閉鎖性海域の赤潮・貧酸素化の予報システムの開発

上野　成三[*1]

Keywords : current, water quality, monitoring system, hydrodynamic simulation, ecosystem simulation
流動，水質，観測システム，流動シミュレーション，生態系シミュレーション

1.　はじめに

閉鎖性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 [1]、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。本論文では、野見湾（高知県須崎市）を対象に流動、水温、塩分、植物プランクトン、溶存酸素などの予報システムを構築し、観測値との比較から予報精度の検証を行った。

なお、野見湾ではリアルタイム観測システムが 2002 年より運用中で、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 1m 間隔）が 1 時間間隔で 24 時間連続計測されている [2]。観測システムの状況として、湾口部観測局を図-1 に示す。

＊1　技術センター土木技術研究所水域・生物環境研究室

2.　予報システムの概要

野見湾の流動・水質の特徴は既往の研究 [3), 4), 5)] 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-2 に示す。予報システムの運用は再現計算と予報計算の２段階で行う。まず、第１段階として、予報計算開始の４日前の時点を計算開始時期とした再現計算を行う。具体的には、湾口観測局

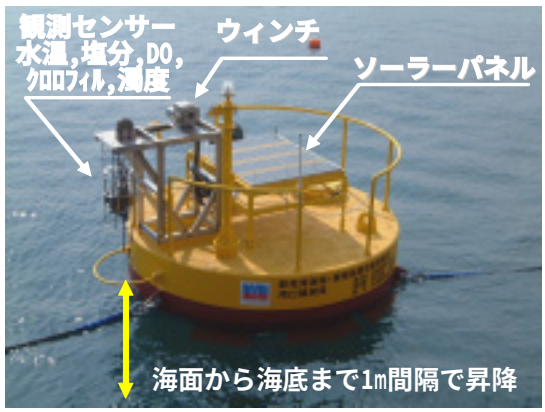

図-1　湾口部観測局の状況
Monitoring Buoy at Bay Mouth

の観測データを用いて、湾内の各変数を一様に設定し、その後、湾口観測局の観測データを用いて作成した湾口部境界データ（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。次に、第２段階として、湾口部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。

湾口部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日以上の長周期成分を合成して作成した。水温の予報値の一例を図-3 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。長周期変動は気温、日射、降雨の気象データと実測の水温・塩分データの相関関係を求めて推定した。図-3 に示した水温時系列を見ると、内部潮汐による約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。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、計算で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-4 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

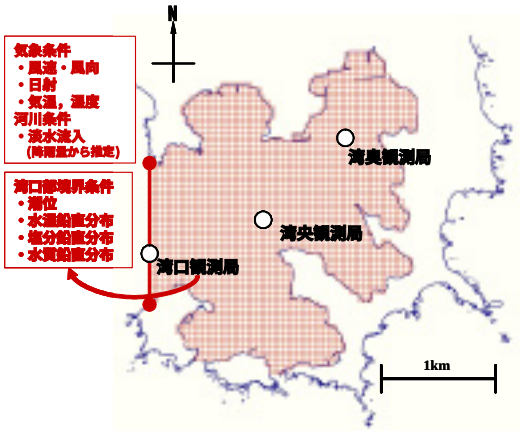

図-2　流動・水質予報システムの概念図
Image of Hydrodynamic and Water Quality Forecast System

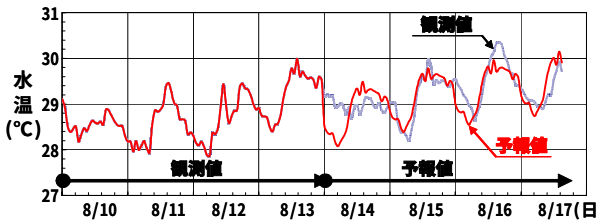

図-3　湾口部境界条件の予報値の作成例
Example of Forecasting Data at Bay Mouth Open Boundary

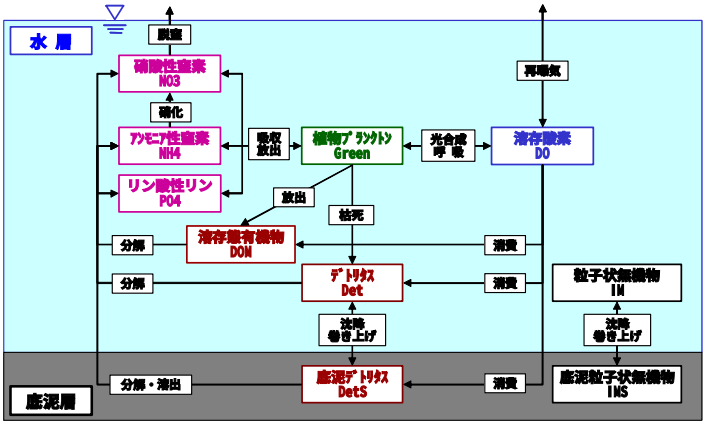

図-4　低次生態系モデルの概要
Outline of Ecosystem Model

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ケースを実施し、各ケースで湾口部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。なお、本論文では、本システムによる予報例として夏季のケースの一部を紹介する。夏季、秋季の両ケースの詳細は既発表論文[6), 7)]を参照されたい。

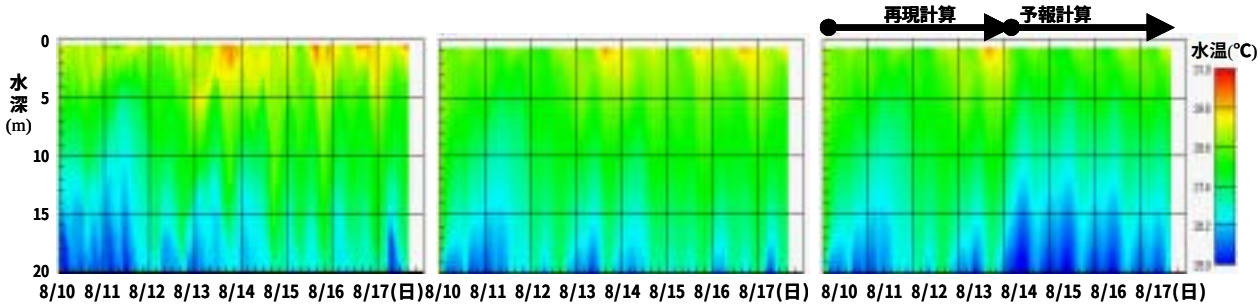

図-5　水温鉛直分布の時間変化コンターの比較（夏季、湾央部）
Comparison of the Time-historical Contours of the Vertical Profile of Water Temperature between the Simulation Data and the Measurement Sata at Center Point of the Bay during Summer

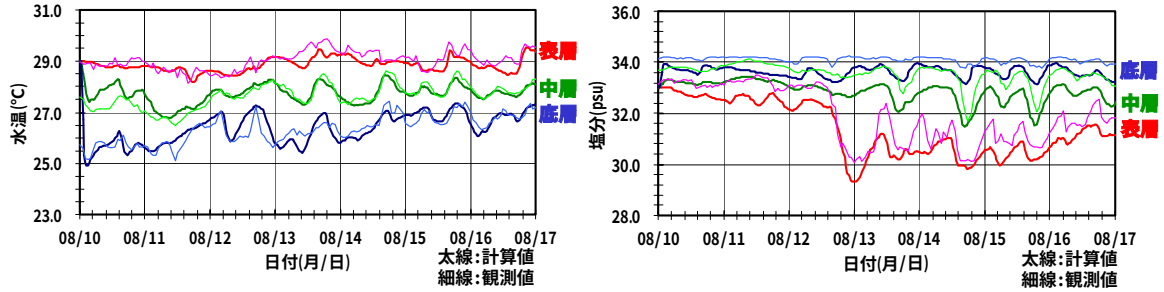

図-6　水温・塩分の経時変化の比較（再現計算：夏季、湾央部）
Comparison of the Time-histories of Water Temperature and Salinity between the Hindcast Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

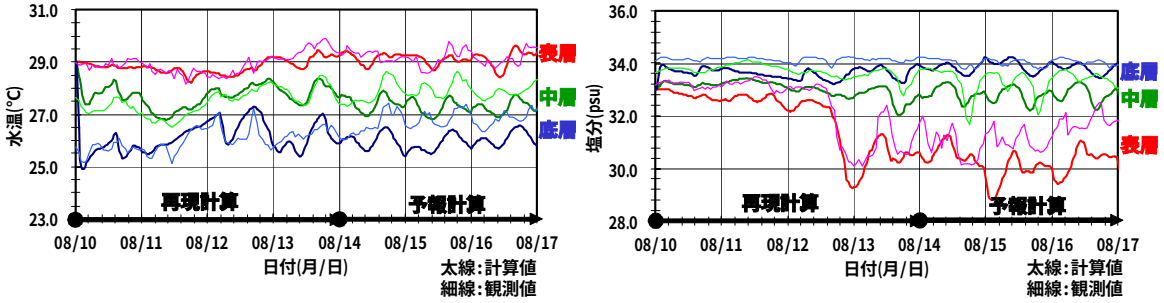

図-7　水温・塩分の経時変化の比較（予報計算：夏季、湾央部）
Comparison of the Time-histories of Water Temperature and Salinity between the Forecast Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

3. 再現計算と予報計算の結果

3.1 流動計算

内部潮汐が卓越する夏季の計算ケースについて、湾央部と湾奥部における水温コンター（水深 - 時間）を観測値、再現値、予報値で比較する（図-5)。観測値では内部潮汐により等水温線が水深の 1/2 以上の振幅で上下に変動しており、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。

表層、中層、底層別の水温と塩分の経時変化を観測値と計算値で比較する。再現計算結果を図-6 に、予報計算結果を図-7 に示す。再現計算結果では、内部潮汐の来襲に伴い大きく変動する観測値(細線)の特徴が、計算値(太線)で良好に再現されている。その一致度は両者のずれ幅が水温で 0.5℃以下、塩分で 1psu 以下となり高精度な再現計算が達成できていると言える。予報計算結果では、再現計算期間（8/10～8/13）では観測値(細線)と計算値(太線)の一致度は良好であるものの、予報計算期間（8/14～8/16）では観測値と予報値のずれ幅が水温で約１℃、塩分で 1-2psu に増大した。ただし、8/14 の予報期間１日目のみに着目すると、両者のずれ幅は大幅に減少し、水温・塩分変動の位相の一致度も高いことが分かる。

以上より、夏季における本流動予報システムによる１日先までの予報精度は実用レベルに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。

3.2 水質計算

内部潮汐が卓越する夏季の計算ケースについて、湾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-8、9)。溶存酸素について、観測値では溶存酸素濃度が 5㎎/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

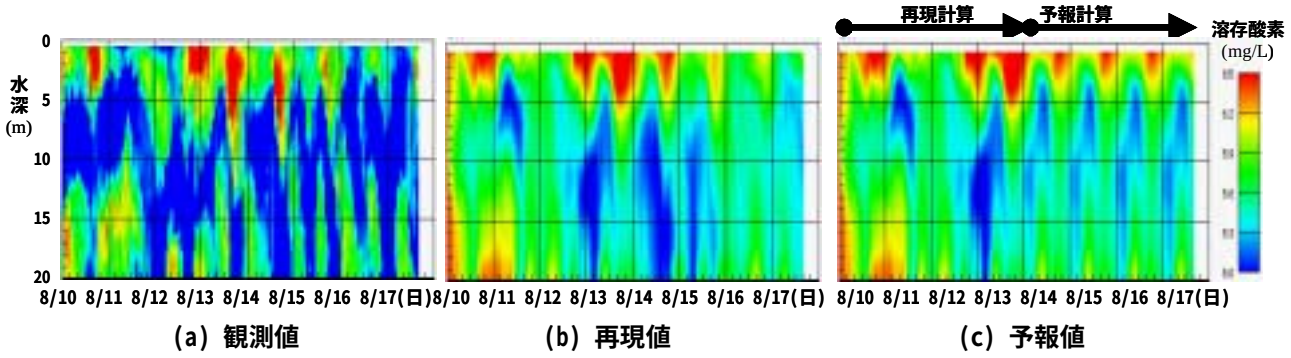

図-8 溶存酸素鉛直分布の時間変化コンターの比較（夏季、湾央部）
Comparison of the Time-historical Contours of the Vertical Profile of Dissolved Oxygen between the Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

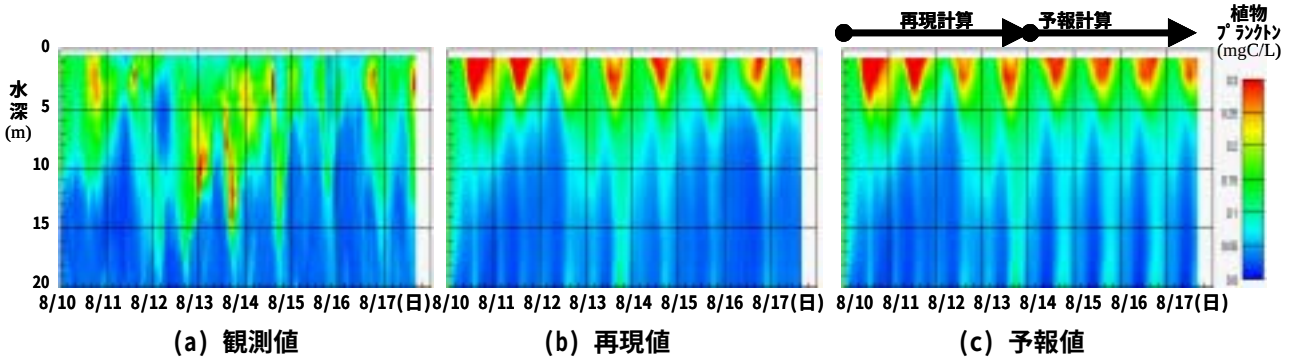

図-9 植物プランクトン鉛直分布の時間変化コンターの比較（夏季、湾央部）
Comparison of the Time-historical Contours of the Vertical Profile of Phyto-plankton between the Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

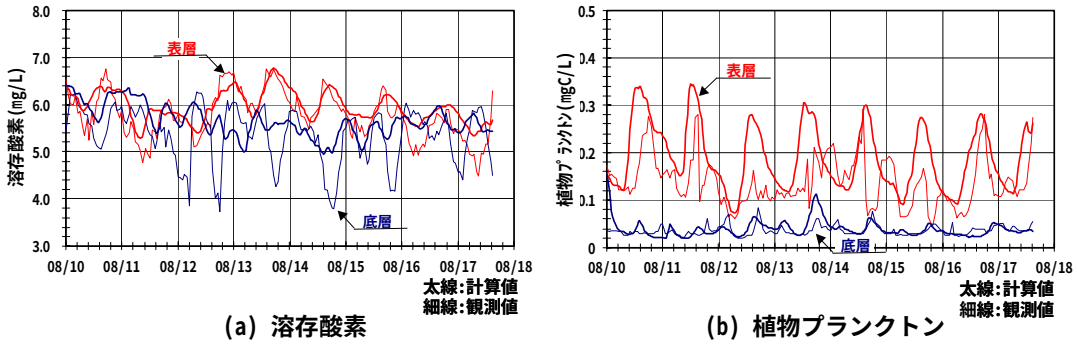

図-10　溶存酸素・植物プランクトンの経時変化の比較（再現計算：夏季、湾央部）
Comparison of the Time-histories of Dissolved Oxygen and Phyto-plankton between the Hindcast Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

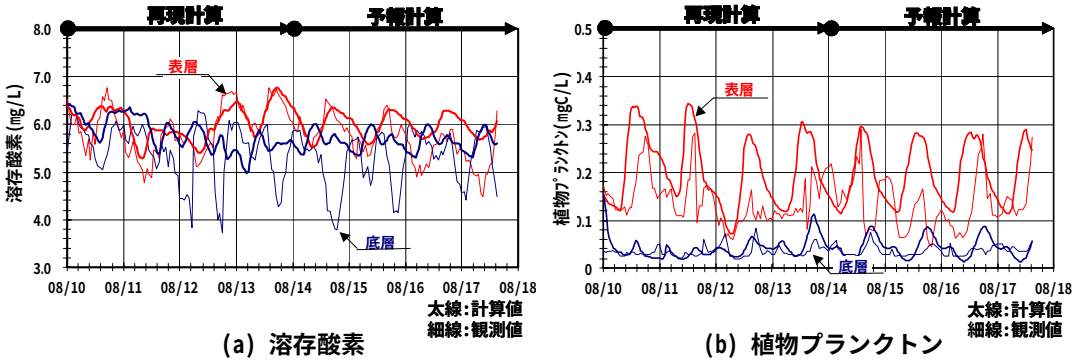

図-11　溶存酸素・植物プランクトンの経時変化の比較（予報計算：夏季、湾央部）
Comparison of the Time-histories of Dissolved Oxygen and Phyto-plankton between the Forecast Simulation Data and the Measurement Data at Center Point of the Bay during Summer

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 0.2mgC/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-10 に、予報計算結果を図-11 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 1mg/L、植物プランクトンで約 0.2mgC/L となり、予報計算精度は溶存酸素で約 2mg/L、植物プランクトンで約 0.2mgC/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。

4.　結論

海洋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開発し、野見湾（高知県須崎市）を対象として予報精度の検証を行った。

本研究の主要な結論を以下に示す。

1)内部潮汐が卓越する夏季における流動予報システムの計算結果は、観測値で見られた内部潮汐に伴う水温・塩分変動が良好に再現できた。その予報精度は、

水温で約１℃、塩分で 1-2psu となり、１日先までの予報精度は実用レベルに達していると言える。

2)本システムの水質予報結果は、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など野見湾の特有の水質変化が再現できた。また、その予報精度は、溶存酸素で約 2mg/L、植物プランクトンで約 0.2mgC/L となり、ほぼ実用性のある範囲にあると判断された。

3)本システムの課題として、予報計算誤差の主要因である湾口部境界条件の予報値の精度向上が上げられる。また、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。

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。ここに謝意を表す。

参考文献

1） Spaulding, M. L., E. Howlett, M. Ward and C. Galagan: A globally re-locatable, real time, marine environmental monitoring and modeling system, with application toNarragansett bay and southern New England coastal waters, Proc. of 8th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling (ECM 8), pp.1-16, 2003.

2） 上野成三・永田良助・山崎英活・中山哲巖：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, 2002.

3） 山本潤・中山哲巖・時吉学・宮地健司：野見湾における夏期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, 2002.

4） 山本潤・時吉学・佐伯信哉・上野成三：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, 2003.

5） 山本潤・佐伯信哉：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, 2004.

6） 上野成三・中山哲巖・山本潤：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, 2004.

7） 上野成三・織田幸伸・中山哲巖：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, 海岸工学論文集, 第 52 巻,2005（印刷中）.