環境流体解析のための 簡易Wetting and Dryingスキーム

A SIMPLE WETTING AND DRYING SCHEME FOR ENVIRONMENTAL FLUID FLOW

新谷哲也¹・中山恵介²・中本篤嗣³

Tetsuya SHINTANI, Keisuke NAKAYAMA and Atsushi NAKAMOTO

¹正会員 博(工) 首都大学東京助教 都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507北海道北見市公園町165番地)

³正会員 修(工) (株)福田水文センター (〒001-0024北海道札幌市北区北24条西15丁目2-5)

The study proposes a simple wetting and drying scheme for analyzing environmental fluid flows using a fixed grid on z-coordinate. The wetting and drying process is especially important in the low-lying coastal areas with large amplitude tides and reservoirs with severe flooding and discharging because it drastically changes the horizontal extent of the water body. The basic idea of the present scheme is a partial-cell (cut-cell) representation of the structured grid based on a finite-volume method to reconstruct the computational domain in response to a surface evolution. The scheme was implemented to an object-oriented numerical model, Fantom3D, and tested against analytical solutions and applied to field scale phenomena. The computed results agree reasonably well with the analytical solutions. We showed that the proposed scheme is a useful technique to compute the flow in partially dry domain for the hydrodynamic models using z-coordinate.

Key Words : Hydrodynamic model, wetting and drying, finite-volume method, cut-cell method

1. はじめに

湖沼・貯水池や海岸域等における流れの数値解析を進めるに当たって、数値的な困難をもたらす原因の一つが自由水面の存在である。例えば、砕波等の水面形の非線形性に関する問題、水面波の波速に伴う計算時間ステップの制限等はその代表例である。これらに加えて、困難を引き起こす問題として、水位変動に伴う冠水・干出 (Wetting and Drying: WAD) 現象が挙げられる。冠水・干出は、潮位変動の大きい海岸域や感潮河川、増水時・放流時の貯水池等で生じ、冠水・干出に伴う水際線の移動と水塊の体積変化によって、水域内の運動量、物質、熱の輸送メカニズムが大きく変化する。

この問題を数値解析的な視点から見ると、水面変動によって変化する計算領域をどのように取り扱うかが主な焦点となる。数値流体力学 (CFD) の分野では、既に気液を直接計算し、冠水・干出はもちろん、砕波を含む水面の大変形に対応した手法が多く開発されている。例えば、

VOF法¹⁾、CCUP法²⁾、Level-set法³⁾等はその代表例である。しかし、これらの手法は比較的計算コストが高いために、主に局所的・短期的な複雑現象の再現に利用されることが多い。本研究では、湖流や潮流の解析等で一般的に用いられる静水圧モデルにも適用できる手法に限定して話を進める。

湖や海岸域の解析に関連するWADの既往研究は、その解析手法によって幾つかに分類することができる。まず、水域を平面2次元として扱うか3次元として扱うかで分類できる。平面2次元の計算は、計算コストの低さから多くの干潟の流れ解析を中心に研究が進められ、様々なWADの計算手法が提案されている。例えば、Kinematic wave法と有限要素法を用いたIpら⁴⁾の研究、移動境界を用いた研究 (例えば、Reid and Bodine⁵⁾ や Sielecki and Wurtele⁶⁾) 等が挙げられる。しかしながら、これらのモデルでは、当然、環境流体解析で重要となる運動量やスカラーの鉛直分布を表現することはできない。一方、3次元領域を計算する手法は、鉛直グリッドの離散化手法で二種類に分類される。Jiら⁷⁾、Uchiyama⁸⁾、

Oey⁹⁾等は、POMやROMSに代表される σ 座標(terrain-following coordinate)に基づいた数値モデルにWADを導入し、解析解や実現象との良好な一致を得ている。一方、z-coordinate(鉛直方向デカルト座標系)を採用したモデルに関しては、Casulli and Cheng¹⁰⁾、Wangら¹¹⁾、Lin and Falconer¹²⁾等によって精力的に研究が進められている。それぞれの座標系を用いることによるメリット・デメリットに関してはここでは言及しないが、本論文では、湖沼などの安定成層場の解析において有利であるz-coordinateに注目する。

Lin and Falconer¹²⁾は、水面変動に伴う格子変化を計算領域の最上層セルのみで対応させ、冠水・干出現象を再現している。この方法は導入が容易であるが、大規模な水位変動に対応させるためには、表層セルを大きく設定しなければならない等のデメリットもある。一方、Casulli and ChengやWangらの方法は、水面変動に伴って水面より上側に位置することになったセルをドライセル(鉛直セル高さ(Δz)をゼロ)とみなし、計算から除外する方法を採用している。また、水面が横切る計算セルについては、水面変動に伴って Δz を変化させている。

上述の多くのモデルで採用されているスキームは、WADを高精度に捕獲することを主目的に設計されているが、実際の海岸域や貯水池では、水面がほぼ水平を維持して変動するなど、水面の非線形性に伴う問題は殆ど無く、より簡単に導入でき、安定して計算できる手法も一方では望まれている。そこで、本研究では、z-coordinateにおいて格子変化を伴わず、既存のモデルへの組み込みが簡単で安定(robust)なスキームの構築を目指した。具体的には、Hirtら¹³⁾によるFAVOR法やAdcroftら¹⁴⁾によって地形表現に用いられたpartial-cell (cut-cell) 法のアイデアを応用し、水面変動に伴ってセル面のフラックスを制限するアルゴリズムをベースとしたWADスキームを提案・検証する。

2. 数値モデルと水面変動計算

本研究においてWADスキームを導入する数値モデルとして、オブジェクト指向型流体モデルFantom3D¹⁵⁾を利用することとした。方程式の離散化手法及びアルゴリズムに関する詳細は文献¹⁵⁾・¹⁶⁾を参考にされたい。このモデルでは、3次元一般座標系においてNavier-Stokes方程式を有限体積的に離散化しているが、鉛直方向はデカルト座標(z-coordinate)としてWADのスキームの定式化を行う。WADは、当然ながら水面変動に依存していることから、まず水面変動の更新手順を簡単に説明する。水面変動はCasulli and Cheng¹⁰⁾と同様に鉛直積分された平面2次元の長波方程式を陰的に解く手法によって求めている。ここでは、簡単のためにデカルト座標に則した記法で説明する。3次元領域を鉛直方向に積分した連続式は以下の式で表せられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_b^h u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_b^h v dz \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 h は自由水面高さ、 b は底面の高さ、 x, y は水平方向の座標成分、 z は鉛直方向の座標成分、 u, v はそれぞれ x, y 方向の速度成分である。一方、部分的に離散化した水平方向の運動方程式は、各方向に以下の式で表される。

$$u^{n+1} = G(u^n) - g \Delta t \frac{\partial \eta^{n+1}}{\partial x} \quad (2)$$

$$v^{n+1} = G(v^n) - g \Delta t \frac{\partial \eta^{n+1}}{\partial y} \quad (3)$$

ここで、 $G()$ は移流項、拡散項など他の陽的な項を表す。 g は重力加速度、 Δt は計算時間ステップである。これら(2)、(3)式を u, v に関して陰的に離散化した(1)式に代入することで、 η^{n+1} に関するポアソン方程式が得られる。この式を共役勾配法やSOR法等で解を得ることで、新たな時間ステップにおける水面変動をCFL条件の制限なく安定に解くことができる。今回の研究の特徴は、この水面に関する陰的スキームと後述するcut-cellのスキームを組み合わせたところにある。cut-cellのアルゴリズムの詳細に関しては参考文献に譲るが、ポイントは、水面を含むセルの水占有体積率とセル境界面の開口率を考慮して計算を行い、サブグリッドスケールの水面変動の効果を考慮するところにある。

3. 冠水・干出スキームについて

(1) 干出・冠水(WAD)の判定

WADの判定方法は、計算グリッド上で水位を評価する位置によって若干異なる。例えば、Lin and Falconer¹²⁾は計算セル中心だけではなく、セル側面における水位を使う方法を採用し、Uchiyama⁸⁾が採用しているセル中心で定義された水位だけ利用する方法を提案している。本研究では、Uchiyamaに習ってセル中心位置で定義されている水位を判定基準に用いる。より厳密なWAD判定のためには、Lin and Falconerが行ったようにセル界面における流速の方向に基づく細かいWAD判定も必要であると考えられるが、本研究では簡単のため水位だけを判定基準とする。まず、ウェットからドライへの判定基準として、以下の条件(a)を満たしたセルが潜在的にドライ(potentially dry)とみなす。

(a) セル水位 d_{cell} が基準値 d_{min} 以下となる:

$$d_{cell} < d_{min} \quad (4)$$

ここで、セル水位 d_{cell} とは対象セルの底部から水面までの距離を表し、 d_{min} はゼロ以上に設定されるドライとウェットを分ける限界水深とする(図-1参照)。底面直

上のセル（底面セル：Bottom cell）において，以下の(b)もしくは，(c)のどちらかを同時に満たせば，計算から除外するセル（effectively dry）とする．

- (b) 水平方向に隣接するセル(4つ)の d_{cell} のうち一つでも対象（中心）セルの d_{cell} より小さい（周辺で最も浅くない）．
- (c) 周辺のセルがすべてドライセル．

一方，底面セル以外は，(b)，(c)の条件にかかわらず， $d_{cell} \leq 0$ となった時点でドライの判定を行う．しかしながら，水面セルにおける d_{cell} が非常に小さい値の場合，風応力や熱収支の計算が発散する可能性がある．そのような場合は，水面セルの d_{cell} に有限な厚さ d_{min} を設定する．また，比較的大きな時間ステップで計算を行った場合，底面セルの d_{cell} が負になることがある．その場合は，Uchiyamaが指摘しているように質量保存が成り立たなくなるが，そのセルを強制的にドライとし， $d_{cell} = d_{min}$ を与える．ドライからウェットへの遷移については，上記条件が満たされなくなった時点で，ウェットとし，計算領域へと戻す．本計算手法では， σ 座標系におけるWADの場合のように鉛直コラムが一度にドライになるのではなく，水位の上下に従って計算セルを個別にドライもしくはウェットへと変更する．それ故，本研究におけるWADは，単に底面が冠水・干出するという限定された意味ではなく，すべての計算セルにおいて水位の有無を判定するスキームとして扱っている．

(2) セルのフラックス制限手法

本研究では，スタッガード格子(Arakawa-c grid)上におけるスキームの導入手法について説明する．コントロールボリュームとしては，塩分・温度等のスカラーに関するコントロールボリューム (C-cv)，そして，このコントロールボリュームの各面に定義した流速成分に関するコントロールボリューム(説明では水平流速 u に関するU-cvのみ)を考える(図-1)．

図-1：ウェット・ドライセルの概念図

計算の手順は，1ステップの計算が終了した時点で，まず最新の水位データを用いて(1)で示した基準でC-cvのドライ・ウェットの判定と水占有体積率(volume ratio: 0~1)を決定する．次に，水平方向のセル面における開口率(open ratio: 0~1)を，そのセル面を共有する2つのC-cvセルの情報に従って決定する．本手法では，セル内の水面は簡単のために水平を仮定しており，隣接するセル間で上流側のvolume ratioをその面における開口率としている．他のコントロールボリューム(U,V,W)のWADの判定及び開口率は，C-cvの情報から設定する．例えば，U-cvは，2つのC-cvを跨がるように定義されるが，一方のC-cvがドライの時はU-cvはドライと判定することとした．

(3) 水面セルの扱い

水面セルは水面に追従して移動を繰り返すため特別な取り扱いが必要となる．特に底面セルでないセル（底面に接している水面セルは底面セルとして処理する）がドライから水面セルになった場合については注意が必要である．水面セルになる直前のドライセルには，ドライになる前の水位とスカラー値が保持されているが，これらの値は底面セル以外では意味を持たない．それ故，この場合は水面上昇が主に鉛直下方からのフラックスによって起こったとみなし，スカラー量，運動量は直下のセルの値をコピーすることで対応する．特に静水圧モデルでは，鉛直方向のフラックスは鉛直コラムが連続式を満たすように水面方向へ決定されていくため，この仮定によって大きな誤差は発生しないと考える(z-coordinateモデルの場合は必ずこの問題は発生する)．

(4) 底面セルの扱い（底面境界条件）

一方，底面セルがドライからウェットになった場合は，ドライになった際に保存してあった水位，スカラー量を復元させて計算を進める．底面セルでもう一つの注意点として水底粗度の評価方法があげられる．一般的に底面抵抗 τ_b は次式で与えられる．

$$\tau_b = \rho_0 C_d u |u| \quad (5)$$

ここで， ρ_0 は参照密度， C_d は抗力係数， u は底面直上のセルにおける水平流速である．通常の計算では，抗力係数に一定値を用いることが多いが，水深が底面の粗度長と比較するほど小さくなった場合は非常に大きな値となる．本研究では，Wangら¹¹⁾に従って，流速の対数分布を仮定し，以下の式から求めることとした．

$$C_d = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_b}{z_0} \right) \right] \quad (6)$$

ここで， κ はカルマン定数， z_b は底面から速度定義位置までの高さ ($d_{cell} / 2$)， z_0 は粗度高差であり本研究では，Wangらにならって $z_0 = 0.001m$ とした．

本モデルは，セル内の水面形を水平とするなどアルゴ

リズムを単純化し、また、最低水位 $d_{\min}$ の設定による運動量の欠損、負の水位の発生による質量欠損を（ある程度）許容しているため、これらの誤差を許容できない局面ではそのまま使用することはできない。しかしながら、このような簡素化によって、従来のデカルト座標系モデルへの導入が容易になっている。

4. モデルの検証

本節では、上で説明した簡易WADスキームの妥当性の検証を行う。はじめに、矩形水路における水面セシシュの問題を扱い、複数の固定セルを横切って変動する水面計算の信頼性とメッシュサイズ依存性について考察を行う。次に、冠水・干出計算の妥当性を検証するために、長波の遡上現象に関して解析解と本計算の適合性を確認する。最後は現地スケールの計算を試み、本研究で開発したWADスキーム導入の効果を実スケールで定性的に評価する。

(1) 水面セシシュの計算

図-2に示すような矩形水槽内（長さ500cm, 水深30cm）に水平1次モード(cosine)の水面形を初期条件として与え、その後の振動現象（水面セシシュ）を考察した。セシシュの振動周期はMerian formulaから理論的に求めることができ、今回の条件では周期 $T=5.83s$ である。WADスキームの格子依存性（特に鉛直解像度）を検証するために、5ケースの格子を用意し（図-2中に表示）、水路端における水位変動の比較を行った。数値計算は非粘性で行い、初期振幅は有限振幅効果が大きく現れない程度 ($A_0=0.3cm$) の小さいものとした。今回は時間精度の検証ではないため、計算時間間隔はすべてのケースにおいて $0.0025s$ の一定とした。

まず、case-1とcase-2は、水面が一つの鉛直セル内を移動するケースで、水平格子解像度に違い（2倍）がある。それ以後のケースは、水平グリッド解像度はcase-2と同じであり、鉛直解像度の違いにより、それぞれ水面が2つの鉛直セル(case-3)、4つの鉛直セル(case-4)、6つの鉛直セル(case-5)を横切って変動する。図-3は、上述のすべてのケースにおける結果を示している。図からは判断できないが、case-1だけ若干数値粘性の影響により振幅の減衰が見られた。しかしながら、ほぼすべてのケース

図-2：水面セシシュ計算の条件

図-3：水面セシシュの変位（左端）

において、セシシュの振幅、及び振動周期が適切に再現されていることがわかる。このことから、今回、格子変形を行わないフラックス制限手法を応用したWADスキームが、水面変動を数値振動や運動量の減衰を起こすことなく正確に計算できていることがわかる。

(2) 長波の遡上現象の計算

WADスキームの精度検証を行うために、多くのWADを扱う既往の研究において参照されている一様斜面上を遡上する長波に関するCarrier and Greenspan¹⁷⁾（以下：CG58）の解析解と数値計算結果の比較を行った。以下、参考のために基礎式と解を求める方法について簡単に説明する。CG58では、1次元非線形長波の運動方程式と連続式において変数変換を行うことにより、次式で示すポテンシャル ϕ に関する一つの線型方程式へと帰着させる。

$$(\sigma\phi_{\sigma})_{\sigma} - \sigma\phi_{\lambda\lambda} = 0 \quad (7)$$

この方程式の解のうち、特に単純な解は、

$$\phi = AJ_0(\sigma)\cos\lambda \quad (8)$$

であり、 A は定数 ($0 < A < 1$)、 σ と λ は新しく導入された変数である。これらの変数と斜面と静水面の交点からの水平距離 x 、水面変動 η 、及び時間 t との関係は、以下の式で与えられる。

$$\eta = \alpha L \left(-\frac{A}{4} J_0(\sigma) \sin\lambda - \frac{A^2 J_1^2(\sigma)}{2\sigma^2} \cos^2\lambda \right) \quad (9)$$

$$x = L \left(-\frac{\sigma^2}{16} + \eta \right) \quad (10)$$

$$t = \sqrt{\frac{L}{\alpha g}} \left(\frac{\lambda}{2} + \frac{AJ_1(\sigma)\cos\lambda}{\sigma} \right) \quad (11)$$

ここで、 L は計算領域の水平長さ、 α は斜面勾配である。式(11)において、時刻 t と位置を表す変数 $\sigma (> 0)$ を決めて、数値的な方法（例えば、Pythonのscipy.optimizeモジュールなどを利用）によって λ を求め、 η そして x を順次求める。

CG58の解析解と数値計算結果を比較するために、Madsenら¹⁸⁾と同様な計算条件を利用した。具体的には、水深0.5m、入射波周期10s、一様斜面勾配1/25、斜面上で水深が0.5mとなる位置で波高が0.006mとなるように斜面と反対側の境界から造波した。造波境界では水位変動のみを与え水平流速の勾配をゼロとした。計算条件は、水平グリッド幅は一定の0.025m、鉛直グリッド幅は可変とし、水面を挟んで上下2cmの区間を0.0025mとした。また、計算時間間隔は0.01秒に固定した。造波境界が斜面に近い場合、斜面上で重複波を完全に形成する前に造波境界からの反射波が戻ってくるため、水深が0.5mの位置から造波境界側に更に20mの一定水深区間を用意して、反射波の影響がない状況における比較を行った。

図-4は、CG58の解と数値計算結果を比較したものである。図-4(a)は水面が斜面を下降する位相、同(b)が逆に遡上する位相を0.4秒ごとに示している。図中の破線はCG58の解における最大変位時($\lambda = \pi/2, 3\pi/2$)の波形を表している。両結果とも、重複波の節の位置と振幅、及び非線形的な波形が解析解と合理的に一致している事がわかる。しかしながら、数値計算結果、特に平均水面付近を通過する際の水面計を見ると、斜面近傍で細かな振動や非線形長波の解析解には存在しない変曲点が存在している。この振動に関しては、階段形状の地形表現と急勾配な水面形が主原因として考えられる。また、この振動の傾向は、計算セルのアスペクト比が小さくなるほど顕著になることを確認している。しかしながら、最大変位時における遡上の特徴やその距離はほぼ適切に表現されており、干出・冠水現象は適切に表現できていると考えられる。現段階におけるスキームの定式化では、津波の遡上や段波などの再現性が高いとは言いきれないが、急激な冠水・干出現象ではなく、貯水池の水位変化や潮汐などのゆっくりとした水位変化に伴う現象には十分適用可能であると言える。

図-4：解析解(CG58)と数値計算結果の比較
(a) 下降時の水面変化、(b) 遡上時の水面変化

(3) 現地スケールへの適用例

最後に、本研究で開発したWADスキームの現地スケールの現象への適用を試みた。計算対象フィールドとして、中本ら¹⁹⁾が以前に数値モデル(Fantom)を用いて海面上昇と塩水遡上の関係を検討した釧路川を選んだ。本河川は、河口部において干潮時に干出が生じていること、そして河口部が比較的直線的であることから計算スキームの検証を行うには適している。釧路川は、北海道道東の釧路湿原を流れる全長154km、流域面積2,510km²の一級河川である。今回は、釧路川で海面上昇が1.45m生じた場合の塩水遡上現象について、最小潮位以上を1グリッドで表現した計算¹²⁾（以下：ケースA）と本研究で開発したWADを使用した場合（以下：ケースB）の計算を行い、得られる結果の比較を行った。計算では、新釧路川の河口部12km程度を13の計算領域(domain)に分割し、並列計算を行った。ケースAの計算では、最低潮位以下は鉛直厚0.15mのグリッド、それ以上の変化は最上層のグリッドセルで表現した。一方、ケースBの計算では、水位変動分も考慮して鉛直方向を鉛直厚0.15mの一樣グリッドで分割した。

図-5は、満潮の位相における両者の比較を行ったものである（河口部から7domain分を表示）。図中のカラーコンターは塩分濃度をPSUで表している。ケースAの結果(a)を見ると、河口近くで急激に水面近くの塩分が低下し、3km程度までしか塩水が遡上していない。しかしながら、ケースBの結果(b)では、河口部から3km程度まで水面近くにおいても高塩分を維持し、先端部は7km近くまで遡上している。この違いは、ケースAにおいて、水面変動が一つのセルで扱われていることに起因している。

図-5：釧路川における塩水遡上予測結果
(a) ケースA、(b) ケースB

と考えられる。つまり、河口から侵入する高塩分水（海水）が密度流として上流側へ進行する際に、最低潮位近くに位置する上から2番目のセルまで下がって進まなければならないことが問題となっている。

今回の比較は海面上昇を想定した場合の計算であり、観測結果との比較はないため、結果の再現性を含めた妥当性の判断はできない。しかしながら、z-coordinateを用いて感潮河川など水位変化が大きい水域の計算を行うためには、本研究で示したような手法でWADを考慮し、水面近くでの格子解像度を低下させないような手法が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、大振幅の水位変動を伴う環境流体を解析する上で問題となる冠水・干出 (Wetting and drying) スキームをz-coordinateをベースに提案した。以下にその要点を示す。

- 1) 計算格子を変形することなく、cut-cell(FAVOR)法に類似したセル面に対するフラックス制御を基本とした簡易WADアルゴリズムを提案した。
- 2) 水面セিশュの計算では、計算セルを跨る水面の変動を適切に再現できることを確認した。
- 3) 冠水・干出現象に関してCarrier and Greenspanの解と比較し、斜面近傍で微細な振動が発生するものの合理的な精度で再現することができた。
- 4) 現地スケールの解析を行い、冠水・干出スキームの導入が塩水遡上の予測距離を大きく変化させる可能性があることがわかった。

謝辞：本研究は、平成23年度首都大学東京 若手傾斜的研究費（代表：新谷哲也，代表：上野敦），及び（株）福田水文センターとの共同研究の一部として行われた。北見工業大学大学院博士課程 丸谷靖幸君には現地データの処理及び検証計算にご協力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, Vol.39, pp.201–225, 1981.
- 2) Yabe, T. and Wang, P.Y.: Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol.60, pp.2105–2108, 1991.
- 3) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S.: A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow, *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.146–159, 1994.
- 4) Ip, J.T.C., Lynch, D.R. and Friedrichs, C.T.: Simulation of estuarine flooding and dewatering with application to Great Bay, New Hampshire, *Estuar, Coast Shelf Sci*, Vol.47, pp.119–141, 1998.
- 5) Reid, R.O. and Bodine, B.R.: Numerical model for storm surges in Galveston Bay, *J. Waterways Harbors Division, ASCE*, Vol.94, pp.33–57, 1968.
- 6) Sielecki, A. and Wurtele, M.G.: The numerical integration of the nonlinear shallow water equations with sloping boundaries. *J. Comput. Phys.*, Vol.6, pp. 219–236, 1970.
- 7) Ji, Z.G., Morton, M.R. and Hamrick, J.M.: Wetting and drying simulation of estuarine processes, *Estuar, Coast Shelf Sci*, Vol.53, pp. 683–700, 2001.
- 8) Uchiyama, Y.: Modeling wetting and drying scheme based on an extended logarithmic law for a three-dimensional sigma-coordinate coastal ocean model, *Rep. Port and Airport Res. Inst., Yokosuka, Japan*, Vol.43, No.4, pp. 3–21, 2004.
- 9) Oey, L.: A wetting and drying scheme for POM, *Ocean Modelling*, Vol. 9, pp.133–150, 2005.
- 10) Casulli, V. and Cheng, R.T.: Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.15, pp. 629–648, 1992.
- 11) Wang, B., Fringer, O. B., Giddings, S. N. and Fong, D. A.: High-resolution simulations of a macrotidal estuary using SUNTANS, *Ocean Modelling*, Vol.26, pp.60–85, 2009.
- 12) Lin, B. and Falconer, R.A.: 1997. Three-dimensional layer-integrated modeling of estuarine flows with flooding and drying. *Estuar, Coast Shelf Sci*, Vol.44, pp.737–751, 1997.
- 13) Hirt, C. W. and Sicilian, J. M.: A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes, *Proc. Fourth Int. Conf. Ship Hydro., National Academy of Science, Washington, D.C.*, 1985.
- 14) Adcroft, A., Hill, C. and Marshall, J.: 1997: Representation of topography by shaved cells in a height coordinate ocean model. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.125, pp.2293–2315, 1997.
- 15) 新谷哲也・中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型モデルの開発と検証, 水工論文集, 第53巻, pp.1267–1272, 2009.
- 16) Shintani, T. and Nakayama, K.: An object-oriented approach to environmental fluid modeling, *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, 2010.
- 17) Carrier, G.F. and Greenspan, H.P.: Water waves of finite amplitude on a sloping beach. *J. Fluid Mech.*, Vol.41, pp. 97–109, 1958.
- 18) Madsen, P.A., Sorensen, O.R. and Schaffer, H.A.: Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, *Coastal Engineering*, Vol.32, pp.255–287, 1997.
- 19) 中本篤嗣・新谷哲也・中山恵介・丸谷靖幸・石田哲也・法村賢一: 海面上昇を考慮した釧路湿原への塩水遡上の影響評価, 水工学論文集, 第55巻, pp.1351–1356, 2011.

(2011.9.30受付)