

Source Process Determinations of Recent and Historical Tsunamigenic Earthquakes using Tsunami Waveforms, Tsunami Inundation Data, Tsunami Deposits, and InSAR Data

(津波波形・津波遡上データ・津波堆積物・InSAR データを
利用した最近及び歴史的な津波発生地震の震源過程解析)

学位論文内容の要旨

2004 年 12 月インドネシアで巨大地震 (Mw9.2) が発生し、M9 クラスの地震がスマトラ沖で発生することが明らかになった。それら巨大地震の発生様式を把握することが将来の巨大地震の長期発生予測につながると考えられている。本研究では、最近の巨大地震だけでなく、歴史地震や古地震と呼ばれる過去の巨大地震の震源過程を推定する手法を開発し、それらの手法をインドネシアのスダ海溝沿いで発生した 3 つの巨大地震に適応し、震源過程を推定するとともにその妥当性を検証した。

まず 2007 年 9 月にスマトラ沖で発生した Bengkulu 巨大地震 (M8.5) の詳細なすべり分布を海底津波計および検潮所で記録された津波波形だけでなく震源近傍 Pagai 島での InSAR (干渉合成開口レーダ) データやスマトラ島での InSAR データを用いて推定した。これまでの津波波形インバージョンでは断層面・すべり角を固定し、すべり量を推定していた。本研究では 2004 年スマトラ巨大地震後に遠洋に設置された 2 つの海底津波計で記録された津波波形を用いることで津波波形インバージョンの解像度が向上し、すべり量だけでなくすべり角も推定できることが分かった。つまり 1 つの小断層に 2 つの未知数を設定することですべり角も津波波形インバージョンにより推定することを試みた。また Pagai 島での InSAR データには Pagai 島近傍で発生した最大余震 (Mw7.9) の地殻変動が含まれているため、最大余震の地殻変動分をすでに推定されている断層モデルから計算し、元データから取り除いた。これら津波波形データと InSAR データを使用した同時インバージョンにより、プレート境界面 (160 個の小断層面) でのすべりの分布を推定した。その結果この地震は Pagai 島の南東部からさらに南東方向へ 100km 程度の範囲で大きなすべりが発生していることが判明した。さらに深さにすると 16km から 32km の間に集中していることも分かった。得られたすべり分布から地震モーメントを計算すると 6.7×10^{21} Nm (Mw8.5) となった。さらに得られたすべり分布から震源域近傍の津波波高を数値計算し、地震後に実施された津波遡上高調査の結果と比較すると、スマトラ島沿岸 Lais 付近で津波が大きくなる調査結果と良い一致を見ることが分かった。

次に 1977 年に発生した Sumba 巨大地震 (Mw8.3) の震源過程をオーストラリアの検潮所で観測された 3 つの津波波形と Sumbawa 島の Lunyuk で地震後に調査された津波遡上高および遡上距離から推定した。この地震は 20 世紀最大の正断層型アウトターライズ地震の 1 つである。地震波解析からすでに推定されている断層モデルを参考に断層の長さを 200km、断層の幅を 70km と仮定し、さらに震源メカニズムは走向 270° 、傾斜角 45° 、すべり角 70° と

仮定した。この断層モデルから海底地殻変動を計算し、さらに津波数値計算を実施しオーストラリアの検潮所での計算波形と計算波形を比較することですべり量を推定することを試みた。精度の良くない検潮記録であるが、後続波の振幅の比較からすべり量は3-7mの範囲であることが推定された。次に Sumbawa 島の Lunyuk で津波の遡上数値計算を行い、調査結果である遡上高8mと遡上距離500mを説明するためにはすべり量は3mが最も良いと推定された。つまりすべり量が3mであればオーストラリアの検潮記録も Lunyuk で調査結果も説明できることとなる。このすべり量からこの地震の地震モーメントは $2.5\cdot2.9\times10^{21}\text{Nm}$ (Mw8.2) と計算される。この結果は津波遡上高や津波遡上距離のデータからも震源過程を推定することができることを示した、さらにこの手法は津波波形記録の無い歴史地震に対しても応用できる可能性があることを示した。

さらに、津波の記述のない古地震の震源過程を研究するためには、津波堆積物の調査結果をデータとして用いる必要がある。本研究では津波伝搬による砂移動を数値計算に取り込む手法を用いることで実際の津波堆積物の分布を数値計算で再現することを試みた。まずは、単純な1次元地形データの上で数値計算を実施することで、津波の波長や海岸から陸に向かう傾斜、さらには初期の砂の分布等が最終的な堆積構造に与える影響を評価した。まず波長は長いほど浸食は少ないが堆積物の分布はなだらかで広くなることが分かった、傾斜は緩くなるほど堆積構造が厚くなることも分かった。また傾斜変動の大きいところで浸食や堆積が大きくなることも分かった。さらに移動される砂は海岸近傍に多く分布していることが津波により砂が移動し陸上に堆積しやすいことも明らかになった。この手法を2次元に拡張し、2004年スマトラ巨大地震の後の Lhoknga (スマトラ島北部) での津波堆積物の分布を再現しようと試みた。Lhoknga ではすでに海岸から陸に向かって400mの直線上で津波堆積物(砂)の堆積構造が調査されている。本研究では津波波形解析からすでに得られている2004年スマトラ巨大地震の震源モデルから津波数値計算および砂移動の数値計算を実施し、実際の Lhoknga での津波堆積構造がある程度再現できることを確かめることができた。また堆積物の厚さを再現することですべり量の推定もある程度は可能であることも確かめられた。しかし、津波堆積物の分布は詳細な津波前の地形に左右されることや、今回用いた砂移動の数値計算手法が実際の堆積構造を表現でききれていない部分があり、津波堆積構造の詳細な再現には精度が足りない。この研究は今後さらに進展させる必要がある。

最後に、最近の巨大地震に対しては、最新の海底津波計のデータや InSAR データを用いたインバージョンによりすべり角を含めた詳細な地震時すべり分布を推定できることを2007年 Bangkulu 巨大地震のすべり分布を明らかにすることで示した。データの少ない過去の巨大地震については津波遡上高や遡上距離をデータとして用いて震源過程を明らかにできることを1977年 Sumba 巨大地震のすべり量を推定することで示した。記述のない古地震については津波堆積物分布をデータとして用い、津波数値計算と砂移動の数値計算を合わせて行うことで津波堆積物分布を再現すれば可能であることを2004年スマトラ巨大地震による津波堆積構造を数値計算で再現することで示した。これらの研究成果は今後様々な沈み込み帯の巨大地震震源過程解析に用いられることが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 谷 岡 勇市郎

副 査 教 授 村 上 亮

副 査 教 授 小 山 順 二

副 査 教 授 日 置 幸 介

学 位 論 文 題 名

Source Process Determinations of Recent and Historical Tsunamigenic Earthquakes using Tsunami Waveforms, Tsunami Inundation Data, Tsunami Deposits, and InSAR Data

(津波波形・津波遡上データ・津波堆積物・InSAR データを
利用した最近及び歴史的な津波発生地震の震源過程解析)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

近年、観測津波波形記録を用いた巨大地震の震源過程の研究は盛んに行われている。しかし、多くの観測津波波形記録が残されているのは 19 世紀後半に入ってからであり、それ以前の巨大地震による波形記録は存在しない。特にインドネシアなど発展途上国の津波波形記録は 20 世紀末期にならないと存在しない。将来の巨大地震を知る上で過去に繰り返し発生してきた巨大地震の震源過程を推定する研究は重要で、さらなる進展が待たれている。さらに最近では干渉合成開口レーダ (InSAR) により地震時地殻変動が陸上で面的に捕えることが可能になってきた。これらのデータや深海での観測津波波形データ等様々なデータを合わせて用い、最近の海溝型巨大地震の震源過程を詳細に推定する研究開発も待たれている。

本論文は、このような現状にある巨大歴史地震の震源過程研究において、観測津波波形だけでなく、津波被害発生後に実施されてきた津波遡上高・遡上域の調査結果や、地質学的調査結果 (津波堆積物調査結果) を用いて巨大地震の震源過程を推定する手法の研究を重要な目的の 1 つとしている。さらに、最近発生した巨大地震の震源過程を詳細に推定するために、多様化する現在の津波観測データや衛星地殻変動観測データ (InSAR) を取り入れて解析する手法を開発することも目的の 1 つとしている。

まず、1977 年スンバ巨大地震について、Sumbawa 島の Lunyuk での津波遡上高・遡上距離をデータとして用い津波数値計算によりデータを再現することで震源モデルを推定できたことは今後の震源過程研究に大きく貢献する。次に、津波による砂の移動を考慮した津波数値計算手法を開発し、2004 年スマトラ巨大地震で発生した津波による Lhoknga (スマトラ島北部) での津波堆積物分布調査結果を既存の震源モデルを用いて再現できた。このことは今後、津波堆積物調査結果を震源過程研究のデータとして

用いることができることを示すもので、有史以前に発生した巨大地震の震源過程研究を大きく発展させることに貢献する。さらに、2007 年 Bangkulu 巨大地震の詳しいすべり量およびすべり方向の分布を津波波形および InSAR データを用いた同時インバージョンにより上手く推定できたことは将来の震源過程研究に新しい解析手法を提供する。

これを要するに、著者は、津波数値計算を用いた巨大地震の震源過程研究について様々なデータから震源過程の情報を得るための手法を開発し、巨大地震に対する新知見を得たものであり、地震長期予測研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。