

## 海況自動観測ブイデータを利用した三河湾東部(渥美湾)における 水温, 塩分, 溶存酸素の変動の解析

二ノ方圭介・高須雄二・湯口真実・天野禎也

2017年1月26日受付, 2017年3月7日受理

### Analysis of water temperature, salinity, and dissolved oxygen fluctuation in the eastern Mikawa Bay (Atsumi Bay) using data of the oceanographic observation buoy system

NINOKATA Keisuke\*, TAKASU Yuuji\*, YUGUCHI Manami\*, and AMANO Yoshinari\*

**Abstract :** A fluctuation of water temperature, salinity, and dissolved oxygen in the eastern Mikawa Bay (Atsumi Bay) was analyzed using data of the oceanographic observation buoy system accumulated for about 23 years from 1991 to 2014. As a result, the water temperature in the upper and lower layers during autumn and the upper layer during summer tended to rise by influence of air temperature. The salinity in the upper and lower layers during spring and the upper layer during summer tended to decline by influence of rainfall. The dissolved oxygen was no clear trend of each season.

キーワード: 渥美湾, 三河湾海況自動観測ブイ, 水温, 塩分, DO, 四季

三河湾は, 小型底びき網漁業, のり養殖業, 船びき網漁業などが盛んに行われる豊かな海である。しかし, 一方で赤潮が頻繁に発生し, 夏季には底層に貧酸素水塊が発達して, 苦潮が発生する内湾でもある。愛知県水産試験場では, 漁業者の操業支援, 漁場環境研究の基礎情報の取得などのために三河湾に海況自動観測ブイを設置し, 海象や気象を迅速に把握するとともに広く情報提供してきた。この三河湾海況自動観測ブイの毎時の観測データは1991年4月以降, 長期間にわたって蓄積されている。一方, 近年, 気象の温暖化の影響で沿岸域では長期的

な水温上昇が示されている。また, 平成12年の東海豪雨に代表される短時間の集中的な降雨が増えていることが, 気象庁のアメダスの観測データの解析結果から明らかとなっている。<sup>1)</sup>

本報告ではこれらの気象の三河湾への影響を想定し, 三河湾海況自動観測ブイにより毎時測定された約23年間の詳細なデータを用いて, 三河湾東部(渥美湾)の水温, 塩分, 溶存酸素飽和度(DO)の季節ごとの長期変動とその変動要因について気象変動に着目して解析した。

#### 材料及び方法

三河湾海況自動観測ブイはテレメータ装置(松下電器産業株式会社製, ETH3227AA), ブイ浮体(株式会社ゼニライトブイ製, DB-35E7-P), 計測器(株式会社鶴見精機製, 03531-03538, 03548-03555)で構成されており, 三河湾内に3基設置し(図1), 1991年4月から2014年1月までの23年間にわたり毎時観測した。設置位置の水深は1, 2, 3号それぞれ11, 12, 14mで, 観測点は上層(海面下3.5m), 及び下層(海底上2m)の2層であり, 観測機器の概要は表1のとおりである。観測データはテレメータにより水産試験場へ送信し, 磁気媒体に記録した。なお, 2014年2月からは後継となる新しい海況自動観

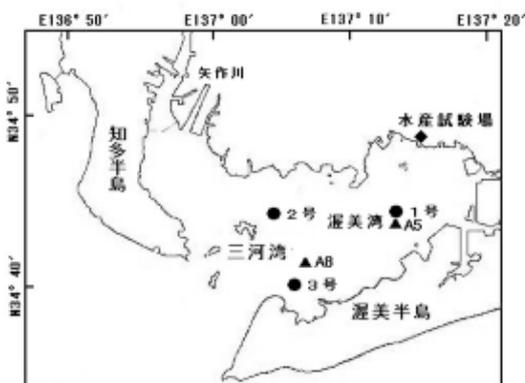


図1 ブイ設置位置(●)及び公共用水域調査点(▲)

\* 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

測バイが稼働している。

解析にあたり、1991年4月から2014年1月に取得した毎時の水温、塩分、DOのデータからバイごとに各項目の日平均値を求め、さらに月平均値を計算した。次に月平均値の当年と前後1年の計3カ年の平均を取り(以下、月3年平均値)、春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~2月)の季節ごとに各年の月3年平均値の3カ月平均値(以下四季平均値)を求めた。解析は、まず月平均値を用いて各月ごとの年変化について一次回帰式をあてはめ傾向をみた。次に月平均値では年変化のばらつきにより傾向が不明瞭となっている可能性を考慮して平均化した四季平均値について、変量が正規分布でなくても適用可能なノンパラメトリック検定手法で、データの外れ値に堅強とされるMann-Kendall検定により傾向を判定した。また、気象庁の観測データや公共用水域調査結果<sup>2)</sup>について、バイデータと同様の期間の四季平均値を求め海況の経年変動の要因解析に利用した。なお、検定結果は $p < 0.05$ を有意とした。

表1 観測機器概要

観測機器	観測方法	測定手法
水温・塩分計	白金測温抵抗式 電磁誘導型セル式	瞬間値
溶存酸素計	ガルバニセル型隔膜電極 (かはん機構付)	15秒かくはん後の瞬間値

## 結果

月平均値を用いて各月の年変化について一次回帰式をあてはめたとときの相関係数 $r$ は表2のとおりで、 $|r| > 0.4$ で比較的高い相関があると考えられる項目について

みると以下のとおりであった。

水温は、特に秋季に顕著な上昇がみられた。バイ別に見ると1号上層で9月に、2号上層で6及び8月から10月に、2号下層で10月に3号上層で9、10月に、3号下層で6、10月に、 $|r| > 0.4$ であった。塩分は、3月が顕著で全観測点で低下がみられた。DOは、 $|r| > 0.4$ で上昇が見られた観測点は、2号上層の11、12月、3号上層の3、5、2月、3号下層の4、10月であった。また、低下が見られた観測点は、1号上層及び3号下層の8月であった。

次に四季平均値の各観測点の変化の傾向についてMann-Kendall検定した結果とその変化幅を表3に、また有意な傾向がみられた観測点の年変化を図2に示す。

水温は、秋季に全ての観測点で有意な上昇傾向がみられた。一方で冬季はいずれの観測点でも変化傾向はみられなかった。また、春季は3号下層、夏季は2号上層でのみ有意な上昇傾向がみられた。有意な傾向が見られた観測点について一次回帰式から1991年から2013年までの23年間の変化を計算すると、のり養殖の育苗・生産期が始まる秋季(全観測点)は $1.1 \sim 1.3^{\circ}\text{C}$ 、春季(3号下層)は $0.8^{\circ}\text{C}$ 、夏季(2号上層)は $1.0^{\circ}\text{C}$ 上昇したことになる。

塩分は、春季が全ての観測点で有意な低下傾向がみられた。夏季は2号上層及び3号上層で有意な低下傾向がみられた。秋季及び冬季は傾向がみられなかった。23年間の変化は、春季(全観測点)で $0.5 \sim 0.8$ 、夏季(2号上層、3号上層)で $0.9 \sim 1.0$ 低下したことになる。

表2 月平均値の年変化に一次回帰式をあてはめたとときの相関

項目	観測点	春季			夏季			秋季			冬季		
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
水温	1号上層	+			+		+	++	+	+			-
	1号下層	+						+	+	+			-
	2号上層	+		+	++	+	++	++	++	+			-
	2号下層	+		+	+			+	++	+			-
	3号上層	+			+	+	+	++	++	+			-
	3号下層	+		+	++			+	++	+			-
塩分	1号上層	--											
	1号下層	--		-	-								
	2号上層	--			-								
	2号下層	--		-	-								+
	3号上層	--		-	-								
	3号下層	--									-		+
DO	1号上層			+		-	--	+	-				
	1号下層						-	-	-	-	-	+	-
	2号上層						-			++	++		
	2号下層			-			-				+	+	-
	3号上層	++	+	++	+				-	+	+	+	++
	3号下層	+	++	+	+		--	-	++	+			

+, -  $0.2 < |r| \leq 0.4$   
 ++, --  $0.4 < |r|$

表3 四季平均値の Mann-Kendall 検定結果と変化幅  
 符号は、Mann-Kendall 検定結果を、数値は1991年から2013年の変化幅を示す

項目	観測点	春季	夏季	秋季	冬季
水温 (°C)	1号上層			++, 1.2	
	1号下層			++, 1.1	
	2号上層		++, 1.0	++, 1.3	
	2号下層			++, 1.2	
	3号上層			++, 1.2	
	3号下層	+, 0.8		+, 1.1	
塩分	1号上層	--, 0.8			
	1号下層	--, 0.5			
	2号上層	-, 0.7	--, 1.0		
	2号下層	-, 0.6			
	3号上層	--, 0.8	-, 0.9		
	3号下層	-, 0.5			
DO (%)	1号上層		--, 17.1		
	1号下層			--, 12.8	-, 7.2
	2号上層				
	2号下層				
	3号上層	++, 10.1			++, 7.5
	3号下層	+, 5.6			

++, -- :  $p < 0.01$

+, - :  $p < 0.05$

+: 上昇傾向, -: 低下傾向

DOで変化傾向がみられた観測点は、上昇傾向が春季の3号上層(23年間の変化は10.1%)及び下層(5.6%)、冬季の3号上層(7.5%)でみられ、低下傾向が夏季の1号上層(17.1%)、秋季の1号下層(12.8%)、冬季の1号下層(7.2%)でみられた。夏季の底層における貧酸素化については、特に長期的な有意の変化は認められなかった。冬季は観測点により逆の結果となった。このように季節による明確な違いはみられなかった。

## 考 察

### (1) 水温

水温は、四季平均値での Mann-Kendall 検定結果で有意な傾向がみられた観測点は全て上昇傾向であった。特に秋季は各ブイ上下層とも上昇傾向がみられ、月平均値でも秋季の上昇が顕著に現れており、渥美湾全体に影響する要因が関与していると考えられた。このため名古屋の気温及び日照時間(気象庁, <http://jma.go.jp>, 2016年11月16日)に着目し、ブイデータと同期間の1991年から2014年の四季平均値を求め、ブイデータとの相関をみた。その結果、気温ではいずれの季節でも強い正の相関が見られたのに対し、日照時間では秋季は相関がみられず春季と夏季で相関がみられたが、いずれも気温に比べて相関係数は小さかった(表4)。夏季は2号の上層で有意に上昇しており、また、3号上層では有意ではないも

の一次回帰式をあてはめると上昇傾向となっており弱い相関がみられた(図3)。これに対して秋季は上下層で上昇傾向がみられた。解析期間中の密度( $\sigma_t$ )の日平均値から求めた上下層の密度( $\sigma_t$ )差は、例えば2号での推移をみると、夏季に大きく、秋季は小さくなることから(図4)、夏季には成層して気温の影響が下層に到達し難いのに対し、秋季は混合期に入るため海水の鉛直混合が生じ、上層での温度上昇が下層へも影響していると考えられた。

本田ら<sup>3)</sup>は三河湾の水温の長期変動をみると上昇傾向にあり、1997/98年にジャンプしていることを報告している。本解析でも水温の上昇傾向が秋季に顕著にみられ、1996年から1999年にかけて水温の上昇が大きく(図2, g, j, m, p, s, u)、本田ら<sup>3)</sup>と同じ結論となった。これらのことから、夏季及び秋季の水温の上昇傾向は気温の上昇に起因するものと考えられた。一方、下層については春季に3号で有意な上昇傾向がみられたが、その他の観測点では変化傾向がなかった。春季は上下層の密度差が小さく混合期にあたるため影響があったとしても変化は小さいと考えられる。また、後述するように外洋水が湾内に流入したときに生じる塩分の上昇傾向もみられなかったため、外洋水の差し込みの影響による水温の上昇は考えられず、原因は不明であった。

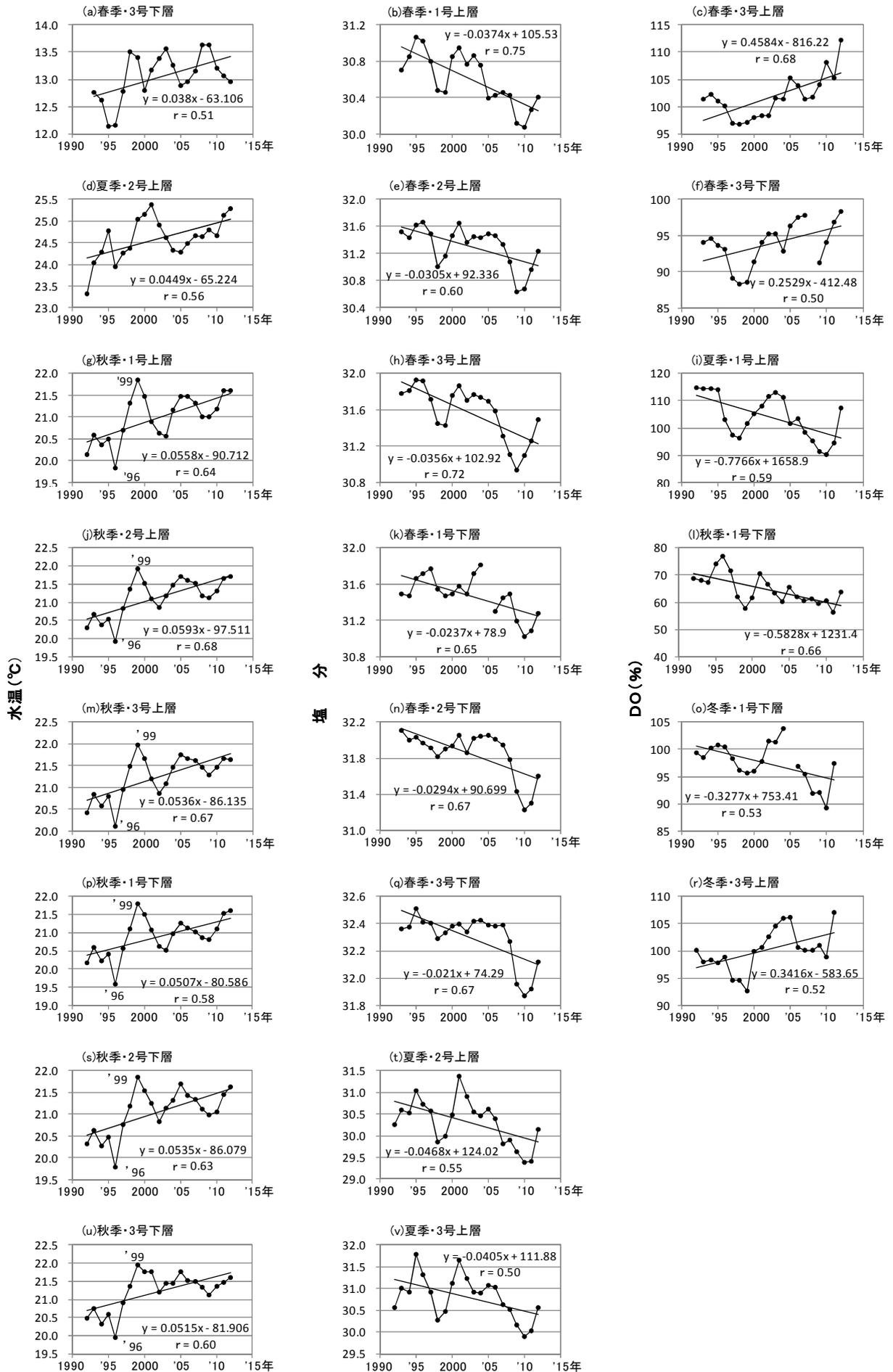


図2 四季平均値の Mann-Kendall 検定で有意な傾向がみられた観測項目の年変化

水温 (a, d, g, j, m, p, s, u), 塩分 (b, e, h, k, n, q, t, v), DO (c, f, i, l, o, r)

表 4 四季平均値の Mann-Kendall 検定で有意な傾向が見られた観測項目と推定される要因との相関係数

観測項目 推定要因	観測点	春季	夏季	秋季	冬季
水温 気温	1号上層			0.93	
	1号下層			0.87	
	2号上層		0.81	0.93	
	2号下層			0.87	
	3号上層			0.95	
	3号下層	0.81		0.79	
水温 日照	1号上層			0.02	
	1号下層			0.01	
	2号上層		0.52	0.08	
	2号下層			0.12	
	3号上層			0.10	
	3号下層	0.28		0.15	
塩分 降水量	1号上層	-0.66			
	1号下層	-0.42			
	2号上層	-0.78	-0.84		
	2号下層	-0.71			
	3号上層	-0.78	-0.83		
	3号下層	-0.66			
DO クロロフィルa (A5)	1号上層		0.44		
	1号下層			0.13	-0.29
DO クロロフィルa (A8)	3号上層	-0.56			-0.09
	3号下層	-0.47			

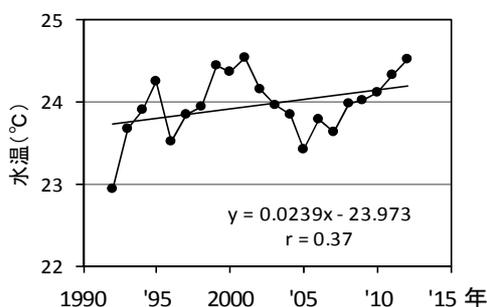


図3 夏季の3号上層の四季平均水温の変化

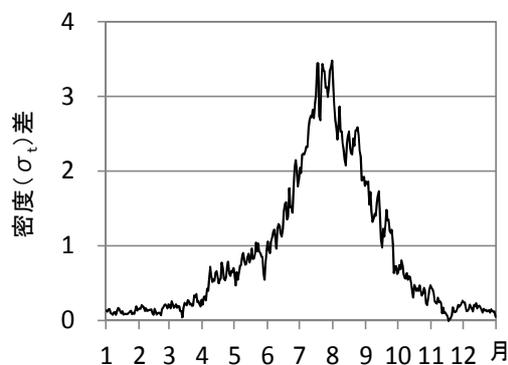


図4 2号上下層の日平均密度 ( $\sigma_t$ ) 差の推移

日平均は解析期間の1991年4月から2014年1月の値から算出

## (2) 塩分

月平均値では3月に低下がみられ、四季平均値での Mann-Kendall 検定結果でも春季は各ブイ上下層で低下傾向がみられた(表2)。また、夏季は2号及び3号の上層で低下傾向がみられ、渥美湾全体に影響する要因が関与していると考えられた。このため、直接、塩分を低下させる河川流量と関連の深い降水量との関係について検討した。三河湾に注ぐ主な河川は矢作川と豊川があり、2015年の日平均河川流量(国土交通省、水文水質データベース <http://www1.river.go.jp>, 2017年1月10日)は、矢作川(西尾市米津観測所)が  $54.5\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、豊川(豊川市当古観測所)が  $37.7\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  と前者が多い。そこで、矢作川流域圏内にある豊田観測所の降水量データ(気象庁, <http://jma.go.jp>, 2016年11月29日)を解析に利用した。豊田観測所の降水量の四季平均値を求め、ブイデータとの相関をみたところ、春季及び夏季ともに負の相関がみられた(表4)。三河湾は閉鎖性で海水交換が悪く、湾全体が換水されるのには1カ月程度必要と推算されており、<sup>4)</sup>降雨による河川水の流入増加の影響は翌月まで及ぶと推定される。降水量の月3年平均値の Mann-Kendall 検定結果では、2月及び5月の降水量が有意に増加傾向となっており(表5)、影響は翌月の3月及び6月、つまり春季及び夏季にその影響が出ていると考えられた。また、上下層の密度( $\sigma_t$ )の差は春季に小さく、夏季は大きくなることから(図4)、春季は上下混合が生じやすく、塩分の低下の影響が上下層ともに現れるのに対し、夏季は躍層の発達により鉛直混合が生じにくく、上層のみに影響が現れていると考えられた。これらのことから塩分の低下傾向は降水量の増加による影響と考えられた。

本田ら<sup>3)</sup>は、三河湾の塩分について、長期的にみると上昇傾向であるとしているが、本解析では、春季及び夏季で低下傾向がみられた。これは、本解析では1991年から2014年を解析の対象とし、日平均値を基に変動を解析したが、本田ら<sup>3)</sup>は1978年から2013年を解析対象期間としていることが異なる理由と考えられた。なお、矢作川本川の流量<sup>5)</sup>も場所により差はあるが、1970年以降減少傾向にあったものが、1991年以降は増加しているように図から判断できる。河川流量は降水量と密接な関係にあり、<sup>5)</sup>降水量の増加が海域の塩分低下を招いたとした本解析と本田ら<sup>3)</sup>とは矛盾していないと考えた。

表5 降水量（豊田）の Mann-Kendall 検定結果

ブイの観測項目の解析期間と同じ1991年4月から2014年1月のデータから算出した四季平均値及び月3年平均値での傾向検定結果

春季			夏季			秋季			冬季		
+									++		
3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
+									++		

++:  $p < 0.01$ で上昇傾向    +:  $p < 0.05$ で上昇傾向

(3) DO

上昇傾向がみられた観測点では過飽和の年がある（図2, c, r）。また、三河湾東部では、降雨後に海域に供給された栄養塩により赤潮が形成されることが報告されており、<sup>6)</sup> 上昇傾向がみられた春季及び冬季の降水量をみると、いずれも有意な増加傾向がみられる（表5）ことから、その影響により植物プランクトンが増加し、DOの上昇につながった可能性が考えられた。このため、DOの増減について植物プランクトン量の指標となるクロロフィルaとブイデータとの相関をみた。1号は同位置の公共用水域調査点であるA5、3号は近隣の調査点のA8の月ごとの表層のクロロフィルaのデータから四季平均値を求めて解析した。その結果、夏季の1号上層では正の相関がみられたが、その他の観測点では相関がみられないか、逆に負の相関がみられた（表4）。また、夏季の1号の日平均値（図5）は上層では高温、低塩分に、下層では低水温、高塩分となり、躍層が発達し下層にDOの少ない、貧酸素水塊が広がっている。このため、海水の鉛直混合が生じた場合、上層では水温の低下や塩分の上昇、DOの低下が起これると考えられる。従って、他のブイの上層でみられた水温の上昇傾向や塩分の低下傾向が1号上層でみられないのは、鉛直混合によりその傾向が相殺された可能性がある。以上から夏季の1号の上層DOの低下はプランクトンの減少や鉛直混合の増加が影響している可能性が考えられたが、他の観測点とは傾向が異なり、その原因の解析については今後の課題となった。

1号下層では秋季及び冬季で有意な減少傾向がみられた。秋季は混合期に入り貧酸素水塊が解消する時期であるが、その時期が遅くなっている可能性がある。このため、1号における秋季の密度（ $\sigma_t$ ）の上下層差の四季平均値について傾向をみるとともに、各年の秋季に1号下層の日平均値でDOが30%以下となった日数を3カ年移動平均して調べた。その結果、密度の上下層差に変化傾向はみられなかったが、DOが30%以下となった日数は有意に増加傾向となっていた（図6）。また、秋季は下層水温の上昇傾向がみられることから、躍層形成の長期化

による混合期の遅れではなく、下層での酸素消費を伴う有機物の分解が速く、貧酸素化しやすい状況にあったと考えられた。一方、月平均では夏季の3号下層で低下がみられ、貧酸素水塊の拡大が考えられたが、四季平均値のMann-Kendall検定ではその傾向はみられず、要因の特定はできなかった。また、冬季の下降傾向についても要因の特定はできず、原因は不明であった。

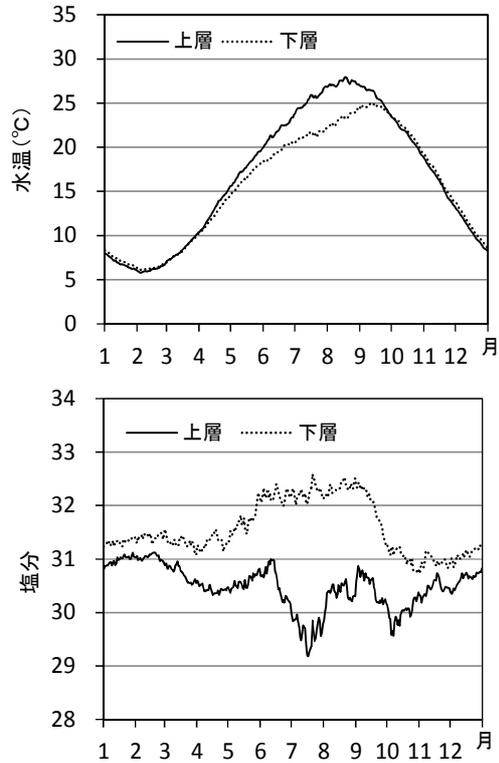


図5 1号の水温・塩分の日平均の推移  
日平均は解析期間の1991年4月から2014年1月の値から算出

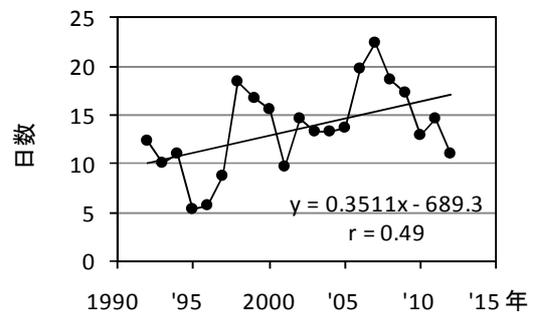


図6 1号下層の秋季（9～11月）の日平均DOが30%以下の日数

(4) 観測期間

本論文では、1991年4月から2014年1月までの約23年の観測期間について解析を行い、三河湾東部において秋季

の水温上昇や春季の塩分低下が明らかとなった。海況は変動が大きく、傾向等を見るためには、長期間のデータが求められる。例えば、日本近海における海域平均海面水温について、およそ100年のデータを利用して+1.07°C/100年の上昇傾向を明らかにしている。<sup>1)</sup> 三河湾東部においても、水温の上昇や湾奥の貧酸素の長期化が観測されており、長期的な変動を把握するためにも今後も継続的なデータ収集、解析をすることが最も重要と考えられた。

酸素水塊形成に及ぼす降雨に伴う河川水流入の影響。  
愛知水試研報, 17, 9-24.

## 要 約

三河湾海況自動観測ブイで取得した1991年4月から2014年1月までの約23年間の毎正時観測データを利用し、三河湾東部（渥美湾）の水温、塩分及びDOの季節ごとの変動傾向を解析した。

水温の上昇はのり養殖の育苗・生産期が始まる秋季が顕著で、1991年から2013年に1.1~1.3°C上昇しており、気温が関与していると推定された。塩分の低下は春季が顕著で0.5~0.8低下しており、降雨が関与していると推定された。DOは季節ごとの明瞭な増減傾向はみられなかった。

## 謝 辞

本報告は1991年4月から約23年にわたる連続観測データを活用した。海況自動観測ブイの運営管理、データ取りまとめ等に從事した歴代担当者及び水質調査船「しらなみ」乗務員、漁業取締・水質調査兼用船「へいわ」乗務員、その他関係者の皆様のご尽力に対し、ここに謝意を表す。

## 文 献

- 1) 気象庁 (2015) 気象変動監視レポート 2015. 21-44.
- 2) 愛知県環境部 (1991-2013) 公共用水域水質調査結果 (資料編).
- 3) 本田是人・戸田有泉・二ノ方圭介・中嶋康生・鈴木輝明 (2015) 三河湾における水質環境と貧酸素水塊の変動. 水産海洋研究, 79 (1), 19-30.
- 4) 松村臯月・松川康夫 (1981) 三河湾・環境と漁業, 東海区水産研究所業績C集 さかな, 26, 31-44.
- 5) 白金晶子・山本敏哉・洲崎燈子・内田朝子・間野隆裕・遠 志保 (2013) 矢作川本川の流量に関連する長期データ. 矢作川研究, 17, 135-142.
- 6) 柘植朝太郎・大橋昭彦・山田 智・岩田靖宏・石田基雄 (2012) 三河湾東部, 渥美湾における赤潮および貧

