

# 現地観測および数値解析による伊勢湾・三河湾の 貧酸素水塊形成要因の比較

鵜飼亮行<sup>1</sup>・村上智一<sup>2</sup>・安田孝志<sup>3</sup>

伊勢湾および三河湾においては、夏季を中心に底層近傍で貧酸素水塊が発生し、漁業生産や生物の生息などの海域環境に大きな問題が生じている。この海域環境の改善には、貧酸素水塊の挙動を十分把握したうえで軽減・改善のための効果的な対応策を検討する必要がある。しかし、現状では、それぞれにおける貧酸素水塊の形成要因や挙動は、十分把握されているとはいえない。本研究では、伊勢湾および三河湾で実施した現地観測に基づき、気象の影響を精度良く考慮した数値解析を実施し、得られた湾内流動構造の解析結果から二つの湾で異なる貧酸素水塊の形成要因を明らかにした。

## 1. はじめに

伊勢湾および三河湾においては、夏季を中心に底層近傍で貧酸素水塊が発生し、漁業生産や生物の生息などの海域環境に大きな影響が生じている。この海域環境の改善には、まず、貧酸素水塊の挙動とともに、その形成要因について把握することが重要である。貧酸素水塊の軽減や改善のための効果的な対応策を検討するためには、その特性を踏まえることが必要である。

貧酸素水塊の形成要因を把握するためには、現地観測データに基づいた考察を行うことが最も良い方法であると考えられる。一方で、閉鎖性が強い海域の貧酸素水塊の形成や成長のメカニズムを明確にし、それに寄与する要因を把握するためには、湾内全体での挙動について検討することが必要である。

しかしながら、観測データの取得は、時間的および空間的に限界があり、湾内全体における貧酸素水塊の挙動や形成のメカニズムを観測データのみで把握することは困難である。これを補うための数値シミュレーションを用いた検討は、データの信頼性に関して観測データより劣ることは否めないが、情報量の多さでは大いに勝るため、湾内全体における貧酸素水塊の挙動やその形成要因を検討するためには非常に有用であるといえる。

本研究では、伊勢湾および三河湾で実施した現地観測に基づき、気象の影響を精度良く考慮した数値シミュレーションを実施し、それにより得られた湾内流動構造の計算結果から二つの湾で異なる貧酸素水塊の形成要因を明らかにした。

## 2. 数値解析による湾内流動と DO 濃度の再現

赤石ら (2005) により、伊勢湾および三河湾における

貧酸素水塊の発生から成長、消滅までのプロセスの実態を把握するための現地調査が 2003 年 6 月から 11 月にかけて行われた。その期間中で貧酸素水塊の拡大が顕著であった 8 月を対象に数値シミュレーションによる再現計算を行った。この再現計算の結果から得られる湾内流動の構造から貧酸素水塊の形成要因を考察することにした。

本研究で用いた数値シミュレーション手法およびその解析結果は、著者らが行った検討 (鵜飼ら, 2006) によるものを用いた。ここでは、詳細を省き、計算手法の概要と再現計算の結果のみを示す。

### (1) 数値シミュレーション手法の概要

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がある (青山ら, 2002)。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、これらを高精度で評価できる村上ら (2004, 2005, 2006) の大気-海洋-波浪結合モデルに 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。結合モデルは、気象モデル (MM5)、海洋モデル (CCM) および波浪モデル (SWAN) の 3 つの基本モデルにより構成されるものである。なお、DO 濃度評価モデルは、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 (1997) の簡易水質モデルを用い、海洋モデル (CCM) に直接組み込んだ。

### (2) 再現計算の計算条件および結果

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 8 月 22 日までとした。この期間では、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た。また、8 月 9 日前後の台風および 8 月 15 日前後のまとまった降雨に伴う出水の影響を受けていた。

1 正会員 工修 岐阜大学大学院工学研究科  
2 正会員 博(工) 名古屋大学助手大学院工学研究科  
3 正会員 工博 岐阜大学教授大学院工学研究科

計算領域を図-1に示す。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-2に示す。

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自動観測ブイにより観測されており、ここでは1号ブイでの値を示している。なお、この自動観測ブイの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の観測値および伊良湖地点での風速の計算結果を合わせて示している。

計算結果では、台風通過時の鉛直混合により成層が弱まり、底層の貧酸素状態が解消している状況や、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および底層の貧酸素化の状況がよく再現されている。

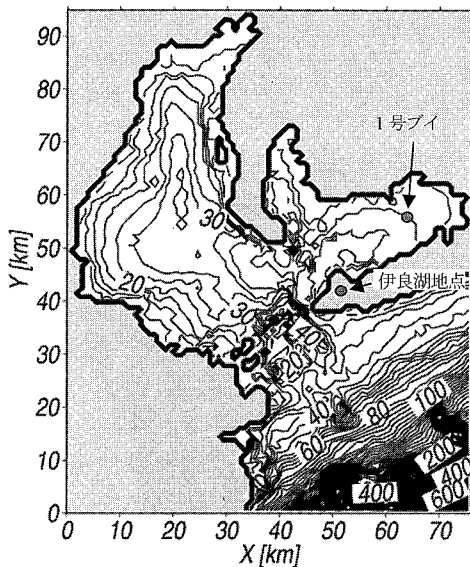


図-1 計算領域

### 3. トレーサーを用いた湾内流動状況の把握

前章に示した数値シミュレーションによる湾内流動の計算結果をもとに、トレーサーの挙動(3次元粒子追跡)を計算し、台風通過時や貧酸素水塊の拡大が顕著であった出水後の湾内流動の特徴を3次元的に確認した。

#### (1) トレーサーによる湾内流動の評価方法

湾内の流動状況を把握するには、湾内をいくつかの領域に分けて検査断面を設定し、それについて流入および流出フラックスを算出し、湾内の流れを定量的に評価することが考えられる。しかし、三河湾のように閉鎖性が強く比較的狭い海域においては、湾内での循環のような

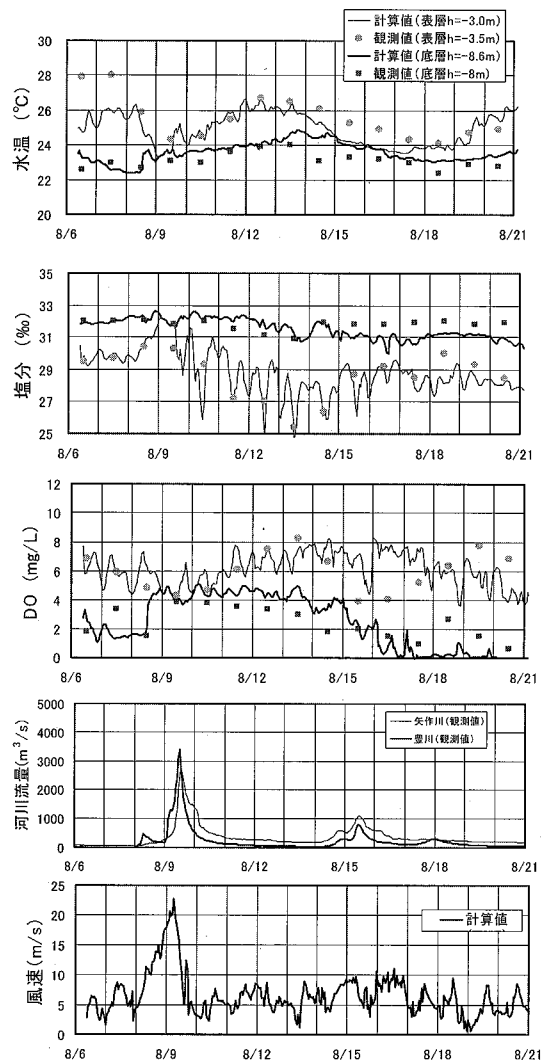
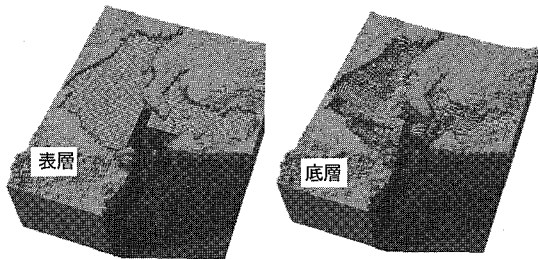


図-2 結合モデルの計算結果(1号ブイ地点)

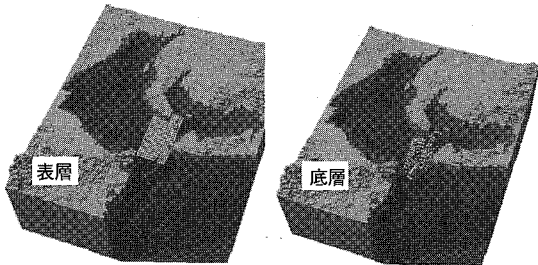
複雑な流動が生じていることが考えられ、フラックスの算出ではその状況の把握は難しい。ここでは、定量的な評価とはならないが、トレーサーの動きを3次元CGアニメーションで表示し、それを確認することで湾内流動の状況を調べることにした。

トレーサーの挙動は、大気-海洋-波浪結合モデルによって求めた計算ステップ毎の流速値をもとに、3次元の移動量および座標を計算した。

湾内の流動状況をわかりやすくするため、把握したい対象ごとにトレーサーの初期配置を設定し、その移動を計算した。ひとつは、湾内での流動とそこからの流出状況を把握するために、湾内の表層および底層にトレーサーを配置したケースで、もうひとつは、湾外からの流入状況を把握するために湾口部周辺から湾外にかけての表



(1) 伊勢湾および三河湾



(2) 湾口部

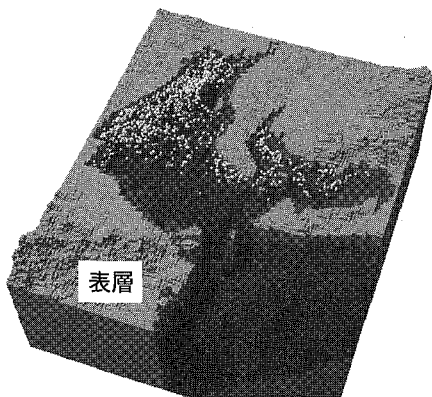
図-3 トレーサーの初期配置

層および底層に配置したケースである。図-3にトレーサーの初期配置を示す。

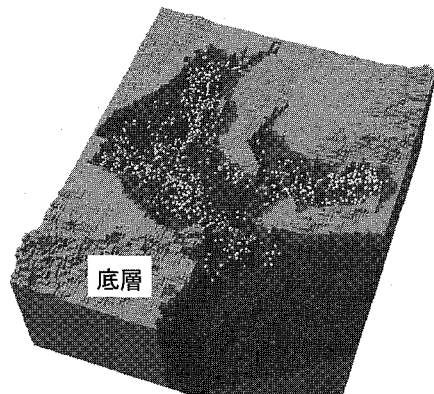
なお、トレーサーの初期位置は、表層は水面下 3 m、底層は海底面上 1 m とし、各領域に 1 km 格子で一様に配置した。また、トレーサーの数は表層および底層ともにそれぞれ、伊勢湾に 1,570 個、三河湾に 619 個、湾口部に 299 個とした。

## (2) 湾内流動状況の把握

図-4 は、台風通過時（南東の強風）の挙動を把握するため、台風通過前日の 8 月 8 日 0:00 を初期値としてトレーサーの移動を計算したもので、1.5 日後について示したものである。1.5 日後なので、トレーサーの位置に潮汐の影響が含まれると考えられるが、台風通過時の特徴的なトレーサーの位置を示していること、トレーサーの移動を見ると台風の影響が潮汐の影響より強いと判断されたことから、ここでは、この時刻のものを示している。表層のトレーサーは風の影響により、伊勢湾では津・四日市沖に、三河湾では北西部（知多湾）に移動している。この表層水の移動に伴い伊勢湾では三重県側の底層が外洋へ流出し、知多半島に沿った外海水の流入が



(1) 伊勢湾および三河湾



(2) 湾口部

図-4 台風通過時のトレーサーの移動状況 (1.5 日後, 初期値: 8 月 8 日 0:00)

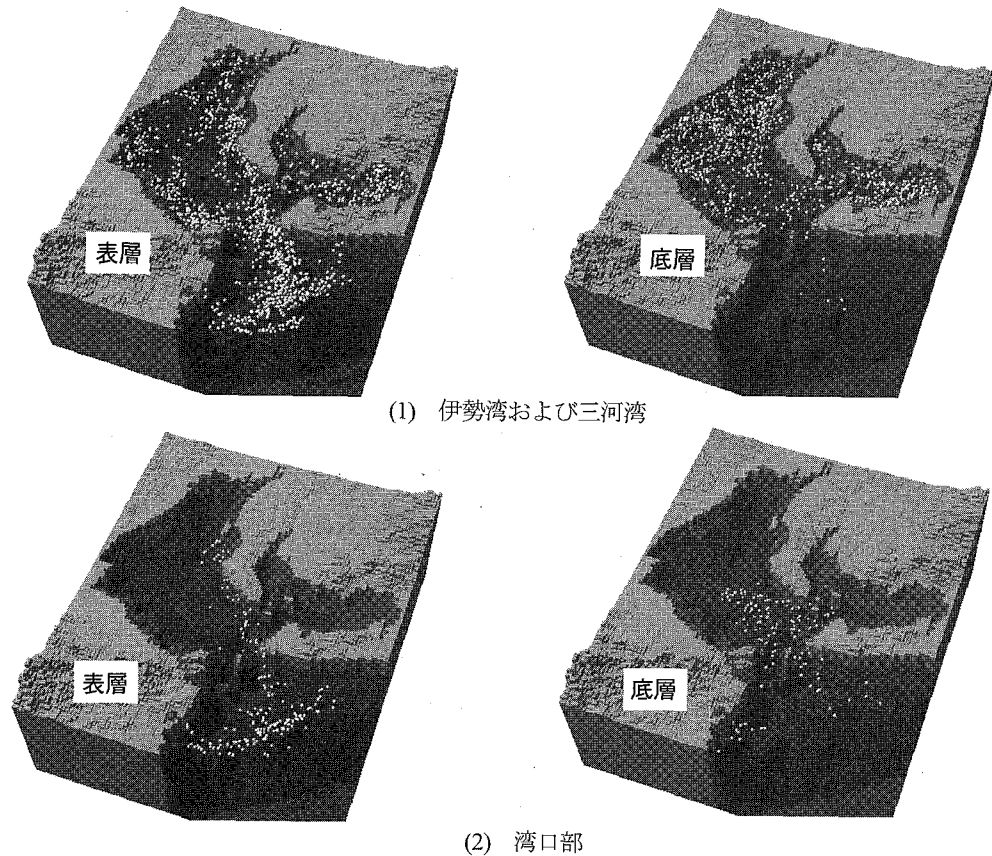


図-5 出水時のトレーサーの移動状況 (1.5日後, 初期値: 8月10日0:00)

確認された。これに対し、三河湾では、多くの底層のトレーサーが三河湾内で循環するように移動しており、閉鎖性の強い状況が確認できた。

図-5は、台風通過後の出水時の挙動について調べたもので、図-2に示すように表層塩分の低下が顕著となり始める8月10日0:00を初期値として1.5日後の状態を示したものである。伊勢湾、三河湾ともに表層水が湾外へ流出している状況がわかり、河川水の流入が表層水の流動に大きく影響していることがわかる。ここで、注目すべき点は、三河湾から湾外へ流出したものの多くは、三河湾北西部(知多湾)からのもので、三河湾東部(渥美湾)からの流出は少なかったことである。これは、三河湾の中でも北西部(知多湾)に比べ、東部(渥美湾)の閉鎖性が強いことを示したものと見える。

湾口部底層のトレーサーの多くが伊勢湾に流入する一方で、三河湾への流入は少なかった。また、三河湾底層のトレーサーのうち、東部の底層のトレーサーは多くがその場に留まっていた。このことから出水時のような一般的にエスチュアリー循環による海水交換が期待される状況においても、三河湾の東部(渥美湾)では閉鎖性が

強い傾向となっていたことがわかる。

#### 4. 湾内流動状況と貧酸素水塊形成要因の関係

三河湾においては、一般的に東部(渥美湾)で貧酸素水塊が発達するのに比べ、北西部(知多湾)では大規模とならない。この理由として、北西部では東部に比べ、底層への酸素供給が多いと考えられている(鶴崎, 2002)。このことは、図-5に示した三河湾北西部と東部との流動状況の対比からも理解できる。

また、三河湾東部での出水時の河川水は、湾内の海水交換にあまり寄与していないことがわかった。出水後の表層のトレーサーの多くは、あまり移動していないことを確認したが、これは、この期間の表層の塩分濃度を長期的に低下させていたことを説明するものと考えられる。このような湾内流動が成層化を保持し、底層貧酸素水塊形成および拡大の要因となっていたと考えられる。

大島ら(2005)による長期間の既往観測資料の重回帰分析により三河湾の貧酸素水塊の規模と河川流量が正の相関を持つことが示されているが、ここで確認した河川水による底層貧酸素化の状況は、この相関を説明するひ

とつの理由といえる。

一般的には、西条 (2002) が説明するように三河湾へ流入する河川流量の低下が湾内の海水交換率を低下させ、底層の貧酸素化を進めていると考えられている。これは長期の平均的な現象として理解できるが、ここで示したような短期的な現象とは相反した傾向であり、メカニズムが異なるものと考えられる。

一方、伊勢湾の貧酸素水塊については、外洋系水との関係が指摘されている。高橋ら (2000) や藤原 (2002) は、外洋系水の進入深度により貧酸素水塊の形成形態が異なり、中層進入により底層貧酸素水塊が、底層進入により中層貧酸素水塊が形成されることをまとめている。また、赤石ら (2005) は、現地観測結果の鉛直分布から底層貫入による湾奥部での中層貧酸素水塊を確認している。図-5の出水時の湾口部のトレーサの移動は外洋系水の伊勢湾内への進入を直接示すものである。また、台風通過時および出水時のいずれにおいても伊勢湾への外洋系水への進入は、東側 (愛知県側) に沿う傾向があるため西側 (三重県側) の底層へ進入し難い状況となっており、西側底層部に貧酸素水塊を形成する流動構造を示しているといえる。

図-4に示した台風通過時では、風の影響により、河川水によるものとは逆向きのエスチュアリー循環が生じ、伊勢湾の西側の底層水が外海へ流出している。伊勢湾では三河湾に比べ、風の影響は小さいと考えられるが、台風のような強風時には影響があるものと考えられ、ここで示したケースでは、底層貧酸素の解消につながる湾内流動が生じていることがわかる。

このように、伊勢湾内の流動状況は外洋系水の影響を大きく受けており、貧酸素水塊の形成と密接に関係しているといえる。

## 5. おわりに

本研究では、伊勢湾および三河湾で実施した現地観測に基づき、気象の影響を精度良く考慮した数値解析を実施した。これをもとにした湾内流動の解析結果から、三河湾では湾内の閉鎖性の強さにより河川水の影響が、伊勢湾では外洋系水の進入構造が貧酸素水塊の形成に大きく関わっていることを明らかにした。

この解析では、ひとつの台風通過前後の状況について、貧酸素水塊の形成という視点から、湾内流動の特長を詳細に考察したものである。一般性に欠ける点はある。しかし、台風の通過とそれに伴う出水という大きな擾乱

の影響を受け、大規模な底層貧酸素化を生じた時期であることから、湾内で生じる特徴的な現象が顕著に現れていたと思われる。本検討のような短期的な状況の詳細な解析は、貧酸素水塊の基本的な形成機構を調べる上で意味のあるものと考えている。時間的に短いスケールの詳細な解析と長期スケールの平均的な解析とを比較・検討することで、貧酸素水塊の本質的な問題点を明らかにしていけると考える。今後は、苦潮 (青潮) などの局所的な現象について、その発生機構を詳細に調べていきたい。

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、および現地調査に関する多くの助言をいただいた(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。なお、本研究は、(財)クリタ水・環境科学振興財団からの研究助成により行われた。

## 参考文献

- 青山裕晃・石田基雄・木村仁美 (2002)：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.
- 赤石正廣・大島 巖・鶴岡亮行・青井浩二・黒田伸郎 (2005)：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.
- 鶴岡亮行・村上智一・安田孝志 (2006)：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, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 823-828.
- 鶴崎直文 (2002)：三河湾における 1989 年から 2000 年にかけての苦潮発生状況, 愛知水試研報第 9 号, pp. 11-18.
- 西条八東 (2002)：内湾の自然誌—三河湾の再生をめざして, 愛知大学総合郷土研究ブックレット 4, 愛知大学総合郷土研究所, (株) あるむ, 76p.
- 佐々木淳・今井誠・磯辺雅彦 (1997)：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.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000)：伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動, 海の研究, Vol.9, No.5, pp. 265-271.
- 藤原建紀 (2002)：貧酸素水塊の発生機構解明, 伊勢湾の生態系の回復に関する研究, 三重県科学技術振興センター共同研究事業報告書, pp. 23-27.
- 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美 (2006)：気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 103-108.
- 村上智一・久保田踊児・吉野 純・大澤輝夫・安田孝志 (2005)：バ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.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫 (2004)：気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 366-370.