

津波高潮シミュレータ Q-Wave[®]を用いた 2019 年台風 19 号の高潮解析

吉村英人ⁱ 坂本大樹ⁱⁱ 荒木和博ⁱⁱⁱ 眞鍋尚^{iv}

Numerical simulation of the storm surge induced by typhoon 1919 by using tsunami and storm surge simulator Q-Wave

Hideto YOSHIMURA Daiki SAKAMOTO Kazuhiro ARAKI Takashi MANABE

高潮計算に用いられるプログラムの多くは GUI が備えられていないものが多く、その使用には高度な技術と多くの作業が必要となる。本報では当社が開発した GUI から簡単に高潮計算が行える津波高潮解析シミュレータ Q-Wave の機能と特徴を紹介し、台風 19 号による高潮の再現計算の結果を示す。GUI からの操作により高度な技術が必要となる高潮計算を容易に行えることや、Building Cube Method に基づく格子系を採用することにより複数の港湾を対象とした計算が一度で行えることを示す。

(キーワード): 高潮解析, 台風, Q-Wave, Building Cube Method

1 はじめに

日本では 1959 年の伊勢湾台風による高潮災害以降、高潮対策施設の整備が進められてきた。しかし、2019 年には台風 15 号や台風 19 号が関東地方に被害をもたらしたように、近年においても大規模な高潮災害が発生している。IPCC 第 5 次評価報告書¹⁾では、将来の気候変動により平均海面水位や海水温の上昇が予想されており、今後より勢力の大きい台風が来襲した場合に備えた高潮対策の強化が求められている。

2015 年 5 月には水防法が改正され、高潮発生時の避難体制の強化および被害の軽減を図るため、想定し得る最大規模の高潮における浸水想定区域を公表する制度が新たに創設された。これを受けて、国は同年 7 月に「高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 1.00」^{2),3)}を作成し、現在、国および地方自治体ではこの手引きに基づく高潮浸水想定区域の見直しや検討が進められている。

高潮対策の検討には数値計算による高潮予測が行

われる。数値計算にはフリーで公開されているプログラムや In-House のプログラムを用いる場合が多く、その使用には高度な専門技術が求められる。また、計算の実施においては入力条件となる地形や風のデータの収集・整備や結果の取りまとめに多くの作業が必要となる。

みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)では高潮計算における作業の効率化と導入障壁の低減を目的に津波高潮シミュレータ Q-Wave を開発し、販売している。Q-Wave の特徴は高度な津波や高潮計算の実施と結果の評価が GUI から容易に行える点であり、港湾や海岸の管理者が実務レベルで使用することも可能である。また、計算条件の設定から結果の評価まで一つのソフトウェアで行えるため、作業コストの大幅な削減が期待できる。さらに、Q-Wave では Building Cube Method⁴⁾(以下、BCM)と呼ばれる格子細分化手法を採用している。これにより例えば、複数の対象港湾周辺の格子を同時に細分化して計算することができるため、一度の計算で広域の高潮を予測するこ

ⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席主任コンサルタント 博士(工学)

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システム コンサルタント

ⁱⁱⁱ サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 上席主任コンサルタント

^{iv} サイエンスソリューション部 先進技術システム 次長 博士(工学)

とができる。

本報では Q-Wave の基本的な機能とその特徴について紹介するとともに、BCM を用いた計算例として 2019 年台風 19 号の再現計算の結果を示す。台風 19 号は中部地方から関東、東北地方にかけて広範囲に被害を及ぼしているため、BCM を用いて複数の港湾を対象とした評価が可能であることを示す。

2 Q-Wave の概要

2.1 基礎方程式

Q-Wave は津波と高潮の解析を目的としたシミュレーションプログラムである。基礎方程式は式(1)および式(2)に示す単層の非線形長波理論に基づく連続の式と運動量保存式であり、日本全域を含むような広範囲の予測ができるように経緯度座標系を採用している。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial N \cos \theta}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M}{D} \cdot M \right) \\ & + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{M}{D} \cdot N \cos \theta \right) - N \cdot 2 \Omega \sin \theta = F_\lambda \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{N}{D} \cdot M \right) \\ & + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N}{D} \cdot N \cos \theta \right) + M \cdot 2 \Omega \sin \theta = F_\theta \end{aligned} \quad (2b)$$

ここで、 t は時刻、 M 、 N はそれぞれ経度 λ 、緯度 θ 方向の流量フラックス、 D は全水深 (=静水深 h +静水面からの水位変化量 η)、 R は地球の半径である。また、運動方程式右辺の F_λ および F_θ は外力項であり、高潮計算の場合には風による海面のせん断応力と気圧低下による海面の吸い上げ効果を考慮して以下のように与える。

$$F_\lambda = -\frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} - \frac{D}{\rho_w R \cos \theta} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \lambda} + \frac{(\tau_\lambda^s - \tau_\lambda^b)}{\rho_w} + V_\lambda \quad (3a)$$

$$F_\theta = -\frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} - \frac{D}{\rho_w R} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \theta} + \frac{(\tau_\theta^s - \tau_\theta^b)}{\rho_w} + V_\theta \quad (3b)$$

ただし、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 P_{atm} は海面

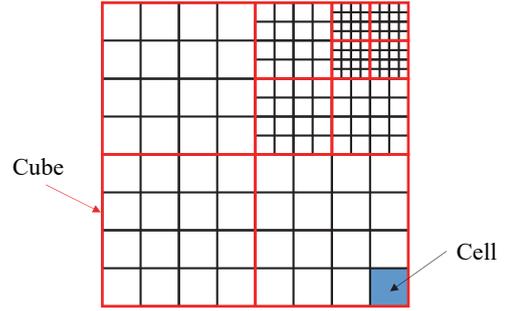


図1 BCMの計算格子の概念図

気圧である。また、 τ_λ^s 、 τ_θ^s は経度、緯度方向の海面せん断応力、 τ_λ^b 、 τ_θ^b は経度、緯度方向の底面せん断応力であり、それぞれ以下の式で与えた。

$$\tau_\lambda^b = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4a)$$

$$\tau_\theta^b = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4b)$$

$$\tau_\lambda^s = \rho_a C_D W_\lambda \sqrt{W_\lambda^2 + W_\theta^2} \quad (5a)$$

$$\tau_\theta^s = \rho_a C_D W_\theta \sqrt{W_\lambda^2 + W_\theta^2} \quad (5b)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 n はマンニングの粗度係数、 W_λ 、 W_θ は経度、緯度方向の海上10m風速、 C_D は海面抵抗係数であり本多・光易⁵⁾の式で与えた。なお、式(3a)および式(3b)の V_λ 、 V_θ は水平方向の粘性であり、それぞれ以下のように与えられる。

$$V_\lambda = \frac{1}{R^2 \cos^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(2\nu_H \frac{\partial M}{\partial \lambda} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \nu_H \cos \theta \left(\frac{1}{R} \frac{\partial M}{\partial \theta} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial N}{\partial \lambda} \right) \right\} \quad (6a)$$

$$V_\theta = \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \nu_H \left(\frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial N}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) \right\} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(2\nu_H \cos \theta \frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \theta} \right) \quad (6b)$$

ただし、 ν_H は水平方向の渦粘性係数である。

2.2 Building Cube Method

Q-Wave では BCM と呼ばれる格子細分化手法を採用している。BCM は航空分野において Nakahashi & Kim⁴⁾により開発された境界適合型の格子生成手法であり、直交等間隔格子を用いて複雑形状を効率的に計算することができる。BCM による計算格子の概念

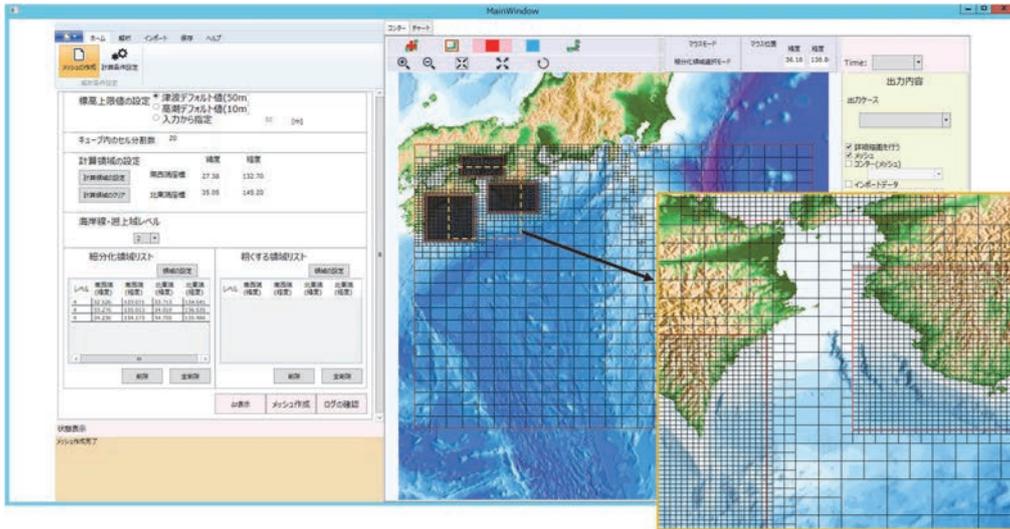


図 2 Q-Wave のユーザインターフェイス

を図 1 に示す. BCM では Cube と呼ばれる大きさ (Cube レベル) の異なる矩形ブロックを階層的に配置することにより格子解像度を制御することができる. 各 Cube の中にはさらに Cell と呼ばれる同じ数の直交等間隔格子に分割されており, 計算はこの Cell 単位で行われることになる. BCM では Cube を地形に合わせて任意に配置することができるため, 格子数の大幅な削減や高い演算効率と並列性能が期待できる. また, 津波や高潮の計算で広く用いられているネスティング格子 (例えば河合⁶⁾) では広範囲の海岸を対象とした評価を実施する場合, 最内側の計算領域を複数セット用意し, セットごとに分けて計算を実施する必要があるが, BCM では一度の計算で評価することも大きなメリットである. 津波や高潮計算における BCM の特徴の詳細については荒木ら⁷⁾を参照されたい.

2.3 Q-Wave の機能と特徴

Q-Wave では GUI を通じて, 領域の設定や格子分割から条件設定, 実行・結果の表示までの一連の操作を行うことができる. Q-Wave の GUI は図 2 に示すように, 画面左側の条件入力部と右側の地図表示部に分かれており, 地図表示部では地形・格子・各種結果の表示や, 領域・時系列データ出力地点の設定等をマウス操作により簡単に行うことができる. 以下では, 計算のフローに従い Q-Wave の機能を説明する.

(1) 領域設定・格子分割

計算領域は地図画面でマウスを操作することにより設定が可能である. 計算領域の設定後, 海岸線から

遡上域や任意の領域の格子解像度 (Cube レベル) を設定すると自動で BCM 格子が生成される. また, 生成された格子の地形データをシェープファイルとして出力し, GIS ソフトで編集することにより, 標高・水深, 堤防, 粗度データを変更することが可能である.

(2) 条件設定

計算条件の設定では, 計算終了時刻など最低限の内容を入力すれば計算が実行できる. 津波計算の場合には地震断層データ, 高潮計算の場合には台風経路データをそれぞれ指定する. また, 時系列データの出力地点を地図表示部で指定もしくは座標値を直接入力して設定することが可能である.

(3) 実行・結果表示

異なる条件の複数ケースを順次実行できるようにジョブ管理機能を搭載しており, 計算の進捗状況を管理機能から確認することができる. また, MPI (Message Passive Interface) による並列計算も可能である.

計算結果は時刻毎や最大の水位分布等が地図表示部で確認できるほか, 指定した地点の水位の時系列データを表示することができる.

(4) データ管理

計算に用いる地震断層データや台風経路データを事前に登録し, データベースとして管理することができる.

以上, Q-Wave の機能について簡単に紹介した. な

お、Q-Wave では日本水路協会の JTOPO30 や内閣府の津波解析用メッシュデータ等から整備した地形データがプリセットされているため、導入後すぐに計算を行うことが可能である。また、ユーザが用意した詳細な地形データを別途インポートすることも可能である。

3 台風 1919 号の高潮計算

本報では Q-Wave を用いて台風 1919 号を対象とした高潮の再現計算を行った。台風 19 号の経路と概要を表 1 および図 3 にそれぞれ示す。台風 19 号は中心気圧 955 hPa で静岡県伊豆半島に上陸し、その後関東地方を縦断した。東海地方から東北地方にかけて広範囲において記録的な大雨、暴風、高潮となった。

表 1 2019 年台風 19 号概要⁸⁾

名称	台風 201919 号 (Habigis)
発生日時	2019-10-06 03:00:00 JST
消滅日時	2019-10-13 12:00:00 JST
最低気圧	915 hPa
最大風速	105 knot

3.1 計算条件

計算領域は台風の経路に合わせて図 4 に示すように北緯 19.3 度、東経 133.55 度から北緯 41.3 度、東経 152.05 度の範囲で設定した。また、計算結果と比較する潮位の観測地点として鳥羽（北緯 34.488 度、東経 136.82 度）、御前崎（北緯 34.617 度、東経 138.217 度）、東京（北緯 35.65 度、東経 139.767 度）の 3 地点を選定した。水平格子解像度は外側領域で 2 km (Cube レベル 0)、海岸線・遡上域を含む領域で 0.5 km (Cube レベル 2) とし、着目する潮位観測地点を含む領域は 0.25 km (Cube レベル 3) となるように設定した。なお、1 Cube あたりの格子分割数は経度および緯度方向ともに 20 であり、総 Cube 数は 4,791、総メッシュ数は 1,916,400 である。地形データは Q-Wave にプリセットされたデータを用いた。外力となる気圧と風のデータには気象業務支援センターが提供するメソ数値予報モデル GPV (以下、MSM) の海面更生気圧と海上 10 m 風速をそれぞれ用いた。また、比較のため Myers の式に基づく経験的台風モデルから算出した気圧と風のデータを与えた計算も実施した。このとき、最大風速半径は国総研モデル⁹⁾により推定し、台風経路の補間にはスプライン補間を用いた。

計算は 2019 年 10 月 10 日 12 時から 13 日 12 時の期間を対象とし、開始から 3 時間で気圧や風速を徐々

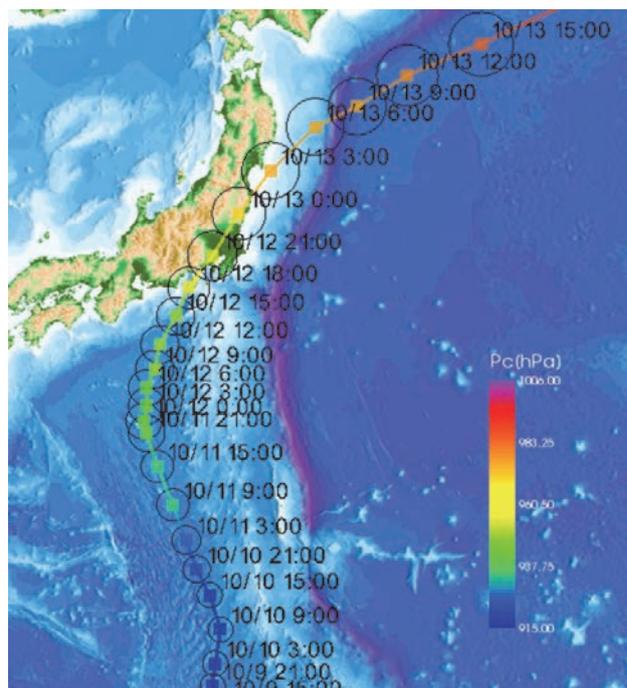


図 3 2019 年台風 19 号の経路と中心気圧 (Q-wave による表示)

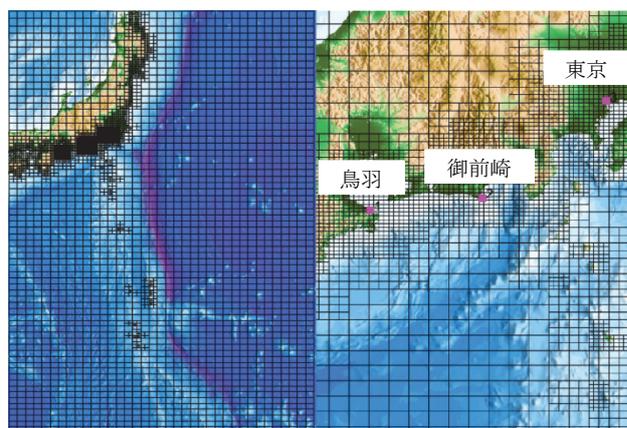


図 4 計算領域と Cube (左：計算領域全体図、右：拡大図)

に立ち上げて計算を行った。時間刻みは 0.5 秒、マニングの粗度係数は全域で $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とした。なお、本計算では波浪による wave setup の効果は考慮していない。

3.2 計算結果

図 5 に計算により得られた太平洋沿岸の潮位偏差分布の経時変化を示す。分布図は Q-Wave 上で可視化されたものを示している。台風が上陸する 10 月 12 日 18 時から 22 時にかけて沿岸域で潮位偏差が大き

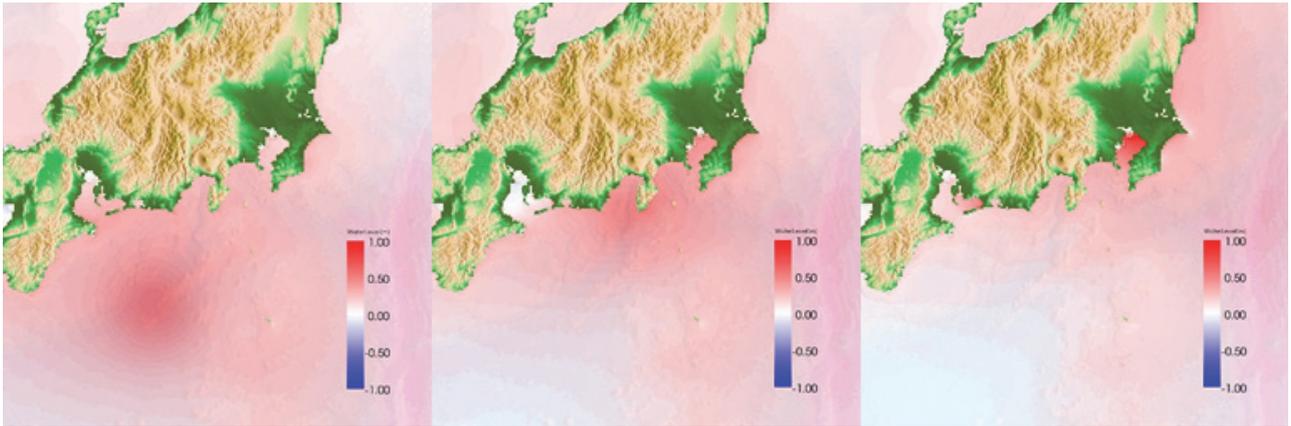


図 5 潮位偏差分布 (左 : 2019 年 10 月 12 日 14:00, 中 : 2019 年 10 月 12 日 18:00, 右 : 2019 年 10 月 12 日 22:00)

くなることを確認できる。また、東京湾では 22 時により一層潮位が大きくなる様子が見られる。検証の対象とした 3 地点の潮位偏差の経時変化を気象庁の観測値と比較して図 6 に示す。図には気圧と風のデータに MSM と台風モデル、それぞれを用いた計算結果に加えて、以下の気象庁の経験式⁹⁾から得られる潮位偏差も合わせて示している。

$$H = a(1010 - P) + bW^2 \cos \theta + c \quad (7)$$

ただし、係数 a を含む右辺第一項が気圧寄与成分、係数 b を含む右辺第二項が風寄与成分に相当し、 H は潮位偏差 (cm)、 P は気圧 (hPa)、 W は平均風速 (m/s)、 θ は主風向 (潮位偏差が最大となる風向き) と風速 W がなす角度、 a 、 b 、 c は各地点での既往の観測値から求めた回帰係数であり、例えば表 2 に示す値を用いた。

MSM を用いたケースでは最大潮位偏差が鳥羽で約 13.4 cm、御前崎で約 3.4 cm、観測値よりも過小となるが、最大潮位偏差の発生する時刻や経時変化の傾向は概ね観測値を再現できている。誤差の要因については外力として与える気圧や風の再現精度を確認する必要があるが、湾口に位置する鳥羽や外洋に面した御前崎では風による吹き寄せは発達しにくいいため、気圧の再現精度が影響している可能性が考えられる。また、湾口の鳥羽では密度成層を、外洋に面した御前崎では wave setup の効果を考慮することにより再現性が向上する可能性がある¹⁰⁾。

台風モデルを用いたケースでは鳥羽と御前崎の 2 地点で潮位偏差が MSM の結果よりも小さく予測されている。これは、台風モデルでは台風を中心からの同心円で近似するため、中心から外れた地点の気圧

や風の分布が再現できていないためと考えられる。

表 2 各観測地点における経験式の係数

地点	a	b	c	主風向
鳥羽	1.825	0.001	0	N45° W
御前崎	1.324	0.024	0	N45° W
東京	2.332	0.112	0	S29° W

東京に関して MSM のケースでは、最大潮位偏差は観測値よりも 67.6 cm の過小となったが、最大潮位観測後に第 2 波が発生する等の傾向は再現できている。東京の観測地点は湾奥に位置し、吹き寄せにとまらう高潮が支配的となるため、風速と風向の再現精度が重要となる¹¹⁾。

計算に使用した MSM の風データと気象庁の観測値を比較した結果を図 7 に示す。なお、観測値は東京観測所 (北緯 35.69 度、東経 139.75 度) の値を海上 10 m 地点の風速に換算している。ただし、換算に用いた風速分布のべき指数は $\alpha = 1/7$ とした。観測地点においては MSM による風データは観測値を概ね再現できており、大きな差はないと言える。よって、本計算結果と観測値との潮位偏差の差異は風場の再現精度以外にも要因があると考えられる。東京湾のような内湾の高潮計算精度向上のためには、密度成層の影響による高潮増幅効果を考慮する必要があることも報告されており¹²⁾、今後の検討が必要である。

4 おわりに

本報では津波高潮シミュレータ Q-Wave の機能とその特徴について紹介した。Q-Wave を利用することによって高度な技術が必要となる高潮計算が容易に行うことが可能であり、作業コストの低減も期待できる。また、2019 年台風 19 号を対象とした再現計算を実施

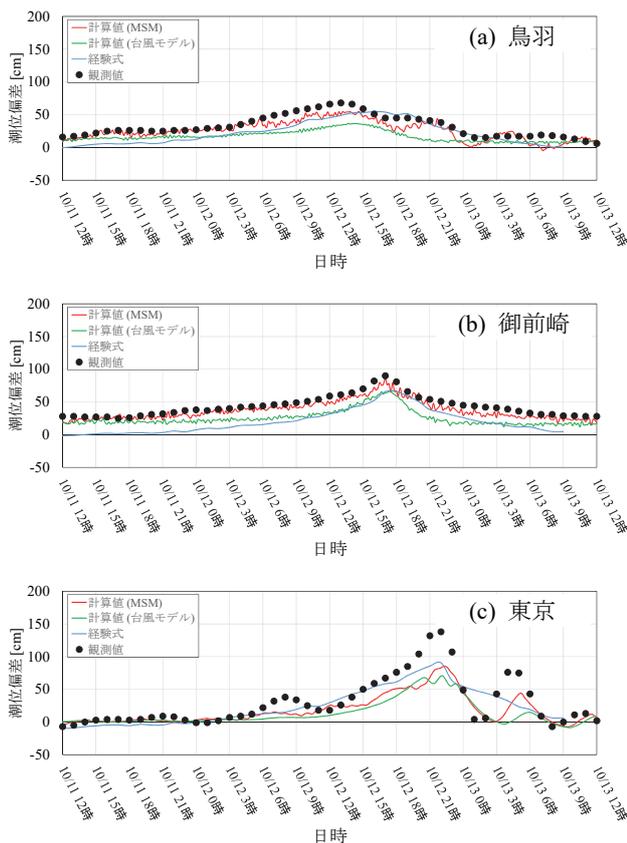


図 6 潮位偏差の計算結果と観測値の比較

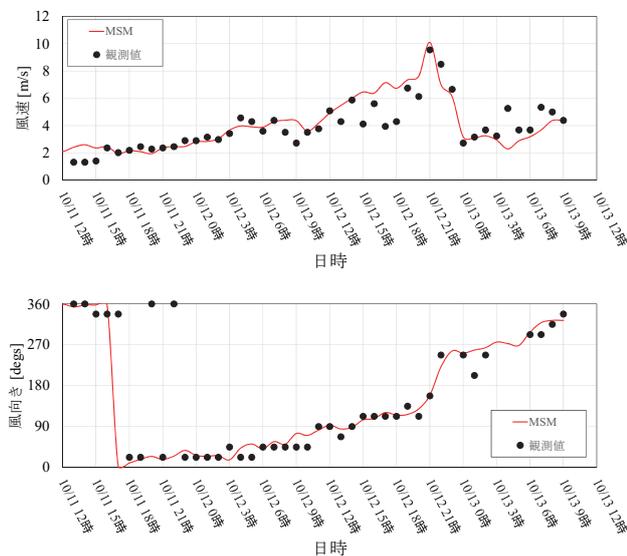


図 7 東京における風速および風向データの観測値とMSMデータの比較

し、広範囲におよぶ複数の港湾の高潮予測が一度の計算で可能であることを示した。計算結果は鳥羽や御前崎では潮位偏差が観測値と良い一致を示す一方で、東京湾では最大潮位が観測値よりも過小となった。その原因については外力となる風場の精度や波浪の効果、計算モデルの影響などが考えられ、今後詳細な検討が必要である。

引用文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : 第 5 次評価報告書, (2013).
- 2) 農林水産省, 国土交通省: 高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 1.00, (2015).
- 3) 農林水産省, 国土交通省: 高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 2.00, (2020).
- 4) Nakahashi, K. & Kim, L. S.: Building-Cube Method for Large-Scale, High Resolution Flow Computations, *Proc. of 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2004) AIAA 2004-434.
- 5) 本多忠夫, 光易恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, (1980) 90-93.
- 6) 河合弘泰: 高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1210 (2010).
- 7) 荒木和博, 寛雅行, 秋山実: BCM を用いた津波解析シミュレータ, みずほ情報総研技報, Vol.8-1 (2016) 45-54.
- 8) デジタル台風 HP : <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201919.html>.
- 9) 加藤史訓: 高潮危険度評価に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.275 (2005).
- 10) 柴木秀之, 渡辺晃: 密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究, 土木学会論文集, No.719 II-61 (2002) 47-66.
- 11) 高橋ら: 関東海域における高潮数値予測モデルの特性及び高潮の地域特性, 測候時報, Vol.80 特別号 (2013) S45-S62.
- 12) 藤本憲久, 柴木秀之, 仲井圭二: 密度成層と内湾海上風を考慮した東京湾の高潮推算, 海岸工学論文集, No.49 (2002) 246-250.

※ Q-Wave はみずほリサーチ&テクノロジーズ(株)の登録商標です。