

( 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滑り分布・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. プレート境界及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滑り量分布を求める。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・震源位置の検討及び地震波形インバージョンによる地震時滑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. プレート境界及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滑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滑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(滑り特性)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及び活動の推定。

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併せて、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) 計画期間中(平成21年度～25年度)の成果の概要：

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

1 - 1) 東北沖地震の前震およびスラブ内の誘発地震の滑り域の推定 (久保田, 2012)

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の前震のうち3月9日に発生した Mw7.3 の地震と3月10日の Mw6.5 の2つの地震について、それぞれに伴う津波を震源域近傍の海底圧力計で捉えた波形記録を用いて震源断層モデルを推定した。3月9日の地震の最大滑り量は 1.0 m で、大きな滑りが破壊の開始点より北西側の 40 km × 40 km の領域に集中していた。一方、3月10日の境界の最大滑り量は 0.2 m と推定され、主滑り域は破壊の開始点の西側の走向方向に 20 km、傾斜方向に 40 km であった。これら2つの地震の主滑り域は互いに重なっておらず、また、10日の地震の主滑り域は、3月9日の地震の余効滑りの範囲に含まれ、3月9日の前震破壊域と3月11日の本震の破壊の開始点に挟まれるように位置する。このことは3月9日の地震に伴う余効滑りが、小さな余震の活発化だけでなく、3月10日の中規模地震を引き起こし、その後さらにプレート境界での滑りが伝播し、東北地方太平洋沖地震を引き起こしたという、連鎖的な破壊の発生を強く示唆する。また、東北沖地震発生から4か月後の7月10日に、震源域下の太平洋プレート内部で発生したスラブ内地震 (Mw7.0) についても、同様に津波波形を用いた震源モデル解析を行った。この地震については滑り量分布ではなく、一様滑りの平面矩形断層モデルを仮定し、グリッド・サーチにより観測津波波形を最もよく再現する断層配置と滑り量を求めた。断層の走向は海底地震観測による余震分布の配列する方向と良く一致するが、津波から推定した断層モデルの深部側の端は余震の震源深さ分布の下限より深部側にまで及んでいる。

1 - 2) 岩手県種市沖の中規模の繰り返し地震の解析

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、2-10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2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 の地震の滑り量は小さかった、

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

2 - 1) 宮城県沖地震の震源域における微小地震活動

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 ( $\theta_i$ ) の分布を図 2-3 に示す。 $\theta_i$  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 ( $\sigma_1$ ) とプレート境界とのなす角度 ( $\theta_1$ ) 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  $\theta_1$  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 ( $\sigma_3$ ) 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  $\sigma_1, \sigma_3$  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。

$\theta_i$  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。

2 - 2 ) 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺の地震活動特性 (Uchida and Matsuzawa, 2011, Uchida and Matsuzawa, 2013)

2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9) の震源域について過去の地震活動・余震分布, 小繰り返し地震分布およびそれから推定されるプレート間カップリングについて調べた。2011 年東北地方太平洋沖地震の滑り域内には, 過去の M7 規模の地震の滑り域 (図 2a) や, 小繰り返し地震が含まれており, 岩手県釜石沖の繰り返し地震と同様に滑り域が階層構造をしていることが分かった。東北地方東方沖のアスペリティ階層構造のモデルを図 2c に示す。カップリング率の調査からは, 2011 年の地震は地震前に広域にカップリングが大きかった場所で発生したことが分かった。また, 滑りが非常に大きい場所にはほとんど繰り返し地震が存在しないことも分かった (図 2b)。

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺の地震活動特性について, 過去の M7 クラスの地震がその滑り域の周囲に位置していること, それらの地震が, 2011 年東北地方太平洋沖地震の滑り域からみて遠方から近傍に向かって連鎖している例があることが分かった。また, 本震破壊開始点から余震の重心に向かうベクトルを調査すると, いくつかの地震でプレート間固着が強い方向を向いていると考えられる例があった。このような地震活動は, プレート境界での固着の不均質や, 地震サイクルの間に発生するアスペリティ外部から内部への滑りの浸み込みを表している可能性がある。

2 - 3 ) 波形相関を利用したメカニズム解の分類によるプレート境界型地震の発生数の時間変化 (中村・他, 2013 他)

「アスペリティの特性解明に向けた観測研究」(1205)で開発した波形相関を利用したメカニズム解の分類手法を用い、プレート境界型地震の発生数を調べた。このなかで宮城県沖の海溝寄り(図1)では、周期的な地震活動の増加がみられ、東北地方太平洋沖地震に向かって増加していくように見える。これはプレート境界での固着の緩みを示している可能性が高い。このうち最後の2回の地震活動の増加は、海底水圧データより推定されたスロースリップの発生時期[Ito et al., (2013)]と一致している。このようなアスペリティの固着状況の時間変化は、アスペリティの破壊プロセスをモデル化するうえで非常に重要と考えられる。

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。

3-1) 釜石沖繰り返し地震と東北地方太平洋沖地震の余効滑りによる影響(Shimamura et al., 2011, 島村, 2012, Uchida et al., 2012, Shimamura et al., 2011)

岩手県釜石沖の地震クラスターについて、1995-2008年の2つの地震サイクルにわたる期間の53個の地震のセントロイドを、波形のクロススペクトルにより求めた走時差データを用いて推定した。

Double-difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いた震源決定の結果、ほぼ重なっているM4.9の地震の滑り域の端で繰り返し発生している小地震のほかに、滑り域の内部に2つのクラスターからなる小地震活動が決められた。これはアスペリティ内部に強度不均質が存在し、比較的弱い領域が地震サイクルの間に繰り返し滑っていることを示唆する。

2つのサイクルにおける地震の積算滑りの空間分布を調べたところ、それらはよく似ており(図3-1)、同じような過程が繰り返し起きている可能性が高い。滑り量としては、プレート間相対運動速度から期待される滑り欠損よりも小さく、地震時滑り域内でも準静的滑りが発生している可能性を示す。

また、M4.9の地震の滑り域内に推定された2つの地震クラスターの活動は、滑り域の端のものよりも不活発であり、これらの地震の地震サイクルにおける発生開始時期は、端の地震よりも遅れていた。この傾向は、新たに波形相関によりクラスターの分離を行った1990年、1995年のM4.9地震の前の地震活動にも見られる(図3-2)。この現象は、地震間においての、アスペリティ内部へ向かっての準静的滑りのしみ込みを反映したものである可能性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震の余効滑り中の釜石沖繰り返し地震の挙動について波形データや破壊伝播速度を吟味して最適な滑り量分布が得られた。普段は、2008年の地震(黒線)のような滑り量分布で直径1km程度の領域が繰り返し破壊されてきたが、2011年の東北地方太平洋沖地震後は直径が3~5倍大きな地震が発生していたことがわかった。この原因としては、釜石沖では直径1km程度の不安定領域があり、そこが繰り返し破壊しているが、その近傍に条件付き安定領域があり、その部分が、今回、2011年東北地方太平洋沖地震やその余効滑りに伴う応力擾乱によって不安定性が増加して、地震性滑りを発生させたものと考えられる。このことは、アスペリティの階層性や「固有地震」の活動の揺らぎを考えるうえで極めて重要である。

4) 内陸地震震源域と地震波速度構造との関係(Okada et al., 2012; 1207 参照)

2008年岩手・宮城内陸地震の震源域における地震波速度構造と滑り域・震源域の広がりと比較したところ、それらは、低速度域に囲まれた高速度域内であることが分かった。この結果はこれまで内陸地震で見られていた対応関係と同様である。

(8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

中村航・内田直希・松澤暢, テンプレートイベントを用いた小地震の断層タイプの推定~東北地方太平洋沖で発生する地震への適用~, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2013年5月.

中村航・内田直希・松澤暢, テンプレートイベントを用いた日本海溝・千島海溝沿いの小地震の断層タイプの分類と震源再決定, 日本地震学会2013年秋季大会, 横浜, 神奈川県民ホール, 2013年10月.

Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa, Faulting type classification of small earthquakes using a

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

海野徳仁・三浦 哲・松澤 暢・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

(10) 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/>

(11) 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

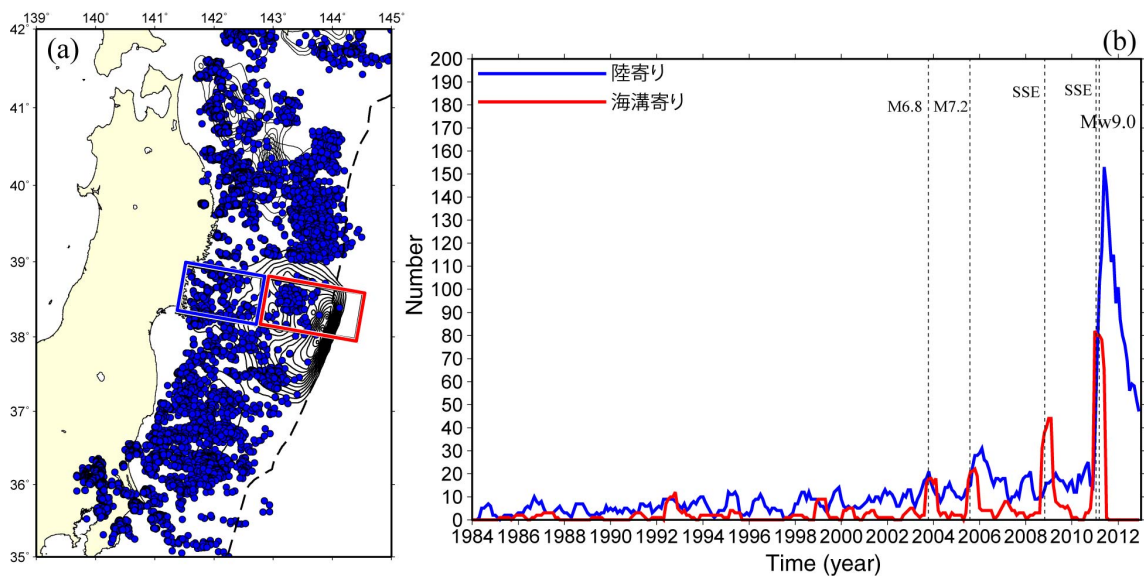


図1 .

宮城県沖におけるプレート境界地震の時間変化。(a) 対象領域, (b) 発生時系列. 青: 陸寄りにおける発生時系列, 赤: 海溝寄りにおける発生時系列とした. 縦軸: 個数 [1/0.5 年], 横軸 [年]