

田辺湾南部における1985年から2000年までの8月の 溶存酸素の変動について

上出貴士

和歌山県農林水産総合技術センター 水産試験場 増養殖研究所

Fluctuation in Dissolved Oxygen in August from 1985 to 2000 in Southern Area of Tanabe Bay

Takashi Uede

*Fisheries Farming Laboratory, Fisheries Experimental Station
Wakayama Research Center of Agriculture, Forestry and Fisheries*

緒 言

田辺湾南部は、本県を代表する養殖漁場として発展し、現在でもマダイを主体とする大規模な魚類養殖が営まれている。また、複雑な海岸線と島嶼が点在する地形から赤潮を多発する海域としても知られている（竹内 1980, 上出 2003a）。更に、有害種 *Gymnodinium mikimotoi* 赤潮の発生機構や貧酸素水塊との関係などについて詳細に調査研究が行われ、田辺湾では夏季を中心に貧酸素水塊が形成されることや、その貧酸素水塊の形成には鉛直安定度よりも増殖した植物プランクトンの枯死が大きなウェイトを占めることが明らかにされている（和歌山水試 1994）。また、湾口南部から外海水の進入がみられ（和歌山水試 1992）、その流れによって *Gymnodinium mikimotoi* 赤潮が湾全体へ広がっていくこと（竹内ら 1992）など、田辺湾特有の貧酸素水塊や有害赤潮の形成機構が明らかにされた。また、著者は田辺湾の底質の AVS や COD の変遷を解析することで、悪化していた漁場環境が 1980 年代後半から回復傾向にあることを明らかにしている（上出 2003b）。

しかし、夏季における田辺湾南部の底層の溶存酸素は回復傾向にあるが（上出 2003b）、完全に基準値を満たしてはいないことも明らかとなった。夏季の溶存酸素濃度は、水産用水基準（2000 年版）において「内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなくてはならない溶存酸素は 4.3mg/l（3 ml/L）であること」が基準値として定められ（日本水産資源保護協会 2000）、更に持続的な養殖生産の確保を目的として 1999 年 5 月に公布・施行された「持続的養殖生産確保法」の運用に際しては、「いけす等の養殖施設の直下の水底における硫化物量が、その漁場の水底における酸素消費量が最大となる時の硫化物量の値を下回っていること」という環境基準が農林水産省告示によって定められている。後者の環境基準である硫化物量は、溶存酸素と密接に関わっていることが知られており（Jorgensen et al 1974, Jorgensen 1977）、養殖漁場の生産性を確保していく上でも、底層の溶存酸素は重要な意味をもっている。

そこで、著者は湾南部の養殖漁場における 1985 年から 2000 年までの 8 月の溶存酸素の変遷について検討を行ったので報告する。

方 法

水温及び溶存酸素（Dissolved Oxygen : DO）

図 1 に示す St. 1 から St. 6 の計 6 ヶ所において堅田漁協が測定した水温及び DO の資料を使用した。

調査は朝、昼、夕方に行われているが、ここでは朝のデータを使用した。観測層は表層、水深2 m、5 m、10 m、海底上1 m（底層）の5層（1980年代中頃は水深2 m層を除く4層）で、水温・DOともに溶存酸素メーター（YSI 製モデル 57）で測定した。このようにして得られた各定点での月平均値を更に定点間で平均したものを解析に用いた。

赤潮資料の解析

和歌山県が毎月取りまとめ、水産庁瀬戸内漁業調整事務所に報告した1985年から2000年の8月のものを用いた。また、ここでは鳥ノ巣の鼻から池田、細野、古賀、網不知の各浦と畠島及び神島によって囲まれた周辺水域を湾南部と定義（図1）し、そこで発生した赤潮について取りまとめた。

結 果

水温及びDOの変遷

田辺湾南部の養殖漁場では、底層の溶存酸素は8月に最も低下することが知られており（上出 2003b）、夏季に発生する貧酸素水塊（和歌山県 1994）が環境に与える影響が最も大きい時期として8月を位置付け、1985年から2000年の8月の平均水温及び平均DOを解析に使用した（1986、1992、1993年を除く）。

図2に表層、水深2、5、10 m、底層の8月の平均水温の推移を示す。いずれの層でも1980年代後半よりも1990年代で高くなる傾向がみられた。特に底層で顕著であり、1980年代後半では24～26℃台で推移したが、1990年代は26～27℃台になった。

図3に表層、水深2、5、10 m、底層の8月のDOの推移を示す。1980年代半ばの南部のDOは著しく低下し、5 m層においても基準値である4.3mg/lを下回った。しかし、水温と同様に各層で上昇傾

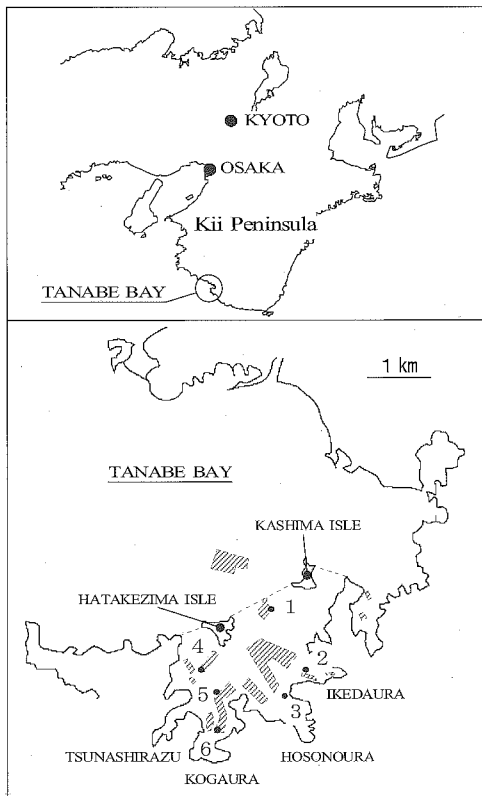


図1 調査定点

黒丸はDOの測定定点を示す。斜線部分は養殖漁場であることを示す。また、図中の破線より南の海域を田辺湾南部とした。

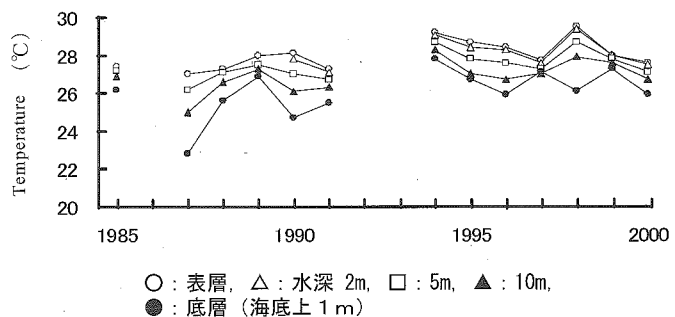


図2 1985～2000年8月の田辺湾南部における水温の変遷
数値は6定点の平均値

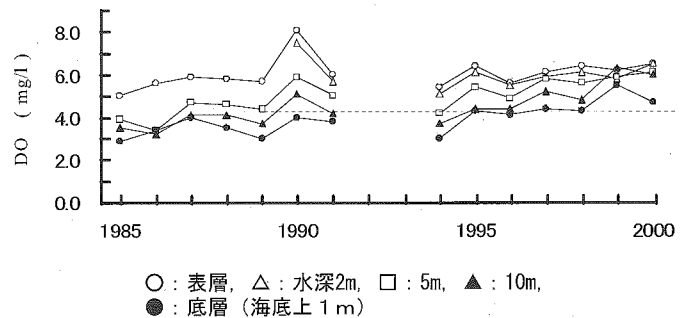


図3 1985～2000年8月の田辺湾南部における溶存酸素の変遷
数値は6定点の平均値を示す。図中の破線は水産用水基準において内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなければならない溶存酸素濃度4.3 mg/lを示す。

向がみられ、5 m 層では 1987 年以降ほぼ全ての年で 4.3mg/l を上回った。10 m 層では 1997 年、底層では 1999 年に 4.3mg/l を超え、15 年間に全ての層で基準値を超える改善がみられた。

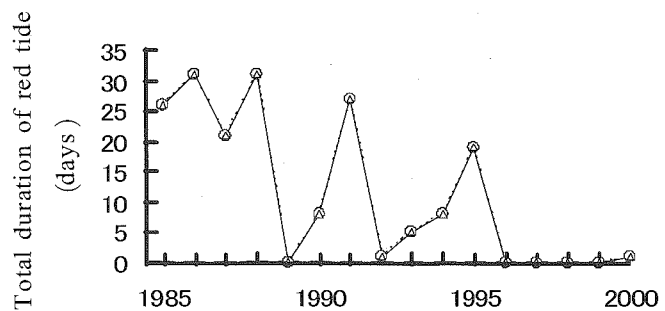
赤潮の発生状況

図 4 に田辺湾全域（齊田崎と番所ノ鼻とを結ぶ線と海岸線によって囲まれた海域）と田辺湾南部での 8 月の赤潮発生日数の推移を示す。8 月の田辺湾における赤潮発生は、全て田辺湾南部において発生し、1985 年から 1988 年までは毎年 20 日を超える赤潮発生があり、1986 年や 1988 年には期間中、毎日赤潮の形成がみられた。しかし、1989 年以降は 2～3 年で増減を繰り返しながら減少し、1991 年には 27 日、1995 年には 19 日となったが、1996 年以降、赤潮の発生はほとんどみられなくなった。

表 1 に田辺湾南部における赤潮構成種別の発生状況を示す。複数月にまたがる赤潮発生が多くみられたので、7 月から 9 月にかけて発生した赤潮を示した。1980 年代後半は 10 日から 53 日の長期にわたる赤潮がみられ、有害種 *Gymnodinium mikimotoi* によるものが多かった。1990 年代初頭も *G.mikimotoi* が赤潮を形成したが、1980 年代後半に比べ継続日数は少ない傾向がみられた。また、1992 年以降は更に赤潮継続日数が短期化したのに加え、構成種は *Heterosigma akasiwo* が多くなった。1996 年からは赤潮形成がなくなったが、2000 年には和歌山県沿岸で初めて *Heterocapsa circularisquama* が赤潮を形成した。

溶存酸素と底層水温の関係

図 5 に 8 月の底層の DO の平均値と 8 月の底層の平均水温の関係を示す。底層における水温と DO との間には、全期間でみると有意な相関はみられなかったが、1985 年から 1994 年までの前期と 1995 年から 2000 年までの後期に分けた場合、前期では高い相関 ($r = -0.84, p < 0.01$) が得られ、底層の水温の低下が底層 DO の上昇と密接な関係にあることが窺われた。一方、後期は前期に比べると両者の関連性は低くなった ($r = 0.58, p < 0.30$)。また、前期は底層の平均 DO が 4.0mg/l 以下、後期は 4.1mg/l 以上の時期に一致した。



△：田辺湾全域，○：田辺湾南部

図 4 1985～2000年 8 月の田辺湾における赤潮発生日数の変遷

表 1 田辺湾南部における1995～2000年の7～9月の赤潮発生

西暦	月日	発生日数 (日)	構成種	最大細胞密度 (cells/ml)	面積 (m ²)
1985	7/22～8/26	34	<i>Gymnodinium sp.</i>	20,000	4
1986	7/29～8/25	28	<i>Scrippsiella trochoidea</i>	29,000	2.8
	8/25～9/4	10	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	1,900	1.4
1987	8/11～9/7	28	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	49,100	5.6
1988	7/17～9/7	53	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	46,000	12
1990	8/3～10	8	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	40,000	13
	8/5～7	3	<i>Heterosigma akasiwo</i>	6,720	3.05
1991	8/8～28	21	<i>Gymnodinium sp. '84k</i>	348,000	3.75
	8/29～9/16	19	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	24,000	13.5
1992	8/31～9/2	3	<i>Heterosigma akasiwo</i>	110,000	-
1993	8/6～10	5	<i>Heterosigma akasiwo</i>	20,000	2
1994	8/2～9	8	<i>Heterosigma akasiwo</i>	-	-
1995	8/7～25	19	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	6,250	-
2000	8/29	1	<i>Heterocapsa circularisquama</i>	224	-

表層と底層の水温差と底層DOの関係

竹内ら (1993) は田辺湾の貧酸素水塊の形成が一週間以内の短期間であることや表層と底層の水温差が大きい時に底層の溶存酸素が上昇することを指摘している。また、その中において底層水温と表・底層の水温差が連動していることが言及されている。そこで、表・底層の水温構造を検討するため8月の測定データが最も多かった St. 5における底層水温と表・底層の水温差の関係を図6に示した。両者は $r = -0.90$ ($p < 0.01$) と高い負の相関を示し、1995～2000年においても貧酸素水塊が多発していた1985、1988年 (竹内 1993) と同じ表・底層の水温構造の存在が窺えた。

次に、前項でみられた後期の表・底層の水温差と底層 DO の関係を日毎に検討するため St. 5における日毎の両者の変化を図7に示す。データは1995年から2000年まで (1998年は除く) を用いた。1997年8月8～13日、2000年8月23～25日には水温差の拡大と底層 DO の増加が、1995年8月2～3日、

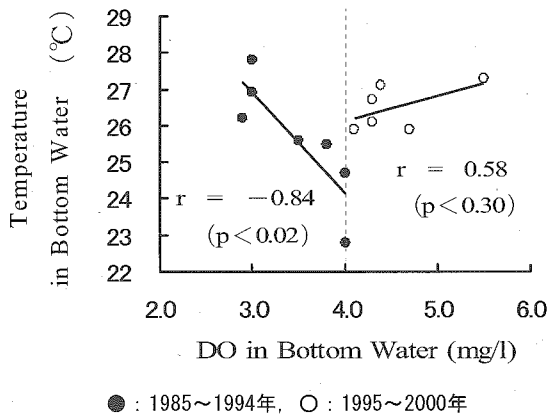


図5 田辺湾南部における8月の平均DOと平均底層水温の関係
 数値は6定点の平均値。破線はDO 4.0mg/lを示す。

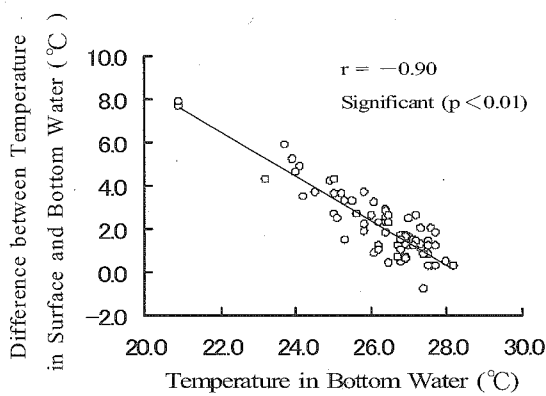


図6 田辺湾南部のSt. 5における1995～2000年8月の日毎の底層水温と表・底層の水温差の関係 (1998年を除く)

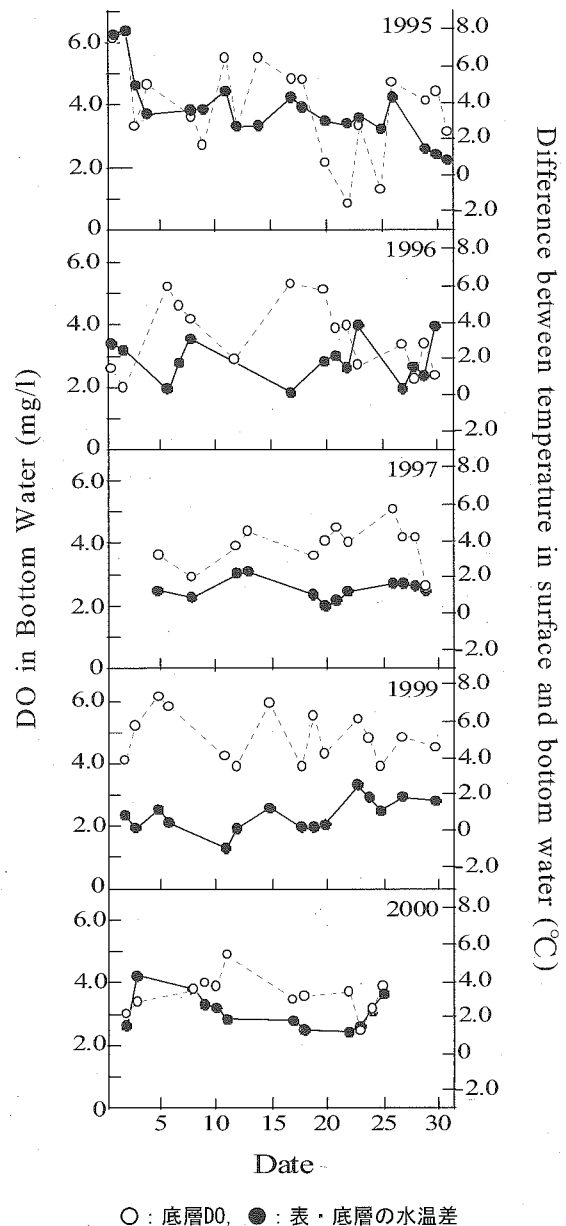


図7 田辺湾南部のSt. 5における1995～2000年8月の底層DOと表・底層間の水温差の日変化 (1998年を除く)

18～22日, 26～31日, 1999年8月5～12日, 23～25日には水温差の縮小と底層 DO の低下がみられた。一方, 1996年8月6～8日, 12～17日, 1997年8月19～22日では, 水温差が拡大した時に底層 DO が低下, 2000年8月8～11日には水温差の縮小と底層 DO の増加というこれまでとは異なる傾向がみられた。

図8に St. 5における日毎の表・底層の水温差と底層 DO の関係を示した。1995年8月1, 2日のように水温差が 7.7, 7.9℃と大きくなり, 底層 DO がそれぞれ 6.1, 6.3mg/l と高くなった日や前述のような水温差の拡大と底層 DO の増加あるいは水温差の縮小と底層 DO の低下という関連性がみられることもあったが, 全体を通じては両者の相関は $r = 0.21$ と低く, 両者の間には有意性は認められなかった。

赤潮発生日数と底層の溶存酸素の関係

図9に8月の底層の平均 DO と8月の赤潮発生日数の関係を示す。底層の DO が 4.3mg/l 以上ではほとんど赤潮が形成されないのに対して, 4.3mg/l 以下では DO の低下とともに増加し, 3.4mg/l 付近で赤潮発生日数が 31 日と最大になった。3.4mg/l 以下では再び赤潮発生日数は減少し, 3.0mg/l となった 1989 年や 1994 年ではそれぞれ 0 日, 8 日と赤潮形成日数が少なくなった。

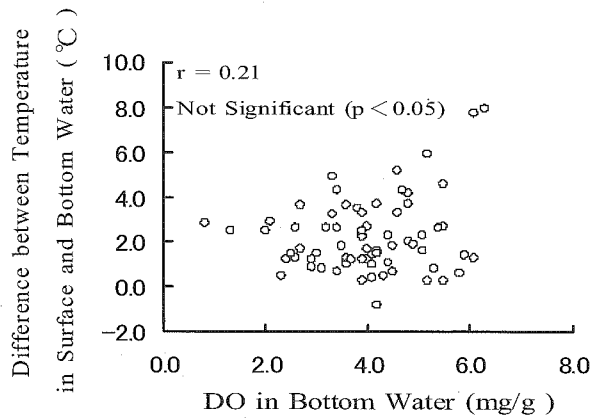


図8 田辺湾南部のSt. 5における1995～2000年8月の日毎の底層DOと表・底層の水温差の関係
1998年を除く。

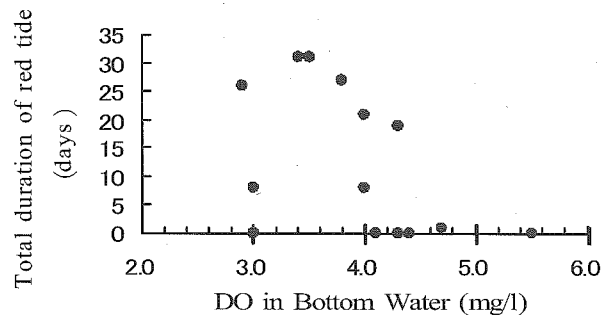


図9 田辺湾南部における1985～2000年8月の赤潮発生日数と平均底層DOとの関係
DO値は6定点の平均値で示す。

考 察

底層水温と底層 DO の月平均値の間には, 全期を通してみると有意な相関はみられなかったが, 1985年から1994年までの前期は負の相関 ($p < 0.02$) を示し, 1995年から2000年の後期は正の相関 ($p < 0.30$) がみられた。貧酸素水塊の形成においては, 大阪湾(城 1989)や東京湾(鬼塚 1989), 周防灘, (田森ら 1991), 豊前海(神蘭ら 1993)などでは, 密度成層が大きな要因であるといわれている。一方, 田辺湾においては貧酸素水塊の形成には鉛直安定度は主要因とならないこと(和歌山水試 1994)が明らかにされており, 前期の結果は低温の外海水の進入で貧酸素水塊が一掃される(吉岡ら 1998)ことによって生じた水温の低下と考えられ, 従来の知見を再確認することとなった。一方, 後期については, 前期とは逆に底層水温と溶存酸素の低下において関連がみられるものの高い相関関係はみられなかった。前期は底層の DO が 4.0mg/l 以下, 後期は 4.1mg/l 以上となっており, 底層の DO の上昇によって, これらの違いが生じたものと考えられる。また, 以上のような田辺湾南部における底層水温の低下を引き起こす原因については, 田辺湾では湾口南部から外海水の進入がみられること(和歌山水試 1992)や低温の内部急潮によって貧酸素水塊が一掃されること(吉岡ら 1998), 田辺湾では反時計まわりの流れが卓越し, しかも底層の流れの方が強いこと(竹内ら 1995)が明らかにされており, ここでは外海水の底層への進入が水温の低下とともに DO の変動に関係していることが示唆された。

竹内ら(1993)は、1979～1991年の田辺湾南部のDOを解析し、1985年から緩やかな上昇傾向がみられることや形成される貧酸素水塊は一週間以内の短期間であり、表・底層の水温差が大きくなったときに底層DOが上昇することを明らかにし、水温差は底層水温に連動していることを述べている。1995～2000年の底層水温、表・底層の水温差、底層DOについて日毎の検討を行ったところ、水温差と底層水温の関係は竹内(1993)と同様の結果が得られ、従来知られている低温の内部急潮の存在(吉岡ら1998)が示唆された。しかし、水温差と底層DOの関係については竹内(1993)によって報告されている傾向がみられるものの水温差の拡大と底層DOの低下が一致するという逆の傾向も認められた。また、全期をとおして水温差と底層DOの関係をみると有意な相関関係は得られなかった。これらのことから、底層のDOが月平均で4.0mg/lを超えた1995年以降では、内部急潮による表・底層の水温差の拡大が底層DOの上昇に対して1994年以前に比べて影響していないことが示唆された。

また、赤潮発生と底層DOについて検討してみると、田辺湾での貧酸素水塊は表層が過飽和になった後に発生する傾向がみられることが指摘され、表面で発生した赤潮プランクトンが枯死し、底層へ沈降・分解されることで底層の酸素が消費されることが示唆されている(和歌山水試1994)。底層の平均DOが3.4mg/lから4.4mg/lの間におけるDOの低下と赤潮発生日数の増加はこのことを裏付けると考えられる。また、前述のように4.0 mg/l以下の濃度帯のDOの低下は底層水温の上昇と関連($p < 0.02$)することから、水温成層が底層のDOを上昇させ赤潮の発生に関連しないという田辺湾に特有な赤潮発生機構の存在が示唆された。

このように田辺湾南部において底層水温と底層DO及び赤潮形成には特有の構造があることが明らかになり、その構造も1995年を境に変化したことが示唆された。構造の変化の要因としてはDO、特に底層のDOの上昇が考えられた。水産用水基準では、内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなければならないDOとして4.3mg/lが定められている(日本水産資源保護協会2000)が、田辺湾南部では4.0mg/lを境界に底層水温との関係に変化が認められ、また、4.3mg/l以上で赤潮の発生日数が少なくなったことから、4.3mg/lという基準は田辺湾においても基準値としての妥当性が認められた。

また、魚介類の致死濃度として底生魚類2.1mg/l、甲殻類3.6mg/lとされ(日本水産資源保護協会2000)、ほぼ正常な底生生物群集の維持に必要なDOは年間を通じて少なくとも3.6mg/l、大部分の海域では4.3mg/lが必要といわれている(玉井1990)。従って、水産用水基準に定められた4.3mg/l以上の維持ラインは、田辺湾における全ての水産業にとって堅持すべきDO値と規定することができる。また、田辺湾では1999年に夏季底層の平均DOが4.3mg/lを上回り、水産用水基準の基準値を超えるようになったにも関わらず夏季に無生物になる海域の存在することが知られている(和歌山県2003・2004)。このことから、出現する頻度や規模は低下したものの湾南部では依然として貧酸素水塊が形成されているものと考えられる。底生動物は有機物負荷の指標として適切であることが明らかにされており(Pearson et al 1978, 玉井1990, 北森1970, 菊池1982)、有機物の負荷はDOの低下と関係がある(上出2003b)ことから、田辺湾南部で依然として無生物の水域がみられることは、環境が完全に回復した状態には至っていないという結論の証左といえよう。

また、低いDOは水産有用種に悪影響を与えるだけでなく、隣接する潮間帯の生物相にも影響を与える(Ueda et al 2000)ため、田辺湾南部に散在する干潟域の貴重な生態系(WWF Japan 1996)に対しても大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。従って、本報で示したDO4.3mg/l以上を堅持することは、水産有用種の保護・育成だけでなく、周辺の動物相との調和にとっても不可欠の要件であるといえる。

摘 要

田辺湾南部における1985年から2000年までの8月の養殖漁場の溶存酸素の変遷について検討を行った。溶存酸素は各層で上昇傾向がみられ、15年間に全ての層で基準値4.3mg/lを上回った。また、底層

における水温と DO との間には、全期間で見ると有意な相関はみられなかったが、1985 年から 1994 年までの前期と 1995 年から 2000 年までの後期に分けた場合、前期では高い相関 ($r = -0.84$, $p < 0.01$) が得られたのに対し、後期は前期に比べると両者の関連性は低くなった ($r = 0.58$, $p < 0.30$)。また、前期は底層の平均 DO が 4.0mg/l 以下、後期は 4.1mg/l 以上の時期に一致した。

1995～2000 年の底層水温、表・底層の水温差、底層 DO について日毎の検討を行ったところ、底層 DO が月平均で 4.0mg/l を超えた 1995 年以降では、表・底層の水温差の拡大は底層 DO の上昇に 1994 年以前に比べ影響していないことが示唆された。更に、赤潮発生日数と底層の溶存酸素の関係は、底層の DO が 4.3mg/l 以上ではほとんど赤潮が形成されないのに対して、 4.3mg/l から 3.4mg/l では DO の低下とともに増加する傾向がみられた。

以上のように 4.0mg/l 以下の濃度帯の DO の低下は底層水温の上昇と大きく関連することから、水温成層が底層の DO を上昇させ赤潮の発生に関連しないという田辺湾に特有な赤潮発生機構の存在が再確認された。また、その関係は 1995 年以降では弱まっていることが示唆され、要因としては DO、特に底層の DO の上昇が考えられた。底層 DO 4.0mg/l を境界に底層 DO と底層水温および表・底層の水温差との関係に変化が認められたことと、 4.3mg/l 以上で赤潮の発生日数が少なくなったことから、 4.3mg/l という値は田辺湾においても基準値としての妥当性が認められた。

謝 辞

本報告で使用した田辺湾南部及び中央部の養殖場における貴重な溶存酸素のデータを提供いただいた堅田漁協 清水 昭治 氏に厚くお礼申し上げます。また、取りまとめの機会を与えてくださり、データの整理・取りまとめにあたり多大なご助言・ご指導をいただいた増養殖研究所 所長 竹内 照文博士に改めてお礼申し上げます。

文 献

- Jorgensen, B.B. and Fenchel, T. 1974. The Sulfur Cycle of a Marine Sediment Model System. *Marine Biology*. 24. 189-201.
- Jorgensen, B.B. 1977. The Sulfur Cycle of a Coastal Marine Sediment (Limfjorden, Denmark). *Limnology and Oceanography*. 22(5). 814-832.
- 神菌真人・江藤拓也・荒田敬生. 1993. 福岡県水産海洋技術センター研究報告. 1. 217-224.
- 菊池泰二. 1982. 海域における富栄養化と底棲動物の指標性. 沿岸海域の富栄養化と生物指標 (日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, 84-100.
- 北森良之介. 1970. 海洋の底生動物と水質汚濁. *海洋科学*. 2. 643-648.
- Naoko Ueda, Tsutsumi, H, Yamada, M, Hanamoto, K, Montani, S. 2000. Impacts of oxygen-deficient water on the macrobenthic fauna of Dokai bay and on adjacent intertidal flats, in Kitakyushu, Japan. *Marine pollution bulletin*. 40(11). 906-913.
- 日本水産資源保護協会. 2000. 水産用水基準 (2000 年版). PP96.
- 鬼塚正光. 1998. 東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート. 26 (2). 99-100.
- T.H.Pearson and R.Rosenberg . 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr.Mar.Biol.Ann.Rev.*, 16, 229-311.
- 竹内照文. 1980. 和歌山県沿岸の赤潮— 1971 年から 1979 年までの赤潮発生状況. 昭和 54 年度和歌山県水産試験場事業報告: 186-199.
- 竹内照文・小久保友義・清水昭治. 1993. 田辺湾における貧酸素現象に関する研究— 1. 平成 4 年度和

- 歌山県水産試験場事業報告：145-153.
- 竹内照文・小久保友義・辻 泰俊・本城凡夫. 1995. 田辺湾における *Gymnodinium mikimotoi* の群生長と流況による赤潮分布域の変化. 日本水産学会誌. 61 (4) : 494-498.
- 玉井恭一. 1990. 底生生物. 海面養殖と漁場環境 (水産学シリーズ), 恒星社厚生閣, 東京, 69-78.
- 田森裕茂・岩男 昂・神菌真人・吉田幹英・池田武彦・馬場俊典・小泉喜嗣・内間満明・三浦秀夫・矢沼 隆. 1991. 西部瀬戸内海における *Gymnodinium nagasakiense* の初期出現域とその環境特性. 日本水産学会誌. 57 (12). 2179-2186.
- 上出貴士. 2004a. 和歌山県沿岸における赤潮— 1981年から2000年の赤潮発生状況—. 和歌山農林水技セ研報. 5 : 107-116.
- 上出貴士. 2004b. 田辺湾における養殖漁場環境の変動について. 和歌山農林水技セ研報. 5 : 117-124.
- 和歌山県水産試験場. 1992. 平成4年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. PP25.
- 和歌山県水産試験場. 1994. 平成6年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. PP15.
- 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場増養殖研究所. 2003. 平成14年度環境保全型養殖普及推進対策事業報告書. PP18.
- 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場増養殖研究所. 2004. 平成15年度養殖漁場環境保全推進事業 (環境保全型養殖普及推進対策事業) 報告書. PP22.
- World Wide Fund for Nature Japan. 日本における干潟海岸とそこに生息する底生生物の現状. WWF Japan サイエンス・レポート. 3. PP182.
- 吉岡 洋・芹沢重厚・高山知司・田中祐志. 1998. 夏季田辺湾における内部急潮による海水交換. 海岸工学論文集. 45. 456-460.
- 城 久. 1989. 大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート. 26 (2). 87-98.