

野見湾における観測システムと数値モデルを統合した 水質予報システムの開発

上野成三*・織田幸伸*・中山哲厳**

高知県野見湾を対象として海洋観測システムと数値モデルを統合した水質予報システムの開発を行った。本水質予報システムは、過去4日間の観測結果を元に湾口部境界条件の予報値を推定し、そのデータを数値モデルの境界条件として湾内の流動と水質の予報計算を行うものであり、3日先までの水質予報が可能なものである。内部潮汐が卓越する夏季と内部潮汐が消滅する秋季の2ケースの検証計算を行った結果、溶存酸素で2 mg/L、植物プランクトンで0.2 mgC/Lの計算精度で観測された現象が再現でき、本予報システムは実用可能な範囲にあると判断された。今後の課題として、湾口境界条件の予報精度の向上が残された。

1. はじめに

養殖海域において赤潮や貧酸素化が発生した場合、養殖魚類の大量斃死を引き起こし多大な被害が発生する。現状の対策として、漁業者や地方自治体の水産関連機関が自主的な監視を行い、赤潮、貧酸素化の発生を極力早期に発見することに努めているものの、しばしば大規模な水質災害が発生する状態が続いている。そのため、赤潮や貧酸素化の早期発見や発生予報が可能なシステムの実現に対する要望が強い。

水質変化の早期発見に関しては、ここ数年で最新の海洋観測システムが全国数箇所に設置され、現地の水質データがリアルタイムに取得できる状態になってきた。また、水質予報に関しては、近年の高度化された流動・水質モデルの境界条件に高精度の観測データが導入できれば、赤潮、貧酸素化など現地の諸現象を再現できるレベルに達してきた。このような状況下、観測システムと数値モデルを統合し流動・水質を予報する「海の天気予報システム」が実現できる環境が整いつつある。欧米の状況を見てみると、米国 Narragansett 湾 (Spaulding ら, 2003)、ギリシャ沿岸、デンマーク沿岸などで潮流、水質などの予報システムが既に運用状態にある。

本研究では、観測システムから得られる物理・水質情報を流動・水質モデルの開境界条件に導入して、2～3日先までの流動、赤潮、貧酸素化をリアルタイムに予報するシステムの開発を目指した。この内、流動予報に関する予報システムとして、著者らにより野見湾 (高知県須崎市) を対象に流動、水温、塩分の物理項目に限定した流動予報システムが既に開発されている (上野ら, 2004)。本論文では、この流動予報システムをベースとし

て低次生態系モデルを導入し水質予報が可能なシステムに拡張し、観測データの比較検証を行った結果を述べる。

なお、野見湾では著者らが開発した観測システムが3年前から運用中で、湾内3点で水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル、濁度の5項目の鉛直分布データ (海面から海底まで1 m 間隔) が1時間間隔で24時間連続計測されている (上野ら, 2002)。

2. 水質予報システムの内容

野見湾の流動・水質の特徴は山本ら (2002, 2003, 2004) で詳細に検討されており、夏季の成層発達時に来襲する内部潮汐により湾内の海水交換が強まること、秋季の成層消滅時に内部潮汐の来襲が止まることにより、湾内の海水交換が極度に弱まる水止まり現象が生じることが明らかにされている。秋季の水止まり現象が発生すると、湾内で貧酸素水塊が発生し養殖魚に被害が生じる場合もある。よって、野見湾の海洋環境予報として、内部潮汐をいかに精度良く予報するかが重要なポイントとなる。

流動予報システムの概要を図-1に示す。まず、予報計算開始の4日前の時点を計算開始時期として、湾口観

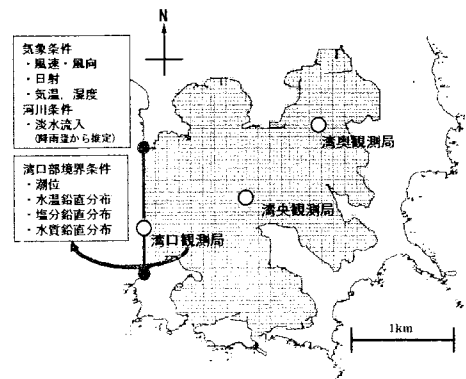


図-1 流動・水質予報システムの概念図

* 正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
** 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所 水理研究室長

測局の観測データを用いて、湾内の各変数を一様に設定する。その後、湾口観測局の観測データを用いて作成した湾口境界条件データ（潮位、水温、塩分、各水質項目の鉛直分布）、気象データ（風速・風向、日射、気温、湿度）、河川流入データを流動・水質モデルに入力し、計算領域全体が一定値の初期条件から4日間の再現計算を行う。さらに、湾口境界条件の予報値と気象庁が提供している気象予報データを導入して、その後3日間の予報計算を行う。流動モデルは多層レベルモデル（水平グリッド幅40mで計2500グリッド、鉛直20層）を、水質モデルは後述する低次生態系モデルを用いた。

湾口境界条件の予報値は、過去の観測データをもとに、主として内部潮汐による周期1日以下の短周期成分と、主として気象変動による周期1日以上長の長周期成分を合成して作成した。溶存酸素の予報値の一例を図-2に示す。短周期成分は過去4日間（8/10～8/13）に観測データから周期1日以下の変動成分を分離し重み付け位相平均処理を行ったものを用いた。長周期変動は過去4日間の平均値（一定値）を用いた。図-2に示した溶存酸素の時系列を見ると、約1日周期の変動が卓越し、観測値とほぼ一致した予報値（8/14～8/17）が作成できていることが分かる。ただし、本手法は過去データの類推から予報値を推定するものであるため、予報計算期間で湾外で新たに発生する水質変化現象は予報計算に反映できないことに注意を要する。また、湾口部の予報値は鉛直分布データを作成する必要があるが、計算に必要な水深に対して観測層が浅すぎる問題があった。そこで、観測データを必要水深まで外挿する処理を行い、流動モデルの境界条件データとして導入した。

水質計算に採用した低次生態系モデルの概要を図-3に示す。低次生態系モデルの計算変数として、植物プランクトン、溶存酸素、水中溶存性有機物、水中デトリタス、栄養塩（硝酸性窒素、アンモニア性窒素、リン酸性リン）、底質デトリタスの水質・底質項目を採用した。生物・化学プロセスとしては、植物プランクトンの光合成・呼吸・枯死、植物プランクトンの光合成による酸素放出と栄養塩の吸収、水中デトリタスの分解、底泥デトリタスの分解、硝化、脱窒、再ばっきなど低次生態系の各プロセスを網羅したモデルを構築した。植物プランクトンの光合成モデルは、水温、水中光量、栄養塩が増殖速度に及ぼす影響を考慮したモデルとなっている。また、野見湾の水質が養殖事業の影響を強く受けていることを考慮して、養殖魚の呼吸による酸素消費、餌の投入に伴う溶存性有機物、水中デトリタスを放出が湾内全域で生じると設定した。

計算ケースは野見湾の特徴的な現象である内部潮汐が来襲する夏季（2002年8月10日から17日）と内部潮汐が消滅する秋季（2002年10月20日から27日）の2ケースと

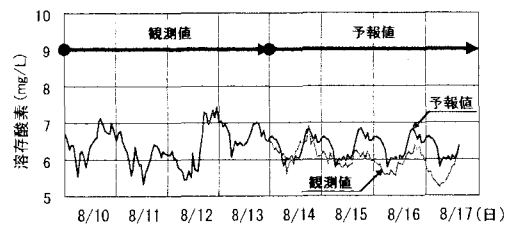


図-2 湾口境界条件の予報値（溶存酸素、夏季）

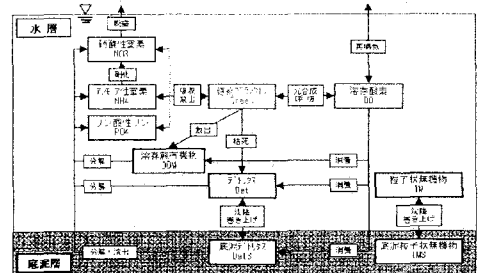


図-3 低次生態系モデルの構造

し、各ケースで湾口境界条件に観測値を入力する再現計算（Hindcast simulation）と、予報値を入力する予報計算（Forecast simulation）を実施した。

3. 再現計算と予報計算の結果

（1）内部潮汐が卓越する夏季のケース

内部潮汐が卓越する夏季の計算ケースについて、湾中央部における溶存酸素と植物プランクトンのコンター（水深・時間）を観測値、再現値、予報値で比較する（図-4）。溶存酸素について、観測値では溶存酸素濃度が5 mg/L以下に低下した貧酸素水塊が水深の1/2以上の振幅で上下に変動した。これは、湾内に侵入した内部潮汐により水塊が上下することを反映している。この現象が再現値、予報値ともに良好に計算できていることが分かる。植物プランクトンについて、観測値では、中層から表層にかけて植物プランクトン濃度が0.2 mgC/L以上の高濃度層が表層から中層にかけて発生し、溶存酸素の場合と同じく上下変動している。これに対して、再現値、予報値ともに、植物プランクトンの濃度増大は表層のみで発生し、観測値との違いが顕著となった。この原因としては、観測期間に発生した植物プランクトンの優占種は鉛直移動を行う渦鞭毛藻類であったのに対して、本低次生態系モデルでは植物プランクトンの鉛直移動を考慮していないことが一因と考えられる。

表層と底層における溶存酸素と植物プランクトンの経時変化を観測値（太線）と計算値（細線）で比較する。再現計算結果を図-5に、予報計算結果を図-6に示す。再現計算結果では、溶存酸素の底層で観測値との差異がやや大きいものの、溶存酸素の表層、植物プランクトン

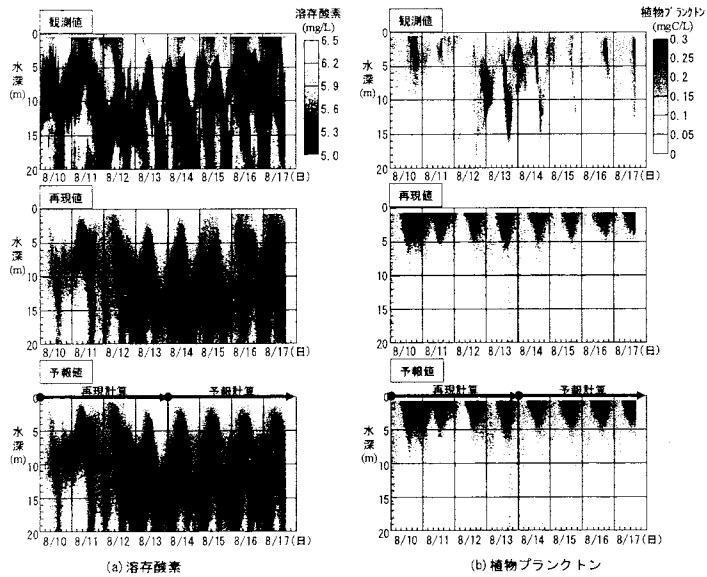


図-4 水質の時間変化コンターの比較 (夏季, 湾央部)

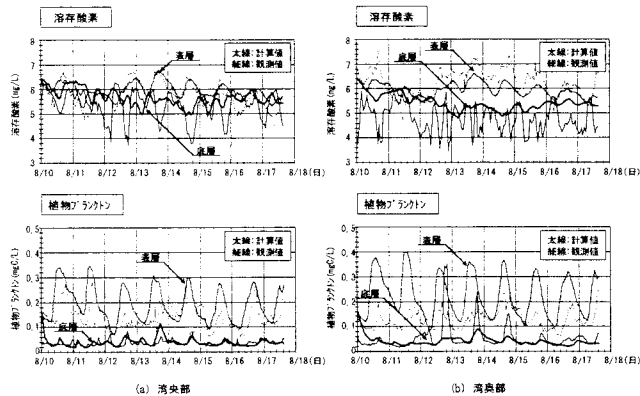


図-5 水質の経時変化の比較 (再現計算: 夏季)

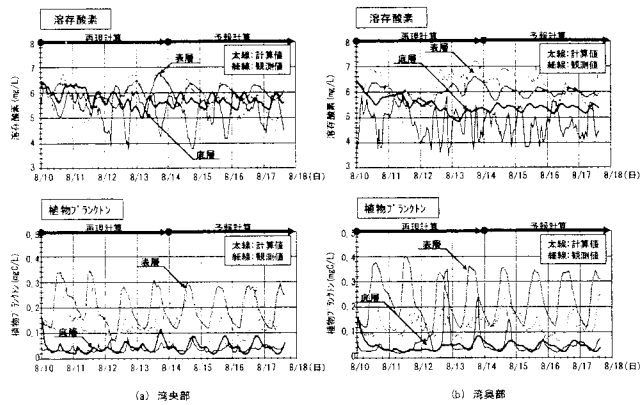


図-6 水質の経時変化の比較 (予報計算: 夏季)

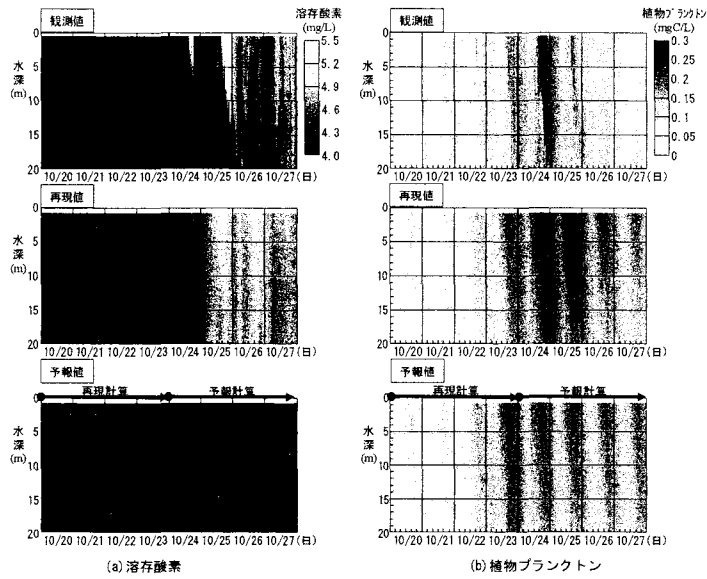


図-7 水質の時間変化コンターの比較 (秋季, 湾中部)

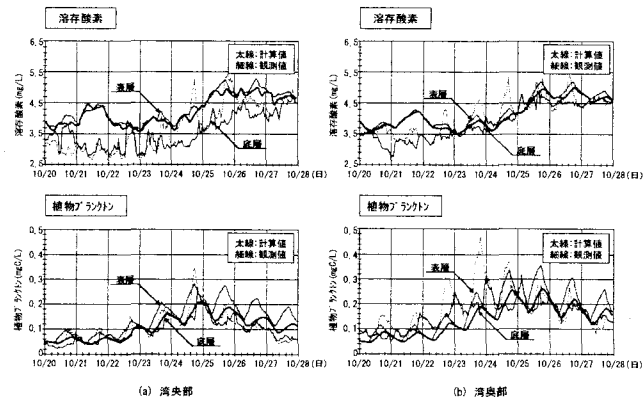


図-8 水質の経時変化の比較 (再現計算: 秋季)

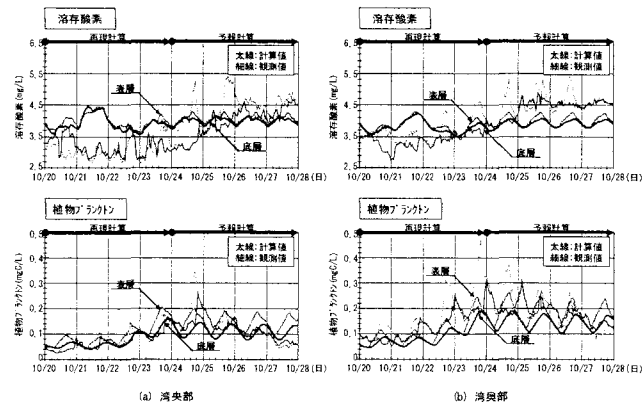


図-9 水質の経時変化の比較 (予報計算: 秋季)

の表層・底層とも、日変動パターンが良好に再現できた。予報計算結果では、溶存酸素の底層での観測値との差異がやや拡大したものの、その他の予報計算値は再現計算値とほぼ同様であった。観測値と計算値の差として、再現計算精度は溶存酸素で約1 mg/L、植物プランクトンで約0.2 mgC/Lとなり、予報計算精度は溶存酸素で約2 mg/L、植物プランクトンで約0.2 mgC/Lとなった。

以上より、夏季における本水質予報システムによる3日先までの予報精度は実用レベルにはほぼ達していると言える。底層で大きくなる予報誤差の主要因は湾口部境界条件の予報値の作成精度にあり、今後の課題となった。

(2) 内部潮汐が消滅する秋季のケース

夏季の計算ケースと同様に、内部潮汐が消滅する秋季の計算ケースについて、湾中央部における溶存酸素と植物プランクトンのコンター（水深－時間）を観測値、再現値、予報値と比較する（図-7）。溶存酸素、植物プランクトンともに観測値は、夏季に見られた内部潮汐による上下変動は見られず鉛直に一樣な分布を示し、その傾向は再現計算、予報計算の両者ともに再現できた。

溶存酸素について、観測値では10/25以降に溶存酸素濃度が増大したのに対して、再現計算結果はその傾向を再現できたものの、予報計算結果は再現できず溶存酸素濃度はほとんど変化しない結果となった。この原因は、観測値によると予報期間中に湾口部で溶存酸素濃度の増大が発生し、湾口部の境界条件の予報値においてその現象が反映できなかったためである。この問題は、湾口境界条件を過去データから推定する本手法の限界であり、本質的には解決困難な問題である。

植物プランクトンについて、観測値では、10/23以降に増大し、10/25以降に減少した。この傾向は再現値、予報値ともにほぼ再現できた。

表層、底層別の溶存酸素と植物プランクトンの経時変化を観測値（太線）と計算値（細線）で比較する。再現計算結果を図-8に、予報計算結果を図-9に示す。溶存酸素、植物プランクトンともに、再現計算結果は、観測値で見られた日変動パターンと2、3日レベルの変化パターンを良好に再現した。しかし、予報計算結果では、植物プランクトンの再現精度はほぼ良好であるものの、溶存酸素の再現精度は低下した。特に、2、3日レベルの変化パターンの再現精度が大きく低下した。この原因は、前述したように、湾口境界条件に予報精度の限界に起因するものである。観測値と計算値の差としては、再現計算精度は溶存酸素で約1 mg/L、植物プランクトンで約0.2 mgC/Lとなり、予報計算精度は溶存酸素で約2 mg/L、植物プランクトンで約0.2 mgC/Lとなり、夏季の再現・予報精度とほぼ同じである。

以上より、秋季における本流動予報システムによる予報

精度は、夏季の結果とほぼ同様となった。ただし、湾口境界条件の予報精度に関する本質的な問題が明らかとなり、過去データのみ推定する予報手法そのものの変更も含めた改良が必要であることが判明した。

4. 結 論

野見湾（高知県須崎市）を対象として、観測システムと数値モデルを統合した流動・水質予報システムを構築した。本システムは4日前の観測データに基づいて3日先までの流動と水質を予報するものであり、世界初の試みである。主要な結論を以下に示す。

- ①本システムの予報結果は、夏季の内部潮汐に伴う植物プランクトンや貧酸素水塊の挙動、および、夏季より秋季に顕著となる貧酸素化現象など野見湾の特有の水質変化が再現・予報できた。
- ②本システムの予報精度は、溶存酸素で約2 mg/L、植物プランクトンで約0.2 mgC/Lとなり、ほぼ実用性のある範囲にあると判断された。
- ③過去の観測データに基づいて湾口部境界条件を推定していることから、予報期間中に湾外で新たに発生した水質変化の影響を取り込むことが不可能であり、このような現象が生じた場合、予報精度は大きく低下することが本システムの本質的な問題点として示された。

謝辞：本研究は農林水産省民間結集型アグリビジネス創出技術開発事業の一部で実施された。また、野見漁協、大谷漁協、須崎市水産課から多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 上野成三・永田良助・山崎英活・中山哲蔵(2002)：赤潮・貧酸素をリアルタイムに観測する野見湾漁場環境情報システム(nomi BAY WATCH SYSTEM)の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1531-1535。
- 上野成三・中山哲蔵・山本潤(2004)：野見湾における観測システムと数値モデルを統合した流動予報システムの開発，海岸工学論文集，第51巻，pp. 326-330。
- 山本潤・中山哲蔵・時古学・宮地健司(2002)：野見湾における夏の流況と水質変動に関する現地観測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1086-1090。
- 山本潤・時古学・佐伯信哉・上野成三(2003)：閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測，海岸工学論文集，第50巻，pp. 941-945。
- 山本潤・佐伯信哉(2004)：野見湾での初夏の流況と水質変動及び赤潮発生を捉える現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 951-955。
- Spaulding, M. L., E. Howlett, M. Ward and C. Galagan (2003)：A globally re-locatable, real time, marine environmental monitoring and modeling system, with application to Narragansett bay and southern New England coastal waters, Proc. of 8th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling (ECM 8), pp. 1-16。