

震央位置を考慮したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測

Real-time Tsunami Prediction Based on Inversion Method Using Epicenter

辰巳大介¹・富田孝史²

Daisuke TATSUMI and Takashi TOMITA

To predict the tsunami profiles along coasts precisely and quickly based on the tsunami profiles observed at offshore locations, the present study improved the inversion method by using the epicenter as a priori information. Numerical experiments were conducted around Nankai Trough. Based on the tsunami profiles observed at 5 offshore locations for 15 minutes, the initial water surface distribution and the tsunami profiles along coasts could be predicted with good accuracy. Sensitivity analysis was also conducted to investigate how the number of the offshore observation points and the length of observation time affect the accuracy of the prediction. Condition number and Dirichlet spread function were confirmed to be effective for estimating the accuracy of the prediction even if the true initial water surface distribution was unknown.

1. はじめに

本研究は、GPS波浪計等が観測する沖合津波観測情報から、沿岸部の津波の挙動を即時的に予測する技術を開発するものである。

本研究の動機付けは、第1に、津波防災対策において津波情報の的確な伝達と提供が重要であること、第2に、気象庁による現行の津波予報は主に地震観測に基づくので、沖合津波観測情報を併用すれば予測精度の向上が期待できること、第3に、GPS波浪計等の沖合で津波を観測する装置が実用化され始めたこと、の3点である。

沖合津波観測情報を利用した津波予測に関しては、大垣ら(2006)をはじめ様々な手法が提案されている。本研究は、まず、震央位置を考慮することで既往のインバージョン手法(小池, 2002; 安田ら, 2007)の精度向上を図り、南海トラフを対象にした数値実験で精度検証を行った。次に、津波観測時間と観測点数が予測精度に及ぼす影響を感度分析により明らかにし、最後に、予測精度の評価指標を提案した。

2. 震央位置によるインバージョン手法の改良

(1) インバージョン手法の原理

概ね水深50 mより深い海域では津波の非線形性を無視できるため、津波波源が発生する津波は、津波波源を分割した小領域の発生する津波の線形和で表せる、という重ね合わせの原理が成立する。したがって、想定波源域を小領域(以下、単位波源と呼ぶ)に分割し、各単位波源が1m隆起した時に発生する津波(以下、単位津波

と呼ぶ)の伝播の数値計算を事前に実行しておけば、沖合における観測津波波形と単位津波による水位変動の線形和の残差が最小になるよう、最小二乗法を用いて単位波源の初期変動量(すなわち津波波源)を推定することが可能である。任意地点Aにおける時刻 j ($j=1\sim M$)の観測水位を η_j 、 i 番目の単位波源の初期変動量を a_i ($i=1\sim N$)、 i 番目の単位波源が発生させた単位津波の、地点Aにおける時刻 j の水位変動を $\tilde{\eta}_{j,i}$ とすると、残差の二乗和 E は式(1)のとおりであり、 E を最小にする a は、正規方程式と呼ばれる式(2)の解である。

$$E = \|\eta - Ha\|^2 \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\text{ただし、}\eta = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_M \end{pmatrix}, a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} \tilde{\eta}_{1,1} & \cdots & \tilde{\eta}_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\eta}_{M,1} & \cdots & \tilde{\eta}_{M,N} \end{pmatrix}$$

$$H^T Ha = H^T \eta \cdots \cdots \cdots (2)$$

推定された単位波源の初期変動量に基づいて拡大・縮小した単位津波の線形和を計算することにより、沿岸部の津波波形が予測される。

最小二乗法と単位津波の線形和のみを計算すれば良いので、インバージョン手法は計算に要する時間が大変短いという利点を持つ。一方、非線形性の卓越する浅い海域や陸上の遡上へは適用できないという欠点がある。

(2) 小池(2002)のインバージョン手法

式(2)中の係数行列 $H^T H$ は悪条件であることが多いため、小池(2002)は、単位波源の初期変動量が空間的に滑らかに分布するという先験情報を利用して、残差の二乗和と単位波源の初期変動量の空間微分を最小化する手法を提案した。

(3) 震央位置によるインバージョン手法の改良

小池(2002)の手法のさらなる精度向上を目指して、本研究では、津波波源が震央の周囲に分布するという先験情報を導入した。震央位置は、地震波の解析から地震

1 正 会 員 修(工)(独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 研究官

2 正 会 員 博(工)(独法)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 上席研究官

発生後数分間で高精度に推定されるため、実用性も高い。

残差の二乗和、単位波源の初期変動量の空間微分、津波波源と震央の離れ度合いの3つを最小にする単位波源の初期変動量は、式(3)の解である。分子の第2項 Da は単位波源の初期変動量の空間微分であり、小池(2002)と異なり中心差分を用いた。分子の第3項 Fa は津波波源と震央の離れ度合いを表す。津波波源と震央の離れ度合いを評価するために、震央から各単位波源までの距離に比例した値を対角要素に持つ行列 F を考案した。 ε_1 と ε_2 は、観測値に対する先験情報の重み付けである。先験情報の総和が観測値と等しい重みを有するように、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.5$ とした。式(3)を展開して得られる式(4)を解けば、単位波源の初期変動量が推定される。

$$\frac{\partial (E + \varepsilon_1 \|Da\|^2 + \varepsilon_2 \|Fa\|^2)}{\partial a} = 0 \cdots \cdots (3)$$

$$\text{ただし、} D = \begin{pmatrix} -4 & 1 & \cdots & \\ & -4 & 1 & \cdots \\ & & \ddots & \\ & & & -4 & 1 \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \ddots & & & \\ & 0.0 & & \\ & & 0.1 & \\ & & & 0.2 & \ddots \end{pmatrix}$$

$$(H^T H + \varepsilon_1^T D + \varepsilon_2^T F)a = H^T \eta \cdots \cdots (4)$$

3. 南海トラフを対象にした数値実験

沖合津波観測情報が未だ十分には蓄積されていないので、地震の断層パラメータに基づいて津波の初期水位分布と津波伝播を計算し、仮想的な観測データを作成して数値実験を実施した。

(1) 数値実験の概要

数値実験の対象領域は、東海・東南海・南海地震の発生が想定される本州太平洋沿岸とした。

インバージョン手法は重ね合わせの原理に基づくため、線形長波方程式を支配方程式とする数値計算モデルを使用した。津波伝播計算に使用した計算領域の大きさは東西約800km、南北約440km、空間格子サイズは1.35km、時間間隔は1秒であり、地震発生から3時間後までを計算対象とした。

インバージョン手法で使用する沖合津波観測点は、対象領域に設置予定のGPS波浪計を参考に、足摺岬沖・室戸沖・白浜沖・尾鷲沖・御前崎沖の5点とした(図-1下段参照)。GPS波浪計は1秒間隔で水位変動を観測するが、本研究では10秒間隔の観測水位を利用した。

宝永東南海地震(1707年、マグニチュード8.4)、昭和東南海地震(1944年、マグニチュード7.9)、昭和南海地震(1946年、マグニチュード8.0)、東海道沖地震(2004年、マグニチュード7.4)、という過去の4個の地震津波を対象に、佐藤(1989)とKoshimura(2008-05-02参

照)の断層パラメータから仮想的な観測データを作成した。

(2) 単位波源および単位津波の作成

東海・東南海・南海地震の想定震源域を覆うように、図-1下段の破線で囲まれた領域を811個の単位波源へ分割した。単位波源の1辺の長さは、河田・小池(1997)を参考に13.5km(計算格子サイズの10倍の長さ)とした。

単位波源を1m隆起させて単位津波の伝播を事前に計算するとき、単位波源の隆起形態は3次元曲面状とした。小池(2002)のように単位波源を角柱状に隆起させた先行研究と異なり、単位波源を3次元曲面状に隆起させた場合、単位津波に高周波数の雑音が含まれにくく、また複雑な平面形状を持つ津波波源へも適合しやすかった。

(3) 改良したインバージョン手法の精度検証

5基のGPS波浪計が地震発生後15分間に観測する沖合津波波形を利用して、インバージョン手法による津波予測を行った。

表-1は、震央位置を考慮して改良した手法と、震央位置を考慮しない手法の初期水位分布の予測精度を、真値と推定値の二乗平均平方根誤差(以下、RMSEと略す)を用いて比較した結果である。初期水位分布が精度良く推定されると、重ね合わせの原理に基づき任意地点の津波波形の残差も小さくなるので、初期水位分布の予測精度は予測精度全般の代表と見なせる。なお、RMSEの後ろのカッコ内には、初期水位分布の真値の最大値に対するRMSEの百分率を記載した。条件数とディリクレスプレッド関数(ディリクレS.F.)は、3.(5)で説明する。

震央位置を考慮して改良した手法は、初期水位分布の真値の最大値に対して10%程度のRMSEで初期水位分布を推定できた。震央位置を考慮しない手法のRMSEに対して、改良した手法のRMSEは10~70%程度の大きさであり、大幅に予測精度が向上した。特に、津波波源が広い1707年宝永地震や1946年南海地震において、精度向上が顕著である。

表-1 改良した手法と既往の手法の初期水位分布の予測精度

地震名	評価指標	震央を考慮	震央を不使用
1707年 宝永	RMSE(m)	0.53(8%)	8.60(129%)
	条件数	69	1759
	ディリクレS.F.	804	2775
1944年 東南海	RMSE(m)	0.12(12%)	0.17(18%)
	条件数	82	1759
	ディリクレS.F.	810	2775
1946年 南海	RMSE(m)	0.27(11%)	1.89(78%)
	条件数	70	1759
	ディリクレS.F.	803	2775
2004年 東海道沖	RMSE(m)	0.06(8%)	0.08(10%)
	条件数	98	1759
	ディリクレS.F.	819	2775

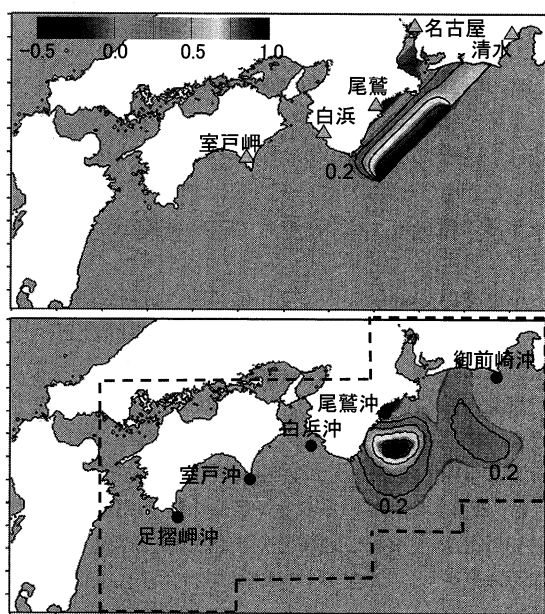


図-1 1944年東南海地震の初期水位分布の真値(上段)と推定値(下段)。下段の破線は単位波源の設置領域を示す。

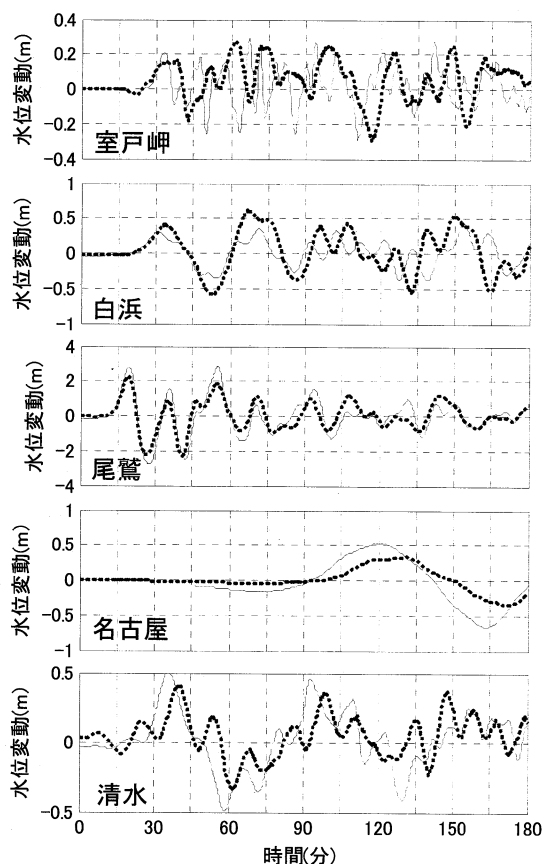


図-2 沿岸5地点の津波波形の真値(実線)と予測値(点線)

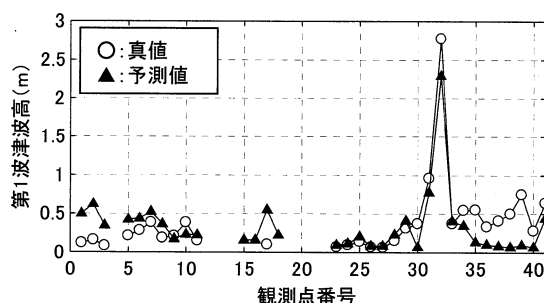


図-3 第1波津波高の真値と予測値

図-1, 図-2, 図-3は, 1944年東南海地震を例に, 津波予測の結果を示した図である。

図-1は初期水位分布の推定結果である。0.2m間隔でコンターを書き込んでいる。津波波源の平面形状の推定精度は必ずしも高くないが, 津波波源の位置はある程度正確に推定されている。

図-2は沿岸5地点(図-1上段参照)における津波波形の予測結果である。名古屋や清水では, 津波波形の大きな傾向しか正しく予測されていないが, 尾鷲では地震発生後3時間までの津波波形が高い精度で予測されている。また室戸岬や白浜でも, 津波到達時刻および第1波の高さまでがある程度正確に予測されている。地震発生後15分間で沖合津波観測を終了し, その後1~2分間以内に津波予測を実行できるため, 地震発生から津波到達までに30分間以上かかる大阪湾内や四国沿岸では津波到達前に, 津波波源に近い尾鷲でも第1波の峰が到達する前に, 津波予測を発表することが可能である。

図-3は, 気象庁等の管理する41の検潮所における第1波津波高を, 真値と予測値と比較した図である。振幅が5cm以下の波は無視し, 振幅が5cmより大きい押し波が到達しなかった地点は何もプロットしていない。横軸の観測点番号は, 気象庁の津波予報区に対応している(1~2宮崎, 3大分瀬戸内海, 4福岡瀬戸内海, 5~10高知, 11徳島, 12~13香川, 14~16愛媛瀬戸内海, 17愛媛宇和, 18山口瀬戸内海, 19~21広島, 22岡山, 23~24兵庫瀬戸内海, 25~26大阪, 27淡路島南部, 28~31和歌山, 32~33三重南部, 34伊勢三河湾, 35~41静岡)。大阪湾や紀伊半島の沿岸(23~33番)では, 第1波津波高が正しく予測されている。一方, 近傍にGPS波浪計が存在しない九州太平洋沿岸(1~3番)や瀬戸内海西部沿岸(15~18番)では, 第1波津波高の予測精度が低い。また図-1のとおり, 静岡県の沖合では初期水位分布の真値と推定値の誤差が大きいため, 静岡県沿岸(35~41番)においても第1波津波高の予測精度が低い。

(4) 津波観測時間と観測点数が予測精度に及ぼす影響
津波観測時間と観測点数が初期水位分布の予測精度に

及ばず影響を明らかにするため、津波観測時間を地震発生後5分間～60分間まで変化させて、あるいは観測点数を3個～19個まで変化させて、感度分析を行った。観測点数が3点の場合は足摺岬沖・白浜沖・御前崎沖の3基のGPS波浪計を使用し、観測点数が10点と19点の場合は、図-1下段に示した5基のGPS波浪計の間に等間隔で仮想的なGPS波浪計を追加した。

図-4から、1707年宝永地震を除く3つの地震では、津波観測時間を20分間より長くすると、観測時間に応じてRMSEが低減し、予測精度が向上する。観測時間を長くすると、津波の第1波の全ての位相を観測できるなど、沖合津波観測情報の質・量が向上し、また、より長い時間の単位津波がインバージョン手法で使用できるため、予測精度が向上すると考えられる。

ただし1707年宝永地震では、観測時間を60分間まで延長しても余り予測精度に変化がない。予測精度が向上しない理由は、観測値に対する先験情報の重み付け係数 ε_1 と ε_2 を定数で与えたためと考えられる。津波波源の広い1707年宝永地震においては先験情報の果たす役割が大きいので、沖合津波観測情報の量の増大により先験情報の影響が小さくなると予測精度は向上しない。

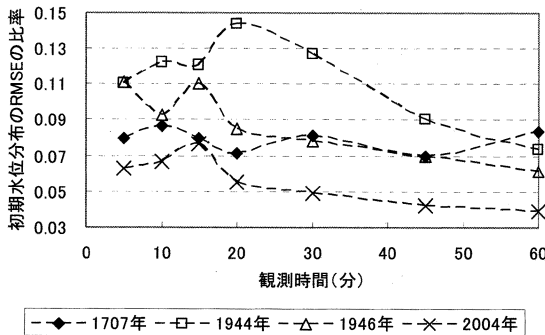


図-4 津波観測時間と、初期水位分布の真値の最大値に対する初期水位分布のRMSEの比率

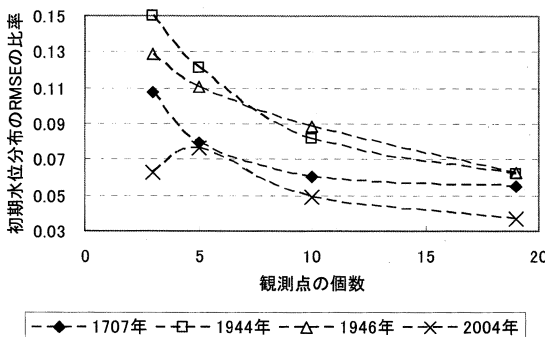


図-5 津波観測点数と、初期水位分布の真値の最大値に対する、初期水位分布のRMSEの比率

なお津波観測時間が短い場合、地震によっては沖合観測点でほとんど津波を観測できないため、初期水位分布の推定値が0に近づき、凹凸の激しい推定値よりRMSEが小さくなる可能性もある。

図-5から、4つの地震全てにおいて、津波観測点数を増加させると、観測点数に応じてRMSEが低減し、予測精度が向上する。津波観測時間を長くした場合と同様に、津波観測点数を増やした場合も、沖合津波観測情報の質・量が向上し、また、より多様な単位津波がインバージョン手法で使用できるため、予測精度が向上すると考えられる。津波観測点数の増加による予測精度の向上は、上記に示した、沖合津波観測情報の量の増大に伴う先験情報の影響の縮小を上回るものと推察できる。

(5) 予測精度の評価指標

本研究のような数値実験を除くと、初期水位分布の真値を正確かつ素早く知ることは困難なので、初期水位分布が未知でも使用できる予測精度の評価指標として、条件数とディリクレブレッド関数の有効性を検証した。

a) 条件数とディリクレブレッド関数の導出

インバージョン手法は、式(4)で示される多次元1次連立方程式を解くことに他ならないので、係数行列($H^TH + \varepsilon_1^2 D^TD + \varepsilon_2^2 F^TF$)の性質が予測精度に大きな影響を持つ。係数行列の評価指標の1つが、行列の最大固有値と最小固有値の比で表される条件数である。条件数が大きい係数行列は特異に近いので、観測値に含まれる誤差が最小二乗解に大きく影響して解の精度は低下しやすい(高倉, 2007)。例えば、沖合観測点における単位津波による水位変動(行列 H の列ベクトル)が線形従属に近い場合、係数行列は特異に近づく。

また、単位波源の初期変動量の真値を列ベクトル a_r とすれば、式(1)中の列ベクトル η (観測波形)は単位津波の線形和を用いて $\eta = Ha_r$ と表されるので、式(4)は式(5)へ展開することが可能である。式(5)から明らかとなっており、行列($H^TH + \varepsilon_1^2 D^TD + \varepsilon_2^2 F^TF$) $^{-1}H^TH$ が単位行列に近ければ、単位波源の初期変動量の真値 a_r と推定値 a の誤差が小さくなる。ディリクレブレッド関数は、行列($H^TH + \varepsilon_1^2 D^TD + \varepsilon_2^2 F^TF$) $^{-1}H^TH$ から単位行列を引き、差として残った行列の要素の二乗和で定義される数である(メンケ, 1997)。ディリクレブレッド関数が小さいほど、一般的に予測精度は高い。

$$a = (H^TH + \varepsilon_1^2 D^TD + \varepsilon_2^2 F^TF)^{-1}H^THa_r \cdots (5)$$

上記から明らかとなっており、条件数もディリクレブレッド関数も、初期水位分布の真値を使用することなく計算できる。

b) 条件数とディリクレブレッド関数の有効性

震央位置を考慮しない手法と比較すると、震央位置を考慮して改良された手法は、初期水位分布のRMSEが大

幅に減少すると同時に、条件数とディリクレスプレッド関数も急激に低下している (表-1参照)。

また、図-6は、津波観測時間と観測点数を変化させた感度分析において、条件数、ディリクレスプレッド関数、初期水位分布のRMSEの比率の関係をプロットした図である。シンボルの違いは、初期水位分布の真値の最大値に対する、初期水位分布のRMSEの比率を表す。初期水位分布のRMSEの比率が0.05より小さいシンボル (+) は、条件数が100以下、ディリクレスプレッド関数が800以下であり、破線より左下側に位置する。これに対して、初期水位分布のRMSEの比率が0.11より大きいシンボル (●) は破線の右上側に位置している。条件数とディリクレスプレッド関数の両者が小さい場合は予測精度が高いと評価できることが確認された。

以上のとおり、条件数とディリクレスプレッド関数は予測精度の評価に有効である。また、震央位置を考慮する、あるいは津波観測時間や観測点数を増加させると、条件数とディリクレスプレッド関数が減少するため予測精度が向上する、と考えられる。

ただし、条件数とディリクレスプレッド関数は、インバージョン手法に使用される単位津波や先験情報の性質を評価する指標であり、沖合における観測津波波形が予測精度に及ぼす影響を、直接には考慮していない点へ注意が必要である。

4. おわりに

震央位置を先験情報として考慮することにより、インバージョン手法を改良した。改良した手法を用いると、

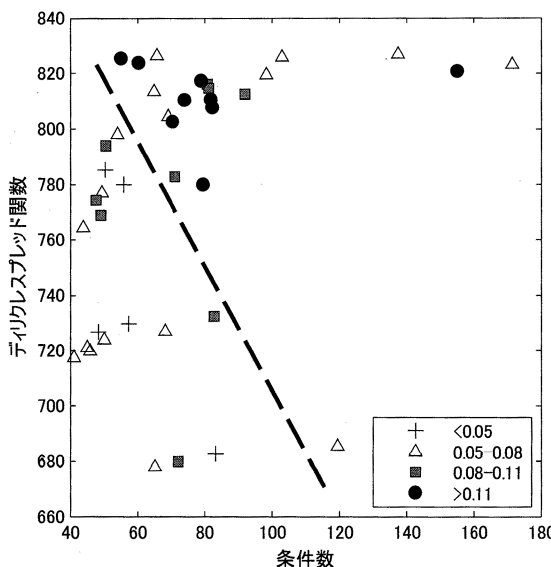


図-6 条件数、ディリクレスプレッド関数、初期水位分布のRMSEの比率の関係

南海トラフを対象にした数値実験では、5基のGPS波浪計が地震発生後15分間に観測する津波波形から、ある程度正確に津波波源や沿岸の津波を予測できることが確認された。津波観測時間と観測点数が予測精度に及ぼす影響を感度分析により明らかにした。初期水位分布の真値が分からない場合でも利用できる予測精度の評価指標として、条件数とディリクレスプレッド関数の有効性を確認した。

今後の課題は、先験情報の内容や重み付け係数の設定方法、津波観測時間等の諸条件を最適化する方法を考案し、予測精度のさらなる向上を目指すことである。また、計算時間の短いインバージョン手法では、沖合津波観測情報の蓄積に応じて津波予測結果を随時更新することが可能であり、津波予測結果の更新方法を検討する必要もある。さらに、沿岸の津波波形の予測精度の地域的な特性も解明しなければならない。

謝辞： GPS波浪計に関する情報は、独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究領域から提供いただいた。また本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金基盤研究 (A) (代表者：加藤照之、課題番号17201038) の補助を受けた。ここに記して、感謝の意を申し上げる。

参考文献

- 大垣圭一・安間友輔・越村俊一・今村文彦 (2006)：リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法，海岸工学論文集，第53巻，pp.216-220。
- 河田恵昭・小池信昭 (1997)：重ね合わせの原理に基づく津波数値解析方法，海岸工学論文集，第44巻，pp.271-275。
- 小池信昭 (2002)：先験情報を考慮したインバージョンによる津波初期水位分布の推定方法とその精度に関する研究，土木学会論文集，No.712 (II-60)，pp.117-135。
- 佐藤良輔 (1989)：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，pp.126-127 (宝永東南海地震モデル2) / p.199 (昭和東南海地震モデル5) / p.211 (昭和南海地震モデル6)。
- 高倉葉子 (2007)：数値計算の基礎ー解法と誤差ー，コロナ社，pp.14-30。
- メンケ，W (1997)：離散インバース理論ー逆問題とデータ解析ー，古今書院，pp.61-78。
- 安田誠宏・高山知司・川村健太・間瀬肇 (2007)：沖合観測情報を用いたインバージョン法によるリアルタイム津波予測，海岸工学論文集，第54巻，pp.196-200。
- Koshimura, S. : Modeling a tsunami generated by the Tokaido-Oki Earthquake of Mw 7.3 [04/09/05] (オンライン，Model-0を使用)，<http://www.dri.ne.jp/koshimuras/tokaido04/case0/>，参照2008-05-02。