GNSSによるリアルタイム断層推定情報の 津波解析への適用手法の検討

井上 拓也¹・太田 雄策²・越村 俊一³・日野 亮太⁴・
川元 智司⁵・檜山 洋平⁶・道家 友紀⁷

¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

E-mail:takuya.inoue.q7@dc.tohoku.ac.jp

²東北大学准教授 大学院理学研究科 (〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

³正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

⁴東北大学教授 大学院理学研究科 (〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

⁵国土地理院 測地観測センター (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1)

⁶国土地理院 測地観測センター (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1)

⁷日立造船株式会社 機械事業本部電子制御ビジネスユニット電子システム部 (〒140-0013 東京都品川区
南大井6-26-3)

GEONETの地殻変動データに基づく即時推定断層モデル(以下, GNSSモデル)の津波波源モデルとしての適用性を, 2011年東北地方太平洋沖地震津波の痕跡値との比較により検証した. GNSSモデルは太平洋沿岸の広域にわたる沿岸津波高を概ね再現しうるが, 三陸沿岸で観測された非常に高い津波の再現性に課題が残ると分かった. 津波浸水規模に関しては, 平野部として石巻湾に面した市街地を対象とする場合, GNSSモデルが一定程度の再現性を持つと分かった. また, 南海トラフのように走向・傾斜の構造が複雑なプレート境界において, 巨大地震による初期水位変動の推定に有用だと考えられるすべり分布モデルを, 1,200程度の矩形要素で近似的に表現することで複雑な初期水位変動を即時解析する手法を提案した.

Key Words : *real-time GNSS, rapidly estimated tsunami source model, tsunami simulation, 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, slip distribution fault model*

1. 序論

近年の大型計算機の演算能力向上に伴い, 地震発生後, 津波が沿岸に到達するまでに津波浸水予測解析をリアルタイムに実施する研究が行われている(Musa *et al.*¹⁾). この技術により, 発災直後に広域にわたる被害状況を把握し, より効率的で効果的な災害対応活動を支援できるといった社会的な便益が期待されている.

本研究では, 事前の津波解析結果とリアルタイムの沖合津波観測波形に基づく「データベース型」の津波浸水予測(例えば, Aoi *et al.*²⁾)ではなく, 大型計算機を利用した地震発生後の「フォワード解析型」の津波浸水予測(例えば, Oishi *et al.*³⁾, Musa *et al.*¹⁾)を行う上で初期条件となる, 地盤変動量(初期水位変動)を推定するための波源モデルについて検討する. 多様な波源モデルを考慮すると想定ケース数とデータベース構築・更新コストが膨大なものになってしまうデータベース型の予測とは異なり, 地震発生後に初期条件を設定して津波解析を実施するフォワード解析型の予測では, 波源モデルにお

いて断層面上でのすべりの不均質等を考慮することでより実際の現象に近い初期水位変動量を推定可能であり, 津波浸水予測の精度向上も期待される. 一方, 波源モデルの即時推定(地震発生後数分以内)が課題となる.

地震発生直後の断層モデル推定に関しては, 例えば地震波の初動に基づく緊急地震速報や地震波形に基づくモーメントテンソル解に, 経験的なスケーリング則を併用することで1枚の矩形断層として震源断層を推定する方法が考えられる. これらに対して本研究では, GNSS(Global Navigation Satellite System), すなわち人工衛星による全地球測位システムを利用した地殻変動の連続観測データに基づく即時推定断層モデル(GNSSモデル)を対象とする. GNSSリアルタイム測位においては地震波だけではなく永久変位も直接的に測定できる. このため, 2011年東北地方太平洋沖地震において緊急地震速報のマグニチュードが過小評価されたような事象が発生せず, 巨大地震に対しても地震発生後数分という短時間で, 地震規模及びその断層の広がりや断層のすべりを推定可能と期待されている(Ohta *et al.*⁴⁾).

図-1 断層モデルの位置及び形状、すべり量。左：矩形モデル（1枚矩形断層，すべり量：15.2 m， M_w 8.7），中：すべり分布モデル（三角要素数：2570，最大すべり量：17.5 m， M_w 8.8），右：内閣府モデル（矩形要素数：4575，最大すべり量：49.6 m）。海溝軸の概略位置を青線で図示。矩形モデル以外でも矩形モデルの位置を黒線（上端を実線，その他の辺を点線）で図示。断層の破壊伝播を考慮した内閣府モデルでは，地震発生から5分間の断層すべり量の総和を用いて色づけした。

日本では，国土地理院によってGEONET（GNSS連続観測システム）が運用されており，その観測点数は約1300点に上る。Ohta *et al.*⁴⁾は2011年地震津波を対象に，このGNSS測位データに基づく即時的な（地震発生後5分以内の）地震規模及び断層モデルの推定手法，沖合津波観測波形との比較によるモデル検証，津波警報への利用可能性を示している。Melgar and Bock⁵⁾はGEONETの観測データだけでなく地震動の速度波形や沖合津波観測波形も利用したインバージョンによる波源モデル推定を行い，津波浸水予測への適用性に関して，地形データの解像度が90m格子程度と低いために三陸沿岸での津波規模が過小に評価される以外は再現結果が極めてよいと議論している。以上を踏まえて，より解像度の高い地形データによるGNSSモデルの検証が求められている。

また，Kawamoto *et al.*⁶⁾は南海トラフのように走向・傾斜の構造が複雑なプレートの沈み込み境界では，地震時すべりを表現する1枚の矩形断層モデルを安定的に求められないとして，国土地理院及び東北大学大学院理学研究科によって開発が進められているREGARD（Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation Monitoring）に多数の三角要素から成るプレート境界における地震時すべり分布モデル推定機能を追加し，その精度を検証している。すべり分布モデルを用いることで複雑な地盤変動量分布を推定できる一方，地盤変動量の解析に長時間が必要となるため，リアルタイム津波浸水予測の初期条件とするためには，この高速解析手法の検討が必要となる。

以下では，まずGNSSモデルの津波波源モデルとしての適用性を，2011年東北地方太平洋沖地震津波の痕跡値との比較によって検証する。次に，多数の三角要素で構

成されるすべり分布モデルを矩形要素の集合により近似的に表現することで，複雑な地盤変動量（初期水位変動）分布の即時解析を可能とする手法を提案する。

2. GNSSモデルの津波波源モデルとしての検証

(1) 検証手法

a) 断層モデルと地盤変動量解析

2011年東北地方太平洋沖地震津波を再現するGNSSモデルとして用いるのは，1枚の矩形断層から成る「矩形モデル（Rectangular）」⁴⁾，及び「すべり分布モデル（Slip Distribution）」⁶⁾とした。すべり分布モデルは，東北地方太平洋沖地震の際に陸上のGEONET観測点の変位量から推定されたものである。比較検討の対象として，津波インバージョンモデルである，2012年に南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定された津波断層モデル（以下，「内閣府モデル（Cabinet Office）」）を用いた。

図-1には，矩形モデルとの対比においてすべり分布モデル・内閣府モデルの位置及び形状，すべり量を示す。矩形モデルに対してすべり分布モデルはすべりの中心が陸側に寄る傾向があること，また内閣府モデルは北寄りにすべりの中心を持ち，三陸沖中部の海溝寄りにもすべり量の大きい要素を持つという特徴があると分かる。

断層モデルによる地盤変動量は，矩形要素で構成される矩形モデル及び内閣府モデルについてはOkada⁷⁾の方法で，三角要素で構成されるすべり分布モデルについてはMeade⁸⁾の方法で解析した。矩形モデル及びすべり分布モデルでは，水深1000 m以深の地域で水平地盤変動と海底勾配によって水塊が鉛直方向に移動する効果も考慮し

たが、インバージョンモデルである内閣府モデルでは鉛直地盤変動量のみを考慮した。

b) 津波解析

上記の地盤変動量分布に潮位を加えたものを初期水位分布、すなわち津波解析の初期条件として、平面2次元非線形長波理論に基づく津波解析を実施した。

入手可能な地形モデルの制約から、太平洋沿岸の広域（北海道～茨城県）での検証は最小格子間隔を50 mとして沿岸津波高を評価した。地形データは中央防災会議「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会（2006）」の公開データを世界測地系UTM54帯に座標変換して使用した。沿岸津波高の概算においては、全ての断層モデルに対して断層は即時的に破壊するものと仮定した。陸上への津波浸水規模の検証は、まず平野部に検討範囲を絞り、津波被害が甚大であった宮城県の石巻湾に面した市街地を対象とした。石巻市・東松島市から貸与された2011年地震後の測量による最小格子間隔10 mの地形データを、地震による地殻変動を標高についてのみ地震前に補正⁹⁾して用いた。海岸構造物等の防護施設は無しとし、粗度は一定値 $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を採用した。再現時間は6時間とした。また、沿岸津波高を対象とした解析では潮位条件をT.P. +0 mとし、浸水解析では鮎川検潮所での津波来襲時推定潮位であるT.P. -0.42 mを設定した。

c) 津波痕跡値との比較

津波痕跡値としては、2011年東北地方太平洋沖地震に関する合同調査グループの津波痕跡データ¹⁰⁾のうち、信頼度A（信頼度大）及びB（中）のものをを用いた。

沿岸津波高を対象とした解析では、地形データの解像度とデータソースの精度を考慮し、T.P. 0 m未満となる汀線付近で津波による最大水位を抽出し、そこから200mを越えて内陸に位置する痕跡値は評価から除外し、各々の痕跡値から最も近い解析抽出値との比較を行った。津波痕跡の高さは、津波による水位変動に着目するため津波来襲時潮位を基準に補正された値を使用した。浸水予測解析では、T.P.基準の痕跡高さを、痕跡値が位置する計算格子でのT.P.基準の津波最大水位と比較した。

(2) 検証結果

a) 沿岸津波高

図-2に、沿岸津波高の解析値と痕跡値の比較図を示す。表-1は北海道から茨城県にかけての太平洋沿岸の全体、及び各道県ごとに、誤差（痕跡値を解析値で割った比の平均と標準偏差である幾何平均 K 及び幾何標準偏差 κ ）を各断層モデルについてまとめた。

すべり分布モデルの沿岸津波高は内閣府モデルや痕跡値に対して大幅に低くなった。これは、陸上のGNSS観測局のみから推定されたモデルであるために大きなすべりの推定位置が陸側に寄ることが理由と考えられる。矩

図-2 沿岸津波高解析値と津波痕跡値との比較図。地図：合同調査グループの津波痕跡値、左グラフ：沿岸津波高解析値（汀線付近のT.P.基準最大水位）、右グラフ：解析値と痕跡値の重ね図（痕跡値は天文潮位基準）。

表-1 沿岸津波高解析値と津波痕跡値との誤差の比較表。基準からの津波水位が1 m以上となる解析値及び痕跡値の組み合わせを評価対象とした。汀線付近から200m以内の痕跡値は計2482点。

Prefecture	Rectangular (K/κ /sample)	Slip Distribution (K/κ /sample)	Cabinet Office (K/κ /sample)
All	1.27/1.60/2475	2.16/1.85/2449	1.01/1.53/2479
1. Hokkaido	1.37/1.36/190	1.70/1.35/167	0.99/1.37/194
2. Aomori	1.13/1.53/168	1.75/1.69/165	0.77/1.36/168
3. Iwate	1.74/1.54/967	3.17/1.88/967	0.94/1.38/967
4. Miyagi	0.93/1.43/486	1.35/1.46/486	0.76/1.42/486
5. Fukushima	0.85/1.57/159	1.32/1.63/159	1.12/1.57/159
6. Ibaraki	1.10/1.31/505	2.20/1.44/505	1.62/1.36/505

形モデルは道県ごとに見ると最も再現性が高くなる場合もあり、即時推定モデルとしては概ね痕跡値を再現していると考えられるが、三陸沿岸では痕跡値に見られる非常に高い津波を再現できず過小評価となると分かった。

b) 津波浸水規模

図-3に宮城県石巻市及び東松島市における各波源断層モデルによる津波浸水規模を最大浸水深分布図と痕跡値との散布図で示し、誤差を集計したものを表-2に示す。

GNSSモデルによる対象地域での津波浸水範囲や津波高は、津波インバージョンモデルである内閣府モデルと

同程度となった。浸水規模は海溝軸に直交する方向での波源の幅にも影響されると考えられ、これが再現できているため、すべり分布モデルでは沿岸津波高は過小だが浸水規模はある程度適切に評価できていると考えられる。

3. GNSSすべり分布モデルの矩形要素近似による地盤変動量（初期水位変動）の即時解析

(1) すべり分布モデル

2章の検証ではすべり分布モデルは過小評価の傾向が見られた。一方で南海トラフでは1枚矩形断層による震源断層の推定は不適切であり、すべり分布モデルを用いる必要がある⁹⁾。ここで検討するモデルは、1707年宝永地震の3次元地震動再現解析による疑似的な地殻変動データを元に推定された、三角要素数2306、 M_w 8.75のモデル（図-5、中段左）である⁹⁾。

波源域の津波解析に用いる格子数を150万格子程度とし、Meade⁸⁾の方法（MATLABで記述）により地盤変動量を解析すると、一般的なデスクトップPCで並列計算しない場合、1つの三角要素あたり約20分が必要であった。そこで、即時解析のため、すべり分布モデルを矩形要素の集合で近似することとした。グリーン関数を予め用意する方法は、2000以上の三角要素に対して必要なテーブルサイズが20 GB以上となり、フォワード解析型予測の利点である即時解析用入力データの保守性を低下させるため採用しなかった。東北大学の大型計算機での実測値から、Okada⁷⁾の方法により1分以内に地盤変動量分布を即時解析できる矩形要素数の上限を1200程度とした。

(2) 矩形要素近似手法

a) プレート形状データ

フィリピン海プレートの深度の離散的な数値データ¹¹⁻¹³⁾をスプライン補間¹⁴⁾し南海トラフの震源域を覆う範囲に810 mグリッドのプレート境界深度データを構築した。

b) 矩形要素によるプレート形状の近似

すべり分布モデルの範囲（面積）と1200程度という矩形要素数の制約から、矩形要素の長さ L を12 km程度とした。 M_w 7.0程度の地震では経験的に断層の大きさが20 km×30 km程度であるので、津波を起こしうる比較的小規模な地震でも複数要素で表現が可能である。

図-4に示すように、各矩形要素に対して、プレート等深線上に長さ L 間隔で断層上端の中心点を取り、断層面をその中心を含む9点での最小二乗法によりプレート形状にフィッティングし、走向・傾斜角を決定した。断層下端が周囲の要素と同程度となるよう矩形要素の幅 W を伸縮させた。ある水平位置でのプレート深度は、上記グリッドデータより双一次補間を用いて取得した。プレート形状の近似に必要な矩形要素数は、合計1245となった。

図-3 宮城県石巻市・東松島市における最大浸水深分布図及び痕跡値と解析値の散布図。TP. +0m未満のデータは除外。上：矩形モデル，中：すべり分布モデル，下：内閣府モデル。

表-2 津波浸水解析値と津波痕跡値との誤差の比較表。比較はTP.基準とし、TP. +0m以上の解析値及び痕跡値の組み合わせを評価対象とした。遡上域の痕跡値は計383点。

Rectangular (K/κ/sample)	Slip Distribution (K/κ/sample)	Cabinet Office (K/κ/sample)
0.62/1.80/369	1.04/1.78/350	0.71/1.81/366

図-4 断層面のプレート形状へのフィッティングの模式図。断層面は矩形、最小二乗法に用いる位置は円盤で表示。

図-5 すべり分布モデル（左）と矩形近似モデル（右）の比較。上段：幾何配置，中段：すべり量分布，下段：地盤変動量分布。地盤変動量には水深 1000m 以深において水平変動と海底勾配による寄与を考慮。隆起・沈降の合計容量を示した。

図-5 上段には、断層要素の幾何配置の比較を示す。

c) すべり量の受け渡し

各三角形要素に対して中心間距離の観点で最も近傍にある3つの矩形要素を抽出し、中心間距離の逆数で重み付けをして地震モーメントを引き渡した。

矩形要素は三角要素と同一面内に存在せず、矩形要素の断層面に垂直な方向の地震モーメントは近似により失われるが、本ケースでは、地震モーメントは $1.700\text{E}+22$ から $1.679\text{E}+22$ に減少するに留まり、 M_w は8.75で不変であった。図-5中段に、すべり量分布の比較を示す。

(3) 地盤変動量（初期水位変動）分布の比較

図-5 下段には、地盤変動量分布の比較を示す。矩形近似モデルでもすべり分布モデルとほぼ同様の分布が得られているため、複雑な津波の伝播・浸水挙動を予測することができると考えられる。

また、図-6には、緊急地震速報とスケーリング則に基づく簡易な1枚の矩形断層モデルで得られる地盤変動量分布の例を示す。ここで M_w 8.75、震央の緯度約 33.5 度、経度約 135.5 度、震源深さ約 20km が断層情報として得られるものとし、震央は断層面中央と仮定した。この

図-6 緊急地震速報に基づく簡易モデル。断層上端は黒実線、その他の辺は黒点線。地盤変動量のカラーは図-5と同様。

ような簡易なモデルによる地盤変動量分布は当然単純なものとなり、矩形近似モデルの方が有意に複雑な初期条件を津波浸水予測へ提供できることは明瞭である。

4. 結論

2011 年東北地方太平洋沖地震津波の痕跡値との比較により、GNSS による即時推定断層モデルは太平洋沿岸の広域にわたる沿岸津波高を概ね再現しうるが、三陸沿岸

で観測された非常に高い津波の再現性に課題が残ると分かった。津波浸水規模に関しては、平野部の例として対象にした石巻市・東松島市の石巻湾に面した市街地において、一定程度の再現性を持つと分かった。また、すべり分布モデルで得られる複雑な地震時すべりを矩形要素近似により即時的に地盤変動量解析する手法を提案した。

地震発生後数分で得られることがGNSSによる断層推定の強みであるので、要求される情報配信までの時間を踏まえつつ、今後は、陸上の地殻変動データで捉えることが難しいと考えられる海溝寄りのすべり等を表現するために、沖合津波観測波形や海底地殻変動データを取り込み、三陸沿岸での津波高の予測精度を向上する必要がある。また、平野部だけではなく、日本海溝沿いの多様な地形条件を持つ地域に対して、GNSSモデルが海溝型巨大地震による津波の浸水規模を概ね表現できる津波波源モデルとして適用できるかを検証する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、JST CREST（代表：越村俊一）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Musa, A., H. Matsuoka, Y. Murashima, S. Koshimura, R. Hino, Y. Ohta, and H. Kobayashi: A Real-Time Tsunami Inundation Forecast System for Tsunami Disaster Prevention and Mitigation, SC15 Extended Abstract, 2015.
- 2) Aoi, S., N. Yamamoto, W. Suzuki, K. Hirata, H. Nakamura, T. Kunugi, T. Kubo, and T. Maeda: Development of Real-time Tsunami Inundation Forecast Using Ocean Bottom Tsunami Networks along the Japan Trench, AGU FALL MEETING, 2015.
- 3) Oishi, Y., F. Imamura, and D. Sugawara: Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, 42, pp. 1083-1091, 2014.
- 4) Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino: Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, 117, B02311, 2012.
- 5) Melgar, D. and Y. Bock: Kinematic earthquake source inversion and tsunami runup prediction with regional geophysical data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3324-3349, 2015.
- 6) Kawamoto, S., K. Miyagawa, T. Yahagi, M. Todoriki, T. Nishimura, Y. Ohta, R. Hino, and S. Miura: Development and Assessment of Real-Time Fault Model Estimation Routines in the GEONET Real-Time Processing System, *Int. Assoc. Geodesy Symposia*, Springer, 2015.
- 7) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040, 1992.
- 8) Meade, B.J.: Algorithms for the calculation of exact displacements, strains, and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half space, *Computers and Geosciences*, 33, 1064-1075, 2007.
- 9) 国土地理院：標高補正ソフトウェア（PatchJGD 標高版），<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/patchjgd/main.html>，参照 2016-05-14.
- 10) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Series B (土木学会論文集 B2 (海岸工学)), Vol. 67, No.1 pp.63-66, 2011.
- 11) Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira: The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 132, 59-73, 2002.
- 12) Nakajima, J., and A. Hasegawa, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
- 13) Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa: Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.
- 14) Smith, W. H. F., and P. Wessel: Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55, 293-305, 1990.

(2016.3.16 受付)

A STUDY ON METHODS FOR APPLYING FAULT MODELS RAPIDLY ESTIMATED USING REAL-TIME GNSS TO TSUNAMI SIMULATION

Takuya INOUE, Yusaku OHTA, Shunichi KOSHIMURA, Ryota HINO,
Satoshi KAWAMOTO, Yohei HIYAMA and Yuki DOKE

Applicability of rapidly estimated fault models based on real-time GNSS to tsunami simulation was examined, in comparison to tsunami survey data in 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. GNSS models could show acceptable reproducibility in terms of tsunami height along the Pacific coast except the ria coast in Sanriku where considerably high tsunami observed in 2011. Tsunami inundation for lowland was fairly modeled by GNSS models in the case of city areas facing the Ishinomaki Bay. We also proposed a new method for rapidly estimating initial tsunami height from a slip distribution model that consists of a number of triangular sub-faults through approximation to a set of rectangular sub-faults.