

|            |  |
|------------|--|
| 氏名         | ひさまつ あき ふみ<br>久松 明 史   |
| 授与学位       | 博士 (工学)  |
| 学位授与年月日    | 平成30年3月27日   |
| 学位授与の根拠法規  | 学位規則第4条第1項   |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻   |
| 学位論文題目     | 巨大津波の波源推定への円錐型断層モデルと土砂移動モデルの適用性評価  |
| 指導教員       | 東北大学教授 今村 文彦   |
| 論文審査委員     | 主査 東北大学教授 今村 文彦 東北大学教授 田中 仁<br>東北大学教授 越村 俊一 東北大学准教授 後藤 和久<br>(災害科学国際研究所) |
|            | 准教授 菅原 大助<br>(ふじのくに地球環境史ミュージアム)  |

## 論文内容要旨

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震・津波のように、広域で大規模な被害をもたらした低頻度巨大地震・津波の実態解明は、依然として大きな課題である。東北地方太平洋沖地震・津波においては、多種多数の観測データが得られており、不均一な断層すべり分布や多数の断層の破壊過程が解明されつつある。しかし、それ以前に発生した巨大津波イベント（例えば、1611年慶長三陸地震や869年貞観地震など）での津波波源モデル推定においては、地震発生メカニズムや断層破壊過程が非常に複雑であるのに対して、古文書などの歴史記録や津波堆積物などの地質記録から得られる情報が限られており、多数の断層パラメータで津波波源モデルを推定することが困難であるのが現状である。

本研究の目的は、歴史津波のように痕跡情報が限られた過去の巨大津波イベントの波源を高精度で推定する手法を構築することにある。特に、より痕跡情報に乏しく、地質記録しか得られない先史時代にまで遡って津波波源を推定できるようにするため、津波堆積物の層厚情報のみに基づいてマグニチュード9クラスの巨大地震 ( $M_w > 8.6$ ) のモーメントマグニチュードおよび津波波源を推定することを目指した。

具体的な研究課題は以下の通りである。

- (1) マグニチュード9クラスの巨大地震の不均一な断層すべり分布を津波堆積物のように質・量ともに限られた情報から推定するため、地震学・測地学の知見を取り入れながら、断層すべり分布に関する未知パラメータ数を合理的に低減させること。
- (2) 津波波源モデルのすべり量と形成される津波堆積物の層厚分布の定量的な関係性を明らかにし、津波堆積物の層厚分布を再現する最適な津波波源モデルを推定すること。また、本研究で提案する津波波源モデル推定手法の歴史・先史時代の津波への適用性を評価すること。

本研究では、それぞれの課題に対する解決手法を提案し、東北地方太平洋沖地震および津波に関して得られたデータを用いて、各手法の有効性あるいは妥当性を検証した。東北地方太平洋沖地震・津波を対象としたのは、断層の破壊過程を推定するための計器観測データ（沖合津波波形）、地形データ、および潮位状況のデータ（験潮記録）が豊富に得られているためであり、この津波を対象に限られた情報でモデルの妥当性が評価されれば、将来的に歴史・先史時代の地震津波に適用可能性を広げることができると考えたためである。検証に用いたデータは、沖合津波波形データ 2507 点（岩手県、宮城県および福島県沖の合計 6 地点の GPS 波浪計において 5 秒間隔で観測された）、および津波堆積物の層厚分布データ 226 点（岩手県山田町小谷島、宮城県仙台市荒浜および福島県南相馬市小高に形成され、合計 6 測線で測定された）である。

課題解決手法、有効性あるいは妥当性検証方法、および結果は以下の通りである。

#### (1) 円錐型断層モデルの適用

断層すべり分布に関する未知パラメータ数を合理的に低減させるため、自己相似的に断層破壊が成長することを仮定する地震学の理論を、津波波源モデルに適用することを提案した。新たな津波波源モデルは、最終的な断層すべり分布が円錐形状となることから円錐型断層モデルと呼ぶこととした。円錐型断層モデルは応力降下を考慮し、断層中央から断層端に近づくにつれて断層すべり量が小さくなるため、破壊力学の観点においても合理的である。また、断層すべり分布が円錐形状となることは、幾何学的にアスペリティ（すべり量が断層平均すべり量の 1.5 倍以上である領域）の面積が断層面積の 25% となり、1952~2011 年に発生したマグニチュード 9 クラス（Mw 8.6~9.2）の地震のアスペリティ面積の断層面積に対する割合（16~32%）と整合的である。不均一断層すべり分布を推定するために断層セグメント 2 個を組み合わせる場合、従来津波波源モデルに用いられている矩形断層面に一様すべりを仮定するモデル（以下、矩形断層モデル）の未知パラメータ数は 11 個（1 セグメントにつき、緯度、経度、断層長さ、断層幅、平均すべり量の 5 個に加えて、2 個目のセグメントの破壊開始遅れ）であるのに対し、円錐型断層モデルは 9 個（1 セグメントにつき、緯度、経度、断層面半径、最大すべり量の 4 個に加えて、2 個目のセグメントの破壊開始遅れ）であり、推定すべき未知パラメータ数が少ないという利点がある。

円錐型断層モデルの有効性を検証するため、東北地方太平洋沖地震において GPS 波浪計で観測された沖合津波波形の再現精度と断層未知パラメータ数について、円錐型断層モデルと矩形断層モデルを比較した。

検証の結果、2 個の断層セグメントを組み合わせた円錐型断層モデルは、沖合津波波形の再現精度が高いことが示された（観測データからの差の二乗平均平方根  $RMS = 0.86 \text{ m}$ ）。沖合津波波形の再現精度が最も高かったのはセグメント数 55 個の矩形断層モデルであったが（ $RMS = 0.41 \text{ m}$ ）、55 個のセグメントそれぞれで 5 段階の断層破壊開始遅れを想定するため、未知パラメータ数は 275 と非常に多く、津波堆積物の層厚情報に基づく津波波源推定には適用できない。一方、未知パラメータ数が最も少ないセグメント数 1 個の矩形断層モデルは（未知パラメータ数 3 個）、沖合津波波形の再現精度が低いことが分かった（ $RMS = 1.30 \text{ m}$ ）。複数セグメント数の矩形断層

モデルはRMSが1.63 m以上であり、断層端で発生する矩形断層モデル特有の沈降により、セグメント数1個の矩形断層モデルより沖合津波波形の再現精度が低かった。これらの結果から、本研究では、円錐型断層モデルが津波堆積物の情報のみから津波波源モデルを推定するときに使用する断層モデルとして、矩形断層モデルよりも適していると判断した。

## (2) 土砂移動モデルの適用

断層最大すべり量を変えた複数の円錐型断層モデルによって岩手県山田町小谷鳥、宮城県仙台市荒浜および福島県南相馬市小高に形成された東北地方太平洋沖地震の津波堆積物の層厚分布を土砂移動モデルによって計算した。ここで、土砂移動モデルによって計算された津波堆積物の層厚分布と実測データを定量的に比較するために、測線状の単位幅総堆積量を新たな指標として導入した。その結果、断層最大すべり量と津波堆積物の調査が行われた測線上の単位幅総堆積量が比例関係にあることが分かった。そこで、断層最大すべり量と測線単位幅総堆積量の関係性を最小二乗法によって定式化し、測線単位幅総堆積量の実測値を再現するような最大すべり量を求める手法を提案した。従来の手法では、津波堆積物の計算層厚分布と実測データを定性的に比較するに留まっていたため、新しい手法によって定量的に断層すべり量を推定することが可能となった。

上記手法の妥当性を検証するため、東北地方太平洋沖地震によって小谷鳥、荒浜および小高に形成された津波堆積物の測線単位幅総堆積量を再現するようなセグメント数2個の円錐型断層モデルの最適な最大すべり量を推定し、沖合津波波形を精度良く再現した円錐型断層モデルとモーメントマグニチュードを比較した。

検証の結果、津波堆積物の層厚から推定された津波波源モデルは、宮城県沖のプレート間地震の最大すべり量が12.8%過大評価、岩手県沖の津波地震の最大すべり量が27.9%過小評価であったが、モーメントマグニチュードは9.0であり、津波堆積物の層厚情報のみから津波波源断層モデルのモーメントマグニチュードを推定可能であることが示された。

最後に、本研究の手法の歴史・先史時代の津波波源推定への適用性を評価するため、不確定要素となる陸上土砂供給源の幅と初期潮位に対する土砂移動計算の感度分析を行った。その結果、小谷鳥および小高では、陸上土砂供給源の幅が実際から $\pm 50$  m異なる場合に対して、測線単位幅総堆積量が $\pm 5$ ~34%変化した。荒浜では、陸上土砂供給源の幅が実際から $\pm 100$  m異なる場合に対して、測線単位幅総堆積量が $\pm 1$ ~23%変化した。しかし、推定されるモーメントマグニチュードの誤差幅は0~0.85%であり、本研究の対象である巨大津波に関しては、概ね無視できる程度であった。また、小谷鳥、荒浜、小高ではそれぞれ潮位 $\pm 1$  mに対して、沖合に想定した円錐型断層モデルの最大すべり量の推定誤差は $\pm 5.2$ ,  $\pm 10.4$ ,  $\pm 7.2$  mであった。推定されるモーメントマグニチュードの誤差幅は0.34~1.20%であり、こちらも本研究の対象である巨大津波に関しては、概ね無視できる程度であった。これらの検証結果から、本研究で提案した津波波源推定手法は、対象とするマグニチュード9クラスの巨大津波に関しては、概ね信頼できる手法であると判断した。

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- 地震学の理論に基づく円錐型断層モデルを初めて津波解析に導入した。
- 東北地方太平洋沖地震津波において、円錐型断層モデルを用い、すべり欠損速度分布および既往地震履歴の先験情報に基づいた津波波源推定を行うことで、従来の矩形断層モデルを組み合わせるよりも少ないパラメータ数で広域の沖合津波波形を精度良く再現可能であることを示した。
- 津波堆積物が観察された地点の沖合に想定した円錐型断層モデルの最大すべり量と津波堆積物の測線単位幅総堆積量の関係性を定量的に求め、両者が比例関係にあることを明らかにした。
- 津波堆積物の層厚情報のみから、マグニチュード9クラスの巨大地震のモーメントマグニチュードを高精度で推定可能であることを初めて示した。

本研究成果を踏まえれば、巨大地震の発生メカニズムにおける円錐型断層モデルの普遍性を追求することで、本モデルの歴史・先史時代への適用の妥当性を高めることができる。歴史・先史時代の津波波源を推定するためには、本研究と同様に、土砂供給源からの津波堆積物の層厚変化および粒径分布の調査が重要であることを提言した。今後、歴史・先史時代の巨大地震・津波の実態解明だけでなく、津波波源推定に活用することを目的とした津波堆積物調査において、調査項目および調査地点決定に本研究で示した手法が寄与することが期待される。

# 論文審査結果の要旨

重要性が高まっている。本研究では、この地震および津波について得られた豊富な観測データを用い、さらに巨大津波の痕跡の一つとして長期間保存される可能性がある津波堆積物を活用してマグニチュード9クラスの巨大地震の津波波源モデルを高精度で推定する手法を検討し、歴史・先史時代への適用性を評価した。

第1章は序論である。

第2章では、津波解析において、断層破壊過程における断層すべり量の自己相似性を考慮した円錐型断層モデルを導入することで、東北地方太平洋沖地震のように、地震規模が大きく断層すべり分布が不均一であっても、少ない断層パラメータ数で沖合の津波波形を精度良く再現可能であることを示した。この成果は、巨大地震における断層破壊過程の普遍性を検討する上で大きな知見である。また、未知パラメータ数の少なさと断層すべり量の合理性の観点から、歴史・先史時代の巨大津波の波源モデルとして、円錐型断層モデルが、従来用いられている矩形一様すべりを仮定したモデルよりも適している可能性が示された。

第3章では、東北地方太平洋沖地震津波の事例において、広域に分布する津波堆積物の層厚情報に基づき、津波土砂移動モデルを活用して津波波源モデルを推定した。津波土砂移動解析の再現精度を評価するための新たな指標として、調査測線における単位幅総堆積層量と調査測線を一定間隔で区間分けしたときの区間平均層厚の計算値と実測値の差の二乗平均平方根を導入した。この指標を用い、津波堆積物調査側線の沖合に想定した円錐型断層モデルの断層すべり量を推定した結果、津波堆積物の層厚情報のみから、津波波源モデルの最大すべり量と地震規模を高精度で推定可能であることが示された。また、歴史・先史時代への適用性を評価するため、津波堆積物の供給源と潮位の不確定性を評価した結果、マグニチュード9クラスの巨大地震に対しては、信頼できる結果が得られた。

第4章は結論である。

以上の成果により、本研究では、地震学の理論に基づく円錐型断層モデルを津波解析に初めて導入し、津波波源モデルの推定においてすべり欠損速度分布および既往地震履歴の先験情報を用いる具体的な手法を示した。また、津波堆積物の層厚情報のみから、マグニチュード9クラスの巨大地震の津波波源モデルを高精度で推定可能であることを初めて示した。今後、津波工学を中心として、地質学や地震学、測地学の知見を融合させる研究として巨大津波の実態解明に大きく寄与できると期待できる。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。