

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

準静的滑りの時空間変化に基づく地震発生切迫度評価の研究

(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

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

イ. 先行現象の発生機構の解明

(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

(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：

プレート境界で発生するスローイベントや余効すべりが地震や低周波微動の発生を促していることが次第に明らかになっており，このことは，アスペリティモデルで定性的には説明できる．平成 21 年度からの5か年では，これを地震の切迫度評価に役立てるために，この影響を定量化することを目指す．地震同士，またスロースリップイベント同士の相互作用についても，さらに詳細に検討し，そのメカニズムの理解を深める．

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成 21 年度は，小繰り返し地震や GPS データによるプレート境界でのすべりモニタリングの自動化や改良を行う．これらの推定結果の相互比較により，すべり量推定の高精度化を目指す．さらに地震サイクルに伴うすべり欠損・前駆すべり・余効すべり過程の数値シミュレーションを行い，上で得られたすべり量推定結果との比較により，プレート間すべりによる局所的な応力の変化やプレート境界の有効法線応力の絶対値の推定を試みる．陸上および海底地震観測網で精度よく求めた地震のメカニズム解を用いて，宮城沖の海溝陸側斜面下の陸側地殻内または沈み込むプレート内部の応力場を調べる．また，相互作用の検証のため，プレート境界での大小地震が入り混じった地震クラスターの抽出を行う．東北日本沈み込み体周辺域の GEONET と東北大学の GPS データを自動的に併合処理するシステム開発を開始する．

平成 22-25 年度は、抽出された地震クラスター内の小繰り返し地震の発生の時間間隔のゆらぎに注目し、周囲の地震や地震の規模等の影響を調べる。東北日本沈み込み帯における小繰り返し地震のモニタリングも継続する。メカニズム解に基づき、地震性および非地震性のプレート間すべりに対応した局所的な応力の変化を調べて、応力場の空間変化に基づく地震発生の切迫度評価の可能性を探る。また、GEONET と東北大学の GPS データを自動的に併合処理するシステムによって数ヶ月単位でのすべり欠損分布を定量的に評価し、プレート間での歪み蓄積の時空間的な不均質について詳細に検討する。数値シミュレーションにより、GPS や小繰り返し地震で観測されている深部側での余効すべりに対して、間隙水圧の推定へのフィードバックを図る。最終的にこれらの観測事例とシミュレーションを組み合わせることで、切迫度に影響する様々な事象の効果を理解する。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

1. 小繰り返し地震や GPS データによるプレート境界でのすべりモニタリング

小繰り返し地震を用いたプレート境界でのすべりモニタリングを継続した。2010 年は、東北日本の日本海溝沿いで 249 個の新たな小繰り返し地震が抽出された。それらの活動から、福島県沖から宮城県沖の海溝に近い場所において 2008 年にすべり速度が加速した後、そのすべり速度がしだいに減速していることが分かった。

GEONET と東北大学の GPS データを統合処理し、日々の座標値がルーチ的に算出可能なシステムを開発した。解析には GIPSY-OASIS II Ver. 6.0 を用いた PPP (精密単独測位法) を採用した。4 コアの CPU (Xeon 2.4GHz) を搭載したサーバマシン 1 台を用いて並列処理を行うことにより、東北大学と GEONET の観測点を合わせた 1,324 観測点分の日毎の座標値算出が 2.5 時間という極めて短い時間で解析が終了するシステムを構築し、本運用を開始した。本システムにより精密暦が公開される 14 日前までの日々の座標値 (ITRF 系準拠) を得ることができる。また平行してプレート間カップリングを GPS 時系列データより逐次推定する手法の開発を行った結果、実運用に向けて目処が立った。

2. 地震サイクルに伴うすべり欠損・前駆すべり・余効すべり過程の数値シミュレーション

西南日本における深部ゆっくり地震の移動現象について、Matsuzawa et al. (2004) が余効すべり伝播過程で提唱した、小アスペリティの連鎖反応というモデルを適用したところ、定性的に説明することが出来た。この伝播現象は、巨大地震発生前になると、発生間隔が短く、伝播速度が速く、解放モーメント率が増加する傾向がみられた (図 1, 2)。有効法線応力の値は、深さ 30km で 50MPa と想定しているが、伝播速度が 13km/day となっている。このことは、特徴的すべり量がさらに小さいモデルを想定すれば、これ以上小さな有効法線応力としなくても、観測されている伝播速度を定量的に説明できる可能性があることを示唆するものである。

3. メカニズム解を用いた応力場の調査

2005 年宮城県沖地震の震源域の周囲で発生した中小規模地震のメカニズム解を用いて応力場の推定を行った結果、宮城県沖の応力場の空間不均質は小さいことが明らかとなった (図 3)。宮城県沖では震源域の東端を境にプレート境界の沈み込み角度が 10°程度から 25°程度に変化しており、推定された宮城県沖の応力場は震源域内ではプレート境界に対する法線応力がその東側よりも大きくなる (図 4)。

4. プレート境界での大小地震が入り混じった地震クラスターによる相互作用の検証

前年までの成果により、2つの地震のうち小さい方の地震のコーナー周波数付近のコヒーレンスを用いると、地震の規模によらず繰り返し地震とそうでないものの区別が明瞭にできることが分かったため、これを東北日本沈み込み帯全域に適用し中規模地震の抽出を行った。67 個の平均マグニチュード 4.5 以上の中規模地震グループのうち、地震観測網に近く、震源決定精度がよい 4 つについて、そのアスペリティ周辺の地震の時空間変化について調べた (図 5)。その結果、すべての中規模地震についてすべり域内に小地震の震源があること、それらの小地震の発生時期が、中規模地震のサイクルの後半に多いことが分かった (図 6)。これらの小規模地震の活動は、中規模地震のアスペリティへの応力集中を表していることが考えられ、アスペリティの応力レベルを小規模地震の活動から推定できる可能

性を示す.

なお, 研究はおおむね計画どおりに進んでいる.

====平成 23 年度の成果====

「課題番号: 9100」

2011 年の東北地方太平洋沖地震について, その余震域をみると, 過去の複数の M7 クラスの地震の震源域を包含していることが分かる (図 7). このような関係は, 釜石沖地震や, 前年度の研究中規模地震について見出されたものとよく似ている. このような階層的構造やそこでの地震活動の調査は, 東北日本プレート境界での地震発生過程を解明する上で重要だと考えられる. 今後 2011 年の地震のアスペリティを含め, 大小アスペリティが重なった場所での地震活動を精査する予定である.

また, 小繰り返し地震の積算すべりにより 1993-2007 の震源域のカップリング率を調べたところ, 2011 年の地震は, 地震前に広域にカップリング率が大きかった場所で発生したことが分かった (図 8). さらに GPS データにより推定された地震時すべり (図中のコンター, Iinuma et al, 2011) は三陸沖や, 関東地方の沖, 断層深部領域など, カップリング率が小さい場所には大きなすべりは及んでいないことも分かった. このような場所が地震の破壊の進展を妨げる働きをした可能性がある.

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う準静的すべりの特徴を調べた結果, 余効すべりはフィリピン海プレートの北限に沿って伝播している様子がみられる. (図 9). フィリピン海プレートと太平洋プレートの間は, 小繰り返し地震の解析より固着が弱く安定すべりが卓越している他, フィリピン海プレートの北限は, 南に行くほど浅くなることが知られている. 一方で, 昨年度までの成果より, 余効すべりは摩擦パラメーター $A(=a \sigma)$ の値が小さいほど, 遠くに速く伝播することが知られている. このため, 卓越した余効すべりがフィリピン海プレート北限に沿ってレーン状に伝播する場合, 南に行くほど浅くなる (σ が小さくなる) ことから, 摩擦パラメーター a の値が南浅でも低い値となる場合, 1677 年に発生した房総半島沖地震震源域まで到達する可能性があることを指摘した (図 10). これらの結果は, 巨大地震発生後に誘発される地震について, 準静的すべりが重要な鍵となることを意味し, その特徴を理解するためには摩擦特性や, より小規模のスケールで詳細なモニタリングをすることが今後さらに必要となる.

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので, 平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J-P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 62, 1-10, doi: 10.5047/eps.2010.09.003, in press.

Ariyoshi, K., T. Hori, Y. Kaneda, J-P. Ampuero, T. Matsuzawa, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, EFFECTS OF SMALL ASPERITIES ON MIGRATION OF SLOW-EARTHQUAKES ALONG TRENCH DIRECTION OF SUBDUCTION PLATE BOUNDARY: INVESTIGATION THROUGH A 3-D NUMERICAL SIMULATION, *Advances in Geosciences (Proceedings of AOGS 6th Annual Meeting 2009)*, in press.

飯沼卓史, 松澤暢, 長谷川昭, 変位勾配から見た東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化, 日本測地学会第 114 回講演会, 2010.

太田雄策, 三浦哲, 松村信介, 森俊行, 低価格 2 周波 GPS 受信機とデータロガーを用いた GPS 観測システムの構築, 測地学会誌, 56(3), 101-106, 2010.

太田雄策, 三浦哲, 松村信介, 森俊行, 低価格 2 周波 GPS 受信機とデータロガーを用いた GPS 観測システムの構築, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉, 幕張メッセ, SGD001-P01, 2010.

太田雄策, 小林竜也, 三浦哲, 高須知二, 中・長基線 RTK-GPS 時系列の長期安定性とそのノイズ特性評価, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 千葉, 幕張メッセ, SGD001-P02, 2010.

鈴木健介・日野亮太・伊藤喜宏・金沢敏彦・山田知朗・篠原雅尚・植平賢司・山本揚二郎・金田義行, 宮城県沖における応力場とプレート間固着強度の関係, 日本地震学会 2010 年, 秋期大会, 広島, 広

島国際会議場, 2010 年 10 月.

内田直希・松澤暢・長谷川昭, 東北日本の中規模繰り返し地震の分布とそのアスペリティでの特徴的地震活動, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 広島国際会議場, 2010 年 10 月.

有吉 慶介・松澤 暢・矢部 康男・加藤 尚之・日野 亮太・長谷川 昭・金田 義行, 東北地方太平洋沖地震・スマトラ島沖地震における連動型地震の考察, JAMSTEC Rep. Res. Dev., Volume 13, September 2011, in press

(9) 平成 23 年度実施計画の概要：

GPS データによるプレート境界でのすべりモニタリングについては、平成 22 年度内に自動 GPS データ解析および数ヶ月単位でのプレート境界でのすべり欠損分布推定という各要素の開発はほぼ終了したため、平成 23 年度はそれらを統合運用することによってプレート間での歪み蓄積の時空間的な不均質性について準リアルタイムでの詳細な検討を行う。また、並列化をより進めて、推定が安定する長期の解析においても早期に解析が終了するように努める。小繰り返し地震については、中規模地震もモニタリングに組み込むことができるよう準備を進める。地震サイクルに伴うすべり欠損・前駆すべり・余効すべり過程の数値シミュレーションでは、今年度の結果で示されるように、相似地震の揺らぎとゆっくり地震の伝播現象とは関連性が深いと考えられる。そこで、小繰り返し地震発生モデルとゆっくり地震伝播モデルの 2 種類のモデルを構築し、巨大地震発生前や余効すべりを伴う連動破壊の際に期待される変化について、両者の共通点・相違点を調べる。メカニズム解を用いた応力場の調査においては、震源位置の高精度化を図ったメカニズム解に基づき、プレート間すべりに対応した局所的な応力の時空間変化を調べて、応力場の時空間変化に基づく地震発生の切迫度評価の可能性を探る。プレート境界での大小地震が入り混じった地震クラスターによる相互作用の検証については、本年度同定した中規模地震の周囲での地震活動の時空間変化を詳細に調べ、相互作用や地震サイクルに関する普遍的な性質の抽出を試みる。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

内田直希・伊藤喜宏・松澤暢・太田雄策（東北大学理学研究科）、ほか 5 名程度（大学院生含）

他機関との共同研究の有無：有

海洋研究開発機構 有吉慶介

(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@aab.geophys.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aab.geophys.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：内田直希

所属：東北大学大学院理学研究科

電話：022-795-3917

FAX：022-264-3292

e-mail：uchida@aab.geophys.tohoku.ac.jp

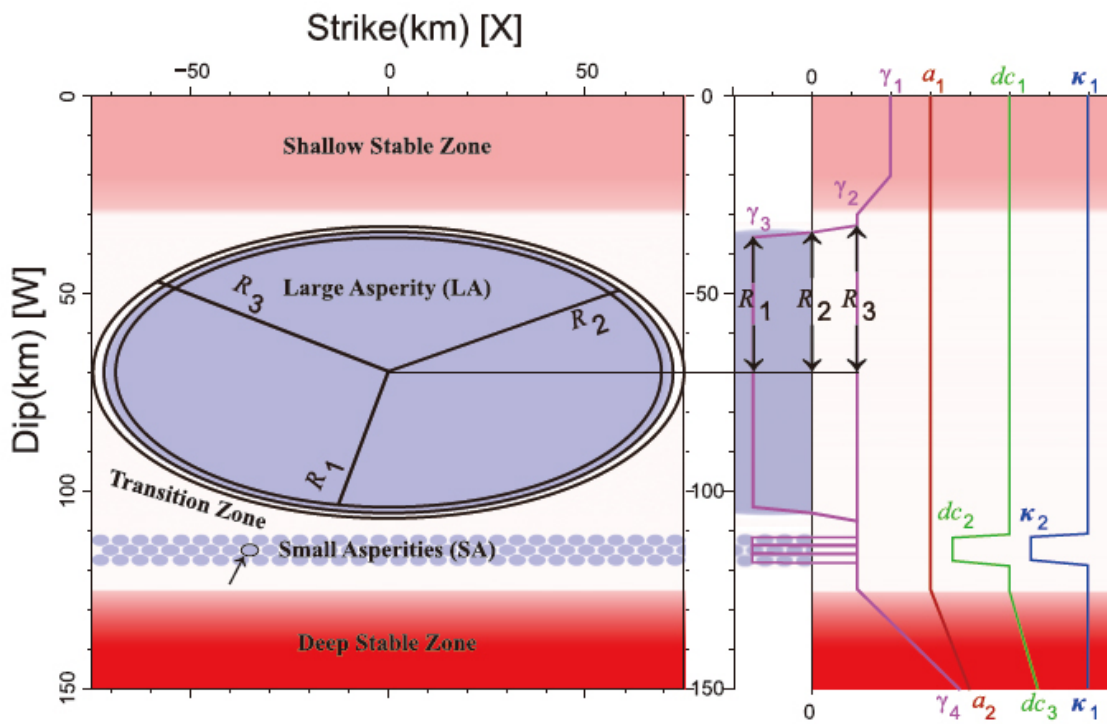


図 1.

シミュレーションに用いた 15 度傾いたプレート境界上の摩擦パラメータ分布. ここで, $\gamma = a - b$, $\kappa = \sigma / \{(\rho_r - \rho_w)gh\}$, $(a_1, a_2) = (2, 5) \times 10^{-3}$, $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) = (0.5, 0.01, -0.3, 4.9) \times 10^{-3}$, $(dc_1, dc_2, dc_3) = (10, 0.43, 100) \text{ [mm]}$, $(\kappa_1, \kappa_2) = (1.0, 0.1)$. アスペリティの短軸半径は, 大アスペリティ(LA)に関して, $(R_1, R_2, R_3) = (35, 36.25, 37.5) \text{ [km]}$, 小アスペリティ (SA) に関して, $(r_1, r_2, r_3) = (1.33, 1.5, 1.67) \text{ [km]}$ とした. ここでアスペクト比は大アスペリティ 2.0, 小アスペリティ 1.5.

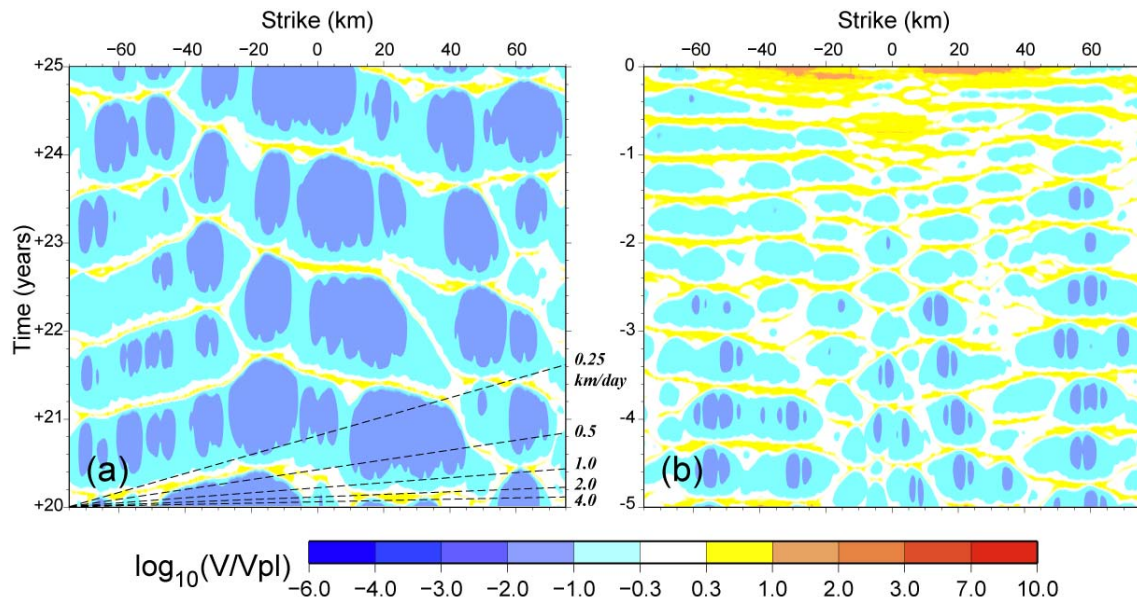


図 2.

Dip が 115km (図 1 で SA が分布する領域) でのインターサイスミック (a) および大きなアスペリティの破壊直前 (b) のすべり速度の時間変化. 大地震発生前になると, 発生間隔が短く, 伝播速度が速く, 解放モーメント率が増加する様子が分かる.

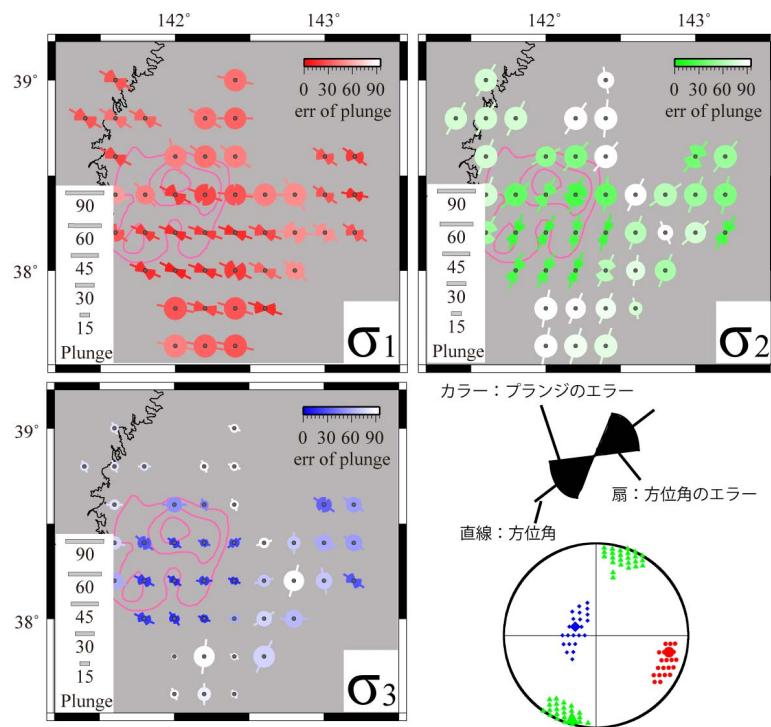


図 3.

プレート境界近傍の応力場。推定された主応力軸（最大主応力： σ_1 ，中間主応力： σ_2 ，最小主応力： σ_3 ）を示す。主応力軸の方位角・プランジを直線の向き・長さで示し，それらのエラーを扇形・カラーで示す。また，震源球は宮城県沖の広域応力場を表す。

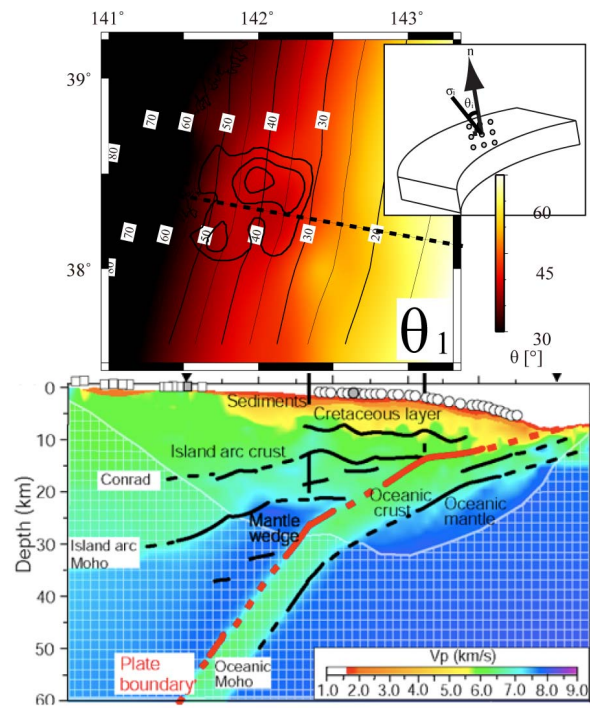


図 4.

最大主応力軸とプレート境界のなす角度 (θ_1) とプレート境界形状の比較. (上) θ_1 の分布. カラースケールで最大主応力軸とプレート境界のなす角度を示す. (下) Ito et al. (2005) によって推定された上図中の点線の断面における宮城県沖のプレート境界形状.

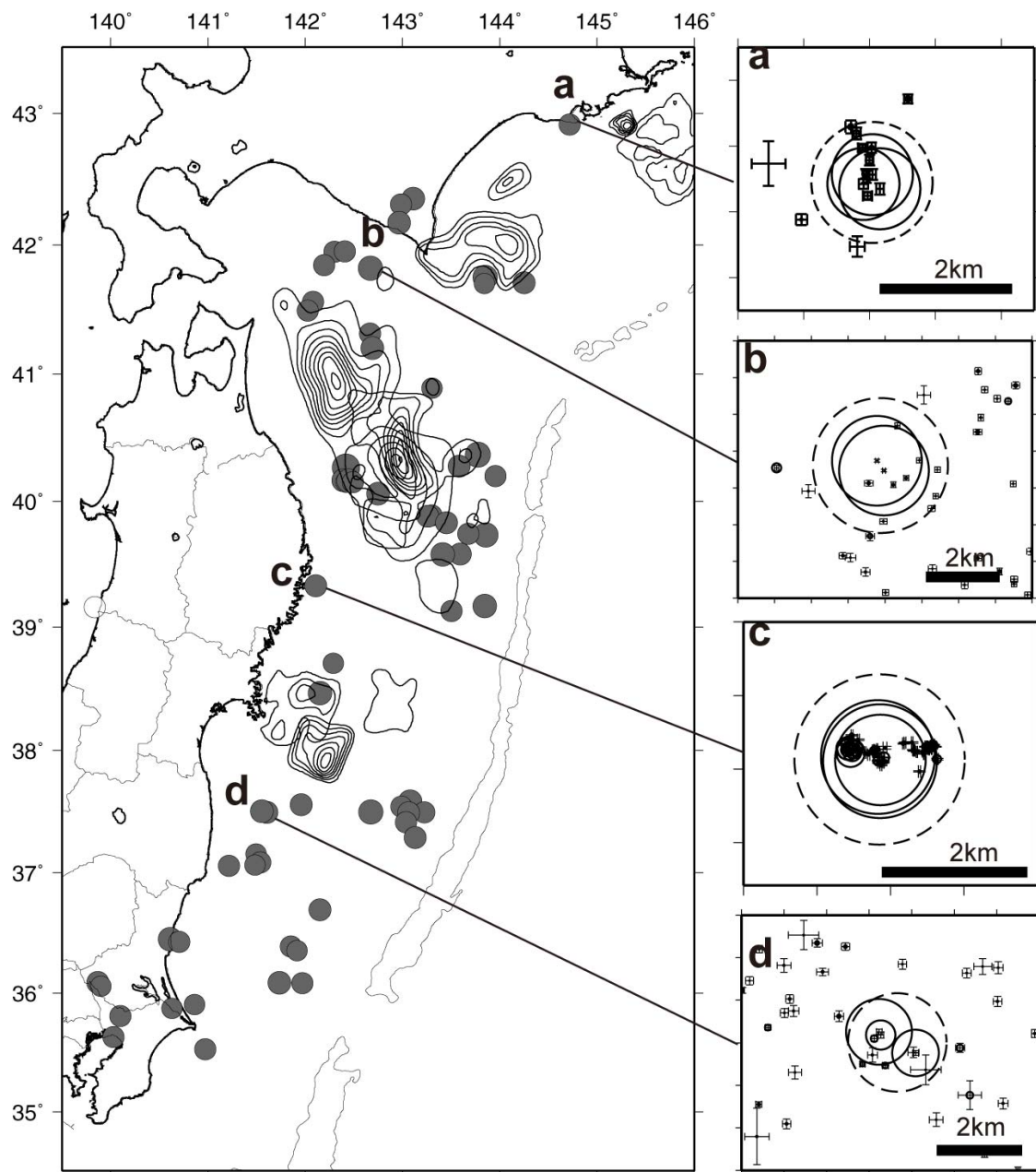


図5.

M4.5 以上の中規模繰り返し地震グループ（灰色丸）の分布とそのなかの4つの孤立的中規模繰り返し地震グループ近傍の地震分布（ダブル・ディファレンス法による震源再決定結果）。領域cは波形相関による走時差，それ以外はカタログ読み取り値による走時差データを用いた。震源を中心とする円は応力降下量 380bar を仮定したおよその断層サイズ。破線円は繰り返し地震のセントロイドの重心から半径の 1.5 倍の距離の範囲を示す。

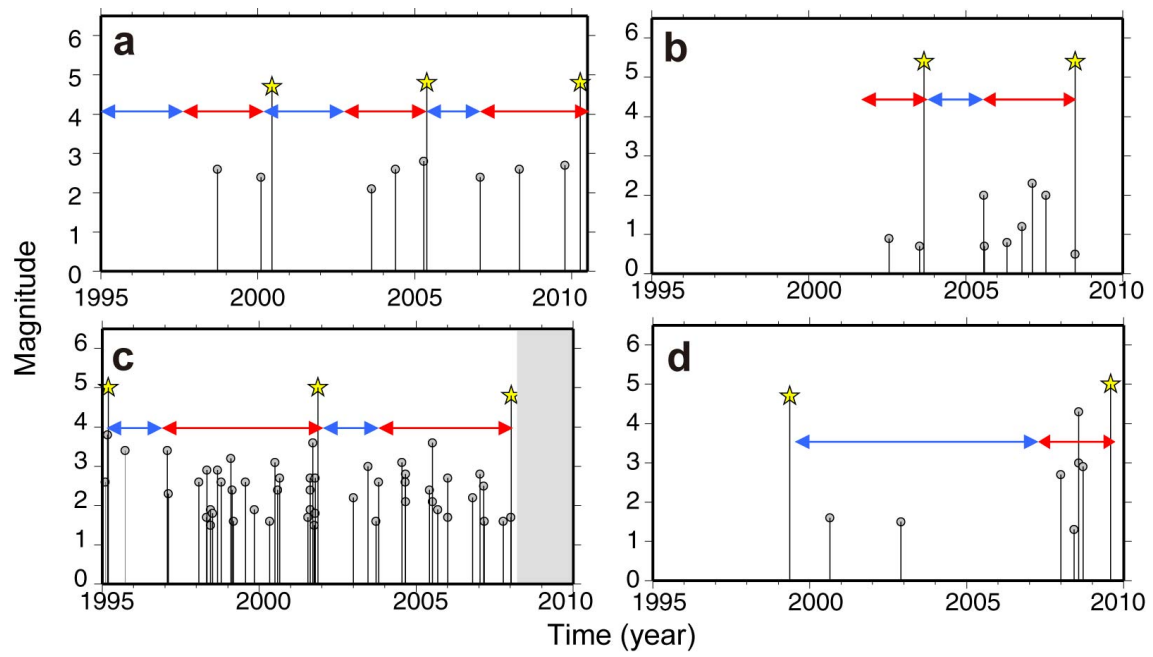


図6.

図5の破線円内の地震活動．黄色い星で示した中規模繰り返し地震の後，地震が少ない時期（青両矢印）があり，その後活発化する時期がある（赤両矢印）ように見える．

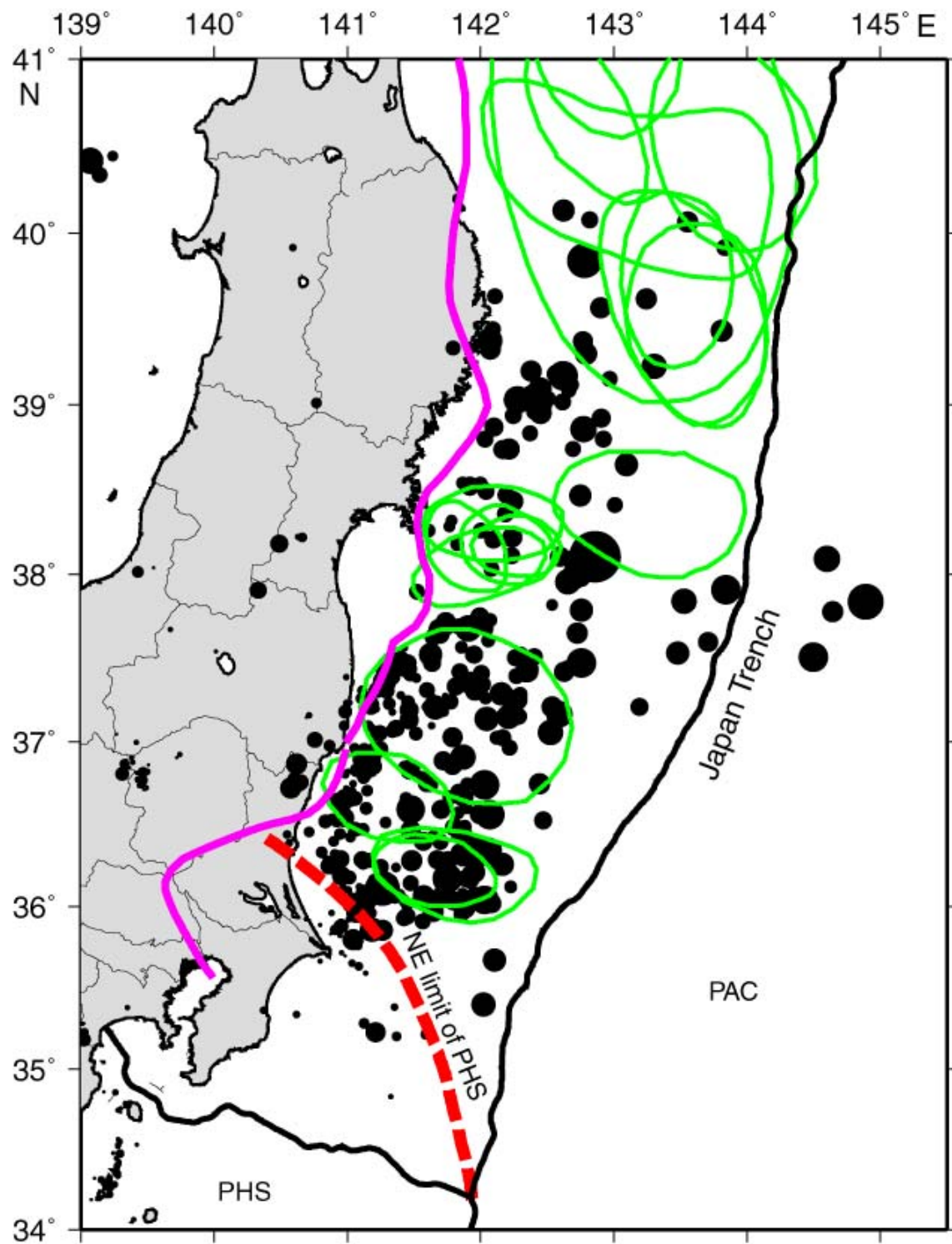


図7.

2011年東北地方太平洋沖地震の余震（黒丸，1日間，気象庁による）と1926年以降のM7以上の地震の余震域（緑丸，Uchida et al., 2009）。ピンクの線は，プレート境界地震の下限（Igarashi et al, 2001; Uchida et al., 2009）。

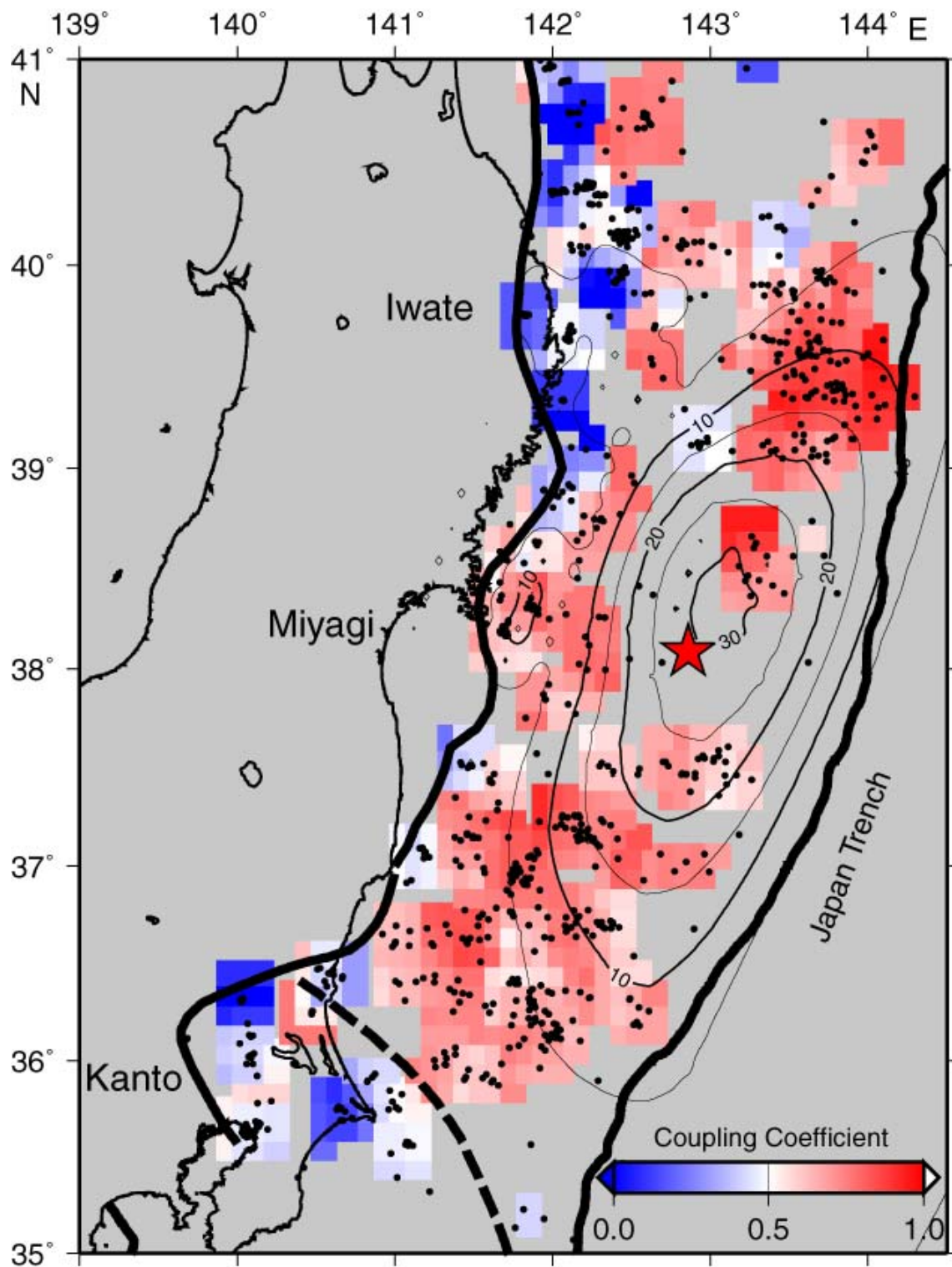


図8.

1993-2007 の太平洋プレート上面のカップリング率の分布（カラー）。黒丸は小繰り返し地震の位置を示す。コンターは Iinuma et al., 2011 による 2011 年東北日本太平洋地震のすべり量分布，赤星は気象庁による震央。黒太線はプレート境界地震の下限 (Igarashi et al, 2001; Uchida et al., 2009), 破線はフィリピン海プレートの北東限 (Uchida et al., 2009).

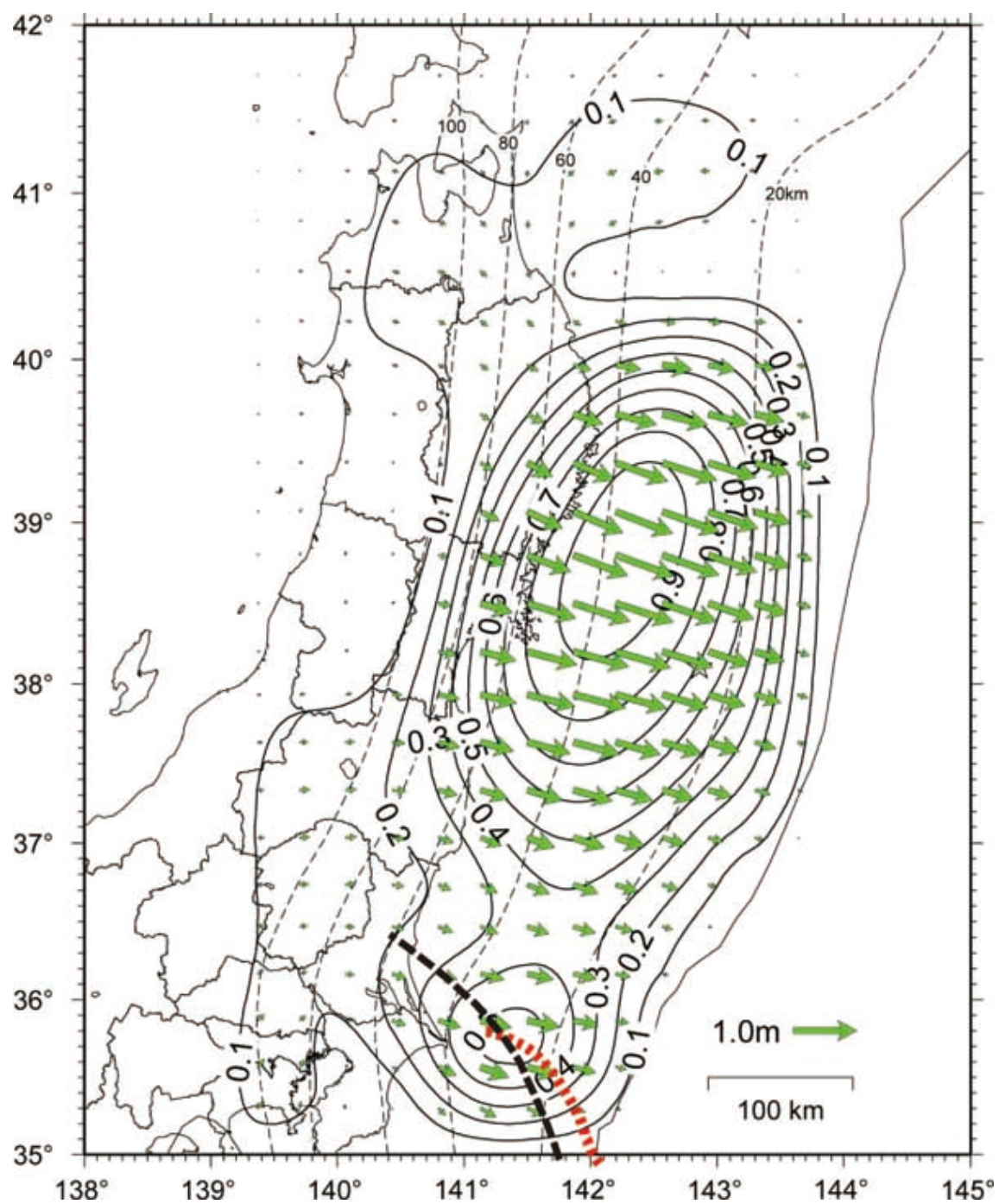


図9.

2011年東北地方太平洋沖地震後のプレート境界面上のすべり分布 (国土地理院, 2011) と、赤破線はフィリピン海プレートの北限 (Miura et al., 2008: 赤破線, Uchida et al., 2009: 黒破線) を重ねた図.

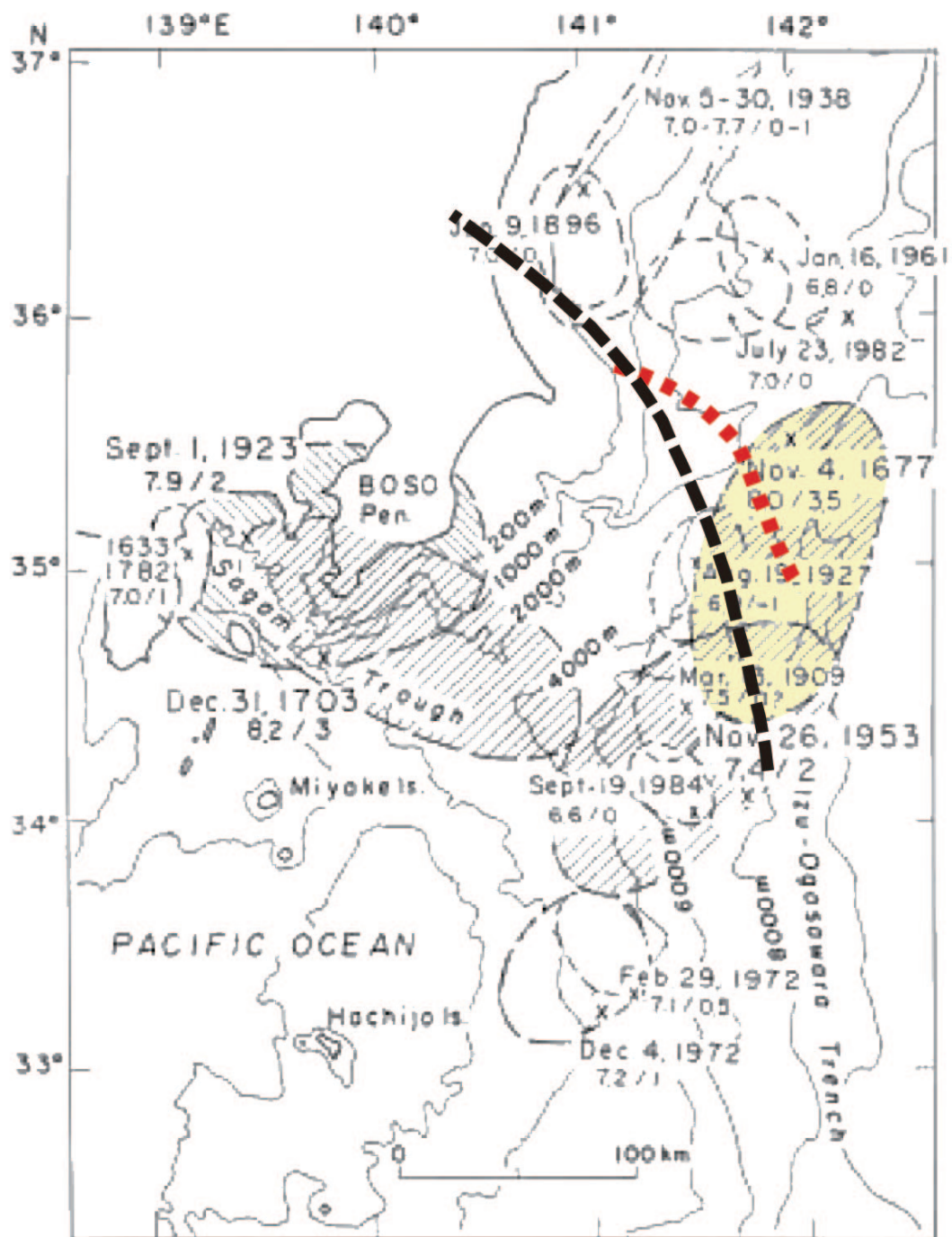


図10.

関東・房総沖における津波の波源域分布 (羽鳥 (2003) を一部修正). 赤破線と黒破線は図9と同じ.