

ベイズ最適化と非線形最小二乗法の組み合わせによる新たな非線形津波インバージョン法の開発

課題責任者

馬場 俊孝

徳島大学大学院社会産業理工学研究部

著者

上谷 政人*

*徳島大学大学院創成科学研究科

キーワード：津波，非線形津波インバージョン法，津波痕跡高，1946 年昭和南海地震

1. はじめに

津波波形により断層の破壊過程を推定する手法として線形津波インバージョン法が提案されている。しかし、線形津波インバージョン法は津波の線形性を仮定している為、非線形性が強く現れる後続波や浸水・遡上高データを利用できない。線形津波インバージョン法は津波観測網が存在しない時代の 19 世紀以前の地震に適用できない為、古い時代の地震を対象としたインバージョン解析には非線形津波インバージョン法が必要となる。これまでの非線形津波インバージョン法の開発を試みた研究では（安中ほか，1999），津波の非線形性を疑似的に補正した線形津波インバージョンの枠組みに留まっている。また、不均質な断層のすべり量を推定する場合、津波波形を入手できないことから、非線形津波インバージョン法に使用する断層モデルの初期すべり量の推定が困難であることも課題である。そこで本研究では、ベイズ最適化と非線形最小二乗法を組み合わせることで、効率的に津波痕跡高データのみから不均質な断層モデルのすべり量の推定を可能とする新たな非線形津波インバージョン法を提案する。この手法を 1946 年昭和南海地震に適用して、津波痕跡高を再現する断層モデルを推定した。

2. 解析手法

本研究で提案する非線形津波インバージョン法の枠組みを図 1 に示す。まず、ベイズ最適化の一手法である Tree-Structured Parzen Estimator（以降、TPE と呼ぶ）と 6 秒の分解能の地形データを用いることで、最適化の効率化と計算コストの削減を図り、初期断層モデルに使用する不均質すべりを推定する。次に、TPE で推定した初期断層モデルと Levenberg-Marquardt 法、2 秒の分解能の地形データを用いることで、断層モデルのすべり量を推定する。

津波痕跡高データは東北大学「津波痕跡データベース」より、信頼度 A の海面基準で整理された 194 地点分の津波痕跡高を使用した。更に、この津波痕跡高データを津波計算に使用する地形データの 1 メッシュに 1 つの痕跡高となるように平均化したものを解析に使用した。2 の地形データに対しては 170 地点分、6 秒の地形データに対しては 148 地点分の津波痕跡高を利用した。津波波形の観測データは「南海トラフ沿いの過去地震の津波断層モデル（図表集）」よりデジタル化し、細島、宇和島、堺、師崎、福江、内浦、伊東の 7 箇所の検潮所における観測データ

3 時間分（1 分間隔）を使用した。

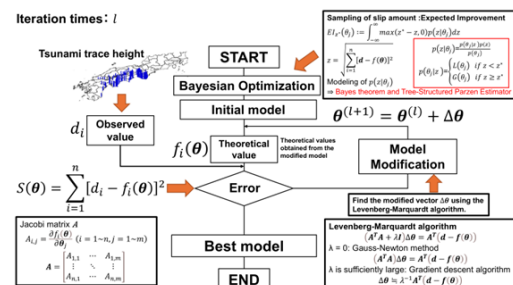


図 1. 本研究で開発した非線形津波インバージョン法の流れ。

地形データには Global tsunami Terrain Model を使用した。津波計算は非線形長波式を採用した。18 秒，6 秒，2 秒の格子間隔を持つ地形データで 3 層ネスティングを組み（図 2），計算時間を 3 時間，計算ステップ幅を 0.1 秒，ライズタイムを 60 秒とした。時間幅を 0.1 秒とした。津波の初期水位分布には、半無限均質弾性体モデルで計算した地殻変動に海底斜面の水平変位による津波励起の効果を考慮し、Kajiura フィルタを適用したものを使用した。陸上への浸水には小谷ほか（1998）の移動境界条件を利用し、水位が海岸の標高を越えた場合に陸上への津波の浸水を計算した。また、計算領域の外縁には透過境界条件を使用した。潮位は東京湾平均海面（T.P.）0m とした。

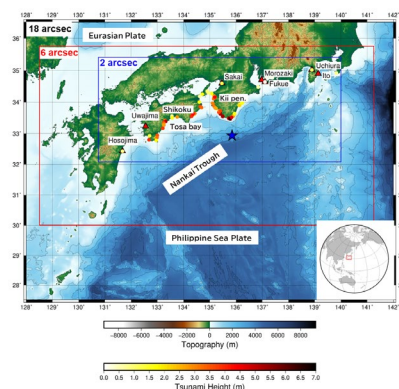


図 2. 本研究で採用した 3 層ネスティングシステムと津波痕跡高の分布。青い星は震源を表す。

本研究では、安中ほか (2003) で提案された矩形断層モデルを採用した。不均質な断層モデルを求める為に、この矩形断層を 8 枚の小断層に分割した断層モデルを作成した。断層モデルのすべり量の初期値として、TPE で推定したすべり量を使用した。更に、非線形インバージョンとの比較の為に、線形津波インバージョンも実施した。

3. 解析結果

TPE により推定された断層モデル（以降、TPE モデルと呼ぶ）を用いて 2 秒の地形データによる非線形津波計算を行った結果、 $K-\kappa$ は 1.00-1.38 であった。断層の剛性率を 50GPa とした場合、TPE モデルの地震モーメント M_0 は 4.86×10^{21} Nm、モーメント・マグニチュード M_w は 8.39 であった。四国沖の B-2 の小断層で最大 7.3m のすべりが生じていた。また、紀伊半島沖付近の A-4 小断層も 4.7m の大きなすべり域であった（図 3）。

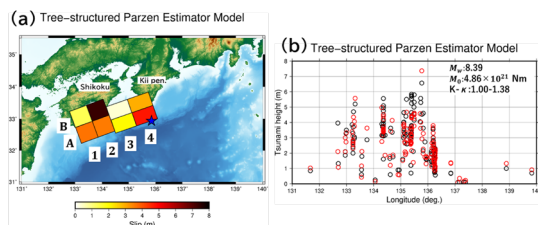


図 3. (a) TPE モデルのすべり量分布. (b) TPE モデルを用いた 2 秒の地形データに対応する 170 地点分の津波痕跡高データの観測値（黒）と計算津波高（赤）の比較. 青い星は震源を表す。

非線形津波痕跡高インバージョンにより推定された断層モデル（以降、津波痕跡高モデルと呼ぶ）の $K-\kappa$ は 0.95-1.37 であった。津波痕跡高モデルの地震モーメント M_0 は 5.26×10^{21} Nm、モーメント・マグニチュード M_w は 8.41 であった。四国沖の B-2 の小断層で最大 7.0m のすべりが生じており、紀伊半島沖付近の A-4 の小断層も 5.2m と大きなすべりが見られた（図 4）。

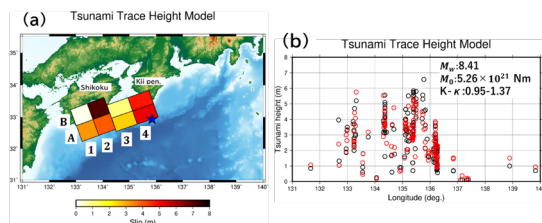


図 4. (a) 津波痕跡高モデルのすべり量分布. (b) 津波痕跡高モデルを用いた 2 秒の地形データに対応する 170 地点分の津波痕跡高データ（黒）の観測値と計算津波高（赤）の比較. 青い星は震源を表す。

線形津波インバージョンにより推定された断層モデル（以降、線形津波インバージョンモデルと呼ぶ）の $K-\kappa$ は 1.37-1.48 であった。線形津波インバージョンモデル

の地震モーメント M_0 は 3.09×10^{21} Nm、モーメント・マグニチュード M_w は 8.26 であった。四国沖の B-2 の小断層で 4.4m のすべりが生じており、紀伊半島沖付近の A-4 の小断層のすべり量は 2.4m と小さな値であった（図 5）。

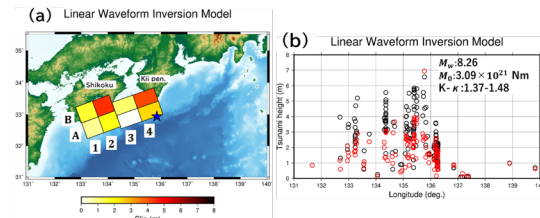


図 5. (a) 線形津波インバージョンモデルのすべり量分布. (b) 線形津波インバージョンモデルを用いた 2 秒の地形データに対応する 170 地点分の津波痕跡高データ（黒）の観測値と計算津波高（赤）の比較. 青い星は震源を表す。

4. 考察

本研究で推定した津波痕跡高モデルには紀伊半島沖（A-4）と四国沖（B-2）の 2 つのアスペリティがイメージされていた。また、津波痕跡高モデル及び線形インバージョンモデルの $K-\kappa$ の値から、潮位計で記録された津波波形を用いた津波波形インバージョンで求められた断層モデルでは津波痕跡高の再現に不十分であることが分かる。津波痕跡高の再現性の向上の観点において、津波痕跡高の使用と津波の遡上計算を考慮した本研究の非線形津波インバージョン法が有効であった。地震モーメント及びモーメント・マグニチュードの比較からも、インバージョンへの津波の非線形性の考慮は、断層のすべり量分布の過小評価の傾向の改善に効果的であったと考えられる。津波痕跡高モデルは線形津波インバージョンモデルと比較して、A-1 から A-4 にかけての浅部の断層のすべり量が大きくなっている。このことから、津波痕跡高の再現性の改善には浅部の断層のすべり量が寄与したと考えられる。

謝辞

本研究の津波計算には地球シミュレータを利用させていただきました。記して、感謝いたします。

参考文献

- [1] 安中正ほか, 浅水変形効果を考慮した津波インバージョン手法に関する研究, 海岸工学論文集, 46, 341-345, (1999)
- [2] 小谷ほか, GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 45, 356-360, (1998)
- [3] 安中正ほか, 津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴, 地震工学研究発表会梗概集, 27, 39-39, (2003)