津波襲来時における伊勢湾海域の水塊構造に関する数値的検討

鈴木 一輝¹・川崎 浩司²・村上 智一³

¹ 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
E-mail: sukazuki@kajima.com

² 正会員 (株)ハイドロソフト技術研究所 (〒530-6126 大阪市北区中之島 3-3-23 中之島ダイビル 26F)
E-mail: kawasaki@hydro-soft.co.jp

³ 正会員 (独法) 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)
E-mail: tmurakami@bosai.jp

本研究では、多重 σ 座標系準3次元海洋モデルCCMを用いて、東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を実施し、観測結果との比較から、津波伝播計算に対するモデルの適用性・妥当性を検証した。さらに、同モデルを活用した気象-海象-水質結合モデルを用いて、発生が懸念される南海トラフ巨大地震による巨大津波を対象に、伊勢湾海域の水塊構造に関する数値実験を実施した。その結果、津波の来襲による強い岸向き流れの発生、短時間での高塩分外洋水の進入、底層における一部の貧酸素水塊の解消が認められたことから、巨大津波が伊勢湾海域の水塊構造に与える影響は大きいことを明らかにした。

Key Words : tsunami, water structure, hypoxia, Ise Bay area, air-sea-water quality coupled model

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震による津波災害を契機として設置された「南海トラフの巨大地震モデル検討会」は、最大クラスの地震・津波を推計し、最大クラスの津波が発生した場合には、関東から九州の太平洋沿岸など、広い範囲で大きな津波が来襲する可能性を明らかにした¹⁾。このような背景から、近年、津波防災・減災に資する研究が多く実施されている。

一方、津波は、急激な水位変動や強い流れを伴うため、沿岸海域の環境場にも大きな影響を及ぼすと考えられる。実際に、東北地方太平洋沖地震による津波の来襲によって、湾内の水質・底質環境の変化が報告されており、津波による海域環境への影響に関心が集まっている。例えば、西ら²⁾は、東北地方太平洋沖地震津波前後の水質観測データを基に、津波による海域環境の変化特性について議論している。宇野・中野³⁾は、四国沖・瀬戸内海沖で観測された海象データに基づいて、東北地方太平洋沖地震津波到達による水塊構造への影響を検討している。しかし、津波の到達に伴う貧酸素水塊の挙動や密度構造の変化に関しては、十分には議論されておらず、研究の余地が残されている。

以上の背景から、本研究では、気象-海象-水質結合モデル⁴⁾を用いて、南海トラフ巨大地震津波が伊勢湾海

域の水塊構造に及ぼす影響について議論することを目的とする。また、結合モデルに使用される多重 σ 座標系準3次元海洋モデルCCM (Coastal ocean Current Model)⁵⁾は、津波伝播計算に適用された事例がないことから、東北地方太平洋沖地震を対象とした津波解析を実施し、観測結果との比較から、CCMの津波伝播計算への適用性についても検証する。

2. 気象-海象-水質結合モデルの概要

本研究で使用した気象-海象-水質結合モデル⁴⁾は、図-1に示すように、気象モデル、海象モデル、水質モデルの3つのモデルから構成される。気象モデルには、非静力学方程式に準ずる領域気象モデルMM5、気象庁メソスケールMSMモデルの解析データであるGPV-MSM、台風気象場を計算できる経験的台風モデルを、海象モデルには気象場-海象場の相互作用を高精度に解析できる多重 σ 座標系海洋モデルCCM、波浪モデルSWAN、潮汐モデルNAO.99Jb、高解像度かつ高頻度な外洋データセットである日本近海海洋変動予測システムの再解析データFRA-JCOPE2⁶⁾を活用している。これらのモデルを計算対象に応じて選択することで、沿岸海域で生じる様々な時間スケールの変動を把握することが可能となっている。

図-1 気象-海象-水質結合モデル

図-2 計算領域

なお、本研究では、気象モデルにGPV-MSMのみを用い、海象モデルのうち波浪モデルは使用しなかった。モデルの詳細については、鈴木ら⁴⁾を参照されたい。

3. 準3次元海洋モデルCCMによる東北地方太平洋沖地震津波の伝播計算

(1) 計算条件

計算領域を図-2に示す。北緯46.39°、東経130.72°を北西端とする南北2308.5 km、東西1882.5 kmの範囲を設定し、水平方向格子間隔は南北方向、東西方向ともに、2430 m、鉛直方向は全30層で解像した。沖側境界は開境界とし、計算領域端部での反射波の影響を除くために、領域の東側、西側、南側にそれぞれ減衰領域を設定した。

東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルは、川崎ら⁷⁾を参考に、藤井・佐竹モデル Ver4.2⁸⁾を採用した。断層モデルによる地殻変動量の計算は、Okada⁹⁾の方法によって行い、算出された海底地盤の鉛直変位量を津波初期水位とした。再現期間は地震発生から3時間とし、計算時間間隔 Δt は、 $\Delta t=0.5$ sに設定した。

(2) 津波伝播計算に対するモデルの妥当性

図-3に水位分布の時間変化を示す。地震発生後15分

図-3 水位の時空間変化

図-4 GPS 波浪計における津波水位の時系列変化

では、津波波源の短軸方向に位置する東北地方沿岸に向かって、大きな波高を有する津波が伝播している。そして、地震発生後45分では、東北地方沿岸の各地に津波が到達している様子が確認できる。後述するが、津波到達時刻に関しては、観測値との良好な一致がみられた。また、南方向に伝播した津波は千葉県房総半島沖で大きく

屈折し、本州南部に向かい伝播している。さらに、地震発生後1時間30分後では、房総半島沖を屈折した津波がさらに回り込み、静岡県沿岸に到達した後、静岡県西部、愛知県沿岸、三重県沿岸に順次到達している。東北地方沿岸では、津波による水位変動が継続し、沿岸部での反射や屈折など複雑な津波挙動が生じていることがわかる。

津波水位の観測値と計算値の比較例として、図-2に示した岩手南部沖と三重県尾鷲沖に設置されたGPS波浪計における比較を図-4に示す。図中の赤丸は観測値を、黒線は計算値をそれぞれ示している。両地点ともに、第1波による最大水位の観測値を概ね再現できている。また、第1波の到達時刻や周期についても、計算値と観測値に良好な一致がみられた。一部、計算値と観測値に差異が認められるが、水平格子間隔が比較的粗い $\Delta x=2430$ mであることを考慮すれば、本計算結果は妥当であるといえる。なお、紙面の制約上図示しないが、他の観測点においても、計算の再現性を確認している。

以上より、海洋モデルCCMは、津波伝播計算を実施するにあたり、十分な精度を有していると判断できる。

4. 南海トラフ巨大地震津波による伊勢湾海域の水塊構造に関する数値実験

(1) 計算条件

津波が伊勢湾海域の水塊構造に及ぼす影響を議論するために、津波の発生時刻を、干潮時に津波が伊勢湾海域に襲来する2009/10/1 0:00 (Case 1)、満潮時に襲来する2009/10/1 6:00 (Case 2)とそれぞれ仮定した数値実験を実施した。計算期間は、各ケースともに、地震発生から1週間とし、津波波源には、内閣府⁹⁾が公表した11ケースのうち、伊勢湾の湾奥の名古屋港で津波高が最大となるケース1を用いた。なお、内閣府の検討では、断層の経時的な破壊を考慮しているが、本計算では、断層全域が時間差なしに同時破壊すると仮定した。

計算領域を図-5に示す。外洋の領域1と伊勢湾海域の領域2を設定し、one-way ネスティング計算を実施した。なお、領域1では、計算領域の東側と南側にそれぞれ減衰領域を設けている。領域1と領域2の水平格子間隔はそれぞれ2430 m, 810 mであり、 σ 領域の適用数や境界面水深、鉛直層数は領域に応じた設定した。計算時間間隔 Δt は全領域で一定値 $\Delta t=5$ sを課した。なお、計算時間の短縮のため、領域1では、地震発生から津波による水位変動が十分に収まるまでの27時間とし、水温と塩分は一定とした。領域2では、一般的な津波解析で無視される潮汐の効果を取り入れるために、水位の開境界条件として、領域1で得られた水位の時空間内挿値に、

(a) 領域1

(b) 領域2

図-5 計算領域

図-6 名古屋における水位の時間変化 (赤線: Case 1, 青線: Case 2, 黒線: 天文潮位)

NAO99.Jbで求めた天文潮を加えた値を課した。なお、津波襲来期(地震発生後27時間)以外の期間では天文潮のみを課した。開境界の水温・塩分は、JCOPE2再解析データを与えた。また、図-5(b)の黄色の○で示す伊勢湾海域に面する主要10河川を考慮した。各ケースの初期値は、鈴木ら⁴⁾が実施した長期計算結果を基に設定した。

(2) 流動構造の変動特性

図-6に、名古屋(図-5参照)における水位の時系列変化を示す。図中の赤線と青線はそれぞれCase 1とCase 2の計算値、黒線は天文潮位であり、黒点線はCase 2の地震発生時刻(計算開始時刻)を表している。同図からわかるように、潮位の低い干潮の時間帯に伊勢湾海域に津波が襲来するCase 1では、名古屋における最大水位は約1 mであり、満潮時の水位と同程度の値となっている。一方、満潮時に津波が来襲するCase 2では、名古屋にお

図-7 Case 1 における津波襲来時の水位分布の時間変化

図-8 Case 1 における津波襲来時の表層流速分布の時間変化

図-9 Case 1 における津波襲来時の底層流速分布の時間変化

いて、2.5 m 程度の最大水位が生じている。内閣府りが公表した名古屋港（名古屋市港区）の最大津波高は約 5 m であるが、潮位（年間最高潮位 T.P.+1.27 m）と地盤沈下（0.4 m）を含む値であること、計算格子間隔が本計算と比べて細かい 10 m であることを考慮すれば、本計算による津波水位は、妥当な値であるといえる。

津波の伝播状況の一例として、図-7～図-9 に Case 1 における水位分布、表層流速分布、底層流速分布の時間変化をそれぞれ示す。図-7 より、地震発生後 30 分には、伊勢湾の湾口に津波が伝播している様子が認められる。同時刻の伊勢湾海域内では、干潮の時間帯であることに加え、地震による地盤沈下の影響で水位が低い状態となっている。地震発生 2 時間後には、伊勢湾の湾奥部で水位が上昇し、4 時間後には、上げ潮の影響で湾内の水位が全体的に上昇している。流速分布を示した図-8 と図-9 より、伊勢湾海域に津波の第 1 波が伝播する地震発生 30 分後と 1 時間後では、表層と底層で湾奥に向かう強い流

れが生じていることが確認できる。地震発生 4 時間後には、表層では依然として、湾奥に向かう流れが認められるものの、底層では流向が逆となり、湾口から外洋に向かう流れが発生していることがわかる。なお、計算領域の南東端部で流速の収束・発散が確認されることから、領域間の接続方法については、two-way ネスティングの導入などの更なる高度化が必要である。

図-10 に、各ケースにおける伊勢湾湾奥の地点 II（図-5 参照）の流速分布を示す。いずれのケースにおいても、第 1 波到達時に、湾奥（北方向）に向かう強い流れが全層で生じていることがわかる。なお、満潮時に津波が到達する Case 2 では、干潮時に襲来する Case 1 に比べて、流速が大きくなると推測したものの、第 1 波襲来時の流速は、ケースによる顕著な違いは認められなかった。

(3) 密度・水質構造の変動特性

津波襲来に伴う密度・水質構造の変動特性を検討する

ために、図-11 と図-12 に Case 2 における津波襲来時の断面 A (図-5 参照) の塩分分布と DO 分布をそれぞれ示す。図-12 では、3 mg/L 以下の DO 値を貧酸素水塊として濃青色で表している。なお、ケースによる顕著な違いが認められなかったことを踏まえ、Case 2 に対して検討を行う。図-11 より、津波の襲来によって、33 psu を超える高塩分外洋水が、短時間の間に、中層から底層にかけて湾内に進入している。図-12 に示した DO 分布からは、津波襲来前 (10/01 6:00) に、湾中央から湾口にかけて認められた貧酸素水塊が、津波襲来後には解消されていることがわかる。ただし、底層の DO 値は依然として低い値となっている。

図-13 に、Case 2 における津波襲来前後の底層 DO 分布を示したものである。図-12 と同様に、3 mg/L 以下の DO 値を貧酸素水塊として濃青色で表している。図-13(a) の津波襲来前では、伊勢湾の湾奥や湾口に貧酸素水塊が形成されているものの、同図(b)に示すように、津波の襲来によって、湾奥の一部を除き、多くの貧酸素水塊が解消することがわかった。

以上より、本数値実験により、津波によって高塩分外洋水の進入や貧酸素水塊の解消が明らかとなった。したがって、津波の襲来が伊勢湾海域の水塊構造に及ぼす影響は大きいと判断される。

5. 結論

本研究では、準 3 次元モデルである多重座標系海洋モデル CCM を用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の伝播計算を実施し、同モデルの津波伝播計算への適用性を検証した。そして、海水流動計算に海洋モデル CCM を活用した数値システムである気象-海象-水質結合モデルを用いた数値計算より、発生が懸念される南海トラフ巨大地震津波による伊勢湾海域の水塊構造の変化特性を議論した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 海洋モデル CCM を用いて東北地方太平洋沖地震津波の伝播計算を実施した結果、数値計算により得られた水位変動は、GPS 波浪計の観測波形の変動傾向を良く再現し、同モデルが津波の伝播過程を適切に計算できることを示した。
- 2) 伊勢湾海域の水塊構造に関する数値実験を実施した結果、津波の来襲によって、強い岸向き流れの発生、

図-10 地点 I1 における南北方向流速分布の時間変化 (北方向が正)

図-11 Case 2 における津波襲来時の断面 A における塩分分布

図-12 Case 2 における津波襲来時の断面 A における DO 分布

短時間での高塩分外洋水の進入、底層における貧酸素水塊の解消が生じることがわかった。よって、巨大津波が伊勢湾海域の水塊構造に与える影響は大きいといえる

本研究は、津波襲来による流動構造の変化やそれに伴う密度・水質構造の変動特性を検討したものであり、東北地方太平洋沖地震津波の調査で報告されている津波の襲来に伴う海底地形の変化や底質の移動や巻き上げなどは考慮していない。ただし、津波襲来後の環境場の変化・回復過程を議論する上では、これらの影響の適切な評価が必要不可欠であり、今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（研究代表者：名城大学・小高猛司，事業番号：S1201023）であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）（オンライン），http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_2nd_report01.pdf, 2012, 参照 2013-12-19.
- 2) 西 敬浩, 八木 宏, 神山孝史, 杉松宏一, 林 健太郎：東北地方太平洋沖地震津波による三陸内湾域の流動構造と底質環境変化の把握, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_286-I_290, 2013.
- 3) 宇野宏司, 中野 晋：東北地方太平洋沖地震津波の到達による四国沖・瀬戸内海の水塊構造への影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_712-I_717, 2013.
- 4) 鈴木一輝, 川崎浩司, 岡本英久, 村上智一：気象-海象-水質結合モデルを用いた伊勢湾海域の水塊構造の長期・短期再現計算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, 2015. (投稿中)
- 5) 村上智一, 安田孝志, 大澤輝夫：気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.366-370, 2004.
- 6) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu : Water mass variability in the western North Pacific

(a) 地震発生時

(b) 地震発生6時間後

図-13 Case 2 における津波襲来前後の底層 DO 分布

detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *Journal of Oceanography*, Vol.65, pp.737-756, 2009.

- 7) 川崎浩司, 鈴木一輝, 高杉有輝, 李 光浩, 中村友昭, 鈴木進吾：東北地方太平洋沖地震による三陸海岸南部の津波被害と浸水特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_381-I_385, 2012.
- 8) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S. I., Shinohara, M., and Kanazawa, T.: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, planets and space*, Vol.63, No.7, pp.815-820, 2011.
- 9) Okada, Y.: Surface deformation due to share and tencile faults in a half-space, *Bulletein of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154, 1985.

NUMERICAL EXAMINATION ON WATER STRUCTURE VARIATION IN ISE BAY AREA UNDER TSUNAMI ATTACK

Kazuki SUZUKI, Koji KAWASAKI and Tomokazu MURAKAMI

This study conducted tsunami propagation simulation due to the 2011 Tohoku Earthquake using the Coastal ocean Current Model (CCM), which is a quasi-three-dimensional ocean model with a terrain following multi-sigma coordinate system, so as to validate the applicability of the model for simulating tsunami propagation. Furthermore, the study numerically examined water structure variations in Ise Bay area under tsunami attack due to Nankai Trough earthquake using an air-sea-water quality coupled model including the CCM for coastal current calculation. As a result, the coastal flow induced by the tsunami caused an intrusion of oceanic water with high salinity during in a short period and the disappearance of hypoxia, which implied that the tsunami has a great impact on water structure.