

冠水・干出を考慮した3次元潮汐流シミュレーションに関する研究

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF WETTING AND DRYING BED DUE TO TIDAL CURRENTS

黒岩正光¹・中平順一²・松原雄平³

Masamitsu KUROIWA, Junichi NAKAHIRA and Yuhei MATSUBARA

¹正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 八千代エンジニアリング(株)(〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

This paper presents a new 3D tidal current model that can compute the wetting and drying bed in the tidal flats due to tidal motion. The governing equations are derived from 3D Navier Stokes equations. The governing equations are solved using the fractional step method, combining the finite difference method in the horizontal plane and the finite element method in the vertical plane. First, in order to investigate the performance of the presented model, a model test associated with the artificial tidal flat surrounded by breakwaters is carried out. Secondly, the tidal current with the wetting and drying bed in the shallow water around a small fishing port in the field site is simulated. Finally, the applicability of the presented model is discussed.

Key Words : Tidal current, Tidal flat, 3D numerical simulation, Fractional step method

1. はじめに

潮間帯は、生態系や物質循環などにとって重要な場であり、精度良い流動予測が必要不可欠である。潮間帯の冠水・干出を考慮した潮汐流の予測は、従来、平面2次元モデル（例えば、加藤ら¹⁾）や層積分型の3次元多層モデル（例えば、小澤ら²⁾）が主として用いられている。平面2次元モデルでは、流れの鉛直構造が表現できない。多層モデルでは、ある程度水深の深いところでは、鉛直構造は表現できるが、干潟のような潮間帯では、鉛直方向の層数が少なくなり、鉛直構造は表現困難である。このような欠点を補うため、内山³⁾は、POM⁴⁾をベースとしたσ座標系の冠水・干出モデルを提案している。

本研究では、これまでのモデルとは別の手法、すなわち、Koutitasら⁵⁾が提案したFractional Step法による冠水・干出を考慮した新たな潮汐流の3次元予測モデルを提案し、数値実験と現地レベルの計算を試み、モデルの妥当性を検討しようとするものである。

2. 数値モデルの概要

(1) 運動方程式及び連続式

3次元のN-S方程式に静水圧近似およびブシネスク近似した運動方程式を基礎式とする。静水面上にxおよびy軸を、鉛直上向きにz軸をとると、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

ここに、 ζ は水面変位、 g は重力加速度、 ε_h および ε_v は水平及び鉛直渦動粘性係数で、Smagorinskyモデル

$$\varepsilon_h = C_h \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

および

$$\varepsilon_v = C_v \Delta z^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

を用いる。\$C_h\$ および \$C_v\$ はそれぞれ 0.1 および 0.5 としている。連続式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

水面変動 \$\zeta\$ および鉛直方向流速 \$w\$ はそれぞれ

$$w = w_{z=-h} - \frac{\partial}{\partial x} \int_h^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_h^{\zeta} v dz \quad (6)$$

および

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_h^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_h^{\zeta} v dz \quad (7)$$

から計算される。

(2) 数値計算法

本研究では、Koutitas ら⁵⁾ が吹送流の計算に用いた Fractional Step 法を適用する。この手法は、運動方程式を水平方向の微分項と鉛直方向の微分項の 2 つに分けて解く方法であり、以下のように 2 段階に分けて時間積分を行う方法である。これまで、檜谷⁶⁾ が河川流と湖沼の吹送流の計算に、山下ら⁷⁾ が高潮計算、黒岩ら⁸⁾ が海浜流の準 3 次元解析に適用している。本モデルは、黒岩ら⁸⁾ の海浜流の準 3 次元モデルのコードを潮流モデルに改良したものである。\$x\$ 方向の運動方程式について示すと、

Step 1 ;

$$\frac{\partial u^m}{\partial t} = \frac{u^d - u^m}{\Delta t} = L_1(u^m) - g \frac{\partial \zeta^m}{\partial x} \quad (8)$$

Step 2 ;

$$\frac{\partial u^d}{\partial t} = \frac{u^{m+1} - u^d}{\Delta t} = L_2(u^{m+1}) \quad (9)$$

ここに、

$$L_1 = -u^m \frac{\partial}{\partial x} - v^m \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (10)$$

$$L_2 = -w^m \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (11)$$

これらの式に、\$z\$ に関する線形の形状関数を乗じ、ガラーキン有限要素法を用いて離散化を行うが、水平方向における微分項の離散化は有限差分法を適用する。鉛直方向に有限要素法を用いて離散化するため、水深の大き

さに関らず等分割、あるいは底面付近だけ細かく分割することも可能であり、極浅海域でも流れの鉛直分布を計算することが可能である。なお、各変数の位置はスタッガード格子で定義する。

(3) 水面および底面における境界条件

水面には、風や波による摩擦せん断応力は作用しないものとする、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (z = \zeta) \quad (12)$$

底面では、底面摩擦せん断応力が作用するとし、

$$\varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{bx}}{\rho}, \quad \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (z = -h) \quad (13)$$

ここに、\$\tau_{bx}\$ および \$\tau_{by}\$ は底面せん断応力で、

$$\left. \begin{aligned} \tau_{bx} &= \rho g u \sqrt{u^2 + v^2} / C^2 \\ \tau_{by} &= \rho g v \sqrt{u^2 + v^2} / C^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

で表され、\$C\$ は Chezy 係数（例えば、柿木ら⁹⁾）を用いて以下のように表した。

$$C = \frac{1}{n} (h + \zeta - 1.0)^{1/6} \quad : \quad h + \zeta \geq 1.1 \text{ m} \quad (15)$$

$$C = \frac{0.683}{n} (h + \zeta) \quad : \quad h + \zeta \leq 1.1 \text{ m} \quad (16)$$

のように表した。

底面における \$w\$ は

$$w = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (17)$$

とした。

(4) 開境界の取り扱い

対象とする場が閉鎖された領域である場合、開口部において潮汐波の水位変動を与えればよい。一方、沖側および側方境界がすべて開境界である場合、特に海岸線に沿って潮流が、海岸線にはほぼ平行な往復流となっている場合、沖側と側方で、水位分布あるいは流速分布を与える必要がある。しかしながら、本モデルでは、冠水・干出を考慮することから、側方での水位あるいは、流速分布の与え方が複雑になると考えられる。そこで、本研究では、開境界の場合は、沖側境界のみに水位変動を与える方法を試みることにする。すなわち、沿岸方向に位相差を考慮した正弦関数による水位変動を与える。側方は周期境界とする。詳細は後述する。

(5) 潮間帯における冠水・干出計算

潮汐による極浅海域の冠水と干出を再現する方法にはいくつかの手法が提案されているが、本研究では、加藤ら¹⁾の手法を用いて冠水・干出計算を試みた。

下げ潮時は、水位が下がり干潟域が露出するにつれて、ある実水深以下になったところで陸域（計算領域外）と

して新たに境界を設定すればよい。一方、上げ潮時は水位上昇に伴い、陸域から海域となるところの水深を設定し、新たな境界を設定する必要がある。加藤ら⁹⁾と同様に、上げ潮時の各計算ステップ内では、境界を不透過として計算領域内の水位と流速を計算し、次のステップに入る前に、計算された水位を領域外に外挿する。外挿は図-1に示すように行うが、陸域のある1点が海域の2点以上のところから外挿するときは、2あるいは3点平均した値を用いることとする。なお、外挿された点の実水深が正であれば海域とするが、実際の計算では、ある程度水深が必要である。本モデルでは、試行錯誤の結果、0.2mがその限界であり、外挿した点における実水深が0.2m以上であれば、海域として計算領域とした。なお、下げ潮時に実水深が0.2m未満であれば、干潟域としている。水位の外挿時には流速値を0としている。2点以上の水位から外挿するときは、平均値を用いるので水面勾配が0とはならず、連続条件を厳密に満たさない。このときは、流速も外挿する必要があるが、経塚ら¹⁰⁾も述べているように過剰な質量変化がなければ計算上問題無い。

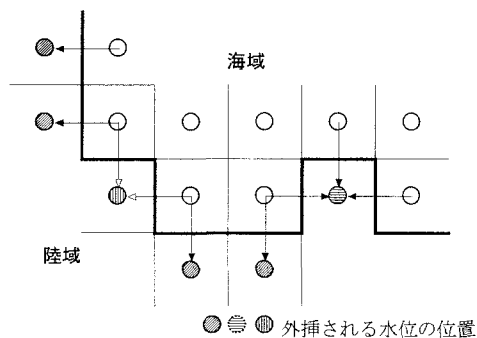


図-1 水位の外挿方法の一例

3. 閉鎖水域における計算

(1) 計算の概要

まず、図-2に示すような構造物で囲まれた人工干潟を想定したモデル領域における潮流計算を試みた。計算条件は表-1に示すとおりで、格子間隔 Δx および Δy は10m、時間間隔 Δt は0.5sとした。

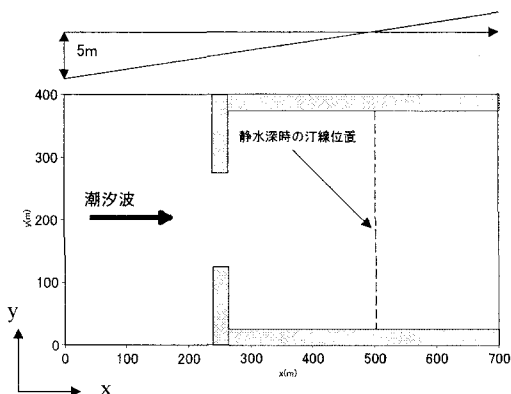


図-2 干潟モデルの計算領域

$x=0\text{m}$ における入射境界では、M2分潮に相当する12時間周期の水位変動を与えた。鉛直方向には5等分割した。

表-1 計算条件

入射境界の水位と流速			側方境界の流速	
$\zeta = a \sin(-\sigma t), \quad \partial u / \partial x = 0$			$\partial v / \partial y = 0$	
振幅 a (m)	周期 T (hours)	Δx (m)	Δy (m)	Δt (s)
1.5	12	10	10	0.5

(2) 計算結果

図-3(a)～(c)は上げ潮時における断面平均流速ベクトルの時間的变化を示したものである。図-3(d)は上げ潮最強時の $y=200\text{m}$ の位置における鉛直断面の流速分布を示したものである。図-4(a)～(d)は下げ潮時における同様の結果を示したものである。これらの図から、干出および冠水の様子が計算されていること、上げ潮時および下げ潮時において開口部において流速が速くなっていること、上げ潮時には、開口部流入による剥離による渦が計算されていることなどが確認できる。

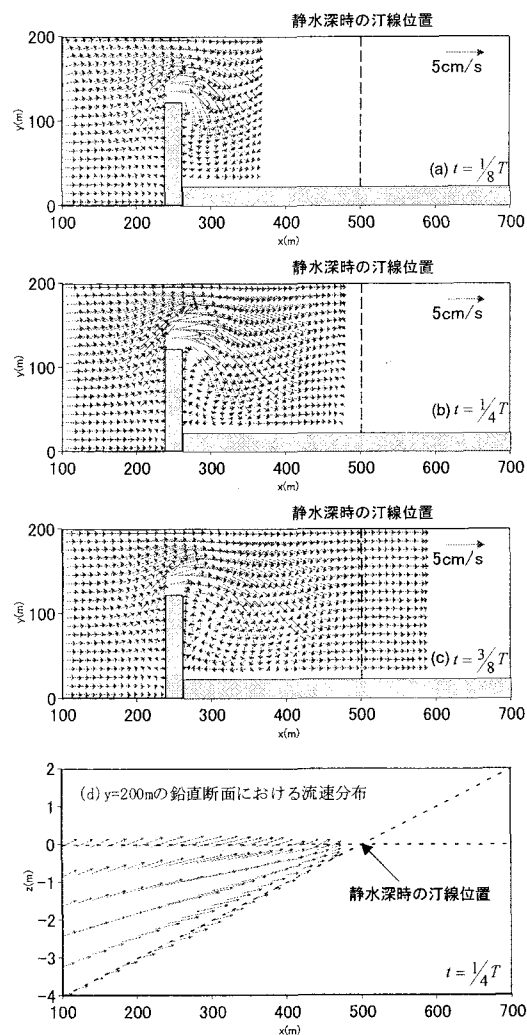


図-3 上げ潮時の流速ベクトル分布

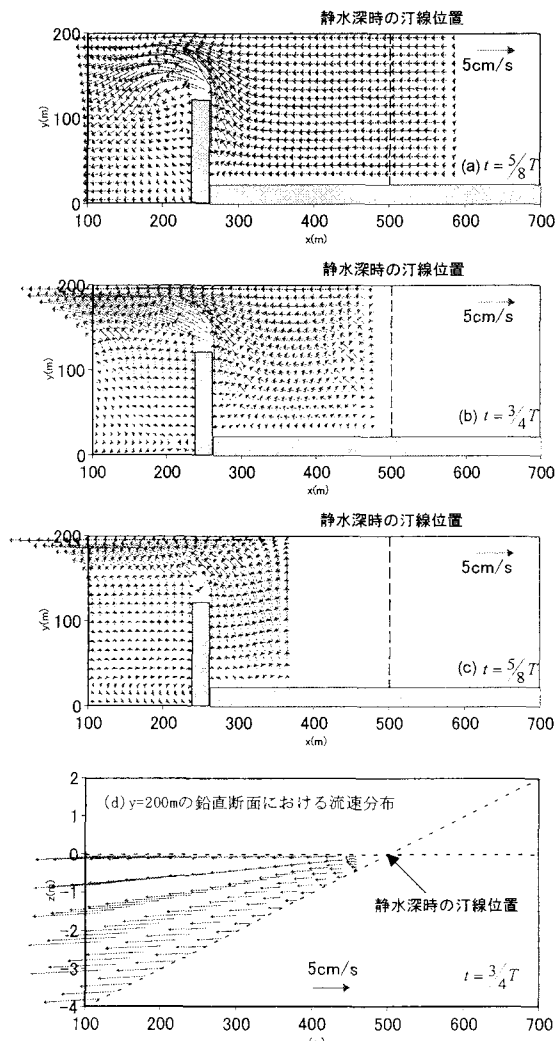


図-4 下げ潮時の流速ベクトル分布

流速分布を与える必要がある。しかしながら、現地では、詳細な水位変動や流速分布のデータの入手が困難であることがほとんどである。本研究では、西郷港の沖で観測された流速データがあり、それを参考に、境界の設定方法を試行錯誤計算によって決定した。

計算領域は、港を囲む沿岸方向に1.2km、岸沖方向に1.0kmの範囲とした。その他の計算条件は表-2に示すとおりで、格子間隔 Δx および Δy は10m、時間間隔 Δt は0.5sとした。水深方向は5等分割（節点数6）とした。表に示す水位変動式中の α は沖側境界における潮汐波の入射角、 k は波数で、長波理論を用いて算定している。 x および y は座標原点からの距離を表している。実際の計算では、D.L.値に2.74mを加算したT.P.値を初期水深、平均潮位差約3m（振幅1.5m）として、4潮汐分の計算を試みた。なお、本計算では、4潮汐分の計算で、十分定常状態になることが確認されている。以下、流速に関する計算結果の傾向のみを調べた。

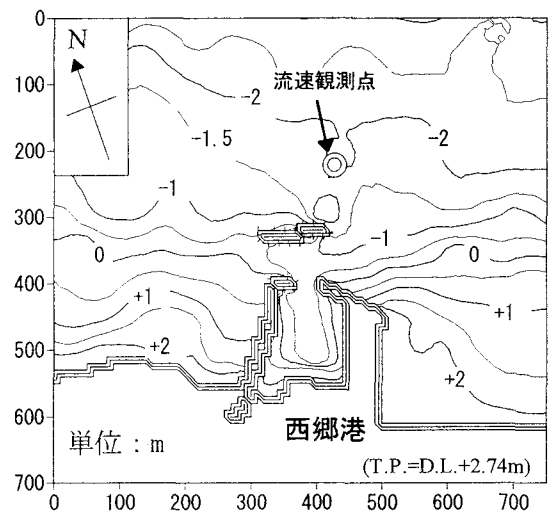


図-5 西郷港と周辺の海底地形 (D.L. 値)

4. 開境界を有する現地計算

(1) 対象とする現地の概要

長崎県諫早湾湾口の島原半島側に位置する西郷港周辺の潮流計算を試みた。図-5は西郷港の概況と周辺の海底地形を示したものであり、水深はD.L. 値で示してある。図中に示す◎は平成16年12月1日～15日までの流速観測点を示したものである。本港周辺での平均潮位差は3m程度である。上げ潮時には、図-5中、右側から左側に向かう流れ、すなわち諫早湾内に流入し、下げ潮時には諫早湾から有明海側に流出する⁽¹⁾。

(2) 計算の概要

現地において対象とする場が小領域で、周辺がすべて開境界となり、潮汐流が、沿岸方向に沿って往復流となっている場合、沖側境界において沿岸方向に水位分布、あるいは流速分布、側方においても水位の分布あるいは

表-2 計算条件

入射境界の水位と流速				側方境界	
$\zeta = a \cos \alpha \sin(kx \cos \alpha + ky \sin \alpha - \sigma t)$				$\partial v / \partial y = 0$	
$\partial u / \partial x = 0$					
振幅 a (m)	α (度)	周期 T (hours)	Δx (m)	Δy (m)	Δt (s)
1.5	45	12	10	10	0.5

(3) 計算結果および考察

図-6～9は、干潮、上げ潮最強時、満潮時および下げ潮最強時における流速ベクトルを示したものである。図-10は、図-5に示した流速観測点◎における鉛直分布の計算結果の一例である。これらの図から、干潮、満潮の様子、沖側防波堤に沿う往復流が計算されていること、さらに、流速の鉛直分布が計算されていることがわかる。

図-11は平成16年12月1日～15日まで沖側防波堤沖（図-5中に示した◎）で2時間毎に測られた流速の平均値と1潮汐分の計算結果をプロットしたものである。実測値と計算値ともに、北方と東方成分で表している。この図から、現地では、ほぼ東西方向の往復流となっており、計算結果も同様な傾向で変動しているのがわかる。つぎに、図-12は実測された流速から調和解析によって得られたM2分潮の潮流楕円と計算結果を比較したものである。この結果から、本モデルを用いて計算された潮流楕円の長軸方向は、実測値とほぼ同様な傾向にあるが、実測値より大きくなっている。特に、下げ潮時（東向き）の流速がかなり過大評価されている。この原因としては、沖側に水位分布しか与えていないことや、境界において流入出する流速分布などを考慮していないことが考えられる。

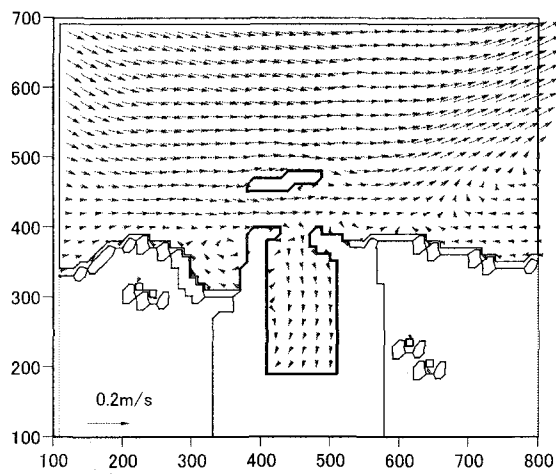


図-6 断面平均流速分布（干潮時）

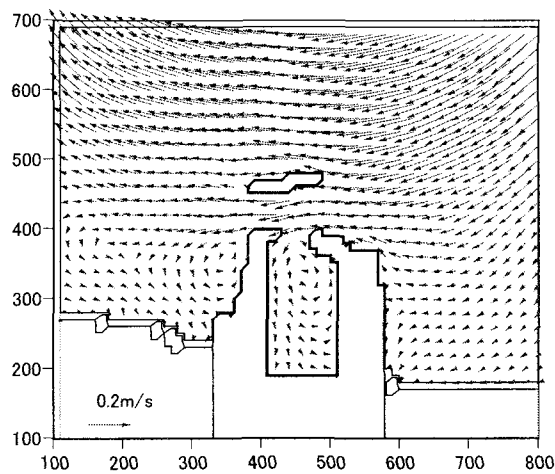


図-7 断面平均流速分布（上げ潮時）

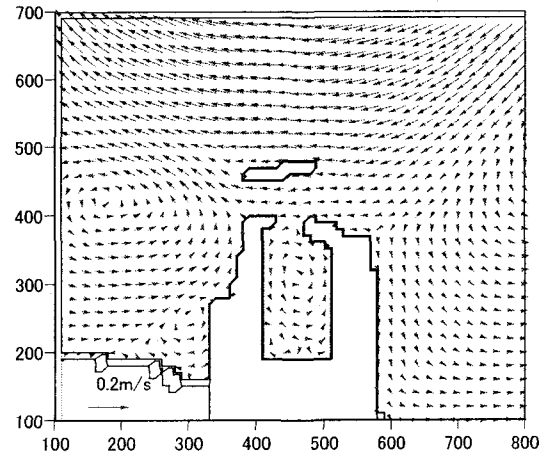


図-8 断面平均流速分布（満潮時）

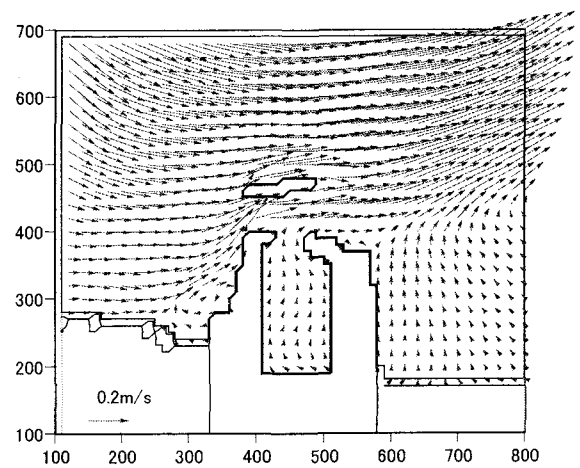


図-9 断面平均流速分布（下げ潮時）

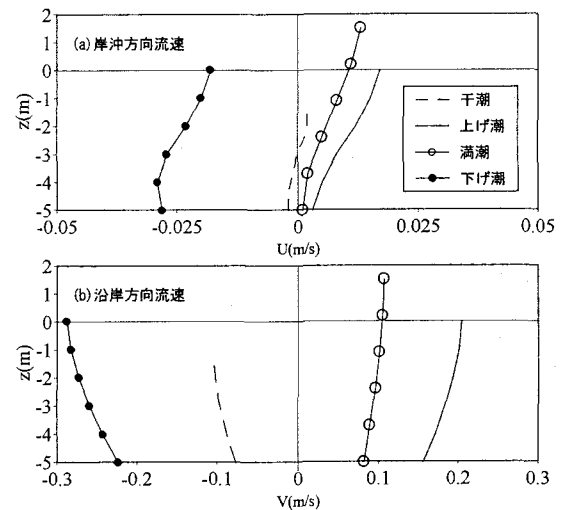


図-10 潮汐流の鉛直分布

以上の結果から、本モデルにおいて、対象とする港湾が小規模でなおかつ狭領域である場合、本手法で現地港

付近の往復流と干満の変化は再現されている。しかしながら、定量的には問題が残されている。今後、開境界において水位分布だけではなく、詳細な流速分布などの与え方なども再検討する必要がある。

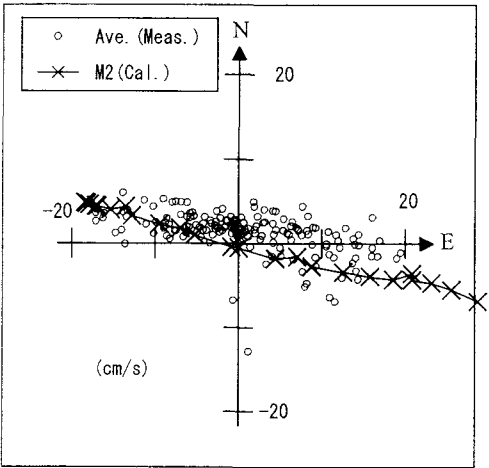


図-11 2時間毎の平均流速と計算結果との比較

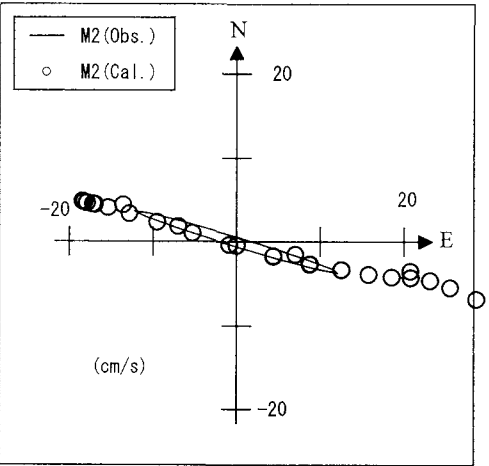


図-12 M2分潮成分の潮流楕円の比較

5. おわりに

本研究では、有限差分法と有限要素法を併用した Fractional Step法による干潟域の冠水・干出と流れの鉛直分布を考慮できる新たな3次元潮流シミュレーションモデルを提案した。閉鎖された水域（人工干潟）を想定したモデルおよび現地における潮流計算を試みた。

比較的簡単な手法であるが、計算結果から潮汐波による干潟域の干出・冠水の様子と流れの鉛直分布が計算できることがわかった。開境界を有する現地計算では、対象とする港周辺の潮汐による流況を定性的ではあるが、計算可能であることがわかった。しかしながら、現地に

おける水位変動、流速分布との比較が不十分であること、各潮汐波の分潮成分、遅角などの設定が不十分であること、沖側および側方境界における水位分布、流速分布の与え方など検討の余地が残されている。今後、境界条件の与え方を再検討するとともに、シルテーション、塩分および水温変化に伴う密度変化を考慮したモデルにも発展させるつもりである。

謝辞：本研究は、平成16年度「共同研究」（鳥取大学、八千代エンジニアリング株式会社、代表：黒岩正光）の研究成果の一部であることを付記する。また、平成16年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究C(2)、「人工生命手法による中海生態系環境の評価手法に関する研究」、代表：松原雄平）の補助を受けて行った。さらに、本研究を遂行するにあたり、長崎県振興局より西郷港における現地資料を提供して戴いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 加藤一正, 田中則男, 灘岡和夫: 干潟上の潮流計算および干潟変形予測の手法, 港湾技術研究所報告, Vol.18, No.4, pp.3-75, 1985.
- 2) 小澤宏樹, 増田光一, 大塚文和, 居駒知樹: 浅場・干潟域における波浪場を考慮した潮流シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.396-400, 2003.
- 3) 内山雄介: 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 σ 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.351-355, 2004.
- 4) Blumberg, A. F. and Mellor, G. L., : Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.4579-4593, 1983.
- 5) Koutitas, C. and B. A. O'Connor: Modelling three-dimensional wind-induced flow, *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol.106, HY11, pp.1843-1865, 1980.
- 6) 檜谷 治: 河川および浅水湖の3次元流れと平面2次元河床変動に関する研究, 京都大学博士論文, 172p., 1992.
- 7) 山下隆男, 土屋義人, 吉岡洋, 吉野敏成: 準3次元高潮数値モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.211-215, 1993.
- 8) 黒岩正光, 野田英明, 芳地康征: 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.151-155, 1997.
- 9) 柿木哲哉, 滝川 清, 山田文彦: 白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.636-640, 2000.
- 10) 経塚雄策, 川浪健治: 干潟を考慮した有明海の潮流解析, 西部造船会々報, 第86号, pp.131-146, 1993.
- 11) 小松利光, 安達貴浩, 金納 聡, 矢野真一郎, 小橋乃子, 藤田和夫: 有明海における流れと物質輸送に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.936-940, 2003.