

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

マルチスケール・アスペリティモデルの構築と拡張

(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

(3-2) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

(4) その他関連する建議の項目：

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

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

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

エ．スラブ内地震の発生機構

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-2) 地震破壊過程と強震動

イ．強震動・津波の生成過程

(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

(5) 本課題の5か年の到達目標：

本研究においては、プレート境界地震について地震時すべり分布・断層サイズの推定や高精度震源決定等によるアスペリティ領域のマッピングを行うとともに、アスペリティの階層構造や複合破壊の条件を明らかにする。また、内陸地震・スラブ内地震については、アスペリティモデルに基づく破壊過程・強震動生成域の理解が可能かどうか検討を進め、アスペリティモデルの拡張を行う。このような研究を行うことで、上記方針を実現化し、地震・火山噴火予知研究上不可欠である、破壊過程・地震発生過程の理解をすすめるものである。

本研究で狙いとするアスペリティモデルに基づく震源モデルの高度化のためには、実際に発生した地震について震源解析の研究が必要であるが、そのためには、より多くの事例を取り扱うとともに、幅広い空間スケールでアスペリティを捉え、どのような階層構造をなしているのかを明らかにすることが重要である。また、これまでの研究から、プレート境界地震については、アスペリティモデルが成り立つことが強く示唆されているが、内陸・スラブ内地震についても、アスペリティモデルの成否の検討を引き続きすすめる必要がある。そこで本研究では、微小地震から大地震にいたる幅広いスケールの地震を対象とし、下記のような研究を実施する。

1. 地震波形インバージョン・地殻変動インバージョン・高精度震源決定による、プレート境界に発生した中～大地震の震源過程の推定
2. プレート境界およびその周囲における微小地震活動によるアスペリティマッピング
3. プレート境界に発生する小地震の断層サイズの推定と高精度震源決定による小アスペリティ分布および活動の推定
4. 上記の観測・研究に基づく、プレート境界・内陸・スラブ内地震のアスペリティモデルの構築

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度は関係するこれまでの研究成果に基づきそれぞれの研究を実施する。

1. 地震波形インバージョン・地殻変動インバージョン・高精度震源決定による、プレート境界に発生した中～大地震の震源過程の推定

東北地方を中心として、プレート境界に発生した中～大地震を対象に、地震波形インバージョン・地殻変動インバージョンにより地震時のすべり量分布を求める。本年度は、繰り返し地震の可能性について指摘されているいくつかの中規模地震について、波形・震源位置の検討および地震波形インバージョンによる地震時すべり分布の推定を行い、繰り返し地震の可能性についての検討を行う。

2. プレート境界およびその周囲における微小地震活動によるアスペリティマッピング

宮城県沖における海底繰り返し地震観測の結果、プレート内部で発生する中小の地震の分布とプレート境界におけるすべり分布との間に相関があることがわかりつつある。このことは、精度良く決定できる中小の地震の震源分布を用いることでプレート境界面上のすべり特性のマッピングが可能になることを示している。本項目では、こうした相関関係が成り立つかどうかを複数の事例において検証するとともに、中小の地震の震源分布を利用した高空間分解能のアスペリティ(すべり特性)マッピングも試みる。

3. プレート境界に発生する小地震の断層サイズの推定と高精度震源決定による小アスペリティ分布および活動の推定。

地震クラスターに含まれる小地震については、コーナー周波数を高精度で推定して断層サイズを求め、DD法による震源決定ともあわせて、小アスペリティの相対的位置と地震活動の特徴の関係についても抽出する。さらに、小繰り返し地震の破壊域や応力降下量等の推定をもとに、アスペリティの繰り返し破壊の同一性・非同一性の程度とその原因について調べる。

4. 上記の観測・研究に基づく、プレート境界・内陸・スラブ内地震のアスペリティモデルの構築

1～3の研究により推定したプレート境界型地震のアスペリティ領域を比較し、アスペリティの階層構造について検討する。得られたアスペリティ領域と余震分布・地震前(先駆的)地震分布や地震波速度構造との比較を行い、アスペリティ・非アスペリティ領域の特徴を抽出する。同様の比較研究を内陸・スラブ内地震に対しても行い、プレート境界地震と同様な、アスペリティモデルに基づく破壊過程・強震動生成域の理解が可能かどうか検討を進める。このような研究を通じ、アスペリティモデルの構築・深化を目指す。

本課題の目標達成のためにはできるだけ多くの事例について研究を行うことが必要である。そこで平成22年度以降についても、実施期間内に発生した地震などを対象とし、同様の研究を継続実施する。

(7) 平成22年度成果の概要：

本年度は関係するこれまでの研究成果に基づきそれぞれの研究を実施した。

1. 地震波形インバージョン・地殻変動インバージョン・高精度震源決定による、プレート境界に発生した中～大地震の震源過程の推定

岩手県種市沖では、図1-1に示すように、中規模の繰り返し地震のクラスターがいくつか見ついている(山田・他, 予知連会報, 82, 84-90, 2009)。この中規模繰り返し地震と1994年三陸はるか沖地震(M7.6)の最大余震(1995年1月7日M7.2)の関係については、昨年度にも報告しているが、今年度は気象庁との共同研究により、さらに丹念な解析を行った。

ここでは1994年三陸はるか沖地震の最大余震(M7.2)の気象庁の加速度デジタル記録を数値積分して速度波形に変換した後、20秒の帯域通過フィルターをかけて解析を行った。グリーン関数としては、山田・他(2009)によって発見されたM6の中規模繰り返し地震のグループ(グループA; 図1参照)の中で、1995年に発生したM6.2の地震の加速度デジタル波形を、M7.2の地震と同様に数値積分・フィルター処理したものの経験的グリーン関数として用いた。M6.2とM7.2の両方で初動の立ち上がりが良い波形を探し、最終的にP波について4観測点、S波について3観測点のデータを採用した。M7.2の地震とM6.2の地震でSの二重差(到達時刻の差についての二つの観測点の差)はPの二重差の V_p/V_s 倍になるという性質を利用して、Pの初動のみならず、Sの初動も高精度で推定し、multi-time window法(Hartzell and Heaton, 1983)を用いてM7.2の地震の破壊過程を調べた。

得られた結果を図1-2に示す。ここでM7.2の地震の破壊の開始点を緑星印で、また山田・他(2009)が再決定によって求めたM6.2の地震の震央を赤星印で示す。大局的な性質は昨年度の成果と変わらないもの、

- 1) M7.2の地震の破壊は、M6.2の地震とは反対方向の西および南に伝播し、
- 2) M6.2の地震の震源付近では、M7.2の地震のすべり量は小さかった、

という性質をより明瞭に示すことができた。これにより、M7.2の地震のときにM6.2のアスペリティがすぐに壊れなかった理由がある程度は説明可能であるものの、それだけで説明するのは困難であり、アスペリティの強度あるいは間隙水圧の時間変化を導入しなければ説明しにくいように思われる。つまり、1994年三陸はるか沖地震の発生により、その周囲のプレート境界では剪断応力が増加するが、本震に近い側ではシールが破れることによって一時的に間隙水圧が低下し、結果的に本震に近い側で一時的に壊れにくくなったというモデルについても、検討してみる価値はあるように思われる。

2. プレート境界およびその周囲における微小地震活動によるアスペリティマッピング

海底地震観測および陸上観測の併合処理データによって得られたP, S波到達時刻から地震(2005年8月16日～2009年10月31日)を山本・他(2009)の三次元地震波速度構造を用いて震源を決定した。その後、P波初動極性(陸上+OBS)とS/P振幅比(陸上観測点)を用いてメカニズム解を決定した。宮城県沖に配置した小領域において得られたメカニズム解を用いてIto et al. (2009)によって応力場を推定し、プレート境界近傍の小領域を抜き出した(図2-1)。推定された主応力軸の方位角・プランジのエラーを考慮すると応力場には有意な差はみられず、宮城県沖の応力場の空間不均質は小さいと考えられる。宮城県沖全体のメカニズム解を用いて推定した広域応力場(図1右下)は、1軸の方位角は海陸プレートの相対運動方向にほぼ一致し、3軸の方向は鉛直に近く、プレート間相対運動に伴う逆断層型(プレート境界型)地震を引き起こす応力場であり、各小領域で推定された応力場もおおむね同様の傾向を持つ。

想定宮城県沖地震の震源域である1978年宮城県沖地震のアスペリティ東端では、プレートの沈み込み角度が25°程度から30°程度に変化しており、プレートの沈み込み角度の変化(折れ曲がり)が存在し、アスペリティとプレート境界形状との間に対応関係が存在する(図2-2)。

主応力軸($\sigma_i, i=1, 2, 3$)とプレート境界の法線とのなす角度(θ_i)の分布を図2-3に示す。 θ_i は、プレート境界の沈み込み角度が変化するアスペリティの東端付近で変化をしており、プレート境界・アスペリティに対応するような分布をする。特に最大主応力軸(σ_1)とプレート境界とのなす角度(θ_1)に注目すると、非アスペリティ域よりもアスペリティ域の θ_1 が小さく、プレート境界に対

して立つ（直交）するような最大主応力軸方向をもつ．この最大主応力軸とプレート境界のなす角度からアスペリティ域では非アスペリティ域に比べて垂直抗力が大きく，摩擦力が大きいために固着が強くなっていることが考えられる．プレート境界に働く剪断応力については最小主応力軸（3）の影響も考えなければいけないが，応力比の推定精度が低く 1, 3 の相対的な大きさの議論ができないために剪断応力の議論は難しい．

i の空間分布においてはプレート沈み込み方向（東西）に対する変化が存在するが，海溝軸に平行な方向（南北）に対する変化は小さい（図 2-3）．そこで，マントルウェッジ内の V_p/V_s に注目すると南北方向に変化し，アスペリティ域では低 V_p/V_s ，非アスペリティ域では高 V_p/V_s といった地震波速度構造とアスペリティとの間に対応関係が存在する（図 2-4）．以上のことから南北のプレート間固着強度の変化は物質の変化によるものであると考えられる．宮城県沖のプレート間固着強度はプレート形状による応力変化（東西），物質による摩擦特性変化（南北）によってきまっているのかもしれない．

3．プレート境界に発生する小地震の断層サイズの推定と高精度震源決定による小アスペリティ分布および活動の推定．

岩手県釜石沖の地震クラスターについて，2001 年および 2008 年の M4.9 前後の地震の初期破壊点の位置を求めた．

これまでにセントロイドの位置が波形相関を用いた走時差の推定により精度よく求められているので，その場所を基準として初期破壊点を求めた．具体的には，正確に読みなおした初動読み取り値を用い，セントロイドと震源（初期破壊点）の位置がおよそ 300m 以内であるクラスター内の小地震の震源をセントロイドに固定し，2001 年および 2008 年の M4.9 前後の地震の震源のみを求めた．その結果，2 つの M4.9 前後の地震とも震源はアスペリティの南東端付近（断層の浅い側）に存在することが分かった（図 3 - 1）．

さらに，クラスター内の中心付近の小地震グループと深い側の端の小地震グループの地震のおよそ 1 ヶ月以内での連動性から，非地震性すべりの浸み込みが，アスペリティの深部でエピソードに起きている可能性が示された（図 3 - 2）．

求められた震源はこのエピソードなすべりの発生域や，クラスター内の小地震の発生場所のいずれとも一致しておらず，M4.9 前後の地震の破壊の開始とこれらの活動との直接的な関係は見つからなかった．

4．上記の観測・研究に基づく，プレート境界・内陸・スラブ内地震のアスペリティモデルの構築
本年度はプレート境界地震を対象に上述の 1.~3. の個別の研究を進めた．さらに 2. については微小地震活動にあわせ，地震波速度構造との比較を行なった．平成 23 年度以降にさらに検討を進める予定である．

====平成 23 年度の成果====

「課題番号：9100」

・2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布を、GPS 観測から得られた地震時変位を基に逆解析手法を用いて求めた。主たる破壊域はプレート境界深さ 30km より浅い、大陸地殻が沈み込むプレートと接している領域にあり、2003 年の福島県沖の地震や 1981 年の宮城県沖の地震の破壊域を包含する。一方、それよりも深い、大陸側のマントルと沈み込むプレートとが接しているところでは、これまで 1978 年宮城県沖地震のアスペリティ周辺にのみ大きなすべりが求まっており、近々発生すると考えられていた宮城県沖地震の想定震源域は、2011 年東北地方太平洋沖地震に際して破壊されたと考えられる。とはいえ、想定宮城県沖地震の規模 (M7.5 クラス) に比して、推定されたすべり量 (10m 以上) は有意に大きく、これまで繰り返し発生していた宮城県沖地震が、地震間に蓄積された歪をすべて解放していなかった可能性がある。(Iinuma et al., 2011)。

・防災科研 F-net の CMT 解を用い、2011 年東北地方太平洋沖地震震源域周辺での応力場の時間変化を推定した。得られた結果から、地震後に 1 軸がプレート境界により垂直に近づくセンスとなっていることがわかった。このことは、応力場がほぼ解放されたことにより説明することができる (Hasegawa et al., 2011)。

Iinuma et al., Coseismic slip distribution of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake (M9.0) estimated based on GPS data - Was the asperity in Miyagi-oki ruptured?, Earth, Planets, and Space, in press, 2011.

Hasegawa, A., K. Yoshida and T. Okada, Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth, Planets, and Space, in press, 2011.

(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) :

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

本課題の目標達成のためにはできるだけ多くの事例について研究を行うことが必要である。そこで平成 23 年度以降についても、実施期間内に発生した地震などを対象とし、同様の研究を継続実施する。

1. については、平成 23 年度は、このアスペリティの強度や間隙水圧の時間変化の可能性を探るために、いわき沖の M5.7 程度の繰り返し地震の解析を行う。いわき沖では、1958 年以降、M5.5 5.8 の地震が平均 8.5 年間隔で発生しているが、1997 年の M5.7 の地震は他の地震よりも高周波の波を放出しなかったことが、山田・他(2009)によって報告されている。このような現象が生じる理由としては、強度あるいは間隙水圧が時間変化している可能性と、一回り小さなアスペリティの破壊履歴の影響(普段は周辺の一回り小さなアスペリティも巻き込んで破壊するので高周波が生成されるが、周辺の一回り小さなアスペリティが破壊されつくした直後に本震が生じると、このような高周波は生じない)の両方が考えられ、長周期型であった 1997 年の地震と短周期が生成された 2005 年の地震の破壊過程を丹念に調べることによって、同じアスペリティの破壊で短周期の励起が異なる原因について情報が得られるものと考えられる。これらの情報を統合化し、種市沖、いわき沖、釜石沖といった中規模地震の破壊過程を比較することにより、アスペリティモデルをさらに高度化させることができると期待される。

2. については、宮城県沖をケーススタディとして、以下のような項目により微小地震によるアスペリティマッピングを継続する(宮城県沖 OBS 観測データを用いた応力場マッピング、小地震の応力降下量分布、陸上観測波形解析によるプレート境界・プレート内地震の分別 = プレート境界地震とプレート内地震とを区別して、あらためて b 値や応力降下量など、従来の地震活動マッピングを見直す) 3. については、釜石沖の地震に適用した手法を他の繰り返し地震クラスターにも適用し、小アスペリティ分布とその活動様式の関係について詳しく調べ、普遍的な現象の抽出を試みる。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

海野徳仁・松澤暢・三浦哲・日野亮太・伊藤喜宏・内田直希・太田雄策・岡田知己・他 計 10 名程度(大学院生含む)

他機関との共同研究の有無 : 有

筑波大学 八木勇治

気象庁 中村雅基・山田安之

内閣府 高木康伸

仙台管区気象台 丹下豪

(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.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.aob.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：岡田知己

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

電話：022-795-3919

FAX：022-264-3292

e-mail：okada@aob.geophys.tohoku.ac.jp

岩手県沖（種市沖）の固有地震

三陸はるか沖地震の最大余震の震源近傍に、M6の2グループの繰り返し地震

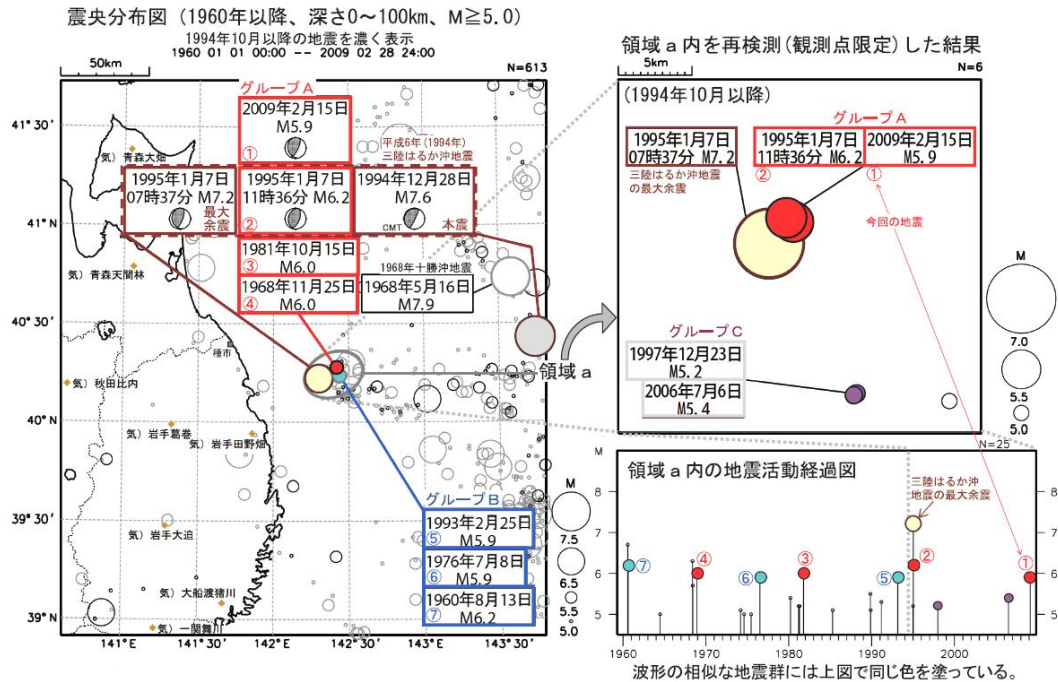


図 1-1 . 岩手県種市沖の中規模繰り返し地震（固有地震）と 1994 年三陸はるか沖地震の最大余震（1995 年 1 月 7 日 M7.2）との位置関係（山田・他，2009）。

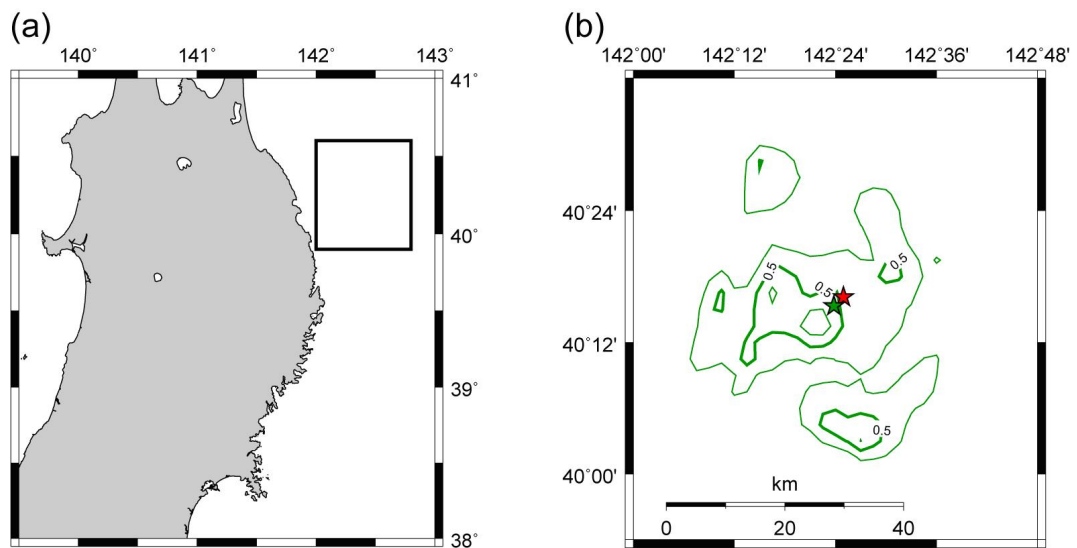


図 1-2 . 1994 年三陸はるか沖地震の最大余震 (M7.2) のすべり量分布と種市沖の中規模繰り返し地震の関係 . (a) 解析範囲 . (b) 波形解析で得られた M7.2 の地震のすべり量分布 . 最大すべり量で正規化して示す . 緑星印は震央を表す . 赤星印は山田・他 (2009) によって再決定された M6 の繰り返し地震グループ (グループ A) に属する 1995 年の M6.2 の地震の震央を示す .

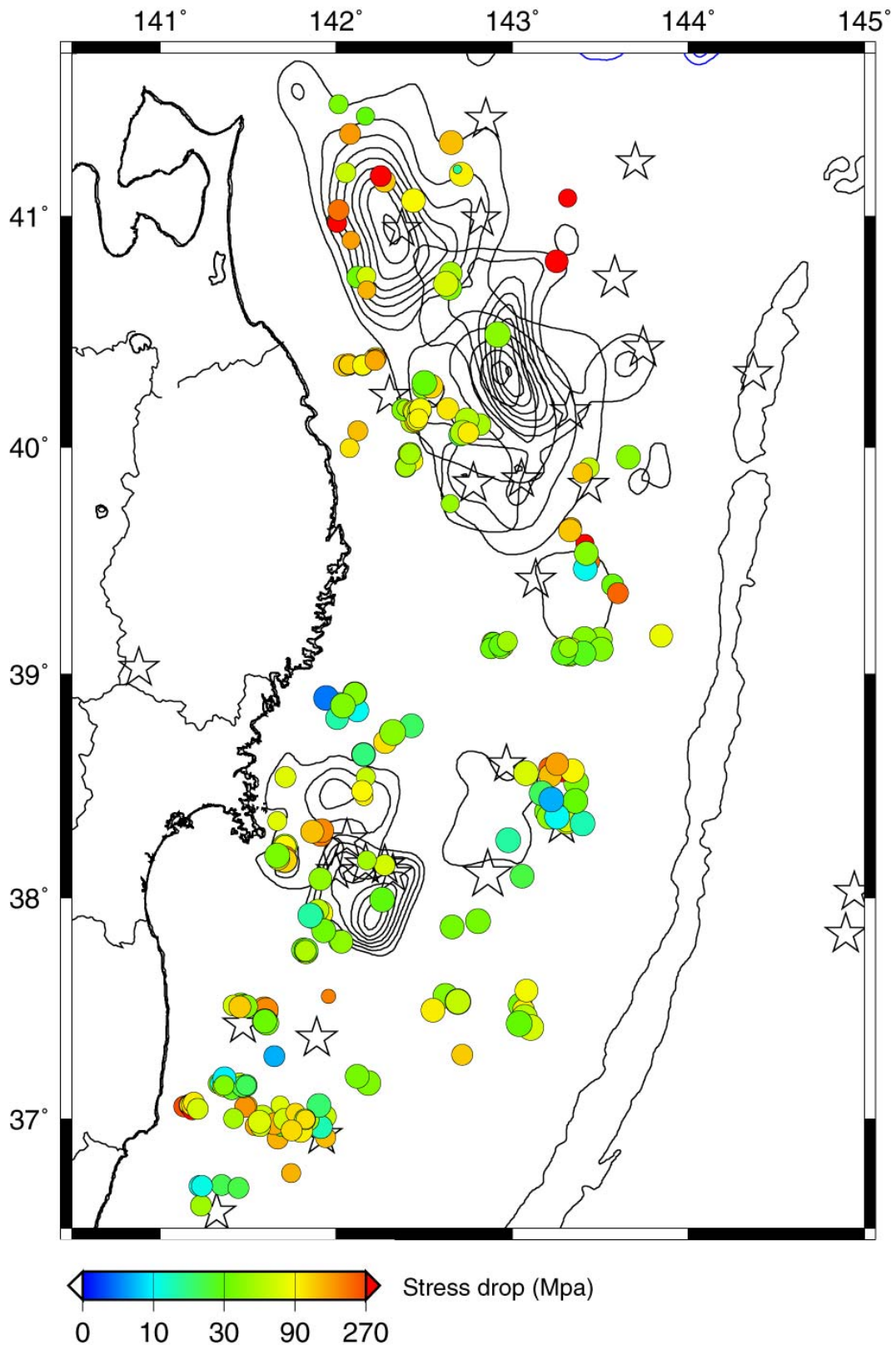


図 4-1. プレート境界地震の応力降下量分布 .

小繰り返し地震 (M3-4 程度), 中規模繰り返し地震 (M4-5 程度), 低角逆断層型地震 (F-net, M3.5-5 程度) について, コーダ部分のスペクトル比を取り, コーナ周波数及び地震モーメントを求め推定した .

東北大学微小地震観測網 (短周期および広帯域地震計, 100Hz サンプリング, 2003-2010) の記録を使用した .

コンターは Yamanaka and Kikuchi(2004) による $M \geq 7$ のアスペリティ分布, 白星は M7 以上の地震の震央を示す .

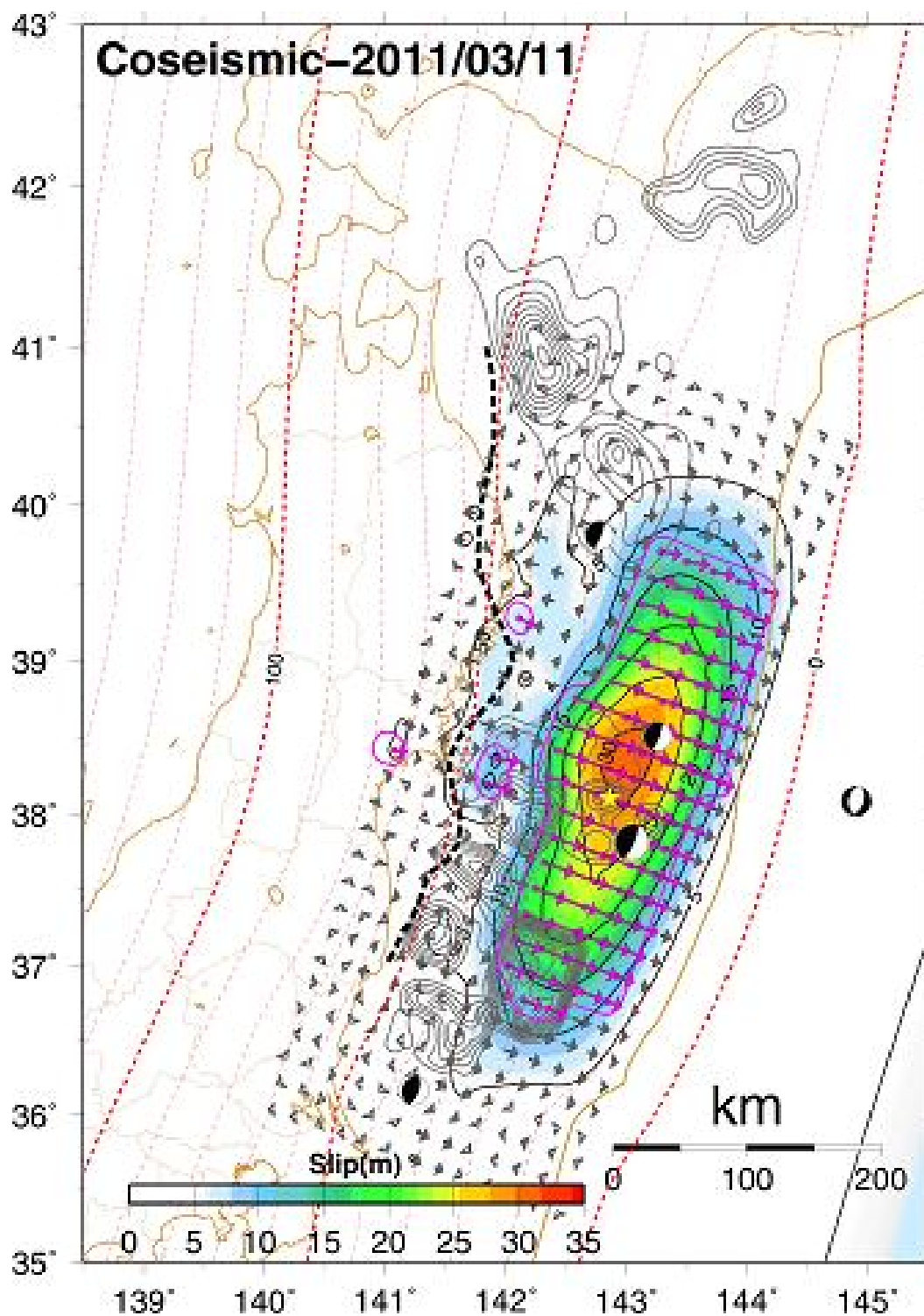


図 5-1 . 東北大学及び国土地理院の GPS 連続観測点で観測された地震時変位から推定された、2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布。

紫の線で囲まれた範囲の、紫の矢印で示されている推定値は推定誤差を上回っている。黄色の星は発震点を、震源球は北から順に、岩手県沖の余震 (3/11、Mw7.4)、3 月 9 日の前震 (Mw7.3)、宮城県はるか沖の余震 (3/11、Mw7.5)、本震 (3/11、Mw9.0)、茨城県沖の余震 (3/11、Mw7.7) のメカニズム解を示す (いずれも気象庁のもの)、黒の破線は Igarashi et al. (2001, JGR) による低角逆断層型地震の西縁を示す。

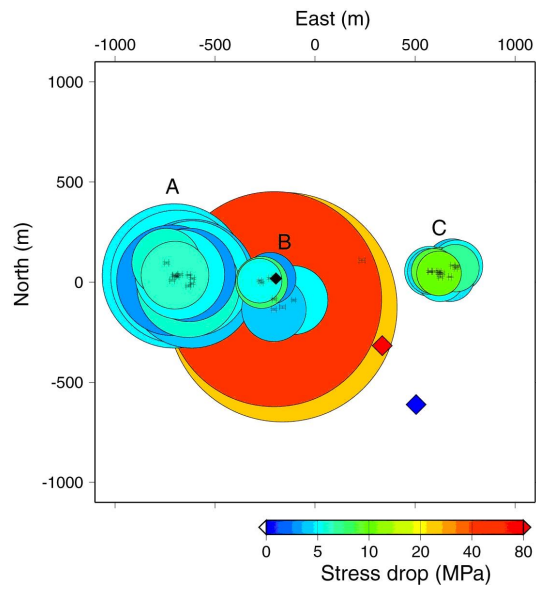


図3 - 2 . (a) 釜石沖地震クラスターにおける 1995-2008 年の M2.4 以上の地震の滑り域 (円) と応力降下量 (カラー) [前年度報告] に初期破壊点 (2001 年青菱形, 2008 年赤菱形) を追加したもの . (b) グループ A と B (図 a 参照) について, グループ A の地震後 50 日以内に B が発生した事例 (B の発生回数 12 回のうち 9 回) のグループ A の地震からの距離の時間差の関係 . A-B 間の距離と時間差に比例関係がみられる . これは深い側 (A 側) から中心側 (B 側) への非地震性すべりの伝播を表している可能性がある .

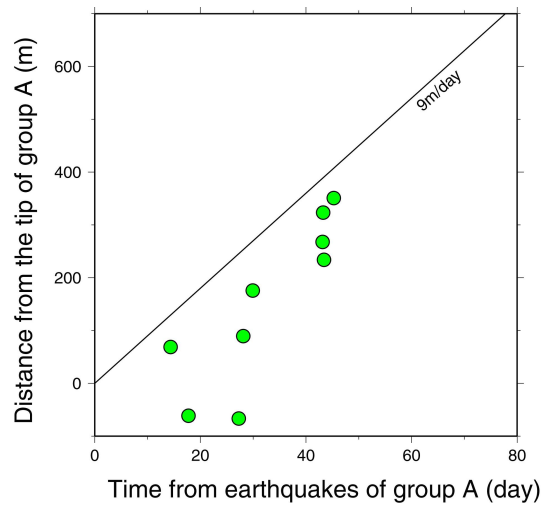


図 3-2 (b).

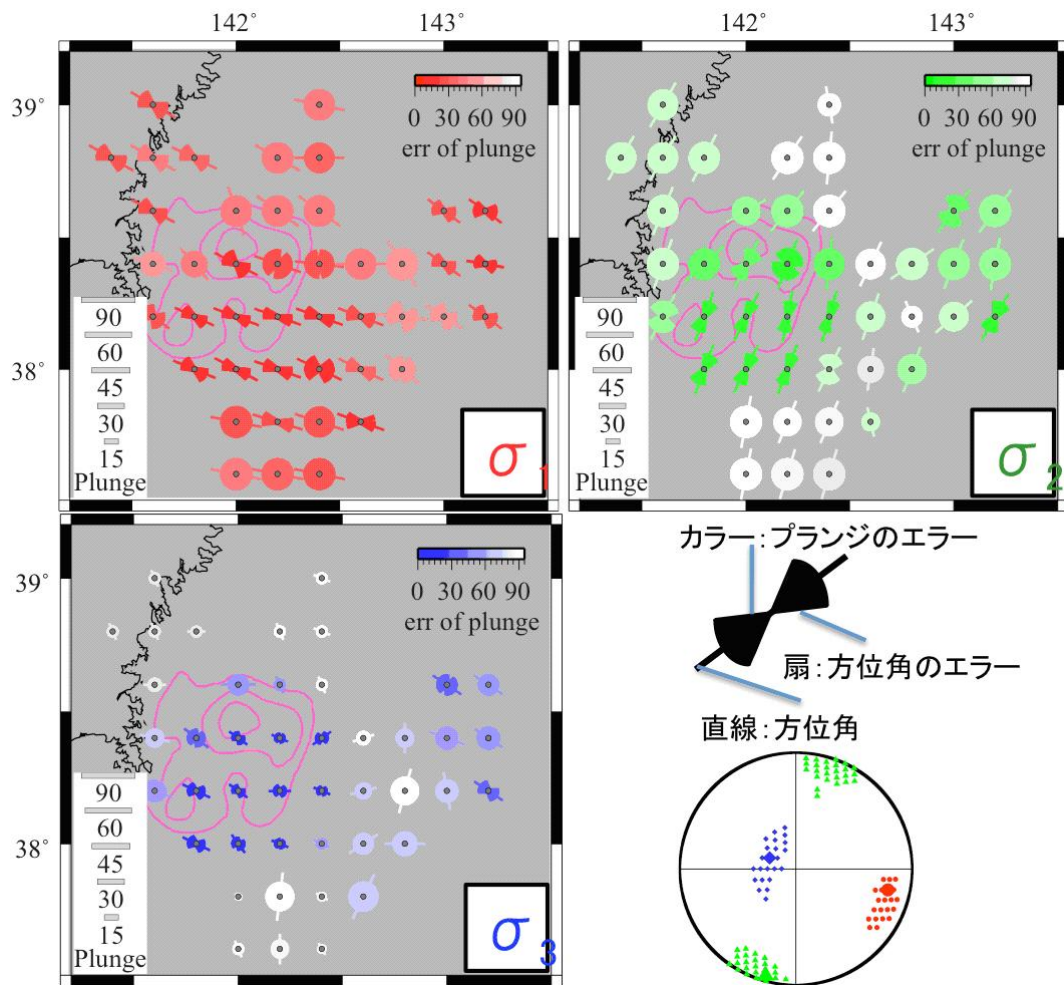


図 2-1 . プレート境界近傍の応力場 . 推定された主応力軸 (最大主応力 : σ_1 , 中間主応力 : σ_2 , 最小主応力 : σ_3) を示す . 主応力軸の方位角・プランジを直線の向き・長さで示し , それらのエラーを扇形・カラーで示す . また , 震源球は宮城県沖の広域応力場を表す .

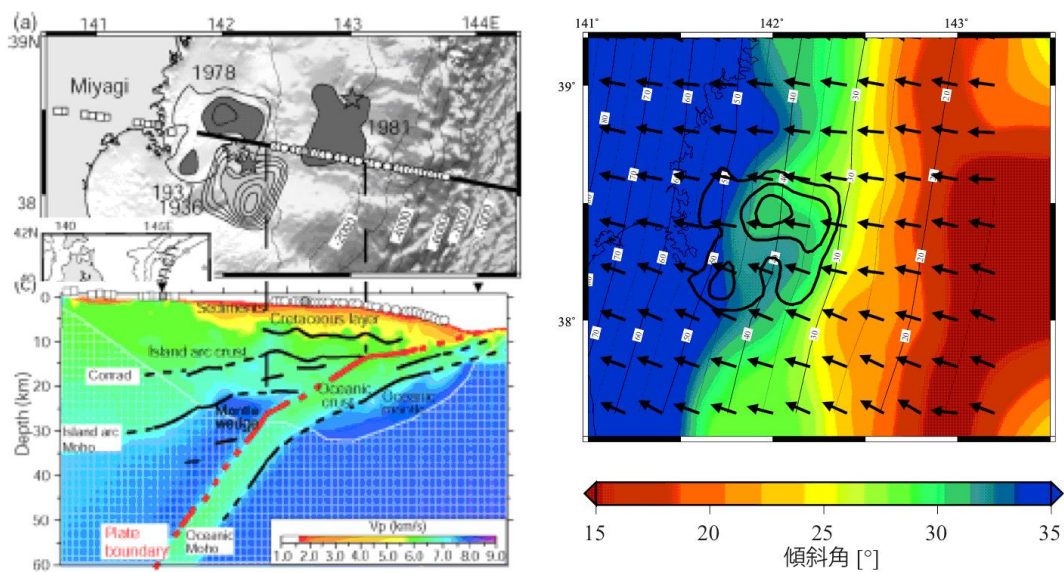


図 2-2 . 宮城県沖のプレート境界形状 (左) Ito et al. (2005) によって推定されたプレート境界形状 (右) 山本・他 (2009) によって推定されたプレート境界形状 . 矢印で沈み込み方向をカラーで沈み込み角度を表す .

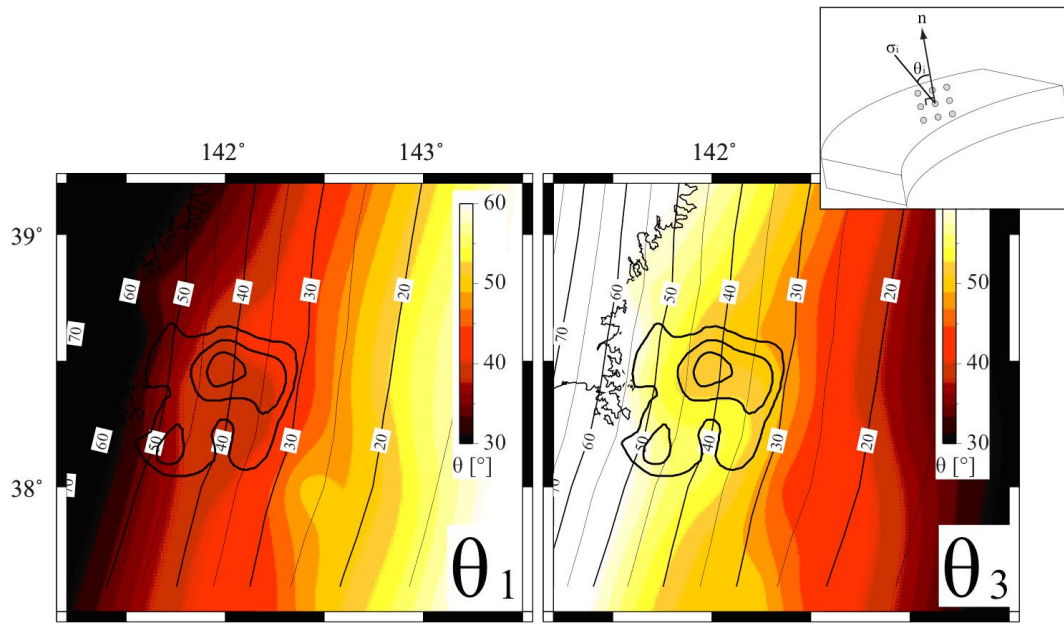


図 2-3 . 主応力軸とプレート境界のなす角度 (θ) . θ の分布をカラー , プレート境界の深さを細い実線 , アスペリティを太い実線で示す (左) 最大主応力軸 (θ_1) (右) 最小主応力軸 (θ_3) .

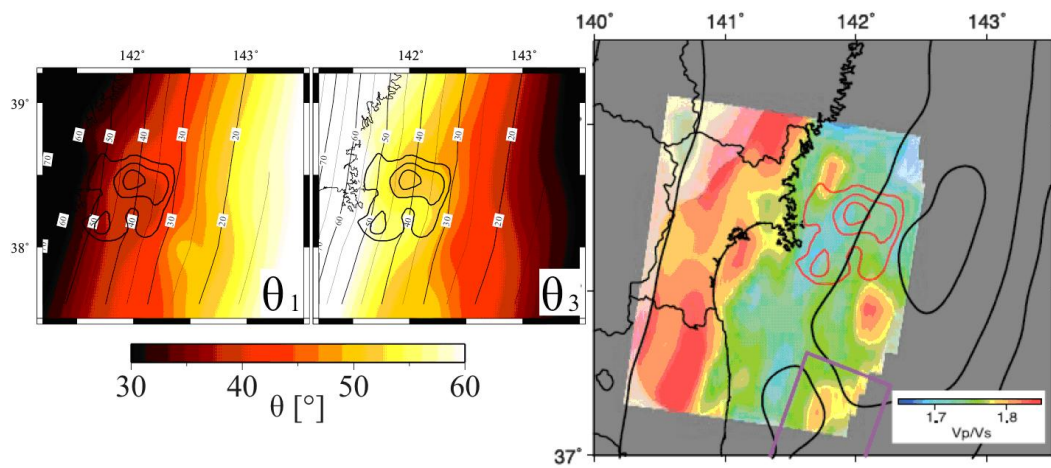


図 2-4 . θ とマンテルウェッジ内の V_p/V_s 構造の比較 (左) θ_1 分布 (中) θ_3 分布 (右) マンテルウェッジ内の V_p/V_s 構造 (Yamamoto et al., 2008) .

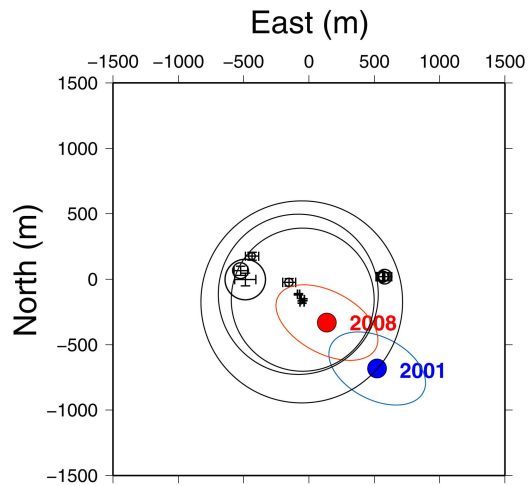


図 3-1 . 釜石沖地震クラスターにおけるすべり域の分布 (丸) と 2001 年 (青丸) と 2008 年 (赤丸) の M4.9 前後の地震の震源 . (a) は平面図, (b) は断面図を示す . M4 以上の地震の滑り域 (円) と応力降下量 (カラー) . 楕円はブートストラップ法により推定した誤差の範囲 . すべり域のサイズは 380bar の応力降下量を仮定した場合の大きさでセントロイドを中心に行っている . 2001 年と 2008 年の地震の初期破壊点は, インターサイズミックな期間に発生する小地震の位置と一致しない . 断面図での西下がり傾向は, プレート境界の傾斜によるものと考えられる .

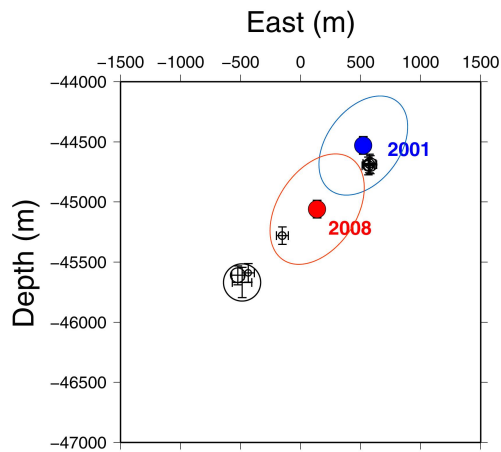


Fig. 3-1 (b)