

気象場による攪乱を受けた伊勢湾・三河湾の 貧酸素水塊の挙動の再現計算

A SIMULATION OF OXYGEN-DEFICIENT WATER MASS
IN ISE-MIKAWA BAY AFFECTED BY METEOROLOGICAL DISTURBANCES

鵜飼亮行¹・村上智一²・安田孝志³

Akiyuki UKAI, Tomokazu MURAKAMI and Takashi YASUDA

¹正会員 工修 岐阜大学 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 博(工) 名古屋大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

Ise Bay and Mikawa Bay are typical semi-enclosed bays. For this reason in both bays oxygen-deficient water mass is generated mainly during summer and has caused heavy damage to the sea area environment. It is important to reduce the generation of the oxygen-deficient water mass to improve the sea area environment of both bays.

In this research, numerical modeling of oxygen-deficient water mass is added to an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model that can estimate coastal currents appropriately. Then, predictions of this model are compared and show excellent agreement with field observations.

Key Words : *Oxygen-deficient water mass, Numerical simulation, Ise-Mikawa Bay*

1. はじめに

伊勢湾・三河湾においては、夏季を中心にして底層近傍のDO濃度が3mg/Lを下回る貧酸素水塊が発生し、漁業生産や生物の生息、水質などの海域環境に大きな問題が生じている。

伊勢湾・三河湾の生物を含めた海域環境を改善するには、この貧酸素水塊を軽減・改善することが最も重要な課題である。その対応策を検討するためには、貧酸素水塊の挙動の実態を把握することがまず必要である。

これまでも現地観測記録が精力的に蓄積され、実態を把握するための貴重なデータとなっているものの、観測地点や観測間隔に限られるため、湾全体での現象の把握や対応策を検討するには数値シミュレーション手法が必要であり、高精度手法の確立が必須の課題となっている。

このとき、台風通過後などに生じる苦潮(青潮)のように、風を要因とする湾内流動が海域環境に大きな影響を与えることがあるので、数値シミュレーションにおける気象場の評価は重要な要素といえる。これまでも、数値シミュレーションによる検討が進められてきたが、気象場は観測値や10km格子で6時間毎に提供されるメソ客

観解析値を用いるなどの簡略化されたものであり、局所的に数時間の規模で発生する苦潮などの現象を検討するうえで、データの密度や時間間隔などは必ずしも十分とは言えない。

そこで、本研究では、伊勢湾および三河湾(主に三河湾)を対象に、気象場の影響を強く受ける場での貧酸素水塊の挙動を評価することを目的として、気象場の影響を高精度で考慮できる大気-海洋-波浪結合モデルにDO濃度評価モデルを組み込んだ数値シミュレーション手法を開発し、解析結果と現地観測結果とを比較することにより精度検証を行い、その有用性を明らかにした。

2. DO濃度評価モデルを組み込んだ大気-海洋-波浪結合モデル

(1) 解析手法の方針

三河湾では、風によって貧酸素水塊が浅場へ湧昇する苦潮(青潮)による被害は周知のとおりであるが、三河湾の海況自動観測ブイの記録から、最近10年くらいの短

い期間における貧酸素水塊の変動は、気象・海象の要因が主体となっているとの報告もある¹⁾。

このことから、三河湾の貧酸素水塊の挙動を把握するためには、気象場による影響を受けた湾内流動場を精度良く評価することが重要であると考え、気象場を高精度で評価できる大気-海洋-波浪結合モデル^{2),3)}にDO濃度評価モデルを組み込み、貧酸素水塊の挙動を解析できるようにした。

計算を進めるにあたり、湾内の移流や鉛直拡散の影響を精度良く反映させるため、DO濃度評価モデルを先の結合モデルに直接組み込み、気象場、波浪場および海洋場（湾内流動、水温、塩分）と同時に解くことにした。また、DO濃度評価モデルは、初期場を現地観測値を基にできる限り適切に与えること、計算対象期間を1ヶ月程度としてその期間中の湾内流動による貧酸素水塊の挙動の再現を主目的とすること、および効率的な計算を行うことを考えて、簡易的なモデルを用いることにした。

(2) 大気-海洋-波浪結合モデルの概要

伊勢湾および三河湾のような内湾における貧酸素水塊などの水質環境を検討するには、外洋との海水交換の影響はもちろん、地形の影響を強く受けた局所的な沿岸域の特徴を精度よく評価し、考慮できることが重要である。

また、三河湾のように水深が浅く、閉鎖性が強い海域では、風による吹送流、風波砕波による海水混合、日射による成層化および降雨・蒸発等の気象場の影響が支配的になると考えられる。

このようなことから、本研究では、湾内流動の評価を村上ら^{2),3)}により提案されている大気-海洋-波浪結合モデルにより行った。このモデルは、図-1に示すように気象場解析モデル(MM5)、波浪場解析モデル(SWAN)および海洋モデル(CCM)の3つのモデルを結合させて、海面で相互に作用される各種パラメタを各モデル間で交換しながら計算を進めるものである。ここで、MM5はペンシルバニア州立大学・米国大気研究センターで、SWANはデルフト工科大学で開発されたもので、CCMは村上ら²⁾による多重座標モデルである。なお、本結合モデルでは、各モデル間のデータ交換を、気象場は2km格子、海洋場および波浪場はほぼ1km格子で、10分毎に行っている。

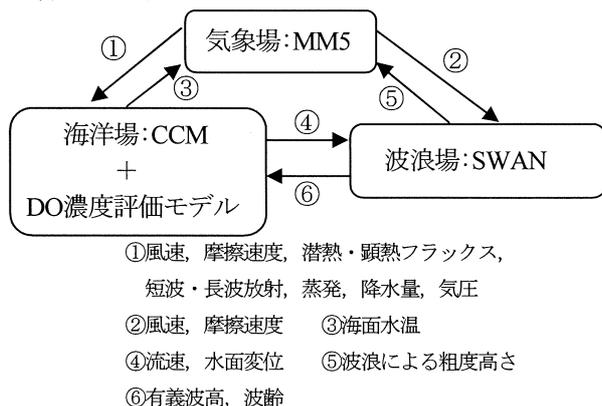


図-1 大気-海洋-波浪モデルの相互関係

(3) DO濃度評価モデルの概要

DO濃度評価モデルは、前述の考えから、DO濃度、植物プランクトンを含む有機物、および無機栄養塩の3要素を代表変数とする佐々木ら⁴⁾の簡易水質モデルを用いた。図-2に各代表変数の関係を示す。

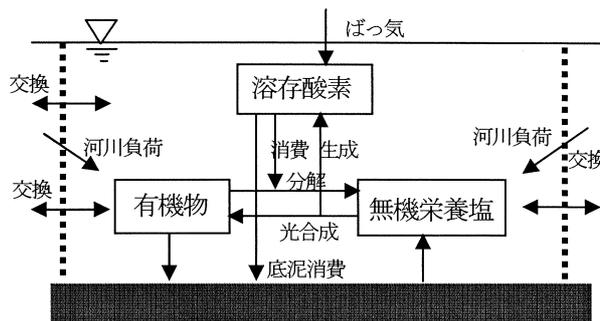


図-2 簡易水質モデルの概念図

この簡易水質モデルは、有機物濃度を植物プランクトンの量に比例するとして動植物プランクトンの標準的な化学式で与え、無機栄養塩は、東京湾での植物プランクトンの光合成の制限因子がリンであるとの考えから、リンの主要な形態であるリン酸性リンを用いている。このモデルは、東京湾に対して適用され、現地観測値をよく再現することが確認されている⁴⁾。

伊勢湾および三河湾においても東京湾と同様に、夏季の植物プランクトンの大増殖による赤潮が頻繁に発生するため、動物プランクトン、その排泄物および死骸の量は、植物プランクトンの量に比例すると考えられること、植物プランクトンの光合成の制限栄養塩類はリンであること⁵⁾から、このモデルを伊勢湾および三河湾にも適用できると考えた。

この簡易水質モデルでは、植物プランクトンの成長速度を算定するために用いる光強度を、現地調査結果を基にした透明度とクロロフィル(a)の関係から設定している。このモデルを伊勢湾および三河湾に適用するにあたり、透明度 Z_T とクロロフィル(a)濃度 C_{hl} の関係を、後述する現地調査結果から図-3に示す曲線のように求めた。この曲線は、次式で表される。

$$Z_T = -1.2517 \ln(C_{hl}) + 6.1208 \quad (1)$$

また、このモデルでは海底での酸素消費および無機栄養塩の溶出を沈降・堆積した有機物の死骸および排泄物

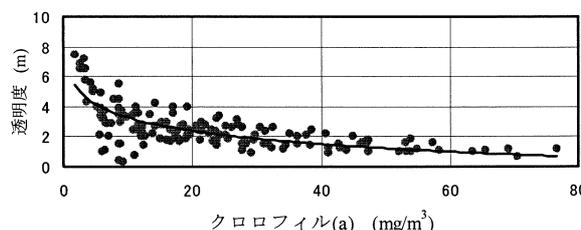


図-3 伊勢湾・三河湾における透明度とクロロフィル(a)との関係

の量に比例するとして、堆積有機物量から求めている。この堆積有機物量は、一定期間中の最下層格子の有機物濃度の積分として与えられており、佐々木ら⁴⁾では、その期間について1日間および3日間について計算し、感度分析を行っている。本研究においては、3日間での計算結果が三河湾のDO濃度を良く再現していたので、これを用いている。

3. 初期値および検証に用いた現地観測調査

本研究による解析手法の検証および初期条件の設定には、2003年6月～11月にかけて伊勢湾および三河湾で行われた水質に関する現地観測調査⁹⁾の結果を用いた。この現地調査では、主に伊勢湾および三河湾の湾奥部を対象に行われており、その調査地点位置図を図-4に○印で示す。現地調査は、伊勢湾では11地点について14回、三河湾では14地点について23回実施している。

この現地調査は、貧酸素水塊の発生から消滅までを捉えることで、伊勢湾および三河湾における貧酸素水塊の発生から消滅にいたる過程に関わる要因を把握しようと試みたものであり、いくつかの有益な知見が得られている。

観測項目は、多項目水質計およびDO計による、水温、塩分、DO濃度、濁度およびクロロフィル(a)であり、調査地点ごとに表層(水面下0.5m)から底面(海底上1m)の間を1mピッチで観測しており、各地点の各項目についての鉛直分布が面的に得られている。

数値解析の初期条件は、各観測項目の鉛直分布を空間的に補間して与えることで、できる限り現地の状況に近い条件として設定した。

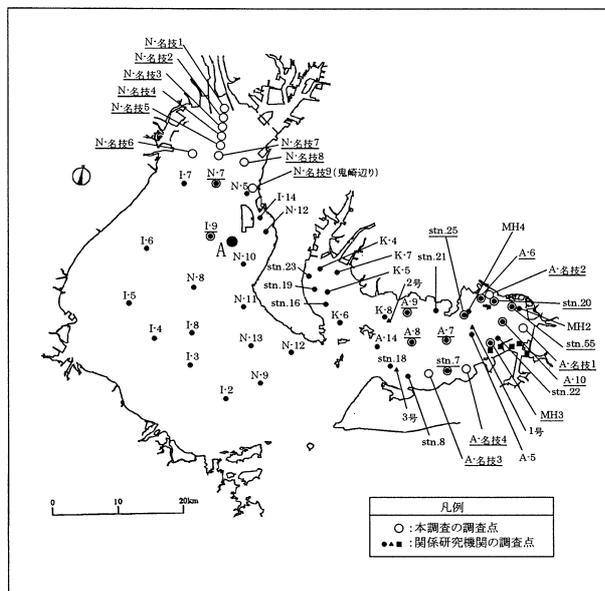


図-4 現地調査地点位置図 (赤石ら, 2005)

4. 水質環境の再現計算とその検証

(1) 計算対象期間と計算条件

計算対象期間は、上述の現地調査期間のうち、初期条件を適切に与えるため伊勢湾および三河湾で同時期の観測データがある日時を計算開始時とし、その後の特徴のある貧酸素水塊の挙動が観測された期間を選んだ。ここでは、2003年8月9日前後の台風通過後に貧酸素水塊がいったん解消し、その後再び貧酸素水塊が拡大していった期間として、2003年8月6日～22日までについて計算を行った。

また、計算条件を表-1に、計算領域を図-5に示した。

表-1 各モデルの計算条件

気象モデル MM5	水平格子数	45×45 (東西×南北) ネスティング (3領域) の最終領域
	鉛直層数	20層
	タイムステップ	9秒
	水平解像度	2km×2km
	大気境界層スキーム	Blackadar scheme
	初期値・境界値	気象庁メソ客観解析値 (6時間間隔, 10km格子, 20層)
海洋モデル CCM + DO評価モデル	水平格子数	99×97 (東西×南北)
	タイムステップ	10秒
	水平解像度	0.763km×0.924km
	σ座標の適用領域数	5
	各領域の層数の合計	27
初期値・境界値	・日本周辺潮汐モデル NA099Jb ⁷⁾ ・現地観測値 ⁹⁾ ・気候値 ⁸⁾ ・河川流量データ (国土交通 省中部地方整備局)	
波浪モデル SWAN	水平格子数	99×97 (東西×南北)
	タイムステップ	5分
結合モデル	水平解像度	0.763km×0.924km
	交換時間間隔	10分

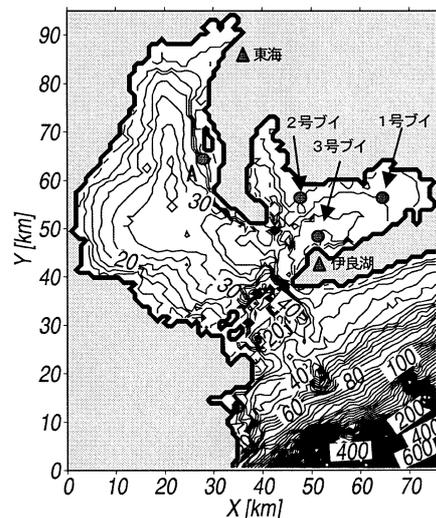


図-5 計算領域

(2) 気象場の再現性

図-6は、気象場の再現性を確認するために、図-4の図中に示した伊勢湾内のA地点における海上風についてMM5による計算値と観測値を比較したものである。図中には、周辺のアメダス観測地点である東海地点および渥美半島上の伊良湖地点での観測値も示している。

MM5による計算値は、風速の比較的小さな場合に若干過大評価となっている部分が見られるものの、実測値を良く再現している。ここに示したアメダス観測地点のデータは、補正を加えていない値であるが、陸地の観測地点である東海地点のデータと海上風の値の差は大きく、このような陸域のデータを用いて海上風を評価することは難しいことがわかる。一方、地点は離れているものの伊良湖地点は、渥美半島の先端付近であることから海上風の特徴に近い値が観測されていることがわかるが、このようなデータにおいても、海上風との差は2倍程度ある。

また、三河湾における海上風の観測値が入手できていないため、計算結果による比較ではあるが、伊勢湾の海上風と三河湾の海上風の風速と風向の比較を図-7に示した。伊勢湾は湾奥に近いI-9観測地点、三河湾は湾奥の愛知県水産試験場の1号ブイ地点である。8月9日前後の台風通過時の風速は、両地点であまり変わらないが、それ以外の期間では、変動に若干のずれがあり、三河湾の1号ブイ地点の風速に比べ伊勢湾のI-9地点の風速が小さい期間もあり、局所的な差がみられた。一方、風向については両者に明確な差異はみられない。

現地観測データから海上風を予測するには、十分な観

測データを基にした補正が必要と考えられること、伊勢湾と三河湾では条件によっては両地点の風速に差が見られることを考えると、風の影響を大きく受ける場でのMM5による気象場の評価は、湾内流動の計算精度を向上させると考えられる。

(3) 気象場の湾内流動への影響

風が湾内流動に及ぼす影響をみるために、表層および底層の流況と、同一地点の風の場の計算結果を比較した。

図-8は三河湾の湾奥に位置する1号ブイ地点（水深10m）での計算結果について示したものであり、表層は水面下1m、底層は水面下8.6mでの値である。ここに示した流速は、潮位の日周期の影響を除去するため24時間平均により平滑化したもので、流向についても同様である。なお、ここでは風向との比較を容易にするため、流向の定義を風向のものと同じとした。参考のために豊川および矢作川の河川流量の観測値も示している。

潮汐の変動のためか、表層および底層ともに流速と風速には明瞭な関係は見られないが、表層の流向と風向は、

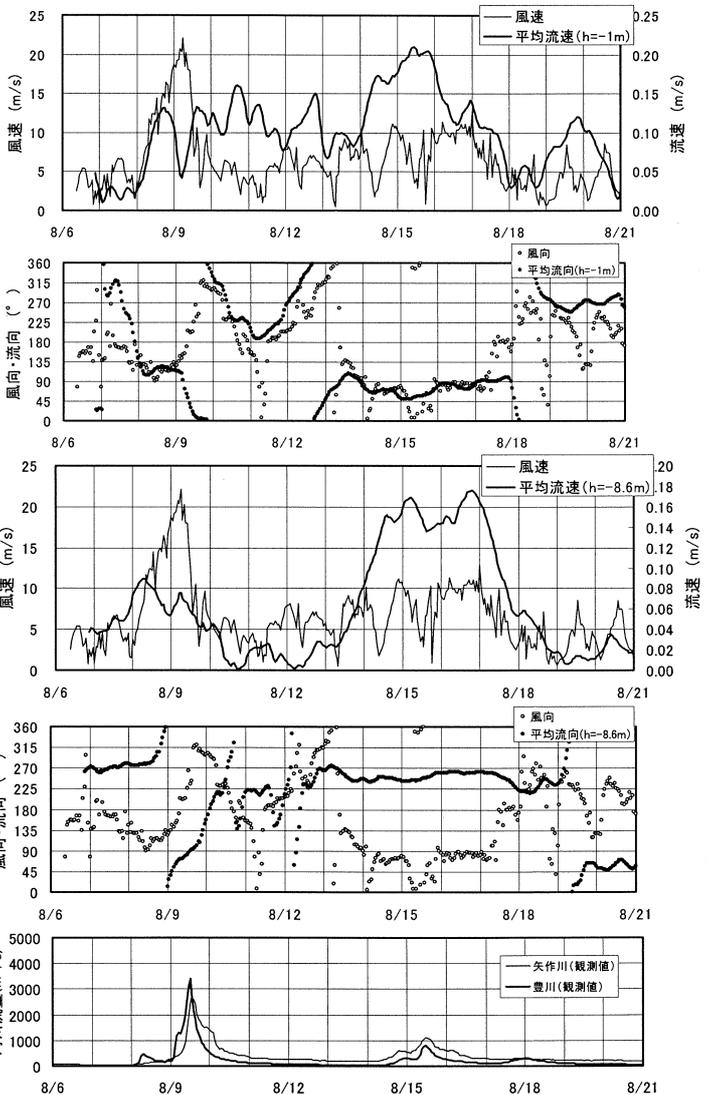


図-8 流速・流向と風速・風向の関係（1号ブイ）
（上段：表層，中段：下層，下段：河川流量）

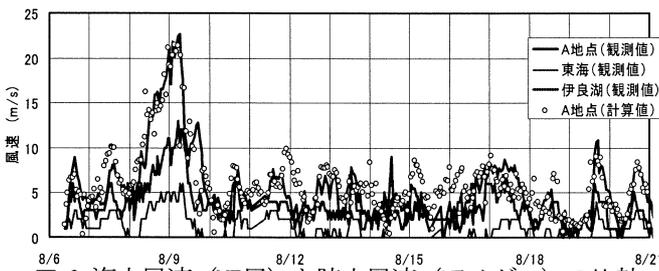


図-6 海上風速 (MT局) と陸上風速 (アメダス) の比較

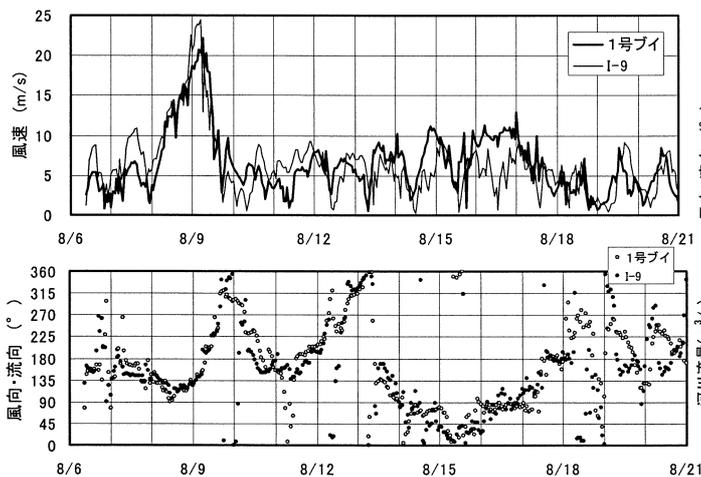


図-7 伊勢湾と三河湾の海上風の比較（計算値）

8月9日の台風通過直後の大きな出水時を除き、ほぼ同様な方向を示している。このことから、表層水の流動に風が大きく影響していることは明らかである。ただし、8月15日前後にも連続した降雨による河川流量の増大が見られるが、この期間の風向きが東よりであることを考えると豊川からの河川流量による流れの方向と一致していたものと考えられる。

底層の流向は表層の流向とほぼ反対方向となっており、風による吹送流および河川水による表層の流れを補間するエスチュアリー循環が生じていることがわかる。

流速値は、潮汐の変動の影響を除去できていないのでわかり難いが、その影響が現れない流向でみると海上風が河川水とともに湾内流動に影響を及ぼしていることがわかる。

(4) 水質環境の再現性

計算対象期間中の水温、塩分、DO濃度の経時変化についての計算値と実測値の比較を図-9に示した。三河湾においては経時的な水質データが愛知県水産試験場の1号～3号ブイにより観測されており、ここでは1号ブイで観測された値を示している。なお、この自動観測ブイによる観測データは愛知県水産試験場のホームページ(<http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/>)で公開されている値を用いている。また、図中には、矢作川および豊川の河川流量および伊良湖地点での風速の計算結果も合わせて示している。

計算対象期間は、三河湾において底層が貧酸素状態となっていた8月6日を初期条件とし、その後の8月9日前後の台風とそれに伴う出水の影響、8月15日前後のまとまった降雨による影響を受けた期間となっている。

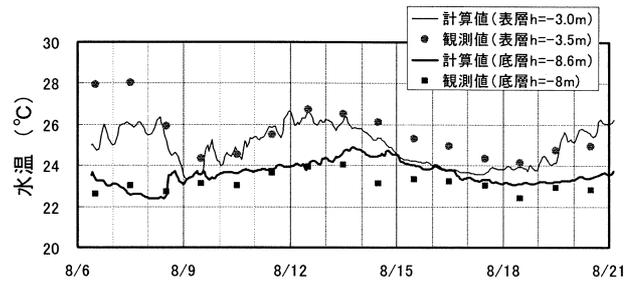
まず、水温と塩分をみると台風通過時の鉛直混合により成層が弱まる状況、その後の河川水の影響と思われる表層塩分の低下とそれに伴う成層の強化が良く再現されている。また、DO濃度についてみると、台風通過時の急激な底層貧酸素状態の解消やその後の成層化にともなう底層の貧酸素化の状況を良く再現している。

また、三河湾の湾央に位置するA8地点および湾奥のA10地点における水温、塩分およびDO濃度の鉛直分布について、計算値と観測値を比較したものを図-10および図-11に示した。鉛直分布においても、鉛直混合による成層や底層貧酸素の解消や、その後の成層化に伴う貧酸素化の状況についてその変化の傾向を良く再現していることがわかる。

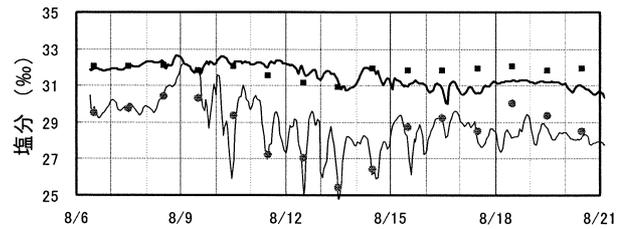
5. おわりに

本研究では、気象場の影響を大きく受ける場での貧酸素水塊の挙動を評価することを目的に、大気-海洋-波浪結合モデルにDO濃度評価モデルを組み込んだ数値シミュレーション手法を開発した。この手法を台風通過時の伊勢湾および三河湾に適用し、現地観測結果と比較した結果、気象場の変動や河川水の影響によるDO濃度の経

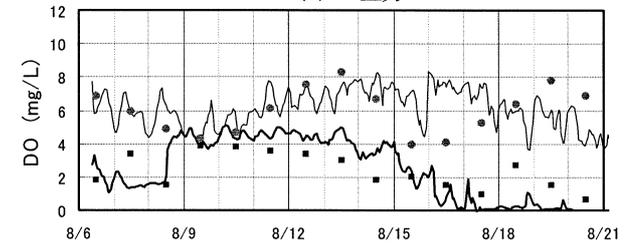
時的な変動や鉛直分布を精度よく再現できた。このことから、本手法が気象場の影響を強く受ける貧酸素水塊の挙動の検討に有用であることを明らかにした。



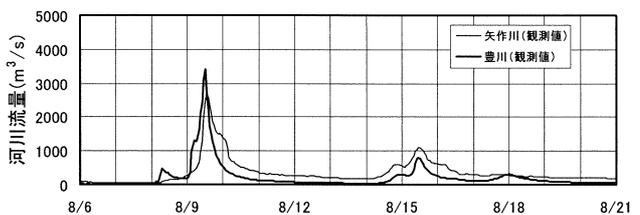
(1) 水温



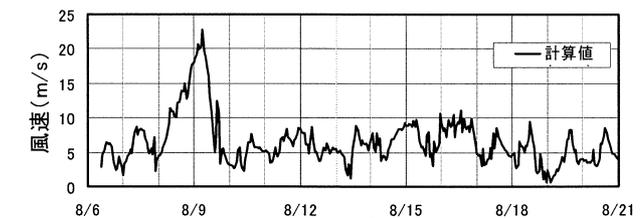
(2) 塩分



(3) DO濃度

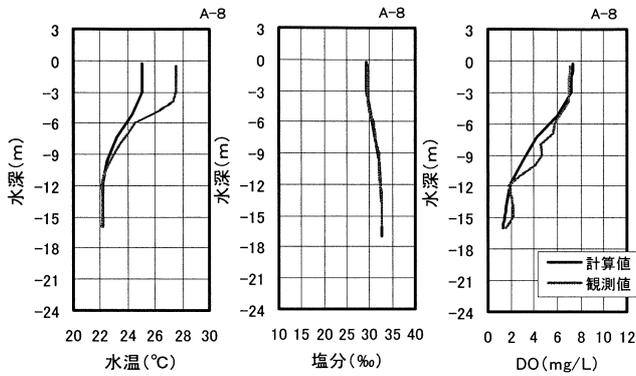


(4) 河川流量

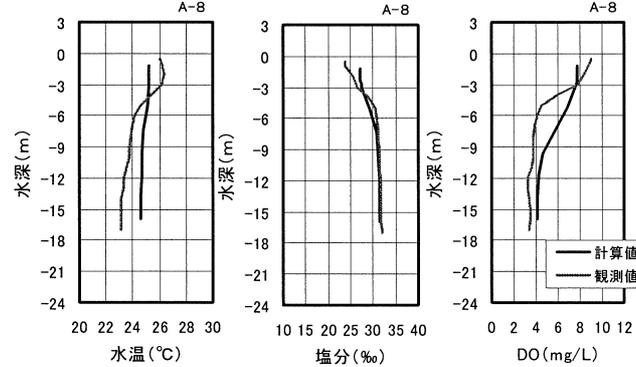


(5) 風速

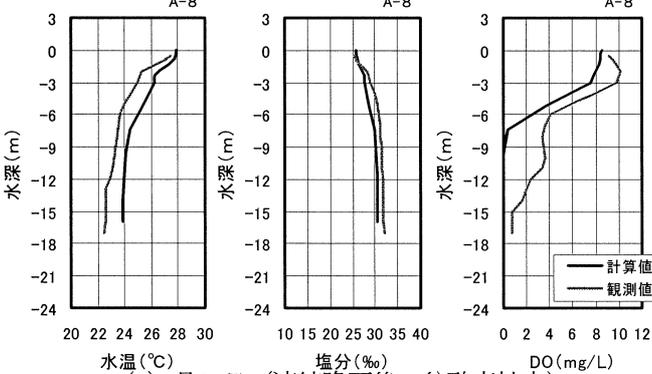
図-9 三河湾奥部での各種諸量の経時変化 (1号ブイ)



(1) 初期値：8月6日（底層で貧酸素状態）

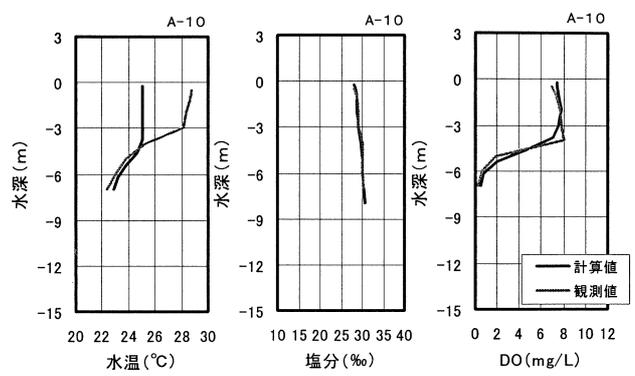


(2) 8月14日（台風通過による貧酸素縮小）

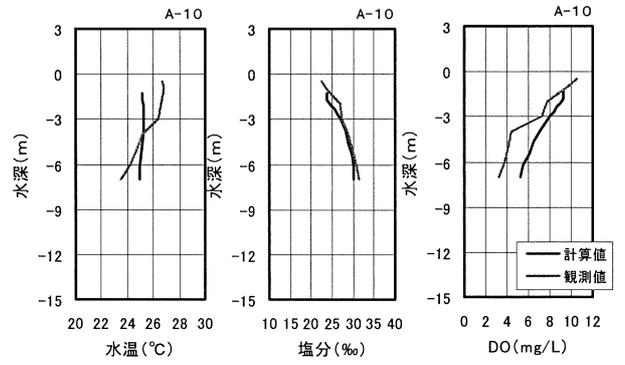


(3) 8月22日（連続降雨後の貧酸素拡大）

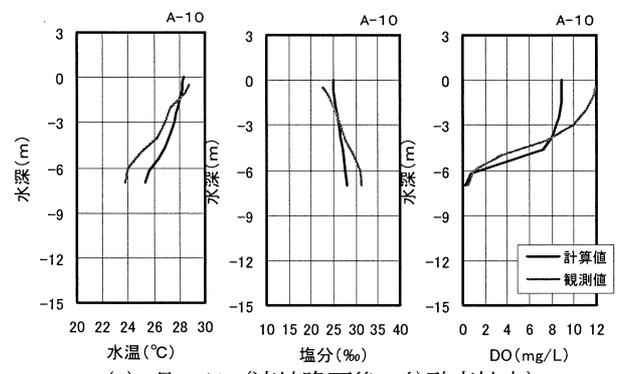
図-10 水温・塩分・DO濃度の比較（A-8地点）



(1) 初期値：8月6日（底層で貧酸素状態）



(2) 8月14日（台風通過による貧酸素縮小）



(3) 8月22日（連続降雨後の貧酸素拡大）

図-11 水温・塩分・DO濃度の比較（A-10地点）

謝辞：現地調査結果および河川流量データを提供していただいた国土交通省中部地方整備局、海洋観測データを提供していただいた愛知県企業庁・中部国際空港株式会社および現地調査に関する助言をいただいた（財）港湾空間高度化環境研究センター大島専門部長、国土環境（株）青井氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 青山裕晃, 石田基雄, 木村仁美：海況自動観測ブイ10ヶ年観測結果（1991～2000年）からみられる三河湾の赤潮と貧酸素, 愛知水試研報第9号, pp.1-10, 2002.
- 2) 村上智一, 安田孝志, 大澤輝夫：気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重σ座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.366-370, 2004.
- 3) 村上智一, 久保田踊児, 吉野 純, 大澤輝夫, 安田孝志：パースト層モデルを組み込んだ強風下大気-海洋-波浪結合モデル, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.316-320, 2005.

- 4) 佐々木淳, 今井誠, 磯辺雅彦：内湾における溶存酸素濃度予測モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1091-1095, 1997.
- 5) 関口秀夫：伊勢湾の環境保全のための総合調査マニュアル-伊勢湾の環境保全と開発・利用のあり方-, 三重県, 2003.
- 6) 赤石正廣, 大島 巖, 鶴飼亮行, 青井浩二, 黒田伸郎：現地観測による伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動の把握, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.391-396, 2005.
- 7) Matsumoto, K., T. Tanaezawa and M. Ooe : *Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional around Japan.* J. Oceanography, 56, pp.567-581, 2000.
- 8) Sekine, Y. and H. Mizutani : *Seasonal variation in vertical distribution of temperature, salinity and density in- and off Ise Bay,* Bull. Fac. Bioresources, Mie Univ. No.10, pp.147-164,1993.