

大船渡湾の成層と貧酸素水塊に関する現地観測

長 坂 猛* ・ 鶴 谷 広 一** ・ 村 上 和 男***
浅 井 正**** ・ 西 守 男 雄*****

1. はじめに

リアス式海岸に代表される湾や入り江では津波のエネルギーが集中するため、津波の遡上によって被害を受けやすい。津波の防災対策としては、湾口部に津波防波堤を建設するのが有効である。しかし、津波防波堤は開口面積が限定されるため、湾内では海水の流動が停滞する傾向にあり、鉛直混合が少なくなる成層期には底層水の貧酸素化が問題となることがある。貧酸素の水塊は底棲生物だけでなく、時として表層付近の生物にも影響を及ぼすため、その形成・消滅の機構や変動を把握する必要がある。

村上・長坂(1996)は、大気との熱収支と窒素を制限要因とした物質循環を加味した鉛直一次元の水質モデルを用い、大船渡湾内に生ずる貧酸素水塊の出現・消滅を再現した。モデルの感度解析により、底層での貧酸素化を防止するためには、海水交換の促進・栄養塩の溶出抑制・鉛直混合が有効であることが示された。しかし、既存の観測結果では、貧酸素水塊の詳細な分布や比較的短時間に生ずる変動をはじめとし、風等の気象要素が鉛直拡散係数に及ぼす効果に関する情報がなく、より詳細な水質モデルを構築することは困難であった。

本研究では閉鎖性水域である大船渡湾(岩手県)を対象区域として水質観測を実施し、湾内に発生する貧酸素水塊の規模と変動を調べると同時に、気象条件と貧酸素水塊の消長に関する検討を行った。

2. 観 測

三陸沿岸は地震津波の常襲地として知られているが、昭和35年のチリ地震津波では40～60分の長周期の津波が来襲し、湾内で共鳴したためにより大きな被害が生じたと言われている。この災害を契機として大船渡湾では

湾口部に津波防波堤が建設された。

防波堤の設置により、静穏な水域が確保され、湾内は県全体の半分以上の貨物を取り扱う重要港湾である大船渡港とともに、漁港やカキ・ホタテの養殖漁場として多面的に利用されている。しかし、下水処理事業の遅れや流入負荷量の増大とともに、閉鎖性湾の傾向があることから湾内の水質汚濁の改善が叫ばれている。特に夏季は湾内に成層が顕著に現れ、下層に酸素が供給されにくくなるために底層が貧酸素化しやすくなる。貧酸素水塊は、付随して生ずるアンモニア態窒素や硫化水素とともに生物の生息をおびやかしている(北上, 1996)。

今回の研究では同湾に発生する貧酸素水塊の規模と経時変化を捉えるため、貧酸素水塊が最も顕著に現れる秋季(平成8年10月3日～同年11月3日)に現地観測を行った。項目は(a)STDによる水質観測(H 8.10.3～4)、(b)係留による水質観測(H 8.10.3～11.3)、(c)流速測定(H 8.10.4～5)の3つである。貧酸素水塊が湾内の下層に存在することは知られていたが、測点間の距離や鉛直解像度は湾の規模に対して充分ではなかった。そこで今回は、湾軸方向と湾を横断するラインを主とした湾内53測点においてSTD観測を実施し、水温・塩分・溶存酸素量の空間分布の詳細な把握を試みた(図-1)。センサーは表面から水底まで降下させ、各データのサンプリング間隔を10 cmに設定した。一方、比較的短時間に起こる貧酸素水塊の変動と水温躍層の変動を捉えるために、湾中央部と湾口部の2測点で水温計と酸素計の係留を行った。係留装置を図-2に示す。水温計は小型メモリ式のものを使用し、2測点ともに水温躍層付近の深さに鉛直2

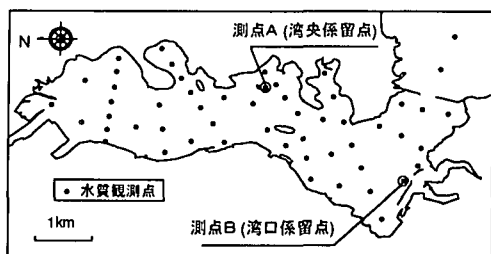


図-1 大船渡湾の地形と観測点

- * 水博 運輸省港湾技術研究所客員研究員(現:宮崎県立看護大学看護学部)
- ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室長
- *** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所特別研究官
- **** 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所技術開発課長
- ***** 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室

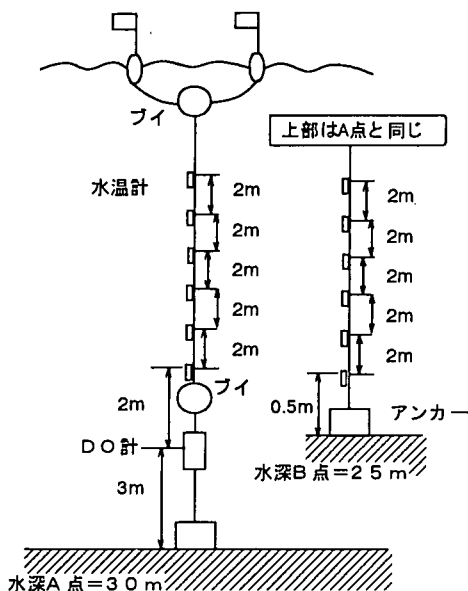


図-2 係留装置の概略

mの間隔で6個取り付け付けた。湾中央部の測点では最下層(水深27 m)にメモリ式の溶存酸素計を取り付けた。水温と酸素のサンプリングは、ともに10分間隔で行った。観測中にはドップラー流速計(ADCP)を用いて湾口部の流速測定も行った。

3. 観測結果

3.1 貧酸素水塊の分布特性

STD観測で得られた代表的な測点(湾中央係留点)の鉛直プロファイルを図-3に示す。水温に注目すると、表層から水深20 m程度までは一様な層が発達し、20~25 mに水温差 2°C 程度の躍層が存在していることがわかる。塩分は水深5 mまでの比較的浅い部分に河川水の影響と考えられる低塩分な層が形成されているが、5 m以深はほぼ一定値を示す。密度は主に塩分の鉛直分布に従っており、水深5 mの部分に躍層が存在しているが、20~25 m付近には水温変化に伴う弱い躍層も認められる。溶存酸素は水温分布と同様で、水深20 mまでは比較的酸素量の多い層が形成されている。しかし水温躍層より深い部分(20 m以深)では酸素量が急激に低下し、 3 mg/l 以下の極めて低酸素な状態になっていることがわかる。

湾軸に沿った各成分の断面分布を図-4に示す。代表的なプロファイルで見られた20~25 m付近の水温躍層は湾内全体のほぼ同じ深さに存在していることが認められる。躍層下に存在する水塊の温度が、防波堤外部に存在する水より低いことは特徴的である。

湾奥には盛川が流れ込むため、湾内全域の表層には低

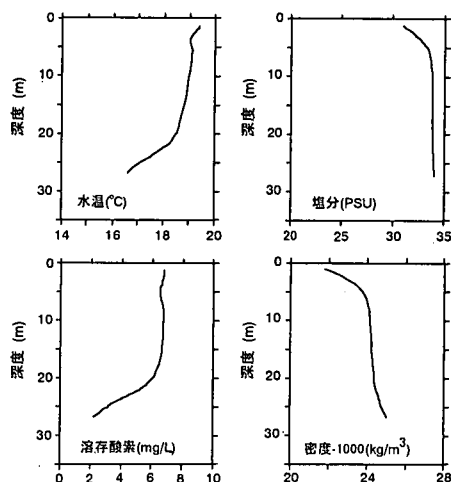


図-3 代表的な測点(測点A)のプロファイル

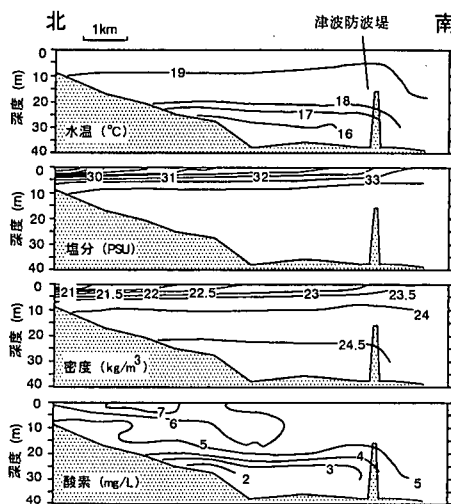


図-4 各成分の湾軸断面

塩分層が存在しており、表面では河口部に近いほど低塩分になる傾向がある。溶存酸素量は湾奥の比較的浅い部分で高く、水温躍層の下部(低水温層)では 3 mg/l 以下の貧酸素になっている。一方、湾外は鉛直方向の酸素分布に差がないばかりでなく、水深20 m以深でも貧酸素化は生じていない。

3.2 水温躍層と貧酸素水塊の時間変動

湾中央の係留点で得られた各層の水温と、最下層で得られた溶存酸素量の時系列を図-5に示す。図中の数字は水温計の設置深度を示す(全て5時間の移動平均を施してある。23 m深は欠測)。観測開始から約10日間は水深20 m程度に水温躍層が存在しているが、13日目以降は次第に下層の水温が上昇することによって鉛直勾配が弱くなり、18日目以降になると躍層はほぼ消滅している。躍層が消滅した後は、全層で一様な水温低下が確認

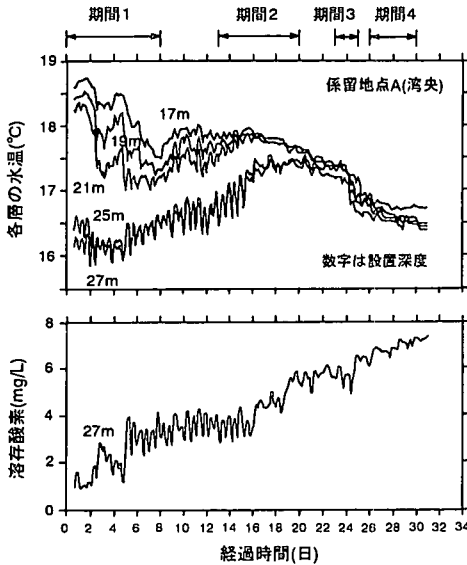


図-5 測点 A で得た水温と溶存酸素量の時間変化

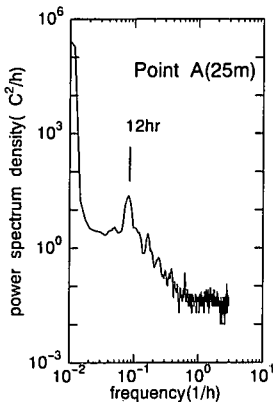


図-6 水温変動のスペクトル (測点 A・25 m)

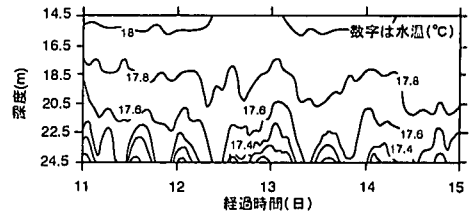


図-7 水温鉛直分布の時間変動 (測点 B)

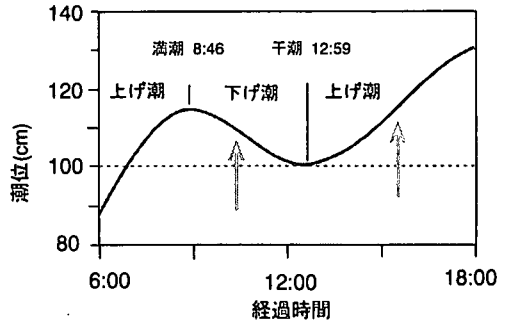


図-8 潮位変化図

得た水温の鉛直分布の時間変化を示したものである。躍層を示す代表的な等値線を 17.6°C とすれば、躍層が潮汐周期で 4 m 以上の振動をしていることがわかる。半日周期の振動は湾口付近の測点 B でも同様に見られたが、測点 A とはピークに時間差が存在した。そこで相互相関をとると、タイムラグ 3.56 時間で相関が最も高くなり (相関係数 0.63)、測点 B の方が測点 A よりもピークが早く現れることが確かめられた (後述の図-13 参照)。

3.3 湾口部での流速分布

観測期間中は、観測船に ADCP を取り付けて、湾口防波堤近傍の湾内側を防波堤に沿って往復航行することにより流速分布を測定した。観測時の潮位の変化を図-8 に示す。下げ潮時と上げ潮時の流速分布の測定結果を図-9, 10 にそれぞれ示す。

図-9 は下げ潮時 (10:40) のもので、全ての層で湾外へ流出しているが、特に海面付近 (2 m 層) の流速が卓越している。図-10 は上げ潮時 (15:45) のものであるが、9 m~16 m 層では湾内への流入が顕著であるにもかかわらず、2 m 層では依然として流出の傾向が続いている。これは、図-4 に示されているように、湾奥部の河川から流出した淡水の影響による低塩分の水が湾口部まで達して、これが上げ潮時にも湾外へ流出していることを示している。

4. 考 察

4.1 気象と成層・貧酸素の関係

成層の消滅に対する気象の影響を知るため、大船渡測

できる。溶存酸素に注目すると、水温躍層が存在する時期の最下層の溶存酸素量は、 3 mg/l 程度の貧酸素であり、若干の上昇傾向を示すに留まっていることがわかる。水温の鉛直勾配が弱くなる 16 日目から貧酸素状態は徐々に緩和され、躍層が消滅した 18 日目以降の溶存酸素量は明らかな上昇を示し、30 日目までの約 2 週間で 6 mg/l 以上にまで回復している。

ところで、各層の水温及び溶存酸素量の時系列 (図-5) には細かな波形が認められる。これは何らかの要因で躍層付近の水温と溶存酸素量が周期的に変動していることを意味する。最も波形が顕著に現れた湾央係留点の最下層を選び、観測期間中の水温変動のスペクトルを示したのが図-6 である。ピークの位置から時系列に現れる振動が、半日周期であることがわかる。この振動は躍層が消滅する時期には殆ど認められない。図-7 は湾央点で

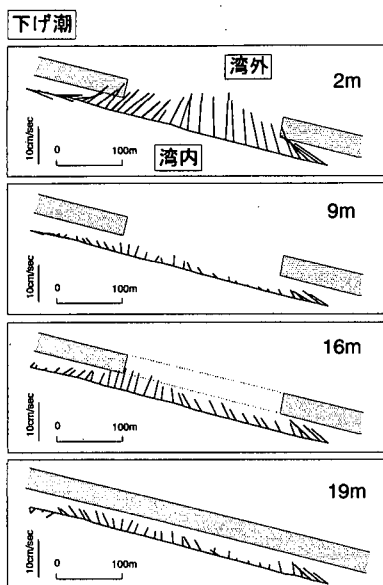


図-9 流速分布（下げ潮時）

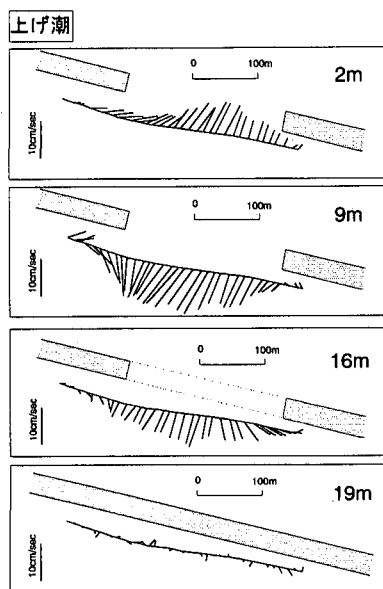


図-10 流速分布（上げ潮時）

候所から気温と風のデータを入手した(図-11)。両データとも25時間の移動平均を施している。秋季であるため気温は概ね低下する傾向にあるが、やや詳しく見ると期間1(0～8日目)、期間2(13～20日目)、期間3(23～25日目)、期間4(26～30日目)で断続的に低下していることがわかる。このときの風向に注目すると、気温の低下が起こるときは北西風、上昇のときは南東風が、それぞれ卓越して吹く傾向にある。期間1に気温が約 5°C 低下したことに伴って、全層で水温低下が起こっている。躍

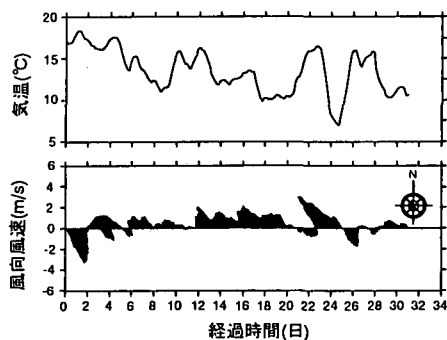


図-11 観測期間中の気温と風の変化

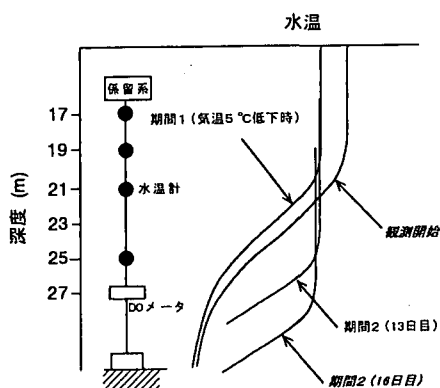


図-12 鉛直プロファイルの時間変化（模式図）

層上部(17, 19, 21 m層)はそれぞれ 1°C 以上の低下が見られるが、25 m以深は大きな変化は認められない。また8日目には17 mと21 mの水温差が 0.5°C 程度になっている。このことから、期間1の冷却によって主に躍層より上の層の熱が奪われると同時に、混合層が発達することによって躍層自体の存在位置が深くなったと考えられる(図-12)。期間2は21 m層より浅い部分に混合層が発達しており、海面冷却によって層内の水温が急激に低下することはない。この期間に低層の水温が上昇するのは、表面付近の冷却、もしくは吹送流によって混合層内の鉛直流が促進され、上層の熱が効率的に下層部へ浸透していると考えられる。期間2の16日目までは、21 m層と25 m層の水温差が約 1°C 存在するため、密度勾配によって底層に酸素が供給されず(溶存酸素量は 3.5 mg/l 程度)、貧酸素の状態が著しく緩和されることはない。しかし、21 m層と25 m層の水温差が 0.5°C 以内になる18日目以降は、底層に酸素が供給され、貧酸素状態は解消されている。観測開始から20日目以降は、表層から底層まで水温が一樣な混合期に入り、湾内の海水が一樣に冷却される傾向が見られる。これは期間3で生じた 10°C 以上の気温の低下により、全層ではほぼ同時に水温低下が生じていることから明らかである。観測期間の大船渡

表-1 各パラメタの実測値

パラメタ値	実測値
ρ_1	1024.2 (kg/m ³)
ρ_2	1025.0 (kg/m ³)
h_2	5.0 (m)

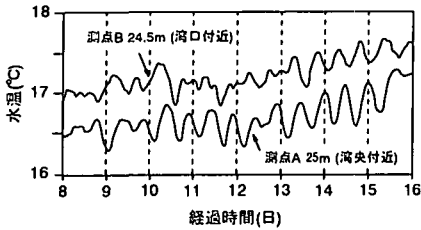


図-13 各係留点の躍層付近で見られた水温変化

湾では、北西風による海面冷却が引き金となって鉛直混合が促進され、表層付近の溶存酸素が底層に供給されたと考えられる。

4.2 内部波について

係留観測を行った2測点では半日周期の内部波が観測された。内部境界波の位相速度 C_{ph} (m/s) は、一般的に式(1)で示される。

$$C_{ph} = \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cdot g \cdot h_2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに ρ_1, ρ_2 : 各々上層, 下層の密度 (kg/m³) , g : 重力加速度 (m/s²) , h_2 : 下層の厚み (m) である。式(1)に実測値(表-1)を代入すると、 $C_{ph} = 0.20$ (m/s) を得る。一方、測点間の距離は2.20 kmであり、位相が3.5時間ずれていることから(図-13)、境界面(躍層)で見られる内部波は0.17 m/sで湾奥に伝播していることになり、式(1)から予測されるものと近い。防波堤の開口面積は湾口の断面に比べて極めて小さいため観測された内部波は湾外で形成されたものが伝播したものというよりはむしろ、上げ潮時に湾内で生成したものと考えられよう。ところで内部境界波の波長(L)は式(2)で与えられる。

$$L = C_{ph} \cdot T \dots\dots\dots (2)$$

式中の T は周期 (s) を示す。実測の位相速度から計算される波長は10 kmであり、湾軸方向のスケールに匹敵するほどの大きさを持つことがわかる。

4.3 湾口防波堤を通過する流れ

ADCPで得られた流速を、湾口防波堤の開口部で平均した。その時間変化を図-14に示す。図-8の潮位変動と対比させて見ると、下げ潮時に湾外流出で、その平均流速は最大5 cm/s程度、上げ潮時の平均流速は最大7 cm/

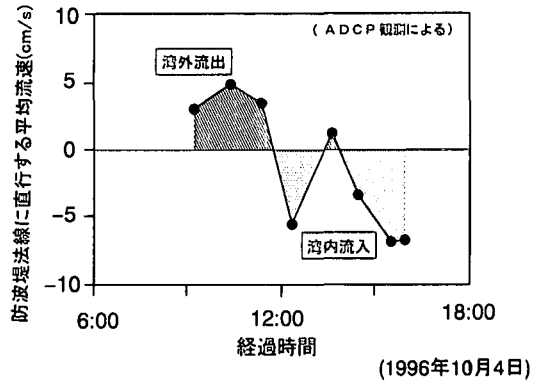


図-14 開口部の断面平均流速

s程度であった。ただし、この時の潮位変動は小潮で、約20 cmの潮位差しかなかったことを考えると、大潮時(1 m以上の潮位差)では、かなりの流速になると考えられる。

5. 結 論

大船渡湾における成層と貧酸素水塊の空間分布・時間変化に関する詳細な観測により、以下のことがわかった。(1) 湾内に発生する貧酸素水塊は、すり鉢状の地形に沿って水温躍層下に広く分布し、湾外には及ばない。(2) 観測期間中は、気温の低下を伴う北西風によって上層部の水温低下が見られた。これによる鉛直混合の促進で底層の貧酸素化は約2週間で解消された。(3) 躍層下部に存在する貧酸素水塊は湾内に生じる潮汐周期の内部波によって短時間のうちに鉛直方向に数メートル移動することがある。(4) 湾口部では、上げ潮時でも水面近くでは沖へ流出する流れが観測された。

気象と混合層の発達(貧酸素化の緩和)の関係を解明するには、今後海面を通した熱エネルギーの収支や風向・風速と湾内水循環の関係などを、さらに詳細に調査する必要があると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、運輸省第二港湾建設局金石港工事事務所には多大の協力をして戴いた。また、使用した気象データは大船渡測候所に提供して戴いたものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

村上和男・長坂 猛 (1996): 熱交換を考慮した鉛直一次元モデルによる貧酸素水塊の形成, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1126-1130.
北上 晃 (1996): 大船渡湾水質浄化へのとりくみについて, ヘドロ (67), pp. 39-42.