

# 田辺湾における貧酸素現象に関する研究— 1

## 定点観測結果からみた湾南部域における貧酸素水塊の発生状況\*

竹内照文・小久保友義・清水昭治\*\*

### 目 的

貧酸素水塊は富栄養化の進んだ内湾域（閉鎖性水域）で出現する典型的な現象であり、大村湾<sup>1)</sup>、豊前海<sup>2, 3)</sup>、大阪湾<sup>4)</sup>、三河湾<sup>5)</sup>や東京湾<sup>6)</sup>など全国各地で形成され、水産業や環境保全面から大きな問題となっている。

そこで、貧酸素水塊の形成状況や形成機構を明らかにし、防除対策を確立することが重要な課題となっている。

田辺湾の南部域では夏季に中～底層で貧酸素水塊が頻発する<sup>7)</sup>ことや秋季の混合期にはまれに表層にまで及ぶ強い貧酸素水塊が形成されることも観察されている<sup>8)</sup>。しかし、貧酸素水塊の形成状況や形成機構については殆ど明らかにされていない。

田辺湾の南部に位置する堅田漁業協同組合では1979年から漁場監視のため定点観測を行っている。ここではその結果を用いて、南部域における貧酸素水塊の形成状況を整理し、貧酸素水塊の形成と気象や海況との関係について検討したので報告する。

なお、貧酸素水塊については各海域ごとに定義されているが、ここでは井上・杉本<sup>9)</sup>を参考にして、養殖魚類が生理的に異常をきたし始めるとされている3 ml/l以下を貧酸素水塊として定義した。

### 方 法

資料は堅田漁業協同組合が行っている定点観測結果で、1979年から1991年までの13年間を取りまとめた。観測の実施回数は表1に示すが、毎年、モジャコ（ブリの稚魚）が漁場に入ってくる春先から始められ、夏季の高水温期を中心に晩秋まで行われている。冬季は欠測となることが多いが、1990年からは周年行われている。調査は1日1～3回行われているが、ここでは午前中に行われたものを用いた。調査定点は図1に示すように漁場周辺に設定した6定点である。観測項目は水温と溶存酸素で、DOメーター（YSI社製Model 57）を用いて、表面、5、10mと海底上1mの4層で行われている。

なお、参考資料として気象月報（和歌山地方気象台発行）を用いた。

\* 養殖漁場環境保全対策事業費による。

\*\* 堅田漁業協同組合

竹内他：田辺湾南部域における貧酸素水塊の発生

表1 定点観測の実施回数

| 年    | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
|------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1979 |   |   |    |    |    | 28 | 21 | 8  |    |    |    |    |
| '80  |   |   |    |    | 9  | 22 | 28 | 30 | 26 | 30 | 9  |    |
| '81  |   |   |    |    |    | 9  | 30 | 31 | 30 | 30 | 8  |    |
| '82  |   |   |    | 1  | 14 | 29 | 31 | 31 |    |    |    |    |
| '83  |   |   |    | 5  | 29 | 28 | 31 | 29 | 28 |    |    |    |
| '84  |   |   |    | 5  | 8  | 29 | 30 | 30 |    |    |    |    |
| '85  |   |   |    | 18 | 22 | 21 | 22 | 27 | 29 |    |    |    |
| '86  |   |   |    |    | 21 | 20 | 28 | 2  |    |    | 22 |    |
| '87  |   |   |    |    |    |    | 18 | 31 | 30 | 28 | 30 | 10 |
| '88  |   |   |    | 23 | 31 | 30 | 30 | 31 | 29 | 31 | 22 |    |
| '89  |   | 4 | 3  | 12 | 26 | 25 | 25 | 22 | 23 | 28 | 27 | 4  |
| '90  | 1 |   | 3  | 11 | 19 | 25 | 27 | 23 | 20 | 24 | 24 | 20 |
| '91  | 9 | 7 | 24 | 26 | 26 | 25 | 27 | 22 | 28 | 25 | 25 | 24 |

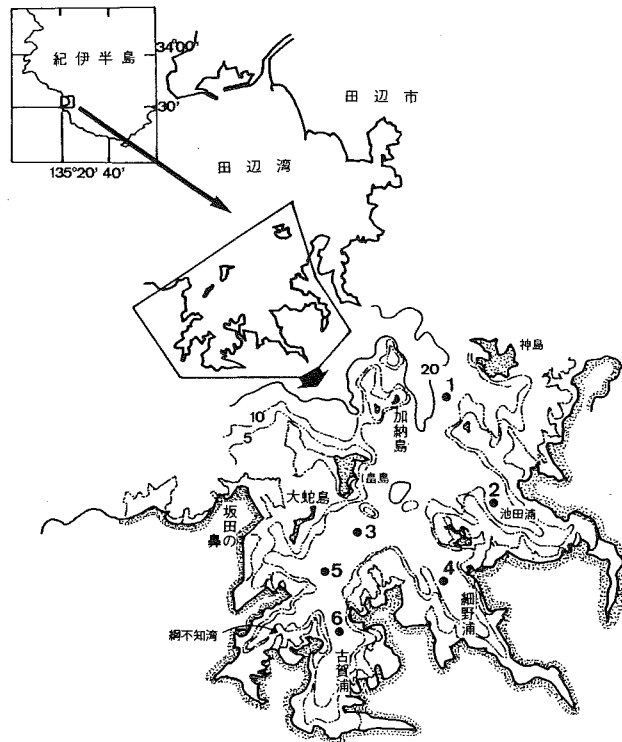


図1 調査水域と定点

## 結 果

## 1 田辺湾南部域の地理的条件と海底地形

田辺湾は湾口幅4km、奥行き4kmの北西に開口した平均水深15mほどの小湾で、その地理的位置や開放的な形状から黒潮系水に影響されやすく、海水交換は比較的良好である<sup>10)</sup>。しかし、降雨時には会津川を始めとして、各支湾部では小河川からの影響も大きく、これら河川水と黒潮系外洋水との混合により湾内水が形成される<sup>11)</sup>。

調査対象水域の南部域は池田、細野、古賀浦や綱不知浦などの支湾と坂田の鼻、大蛇島、畠島、加納島や神島などの島しょに囲まれた半開放的な水域である。ここでは古くから魚類養殖が大規模に行われ、これらと後背地からの有機物負荷が相乗して富栄養化が進行し、県下で赤潮が最も頻発する水域である<sup>12)</sup>。この水域は陸岸から100m以内で水深10mになるところが多く、この間は急傾斜であるが、それ以深は最深部(21m)まで比較的平坦な海底地形を示している。また、陸岸から10m以浅の水域は砂浜や岩礁が点在し、それ以深では露岩とその周辺に0.064mm以下の泥分含有率が50~75%のシルト質の堆積物で覆われ<sup>13)</sup>、その厚さは2m前後にまでなっている(未発表)。また、底泥のCODは20mg/g以上の部分が多く<sup>13)</sup>、長年にわたって有機物が負荷され続けたことにより著しく悪化している。

## 2. 貧酸素水塊の形成状況

表面、5、10m層と海底上1m層の全点平均値による水温の季節変化を図2に示す。水温は1979年から1991年までの13年間の毎月の平均値である。表面は13.0~28.0℃、底層は13.0~25.0℃の範囲で推移し、4月頃から表、底層間の水温差が生じ、6月が1.7℃、7月が2.5℃、8月が2.2℃で夏季に最も大きい。また、10月には表、底層間の水温がほぼ均一になって、混合期に入る。11月から3月頃までの低水温期には表、底層間の水温差がなく、ほぼ均一に推移している。田辺湾は、水深が浅く、しかも、この季節には湾口から湾奥に向う北西の季節風が卓越するため、湾内が容易に擾乱され、このことが表、底層の水温が均一に推移している一因になっているものと考えられる。

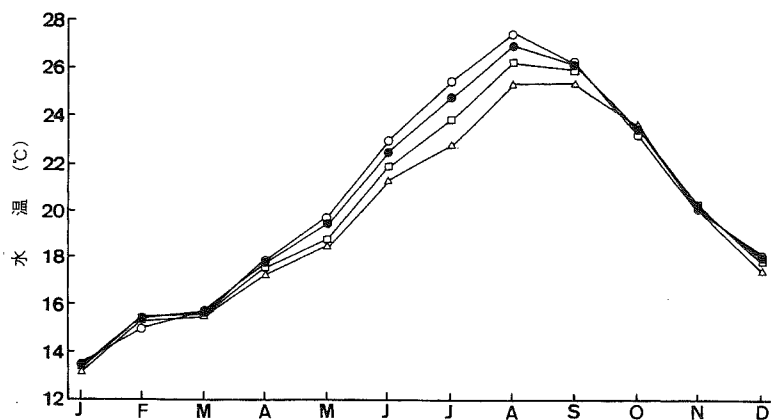


図2 水温の季節変化

○-○: 表面      ●-●: 5 m  
□-□: 10 m      △-△: 海底上1 m  
※1979年から1991年までの平均値による

また、1月に最低値を示したが、表1にみられるように調査回数が少ないため、この頃の正確な状況を反映しているとは思えない。

表面、5、10m層と海底上1m層の全点平均値による溶存酸素の季節変化を図3に示す。溶存酸素は1979年から1991年までの13年間の平均値である。なお、表1に示すように、各月により調査回数に差があるが、ここでは毎月の調査回数の差を無視して示した。溶存酸素は、表層では1月から10月まで、中、底層では8月まで緩やかに下降していた。また、3月頃までは表、底層間の差がほとんど認められないが、4月頃から徐々に大きくなり、8月には表面が5 ml/l、5 m層が4 ml/l、そして、10m層と海底上1 m層では3 ml/lで、中、底層での値が最も低く、しかも、表、底層間の差が最も大きくなった。また、9月から10月にかけて中、底層での値が急速に回復し始め、その結果、10月には表、底層間の差がなく、ほぼ均一になった。

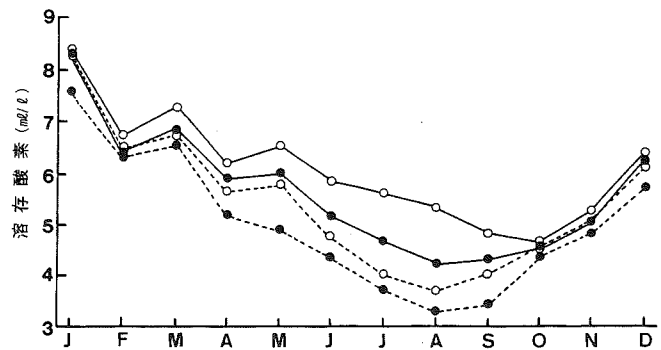


図3 溶存酸素の季節変化

○-○：表面 ●-●：5 m  
□-□：10 m △-△：海底上1 m  
※1979年から1991年までの平均値による

中、底層で溶存酸素が最も低下する8月の値を用い、表面、5、10m層と海底上1m層の全点平均値による経年変化を図4に示す。溶存酸素は1981、'82年頃から緩やかに減少し始め、1984年には表面が3 ml/l、5、10m層が2 ml/l、そして、海底上1 m層では1 ml/lで、全層にわたって最も低下した。ところが、1985年から徐々に上昇し始め、表面から10m層では1991年までその傾向

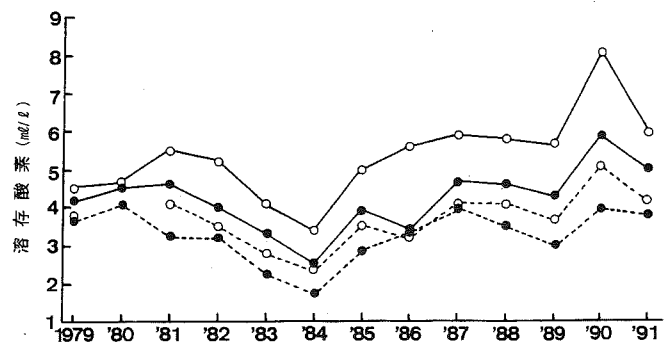


図4 8月の値による溶存酸素の経年変化

○-○：表面 ●-●：5 m  
□-□：10 m △-△：海底上1 m

が続く、観測開始当時の値よりもいくぶん高くなった。一方、海底上1 m層では1987年まで緩やかに回復していたが、1988年からはほぼ横ばい状態に推移し、1979、'80年の水準に戻った。また、1983、'84、'85年や1989年には月平均値でも中、底層で3 ml/l以下の貧酸素状態になっていた。

### 3. 貧酸素水塊の形成と気象、海況の関係

ここでは13年間の資料から貧酸素水塊が形成されていた3例を取り出し、貧酸素水塊の形成と気象、海況との関係を検討した。解析期間は1985年7月27日～8月26日、9月1日～9月30日と1988年8月4日～8月30日で、この間の表、底層の溶存酸素、水温、水温差と気温及び降水量の推移を図5、6、7、また、同期間中の最多風向と平均風速を図8に示す。表面での溶存酸素は3～8 ml/lで、一週間ほどの周期で上下変動を繰り返していたが、6、7 ml/lの過飽和状態を示すことが多く、植物プランクトンの増殖していることが示唆される。底層では1～5 ml/lで、貧酸

素水塊が頻繁に形成され、しかも、1985年8月9日や9月25日のように1 ml / 1 台の無酸素水塊にちかい日もあった。ただ、貧酸素水塊は長期に継続することがなく、一週間以内で比較的短期間の内に消滅するものが多かった。また、表面と底層の溶存酸素は互いに相反するように推移し、表面で溶存酸素が高い時には底層の溶存酸素が低下し、貧酸素水塊の形成されていることが多かった。特に、1985年9月上、下旬や1988年8月中、下旬にはこの傾向が著しい。しかし、1985年8月中旬のように表面の溶存酸素があまり高くない時に底層で貧酸素水塊が形成されていたり、1988年8月上旬のように表面の溶存酸素が7 ml / 1 以上の時に底層で貧酸素水塊が形成されていないこともあった。

表面水温は気温と概ね対応していたが、気温よりは変動幅が小さく、比較的安定していた。底層水温は20~27°Cで推移し、表面水温の変化と連動することがなく、しかも、表面水温よりは日変化が大きかった。水温差は底層水温とよく連動し、底層水温が低下した時に水温差が大きくなった。また、水温差が大きい時には底層の溶存酸素が高く、小さい時には溶存酸素が低下して貧酸素水塊が形成されていることが多かった。特に、1985年9月上、中旬や1988年8月中、下旬にその傾向が著しい。また、1985年8月19、20日や9月3~5日のように底層水温が下降して水温差が大きくなる時に貧酸素水塊が消滅する傾向が認められた。

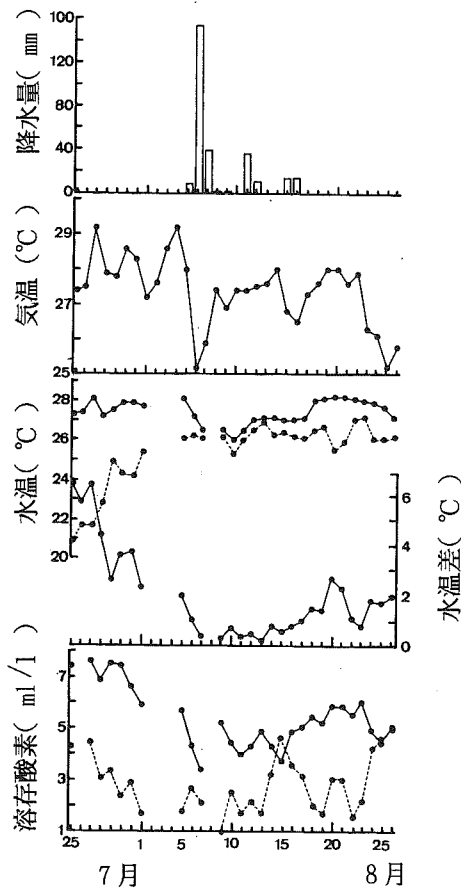


図5 溶存酸素、水温、水温差、気温と降水量の推移 (1985年7月25日~8月26日)  
水温と溶存酸素は表面(●-●)と底層(●...●)で示す

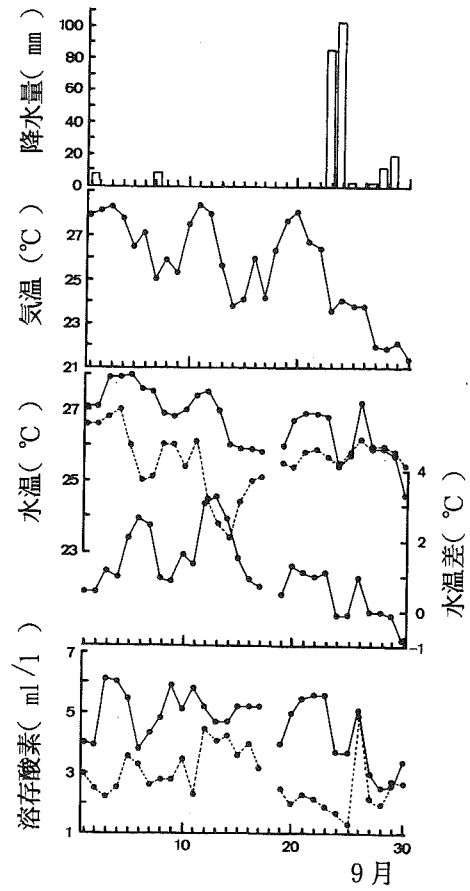


図6 溶存酸素、水温、水温差、気温と降水量の推移 (1985年9月1日~9月30日)  
水温と溶存酸素は表面(●-●)と底層(●...●)で示す

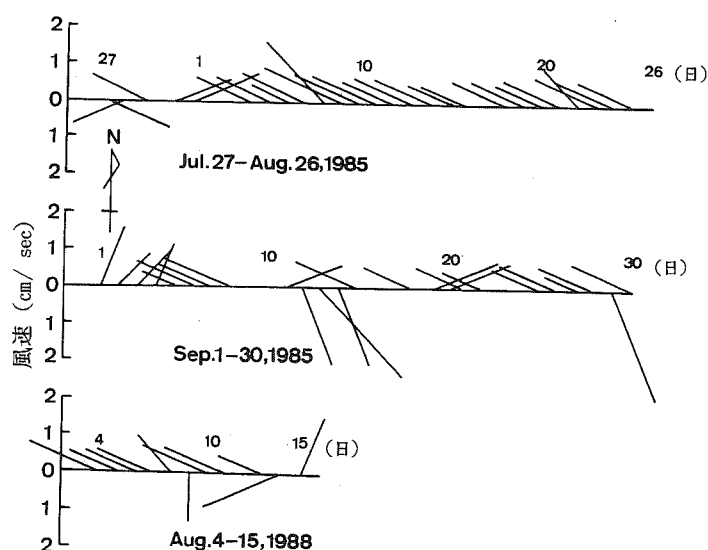


図8 最多風向と平均風速の推移

1985年8月上旬、9月下旬と1988年8月中旬には100mmを超えるまとまった降雨があったが、貧酸素水塊は降雨の有無に係わらず形成されていた。また、期間中にはS E方向の湾奥から湾口に向かう風が卓越し、何日かこの方向の風が連吹した後にN W等の風が変わっていたが、貧酸素水塊との関連は認められなかった。

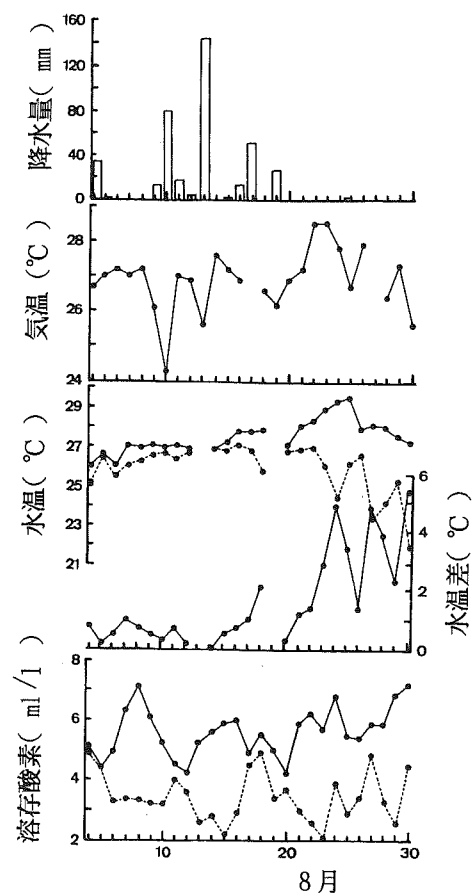


図7 溶存酸素、水温、水温差、気温と降水量の推移（1988年8月4日～8月30日）

水温と溶存酸素は表面（●—●）と底層（●…●）を示す

## 考 察

田辺湾南部域では溶存酸素が8月に最も低下する（図3）ことや1981、'82年頃から急速に減少していたが、1985年を境にして緩やかに回復傾向にある（図4）ことが明らかになった。同湾では赤潮の継続日数が1975年頃から1987年にかけて徐々に長期化していたが、1988年を境にして近年、短くなっている（未発表）。富栄養化の進行に伴って貧酸素水塊が形成されることが知られているので、ここでは逆の現象が認められることになり、この二つの現象から判断するかぎり、田辺湾南部域では富栄養化の進行が止まり、水域の浄化されつつあることが推察される。しかし、田辺湾の中央部ではCODが徐々に増加傾向にあることが報告されている<sup>14)</sup>ので、田辺湾全体としての富栄養化の状況については更に解析することが必要であろう。

田辺湾では、1983年に実施された漁業権の切り替えにより、沖合い域に避難漁場が設置され（図9）、1984年以降は春先から晩秋にかけての高水温期に大半を沖合い漁場に移すようになった。そこで、1984年からは夏季の投餌による負荷が湾奥部と沖合いに二分されるようになったが、図4に示したように、溶存酸素が上昇し始めた年と一致している。また、近年、ハマチの価格低下や漁場環境の悪化が指摘されるようになり、地元漁協では摂餌量の多いハマチを中心とした養殖形態から

摂餌量が少ないマダイやトラフグを中心とした形態に移行しつつある。この水域での総投餌量については明らかでないが、養殖形態の変換により総投餌量の少なくなったことが推定され、このようなことが溶存酸素の回復につながっているのかも知れない。しかし、後背地における下水道の整備は進行せず、しかも、依然として開発は進められているので、水域の浄化を図るには後背地からの負荷を含めた総合的な対策が必要であろう。

貧酸素水塊は富栄養化の進行した閉鎖的な内湾域で形成される現象であり、主たる原因から2つのタイプの水域に区分される。1つは後背地等からの有機物負荷が極めて大きい水域であり、2つ目は有機物負荷があまり大きくないが、閉鎖性の強い湾型を示す水域である。飯塚・関<sup>1)</sup>によると、大村湾は一潮汐による海水の流出入量が全海水量の3.0%であり、このように海水の交換が少なく、有機物量の多いと言えないこの湾で強度の無酸素化現象が進行する主たる原因は湾型に基づく海水流動の悪さにあると指摘している。

田辺湾南部域の平均水深を15m、平均干満差1.873m<sup>15)</sup>として一潮汐による海水の流出入量を計算すると12.5%になり、大村湾の3.0%<sup>1)</sup>や佐世保湾の9.6%<sup>1)</sup>よりも高く、三河湾の20%<sup>1)</sup>に比べるといくぶん低い。田辺湾は開放的な形状を示し、そこと直結している湾南部域は前面に島しょがあり、海水交換の何割かを遮断していると考えられるが、必ずしも閉鎖的な形状でない。そこで、湾南部域での貧酸素水塊は湾の形状と魚類養殖や後背地からの有機物負荷が効くことにより形成されているものと推察される。

また、貧酸素水塊は夏季の成層の形成に伴って上層からの酸素供給が遮断されると同時に、底層で易分解性の有機物が分解される過程で形成され、上層からの酸素供給と下層での酸素消費の均衡によって決まると考えられている。し

しかし、水域によって両者の比重が異なるため、必ずしも一様なパターンで形成されるものでない。例えば、大阪湾<sup>1)</sup>では日射に伴って水温差ができ、上層からの酸素の供給が遮断されることによって貧酸素水塊が形成されるので、貧酸素水塊の消長が表層と底層の水温差と良く対応していることが報告されている。しかし、豊前海<sup>2)</sup>では貧酸素水塊の形成と水温差は必ずしも対応せず、降雨に伴って陸上から有機物が負荷されることが重要であると指摘されている。ここでの結果から、田辺湾南部域では春季から夏季にかけて表、底層間の水温差が大きくなる(図2)につれて溶存酸素の低下する(図3)

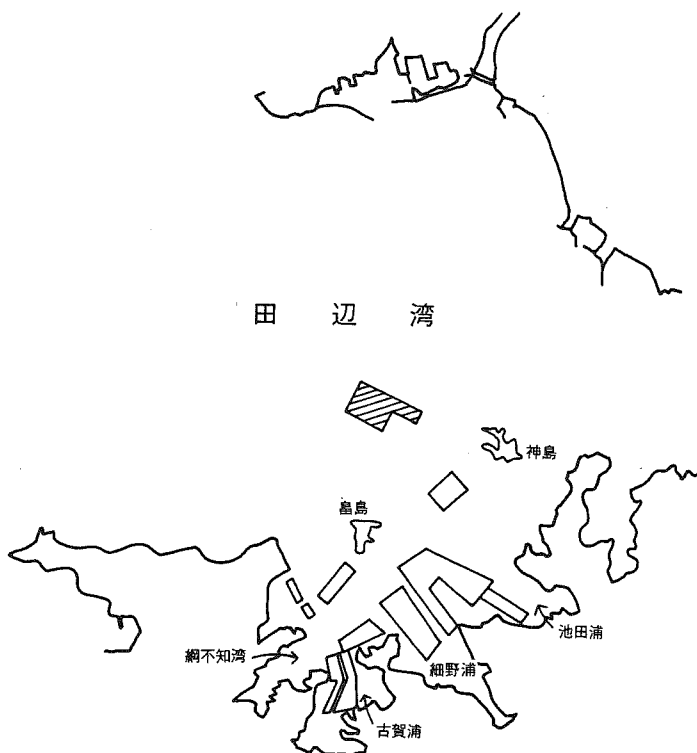


図9 田辺湾南部における養殖漁場の位置  
斜線部は1983年から設定された避難漁場

ことが明らかになったので、大阪湾で報告<sup>4)</sup>されている状況と一致している。ただ、夏季に限定すると、底層水温が低下して水温差が大きくなった時に底層の溶存酸素が上昇し、逆に、底層水温が上昇して水温差が小さくなった時に貧酸素水塊の形成される傾向が認められた(図5、6、7)。水温差は底層水温とよく対応し(図5、6、7)、底層水温が上昇した時に水温差が小さく、また、低下した時に大きくなることが明らかになった。底層水温の上昇は外洋水の進入が弱まった時に上層からの熱伝導によって起こり、逆に、底層水温の低下は外洋水の進入によると考えられる。また、貧酸素水塊の形成には底層の流動が重要な要因となっていることが知られている<sup>1)</sup>。そこで、外洋水の進入が弱まった時には流動が弱まり、かつ、底層水温が上昇して水温差が小さくなり、このような状況の中で貧酸素水塊が形成されているものと推察され、田辺湾南部域の貧酸素水塊の形成には外洋水の進入の度合いが大きな要因になっているものと考えられる。また、底層水温の日変化は表層水温よりも大きいので、この水域には外洋水が頻繁に進入していることが推察され、しかも、貧酸素水塊の消滅時には底層水温の下降することが認められている。そこで、貧酸素水塊は長期化することなく、短期間で消長を繰り返しているものと考えられる。

また、貧酸素水塊の形成時には表層の溶存酸素が極めて高くなる傾向が認められた(図5、6、7)。表面での高い溶存酸素は植物プランクトンの増殖によるものであり、これらが枯死、分解されながら、下降する過程で、溶存酸素が消費され、貧酸素水塊が形成されるものと推察される。しかし、表面の溶存酸素が高い時に貧酸素水塊が形成されていないこともあった。これは1985年7月下旬に見られるように底層水温が急変しており、底層の流動が強かったため、貧酸素水塊が形成されなかったものと考えられる。

また、貧酸素水塊の形成と降水量<sup>2)</sup>や風<sup>6)</sup>の間には重要な関連を持つことが指摘されているが、ここでの結果からは両者とも明瞭な関係が認められなかった。

## 要 約

地元の漁業協同組合が行っている定点観測結果を整理し、田辺湾南部域における貧酸素水塊の形成状況について以下のことが明らかになった。

- 1 田辺湾南部域では春先からの水温の上昇に伴って、溶存酸素が緩やかに低下し始め、8月には表面が5 ml/l、中層が4 ml/l、そして、底層では3 ml/lで、最も低くなった。また、8月の経年変化から、ここでの溶存酸素は、1980、'81年頃から緩やかに低下していたが、1985年を境にして回復傾向にあることが明らかになった。
- 2 中、底層では貧酸素水塊が頻繁に形成され、1 ml/l 以下の無酸素水塊にちかい日もあった。また、貧酸素水塊は長期化することなく、一週間以内で消滅するものが多かった。
- 3 表面と底層の溶存酸素は互いに相反するように推移し、表面で溶存酸素が高い時には底層の溶存酸素が低下し、貧酸素水塊の形成されていることが多かった。
- 4 水温差が大きい時には底層の溶存酸素が高く、小さい時には溶存酸素が低下して貧酸素水塊の形成されていることが多かった。



文 献

- 1) 飯塚昭二・関 霽虹、1989: 大村湾における無酸素水塊の形成. 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 75-86.
- 2) 神蘭真人・江藤拓也・荒田敬生、1993: 豊前海の貧酸素水塊形成と降水量との関係. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, 1, 217-224.
- 3) 神蘭真人・江藤拓也・磯辺篤彦・俵 悟, 1993: 豊前海の貧酸素水塊-II. 1993年度日本海洋学会春期大会講演要旨集, 141-142.
- 4) 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.
- 5) 佐々木克之, 1989: 三河湾における貧酸素水塊の形成機構. 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 109-118.
- 6) 柿野 純・松村皐月・佐藤善徳・加瀬信明, 1987: 風による流れと青潮の関係. 日本水産学会誌, 53(8), 1475-1481.
- 7) 竹内照文・芳養晴雄・中西 一, 1982: 田辺湾の赤潮-II 1979、'80年の定置観測結果と赤潮発生の関係について. 昭和55年度赤潮予察調査報告書(瀬戸内海ブロック), 水産庁, 67-76.
- 8) 水産庁, 1984: 昭和55年度赤潮予察調査事業調査資料(瀬戸内海ブロック)-和歌山県水産試験場, pp. 30.
- 9) 井上裕雄・杉本仁弥, 1985: 六 環境条件 養魚講座4 ハマチ・カンパチ. 緑書房, 東京, 126-140.
- 10) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1990: 平成元年度赤潮対策技術開発試験報告書-中層増殖性広域赤潮被害防止技術開発試験. 43pp.
- 11) 加来靖弘・渡辺勇二郎・竹内淳一・坂本博規・中筋 孝・西浦幸雄・田上伸治, 1975: 新川改修事業に係る漁場の実態調査-II. 昭和49年度和歌山県水試事報, 179-192.
- 12) 竹内照文・芳養晴雄, 1979: 田辺湾の赤潮-1 発生傾向と環境について. 昭和54年度赤潮予察調査報告書(瀬戸内海ブロック)水産庁, 200-215.
- 13) 水産庁, 1983: 昭和57年度漁場改良復旧基礎調査報告書(田辺湾、串本港、浦神湾、森浦湾・勝浦港). 18-52.
- 14) 加来靖弘, 1989: 沿岸域の総合利用と環境について. 瀬戸内海の環境保全に関する漁業団体合同研修会講演要旨集, 24-34.
- 15) 加来靖弘・中筋 孝・渡辺勇二郎・芳養晴雄, 1977: 細野浦湾周辺漁場の海水交流. 昭和51年度和歌山県水試事報, 103-120.