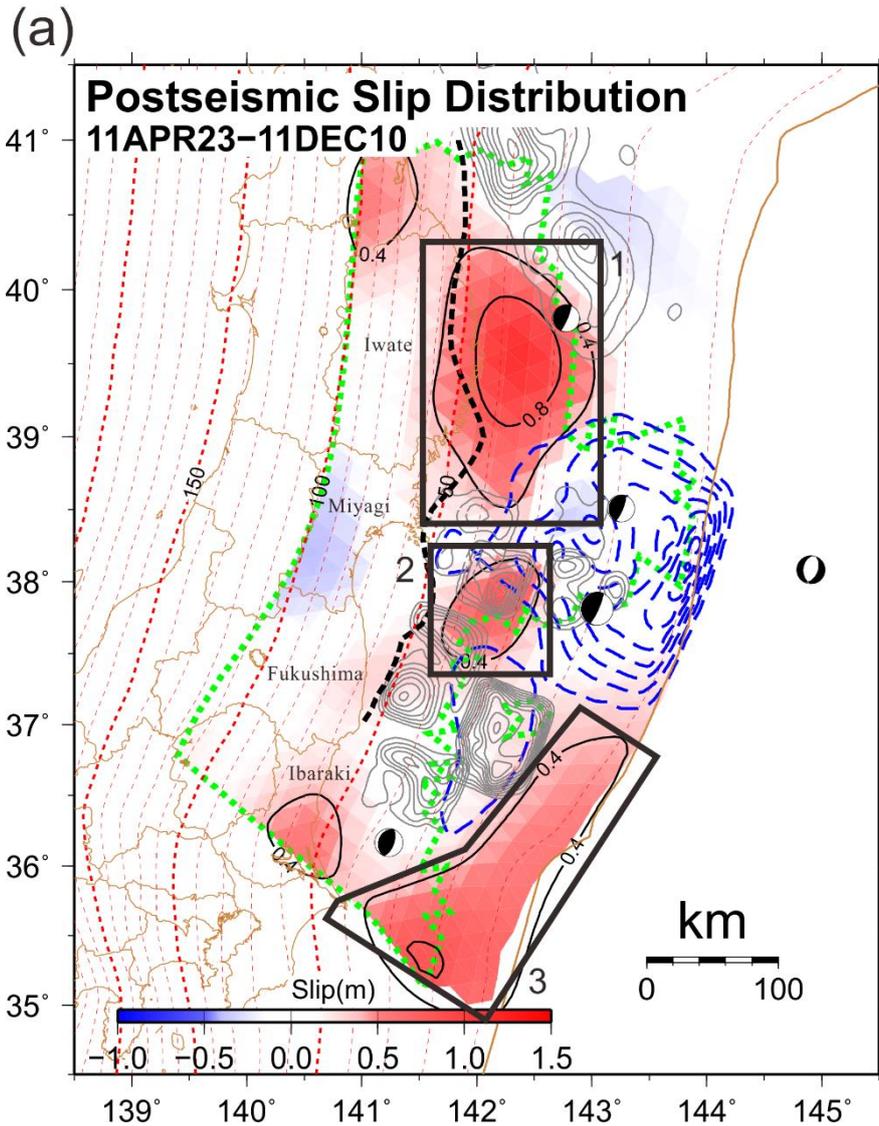


図1：海陸の地殻変動データから推定された、プレート境界断層における余効すべりの分布。赤青色ですべり量を示す（図中下部のカラースケール参照）。正值は逆断層型のすべり（地震時のすべりと同じ向き）を、負値は正断層型のすべり（沈み込むプレートに引きずり込まれる向き）を表す。すべり量0.4mごとに等値線を描いてある。青色の破線は東北沖地震の地震時すべりの等値線（10m間隔）を、黒の破線はプレート境界型地震の西縁を表す。赤の破線はプレート境界面の等深線。緑の点線で囲った範囲は余効すべりの推定精度が十分良いと考えられる領域に対応する。灰色の等値線は過去の大地震の破壊域。

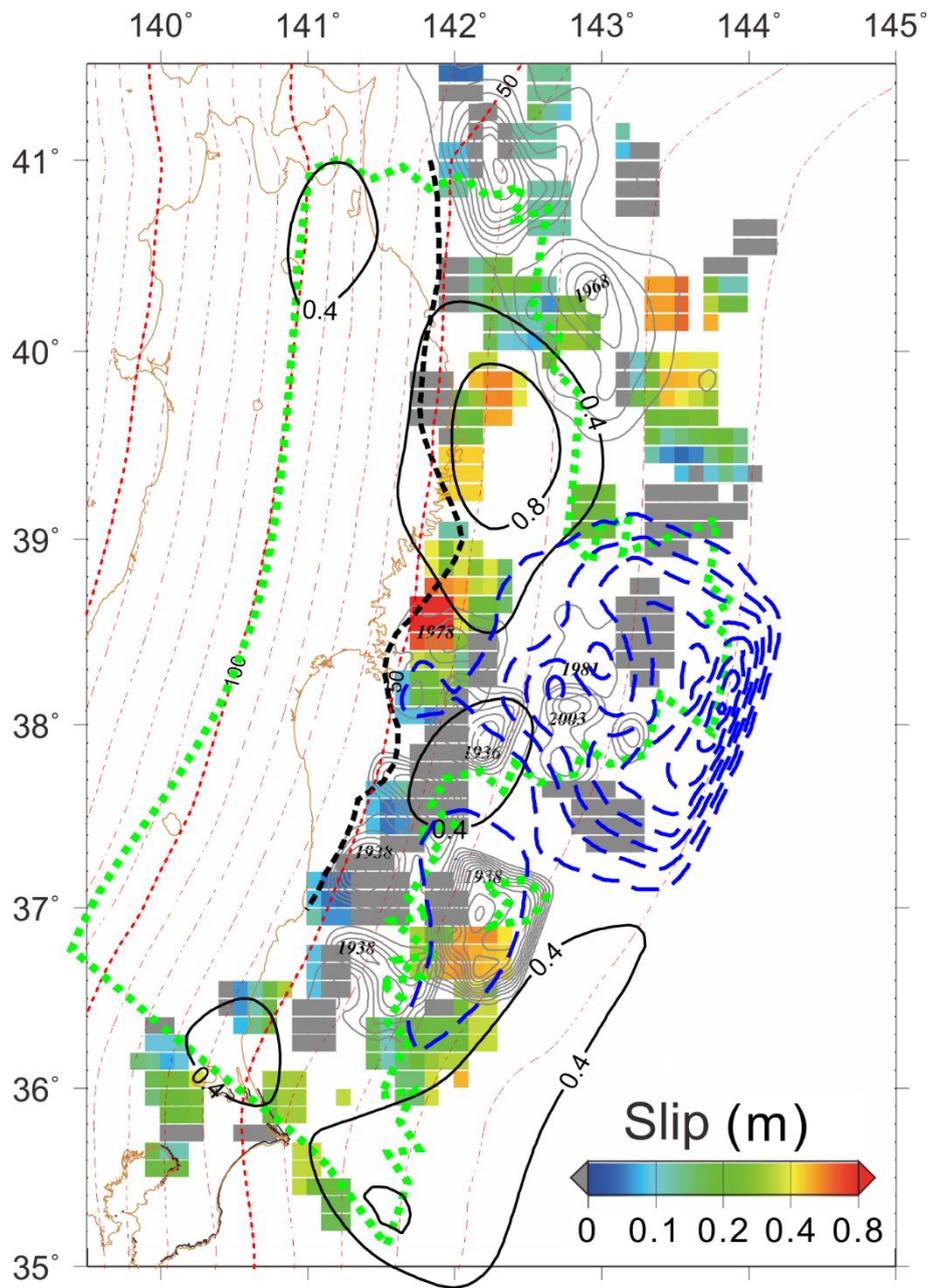


図2：小繰り返し地震から推定された余効すべりの分布。緯度・経度0.1度ごとに、その周辺で発生する小繰り返し地震から求まるすべり量を図内のカラースケールに従って色で示している。黒の等値線は、図1で示した地殻変動データから求めた余効すべり分布のもの。そのほかのシンボルは図1と同様。

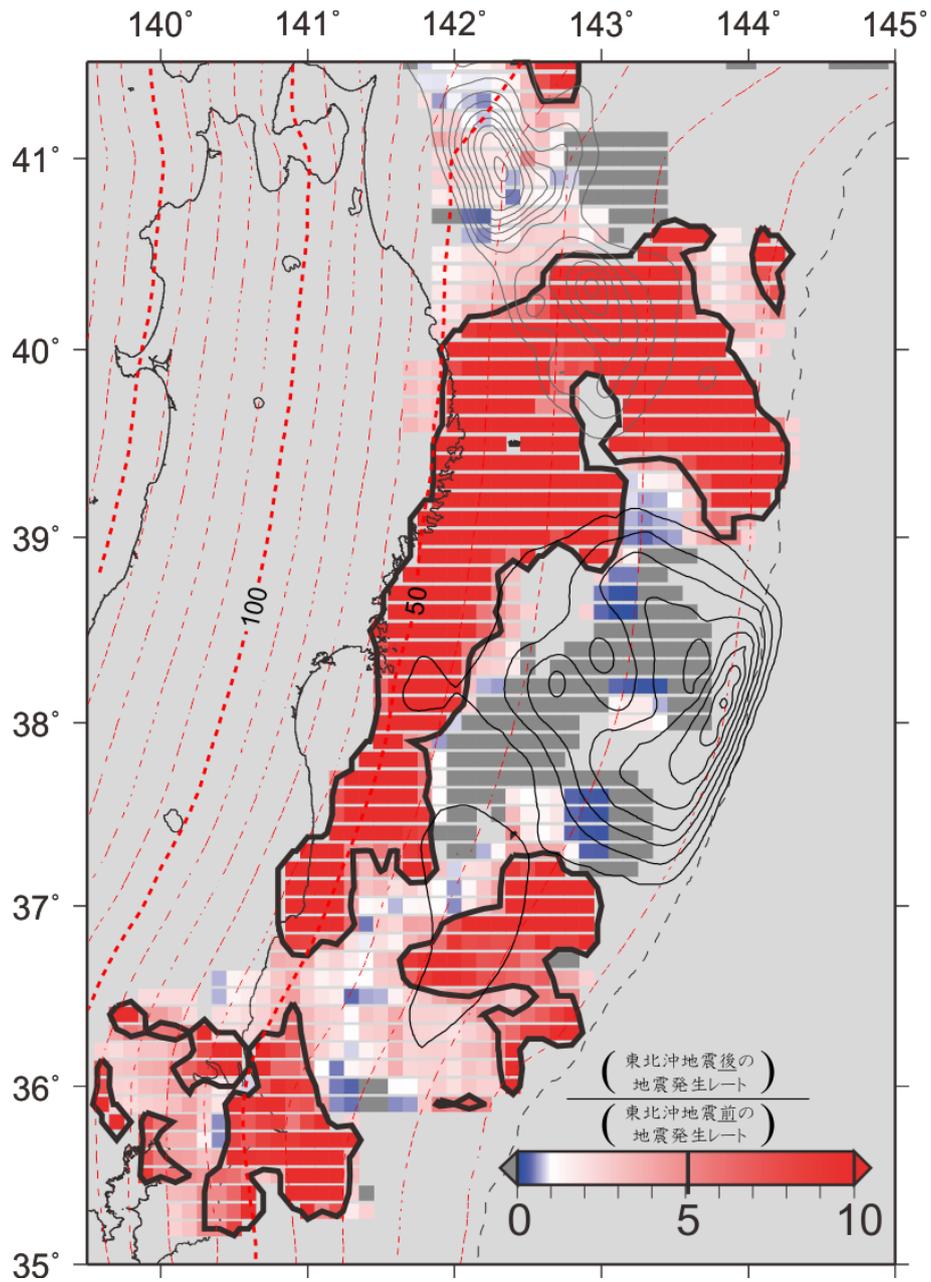


図 3：プレート境界型地震の発生レートの、東北沖地震以前（2008 年から東北沖地震直前まで）に対する地震後の比を赤青の色（カラースケールは図内参照）で表したものの増加も減少もしていない場合に白になる。5 倍以上の発生レートになっている領域を黒の太線で囲んで示してある。