周防灘西部海域における流動・濁り・低次生態系結合型モデリング

Flow-Turbidity-Ecosystem combined Modeling in Suo Nada, the Seto Inland Sea, Japan

吉田秀樹¹・河野正文²・丸山晴広³・柴木秀之⁴・白木喜章⁵

Hideki YOSHIDA, Masahumi KAWANO, Haruhiro MARUYAMA
Hidenori SHIBAKI and Yoshiaki SHIRAKI

Numerical simulation of ocean environments (flow, temperature, salinity, turbidity and ecosystem) is carried out in Suo Nada, the Seto Inland Sea, Japan. Past observations in Suo Nada show the bottom sediments consist mostly of silt and clay, and tidal current resuspends those materials at the bottom layer. In addition, benthic microalgae plays important role, and it is rolled by tidal current at bottom layer. To simulate these processes needs a numerical model combined flow, turbidity and ecosystem. This study develops the combined model and shows the reproducibility.

1. はじめに

沿岸域の海域環境を把握するための有用な手段として数値シミュレーションが挙げられる。沿岸域はその海域特有の物理・生物・化学過程を有しており、対象とする海域の特性を考慮した上での数値モデルの構築が重要となる。流動・濁り・生態系は海域環境の主たる要素であり、それぞれが密接に関係している。例えば、高橋ら(2005)は瀬戸内海において、SS濃度の上昇と有光層の減衰との相関性を明らかにしている。よって、巻き上がりや陸域からの負荷による濁り変動が比較的高い海域において、生物・化学過程を含む水質シミュレーションをおこなう際、濁りと生態系を結合した数値モデルの構築が必要となる。

本研究は、流動・濁り・低次生態系を連携させた結合モデルを構築し、2009年夏季の周防灘西部海域に適用した例を報告する。

2. 海域特性の把握

対象海域とする周防灘を図-1に示す。瀬戸内海西部に位置する周防灘は、大潮期の干満差がおおよそ3mと比較的大きく、随所に干潟が点在している。特に、北九州空港西方の曾根干潟は最も面積が大きく、干出、冠水に伴う海域への熱輸送など、海域環境に大きく影響している。図-1の地点A～Cは、2009年夏季に実施された現地観測の代表的な測点であり、流速や水温・塩分をはじめ、濁

りや植物プランクトン、栄養塩といった一連の項目について時空間的に密な観測がおこなわれている。この観測結果をもとに周防灘西部海域の特性を把握する。

図-2に、地点Cにおける2009年8月26日と9月7日の水温・塩分および溶存酸素(DO)濃度の鉛直プロファイルを示す。8月26日は水温・塩分ともに強い成層構造がみられ、水深10m付近に顕著な密度躍層が形成されている。さらに、密度躍層の下でDO濃度が急激に低下している。表層から水深10mまでは一様に分布していることから、底層において外海から低温・高塩・貧酸素の水塊が浸入してきたものと考えられる。また、およそ10日後の9月7日には成層構造は消滅し、ほぼ鉛直一様の分布になっている。このように、東部の境界が広い周防灘では、水温・塩分、DOなどの分布に隣接海域の影響を受けやすく、さらにその変動も大きいことがわかる。

図-3は、地点Aおよび地点CにおけるSS濃度とクロロフィル-a濃度の鉛直プロファイルである。周防灘西部の底質粒度組成はほぼ100%がシルト・粘土で占められており、底層付近は潮流による巻き上げによってSS濃度が高くなる。ただし、表層から中層にかけては、SS濃度は低く、巻き上がりの影響は小さい。さらに、SS濃度の鉛直構造に一致してクロロフィル-a濃度も底層付近で高くなっている。これは、周防灘の低次生態系の特性の一つである、付着珪藻の存在を示唆している。

Sarkerら(2009)は、周防灘西部の浅海域では、水中の生物量に対する付着珪藻の割合は、冬季が7%、夏季が2%であることを現地観測をもとに見積もっている。さらに、付着珪藻による基礎生産は、全体の植物プランクトンによる基礎生産のうちおよそ2～12%を占めることを明らかにしている。図-3にみられるクロロフィル-a濃度の鉛直構造は、底泥とともに付着珪藻が巻き上がっている様子を捉えたものであることが考えられる。

以上のような海域特性を踏まえ、再現対象期間を2009

1	正会員	工修	国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 所長
2			国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第二工務課 課長
3			国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 第二工務課 係長
4	正会員	工博	(株)エコー 技術本部 副本部長
5		理博	(株)エコー 技術本部 沿岸環境部 主任

年8月～9月とする数値モデルの構築をおこなう。

3. 流動・濁り・低次生態系結合モデル

(1) 計算範囲、格子分割および鉛直座標系

モデルの格子サイズは、図-1中に示すように外側から

図-1 計算対象とする周防灘と格子サイズおよび2009年夏季の現地観測における代表測点（破線は開境界、矢印は代表的な河川水流入点を示す）

図-2 2009年夏季観測による水温・塩分、DO濃度の鉛直プロファイル

図-3 2009年夏季観測によるSS濃度およびクロロフィル-a濃度の鉛直プロファイル

300m, 100mとし、主対象領域である周防灘西部を50mとする。それぞれの領域間で2-wayネステイングによって接続する。

水温・塩分の変動やそれに伴う密度流、さらには濁りや水質の鉛直構造を再現するために3次元の数値モデルを使用する。数値モデルの代表的な鉛直座標系としてZレベル座標とシグマ座標が挙げられるが、底泥や付着珪藻の巻き上げに着目し、本研究では等間隔5層のシグマ座標系を用いる。

水深によって層数が変わるZレベル座標では、層数の違う格子点で最下層同士の水のやりとりができず、最下層流速に不連続が生じる。その結果、最下層流速を用いて計算する底泥の巻き上げや堆積量にも不連続が生じてしまう。一方、シグマ座標は、全水深帯で層数が同一であり、最下層流速が連続的に表現できるため、Zレベル座標のような不連続は生じず、巻き上げや堆積を適切に計算できる。また、その他の利点として、干潟域などの水深の小さい領域でも層数が変わらないため、表層における淡水の広がりなどを精度良く計算できるといった点も挙げられる。

(2) 流動モデル

流動モデルによる計算項目は、潮汐・潮流、平均流（潮汐残差流、吹送流、密度流）ならびに水温・塩分であり、計算期間を、2009年の8月20日～9月8日とする。

支配方程式は、連続の式、3次元運動方程式および水温・塩分の移流・拡散方程式とし、水平渦動粘性係数および水平渦動拡散係数はスマゴリンスキー型、鉛直渦動粘性係数および鉛直渦動拡散係数はリチャードソン数の関数型を用いる。

潮汐は7分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1) を考慮する。日本海側の開境界には、全球潮汐モデル (Matsumotoら, 2000) による潮位変動を、周防灘側の開境界においては、白木ら (2010) による瀬戸内海全域の潮汐モデルの結果から推算した潮位変動を与える。

海面境界では、近隣のアメダス測候所で観測された風向・風速データおよび下関地方気象台の日射量データ等を用いて、吹送流や海面熱収支を考慮する。また、図-2に示したような外海の影響による変動を再現するために、開境界に水温・塩分を時系列で与え、その変動は観測値から推定する。河川水流入点においては、塩分ゼロの淡水流量を与える。流量変動は近接する一級河川の流量年表 (国土交通省) をもとに比流量を用いて推定する。

干潟域においては、シグマ座標による移動境界法を用いて、干潟面の干出、冠水の表現を可能にしている。同時に、干出時の干潟面の貯熱や冠水時の海水への熱供給を計算する。

上記によって得られる流動場を、次に示す濁り・低次

生態系モデルにリンクさせる。

(3) 濁り (SS濃度) モデル

濁り (SS濃度) モデルでは、流れによる移流・拡散、沈降および河川からの濁水流入に加え、海底面の巻き上げ、堆積を考慮する。

巻き上げ量 Q_m (kg/m²/sec) は、

$$\begin{cases} Q_m = M \left(\frac{\tau_t}{\tau_e} - 1 \right) \times \frac{M_R}{100} & (\tau_t > \tau_e) \\ Q_m = 0 & (\tau_t \leq \tau_e) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

で表され、 M は巻き上げ定数 (kg/m²/sec)、 M_R は含泥率 (%), τ_t は海底面せん断応力 (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。上式は、海底直上の流速が限界値よりも大きくなると堆積粒子が巻き上がり、流速が限界値以下の時は巻き上がりは起こらないことを表現している。堆積量 D_m (kg/m²/sec) は、

$$D_m = w_s C_{bhm} \dots\dots\dots (2)$$

で表され、 w_s はSSの沈降速度 (m/sec), C_{bhm} は底層のSS濃度 (kg/m³) である。なお、式 (1), (2) におけるパラメータは、2009年夏季の観測値をもとに海域特有の値を設定する。巻き上げ定数や海底面限界せん断応力、沈降速度については、高尾ら (2008) と同様にADCPによる反射強度をSS濃度に換算した時系列データを理論的に解析することで算出する (表-1)。

表-1 濁りパラメータ

パラメータ	値
M (kg/m ² /sec)	2.22×10^{-6}
τ_e (N/m ²)	0.033
w_s (m/sec)	4.63×10^{-4}

また、含泥率については、対象海域の底質粒度組成をもとに水深 h (m) の関数として分布を考慮した (式 (3))。

$$M_R(\%) = \begin{cases} 31.71 & (h < 0) \\ -12.81h + 31.71 & (0 \leq h < 1.4) \\ 18.74h - 12.53 & (1.4 \leq h < 6.0) \\ 100 & (6.0 \leq h) \end{cases} \dots\dots (3)$$

(4) 低次生態系モデル

低次生態系モデルは、植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁態有機物、溶存態有機物、溶存態無機リン、溶存態無機窒素、溶存態酸素のコンパートメントとし、それぞれについて、流れによる移流・拡散、沈降および河川からの負荷に加え、生物・化学過程による生成・消失を考慮する。さらに、濁りモデルと結合させ同時に計算することで、巻き上げ等により濁りが高くなる時の遮光効果や底泥に付着した付着珪藻の巻き上げを表現可能にする。

a) 生物・化学過程の定式化と濁りによる遮光効果

生物・化学過程の式は中田 (1993) を基本とし、それらの多くは水温の関数型としている。ここでは、代表として植物プランクトンの光合成について示す。

光合成は下式で表される。

$$\text{光合成} = B_I \cdot \text{EXP}(\beta_I \cdot T) \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot P \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 B_I は植物プランクトンの0℃における増殖速度 (1/day), β_I は増殖速度の温度係数, T は水温 (℃), μ_1 はセルクオタによる光合成の制限 (= 0.5), P は植物プランクトン濃度 (mgC/m³) である。 μ_2 は光強度による光合成の制限であり、下式で表される。

$$\mu_2 = \frac{I}{I_{opt}} \cdot \text{EXP} \left[1 - \frac{I}{I_{opt}} \right] \dots\dots\dots (5)$$

I_{opt} は最適光量 (= 200 ly/day), I は水深 z (m) における光量であり、海面光強度 I_0 (= 856 ly/day) と光の消散係数 k を用いた以下式により水深方向に指数関数的に減衰する。

$$I(z) = I_0 \cdot \text{EXP}(-k \cdot z) \dots\dots\dots (6)$$

さらに、本研究では消散係数 k をSS濃度の関数 (式 (7)) とし、巻き上げ等によって濁りが高くなる時の遮光効果を表現する。

$$k = 0.07 \cdot \text{SS}(\text{mg/l}) + 0.01 \dots\dots\dots (7)$$

b) 付着珪藻の巻き上がり

付着珪藻の巻き上がり量を現地観測によって直接求めるのは困難である。ここでは、2009年夏季の観測によるSS濃度とクロロフィル-aの鉛直プロファイルから、巻き上がりによって底層付近で上昇するSS濃度とクロロフィル-aの比 (Chl-a (μg/l) / SS (mg/l)) を推定した。その結果、全地点の平均値として0.87が得られ、濁りモデルによるSSの巻き上がり量にこの比を乗じることで、低次生態系モデルにおける海底からの植物プランクトンのフラックスを算出する。なお、付着珪藻の生物パラメータは浮遊系のものと異なることが考えられるものの、現時点において不明であるため、本研究では、浮遊系と同一のパラメータ値を用いた。

c) 生物・化学パラメータ

植物プランクトンの増殖速度や分解速度等の主な生物・化学パラメータは、2009年夏季の観測時における、採水、分析、室内実験等による値を用いる。その他の不明なパラメータについては、既往文献 (例えば、中田、1993など) を参考に設定する。表-2に主な生物・化学パラメータを示す。

4. シミュレーション結果

(1) 再現結果

図-4に、大潮期 (8月21日) の表層における上げ潮時、下げ潮時の流速ベクトル分布を示す。上げ潮時は周防灘

全体で北西向き、下げ潮時は南東向きの潮流が生じる。

顕著な密度成層がみられた8月26日の表層、底層の水温分布を図-5に示す。底層において低温水が浸入する様子を再現できていることがわかる。水温・塩分の境界条件に時間変動を考慮することにより、外海の影響を表現できる。

図-6に、濁りモデルによる、表層および底層における計算期間平均のSS濃度分布を示す。観測値にみられるような、底層付近で濃度が高く、表層で低いといった分布が再現できている。また、潮流が強い箇所で巻き上がりが強くなる。

図-7に、低次生態系モデルによる表層、底層における計算期間平均の植物プランクトン濃度 (mgC/m^3) 分布を示す。濁りモデルと結合し、付着珪藻の巻き上がりを取り入れることで、表層よりも底層において植物プランクトン濃度が高いといった周防灘の特性を表現できる。

(2) 再現検証

図-8に、地点Aおよび地点Cの表層における潮流楕円の比較を M_2 成分について示す。観測値と計算値はほぼ一致していることがわかる。図-9は、地点Cにおける水温・塩分の時系列の比較である。表層における昼夜間の

表-2 主な生物・化学パラメータ

パラメータ	値
植物プランクトンの0℃における増殖速度 (1/day)	0.68
℃の温度係数	0.0633
植物プランクトンの沈降速度 (m/day)	0.173
懸濁態有機物の沈降速度 (m/day)	0.11
バクテリアによる懸濁態有機物の分解速度 (1/day)	1.0×10^{-3}
℃の温度係数	0.07
バクテリアによる溶存態有機物の分解速度 (1/day)	1.5×10^{-3}
℃の温度係数	0.1036
水温25℃における底泥の酸素消費速度 ($\text{mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$)	500
℃の温度係数	0.04

図-4 大潮期 (2009年8月21日) の上げ潮時 (左)、下げ潮時 (右) の表層流速ベクトル分布

図-5 2009年8月26日の表層 (左)、底層 (右) の水温分布

図-6 計算期間平均の表層 (左)、底層 (右) のSS濃度分布

図-7 計算期間平均の表層 (左)、底層 (右) の植物プランクトン濃度 (mgC/m^3) 分布

水温変動が再現できている。また、8月26日前後に外海の影響により密度成層が強化され、9月上旬に弱化するといった変動もみられる。

図-10は、地点BにおけるADCPの反射強度から推定したSS濃度とシミュレーションによるSS濃度の時系列を示したものである。期間を通して、底層で濃度が高く、表層から中層で低いといった傾向が再現できている。また、上げ潮、下げ潮による1日周期以下の変動や大潮期

図-8 地点A, Cの表層のM₂潮流楕円の比較

図-9 地点Cの水温(上)・塩分(下)の時系列比較

図-10 地点Bの観測値(上)と計算値(下)のSS濃度時系列

で巻き上がりが強く、小潮期に弱くなる長周期の変動も再現できている。

図-11は、地点Aおよび地点Cにおけるクロロフィル-a濃度の鉛直プロファイルの比較である。付着珪藻の巻き上がりを取り入れることで、底層付近でクロロフィル-a濃度が高くなる傾向を再現している。ただし、表層で過大に、底層で過小になるといった観測値との差異は、生物・化学パラメータに加えて、鉛直解像度にも起因することが考えられる。鉛直層分割数を増やすことで、より精度が向上することが期待できる。

図-12は、地点CにおけるDO濃度の比較である。密度成層が強化された8月26日は、観測値にみられるほど顕著ではないものの、底層付近でDO濃度が低くなる傾向が計算値にもみられる。9月7日は両者はほぼ一致しており、底層の貧酸素が解消される変動を再現している。

5. おわりに

周防灘西部海域において、観測結果により海域の特性を把握し、流動・濁り・低次生態系の結合モデルを構築し、濁りによる遮光効果や付着珪藻の巻き上がりを計算

図-11 地点A, Cのクロロフィル-a濃度の比較

図-12 地点CのDO濃度の比較

に取り入れた。

今後の課題として、付着珪藻特有のパラメータ設定や干潟域の生物・化学過程のモデル化等が挙げられる。また、濁りモデルによるSS粒子と生物起源の懸濁態粒子の関係性を明らかにしていくことで、海域の濁りの再現性をより向上させることができるものと考えられる。

参考文献

- 白木喜章・高尾敏幸・柴木秀之(2010): 領域モデルの境界条件設定を目的とした瀬戸内海潮汐計算とそのデータベース化, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 423-428.
- 高尾敏幸・白木喜章・柴木秀之・山下義昭・田中丈裕(2008): 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, 第24巻, pp. 1075-1080.
- 高橋 暁・湯浅一郎・村上和男・星加 章(2005): 瀬戸内海の実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.
- 中田喜三郎(1993): 生態系モデル 一定式化と未知のパラメータの推定法—(原著), J. Adv. Tech. Conf., Vol.8, pp. 99-138.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide modes developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, J. Oceanogr., Vol.56, pp. 567-581.
- Sarker, M. J., T. Yamamoto and T. Hashimoto (2009): Contribution of Benthic Microalgae to the Whole Water Algal Biomass and Primary Production in Suo Nada, the Seto Inland Sea, Japan, J. Oceanogr., Vol.65, pp. 311-323.