

五ヶ所湾における中層貧酸素水塊の発生と予測

阿保勝之*・杜多 哲**・藤原建紀***・武内智行****

1. はじめに

熊野灘沿岸にはリアス式の半閉鎖性の小湾が多く存在しており、その多くは魚類養殖場として利用されている。これらの魚類養殖場では、しばしば夏季に養殖生質内が貧酸素化して養殖魚に悪影響を与えることが知られている。しかし、この貧酸素化の原因や発生機構はよく分かっておらず、貧酸素被害の発生に対して何ら対策をとれないのが現状である。

五ヶ所湾は、熊野灘北部に位置する小湾であり、主湾の他にいくつかの枝湾から成り立っている。このうち西側に位置する迫間浦には、魚類養殖場が集中して分布している（図-1）。この枝湾は、湾口部が周りより少し浅くシル（sill）を形成している。そのため、迫間浦の下層は海水交換が悪く、夏季には下層に貧酸素水塊が形成される（Abo and Toda, 1996）。ただし、この下層の貧酸素水塊は、表層（6 m 以浅）に飼育されている養殖魚に直接的な悪影響を与えることはない。しかし、中層に貧酸素水塊が発生する時があり、この場合には養殖生質に貧酸素水が及んで養殖魚に悪影響が生じる。

本研究では、迫間浦の魚類養殖場でみられる中層貧酸素水塊の発生機構を解明する。さらに、数値モデルを用いて中層貧酸素水塊の発生予測を試みる。

2. 現地調査

1992 年 5 月から 9 月に、迫間浦（測点 1～8）において溶存酸素濃度の鉛直断面分布を調査した。1995 年 8 月から 9 月には、湾外（測点 A）と湾内（測点 B～D）で水温鉛直分布の時間変動を測定した。1996 年 8 月から 9 月には、迫間浦の測点 1～7 において、水温、塩分、溶存酸素の鉛直断面分布を調査した。水温測定には自記式水温計（離合社製 RMT、アレック電子製 MDS-T）を用いた。水温、塩分、溶存酸素濃度の鉛直断面測定には、ユニオンエンジニアリング製直読式 CTD 計および溶存酸素計 YSI モデル 58 を使用した。また、風のデータは、

大王崎航路標識事務所の毎時値を使用した。

3. 観測結果

3.1 貧酸素水塊の挙動

1992 年 5 月から 9 月に、迫間浦の魚類養殖場周辺において、溶存酸素の鉛直断面分布を調査し、貧酸素水塊の実態を明らかにした。図-2 は、測点 1～8 における溶存酸素濃度の鉛直断面分布である。

5 月 6 日には、海底に近づくに従って溶存酸素濃度は低くなっているが、海底付近でも 4 mg/l 以上であり貧酸素水塊は見られない。5 月 18 日には、海底付近で溶存酸素濃度 3 mg/l 以下の貧酸素水塊（図中の点刻部）がわずかに形成され始める。その後、貧酸素水塊の規模は大きくなり、その厚みが 5 m を越えるようになる。この下層の貧酸素水塊は 7 月 13 日まで続く。ところが、7 月 20 日には、測点 5 より奥で水深 10 m 付近を中心に貧酸素水塊が形成されて、3 mg/l 以下の貧酸素水が水深 3 m にまで及んでいる。このとき、中層では溶存酸素濃度が 1 mg/l 以下と著しい貧酸素状態であるが、下層部では 2 mg/l

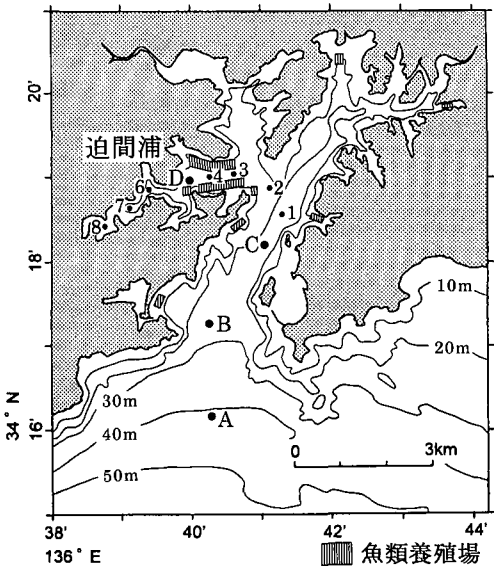


図-1 五ヶ所湾の地形および魚類養殖場と測点の位置

* 水産庁養殖研究所 環境制御研究室
** 正会員 農博 水産庁養殖研究所 環境制御研究室長
*** 正会員 農博 京都大学助教授 農学研究科海洋生物環境学
**** 正会員 農博 水産庁水産工学研究所 開発システム研究室長

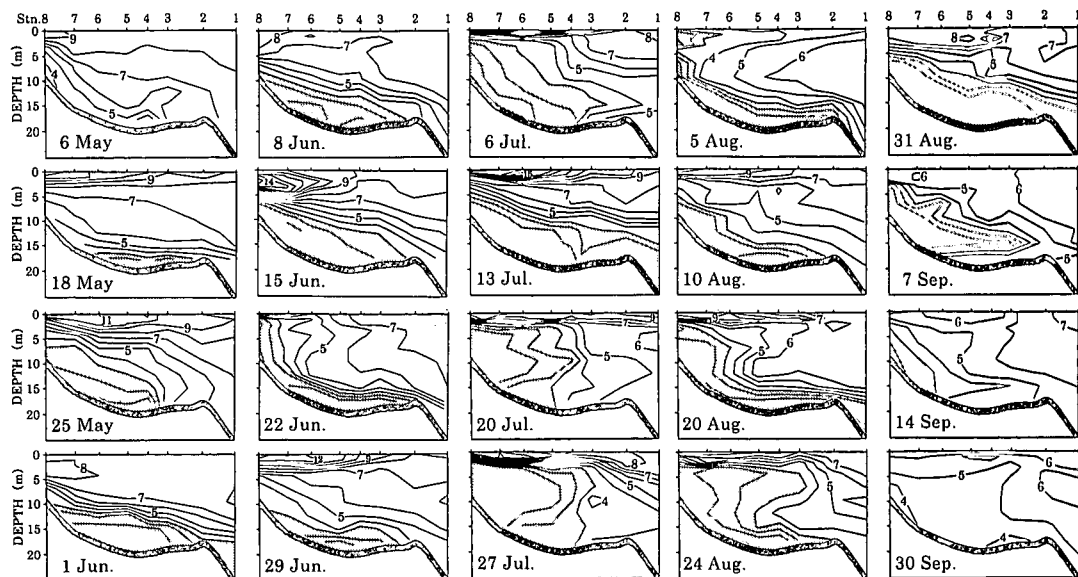


図-2 溶存酸素の鉛直断面分布 (1992年)。図中の点刻部は 3 mg/l 以下の貧酸素水塊を表す。

以上と比較的高濃度になっている。7月27日にも、測点3から奥で中層を中心に貧酸素水塊が形成されている。この中層貧酸素水塊は、測点3～5の水深6m以浅で行われている魚類養殖に悪影響を与えている。8月5日には、再び下層に貧酸素水塊が形成されるが、8月24日には、中層貧酸素水塊が発生し、測点3より奥では水深4mまで貧酸素化している。8月31日には下層に貧酸素水塊が形成され、その後、下層の貧酸素水塊は規模が小さくなり、9月14日には湾奥にのみ見られる。そして、9月30日になると、貧酸素水塊は消滅している。

3.2 中層貧酸素水塊

迫間浦の魚類養殖場では、夏季の成層期に貧酸素水塊が下層に形成される。しかし、魚類養殖は枝湾中央部の表層で行われているので、下層の貧酸素水塊が養殖魚に直接の悪影響を及ぼすことはない。しかし、1992年7月27日や8月24日のように中層に貧酸素水塊が形成された時には、養殖が行われている水深6m以浅に貧酸素水が進入し、養殖魚に悪影響を及ぼす。

この中層貧酸素水塊の発生機構を解明するために、1996年に迫間浦(測点1～7)において短い時間間隔で調査を実施した。その結果、中層貧酸素水塊の発生する前(8月27日)、発生直前(9月2日)および発生直後(9月3日)に水温、塩分、溶存酸素の鉛直断面分布を捉えることができた(図-3)。8月27日には、枝湾内は水温 23.5°C 以上、塩分 33.9 psu 以下の海水で満たされている。溶存酸素濃度は上層で高く、深くなるにつれて低下しており、下層には 3 mg/l 以下の貧酸素水塊が形成されている。この貧酸素水塊の厚みは、迫間浦の湾口付近で

は約2mであるが湾奥では約10mである。ただし、養殖生簀は水深6m以浅に存在するので、この貧酸素水塊が養殖魚に直接の悪影響を与えることはない。

しかし、9月2日から3日にかけて貧酸素水塊が上昇し、中層に貧酸素水塊が形成されて養殖魚に悪影響を及ぼした。9月2日には、8月27日に比べて底層が少し高温・低塩分化していたが、9月2日から9月3日にかけて、それまで湾内に存在していなかった水温 24°C 以下、塩分 33.9 psu 以上の低温・高塩分水が、湾内の下層へ進入している。これにより、 25°C 等水温面と 33.75 psu 等塩分面がわずか1日の間に約10m上昇して、水面下8mにまで及んでいる。また、溶存酸素の分布をみると、湾外水進入前には貧酸素水塊は下層に形成されていたが、進入後は押し上げられて、水面下5m付近を中心にして中層で貧酸素水塊を形成している。この中層貧酸素水塊の発生により、養殖生簀(測点3～5の水深6m以浅)に貧酸素水が進入して養殖魚に悪影響が及んでいる。

3.3 湾外水の進入

養殖魚に被害をもたらす中層貧酸素水塊は、低温・高塩分水が下層へ進入するのに伴って発生した。つぎに、この低温・高塩分水の進入の原因を明らかにする。

1995年に湾外(測点A)、主湾部(測点B、C)および迫間浦(測点D)において測定した水温鉛直分布の時間変動を図-4に示す。ただし、測点A～Cでは内部潮汐に伴う半日周期変動が卓越しているので、25時間移動平均を施して短周期成分を除去した 21°C 等水温面を図中に太線で示してある。また、図の上部には風の東西成分(西風を正とする)を示してある。

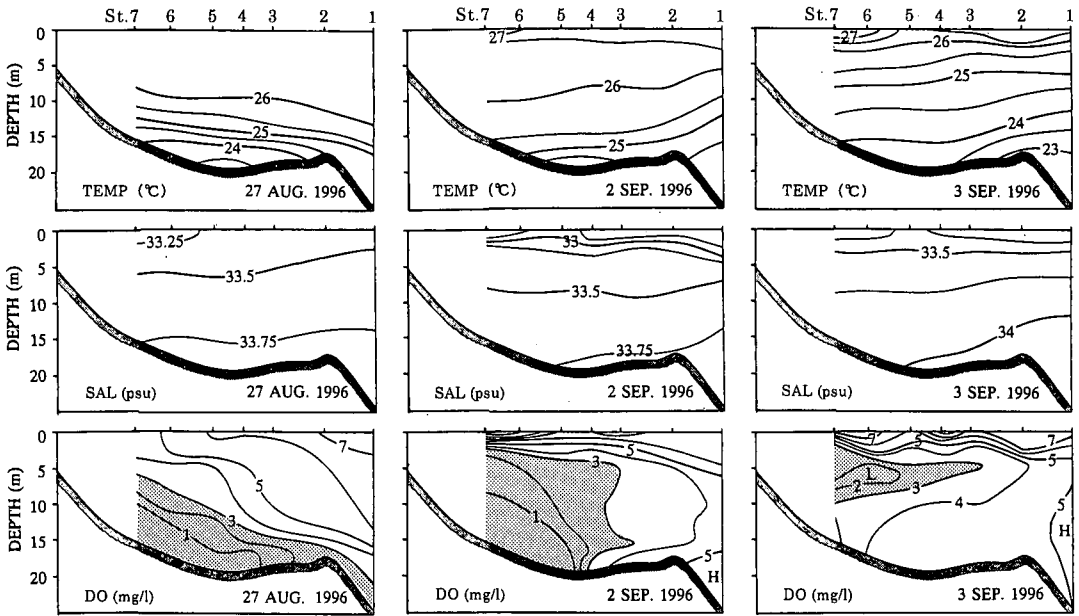


図-3 水温、塩分、溶存酸素の鉛直断面分布 (1996 年)

熊野灘北部では西風によって沿岸湧昇が発生し、五ヶ所湾内では躍層面が上昇することが知られている (阿保ら, 1996)。測点 A~C における 21°C の移動平均値 (太線) に注目すると、8 月 24 日から 8 月 28 日の西風によって沿岸湧昇が発生し、等水温面が上昇していることが分かる。 21°C 等水温面の深度は、8 月 24 日には、湾外 (測点 A) で水深 24 m、主湾部 (測点 B, C) で水深 22 m、20 m であった。しかし、8 月 27 日には、それぞれ水深 12 m、13 m、13 m まで上昇している。一方、迫間浦 (測点 D) では、8 月 27 日までは、 21°C 以下の低温水はほとんど存在していない。しかし、主湾部 (測点 B, C) の 21°C 等水温面が上昇するのに伴って、28 日には 21°C 以下の低温水が迫間浦の下層へ進入している。

つまり、迫間浦の湾口部にはシルが存在するために、躍層面が深い位置にある 8 月 27 日までは、主湾部の下層にある低温水が迫間浦へ進入できない。しかし、躍層面が上昇して、 21°C 等水温面がシルの水深である 16.5 m よりも浅くなった 28 日には、主湾部の下層の低温水がシルを乗り越えて枝湾の下層へ進入することが出来た。これにより、迫間浦には 20°C 以下の低温水も見られるようになる。この 20°C 以下の低温水は、8 月 26 日までは、湾内 (測点 B, C) には存在しておらず、湾外の 30 m 以深にのみ存在していた。つまり、湾外の下層に存在していた低温水が迫間浦の下層へ進入したことが分かる。

3.4 調査結果のまとめ

以上のことから、1) 沖合で西風が吹くと沿岸湧昇が発

生して湾外の下層水が主湾に進入する、2) さらに躍層面の上昇に伴って、湾外水がシルを越えて枝湾の下層へ進入する、3) これに伴い、養殖場の下層の貧酸素水塊が押し上げられて中層貧酸素水塊を形成し、養殖魚に悪影響を及ぼす、ことが明らかとなった。

4. 中層貧酸素予報モデル

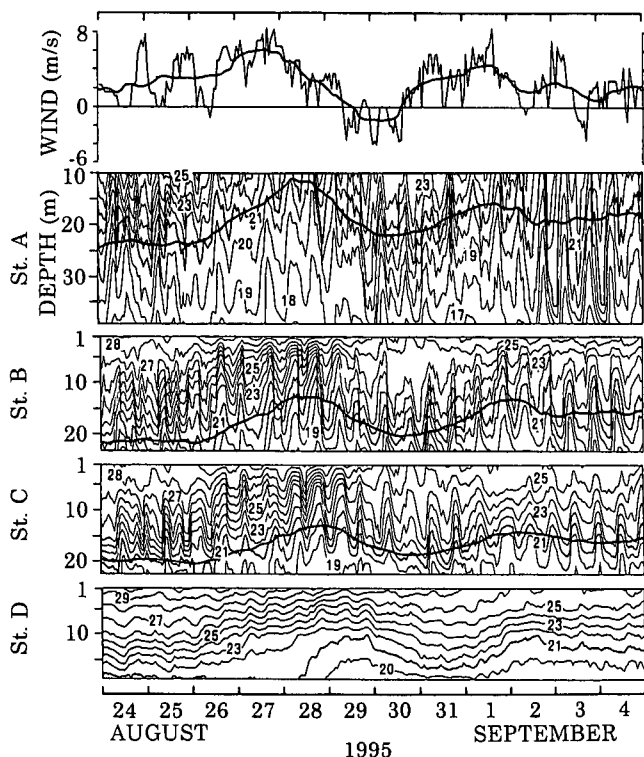
魚類養殖場における貧酸素被害の発生を予測するために、中層貧酸素水塊の発生予測モデルを開発した。このモデルでは、まず、ダイナミックシステムの統計的解析法 (赤池・中川, 1972) により、風のデータから躍層面の上下変動 (沿岸湧昇) を予測する。つぎに、この上下変動を湾口部の境界条件とし、湾外水の湾内への進入および湾内の貧酸素水塊の挙動を多層レベル密度流モデルを用いて計算する。

4.1 躍層面の変動予測

西風による沿岸湧昇に伴う躍層面の上昇は、湾外水の進入および中層貧酸素水塊発生の原因となる。ここでは、ダイナミックシステムの統計的解析法を用いて、躍層面の上下変動を風から経験的に予測する。すなわち、躍層面の深度 $D(t)$ を目的変数、1 時間前から m 時間前までの 1 時間毎の風の西風成分 $W(t-i) (i=1, \dots, m)$ を説明変数とする重回帰分析により、次の予測式を決定する。

$$D(t) = \sum_{i=1}^m a(i) W(t-i) + \text{Const} + \varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $a(i)$ は回帰係数、Const は定数項、 ε は予測誤差



図一4 風の東西成分（上，西風が正）と水温変動（下，太線は21°C等水温線の25時間移動平均値）

である。また、最適な m の値はAIC（赤池情報量基準）最小によって決定する。

このモデルを用いて、1995年8月24日から9月4日までの12日間の躍層面の上下変動を再現した。この予測式を用いて計算した21°C等水温面の深度を実測値と共に図一5に示す。予測値は実測値とよく一致しており、重相関係数は0.92であった。つまり、風のデータから躍層面の上下変動を精度良く予測することが可能である。

4.2 貧酸素水塊の挙動予測

躍層面が上昇したときに起こる湾外水の進入と中層貧酸素水塊の発生を予測するために、多層レベル密度流モデルを用いて、湾内の流動および貧酸素水塊の挙動を鉛直二次元で計算する。このモデルでは、五ヶ所湾の枝湾（迫間浦）を鉛直二次元的に表し、迫間浦の湾口部を開境界とする。迫間浦の湾口から湾奥までの縦断面を、水平200 m・鉛直1 mの長方形格子に分割し、その中で基礎方程式を積分して解を求める。基礎式は、運動方程式、連続の式と水温・塩分・溶存酸素の輸送方程式であり、ブシネス近似を用い、鉛直方向には静水圧近似を用いる。なお、計算方法は、武内（1996）に準拠する。

このモデルを用いて、1996年9月2日から9月3日に起こった湾外水の進入とそのときの貧酸素水塊の挙動

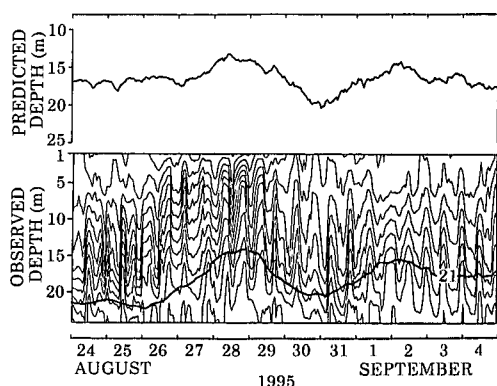
（中層貧酸素水塊の発生）を再現した。水温、塩分と溶存酸素濃度の初期値としては、1996年8月27日に現地で測定した鉛直断面分布を与えた。また、迫間浦の湾口部（測点1）では、水温、塩分、溶存酸素の鉛直分布の変動を測定している。この実測値に基づいて、水温、塩分、溶存酸素の上下変動を正弦関数で表し、境界値として与えた。このモデルによって計算された水温と溶存酸素の鉛直断面分布の変動を図一6に示す。

初期値では、24°C等水温面の深度は水深14 mであるが、24時間後には水深11 m、48時間後には水深8 mにまで上昇している。これに伴って、24°C以下の低温水が迫間浦の下層へ進入している。一方、溶存酸素分布は、初期値では、3 mg/l以下の貧酸素水塊は下層に存在しているが、低温水が下層へ進入するのに伴って、貧酸素水塊が上へ押し上げられて、48時間後には、水深4 mを中心にして中層に貧酸素水塊が形成されている。この計算結果は、現地で観測された湾外水の進入および中層貧酸素水塊の発生をよく再現している。

5. おわりに

本研究では、五ヶ所湾の魚類産卵に被害を与える中層貧酸素水塊の発生原因が、沿岸湧昇に伴う湾外水の進入であることを明らかにした。さらに、数値モデルを構築して、中層貧酸素水塊の発生を再現した。

本論文では、沿岸湧昇に伴って中層貧酸素が発生し、養殖施設内に貧酸素水が進入した例（1996年9月3日）について述べた。しかし、発生する中層貧酸素水塊の規模は、湾外水進入前の下層貧酸素水塊の大きさや沿岸湧昇の規模（進入する湾外水の量）によって異なる。つま



図一5 21°C等水温線の深度の計算値（上）と実測値（下）

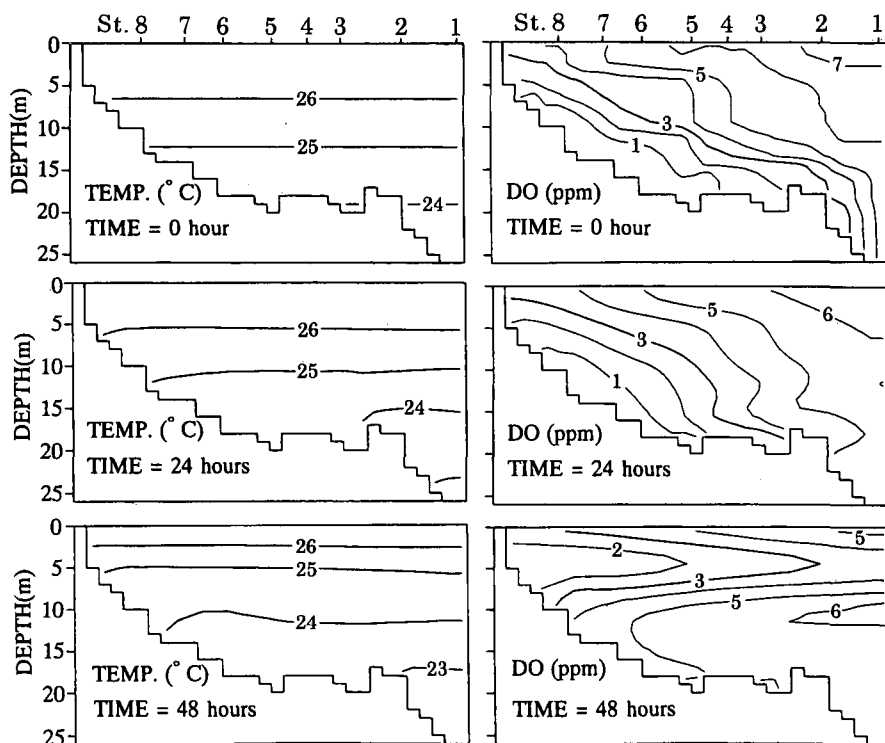


図-6 水温と溶存酸素の鉛直断面分布の計算値

り、沿岸湧昇や下層貧酸素水塊の規模が小さいときには、中層貧酸素水塊が発生しない。あるいは、発生したとしても規模が小さく、養殖生簀内に貧酸素水が進入しない。

今回の数値モデルは、このような魚類養殖に悪影響を与えない場合の貧酸素水塊の挙動についても、よく再現できることが既に確認されている。このモデルにより、中層貧酸素水塊の発生とその規模を予測し、魚類養殖に悪影響が生じるか否かを事前に予報することが可能となった。

参 考 文 献

- 赤池弘次・中川東一郎 (1972): ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 189 p.
- 阿保勝之・杜多 哲・西村昭史 (1996): 五ヶ所湾への沿岸湧昇と湾外水の侵入, 沿岸海洋研究, 第33巻, pp. 211-220.
- 武内智行 (1996): 内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1141-1145.
- Abo, K. and S. Toda (1996): Effects of water movement on the fluctuation of oxygen concentration in the lower layer of Gokasho Bay, Japan, UJNR Technical Report, 22, pp. 85-89.