

岡山県水島港周辺海域における 流況・SS分布予測モデルの開発

DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODEL FORECASTS OF FLOW AND
SUSPENDED SOLIDS DISTRIBUTIONS AROUND MIZUSHIMA PORT IN THE
SETO INLAND SEA

白木喜章¹・高尾敏幸²・柴木秀之³・山下義昭⁴・田中丈裕⁵
Yoshiaki SHIRAKI, Toshiyuki TAKAO, Hidenori SHIBAKI, Yoshiaki Yamashita
and Takehiro TANAKA

¹理博 株式会社 エコー 環境・計画部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²正会員 工修 株式会社 エコー 環境・計画部

³正会員 工博 株式会社 エコー 防災・水工部

⁴岡山県 土木部港湾課 (〒700-8570 岡山市内山下2-4-6)

⁵農修 岡山県 農林水産部水産課

Numerical simulation of the behavior of oceanic properties is necessary for management of coastal environments. A numerical model is developed to forecast flow pattern and suspended solid (SS) distribution around Mizushima Port. Observations of flow fields and SS characteristics were undertaken in a previous study during low-temperature, rainy, and high-temperature seasons. This paper shows that the model simulates the observed flow pattern and SS distribution around Mizushima Port with high accuracy in the three seasons.

Key Words : Numerical simulation, suspended solid, sediment resuspension, Seto Inland Sea

1. はじめに

海洋における懸濁粒子 (Suspended Solid : SS) は、その海域の生態系に多大な影響を与える。たとえば、高橋ら¹⁾は瀬戸内海における海砂利採取周辺海域の藻場の衰退はSS濃度上昇による有光層の減衰と関係があることを明らかにしている。そのため、海域のSSの輸送・分布特性を把握することは、沿岸域の環境整備を行う上で非常に重要な要素となる。

岡山県水島港周辺海域 (図-1) は、流況とSS濃度が時空間的に密に観測されており²⁾、SSの輸送・分布特性を明らかにするうえで豊富な観測データがある。本研究は、観測結果から確認できる水島港周辺海域の流況とSS分布の時空間変動を再現するとともに、任意時刻の流況とSS分布を予測できる数値モデルを構築することを目的としている。

2. 観測データ

予測モデルの再現性の検証に使用する観測データは2006年の低温季 (3月1日～3月20日)、増水季 (6

月29日～7月18日)、高温季 (8月21日～9月7日) の3季に観測されたものである²⁾。測点を図-1に示す。

図-1中の全ての測点において、3月3日、7月3日、9月4日の3日間、水温・塩分、濁度、SSの広域鉛直分布観測を行っている。さらに、Sta. a, bおよびcの3点では、流速、水温・塩分、濁度の定点15昼夜連続観測を行っている。流速については、音響ドップラー流速分布計 (Acoustic Doppler Current Profiler : ADCP) を用いて鉛直層厚25cm、10分間隔で計測し、水温・塩分、濁度はそれぞれ水温・電気伝導度計、濁度計を上層 (海面下2m) と下層 (海底上2m) に係留し、10分間隔で計測している。

3. 数値モデル

(1) 数値モデルの基本設定

流況とSSの数値計算はそれぞれ別途行う。手順として、まず、連続の式、3次元運動方程式および水温・塩分の移流拡散方程式からなる流動モデルで流況を再現し、それによって得られる流速の結果を用いて、濁りモデルによりSSの数値計算を行う。

図-2に数値モデルの計算領域と水深分布を示す。計算領域は水島港周辺海域を十分に包括する領域としており、図中の破線を東西の開境界としている。また、水島港周辺を100m格子間隔の高解像度小領域とし、その外側の500m格子間隔の大領域とネスティングによって接続している。なお、計算の安定性を考慮し水深データは適度のスムージング処理を行っている。

鉛直方向にはシグマ座標系を用いており、等間隔に20層の分割をしている。シグマ座標系は海底勾配に沿って層厚が変化するため、全領域で同じ数の層分割ができる。よって、水深の浅い領域において層分割数が少なくなるレベル座標系よりも鉛直方向の精度が高くなることが期待できる。

以下に流動モデルと濁りモデルの概要を示す。

(2) 流動モデル

a) 境界条件および初期条件

流況計算では、潮流と平均流（潮汐残差流，吹送流，密度流，通過流）を考慮している。東西の開境界では，対象海域で卓越する主要4分潮（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）の調和定数（海上保安庁）をもとに推算した水位変動を与える。用いる調和定数は三島，福山，高松，宇野の値である（図-1参照）。さらに，瀬戸内海で比較的強いとされている通過流³⁾を考慮するために，平均水位変動も東西の開境界に与えている。与える平均水位は，松山と高松（図-1参照）の毎時潮位データから48時間タイドキラーフィルター⁴⁾によって潮汐成分を除去した水位に係数として0.3を乗じたものとしている。この係数は，松山と高松の平均水位勾配が線形であることを仮定し，松山，高松間の距離が計算領域東西間の距離のおよそ3倍であることから0.3としている。また，開境界の水温・塩分の境界条件として，岡山県水産試験場が毎月1回実施している浅海定線調査データを用いる。各月の観測値の間は時間的に線形補間して設定している。

海面境界では，岡山気象台で対象期間に観測された風向・風速データ等と高松気象台で観測された日射量を用いた海面応力と海面熱収支を考慮している。

小領域の北部中央に位置する高梁川から河川流入を与える。河川流量は国土交通省が観測している日羽観測所の河川水位よりHQ曲線から推算し，河川水の水温・塩分は観測値をもとに設定している。

水温・塩分の初期鉛直分布は観測値をもとに設定し，水平方向に一様とする。計算期間はSta. a, bおよびcの観測期間と同じ15昼夜とする。

b) 渦動粘性係数および渦拡散係数

水平渦動粘性係数および水平渦拡散係数は式(1)で表されるスマゴリンスキー型を用いる。

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

ここで， x , y はそれぞれ東方，北方を正とする座標

で， Δx , Δy は x , y 方向の水平格子間隔， u , v は x , y 方向の流速である。また，係数 C は再現性を考慮して2.0とする。

鉛直渦動粘性係数および鉛直渦拡散係数は式(2)で表わされるMunk and Anderson⁵⁾によるリチャードソン数依存型を用いる。

$$\text{viscosity} : A_{z0} (1 + \beta R_i)^\alpha, (\alpha = -0.5, \beta = 10.0)$$

$$\text{diffusivity} : K_{z0} (1 + \beta R_i)^\alpha, (\alpha = -1.5, \beta = 3.33) \quad (2)$$

ここで， A_{z0} , K_{z0} は中立成層時の係数で 10^{-4} (m^2/sec) である。また，リチャードソン数 R_i は以下の式で表わされる。

$$R_i = \frac{-g \partial \rho / \partial z}{\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]}$$

g は重力加速度， ρ は海水密度， z は鉛直上向きを正とする座標である。

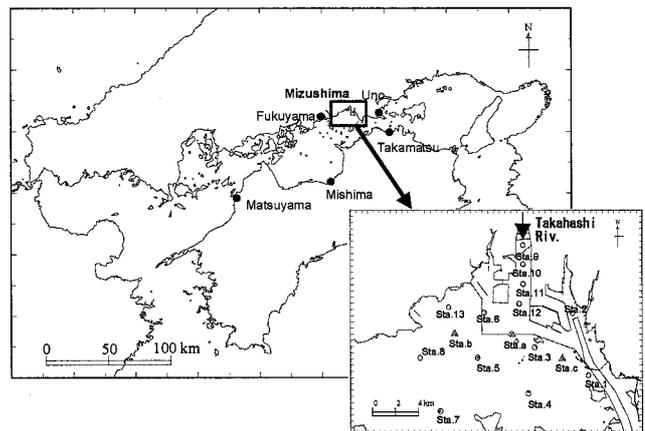


図-1 対象海域と観測点

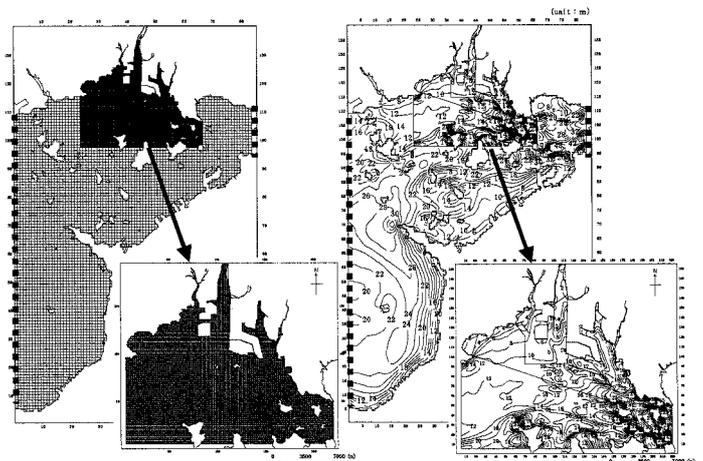


図-2 計算領域 (左) と水深分布図 (右)

(3) 濁りモデル

a) 境界条件

東西の開境界からのSS濃度の流入は一定値とする。海底面の境界条件として，SSの海底面への沈降量 D_m ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}$) と海底面からの巻き上げ量

Q_m (kg/m²/sec)がある。海底面への沈降量は式(3)によって表わされる。

$$D_m = w_s C_{bm} \quad (3)$$

w_s はSSの沈降速度、 C_{bm} は底層のSS濃度である。海底面からの巻き上げ量 Q_m は式(4)によって表わされる。

$$Q_m = M \left(\frac{\tau_t}{\tau_e} - 1 \right) * M_R / 100 \quad (\tau_t > \tau_e) \quad (4a)$$

$$Q_m = 0 \quad (\tau_t \leq \tau_e) \quad (4b)$$

ここで、 M は巻き上げ定数(kg/m²/sec)、 M_R は含泥率(%), τ_t は流動モデルの結果によって算出される海底面せん断応力(N/m²), τ_e は巻き上げに関する海底面限界せん断応力(N/m²)である。海底面の堆積粒子は、海底直上の流速が限界値よりも大きくなると巻き上がる。その時の巻き上がり量は式(4a)で表わされる。流速が限界値以下の時は式(4b)となり、巻き上がりは起こらない。

濁りモデルの計算を行ううえで、以上で示した w_s , M , M_R , τ_e の値を設定する必要がある。その値については次節において記述する。

4. 再現結果

(1) 流動モデルの再現結果

a) 潮流楕円

図-3に低温季のSta. a, bおよびcの上層における4分潮の中で最も支配的なM₂分潮の潮流楕円の計算値と観測値との比較結果を示す。Sta. aおよびbでは観測値と計算値はほぼ一致している。潮流が強く、比較的複雑な地形に位置するSta. cではやや観測値とのずれがあるものの長軸の向きや大きさ、位相ともに再現性は高い。潮流は季節変動が小さく、順圧的な流れであるので、ここでは示していない他の2季および他の層についても再現性は高い。

b) 流速時系列

図-4に低温季のSta. a, bおよびcの下層における流速時系列比較結果を示す。下層の流速は式(4)の巻き上げ量を計算するうえで重要となる。観測値、計算値ともに北方分速よりも東方分速の方が卓越しているため東方分速のみを示す。

Sta. aおよびcにおいて、潮流の強い時期に観測値よりも計算値の方が西向き流れが弱くなっている。この原因のひとつに地形の影響が考えられ、計算領域の東部からSta. c, Sta. aにかけての西向き流れが弱くなっている可能性がある。本研究で用いている水深データは海図をもとに現場の水深を忠実に再現したものであるが、さらに再現性を高めるために水深データの扱いを今後検討していく必要がある。しかしながら、全体的に位相、振幅ともに再現性は高く、濁りモデルに十分に適用できる結果である。

c) 25時間移動平均流

25時間移動平均して潮流成分を除去した低温季の平均流の比較結果を図-5に示す。ここでは、比較的再現性の高いSta. bおよびcの下層、また、再現性の低いSta. aの下層について示している。

Sta. bおよびcの計算値は流速、変動傾向ともに観測値とほぼ一致している。Sta. aにおける観測値との不一致は、前述した西向き流れが弱いことから生じており、地形データの扱いによって改善されることが期待できる。

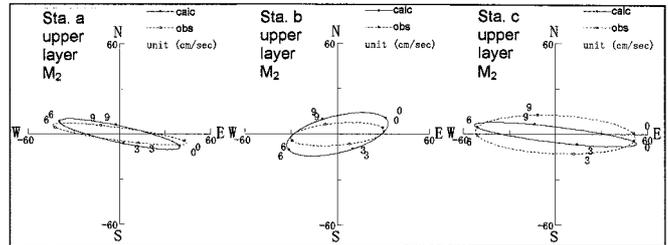


図-3 Sta. a, b, cの上層におけるM₂分潮の低温季潮流楕円の比較結果(実線:計算値, 破線:観測値)

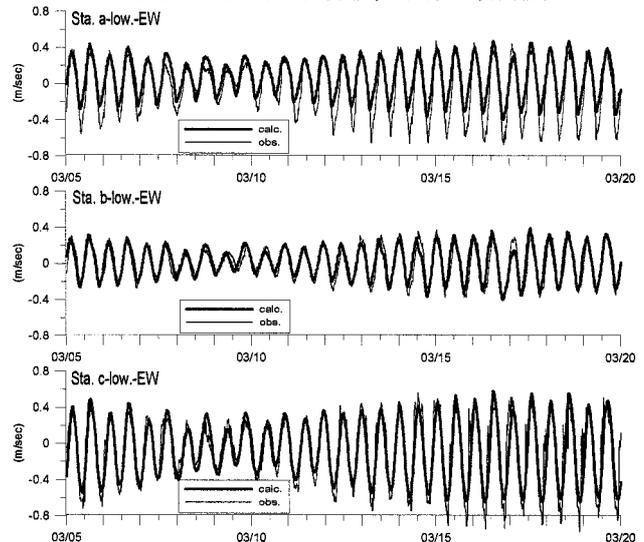


図-4 Sta. a, b, cの下層における低温季の流速の東方分速の比較結果(太線:計算値, 細線:観測値)

d) 水温の水平・鉛直分布

水温の再現性については、3季のうち最も水温の高くなる高温季について示す。

図-6は海面下0.5mの水温の計算値と広域鉛直分布観測データを空間補間して得られる水温水平分布との比較結果である。水温の値はほぼ一致している。沖側での分布に差異があるのは、水温の東西の境界条件を毎月1回の観測データから設定しているためであると考えられる。数日から数週間の時間スケールの境界からの熱輸送の変動を再現するには、境界における、より時間的に密な観測が必要となる。

図-7にSta. 12(河口部), Sta. 13(領域西部), Sta. c(領域東部)の水温の鉛直分布の比較結果を示す。計算値と観測値はほぼ一致している。

e) 塩分の水平・鉛直分布

塩分の再現性は、河川流量が多く、塩分変動の大きい増水季について示す。

図-8は海面下0.5mにおける塩分の水平分布の比較結果である。計算値は観測値に比べて、河口部南東方向への低塩分水の張り出しが弱い。塩分の値や分布傾向はほぼ一致している。

図-9にSta. 12, 13およびcにおける塩分の鉛直分布比較結果を示す。河口部に位置するSta. 12の表層の薄い低塩分層が計算値の方が厚いものの、分布傾向はほぼ再現されている。

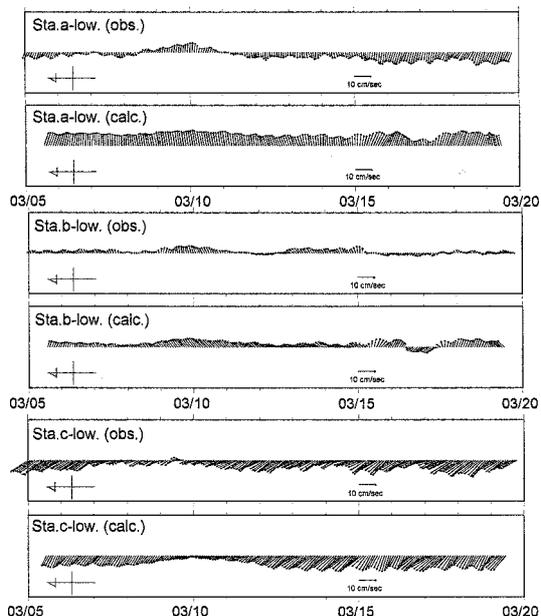


図-5 Sta. a, b, cの下層における低温季25時間移動平均流の比較結果（紙面左方向を北向きとする）

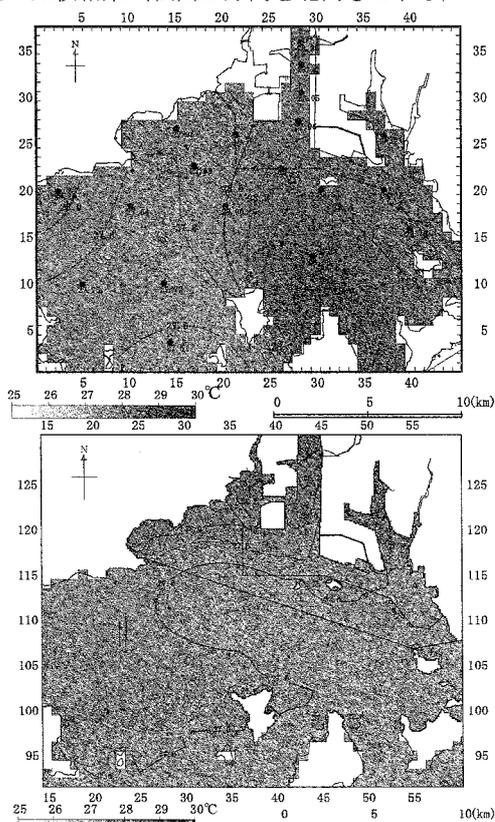


図-6 高温季水温水平分布の観測値（上段）と計算値（下段）の比較結果（上段図中の黒丸と数値は測点と観測値を示す）

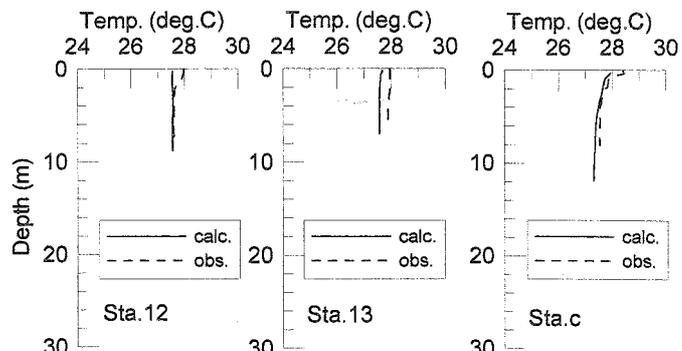


図-7 Sta. 12, 13, cにおける高温季水温鉛直分布の比較結果（実線：計算値、破線：観測値）

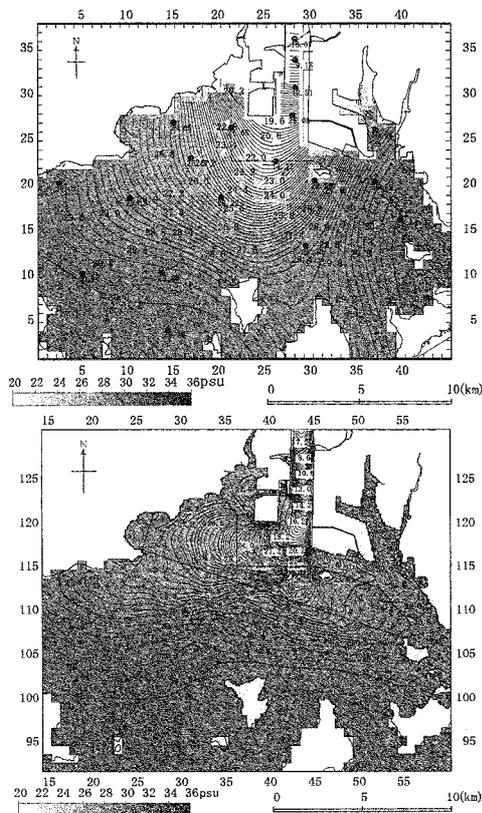


図-8 増水季塩分水平分布の観測値（上段）と計算値（下段）の比較結果（上段図中の黒丸と数値は測点と観測値を示す）

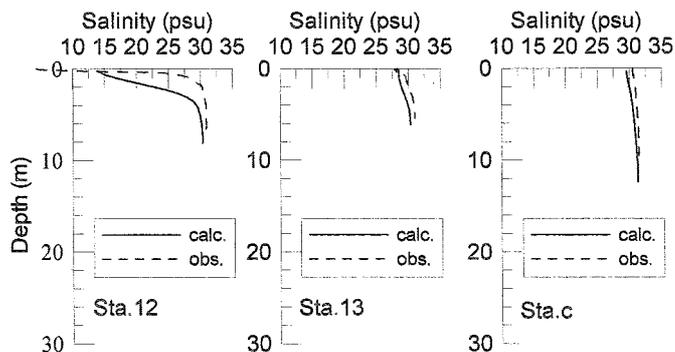


図-9 Sta. 12, 13, cにおける増水季塩分鉛直分布の比較結果（実線：計算値、破線：観測値）

(2) 濁りモデルのパラメータ設定

濁りモデルの計算では、高梁川起源粒子と海底からの巻き上げによる再懸濁起源粒子の2粒径を考慮する。本研究では再懸濁粒子としてシルト・粘土を対象とし、海底堆積物中のシルト・粘土の割合を含泥率 M_R とする。式(4)によって巻き上がり量を計算する際に、計算領域全域において M_R の値を設定する必要がある。その設定法を以下に示す。

図-10は高尾ら²⁾によって観測された各測点のシルト・粘土の割合と本研究の流動モデルによって計算された各測点での期間最大流速値 V_{max} との相関をとったものである。図-10によると、当海域の含泥率は流速に対して破線で示すステップ状の近似式で表わされることがわかる。この近似式と V_{max} 分布を用いれば推算した含泥率分布を得ることができる。以上によって推算された含泥率分布は高尾ら²⁾による観測結果と一致している。

巻き上げ定数 M および海底面限界せん断応力 τ_e の値は高尾ら⁶⁾による解析値を基に設定している。また、沈降速度 w_s は高尾ら²⁾による当海域の現地観測結果をもとに設定している。表-1にパラメータ一覧を示す。

表-1 濁りモデルで設定したパラメータ

| | 低温季 | 増水季 | 高温季 |
|----------------------------------|---|--|--|
| M (kg/m ² /min.) | 0.15×10 ⁻³ (0.11×10 ⁻³) | 0.15×10 ⁻³ (0.106×10 ⁻³) | 0.15×10 ⁻³ (0.092×10 ⁻³) |
| τ_e (N/m ²) | 0.04 (0.0414) | 0.03 (0.0304) | 0.02 (0.0175) |
| w_s (m/day) 海底起源 | 20.0 | 20.0 | 20.0 |
| w_s (m/day) 高梁川起源 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |

※表中括弧の値は高尾ら⁶⁾による解析値

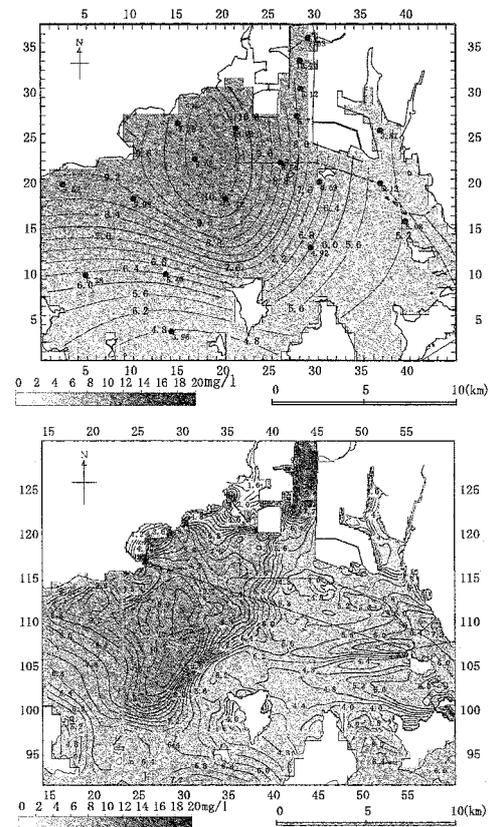


図-11 低温季の下層におけるSS濃度水平分布の観測値(上段)と計算値(下段)の比較結果(上段図中のプロットと値は測点と観測値を示す)

(3) 流動モデルの再現結果

a) SS濃度の水平分布

濁りモデルの再現性については、比較的SS濃度が低かった低温季とSS濃度が高かった高温季について示す。

図-11は低温季の下層におけるSS濃度の比較結果である。観測値と計算値の値はほぼ一致しており、海域の西部で濃度が高く、東部で低いという分布傾向も再現されている。

高温季の下層における比較結果を図-12に示す。高温季においても、観測結果は西部でSS濃度が高く、東部で低いという分布傾向となっており、計算値も概ねその分布傾向を再現している。しかしながら、観測値の方が計算値よりも全体的に高い値となっている。この点については次の時系列比較において記述する。

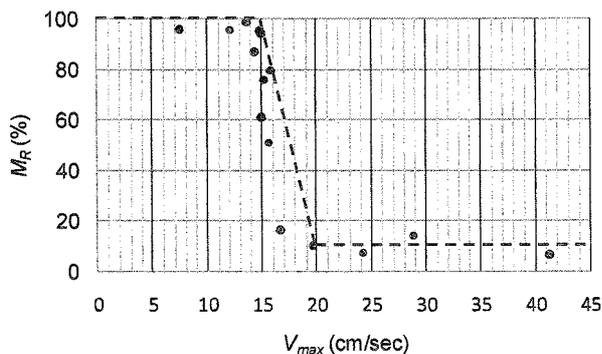


図-10 M_R と V_{max} の相関図(破線は適用した近似線)

b) SS濃度の時系列

図-13に低温季のSta. a, bおよびcの下層におけるSS濃度の時系列比較結果を示す。観測値にみられるような数時間スケール以下の細かな変動は本研究の計算条件では再現できないが、潮流の巻き上げと沈降による変動や大潮期で濃度が高くなり、小潮期で低くなるといった変動はよく再現されている。Sta. aをみると、観測値は半日周潮による1日に4回の巻き上げのピークがあるが、計算値では2回しかない(図中矢印参照)。これは、Sta. aにおける西向き潮流が弱いためであると考えられる。

高温季の比較についても同様に図-14に示す。観測値、計算値ともに低温季に比べてSS濃度は高くなっており、値もほぼ一致している。しかしながら、9月1日から5日においては、小潮期のために潮

流による巻き上げ量が小さいにも関わらず、観測値は平均的にSS濃度が高くなっている（図中破線枠）。その原因として、植物プランクトンの再生産や、デトリタス等の沈降速度の遅い粒子の浮遊が挙げられる。図-12で示した高温季のSS濃度水平分布の差異も以上によって説明できる。本研究はシルト・粘土を対象にしているが、高温季における上記のようなSS濃度の変動を再現するには生化学過程の効果を取り入れる必要がある。

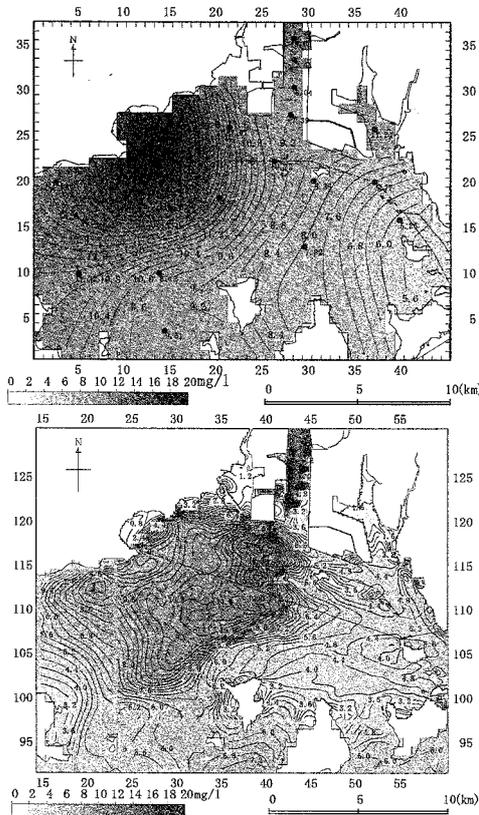


図-12 高温季の下層におけるSS濃度水平分布の観測値（上段）と計算値（下段）の比較結果（上段図中の黒丸と数値は測点と観測値を示す）

5. おわりに

本研究は、水島港周辺海域の流況と濁りの分布を予測できる数値モデルの構築を目的とした。時空間的に密な既存観測データの再現を試みたところ、流動場とSSの分布をほぼ再現できた。これにより、河川出水時等の気象・海象擾乱時、或いは港湾整備等の条件のもとでの流況・濁り分布の予測が可能となる。

今後、より数値モデルの再現性を高めるために検討すべき事項を以下に示す。

- ・ Sta. aおよびcにおける西向き流速の再現性（水深データの取り扱い方）
- ・ 開境界に設定する水温・塩分データ
- ・ 高温季にみられるような、生化学過程によるSS濃度の変動

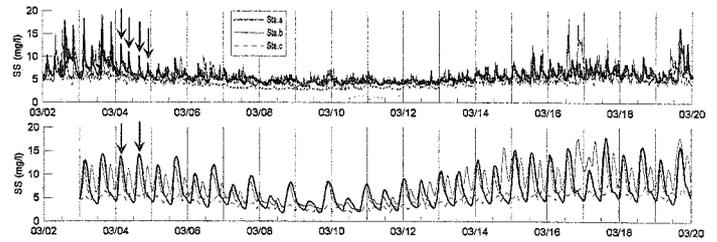


図-13 低温季のSta. a, b, cの下層におけるSS濃度時系列の観測値（上段）と計算値（下段）の比較結果（太実線：Sta. a, 細線：Sta. b, 細破線：Sta. c）

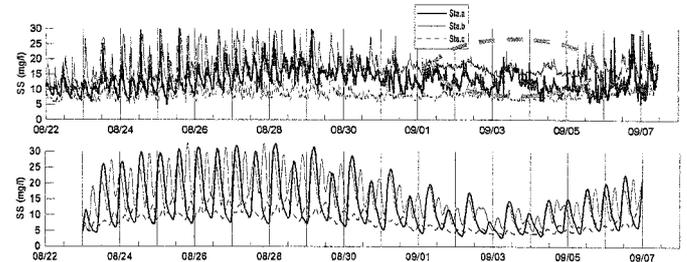


図-14 高温季のSta. a, b, cの下層におけるSS濃度時系列の観測値（上段）と計算値（下段）の比較結果（太実線：Sta. a, 細線：Sta. b, 細破線：Sta. c）

また、生化学過程を取り入れ、生物因子の挙動を対象にした予測モデルの構築にも取り組んでいく予定である。

謝辞：本研究は、水島港の濁り拡散予測モデル開発の一環として行ったものであり、貴重なご意見を賜りました京都大学名誉教授奥田節夫博士、九州大学教授柳哲雄博士、岡山大学教授大久保賢治博士に感謝いたします。また、観測データの収集にご協力頂きました岡山県備前中県民局水島港湾事務所、岡山県水産試験場の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋 暁, 湯浅一郎, 村上和男, 星加 章：瀬戸内海の内海砂採取周辺海域における透明度の変化と藻場分布の関係, 沿岸海洋研究, Vol. 42 (2), pp. 151-159, 2005.
- 2) 高尾敏幸, 杉松宏一, 柴木秀之, 常森通浩, 田中文裕：瀬戸内海水島港周辺海域の懸濁粒子(SS)の輸送特性, 海洋開発論文集, Vol. 23, pp. 1153-1158, 2007.
- 3) 国井麻妃, 藤原建紀：瀬戸内海の東西の水位差によって起きる通過流, 海と空, 第81巻, 第2号, pp. 63-72, 2006.
- 4) 花輪公雄, 三寺史夫：海洋資料における日平均値の作成について-日平均潮位を扱う際の問題点-, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 23, pp. 79-87, 1985.
- 5) Munk, W., H. and Anderson, E., R. : Notes on a theory of the thermocline, Journal of Marine Research, Vol. 7, pp. 276-295, 1948.
- 6) 高尾敏幸, 白木喜章, 柴木秀之, 山下義昭, 田中文裕：瀬戸内海水島港周辺海域における懸濁粒子(SS)の巻き上げ・沈降特性の解析, 海洋開発論文集 (投稿中)