

伊勢湾における水質の長期変動傾向と 風向・風速の経年変化の関係に関する数値解析

A NUMERICAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN WATER QUALITY
AND WIND PATTERN CHANGE IN ISE BAY

東 博紀¹・越川 海²・木幡 邦男³・村上 正吾⁴・水落 元之⁵

Hironori HIGASHI, Hiroshi KOSHIKAWA, Kunio KOHATA,
Shogo MURAKAMI and Motoyuki MIZUOCHI

¹正会員 博(工) 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
²非会員 博(工) 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
³正会員 理博 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
⁴正会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
⁵非会員 博(農) 独立行政法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

We describe impacts of wind-pattern change on water quality in Ise Bay based on a numerical simulation. Trend analysis for the observed COD data from 1981 to 2004 in the bottom layer in Ise Bay was carried out. The results indicated that the COD was the significant increase (decrease) trend in the eastern (western) bay, and that the trend was particularly strong in the winter-spring season when the strong northwest-wind events decreased. A numerical quasi-3D hydrodynamic and ecosystem simulation was carried out to investigate the relationship between wind pattern changes and organic carbon content in the bottom layer in the bay. It was clarified that the spatial pattern of the COD trend was driven primarily by changes in inflow from the open sea toward the bay head in the lower layer and vertical mixing rate in the upper layer caused by the wind pattern change.

Key Words : numerical simulation, hydrodynamic and ecosystem model, wind pattern change, water quality, Ise Bay

1. 研究目的

伊勢湾は、高度経済成長期における急速な臨海部の開発や流域の都市化によって著しく汚濁負荷流出量が増加・湾内水質が悪化した、東京湾、大阪湾と並ぶ我が国の代表的な閉鎖性海域である。水質汚濁防止法等に基づく排水規制や下水処理施設の整備などによって流域の発生負荷量は減少した¹⁾が、湾全域平均の化学的酸素要求量(COD)、全窒素(TN)および全リン(TP)は表層・底層ともに1978年以降ほとんど改善されておらず²⁾、依然として毎年のように赤潮・貧酸素水塊が発生している³⁾。また、近年では三重県側におけるアサリ・ハマグリ漁獲量の激減⁴⁾や三河湾におけるノリの色落ち³⁾など水産業への被害が多数報告されており、生態系の劣化が深刻な問題となっている。

閉鎖性海域における健全な水環境・生態系を中長期的に保全・形成するためには、過去に生じた水・生態系環

境の変化要因を明らかにするとともに、流域の都市化や気候変動など将来起こりうる外的変化が水質・生態系に及ぼす影響を的確に予測し、有効な環境改善施策・事業を実施する必要がある。伊勢湾の流動構造に関する研究はこれまでに多数行われており、エスチュアリー循環や湾中央部上層に見られる時計回り・反時計回りの水平循環の季節変動特性が明らかにされている^{5) 6)}。また、近年では長期間にわたる現地観測データに基づいた水質構造の解明研究も進められている。川崎ら⁷⁾は三重県科学技術振興センターによる浅海定線調査の結果をもとに1972年～2005年の平均的な密度・水質構造の季節変動特性を検討し、表層におけるCODとクロロフィルaは夏季に増加、冬季に減少する傾向にあり、河川水が流入する湾奥部ほど濃度が高いことを示した。大島ら⁸⁾は貧酸素水塊の挙動とその環境要因の関係を約10年間の現地観測データをもとに解析し、貧酸素水塊の規模と水温・河川流量の相関が高いことを明らかにした。数値モデルを用いた湾内水質の研究も進められている^{9) 10)}が、水質の経

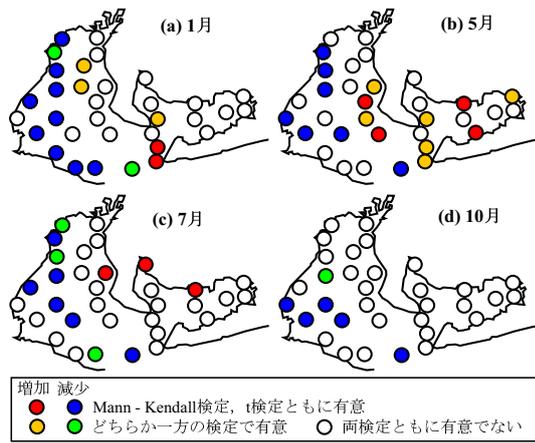


図-1 伊勢・三河湾における底層CODトレンド

年変化について言及した研究は少なく、1980年代以降に水質が改善されない要因は解明されていないといっても過言ではない。

著者ら¹¹⁾は、1981～2004年の広域総合水質調査(環境省水環境部)の観測値を解析し、底層CODは湾全域平均では上述のように経年変化はないものの、測点別では三重県側で有意な減少、愛知県側で増加のトレンドがあることを見出している。また、近年伊勢湾およびその周辺地域ではいわゆる「伊吹おろし」と呼ばれる北西風が弱まっている傾向を指摘し、それに伴って湾内流動が変化していることを数値シミュレーションで明らかにしている。底層CODの長期変動傾向は流動特性の経年変化と関連しているのではないかと推測されたが、上記のシミュレーションでは栄養塩や内部生産の時空間変動を取り扱っていないため、その妥当性の検証は十分ではない。

本研究では、底層CODの長期変動傾向と風向・風速の経年変化の関係を明らかにするため、準3次元流動・水質・生態系シミュレーションを行い、風向・風速の変化が湾内の水質に及ぼす影響を議論する。

2. 伊勢湾における有機汚濁の経年変化

水域の有機汚濁を定量的に評価するのに適した指標としては有機物を炭素量で評価する全有機炭素量(TOC)が挙げられるが、伊勢湾で継続的に計測が開始されたのはここ数年のことであり、経年変化を論じることはできない。ここでは海域の有機汚濁を測る環境基準項目として総量規制の開始以降データが蓄積されているCODを用いて伊勢湾の有機汚濁の長期変動傾向を調べた。1981～2004年にかけて主に1, 5, 7, 10月の年4回実施された広域総合水質調査の観測値を解析して得られた伊勢湾24点・三河湾9点の底層CODのトレンドを図-1に示す。なお、トレンドの検定にはMann-Kendall検定とt検定(いずれも有意水準5%)を用いた。

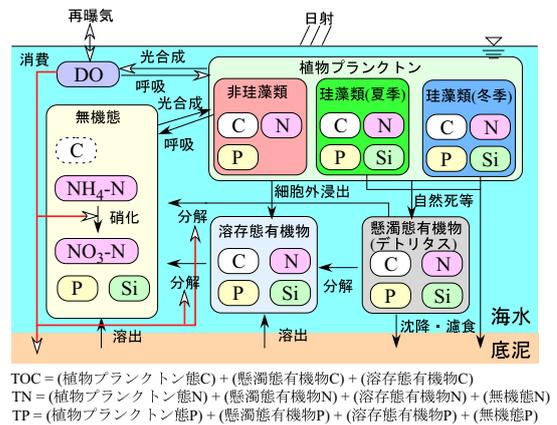


図-2 水質・生態系モデルの構造

伊勢・三河湾33点のうちMann-Kendall検定、t検定ともに有意な増加・減少トレンドを示した地点は1月と5月が11点と最も多く、次いで7月の9点、10月の5点であった。伊勢湾のトレンドの空間分布を見ると、いずれの月も三重県側では湾奥から湾口にわたる広範囲で減少傾向にあり、愛知県側では夏季の知多半島西側において増加の傾向が見られる。とくに1月は三重県側のほぼ全ての点で有意な減少トレンドが認められ、5月は愛知県側で増加、三重県側で減少する東西方向での差が明瞭に現れている。

24年間の平均CODに対する増加・減少量の割合を回帰直線の傾きより求めると、伊勢湾内に有意な減少トレンドを示した地点では10年間で19%(14～27%)の減少、増加トレンドの地点では26%(21～29%)の増加に相当し、定量的に無視できない長期変動傾向といえる。なお、湾内のTOCとCODには正の相関(相関係数0.74)があり、TOCはCODの0.74倍であることを付記しておく。

3. 流動・水質・生態系モデル

(1) モデルの概要

本研究で用いる流動モデルは著者ら^{11), 12)}のσ座標系準3次元FEMモデルである。本モデルでは移流方程式の解法にCIP法¹³⁾を、鉛直混合モデルにMellor¹⁴⁾、海面フラックスの算定にKondo¹⁵⁾のモデルを採用している。解析対象領域は伊勢・三河湾全域であり、水平方向は重構造の四角形要素で、鉛直方向は線要素で20層に分割している。海底地形や境界条件(湾口部の潮位・水温・塩分および河川からの淡水流入、気象条件)、および本モデルの水温・塩分濃度の再現精度については著者ら¹¹⁾に記されているのでここでは省略する。

水質・生態系モデルの解析対象物質はC, N, P, SiおよびDOであり、これらの湾内での輸送については塩分や熱と同様に移流拡散方程式を用いて計算する。各物質の内部生成・消滅項は図-2に示した構造でモデル化されており、算定式はNEMURO¹⁶⁾や藤田ら¹⁷⁾など一般によく

表-1 珪藻類の基礎式とモデル定数

$\begin{aligned} &(\text{増加量}) = (\text{増殖}) - (\text{呼吸}) - (\text{細胞外浸出}) - (\text{自然死}) \\ &(\text{増殖}) = (\text{比増殖速度}) \times (\text{温度関数}) \\ &\quad \times (\text{光関数}) \times (\text{栄養塩関数}) \times (\text{濃度}) \\ &(\text{呼吸}) = (\text{呼吸速度}) \times (\text{温度関数}) \times (\text{濃度}) \\ &(\text{細胞外浸出}) = (\text{浸出率}) \times (\text{増殖}) \\ &(\text{自然死}) = (\text{自然死率}) \times (\text{濃度}) \end{aligned}$		
関数・定数		
	夏季	冬季
温度関数	$\exp(kT)$	
	$\begin{cases} 1 - \left(\frac{T - T_{opt}}{T_u - T_{opt}}\right)^{p_u} & (T \geq T_{opt}) \\ 1 - \left(\frac{T_{opt} - T}{T_{opt} - T_l}\right)^{p_l} & (T < T_{opt}) \end{cases}$	
	$k = -0.0693 \text{ (1/degree C)}, T_{opt}, T_u, T_l = 25, 4, 33 \text{ (degree C)},$ $T: \text{水温 (degree C)}, p_u, p_l = 1.3, 2.0, T: \text{水温 (degree C)}$	
比増殖速度	1.09 (1/day)	5.50 (1/day)
光関数	$\min(I/I_l, 1)$ 最大増殖時の光量下限値: $I_l = 120 \text{ (}\mu\text{mol/m}^2/\text{s})$	
栄養塩関数	$\begin{aligned} &\min(f(NH_4, NO_3), g(DIP), h(SiO_2)) \\ &f = \frac{NO_3}{K_{NO_3} + NO_3} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{K_{NH_4} + NH_4} \\ &g = \frac{DIP}{K_{DIP} + DIP}, h = \frac{SiO_2}{K_{SiO_2} + SiO_2} \end{aligned}$	
	NH_4 : アンモニア態窒素, NO_3 : 硝酸態窒素, DIP : 無機態リン, SiO_2 : ケイ酸ケイ素 (いずれも $\mu\text{mol/L}$)	
	半飽和定数 $K_{NH_4} = 0.80 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{NO_3} = 0.45 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{DIP} = 0.30 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{SiO_2} = 0.88 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ 窒素摂取の選択係数 $\psi = 0.14 \text{ (L/}\mu\text{mol)}$	半飽和定数 $K_{NH_4} = 0.80 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{NO_3} = 0.82 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{DIP} = 0.30 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ $K_{SiO_2} = 0.88 \text{ (}\mu\text{mol/L)}$ 窒素摂取の選択係数 $\psi = 0.14 \text{ (L/}\mu\text{mol)}$
呼吸速度	0.0327 (1/day)	0.165 (1/day)
浸出率	0.135	
自然死率	0.15 (1/day)	
沈降速度	0.01 (m/day)	
組成比	C : N : P : Si = 106 : 16 : 1 : 16 (mol, 一定)	

適用されているものを採用している。

伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況³⁾を見ると、夏季に限らず冬季にも長期間かつ大規模な赤潮が発生している。赤潮優占種は主として珪藻類であり、夏季には *Skeletonema costatum*, 冬季には *Eucampia zodiacus* が多く発生する傾向にある。本モデルでは植物プランクトンとして栄養塩に珪素が必要な珪藻類とそれを必要としない非珪藻類を考慮し、さらに珪藻類は夏季と冬季に増殖しやすい特性を有するものに大別した。表-1に伊勢・三河湾の内部生産に主要な役割を果たす夏季と冬季の珪藻類の基礎式とモデル定数の比較を示す。なお、表中の比増殖速度および呼吸速度は夏季と冬季の珪藻類で大きな差が見られるが、これは両者の温度関数の値域が異なるためである。モデル定数は、極力既存の現地観測や培養実験等のデータ^{18), 19), 20), 21)}をもとに値を与えたが、情報が得られなかったもの(沈降速度など)に関しては他の海域のシミュレーションで用いられた値^{16), 17), 22)}を参考にして決定した。なお、比増殖速度については、文献の値が明暗サイクルを経てサンプリングされた培養実験で得られた平均的な値であるため、本モデルでは照度を考慮したプランクトン増殖量の計算値と実験結果が一致するように値を補正してある。

水質・生態系モデルのモデル定数は、知多半島と渥美半島の先端を結んだ線を境界条件とした三河湾を解析領域として計算を行い、計算値が観測値(図-3のSt. 59と60)と一致するように微調整した。

(2) 観測値と計算値の比較

2003年1月1日～2004年1月31日の13ヶ月間の計算を行い、広域総合水質調査データのTOC, TN, TPおよび溶存酸素量(DO)の観測値と計算値を比較して数値モデルの妥当性を検討する。2003年1月1日の初期値については、2002年10月の広域総合水質調査結果を内挿したものを初期値として2002年11月1～12月31日の計算を行い、得られた結果を与えた。各物質の陸域からの流入条件については、一級河川(宮川, 櫛田川, 雲出川, 鈴鹿川, 揖斐川, 長良川, 木曾川, 庄内川, 矢作川, 豊川)を經由して流入するものと、その他の流域からの流入するものに分けて考慮した。一級河川からの淡水流入量 Q は流量年表(国土交通省河川局)に記載されている最下流の観測地点の日平均流量に(全流域面積)/(観測地点より上流の流域面積)を乗じた値とし、河口に最も近い計算節点の表層に流入させた。物質負荷量 L は、水質年表(国土交通省河川局)に記載されている河口もしくは合流点にもっとも近い観測地点の物質濃度 C に河川流量 Q を乗じて算出した。なお、物質濃度 C は水質年表の2000～2001年の観測値を観測日の河川流量で重み付け平均して得られた値とした。一級河川以外の流域からの負荷量については、情報が入手できなかったため、流域内における下水処理施設の処理水量および負荷量の総量とし、下水道統計(日本下水道協会)を用いて算定した。外洋の物質濃度については、三重県科学技術振興センターの浅海定線調査をもとに月ごとに与えた。

図-3に伊勢・三河湾内6点の表層・底層におけるTOC, DO, TN, TPの観測値と計算値を示す。また、St.60の近傍にある愛知県水産試験場の自動観測ブイ1号による底層DOの観測値をSt.60に併示する。

全体的に各項目の計算値は観測値に近い値が得られており、汚濁負荷物質が多量に流入する湾奥部(St.11, 12及び60)に近いほどTOCやTNが高く、底層DOが低くなる傾向が再現されている。TNを見ると、St.11と12で見られる表層と底層の濃度差など、計算値は観測値をうまく再現している。TPについては、その変動が表層・底層ともにあまり大きくないため詳細な検討ができないが、計算値は観測値に概ね近い値となっている。

底層のTOCおよびDOの計算値を見ると、両者ともに観測値とよく一致しており、とくにDOについては自動観測ブイ1号の観測値と比較してもかなり良好な精度で再現できていることが分かる。しかし、表層では伊勢・三河湾奥部(St.11, 12, 59, 60)における5～10月の植物プランクトンの活発な増殖による3mg/Lを超える高濃度のTOCや過飽和状態のDOをうまく再現することができず、両計算値は観測値よりも過小に算出される傾向がある。そのときの表層TN, TPの計算値は観測値と大きく違わないため、赤潮のような極端現象をよりの確に予測・評価するためには植物プランクトンの組成比(C:N:P:Si比)の変動等を考慮するなどモデルの再検討が

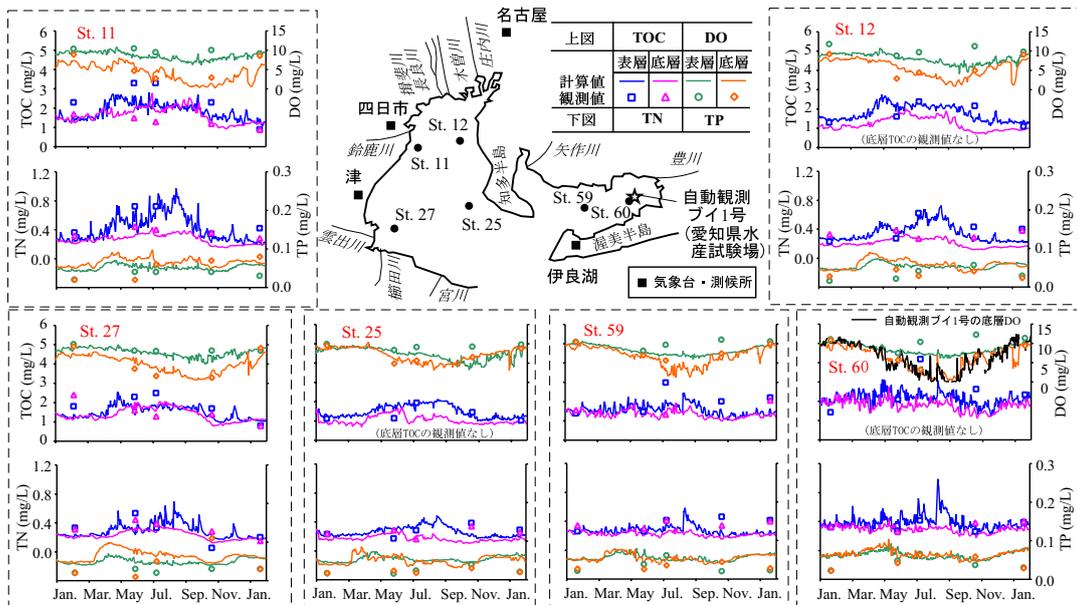


図-3 TOC, TN, TPおよびDOの計算値と観測値の比較

表-2 1988年と2003年の風速(高さ10m)の時間積分平均値

時間積分 平均値 (m/s)	1月		2-5月		6-7月		8-10月		
	1988	2003	1988	2003	1988	2003	1988	2003	
四日市	北風成分	1.7	1.4	2.4	1.9	0.9	0.8	1.4	1.1
	西風成分	3.0	2.3	2.0	1.5	1.0	0.7	1.1	0.9
	南風成分	0.5	0.5	0.7	0.7	1.5	1.0	0.8	0.9
	東風成分	0.2	0.2	0.7	0.7	1.3	0.9	0.8	0.7
伊良湖	北風成分	2.9	2.7	2.4	2.1	0.5	0.6	1.3	1.4
	西風成分	3.2	3.6	2.3	1.8	0.8	1.0	1.2	1.2
	南風成分	0.0	0.1	0.6	0.7	1.5	1.2	0.7	1.0
	東風成分	0.1	0.2	0.7	1.0	1.5	1.4	1.4	1.0
津	北風成分	2.0	1.6	2.2	1.9	0.8	0.9	1.3	1.1
	西風成分	3.9	3.6	2.8	2.1	1.0	1.2	1.8	1.6
	南風成分	0.2	0.1	0.6	0.7	1.5	1.3	0.8	1.0
	東風成分	0.1	0.2	0.7	1.0	1.8	1.6	1.2	1.1
名古屋	北風成分	2.0	2.1	2.0	1.8	0.7	0.9	1.4	1.3
	西風成分	1.5	1.9	1.5	1.4	0.8	0.8	0.8	0.9
	南風成分	0.1	0.1	0.5	0.7	1.2	1.0	0.7	0.9
	東風成分	0.2	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5

必要である。

上記のように本モデルは、夏季の活発な内部生産の再現精度には問題を残しているが、それを除けばTOC, TN, TP, DOの時空間分布は概ね妥当な結果が得られており、有用性が認められる。

4. 風向・風速の変化が湾内水質に及ぼす影響

(1) シミュレーション条件

風向・風速の経年変化が湾域の有機汚濁に及ぼす影響を考究するために、著者らの先行研究¹¹⁾で風による流動場の違いが顕著であった1988年と2003年を対象とし、それぞれの風向・風速条件下で1年間の数値シミュレーションを行い、計算結果を比較した。他の気象・河川からの流入・外洋の境界条件および初期値は、気象場の物理的整合性が損なわれるが、風向・風速の影響を検討するため両者とも前述の2003年の解析と同じとした。以降、1988, 2003年の風向・風速を与えたシミュレーションを

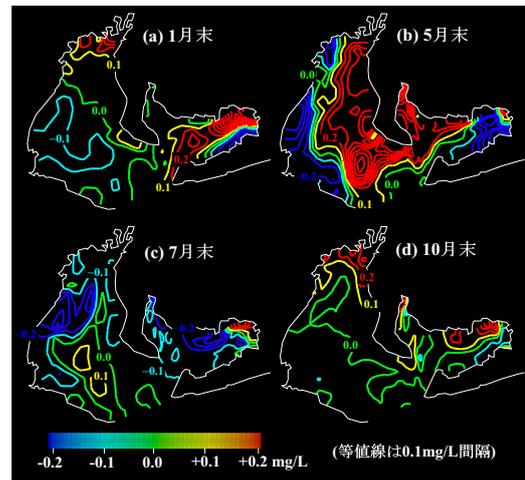


図-4 1, 5, 7, 10月末の底層TOCの偏差(W03-W88)

それぞれW88, W03と記す。表-2に1988年と2003年の四日市, 伊良湖, 津, 名古屋における地上気象観測データ(気象庁)を対数則を用いて高さ10mの風速に換算して得た時間積分平均値を示す。両年は2~5月の北西風の強さに違いが見られ、2003年より1988年の方が卓越している。

(2) W88とW03の底層TOCの比較

鉛直方向20層を海面から海底まで4層ごとに表, 上, 中, 下, 底層とし、計算結果をそれぞれの層で平均したもので以降の考察を進める。図-4に広域総合水質調査が行われる1, 5, 7, 10月の末日におけるW03とW88の底層TOCの偏差(W03-W88)を示す。同図の暖色はW88よりW03の方がTOCが高く、寒色はその逆を示している。

伊勢湾に着目すると、計算開始後1ヶ月(1月末)には三重県側でW88よりもW03のTOCが低く、湾奥部及び愛知県側で高くなる傾向が現れ始め、5月末にはその傾向が

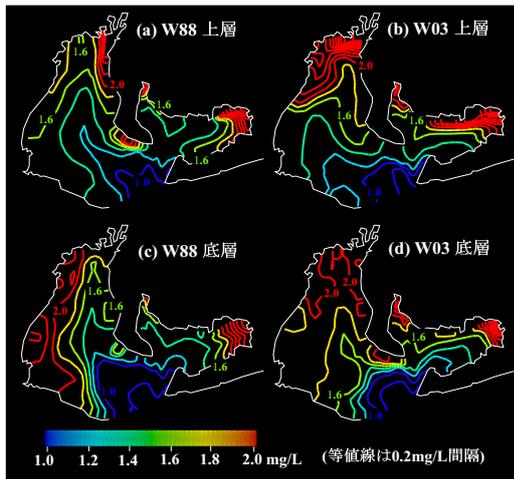


図-5 5月末における上・底層のTOC

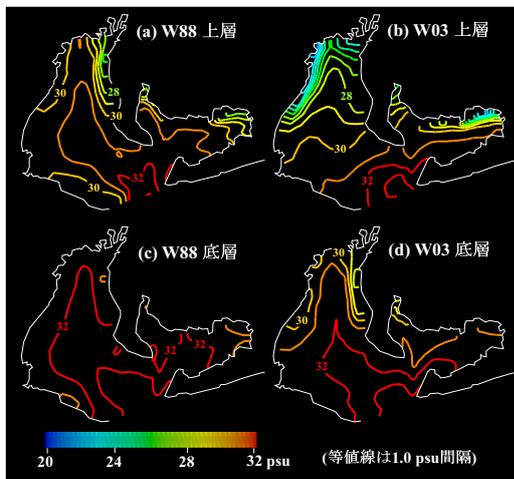


図-6 5月末における上・底層の塩分濃度

より顕著になっている。7月末では、愛知県側のTOC偏差が小さくなり、W88とW03の結果に大きな差は見られなくなっているが、三重県側では依然としてW88よりW03のTOCが小さい状態が続いている。10月末は湾奥部でW03よりW88のTOCが高いところが見られるが、大部分の領域でTOCの偏差はなくなっている。

図-1の底層CODのトレンドと図-4を比較すると、両者の傾向はよく一致していることが分かる。底層TOCの計算値は図-3に示してあるように概ね1~3mg/Lで変動しているが、TOCに対する変化量の割合は数十%にも及び、前述の底層CODのときと同程度の割合である。陸域からの水・物質流入量、日射量、潮汐など風以外の外部条件の変化による影響については現在のところ明らかではないが、少なくとも伊勢湾に見られる底層CODのトレンドには風向・風速の経年変化が重要な要因の一つになっていることが分かる。

(3) 5月末における底層TOCと北西風の強さの関係

5月末にW88とW03の底層TOCの差が最も顕著に現れる要因について検討する。図-5, 6に5月末の上・底層に

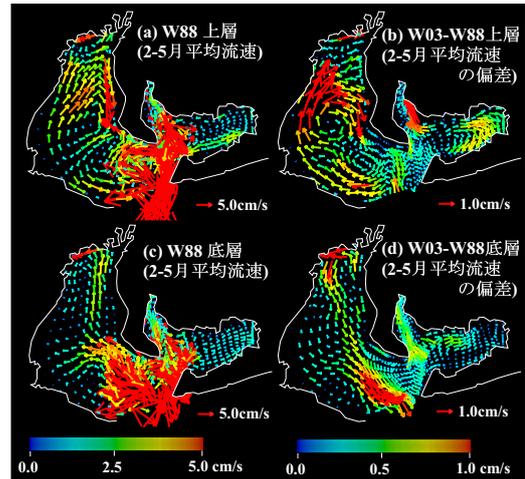


図-7 W88とW03の上・底層における2~5月平均流速の差

おけるTOCと塩分濃度をそれぞれ示す。また、図-7に上・底層におけるW88の2~5月の平均流速、およびW03とW88の偏差(W03-W88, W88の平均流速と同方向であればW03では加速、逆方向であれば減速)を示す。なお、(b)(d)の偏差ベクトルは(a)(c)の平均流速と比べてベクトルの長さを5倍にしてある。

図示していないが、表層ではW88, W03ともに木曾三川及び庄内川から流入した河川水が知多半島に沿って南下する流れとなっている。図-7(c)を見ると、底層ではエスチュアリー循環によって外洋水が愛知県の知多半島に沿って北上する湾口から湾奥に向かう流れが見られるが、(d)の偏差ベクトルはその逆向きであり、W03はW88と比べてその北上流が弱まっていることが分かる。図-6(c)と(d)の塩分濃度の違いからも塩分濃度が高い外洋水がW03よりもW88の方が伊勢湾に多く浸入していることが裏付けられる。これはW88ではW03よりも北西風が強いため、表層の南下流及びエスチュアリー循環が速くなったことが原因と考えられる。W88ではW03よりも愛知県側の底層にTOCが低い外洋水が多く流入するため、図-5のようにW03の底層TOCがW88より高くなるといえる。

図-5(a)(b)を見ると、湾奥部上層ではW03のTOCがW88よりも高く、W03の三重県側で見られる南北方向の大きな濃度勾配がW88では現れていないことが分かる。図-6(a)と(b)を比較すると、W03の湾奥部上層の塩分濃度はW88よりかなり低く、W03ではW08よりも陸域から流入した淡水が湾奥部に留まりやすいことが明らかになる。この原因を図-7(a)(b)より考察すると、W03ではW88よりも北西風が弱いため湾奥から湾口に向かう表層の南下流が比較的小さくなること、加えて鉛直混合が弱くなって成層化し、風の影響が下層に伝わりにくくなるため、上層の津から四日市に向かう北上流が強くなることが考えられる。北西風が弱くなるに伴って湾奥部表・上層の栄養塩濃度が高い水が三重県側に輸送されにくくなり、そこでの内部生産量および有機物沈降量が小さくなるため、三重県側におけるW03の底層TOCがW88より

も低くなるといえる。

5. 結論

本研究では、伊勢湾における底層CODの長期変動傾向と近年冬から春の北西風が弱まっている傾向との関連性を明らかにするため、準3次元流動・水質・生態系シミュレーションを行った。得られた結論をまとめると次のとおりである。

- (a) 1981～2004年の底層CODは三重県側で有意な減少、愛知県側で増加のトレンドが認められる。この空間分布の傾向はとくに1、5月で顕著である。
- (b) 風向・風速条件のみを変化させて3次元流動・水質・生態系シミュレーションを行ったところ、2003年の風向・風速を与えたときの底層TOCは2～5月の北西風がより卓越する1988年の結果よりも三重県側で低く、愛知県側で高くなる傾向が見られた。この傾向は観測値の底層CODの長期変動傾向と一致しており、風向・風速の経年変化が底層CODトレンドの重要な要因の一つになっていると考えられる。
- (c) 上記の愛知県側における底層TOCの増加は、北西風が弱まることにより、底層における湾口から湾奥に向かう外洋水の浸入量が少なくなり、海水交換速度が遅くなるのが原因である。
- (d) 三重県側の底層TOCの減少は、北西風が弱まるに伴って表層における湾全域の南下流が遅く、上層の津から四日市に向かう北上流が早くなるため、陸域から流入した栄養塩濃度が高い水が湾奥部より流出しにくくなり、三重県側の海域において内部生産量および有機物沈降量が少なくなることが起因である。

本研究では風の経年変化が湾内水質に及ぼす影響について検討したが、今後は他の気象要素や河川流入水・負荷量および外洋条件についても検討を重ね、伊勢湾における水環境の経年変化の原因を考究する予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」(研究代表者:辻本哲郎)、文部科学省科学研究費補助金 若手研究(B)(研究代表者:東博紀、課題番号:19710031)の補助を受けた。また、環境省水環境部、国土交通省河川局、中部地方整備局、気象庁、第四管区海上保安部、愛知県水産試験場、三重県科学技術振興センター、名古屋市、日本海洋データセンターのデータを使用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中央環境審議会水環境部会総量規制専門委員会: 発生源別・汚濁負荷量等の推移について、<http://www.env.go.jp/>

- council/09 water/y097-03/mat05.pdf, 参照2008-09-24.
- 2) 中央環境審議会水環境部会総量規制専門委員会: 水質総量規制の実施状況等について(資料編), <http://www.env.go.jp/council/09water/y097-01/mat05-2.pdf>, 参照2008-09-24.
- 3) 愛知県水産試験場: 伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況(平成16年), pp.1-30, 2005.
- 4) 伊勢湾環境データベース: 伊勢湾流域の環境, http://www.isewan-db.go.jp/ise-kankyo/B3d_1.asp, 参照2008-09-24.
- 5) 杉山陽一, 中辻啓二, 藤原建紀, 高木不折: 伊勢湾湾央部の残差流系に関する一考察, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.401-405, 1998.
- 6) 笈茂徳, 藤原建紀, 山田造且: 伊勢湾における密度・流動構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 386-390, 2002.
- 7) 川崎浩司, 村上智一, 大久保陽介: 長期現地観測データに基づく伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.946-950, 2006.
- 8) 大島巖, 鶴飼亮行, 赤石正廣, 青井浩二, 黒田伸郎: 伊勢湾・三河湾における貧酸素水塊の長期間の挙動とその要因, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.901-905, 2005.
- 9) 鶴飼亮行, 村上智一, 安田孝志: 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, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.976-980, 2006.
- 10) 中央環境審議会水環境部会総量規制専門委員会: 水質予測シミュレーションについて, <http://www.env.go.jp/council/09 water/y097-02/mat04-1.pdf>, 参照2008-09-24.
- 11) 東博紀, 越川海, 木幡邦男, 村上正吾, 水落元之: 伊勢湾における気温・風速の長期変動傾向とそれに伴う流動・水質の変化, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1041-1045, 2008.
- 12) 東博紀, 牧秀明: CIP-FEMを用いた準3次元内湾流動モデルによる東京湾の循環流に関する基礎研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.1405-1410, 2008.
- 13) 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一: CIP法, 森北出版株式会社, pp.1-222, 2003.
- 14) Mellor, G.L.: One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 31, pp. 790-809, 2001.
- 15) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, vol. 9, pp. 91-112, 1975.
- 16) PICES: 2000 MODEL workshop report, http://www.pices.int/publications/scientific_reports/Report15/MODEL.pdf, 参照2008-09-24.
- 17) 藤田健一, 李寅鐵, 楠田哲也: 水-底質相互作用モデルによる博多湾のリン循環の数値予測, 水環境学会誌, 第24巻1号, pp.47-57, 2001.
- 18) 西川哲也: ノリの色落ち原因藻*Eucampia zodiacus*の増殖に及ぼす水温, 塩分及び光強度の影響, 日本水産学会誌, 第68巻3号, pp.356-361, 2002.
- 19) 西川哲也, 堀豊: ノリの色落ち原因藻*Eucampia zodiacus*の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響, 日本水産学会誌, 第70巻1号, pp.31-38, 2004.
- 20) 安藤晴夫, 菊地幹夫, 津久井公昭, 曾田京三, 川原浩: 東京湾の富栄養化に関する研究 -そのII-, 東京都公害研究所年報, pp.109-120, 1985.
- 21) Redfield, A. C., Ketchum, B. H., and Richards, F. A.: The influence of organisms on the composition of sea water, *The Sea*, Vol. 2, edited by Hill, M. N., Interscience Pub., NewYork, pp. 26-77, 1963.
- 22) 東京湾流域別下水道整備総合計画策定懇談会: 第3回東京湾流域別下水道整備総合計画策定懇談会資料, <http://www.ktr.mlit.go.jp/kyoku/region/ryuso/pdf/3/2.pdf>, 参照2008-09-24.

(2008. 9. 30受付)