

論文の内容の要旨

論文題目 沈み込み帯における浅部プレート境界断層の変形過程と強度空間分布
(Deformation process and strength distribution of shallow plate boundary fault
in subduction zone)

氏 名 高下 裕章

地震は地震動が直接与える災害に加え、津波を引き起こすことで広範囲の地域に対し甚大な被害をもたらす。特に大きな被害を及ぼすのがプレート沈み込み帯の巨大地震である。モーメントマグニチュード M_w 8.0を超えるような巨大地震の9割は沈み込み帯で発生することが知られている。日本においても巨大地震が南海トラフや日本海溝で繰り返し発生し、津波を伴うことで海岸沿いの地域に対し大きな被害をもたらしてきた。プレート沈み込み帯では、沈み込みに伴いプレート境界面が固着している領域で歪が蓄積され、それが一気にずれて歪を解放、境界面が滑ることで地震が発生する。そのため、固着が強い地震発生帯と呼ばれる深部領域が、沈み込み帯の中では主な研究対象であった。一方、固着が弱く非地震性の定常すべり領域と考えられてきた浅部領域は、歪を多く蓄積せず、巨大なすべりを一度に開放することがないとされてきたため、これまで注目される機会が少なかった。

しかし近年の観測・研究結果から、この浅部プレート境界断層領域は防災上重要な研究の新領域として注目されている。まず、浅部プレート境界断層でも巨大地震時には巨大なすべりを伴うことが明らかになってきた。2011年の東北地方太平洋沖地震ではプレート境界断層の破壊が海底にまで到達したことが初めて観測され、津波を通常より巨大化させたと考えられている。また、2000年代以降の測地・地震波観測の高精度化に伴い「スロー地震」と呼ばれる新たな地震現象が発見されており、この地震現象は浅部プレート境界断層領域でも発見・観測されている。スロー地震は、揺れを伴わず通常の地震より継続時間が長い破壊が進行する地震と定義されるが、そのスロー地震は巨大地震震源の周辺で発生し、応力状態を変化させるため、研究は途上ではあるがプレート境界断層上で巨大地震の震源域における断層破壊と深く関連していることが示唆されている。

本研究では、上述のようにほとんど注目されてこなかった浅部プレート境界断層に関

して、特にその時空間変化を捉えることを目的とし以下の2つの研究を行った。研究テーマ1：日本海溝を対象に東北地方太平洋沖地震において浅部プレート境界断層領域がどのような動的変形を辿ったかを明らかにする。研究テーマ2：浅部プレート境界断層の摩擦係数の詳細な分布を明らかにするために、これまで用いられてきた手法を改善し、新たな解析手法の開発に取り組む。

研究テーマ1：浅部プレート境界断層の変形過程の解明

2011年の東北地方太平洋沖地震では地震前の観測データが存在しており、地震直後の観測結果と比べると、海溝軸付近で最大約60 mの巨大な変位が地震時に発生したことが明らかになり、浅部プレート境界断層の破壊に関する初の観測事例となった。この地震に伴って発生した巨大な津波は、東北地方沿岸部の広い地域に甚大な被害をもたらすこととなった。

しかしながらこの最も巨大な地震時すべりを起こした領域が、地震時にどのような変形を辿って破壊されたのかということは十分に明らかになっていない。先行研究の問題点としては以下の3つが挙げられる。1) 一般的に日本海溝には地塁・地溝構造という凹凸構造が発達した海洋プレートが沈み込んでいるが、この最大すべり領域においては凹構造である半地溝構造が沈み込んでいる。これまで凸地形の沈み込み（海山やリッジなど）により地震が巨大化するということが示唆されていたため、その動的変形モデルの研究が進んでいるのに対し、凹地形の沈み込みはその逆の現象が発生すると推測され、ほぼ無視されてきた。そのため、第一に本領域における凹地形の沈み込みのメカニズム自体が未解明である。2) 地震前後の観測から海底面付近の浅部領域においてプレート境界断層の破壊が発生したことが確かめられているが、観測結果は観測時点でのスナップショットにすぎず、その間をつなぐシームレスな動的変形について議論することは困難である。そのため実際に地震時に動いた断層の特定を難しくしている。3) 地震直後の国際深海科学掘削計画Expedition 343/343Tにおいて5～15 mの主断層部、また主断層の直上に100 mもの厚い変形帯が存在していることが確かめられている。掘削地点は海溝軸から3.2 km程度の水平距離であるが、このような厚い変形帯を作るメカニズムは分かっていない。

そこで、本研究では半地溝構造の沈み込みを再現したアナログモデル実験を実施した。本実験によって動的変形を把握し、凹地形の沈み込みの影響の評価と変形メカニズムの理解を目指す。アナログモデル実験ではデジタル画像相関法（DIC）を併用し、断層運動を可視化、内部の変形の定量化を行った。本研究を通じた実験において、以下のように4つの結論が得られた。1) 半地溝構造の沈み込みはウェッジを圧縮させる効果を持つ。2) 海溝充填堆積物が少なかったことが大きなすべりの要因の1つであった可能性が高い。これら2つの結論は、これまで先行研究を通じて得られていなかった凹地形沈み込みの効果に対し、新たな知見をもたらした。3) 凹部底面への断層の伸展は、円弧すべ

りを原因とするものではなく、斜面全体が押し出される変形を原因とするものであることが明らかになった。これによりプレート境界断層浅部領域の動的な破壊モデルが決定された。4) これまで報告例のない新たな断層運動であるFault dancingを発見した。この運動によって日本海溝の主断層部上部に存在する約100 mの厚い変形帯が形成された可能性が高い。さらに従来の研究で、断層の厚さを用いて断層が放出するエネルギーの推定を行われてきたが、エネルギーが過大評価されてきた可能性を示した。

研究テーマ2：地形解析によるアプローチ:Critical taper modelの改善

沈み込み帯や造山帯のように側方からの圧縮により衝上断層が卓越し、短縮変形を受けた地質体を総称してFold-and-thrust beltと呼ぶ。Critical taper modelはfold-and-thrust beltの断層強度を知るために広く用いられてきた。沈み込み帯に対してこのCritical taper modelを適用した場合、単純な地形パラメータを用いて主にプレート境界断層における摩擦係数の推定が可能である。そのため、Critical taper modelは地震に関連する研究分野で広く用いられてきた。ただし、Critical taper modelでは、計算に用いる地形データの取得の際に、以下のような2つの問題点が指摘できる。1) 反射法地震探査断面のデータが必要であるため、観測記録のある断面以外に Critical taper modelの適用ができない。2) 反射法地震探査データを用いた深度断面処理において、プレート境界断層の深度が速度モデルに大きく依存し、デコルマ傾斜角 β の値に影響を与える。そのため正確な比較という点に関して信頼性が低い。

そこで本研究は上述の問題点を改善するため、Critical taper modelに用いるパラメータを反射法地震探査断面ではなく、水深測量データからのみ得る新たな手法の開発を行った。反射法地震探査断面から得られるプレート境界断層の傾斜角 β の代わりに、プレートが沈み込む前の海溝海側斜面の傾斜角 $\beta_{\text{bathymetry}}$ を使用し、その計算結果から手法の妥当性の検証を行った。本研究では、南海トラフを対象領域として手法の妥当性の検証を行った。南海トラフでは海溝型巨大地震の基礎研究の重要性から反射法地震探査断面が多く取得されており、従来の Critical taper modelと本研究で新たに行う手法との比較が行い易いこと。地震波やGPSなど、様々な研究手法による観測が進んでいることから、その比較対象とするべき先行研究が豊富であることが理由である。

本手法の妥当性の検証結果から、Critical taper model自体に理論的に見過ごされてきた性質、間隙水圧比を考慮した摩擦係数である有効摩擦係数の算出に際し、 β が結果に与える影響が非常に小さいことが明らかになった。そのため水深測量データにおける海溝陸側斜面 α のみを用いて浅部プレート境界断層の摩擦分布を議論することが十分可能であることが示唆される。ただしその際、有効摩擦係数の算出誤差が20パーセント程度生じる点は注意が必要である。

水深測量データは空間的に密に取得されたデータであるため、これにより海溝軸に沿った高密度な浅部プレート境界断層の摩擦分布を初めて算出することが可能となった。

南海トラフにおいて高密度な海溝軸沿いの摩擦分布データから、摩擦が著しく低く算出された領域がこれまでの地震観測によって議論されてきたセグメント境界やスロー地震と関連していることが示唆された。また、日本海溝においても海溝軸に沿った高密度な摩擦分布を議論した。結果として α はヒストグラムから2つのピークを持つことを示し、低い α の領域が東北地方太平洋沖地震における滑り分布と、また高い α の領域が明治三陸地震の震源域と対応している様子が見られた。

以上から、本手法は反射法地震探査断面が十分に取得されていない海域や、地震活動によるセグメントが十分に検討されていない領域において、地震・津波防災に関して資する新たな手法だと考えられる。