

密度流・湧昇流の計算を目的とした 非静水圧沿岸域流動モデルの開発

DEVELOPMENT ON NON-HYDROSTATIC NUMERICAL MODEL FOR
STRATIFIED FLOW AND UPWELLING IN ESTUARY AND COASTAL AREAS

田中陽二¹・鈴木高二朗²・西村大司³・日置幸司³・中出浩靖³
Yoji TANAKA, Kojiro SUZUKI, Daiji NISHIMURA, Koji Hioki, Hiroyasu NAKADE

¹正会員 博(環境) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (同上)

³非会員 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 愛知県名古屋南区
東又兵ヱ町1丁目57-3)

Estuary area is one of the most important areas for marine ecosystems. The contamination of water becomes a serious problem in some estuary areas. Numerical simulation is useful to predict flow field of an estuary area. But the hydrostatic numerical model formerly employed is difficult to represent upwelling currents, buoyancy effects and so on.

The purpose of this study is to develop a non-hydrostatic numerical model for estuary and coastal areas by modifying STOC (Storm surge and Tsunami simulator in Coastal and Ocean areas) model. The developed model is validated by fundamental experiments. Additionally it is applied to calculate the flow in Ise Bay from January to December 2008 by inputting observation data of a ferry boat, Ise-wan Ferry. The validity of the model is confirmed by the agreement of simulated salinity and temperature with the annual observation data in Ise Bay.

Key Words : *Non-hydrostatic model, Numerical model, STOC, Estuary, Ise Bay*

1. はじめに

沿岸の海域は陸域からの栄養塩が河川から流入し、プランクトンによる一時生産が活発に行われ、魚類も豊富に存在し、生態系にとって非常に重要な海域である¹⁾。一方で、沿岸に近い陸域では都市化が進行している地域が多く、栄養塩負荷の増大によって赤潮や青潮などの発生が問題となっている。このような複雑である沿岸域の水環境を解析し、現状理解や対策の立案を行うツールとして、数値シミュレーションモデルは非常に有効である。

沿岸海域における従来の数値モデルは計算コストの関係から、静水圧近似を仮定したモデルが一般的であった^{2),3)}。しかしながら、湧昇流や河川水の流入などは、静水圧近似では再現が困難であることが指摘されている⁴⁾。近年では、沿岸海域のシミュレーションに非静水圧モデルを用いた事例も報告され始めており、その有用性が指摘されている^{5),6),7)}。

以上の背景を踏まえて、本研究では非静水圧近似を用いて、沿岸域に適した新しい三次元流動モデルを開発することを目的とした。さらに、開発された

モデルを用いて、モデルの特徴と適用性を確認するため、以下のシミュレーションを行う。(1)非静水圧モデルと静水圧モデルによる流動の違いを、種々モデルケースによって明らかにする。(2)伊勢湾の年間を通じた計算を行い、計算結果を観測値と比較することによって現地適用性を確認する。

一方、富田・柿沼⁸⁾は非静水圧および静水圧モデルによる高潮・津波数値シミュレータSTOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas)を開発した。これまで、主として津波計算で用いられており、実績を着実に積み重ねている^{9),10),11)}。そこで、本研究ではSTOCを基に、塩分水温モデル・熱収支モデル・河川流入などを組み込み、沿岸域の流動場にも適用できる汎用的な数値計算モデルを構築することとした。

新しいモデルの特徴は、非静水圧モデルであることに加えて、水面を移動境界としていること、および冠水・干出スキームを有していることである。

2. 数値モデルの概要

本研究で用いている非静水圧モデルの連続式，運動方程式をそれぞれ(1)，(2)式に示す．なお，運動方程式は非圧縮性流体，Boussinesq近似， f 平面近似を仮定し，基礎方程式は透過性構造物を考慮したポーラスモデルを導入している¹²⁾．

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma u)_i = 0 \quad (1)$$

$$\gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial(\gamma u)_i u_j}{\partial x_j} - C_i + \gamma_v \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g_i - \gamma_v \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial \gamma v_e}{\partial x}\right)_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2)$$

ここで， u_i は i 方向の流速(m/s)， γ_i は i 方向の面透過率(-)， γ_v は体積透過率(-)， ρ, ρ_0 は流体密度と基準密度(kg/m³)， g_i は重力加速度(m/s²)， $C = (-f_0 v, f_0 u, 0)$ はコリオリ項で f_0 はコリオリパラメータ(1/s)， v_e は実効渦動粘性係数(m²/s)である．

水面位置 η を xy 平面の1価関数と仮定すれば，自由表面と底面の運動学的条件式より，自由表面の式は次式で表わされる．

$$\gamma_v \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz \right) = 0 \quad (3)$$

ここで， η は水面位置(m)， h は水深(m)である．

スカラー量(塩分・水温など)の輸送方程式を次式に示す．

$$\gamma_v \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(\gamma u)_i C}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial \gamma K_{C,e}}{\partial x}\right)_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + q_c \quad (4)$$

ここで， C は水温・塩分などの水質スカラー量(unit)， $K_{C,e}$ は水質 C の実効渦動拡散係数(m²/s)， q_c は水質 C の生成項(unit/s)である．

密度は塩分と水温の関数とし，Knudsen式¹³⁾を用いた．

静水圧モデルの場合は， z 方向の運動方程式が次式のように簡略化される．

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -(\rho - \rho_0)g \quad (5)$$

したがって，圧力のPoisson方程式を解く必要がなくなり，非静水圧モデルと比べて高速に計算が可能である．

ただし，静水圧モデルでは，鉛直方向で密度逆転が起こった場合(上の水塊の方が重くなった場合)は，計算が不安定になる．そこで，密度逆転が発生した場合は，逆転した場所から上の部分について，逆転が発生しなくなるまで，強制混合させる(対流調整)．静水圧モデルと非静水圧モデルの差は以上であり，その他は同じである．

3. 静水圧モデルと非静水圧モデルの比較

3.1 種々のモデル計算

静水圧モデルは鉛直方向の運動方程式を簡略化しているため，鉛直方向の流速が水平方向の流速と同

程度の強さで現れるような流れの場合には，非静水圧モデルとの差が大きくなる．以下では，静水圧モデルでは再現が困難と考えられる2つの流れ場について，非静水圧モデル・静水圧モデルによる流動構造の違いを確認した．

なお，今回は非静水圧・静水圧のモデルによる差異を調べることが目的であるから，乱流モデルは使わず，渦動粘性係数・渦動拡散係数は一定値を与えて計算を行った．非静水圧・静水圧モデル計算の設定値(格子間隔，時間刻みなど)は同じである．

(1) 実験ケース1：密度増流

このテストケースは温排水の流入を想定したシミュレーションである．図-1のように，幅60m，高さ10mの2次元矩形水路を考え，一方を閉境界，もう一方を開境界とした．水路内の水は塩分0，水温15℃の初期値を与えた．水平方向の格子間隔は0.5mとし，鉛直方向の格子間隔は水深10～0.5mまでは0.5m間隔でそれ以浅は0.1m間隔とした．閉境界の水深9.5～9m(すなわち底層から1つ上のメッシュ)から流速0.2m/sで，塩分0，水温20℃の水塊を流入させた．時間刻みは流速に応じた可変刻み(0.001～0.2s)とした．

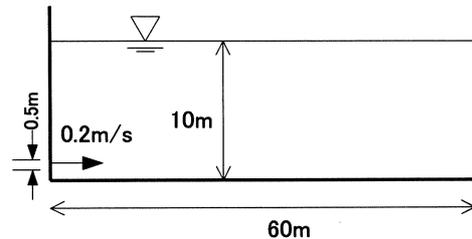


図-1 密度増流の計算条件

非静水圧・静水圧モデルについて，計算開始から600sと1800sの計算結果を図-2，3に示す．非静水圧モデルの場合，密度増流は20mほど噴出したところで，浮力によりキノコ雲状を呈して上昇し始めた(図-2(a))．表層まで到達すると，S字状の流れとなって開境界へ流出した(図-2(b))．なお，この計算では，移流項の差分方法は1次精度風上差分と2次精度中心差分との平均で行った．したがって，初期水温の15℃よりも低くなるアンダーシュートが発生している箇所がある．ただし，周囲との温度差は小さくなっていることから，それが流れに大きな影響を及ぼしてはいないと考えられる．

一方，静水圧モデルは対流調整を行うため，噴出直後から全層で混合する．したがって，図-3のように，表層を伝って流出する流れとなった．このように，密度逆転が発生するような流れ場では，静水圧モデルは非静水圧モデルと比べて定性的にも大きく異なった流れになってしまう．

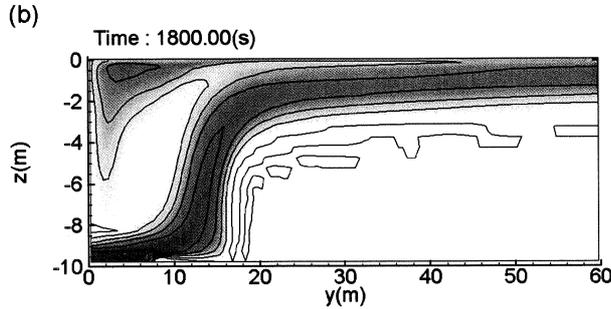
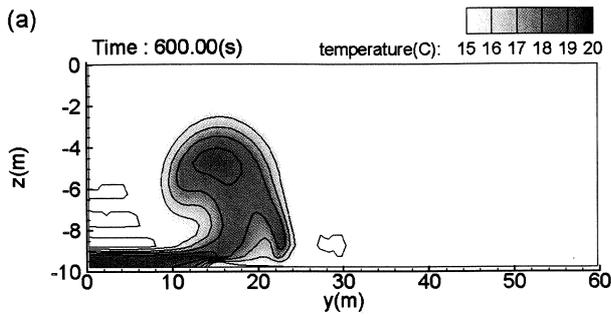


図-2 実験ケース1における水温分布の計算結果（非静水圧モデル）；(a)10分後，(b)30分後

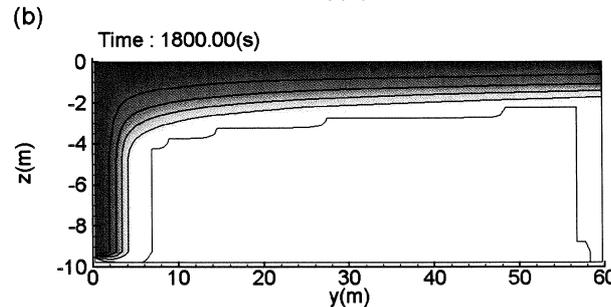
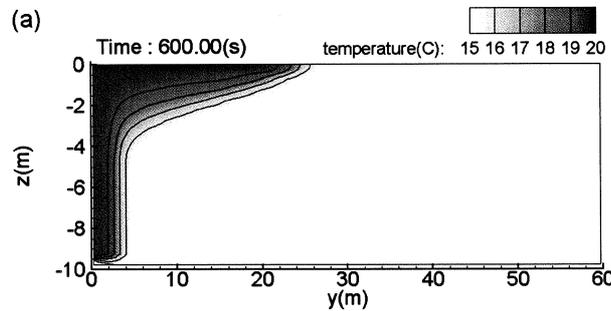


図-3 実験ケース1における水温分布の計算結果（静水圧モデル）；(a)10分後，(b)30分後

(2) 実験ケース2：密度界面の湧昇

このテストケースは青潮の湧昇を想定したシミュレーションである。図-4のように、幅10km、高さ10mの2次元矩形水路を考え、両端を閉境界とした。水深5mで密度躍層を作り、上層水は塩分20、水温20°C ($\sigma_t=13.4$)、下層水は塩分26.614、水温20°C ($\sigma_t=18.4$)の初期値を与えた。水平方向の格子間隔は200mとし、鉛直方向の格子間隔は0.25mとした。風速は10m/sの一定値を与えた。時間刻みは1sとした。

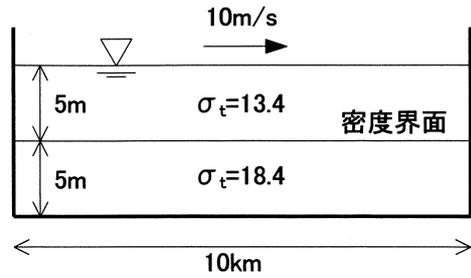


図-4 密度界面湧昇の計算条件

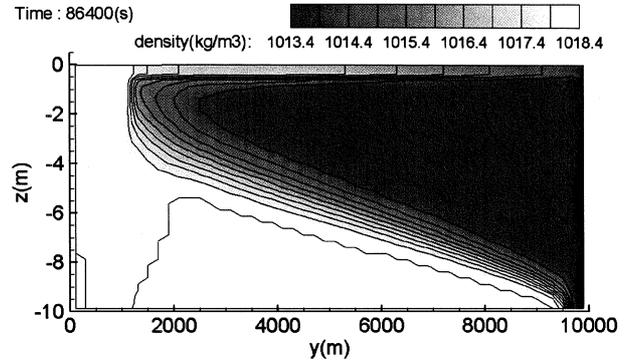


図-5 実験ケース2における密度分布の計算結果（非静水圧モデル，1日後）

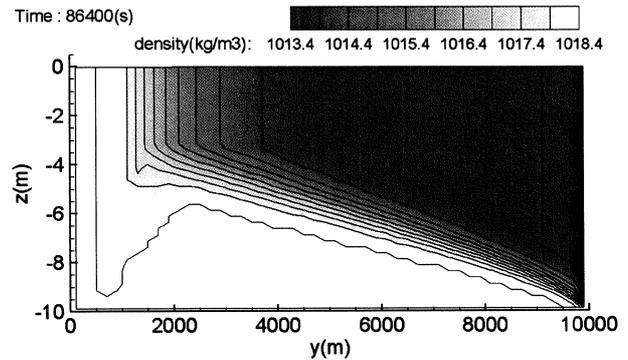


図-6 実験ケース2における密度分布の計算結果（静水圧モデル，1日後）

非静水圧・静水圧モデルについて、計算開始から1日後の計算結果を図-5、6に示す。非静水圧モデルは密度界面が湧昇したあと、底層水塊が表層を流れていく流動パターンとなった。静水圧モデルの場合は、底層水塊が表層まで湧昇したときに密度逆転が生じ、対流調整が働くため、表層付近は鉛直に一様な水塊が形成された。

3.2 計算結果の考察

2つのモデルケースの比較より、湧昇や密度逆転が発生する流れ場では、定性的にも大きく異なった流れとなることが分かった。両実験ケースはともに静水圧近似に起因する流れよりも対流調整の影響が大きい流れ場となっている。ただし、対流調整を工

夫することで、密度増流や密度逆転の再現を試みたとしても、静水圧モデルは w の移流項などを無視しているため、定性的な流れのパターンは一致しても定量的には異なった流れになると考えられる。

したがって、青潮などの密度界面の湧昇現象等を詳しくシミュレーションする場合には、静水圧モデルよりも非静水圧モデルを使用する必要がある。また、密度流の貫入現象を再現する際にも非静水圧モデルの有効性が中山・岡田¹⁴⁾によって指摘されている。

ただし、非静水圧モデルの欠点は計算速度が遅くなることである。今回のケースでは、非静水圧モデルは静水圧モデルと比べておよそ2~7倍の計算時間を要していた。非静水圧モデルでは圧力のPoisson方程式を解くことに計算時間が多くかかってしまうためである。したがって、長期の計算を行う場合には、静水圧モデルの方が計算コストの面で有利である。

4. 伊勢湾への適用

本研究で開発されたモデルの現地適用例として、伊勢湾・三河湾（以下、本研究では両者を合わせて「伊勢湾」と呼ぶ）の計算を行った。計算対象の期間は2008年1月1日から12月1日までとした。

4.1 計算データの作成

今回の計算では伊勢湾フェリーの観測値を境界条件として与えることを考え、伊良湖水道を開境界に設定してメッシュを作成した（図-7）。伊勢湾フェリーは鳥羽-伊良湖間で1日8~9便が運航されている（フェリー観測の詳細は鈴木他¹⁵⁾を参照）。

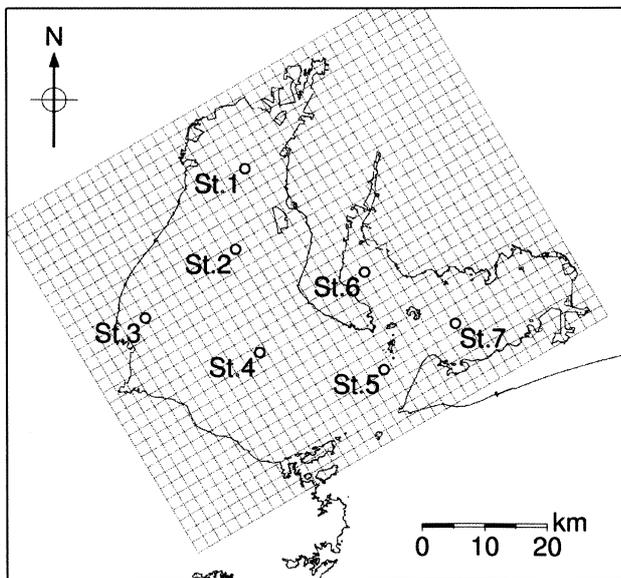


図-7 伊勢湾の計算メッシュと白龍の観測地点

水平方向の格子間隔は2km正方格子とし、40×32メッシュとした。鉛直方向のメッシュは20層に区切った。メッシュ区切り位置はそれぞれ、-80, -60, -40, -30, -25, -21, -19, -17, -15, -13, -11, -9, -7, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 5である（単位m, 鉛直上向きを正, 平均水面は0m）。時間刻みは10sとした。

気圧・日射量・降雨量は名古屋気象台の観測値を用い、風向風速は中部国際空港のデータを用いた¹⁶⁾。大気放射量は二宮ほか¹⁷⁾の方法を用いて名古屋気象台のデータから推測した。

伊勢湾に流入する一級河川は10河川であり、一級河川の流量と水位は国土交通省の水文水質データベース¹⁸⁾で公開されている。ただし、水位はリアルタイムで更新されているが、流量は2~3年前までしか公開されていない。そこで、田中ほか¹⁹⁾の方法と同様に、2002年から2006年の水位・流量データから、独自に各流量観測所における水位-流量(H-Q)曲線を作成し、それを基に2008年の流量データを作成した。水温はテレメータ観測所があればその値を用いて、データがない河川ではそれ以外の河川水温の平均値を用いた。

外洋との開境界では主要4分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) の潮汐を与えた。調和定数は、伊良湖の観測値²⁰⁾を基に、計算結果と観測値を比較して微調整を行った。

開境界の塩分・水温条件には伊勢湾フェリーのデータ（1航海の平均値）を用いた。ただし、フェリーの観測は2008年3月からであり、途中で長期の運休もあるため、データの欠測が多かった。したがって、1~3月のデータについて、水温は鳥羽の2003~2004年のデータ²¹⁾を1年周期の余弦関数で補間した値を用い、塩分は2/11まで33の一定値とした。データの欠測は、観測値をスプライン補間した。

一方、伊勢湾フェリーで観測される値は表層のものであるから、中・底層のデータも必要である。しかし、観測値がないので、表層~5mに伊勢湾フェリーのデータを与え、それ以下の水深で塩分一定値・水温勾配ゼロ条件を与えた。

4.2 計算結果と考察

(1) 潮汐の比較

既往の観測結果がある15地点（名古屋，四日市，鬼崎，師崎，武豊，形原，蒲郡，佐久島，三河，豊橋，立馬崎，福江，伊良湖，神島，鳥羽）について、潮汐の調和定数^{20), 22)}を比較した。潮汐の振幅値・位相の比較を図-8に示す。振幅のRMSE (Root Mean Square Errors) は1.88cm, 位相のRMSEは5.24°であり、振幅・位相ともに観測値とよく適合していた。

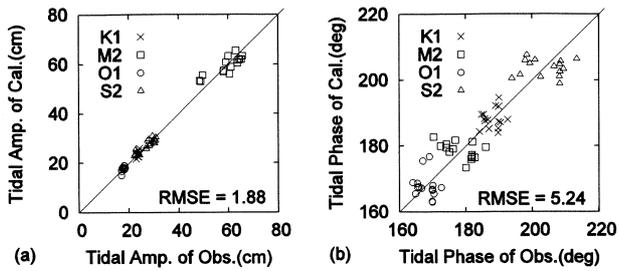


図-8 観測値と計算結果の潮汐調和定数の比較；(a)振幅，(b)位相

(2) 塩分・水温の比較

塩分・水温の観測値として、名古屋港湾空港技術調査事務所が行っている、ごみ回収兼油回収船「白龍」による水質調査の結果²³⁾を用いた（白龍の調査地点は図-7を参照）。

観測点数が比較的多いSt.3について、表層・中層・底層の水温・塩分時系列変化を、図-9に示す。加えて、St.2における7/28の水質の鉛直プロファイルを図-10に示す。

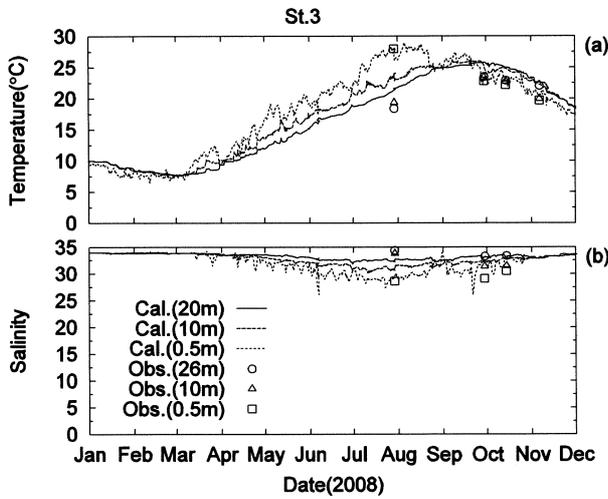


図-9 St.3における水温・塩分の比較

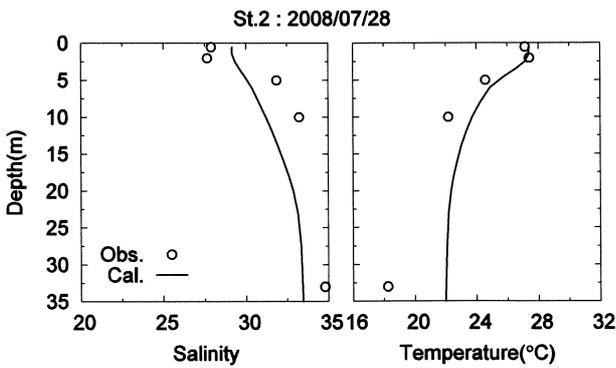


図-10 St.2における水温・塩分の比較（2008/7/28）

伊勢湾における水温の季節変化は、3月頃から表層水温が底層水温より高くなり始め、8月に最大と

なり、9月頃に表層～底層までほぼ一様となり、10月頃から表層水温が底層水温よりも低くなることが知られている²⁴⁾。

水温の計算結果は、3月初旬から表層水温が中・底層よりも高くなり、8月中旬にピークを迎え、8月下旬に水温が一様となり、9月下旬から表層水温が底層よりも低くなる結果となった（図-9(a)）。これは上記の水温季節変化と定性的に一致している。しかし、底層水温の計算値は観測値よりSt.3で2℃程度、St.2で4℃程度高くなっていた（図-10）。既往の観測例²⁴⁾によると、伊勢湾奥での底層水温のピークは9月頃であるが、計算結果のSt.3における底層水温のピークは9/30～10/1であり、位相が遅れていた。これは、開境界の底層水温の境界条件を勾配ゼロ条件であったため、外洋からの低温水塊の流入がなかったことによるものと考えられる。今後、開境界の底層水温のデータを用いることにより、より精度が向上することが期待される。

表層塩分は河川の流入量に対応して低下しており、特に湾奥部のSt.1では河川の影響が明瞭に表れていた（図-11）。このような河川との対応は定性的に見て正しい挙動をしている。

7月の中・底層部において、計算値の塩分がSt.2およびSt.3で1～2程度低くなっており、St.2の観測値の塩分は34.8と非常に高い塩分が観測されていた（図-10）。筑ほか²⁵⁾は夏期に低水温・高塩分の外海水が間欠的に伊勢湾の底層へ侵入することを観測している。内湾では外海水の侵入によってのみ塩分が高くなるので、2008年の夏期においても外海水の侵入によって底層で高塩分化したものと考えられる。

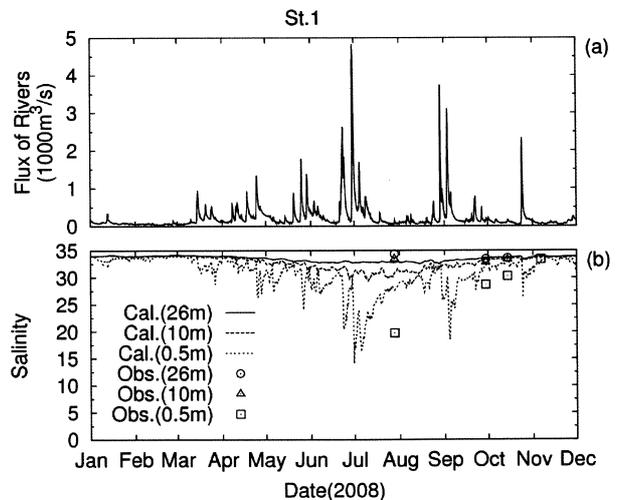


図-11 河川流量とSt.1における塩分の比較；(a)木曾川・揖斐側・長良川・庄内川・鈴鹿川の合計流量，(b)St.1における塩分の比較

冬季においては、表層の塩分計算値は観測値よりもやや高くなっているものの、中・底層の塩分計算結果と観測値はよく一致していた（図-9, 11）。

(3) 計算時間の検討

今回のシミュレーションに要した計算時間は約15時間であった。なお、計算を行ったPCのCPUはIntel社製Core 2 Duo E8500 (3.16GHz)である(並列計算なし)。計算期間は1/1~12/1の335日間であるから、約540倍の計算速度(=計算期間/要計算時間)であった。すなわち、20年間の計算を行ったとしても、14日程度で計算が終了する。

これは実務的な観点から見て現実的な計算速度であり、数年~数十年という長期計算も安価なPCで行うことができる。今回のシミュレーションによって、本モデルが実用的な計算速度を有していることが確認された。

5. おわりに

沿岸域を対象として、密度流・湧昇流の計算を目的とした非静水圧流動モデルを新たに開発した。本モデルの特徴は、非静水圧モデルであることに加えて、水面を移動境界としていることや、冠水・干出スキームを有していることである。開発されたモデルを使って、モデル計算と現地への適用シミュレーションを行った。主要な結論を以下に示す。

- 1) 湧昇や密度逆転が発生する流れ場では、静水圧モデルは非静水圧モデルと比べて定性的にも異なった流れ場となる。
- 2) 伊勢湾での年間計算を行った結果、塩分・水温の再現性を保ちつつ、現実的な計算速度を有していることを確認した。

今後の課題として、現地への適用実績を増やすことや、生態系モデルの導入などが挙げられる。

謝辞: 伊勢湾フェリー株式会社の後藤様、三浦様にはフェリー観測にご協力頂きました。みずほ情報総研の秋山様、荒木様にはプログラム開発にご協力頂きました。港湾空港技術研究所の中村研究主監には有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Nixon, S. W.: Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.33, pp.1005-1025, 1988.
- 2) 佐々木淳, 磯部雅彦, 渡辺晃, 五明美智男: 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1111-1115, 1996.
- 3) 村上智一, 安田孝志, 吉野純: 気象モデルおよび多重 σ 座標系海洋モデルを用いた台風0416号による広域高潮の再現, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.4, pp.282-290, 2007.
- 4) 木下嗣基: 静水圧モデルとFull-3Dの比較, MECモデルワークショップ(第1回), 日本造船学会海洋環境研究委員会, pp.17-23, 2000.
- 5) 岡田知也, 中山恵介, 日比野忠史, 細川恭史: 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内環境に及ぼす

- 影響の定量的評価, 港湾空港技術研究所報告, Vol.39, No.2, pp.73-98, 2000.
- 6) 殿城賢三, 佐藤徹: 五ヶ所湾の海域浄化装置の効果に関する数値シミュレーション, MECモデルワークショップ(第2回), 日本造船学会海洋環境研究委員会, pp.27-34, 2001.
 - 7) 大見智亮, 内藤大輔, 酒井亨, 山口将人, 寺澤和彦, 田口浩一, 中田喜三郎, 中村由行: 浚渫窪地における酸素環境シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1026-1030, 2008.
 - 8) 富田孝史, 柿沼太郎: 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44, No.2, pp.83-98, 2005.
 - 9) 柿沼太郎, 富田孝史, 秋山実: 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.286-290, 2003.
 - 10) 富田孝史, 柿沼太郎, 島田昭男: 3次元流動モデルによる津波防波堤の防護効果に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.296-300, 2004.
 - 11) 富田孝史, 本多和彦: 臨海部における津波解析への3次元非静水圧流動モデルの適用, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.231-235, 2008.
 - 12) 榊山勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.554-558, 1990.
 - 13) 玉井信行: 密度流の水理, 技報堂出版, p.5, 1980.
 - 14) 中山恵介, 岡田知也: 湾口部にシルをもつ湾における底層貫入とDO濃度に関する観測と数値実験, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.817-822, 2006.
 - 15) 鈴木高二朗, 田中陽二, 西村大司, 日置幸司, 中出浩靖, 中村由行: 伊勢湾口における流況・水質のフェリーによる連続観測, 海岸工学論文集, 第56巻, 投稿中, 2009.
 - 16) 気象庁: 気象庁HP過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, web.
 - 17) 二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽: AMeDASのデータを用いた時刻別大気放射量の推定法, 空気調和・衛生工学論文集, No.60, pp.133-144, 1996.
 - 18) 国土交通省河川局: 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, web.
 - 19) 田中陽二, 永井紀彦, 鈴木高二朗, 清水勝義: 海象計による流況観測データを用いた東京湾第二海堡における残差流の変動特性に関する解析, 港湾空港技術研究所資料, No.1168, 42p., 2007.
 - 20) 海上保安庁水路部: 日本沿岸潮汐調和定数表, 日本水路協会, 267p., 1993.
 - 21) 海上保安庁海洋情報部: 日本海洋データセンター, http://www.jodc.go.jp/index_j.html, web.
 - 22) 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所: 三河港湾事務所, <http://www.mikawa.pa.cbr.mlit.go.jp/index.html>, web.
 - 23) 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所: 伊勢湾環境データベース, <http://www.isewan-db.go.jp/index.asp>, web.
 - 24) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会沿岸海洋誌編集委員会編: 日本全国沿岸海洋誌, 1106p., 1985.
 - 25) 笈茂穂, 藤原建紀, 杉山陽一: 伊勢湾底層への間欠的な外海水の侵入とそれに伴う湧昇, 海の研究, Vol.13, No.6, pp.537-551, 2004.