

大船渡湾での海水交換機構と 自然力を利用した水質管理手法の検討

AN INVESTIGATION OF WATER EXCHANGE AND WATER QUALITY MANAGEMENT METHODS USING NATURAL POWER IN OHFUNATO BAY

豊田政史¹・日比野忠史²・西守男雄³

Masashi TOYOTA, Tadashi HIBINO and Dan'o NISHIMORI

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部環境評価研究室研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部主任研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³運輸省港湾技術研究所 海洋環境部環境評価研究室研究員 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

It is often considered that water quality becomes worse after the construction of port structures; however, port structures may contribute to water purification. This paper describes water quality processes in ports using Ohfunato Bay as an example. In Ohfunato bay, the bottom layer becomes anoxic in summer, due to the formation of a thermocline. In this investigation, it was found that the bottom water inside the bay was carried outside on the ebb tide, depending on the strength of the thermocline. Numerical simulations using a two-layer model confirmed that internal waves carry bottom waters from the bay. Finally, mention is made about water quality management methods using this mechanism. Upwelling of bottom nutrients is prevented by the thermocline, thereby repressing red tide phenomena.

Key Words: Tsunami breakwater, Thermocline, Ebb tide, Drainage of bottom water

1. はじめに

海と陸とが接する沿岸域は、多様な自然が存在する空間であり、また人間の諸活動の最も盛んな空間である。なかでも、港湾を中心とする臨海部は、人口が集中し、稠密で高度な開発・利用がなされてきた。しかし、人間の活動が拡大するにつれて自然に対する負荷が増大し、さまざまな不都合や問題が生じるようになり、その解決が急がれている。このような状況の中で、流入負荷の規制に加えて、港湾に流入した栄養塩をいかにして効率的に除去するかを考え、干潟・藻場の造成や浚渫・覆砂等の環境と共生する港湾づくりをめざした事業（エコポート）が行われている。これらの事業を効果的に行うために、自然現象の理解、港湾構造物と流れ場・生態系との調和等をあわせて考えていく必要がある。このためには、社会インフラ整備や防災を目的に作られた構造物においても、港湾内の流れの中でどのような環境機能を有しているかを適切に評価しなければなら

ない。たとえば、湾口に防波堤等が建設されると港湾内水を停滞させ水質悪化を増長するといわれているが¹⁾、港湾自体が以下にあげるような水質浄化の効果もあわせもっている場合もある。

①明確な温度（密度）成層が形成されることにより、底質からの溶出した栄養塩を底層低水温塊内にとどめ、上層を経由させないで栄養塩の外海への放出を可能にする。②港湾域に藻場や干潟等が存在する場合には港湾内に河川からの流入水が湾内で循環することによって、栄養塩を多く含む水塊が藻場や干潟に滞留し、生物活動による栄養塩の除去が効率的に行われる²⁾。

本研究の目的は自然力を利用して港湾域の水質管理を行うこと、すなわち、港湾構造物の水質環境に対する影響について明らかにすることである。本論文では岩手県の大船渡湾を対象として、湾口部にマウンドを有する閉鎖性湾域での海水交換機構を明らかにし、この特性を用いた水質管理手法について検討を行う。

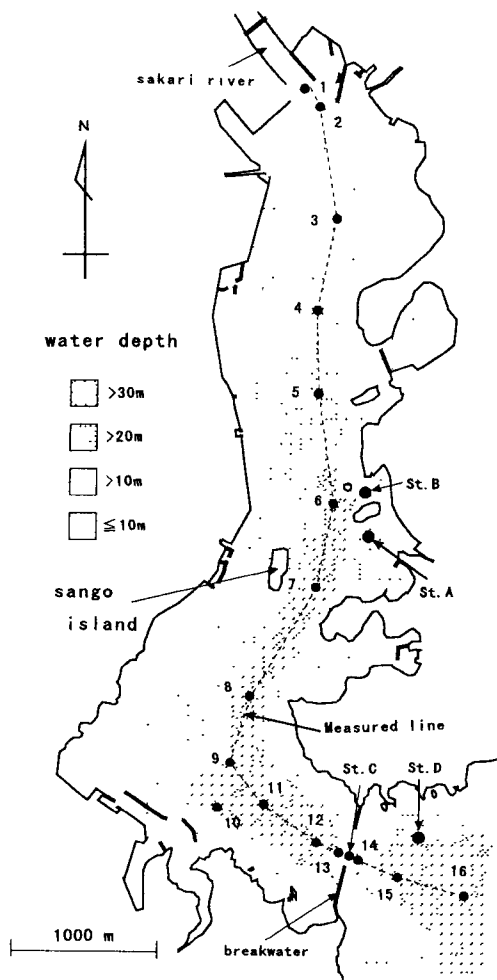


Fig.1 Plan of Ohfunato Bay

2. 大船渡湾における流れ場の特性

(1)地形特性

大船渡湾（北緯 $39^{\circ} 02'$ ，東経 $141^{\circ} 44'$ ）は三陸沿岸に位置しており，黒潮および親潮の影響を受けている．Fig.1 に示すように，南北方向が約 7km，東西方向約 2km の南北に細長い湾であり，最大水深約 40m，平均水深約 20m の空間スケールを有している．湾軸に沿って，図中の濃い網掛けで示した水深 30m 以上の淵が湾央まで続いている．湾奥部には，日平均流量 $2.6\text{m}^3/\text{s}$ の規模の盛川が流れ込んでいる．また，湾口から約 1km 地点で約 90° に屈曲する部分があり，湾の中心部にはサング島がある．チリ地震（1960 年）により津波の被害を受けた教訓から湾口に津波防波堤が建設され，その開口部には，水深約 16m のところに長さ 200m，幅 90m の捨石マウンドが存在している．なお，Fig.1 中の数字および記号(St.)は観測地点を示している．St.B は岩手県水産技術センターによる観測点であり，水深 10m と 27m で水温・塩分・溶存酸素の連続測定が行わ

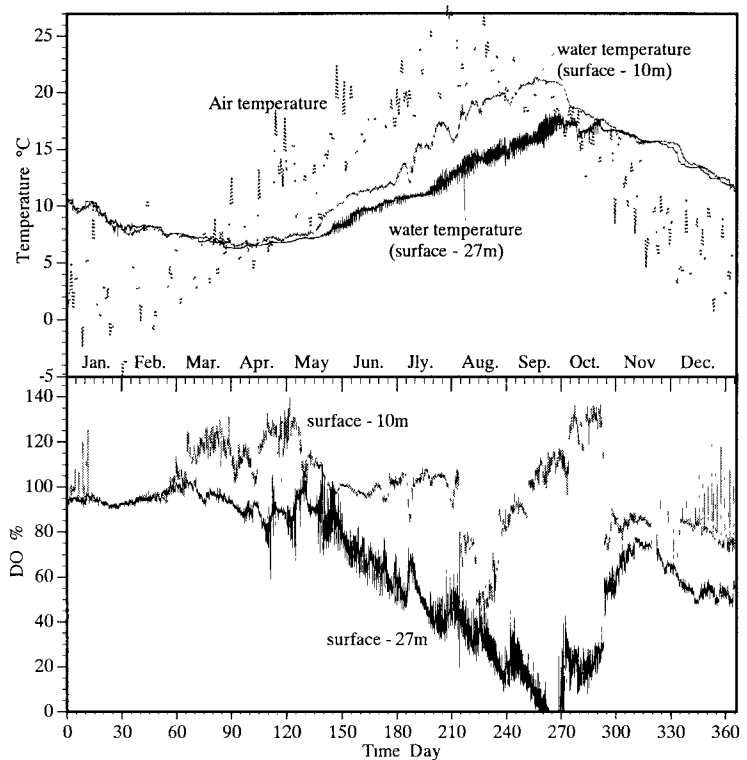


Fig.2 Water temperature, Salinity and DO variations for Ohfunato bay in 1997

れている．著者らは 1996 年から，水温（MDS-T：アレック電子社製），塩分（MDS-CT：アレック電子社製），溶存酸素（ADO-8M：アレック電子社製，DATASONDE4：Hydrolab 社製），照度（MDS-L：アレック電子社製）の定点連続係留観測に加え，水質（ACL-1183PDK：アレック電子社製）および図中の観測線（破線）での ADCP（DR/SC 型：RD 社製）を用いた流速の移動観測を行ってきた³⁾．

(2)水温と溶存酸素量の年間変動特性

Fig.2 は 1997 年の St.B での水深 10m と 27m における水温および溶存酸素量を気温とともに示したものである．大船渡湾は閉鎖性が強いために，季節的な気温の変化にともなって温度躍層が形成されている．4 月中旬から温度躍層が形成されはじめ，9 月頃に躍層が最強となっている．また，溶存酸素量をみると，10m では，貧酸素化はみられないが，27m では，温度躍層の形成とともに貧酸素化が進行しており，温度躍層が最強となる 9 月頃には無酸素状態になっている．その後，温度躍層の消滅とともに，底層の貧酸素化は約 1 ヶ月で急激に解消されている．貧酸素水塊の形成・消滅機構については，参考文献 4)を参照されたい．

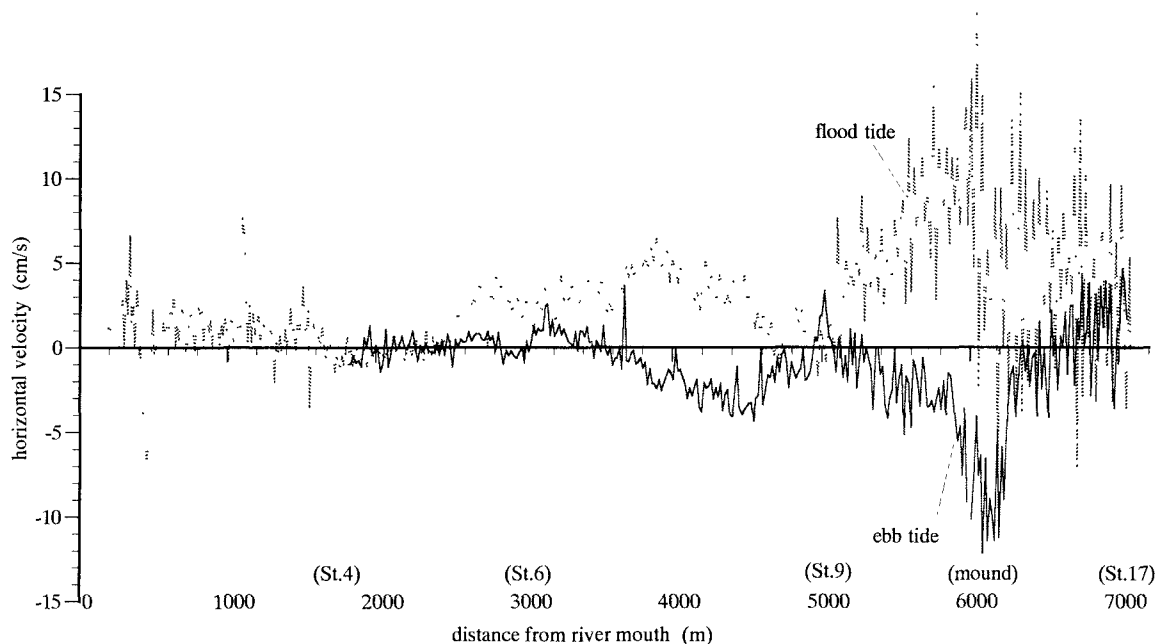


Fig.3 Velocity distribution along the bay axis (see Fig.1), comparison between flood tide and ebb tide, 1997.9.30.

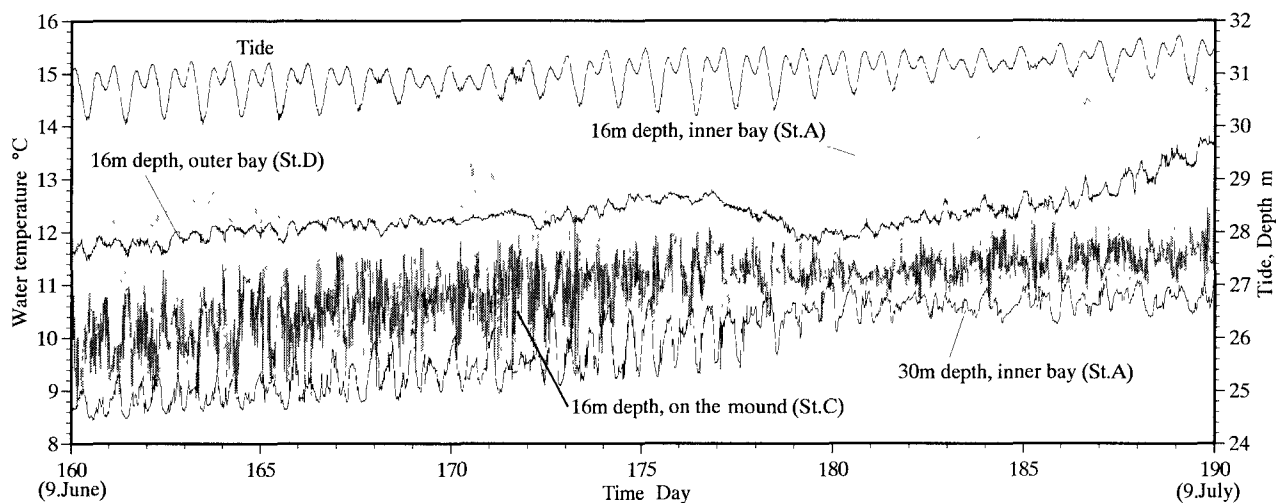


Fig. 4 Water temperature variation around the mound (1998.5.30 - 7.15)

(3) 湾軸方向における流速分布

Fig.3は1997年9月30日の上げ潮時、下げ潮時(潮位差約90cm)においてADCPにより測定された水深20mまでの断面平均流速分布である。なお、測線は、湾軸ライン上(Fig.1中の破線)である。図中の縦軸は、湾軸ラインに沿った流速を示しており、湾外から湾内への流入を正としている。横軸には、河口(St.1)からの距離をとっている。上げ潮時、下げ潮時いずれの場合においても湾口部のマウンド上の流速が最も大きくなっており、その大きさは上げ潮時に約20cm/s、下げ潮時に約13cm/sとなっている。上げ潮時には湾口部から湾内の屈曲部付近まで徐々に減少し、再びサンゴ島付近(3800m)で5cm/s程度の湾奥へ向かう流速が現れる。下げ潮時には、湾外では上げ潮と同様の流れがみられるが、湾に近づくにつれて、流向が変化している湾口部から湾内の屈曲部ま

での流速は、上げ潮時に比べて小さく、サンゴ島より湾奥での流れはほとんどない。

3. 下げ潮時にともなう湾内底層水の湾外への排出

(1) 成層の強さと湾内底層水排出の関係

Fig.4は、1998年6月9日から7月9日までの1ヶ月間連続測定された湾内のSt.A(水深16m,30m)、マウンド直上のSt.C(水深16m)、湾外のSt.D(水深16m)における水温の時間変化を表したものである。図の上部には、St.Aで測定された潮位(計測器の設置水深)の時間変化も示されている。水温は、マウンド上で最も大きく変動しており、マウンド上の水温は、湾外16mと湾内30mにおける水温の間の値をとっている。Fig.4から、マウンド上の水温は下げ潮時に下降し、上げ潮時に上昇していることがわかる。

このことは、下げ潮時に湾内底層にある低温水塊がマウンド上を通過し、上げ潮時には湾外の水塊がマウンド上を通過していることを示している。また、16mの水温を湾内外で比べると、全体に変化の傾向は同じであるが、湾内の方が湾外に比べて変動幅が大きくなっており、その周期は約半日である。

Fig.5は(a)1997年9月2日、(b)1997年9月30日、(c)1997年11月17日(いずれも大潮期)の下げ潮時に観測された津波防波堤付近での水温分布を示したものである。各図の両サイドの示されたプロファイルは河口からの距離が5.7km(St.12)と6.4km(St.15)の水温(実線:下げ潮時、点線:上げ潮時)を示したものである。(c)の左サイドには観測を行った3回の下げ潮時における水温分布を示している。(a)、(b)の図の右に示した湾外の水温プロファイルから、上げ潮時と下げ潮時のプロファイルと比較すると、下げ潮時に下層の水温が低くなっていることがわかる。この現象は、下げ潮時に湾内底層部の低温水塊が湾内水の流出にともなって上層へ持ち上げられ、マウンドを越えて湾外に流出していることを示している。また、その連行量は水温によって異なっている。下げ潮時、湾外の下層に9月2日は約17.5℃、9月30

日は約16℃の水塊が存在する。このことは、9月2日には少なくとも水深約20m、9月30日には水深約30mの水塊が下げ潮にともなって湾外に流出していることを示している。図(c)の左に示した湾内の9月2日と9月30日の水温分布を比較すると、水温差が現れる15m以深の温度勾配はそれぞれ約0.275℃/m、約0.225℃/mであり、0.05℃/mの差が連行量に影響していることになる。また、水温躍層がなくなった11月17日には、湾内外の水温分布に差がみられず、全水深において、海水の流出入が起こっていることがわかる。

(2)2層モデルによる流れ場の再現

2レイヤーモデルを用いて、前節で明らかにした湾内底層低温水塊の湾外への排出の再現計算を行った。上下層の運動方程式および連続方程式を基礎方程式とし、leap-frog的に計算を進めた。なお、各層の水平渦動粘性係数は、10m²/sとしている。Fig.6(a)に、海底地形と計

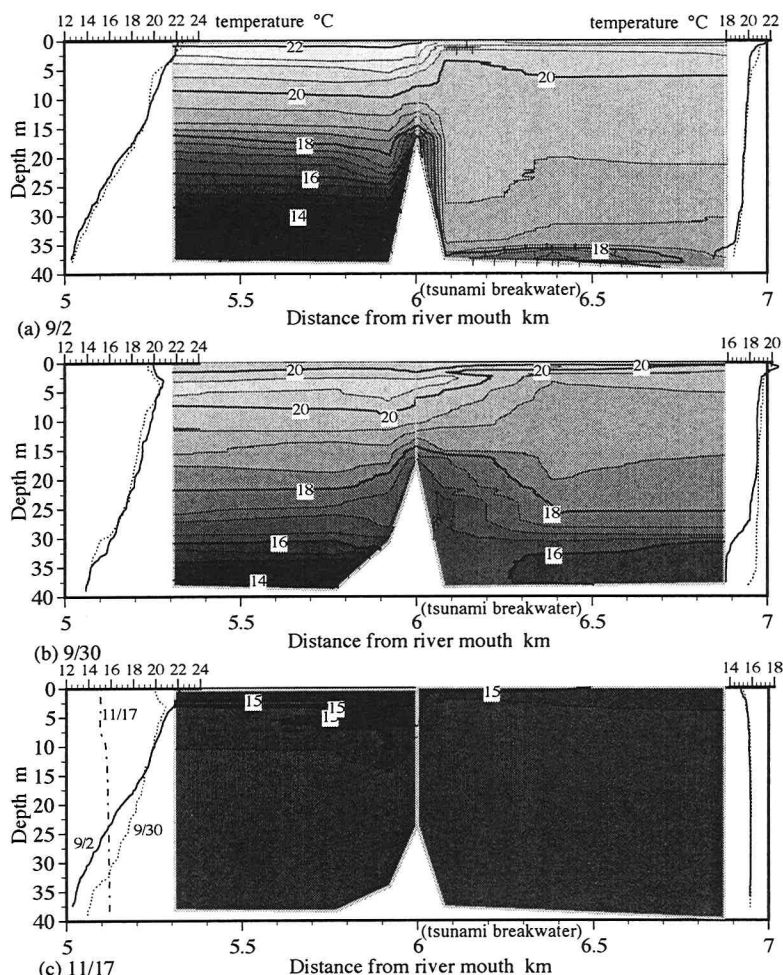


Fig. 5 Water temperature distribution around tsunami protection breakwater during ebb tide
(Figures in the sides of graphs (a) and (b) show water temperature profiles at 5.7 km and 6.4km. solid line ; during ebb tide, dotted line ; during flood tide. The left hand side graph in (c) show water temperature profiles in three periods.)

算条件を示す。初期条件として、密度界面を静水面から23mとし、上層の密度を1024.5kg/m³、下層の密度を1024.75 kg/m³に設定した。沖側境界条件として、湾外から振幅0.4m、周期12.42時間のsin波を入力した。

Fig.6(b)に満潮時から干潮時までの界面挙動、Fig.7に下げ潮最強時($\pi/2$)の(a)上層の流速ベクトル、(b)下層の流速ベクトルと界面挙動の計算結果を示す。Fig.7 (b)に示した界面の色の濃い部分は上昇、薄い部分は下降を表す。上層では、Fig.3の観測結果と同様に、マウンド付近のベクトルが特に大きくなっており、サンゴ島より湾奥での流速は小さくなっている(Fig.7(a))。マウンド近傍における界面は、満潮時(■)には、初期界面より約0.2m下がっているが、下げ潮にともなって、徐々にマウンド近傍の界面は上昇し、 $\pi/2$ (◆)から $2\pi/3$ (□)の最大値を経て、干潮時(△)まで減少している。また、Fig.6(b)とFig.7(b)から、密度界面は、2.0km、6.0km付近を腹、4.2km付近を節とした基本モードの振動⁵⁾を示して

おり、この結果は参考文献3)に示されている観測結果とも一致している。これらのことから、Fig.5で示した下げ潮時の湾内底層水塊の湾外への排出は、内部波による界面の上昇と関連が深いものと考えられる。

4. 水質管理手法の検討

(1)赤潮の抑制

Fig.8は、1998年7月16日の溶存態無機リン(DIP)の湾内分布である。図に示すように赤潮の原因となる栄養塩は、湾内底層にたまっており、表層ではほとんどみられない。これは、温度躍層の存在により、上下層の水塊が混合されにくいため、底泥から溶出したリンが上層に浮上することなく、底層にとどまっていることを示している。このことは、防波堤の存在が富栄養化した水塊を底層にとどめ、上層部での赤潮の発生を抑制している可能性を示している。実際、大船渡湾での大規模な内湾性の赤潮の発生は非常に稀である。

(2)津波防波堤を利用した湾内底層部の富栄養水塊の湾外への排出

近年、内湾と外洋の海水交換を促進させるためにFig.9に示すような海水交換型防波堤が提案されている。これを用いて、湾外の表層高温水塊を湾内底層の低温部に送りこむことができれば、湾内の密度(水温)勾配を小さくすることができる。密度勾配が小さくなれば、Fig.10に示すように下げ潮時における底層水塊の持ち上げ機構を利用して、富栄養化した水塊の湾外への排出を促進することができる。上述の赤潮抑制効果との関連からケーソンによってどの程度の量の海水を侵入させるかなどは今後の課題であるが、この手法を実現できれば、浚渫・覆砂やパイプラインによる海水浄化手法と比べてローコストで栄養

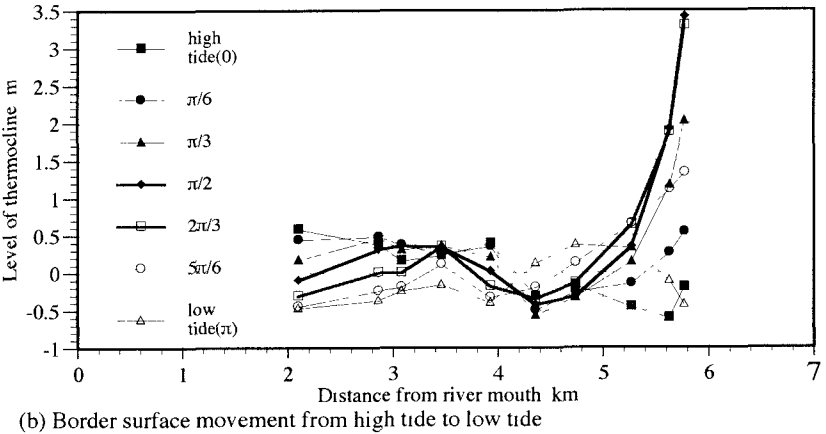
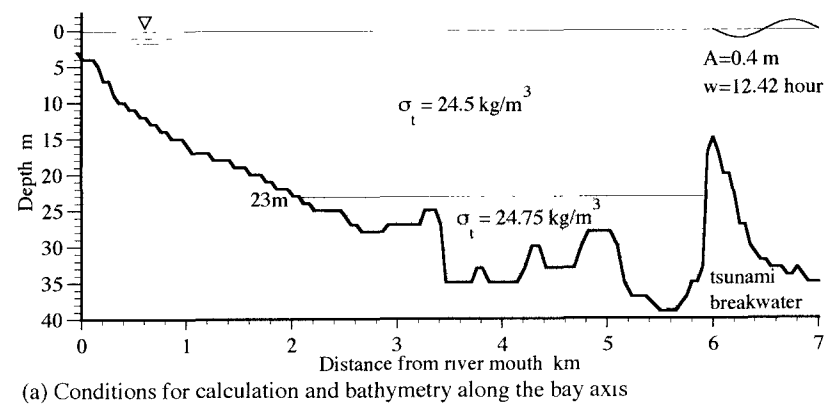


Fig.6 Simulation of border surface movement using the two-layer model

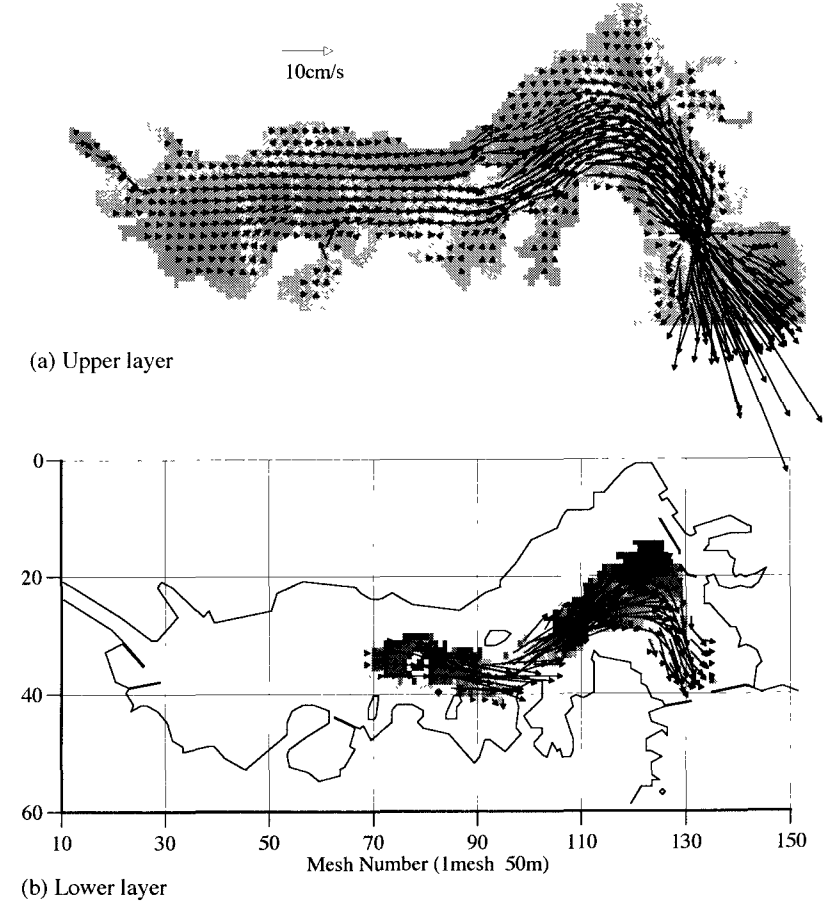


Fig.7 Velocity vector and Border surface movement at ebb tide ($\pi/2$)

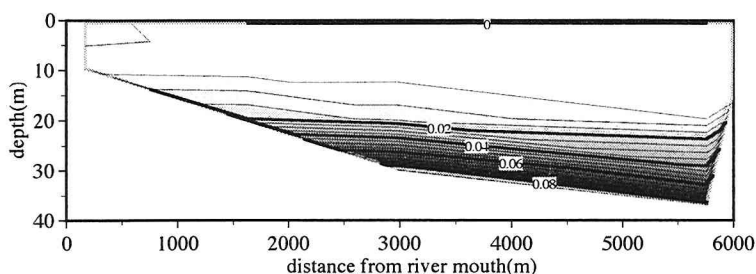


Fig.8 DIP distribution (1998. July. 16)

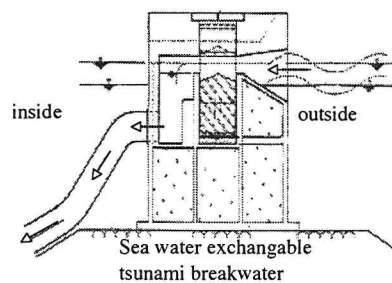


Fig.9 Water exchangeable breakwater

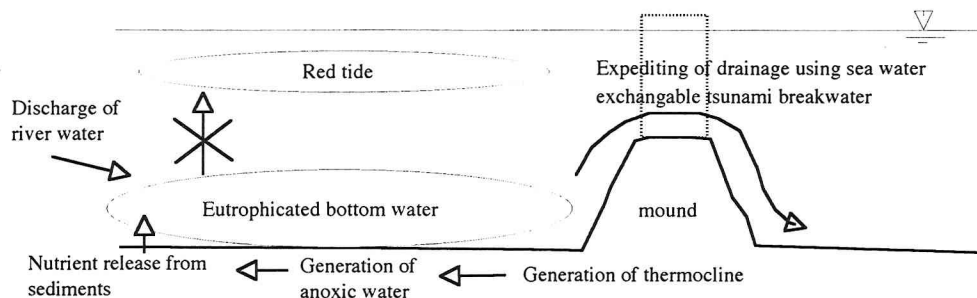


Fig.10 Drainage of eutrophied bottom water during ebb tide

塩排除を行うことができる。防波堤を利用した海水交換手法は、湾内の海水浄化を促進するための有力な手法の一つとして考えることができる。

5. おわりに

大船渡湾において、秋季の貧酸素水塊形成後、下げ潮にともなって防波堤開口部から湾内底層水が湾外に排出される機構を現地観測と数値計算結果から明らかにした。

- (1)湾内においては、4月中旬から温度躍層が形成されはじめ、9月頃に躍層が最強となる。湾内底層部では、温度躍層の形成とともに貧酸素化が進行し、9月頃には無酸素状態となる。
- (2)流速は、潮汐の上げ下げにかかわらず、湾口部マウンド上で最も大きくなっている。また、サンゴ島付近より湾奥での流れはほとんどない。
- (3)下げ潮時には湾内底層部の低温水塊が湾内水の流出にともなって上層へ持ち上げられ、マウンドを越えて湾外に排出される。その排出量は、湾内水の温度勾配が小さいほど大きくなる。上げ潮時には湾外の水塊がマウンド上を通過している。
- (4)湾内底層部の低温水塊が湾外へ排出する機構の再現を、2レイヤーモデルを用いて行った。その結果、湾口部を腹とする基本モードの内部界面振動が現れ、湾内底層水の湾外への排出機構が内部波と関連が大きいことが確認された。

- (5)大船渡湾では防波堤の存在が富栄養化した水塊を底層にとどめ、上層部での赤潮の発生を抑制している。
- (6)下げ潮時における湾内底層水塊の持ち上げ機構を利用すれば、湾内底層に蓄積されている富栄養水塊を湾外へ効率的に排出できる。

謝辞：本研究は運輸省第二港湾建設局の協力のもとに行われた。また、1997年の水温、溶存酸素のデータは岩手県水産技術センターから提供を受けている。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1)宮沢公明、早川康博：大規模構造物と環境収容力ー人工構造物(大船渡湾湾口防波堤)が湾内に及ぼす影響ー、沿岸海洋研究ノート、第32巻、第1号、pp.29-38、1994。
- 2)日比野忠史・鶴谷広一・西守男雄：小規模湾における生態系の季節変化特性と流れ場の生態系への影響、土木学会海岸工学論文集[45](2)、pp.1081-1085、1998。
- 3)長坂猛・鶴谷広一・村上和男・浅井正・西守男雄：大船渡湾の成層と貧酸素水塊に関する現地観測、土木学会海岸工学論文集[44](2)、pp.1066-1070、1997。
- 4)日比野忠史・豊田政史・深和岳人：大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構、土木学会水工学論文集[43]、1999。
- 5)宇野木早苗：沿岸の海洋物理学、P.342、東海大学出版会、1993。

(1998.9.30 受付)