東京湾内における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の伝播特性および 計算条件の違いによる計算精度の検討

STUDY ON INFLUENCES OF NUMERICAL CONDITIONS OF TSUNAMI SIMULATION AND CHARACTERISTICS OF TSUNAMI PROPAGATION OF THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI IN TOKYO BAY

小園裕司 * • 野島和也 * • 桜庭雅明 * Yuji KOZONO, Kazuya NOJIMA and Masaaki SAKURABA

This paper presents a study on influences of computational conditions on numerical simulation of Tsunami generated by the 2011 from Tohoku-Pacific earthquake. In Tokyo bay, the characteristic reaction of water elevation to the Tohoku tsunami was studied. The relationship between the own natural period of Tokyo bay and the wave period of the tsunami was discussed. Two conditions are dealt with for the comparison of computational accuracy. The first one is the difference of shape of the initial wave, i.e. difference of the fault models. The second one is the difference of area of computational domain. Each of computational results were compared with observed water elevation in Tokyo bay. Influences of the differences on the accuracy of the tsunami simulation in Tokyo bay were identified from results.

Keywords: Tsunami Simulation, the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Tokyo Bay,the Own Natural Period, Computational Conditions, The Wave Period

1. はじめに

東京湾周辺は、過去に1498年明応東海地震津波、1605年慶長東海地震津波、1703年元禄関東地震津波、1707年宝永東海・南海地震津波、1854年安政東海地震津波、1960年チリ地震津波や、2011年東北地方太平洋沖地震津波(以下、東北津波)などの多くの地震津波が来襲する津波常襲地域である。2011年3月11日に発生した東北津波では、東北地方沿岸をはじめ、広範囲にわたり甚大な被害が生じた。波源から500km以上離れた東京湾外の銚子港で5.0m前後、東京湾口に位置する第二海堡で1m程度、湾央に位置する横須賀港や横浜港で2m弱の津波が観測された1),2)。また同湾内では1波目よりも2波目が最大波となる事が確認されており、最大波が第1波となっている湾外の験潮所とは異なる水位変動を示した。このような湾の特性や津波の伝播過程を明らかにすることは、首都機能や多大なインフラを持つ沿岸都市域の防災減災対策において有用な知見となると考えられる。

同地震津波については、東北地方の潮位データや被害状況に基づき再現した津波断層モデルが提案されている^{3),4)}。これらの断層モデルについては東北地方を中心に再現性の検証が行われているが、東京湾周辺での検証事例は少ない。東京湾周辺における再現性や有用性については、佐々木ら³⁾などによって行われているが、各断層モデルのバージョンの違

いにまで検証を行なっていないのが現状である。

数値計算による津波の予測を行う際、適切に計算モデル・ 計算条件のチューニングを行う必要がある。その方法の一つ に既往津波の再現計算が考えられる。その際、津波計算の外 力となる断層モデルの設定は重要な要因となる。その他の計 算精度に影響を及ぼす要因として、計算格子の解像度と計算 範囲の設定も重要となる。詳細領域でのある程度の計算精度 を維持するためには適切な計算範囲と計算格子の解像度を有 する事が重要である。

以上を踏まえ本研究では、2011年に発生した東北津波を対象に、実績潮位データから東京湾に来襲した津波特性について検討した。また、数値計算を用いて、複数の断層モデルによる再現性を検討するとともに、湾内の津波の伝播特性について検討した。最後に、同モデルを用いて計算範囲の違いによる計算精度の差異について検討した。

2. 研究方法

(1) 観測値による東京湾における東北津波の特性(検討1)

東北地震によって東京湾に来襲した津波について各験潮所における1分間隔の実績潮位データを整理した。これらのデータを用いてスペクトル解析を行い東京湾に来襲した津波のピーク周期について整理するとともに、同湾の固有周期に関して検討した。なお、スペクトル解析の対象時間については、2011年3月11日午後2時から翌日の午前4時までの14時間とした。

^{*} 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

(2) 数値解析に用いる断層モデルの精度(検討2)

東北津波を対象に複数の断層モデルを用いて東京湾周辺の 津波の再現計算を行い、東京湾内の伝播状況を把握するととも に、各断層モデルの再現性を検証した。

本検討で採用する断層モデルは国内で最も用いられている藤井・佐竹モデル³⁾ および東北大モデル⁴⁾ とした。藤井・佐竹モデルについては海溝軸に 40 以上の小断層を配置し、東北地方沿岸域における津波実績波形のインバージョン解析により各断層のすべり量を推定している。また東北大モデルについては、海溝軸に 10 枚の小断層を配置し、すべり量以外のパラメータについては藤井・佐竹モデルに基づき設定している。すべり量については東北地方の浸水域に再現できるように調整している。両断層モデルは数回のバージョンアップを図っており、本検討においては各断層モデルの複数のバージョンを対象として比較検討した。各種の断層モデルで、どの程度計算結果に違いがあるのかを明らかにすることを目的としている。

(3) 数値解析による計算範囲の影響(検討3)

東京湾周辺の詳細領域を変化させた場合、東京湾内の計算結果に及ぼす影響を比較した。東京湾外は伊豆諸島や小笠原諸島など東京都島嶼部が点在している。また東から来襲する津波に対して壁となるように伊豆半島が位置しており、反射・屈折など非常に複雑な波の挙動を示すことが予測される。本研究ではこれらの影響を加味しつつ4通りの計算範囲を設定して、湾内の計算結果を比較検討した。

領域2 (領域3 (領域3 (100 0 100 200 km

図-1 検討2における計算領域

3. 数值解析法

(1) 津波の数値解法

津波伝播の数値計算には、基礎方程式に非線形長波方程式を採用しleap-frog法、スタッガード格子に基づいた平面2次元の浅水流モデルを用いた⁶⁾。海底摩擦にはマニング式を用いている。

地震発生後の津波の初期波形については、断層モデルから Okada(1992)の方法 7 により算出される海底地殻変動の鉛直成分を海上面に与える方法を用いた。

(2) 計算条件

1) 数値解析に用いる断層モデルの精度について(検討1)

断層モデルについては東北津波を対象として、藤井・佐竹モデル Ver. 4.0、Ver. 4.2、Ver. 6.2、Ver. 7.0、Ver. 8.0、東北大モデルの Ver. 1.0、Ver. 1.1 および Ver. 1.2の計8つのモデルを採用した。なお、藤井・佐竹モデルの Ver. 6.2、Ver. 7.0、Ver. 8.0 については、従来の断層モデルとは異なり、プレートの破壊伝播速度とすべりの時間変化を考慮することが提案されている。本研究でもこれに倣い、破壊伝播速度 2.0km/s、各小断層におけるすべりの時間変化を設定した。その他の断層モデルについては、破壊伝播速度と各小断層におけるすべりの時間変化は従来通り考慮しないものとした。計算範囲については、図ー1中の黒枠の領域(領域1)および図ー2中の赤い枠の領域(領域2)とオレンジ色の領域(領域3)に示す通り東北地方から東海地方を広域のメッシュとして、東京湾内を詳細の検討範囲として、1,350m、450m、150m 格子を採用し、各メッシュ間は領域接続を行った。X方向、Y方

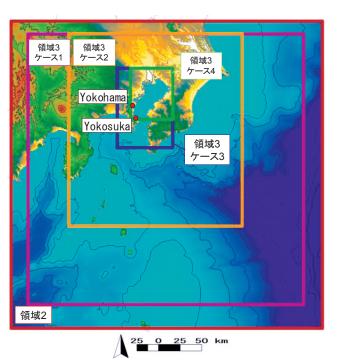


図-2 検討3における計算領域と験潮所位置

向の分割数については表-1に示す通りである。水深値、標高値については広域に ETOPO1⁸⁾ を、東京湾周辺などの詳細域に数値地図 50m メッシュ(標高)および海底地形データを用いた。なお、本検討においては最小メッシュサイズが150m であるため、横断方向に十分なメッシュ数を確保できないことを踏まえ、河川について考慮は行なっていない。また、横須賀港の水深については海底地形デジタルデータが沖合のデータまでしか存在していなかったため、港湾内の水深データについては沖合の水深値を延長する形で水深データを補間作成した。海底摩擦についてはマニングの粗度係数 0.025 とし、潮位条件については津波来襲時の東京湾における天文潮位T.P.+0.125m とした。境界条件については、陸域と海域の境界は完全反射とし、領域 1 の沖側境界は自由透過とした。再現計算時間については地震発生から 12 時間とした。

2) 数値解析による計算範囲の影響について

断層条件については、検討 2 の結果を踏まえ藤井・佐竹モデル Ver. 4.2 とした。計算範囲については、領域 1.2 ともに検討 2 と同様の範囲として、領域 3 のみを変化させ、図-2 に示す通り以下に示す範囲について検討した。

- ケース 1: 関東全域を包括
- ケース 2: 東京湾内と周辺の島嶼部を包括
- ケース 3: 東京湾と浦賀水道を包括 (検討 2 と同範囲)
- ケース 4: 東京湾のみ

なお、検討 2、3 における計算結果は $\mathbf{2}-2$ 中に示している横須賀港、横浜港、京浜港および第二海堡の実測津波波形 $^{1),2)}$ と比較した。

表一1 その他の計算条件

| 項目 | 内容 | | | | |
|----------------------|---|--|--|--|--|
| 計算格子間隔 | 領域 1:1,350m(1300 × 1500) | | | | |
| (分割数) | 領域 2:450m(800 × 788) | | | | |
| | 領域 3:150m(1337 × 1481) | | | | |
| 時間増分間隔 | すべての領域で Δt = 0.1 秒 | | | | |
| 基礎方程式 | 非線形長波方程式 | | | | |
| 計算手法 時間:リープフロッグ法 | | | | | |
| | 空間:スタッガード格子 | | | | |
| 沖合境界条件 | 領域1で自由透過 | | | | |
| 領域間 | 水位・流量を接続 | | | | |
| 陸側境界条件 | 領域1~3は完全反射境界 | | | | |
| 海底摩擦 | Manning の粗度係数 0.025 | | | | |
| 水深データ | ETOPO1、海底地形データ、 数値地図50m メッシュ標高 | | | | |
| 潮位条件 | T.P.+ 0.125m | | | | |
| 対象地震津波 | 2011 年東北地震津波 | | | | |
| 断層モデル | 藤井・佐竹モデルおよび東北大モデルの | | | | |
| Mark Indiana Indiana | 各バージョン | | | | |
| 津波初期波源 | Okada (1992) の方法により断層モデル から地殻変動量・初期津波波形を算出 | | | | |
| 計算再現時間 | 地震発生から 12 時間 | | | | |

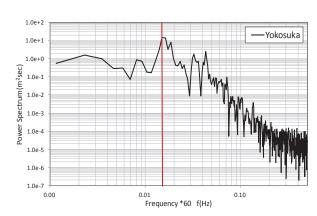
4. 検討結果

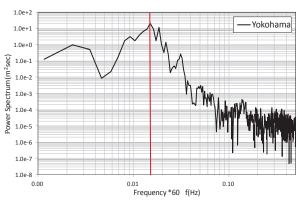
(1) 東北津波の東京湾内の津波来襲状況 (検討 1)

図-3 に東京湾内に位置する横須賀港、横浜港における 潮位変動のスペクトル解析を行った結果を示す。これらの結果 より、各験潮所でのピーク周波数は 1.5×10^{-2} (\times 60Hz) 付近であり、東日本大震災時に東京湾に来襲した津波周期は 67 分程度が最も卓越していた事を確認した。既往の研究 9 より東京湾には 60 分 \sim 90 分程度の固有振動周期が存在する事が報告されており、今回の東北津波においては、湾内で湾水振動を引き起こしていた可能性があったと考えられる。

(2) 数値解析に用いる断層モデルの精度 (検討 2)

図-4に藤井・佐竹モデル、東北大モデルの鉛直地殻変動量(津波波源)の一覧を、図-5に本解析より得られた藤井・佐竹 Ver. 4.2 における東京湾周辺の津波伝播状況を示す。これらの結果より、東北沖で発生した津波は地震発生後35分程度で銚子に到達し、60分程度で東京湾入り口に到達し湾の奥に向かって湾内を伝播する。地震発生後120分程度経過すると第2波が東京湾入り口に到達する。その後東京湾内で、湾奥で反射した第1波と湾奥に進行する第2波が湾央で合成する。また、東京湾周辺には島嶼部がありそれらが湾外で複雑な反射・屈折を引き起こす事を確認した。図-6に各験潮所における津波波形についての実績値と計算値の比較を、表-2に各験潮所における最大津波水位について実





図ー3 スペクトル解析結果

績値と計算値の誤差率を示す。これらの結果から、いずれの 断層モデルにおいても実績波形を概ね再現可能であることを 確認した。

最大波の津波到達時間については、破壊伝播速度と各小断層におけるすべりの時間変化を考慮した藤井・佐竹モデルの Ver. 6.2、Ver. 7.0、Ver. 8.0 がその他のモデルと比較して若干ではあるが実績値の再現性が高い。最大波については、藤井・佐竹モデルはいずれも平均 $13\sim14\%$ 前後、東北大モデルは平均 25% 前後の誤差率となることを確認した。これは津波波形からも分かる通り、東北大モデルは藤井・佐竹モデルと比較して若干過少評価であることからも確認される。なお、藤井・佐竹モデル間では最大ピーク値こそ大きな差は見られないが、短周期な波が卓越する 20 時以降になると、

Ver. 6.2、Ver. 7.0、Ver. 8.0 は Ver. 4.0、Ver. 4.2 と比較して過大に評価していること、横須賀港や京浜港などの第一波については藤井・佐竹モデルの Ver. 4.2 が最も再現性が高い事を確認した。

いずれの断層モデルにおいても、横須賀港の第1、第2波後の引き波が過大評価されている点については、当該地点の水深値を沖合の水深値を延長する形で補間して作成していため、水深値が過大評価の可能性がある。そのため、流体の底面摩擦の影響が小さくなることで水面形の変化が大きくなったと考えられる。この点については今後、港湾計画図等の詳細なデータを入手して水深値と計算結果の改善を図っていく予定である。

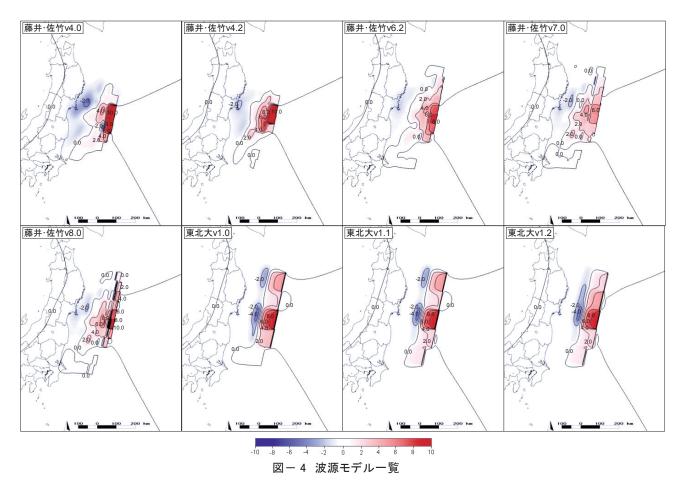


図-5 津波の伝播状況

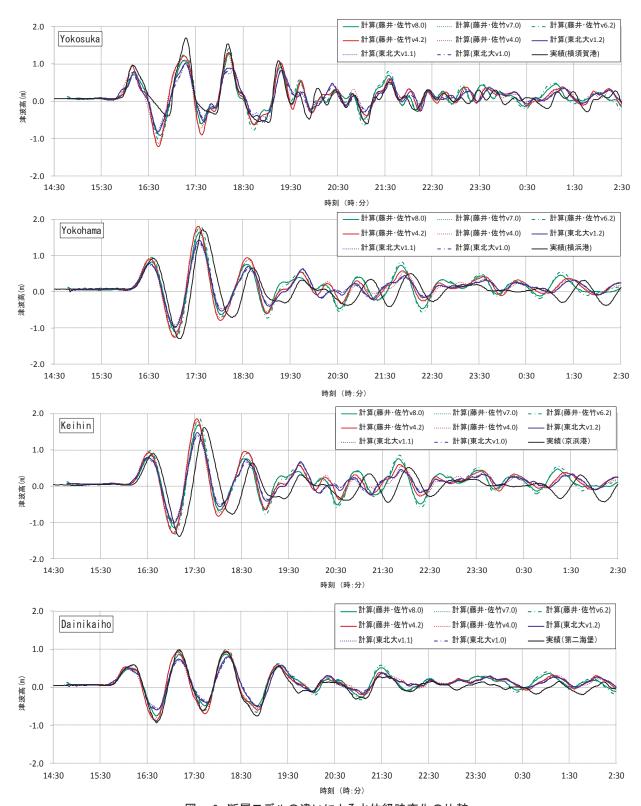


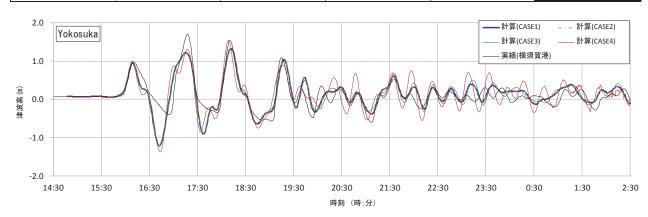
図-6 断層モデルの違いによる水位経時変化の比較 (最上段:横須賀港、中段上:横浜港、中段下:京浜港、最下段:第二海堡)

(3) 数値解析の計算範囲の影響(検討3)

図-7にケース1~4までの津波波形の計算値を示す。 図中には実測値もあわせて示す。本検討では、最も計算領域 が大きいケース1の計算結果をより真値に近い値として、その 他の計算ケースの結果を比較検討した。 ケース2については、ピーク値や波形などケース1とほぼ同様の計算結果を示した。ケース3についてもケース1、ケース2とほぼ一致する結果となったが横須賀港での第4波以降に若干ではあるがケース1、2とは異なる挙動を確認した。ケース4については、第1波~第3波まではケース1と同様の津

| 断層モデル | 津波最大値の誤差率 (%) | | | | | |
|--------------|---------------|------|------|------|------|--|
| | 横浜港 | 京浜港 | 横須賀港 | 第二海堡 | 平均值 | |
| 藤井·佐竹Ver.4.0 | 1.7 | 10.4 | 34.2 | 7.0 | 13.3 | |
| 藤井·佐竹Ver.4.2 | 5.7 | 14.5 | 28.1 | 5.7 | 13.5 | |
| 藤井·佐竹Ver.6.2 | 6.8 | 15.7 | 27.0 | 3.6 | 13.3 | |
| 藤井·佐竹Ver.7.0 | 2.9 | 5.1 | 35.2 | 12.4 | 13.9 | |
| 藤井·佐竹Ver.8.0 | 4.0 | 3.9 | 36.4 | 13.3 | 14.4 | |
| 東北大Ver.1.0 | 20.5 | 13.9 | 39.4 | 28.1 | 25.5 | |
| 東北大Ver.1.1 | 21.4 | 14.2 | 38.5 | 30.1 | 26.1 | |
| 東北大Ver.1.2 | 16.1 | 8.9 | 40.3 | 25.6 | 22.7 | |

表-2 津波最大値の誤差



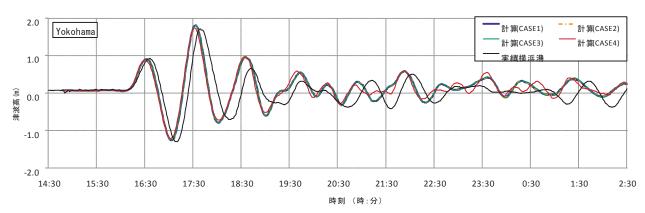


図-7 計算範囲の違いによる水位経時変化の比較(上段:横須賀港、下段:横浜港)

波挙動を示すが、それ以降の短周期の波が他のケースと比較して異なる挙動を示した。これらの計算結果は東京湾外での影響が東京湾内の計算結果に寄与したのではないのかと考えられる。特に湾外に比較的近い横須賀の第4波以降では、東京湾外の反射の影響を受けるためケース4よりケース1の計算結果がより実測値を再現していることを確認した。

5. おわりに

本研究では、東北津波を対象に、東京湾内における津波の 伝播状況と特性を把握するともに、複数の断層モデルによる 再現性を検証した。また、東京湾周辺の計算領域を変化させ てその計算精度の差異について検討した。その結果、以下の 知見が得られた。

- スペクトル解析によって東京湾内における東北津波固有周期が既往の報告の固有振動周期と同等の値を示していることが分かった。これにより湾水振動を起こしていた可能性を示した。
- 東北津波は地震発生から60分程度で東京湾に到達し、およそ60分周期で来襲を繰り返す。また複数の津波が東京湾に浸入し湾内で波が合成される。これらのプロセスより東京湾内では2波以降が最大波となることを明らかにした。
- いずれの断層モデルにおいても、東京湾においては実 測波形を概ね再現可能である。
- 破壊伝播速度と断層におけるすべりの時間変化を考慮

- した断層モデルは、考慮していないモデルと比較して 津波の津波到達時間の再現性が高い。
- 東京湾内の挙動を適切に捉えるためには、湾外の挙動 も捉えるための計算範囲の設定を行う必要がある。

今後は、その他の断層モデルについても再現性について検 討するとともに、また、適切な計算範囲の設定方法について 検討していく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省:海上保安庁、http://www.kaiho.mlit.go.jp/
- 国土交通省港湾局他:ナウファス、 http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html
- 3) Fujii, Y, K Satake, S.Sakai, M.Shinohara and T.Kanazawa.:
 Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku
 Earthquake, Earth Planets Space, Vol.63, pp.815-820

- 4) 今村文彦、越村俊一、大家隆行、馬渕幸雄、村嶋陽一 (2011): 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル Ver.1.0
- 5) 佐々木敦、伊藤一教、鈴木崇之、Retno Utami Agung Wiyono、 織田幸伸、高山百合子、羽角華奈子、古田敦史、高木泰士:2011 年東北地方太平洋沖地震津波の東京湾内での伝播特性と被害状 況、海岸工学論文集、Vol.68、No.2、pp.261-265.
- 6) 後藤智明、小川由信:Leap·Frog 法を用いた津波の数値計算法、 東北大学工学部土木工学科、52p、1982
- Okada.Y.:INTERNAL DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992
- 8) NATIONAL GEOPHSICAL DATA CENTER :ETOPO1 Global Relief Model,
 - http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/
- 9) 日野幹雄、日野和子:東京湾の進入長波に対する振動応答特性、 第11回海岸工学講演会講演集、pp.98-107、1964