効率的な高潮氾濫解析を目指した 準3次元－平面2次元結合モデルの構築と精度検証

Development and Accuracy Verification of H2D-Q3D Coupled Model for Storm Surge-induced Inundation Analysis with Efficiency

鈴木一輝¹・川崎浩司²

Kazuki SUZUKI and Koji KAWASAKI

The main purpose of this study is to develop a H2D-Q3D coupled model, which consists of a quasi-three-dimensional ocean current model CCM (Q3D model) and a horizontal two-dimensional inundation model using a CIP method (H2D model), in order to analyze storm surge-induced inundation with efficiency and low computational load. The validity of the coupled model was verified by comparing with the existing numerical results and the experimental ones. As a result, the coupled model was confirmed to be consistent with the existing numerical scheme. Furthermore, the numerical results were found to be in good agreement with the experimental ones, which indicated that the coupled model was capable of analyzing inundation with high accuracy.

1. はじめに

我が国の主要都市の多くは、沿岸部の低平地に位置し、高潮や津波といった沿岸災害のリスクが高い。気候変動に関する政府間パネル IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第4次報告書では、地球温暖化による海面上昇に加え、台風の強大化が指摘されている。吉野ら (2009) は、IPCCの温暖化シナリオA1Bに沿って地球温暖化が進行した場合、伊勢湾湾奥部での潮位偏差が、伊勢湾台風による潮位偏差3.5 mを2倍近く上回る6.9 mに達することを示した。村上ら (2011) は、計画潮位偏差が2.0 m～3.0 mである東京湾湾奥部において、潮位偏差4 mを超える高潮が発生しうること明らかにした。このように、地球温暖化の進行により、既存の防災施設では対応できない巨大な高潮が発生する危険性があり、早急に有効な防災・減災対策を講じる必要がある。

高潮の数値解析には、これまで非線形長波理論に基づく平面2次元モデルが主に活用されてきた。台風接近時には、強風による吹き寄せなどによって、海域では3次元的な流動場が形成される。そのため、近年では、海水流動の3次元性を考慮可能な準3次元モデルによる高潮・氾濫計算が実施されつつある。例えば、Weisberg・Zheng (2008) は、Chenら (2003) が開発した非構造格子海洋モデルFVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) を用いて高潮計算を実施し、平面2次元計算と準3次元計算の比較より、平面2次元計算では、高潮を過小評価すると指摘し

ている。したがって、精度良く高潮を評価する上では、海水流動の3次元性を考慮することは必要不可欠である。しかしながら、膨大な計算容量と演算時間を必要とする準3次元モデルを用いて広域な氾濫計算を実施することは、計算負荷の観点から効率的でないといえる。

本研究では、計算負荷を抑えた効率的な氾濫解析の実現を目指し、海域流動を計算する準3次元モデルと氾濫計算を行う平面2次元モデルを組み合わせた準3次元－平面2次元結合モデルを構築する。そして、既往の数値計算および水理模型実験の結果との比較より、本結合モデルの妥当性について検証する。

2. 準3次元－平面2次元結合モデルの構築

(1) 各モデルの概要

本研究で構築した準3次元－平面2次元結合モデルは、海域の流動計算を実施する準3次元モデル (Q3Dモデル) と陸域での氾濫計算を担う平面2次元モデル (H2Dモデル) から構成される。2つのモデルを結合することで、海域流動の3次元性を考慮し、海域から陸域までの連続的な解析を行う。

Q3Dモデルには、村上ら (2004) が開発した、外洋から内湾への海水進入を適切に評価可能である多重 σ 座標系海洋モデルCCM (Coastal ocean Current Model) を用いた。同モデルの最大の特徴は、鉛直格子を多重 σ 座標系で表現する点である。 σ 座標系で問題とされた鉛直差分精度の水深依存性を改善し、外洋から沿岸海域への海水進入や海面相互作用を精度よく計算することができる。H2Dモデルには、Yabeら (1990) が開発した高精度な移流計算が可能なCIP (Constrained Interpolation Profile) 法に基づく平面2次元氾濫モデル (川崎ら, 2013) を採用した。

1 学生会員 修(工) 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

(2) モデル間の接続手法

本結合モデルでは、図-1のようにQ3DモデルとH2Dモデルの計算領域をオーバーラップさせ、両モデルをそれぞれ独立に実行し、オーバーラップ部分の情報を交換することで、2つのモデルを接続する。具体的には、図-2に示すとおり、両モデルの境界メッシュおよびその1メッシュ内側の断面平均流速 U と水位 η に、他方のモデルによる値を課すことで、Q3Dモデルの結果をH2Dモデルへ、H2Dモデルの結果をQ3Dモデルへフィードバックさせる。なお、モデルの実行や変数の交換等については、Linux上のシェルスクリプトにより管理する。両モデルの計算ステップが揃ったときに、各モデルにおいて交換する変数をファイルに書き出し、交換処理を行う。

H2Dモデルは、流速の鉛直分布を求めることができないため、本来、水平方向流速が鉛直方向に一樣となる地点で2つのモデルを接続する必要がある。しかし、台風などの強風が作用する場合には、海域の流動場は基本的に3次元性を有する。そこで、H2Dモデルの流速をQ3Dモデルに課す際に、正村ら(2001)および富田・高橋(2012)が提案した接続方法を参考に、流速の鉛直分布を考慮できるように接続する。

図-3に、接続部分における流速の変数配置を示す。簡単のため、 x 方向のみを考える。H2Dモデルから与えられる断面平均流速の位置を接続位置とし、接続位置から1メッシュ内側の位置を参照位置とする。なお、H2DモデルからQ3Dモデルには、境界メッシュおよびその1メッシュ内側の断面平均流速が与えられるが、ここでは、1メッシュ内側の流速について説明する。境界メッシュの流速についても同様の方法で与えるものとする。

接続位置における流量を考えると、接続位置におけるQ3Dモデルの各層での流速 $u_{b,k}$ は、式(1)を満足する。

$$\sum (u_{b,k} \times \delta_{b,k}) = U_b \times H_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、図-3に示すように、 $\delta_{b,k}$ は接続位置における各層の層厚、 U_b 、 H_b はそれぞれH2Dモデルより与えられる断面平均流速、全水深である。

富田・高橋(2012)と同様に、参照位置における各層での断面平均流速からの流速のずれが接続位置においても同様であると仮定すると、次式を得る。

$$u_{b,k} - U_b = u_{ref,k} - U_{ref} \quad k=1,2,3 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $u_{ref,k}$ 、 U_{ref} はそれぞれ参照位置における各層の流速、断面平均流速である。

よって、接続位置での流速 $u_{b,k}$ は、接続位置での断面平均流速 U_b および参照位置での流速 $u_{ref,k}$ および断面平均流速 U_{ref} を用いて式(3)で表すことができる。

$$u_{b,k} = u_{ref,k} - U_{ref} + U_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-1 計算領域の概念図

図-2 接続部分の変数配置

図-3 接続部分における流速の変数配置

しかし、式(3)より求められる流速 $u_{b,k}$ は、必ずしも式(1)を満足しない。そこで、次式に示すように流速 $u_{b,k}$ を修正する。

$$u'_{b,k} = u_{b,k} \frac{U_b}{U'_b} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$U'_b = \sum (u_{b,k} \times \delta_{b,k}) / H_b \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $u'_{b,k}$ は修正後の流速、 U'_b は流速 $u_{b,k}$ から算定した断面平均流速である。なお、 U'_b が微小である場合は、修正せず、修正前の流速 $u_{b,k}$ をそのまま用いた。

3.1 次元段波問題による精度検証

1次元段波問題を対象に、準3次元-平面2次元結合モデルを用いて計算を行った。ここでは、特性曲線法に基づく1次精度流速差分法(FDS)、特性曲線上の関係式に高精度TVDスキームを用いたTVD-MUSCLスキーム、MacCormack法、CIP法による手法(土木学会水理委員会基盤水理部会, 1999)、CIP法とSMAC法に基づく平面2次元汜濫流モデル(川崎ら, 2004)による計算結果と比較

より、本モデルの妥当性について評価する。

(1) 計算条件

計算領域を図-4に示す。長さ10.0 mの水槽を設定し、初期条件として計算領域の左半分、右半分にはそれぞれ深さ1.0 m、0.4 mの水を静水状態で配置した。 $x=0.00$ mから $x=6.01$ mをH2Dモデルの計算領域とし、 $x=5.99$ mから $x=10.00$ mをQ3Dモデルの計算領域とした。奥行き方向には両モデルともに4メッシュ設けた。なお、本計算およびCIP法とSMAC法に基づく平面2次元氾濫流モデルを除き、各手法では、厳密に1次元計算を行っている。また、水平格子間隔を0.01 m、計算時間間隔を0.0005 sと両モデルともに設定した。以上を含めた計算条件の詳細は、表-1に示すとおりである。

(2) 既往の数値計算結果との比較

図-5(a), (b)に、それぞれ計算開始後 $t=1.0$ sと $t=3.0$ sにおける各計算手法による水面形を示す。図中の黒実線が本結合モデルによる計算結果を示している。図-5より、計算開始後、全ての計算手法において、急激な水深変化を伴う段波が発生している。また、本結合モデルの計算結果は、接続位置($x=5.98\sim6.00$ m)前後で水面が滑らかに変化しており、問題なく計算できていることがわかる。図-5(a)をみると、MacCormack法を用いたケースでは、 $x=4$ mおよび $x=8$ m付近で他の手法による結果と差異が生じている。その他の手法では顕著な差異はみられない。一方、段波が右端の壁に衝突し跳ね返った後($t=3.0$ s)の水面形状を示す図-5(b)では、段波前部付近で各手法に違いが現れている。本モデルの計算結果は、各手法の計算結果の間にあることがわかる。

以上より、1次元段波問題において、他の高次精度のスキームと比較しても、本結合モデルは、良好な計算精度を有し、安定的に時系列計算が可能であるといえる。

4. 遡上段波の数値解析による精度検証

高潮による防潮堤の越流や氾濫現象に対する本結合モデルの妥当性を評価するために、有光ら(2012)が行った水理模型実験の再現計算を実施した。本研究では、貯水位 $\Delta h=0.15$ m、陸上構造物の設置がない場合の実験を対象とし、陸域端部に防潮壁がない場合、防潮壁(高さ $H_w=0.02$, 0.05 m)を設置した場合の実験結果と比較した。

(1) 計算条件

本研究で設定した計算領域を図-6に示す。実験条件を再現するために、下流端の境界条件に勾配ゼロ条件による開境界を、上流端には完全反射条件を、側壁にはスリップ条件を課した。各モデルの計算条件は表-2に示すとおりである。H2Dモデルにおける波先端条件および陸域端部に防潮壁を設置した場合の越流量の算定方法については、川崎ら(2013)と同様に設定した。具体的には、波

図-4 計算領域

表-1 計算条件

H2D モデル	計算領域 (m)	$x=0.00\sim6.01$
	水平格子間隔 (m)	0.01
	水平格子数	601×4
	計算時間間隔 (s)	0.0005
Q3D モデル	計算領域 (m)	$x=5.99\sim10.00$
	水平格子間隔 (m)	0.01
	水平格子数	401×4
	σ 座標の適用領域数	2
	全層数	8
	計算時間間隔 (s)	0.0005

(a) $t=1.0$ s

(b) $t=3.0$ s

図-5 1次元段波問題

先端条件には川崎ら(2004)によるスリップ条件を課し、越流量については、越流公式を用いず、陸域端部2メッシュを防潮壁高さに地形を嵩上げすることで、防潮壁を表現し、運動方程式より流量を計算した。

(2) 計算結果および考察

計算結果の一例として、各計算ケースにおける段波状

津波の水面形状と流速場の時間変化を図-7に示す。ここで、図-7(a)は陸域端部に防潮壁の設置がない場合であり、図-7(b), (c)はそれぞれ高さ $H_w=0.02$ m, 0.05 mの防潮壁が設置された場合である。なお、本計算では、表-2に示す様に、 $x=2.20\sim 2.22$ mでモデルを接続しており、図中の黒実線は接続位置を示している。また、陸域端部から2 m沖に津波が到達した時刻を $t=0$ sとした。図-7より、水塊が段波状に左方向へ進行し、 $t=2.11$ sには、陸域に遡上している。このとき、陸域端部で反射波が生じており、時間経過とともに右方向に反射波が進行する様子も確認することができる。また、各ケースともに、全計算において、接続位置前後で水位および水平方向流速が連続的に変化しており、良好に2つのモデルが接続されている。

図-8に、陸域端部から1 m沖の地点における水位と水平方向流速の実験値と計算値の比較をそれぞれ示す。図-8より、陸域端部で反射した段波が到達する $t=3$ s付近に実験波形でみられる水位および水平方向流速の振動については、本計算結果は再現できていない。ただし、防潮壁がない場合 ($H_w=0.00$ m)、防潮壁 (高さ $H_w=0.02$, 0.05 m) が設置された場合ともに、本計算結果は実験結果の傾向を良好に再現している。

図-9に示す陸域端部から1 m内陸の地点における浸水深と水平方向流速については、各ケースにおいて計算結果は実験結果と良好に一致していることがわかる。

以上のことから、本研究で構築した準3次元-平面2次元結合モデルの妥当性が検証されたと判断できる。

図-6 計算領域

表-2 計算条件

H2D モデル	計算領域 (m)	$x=-6.80\sim 2.22$
	水平格子間隔 (m)	0.01
	水平格子数	401×4
	計算時間間隔 (s)	0.0005
	越流量の計算方法	地形の嵩上げ
Q3D モデル	波先端条件	スリップ条件
	計算領域 (m)	$x=2.20\sim 11.20$
	水平格子間隔 (m)	0.01
	水平格子数	601×4
	σ 座標の適用領域数	2
	全層数	8
	計算時間間隔 (s)	0.0005

図-7 段波状津波の水面挙動と流速場の時間変化

図-8 水位および水平方向流速の計算結果と実験結果の比較（陸域端部から1 m沖）

図-9 浸水深および水平方向流速の計算結果と実験結果の比較（陸端部から内陸1 m）

5. おわりに

本研究では、計算負荷を抑えた効率的な氾濫解析の実現を目指し、海域流動を計算する準3次元モデルと氾濫計算を行う平面2次元モデルを組み合わせた準3次元-平面2次元結合モデルを構築した。1次元段波問題や既往の水理模型実験の再現計算を実施し、本モデルの妥当性を評価した。その結果、他の高精度な計算手法と同程度の計算精度を有していることが判明した。さらに、結合モデルによる計算結果は実験結果と良好に一致し、安定かつ精度よく計算できることを示した。

今後は、高潮のような3次元な流動場が形成される現象に本モデルを適用し、有用性を評価する予定である。

参 考 文 献

- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012) : 構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_776-I_780.
- 川崎浩司・小野稔和・Napaporn Piamsa-nga・熱田浩史・中辻啓二 (2004) : CIP法とSMAC法に基づく平面2次元氾濫流モデルの構築, 水工学論文集, 第48巻, pp. 565-570.
- 川崎浩司・鈴木一輝・高杉有輝・西浦洋平・有光 剛 (2013) : CIP法を用いた平面2次元数値モデルによる段波状津波の遡上・氾濫解析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, 印刷中.

富田孝史・高橋研也 (2012) : 2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現を目指した実務計算手法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_191-I_195.

土木学会水理委員会基礎水理部会 (1999) : 水工学における計算機講習会.

正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利幸 (2001) : 2次元・3次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析, 土木学会論文集, No. 670, II-54, pp. 49-61.

村上智一・深尾宏矩・吉野 純・安田孝志・飯塚聡・下川信也 (2011) : 温暖化による台風強大化に伴う東京湾での最大級高潮と波浪の時空間分布, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. 396-400.

村上智一・安田孝志・大澤輝夫 (2004) : 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, 第51巻, pp. 366-370.

吉野 純・小林孝輔・児島弘展・安田孝志 (2009) : 大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 396-400.

Chen, C., H. Liu and R. C. Beardsley (2003) : An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 20, Issue 1, pp. 159-186.

Weisberg, R. and L. Zheng (2008) : Hurricane storm surge simulations comparing three-dimensional with two-dimensional formulations based on an Ivan-like storm over the Tampa Bay, Florida region, Journal of Geophysical Research, 113 (C12), C12001.

Yabe, T., T. Ishikawa, Y. Kadota and F. Ikeda (1990) : A multi-dimensional cubic-interpolated pseudoparticle (CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 59, Issue 7, pp. 2301-2304.