

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

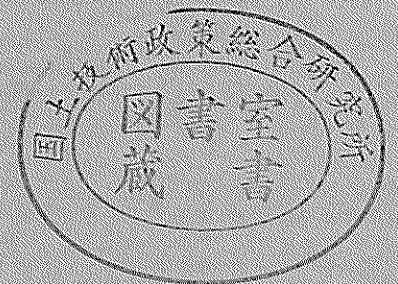
No. 938

June 1999

大船渡湾における潮汐周期の流れ場および貧酸素期の水質特性

豊	田	政	史
日	比	野	忠
西	守	男	史
細	川	恭	史
鶴	谷	広	一

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 大船渡湾の地形と湾内水質の現状	4
2.1 地形特性	4
2.2 観測の概要	5
2.3 大船渡湾内の水質の現状	6
3. 下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出	8
3.1 成層の強さと湾内底層水排出の関係	8
3.2 2レイヤーモデルによる流れ場の再現	9
3.3 湾内底層水塊排出量の算定	9
4. 水質管理手法の検討	15
4.1 赤潮の抑制	15
4.2 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	16
4.3 湾内底層水の排出が貧酸素水塊に及ぼす影響	16
5. おわりに	16
謝 辞	17
参考文献	17

# Characteristics of Water Quality and Current Field around the Tsunami Breakwater in Ohfunato Bay during Summer

Masashi TOYOTA<sup>1)</sup>  
Tadashi HIBINO<sup>2)</sup>  
Dan'o NISHIMORI<sup>1)</sup>  
Yasushi HOSOKAWA<sup>3)</sup>  
Hiroichi TSURUYA<sup>4)</sup>

## Synopsis

This paper describes water quality processes in Ohfunato Bay. In Ohfunato bay, the bottom layer becomes oxygen deficient in summer, due to the formation of a thermocline. This oxygen-deficient water mass promotes the dissolution of nutrients from sediments, especially phosphorus.

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.

On the ebb tide, water inside the bay flows out in the surface and bottom layer. On the flood tide, water outside the bay flows in through the middle layer. The oxygen-deficient water mass carried out during one tide was estimated as 0.4% to 1.2% of the total oxygen-deficient water mass inside the bay. The amount of oxygen supply from outside the bay was estimated about 1/3 of oxygen consumption in the bottom layer.

Finally, mention is made about water quality management strategies using this mechanism briefly. This mechanism has an effect on the amount of dissolved oxygen at bottom water inside the bay.

**Key words:** Tsunami breakwater, Thermocline, Ebb tide, Nutrients, Water Exchange

---

1) Member of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

2) Senior Researcher, Marine Environment Division

3) Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division

4) Director of Marine Environment Division

3-1-1 Nagase Yokosuka, 239-0826

TEL : 0468-44-5018, FAX : 0468-44-6423, E-MAIL : toyoda@cc.phri.go.jp.

# 大船渡湾における潮汐周期の流れ場および貧酸素期の水質特性

豊田 政史<sup>1)</sup>  
日比野 忠史<sup>2)</sup>  
西守 男雄<sup>1)</sup>  
細川 恭史<sup>3)</sup>  
鶴谷 広一<sup>4)</sup>

## 要 旨

現在、多くの内湾は富栄養状態にあり、水質の適正な管理が必要とされている。本論文は、内湾における水質管理手法の確立を最終目的として、三陸沿岸に位置する岩手県大船渡湾において、夏季(貧酸素期)における湾内水質の現地観測および再現計算を行ったものである。まず、現地観測結果をもとに貧酸素期における湾内水質の現状の把握を行った。次に、貧酸素水塊(湾内底層に蓄積される栄養塩)が潮汐変動にともなって湾外へ排出される機構について検討した。最後に、その機構による湾内底層水の湾外への排出量の算出を行った。

貧酸素期(7~10月)における湾内の栄養塩(窒素・リン)量を調べた結果、従来からいわれているように、底泥からの溶出によると考えられる溶存態の栄養塩(特にリン)が底層で多くみられ、底層の貧酸素化が栄養塩濃度の増加と密接な関係があることを確認した。

栄養塩を多く含む貧酸素水塊は、下げ潮時において、湾内水の流出にともなって湾外へ排出される。湾内上下層間の密度勾配が小さくなるほどその排出量は大きくなるのが現地観測からわかった。そして、その機構が内部波によるものであることを2レイヤーモデルによる数値計算で確認した。

夏季(成層期)の防波堤開口部における流速の鉛直分布の連続観測により、下げ潮時は表層・底層から流出し、上げ潮時は中層から流入していることがわかった。この結果をもとに、下げ潮一回あたりの湾内貧酸素水塊の排出量を計算すると、湾内に存在する貧酸素水塊の0.4~1.2%であった。また、湾内底層水の湾外排出を補償する湾外から湾内底層への酸素供給量は湾内底層水の酸素消費量の約1/3と求められ、この機構にともなう湾外からの酸素供給量が湾内底層の溶存酸素量の変動に影響を及ぼしていることがわかった。

これらの結果は、海水交換型防波堤を用いて湾外水を湾内底層部へ流入させることにより密度勾配を小さくし、下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出機構を促進させる「潮汐を利用した水質管理手法」の基礎データとなるものである。

キーワード：防波堤、水温躍層、下げ潮、栄養塩、海水交換

---

1) 海洋環境部環境評価研究室

2) 海洋環境部主任研究官

3) 海洋環境部環境評価研究室長

4) 海洋環境部長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 TEL: 0468-44-5018, FAX: 0468-44-6423, E-MAIL: toyoda@cc.phri.go.jp.

## 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、生物・生態系に配慮し自然環境と共生したアメニティ豊かな環境負荷の少ない港湾「環境共生港湾<エコポート>」<sup>1)</sup>の実現を目指した事業が行われている。これらの事業を効果的に行うためには、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。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<sup>2)</sup>。このような考えに基づいて、無酸素水塊が頻発する京都府の久見浜湾において浅海漁場開発事業として、湾口を拡幅し海水交換を促進させる事業が行われた。しかし、湾口の拡幅工事後も無酸素水塊の規模は変わらなかった。この理由を調査した結果、初夏から冬にかけて湾内に流入する外海水は、晩春に流入した外海水よりも密度が小さいので晩春に形成された湾内底層水の内部に進入できないためとわかった<sup>3)</sup>。元来日本海側は潮汐が小さいうえに湾口部の拡幅により流入流速が減少したこともあり、夏の水質悪化時には外海水は表層と交流しても底層には届かなかったようである。つまり、湾口の拡幅は底層の無酸素水塊の解消ではなくその強調をもたらしたということである。このように社会インフラ整備や防災を目的に作られた港湾構造物においても、港湾内の流れの中で環境に対してどのような機能を果たしているかを適切に評価することが必要である。

本研究は、上記のような視点に基づいて、湾口部に津波防波堤を有する岩手県大船渡湾を対象として、貧酸素期における流れ場および水質の現地観測を行い、そのような特性をもつ閉鎖性湾域での水質管理手法確立の基礎データを取得することを目的としている。

## 2. 大船渡湾の地形と湾内水質の現状

### 2.1 地形特性

大船渡湾（北緯 39° 02′，東経 141° 44′）は三陸沿岸に位置しており、黒潮および親潮の影響をうけている。図-1 に示すように、南北方向が約 6km、東西方向約

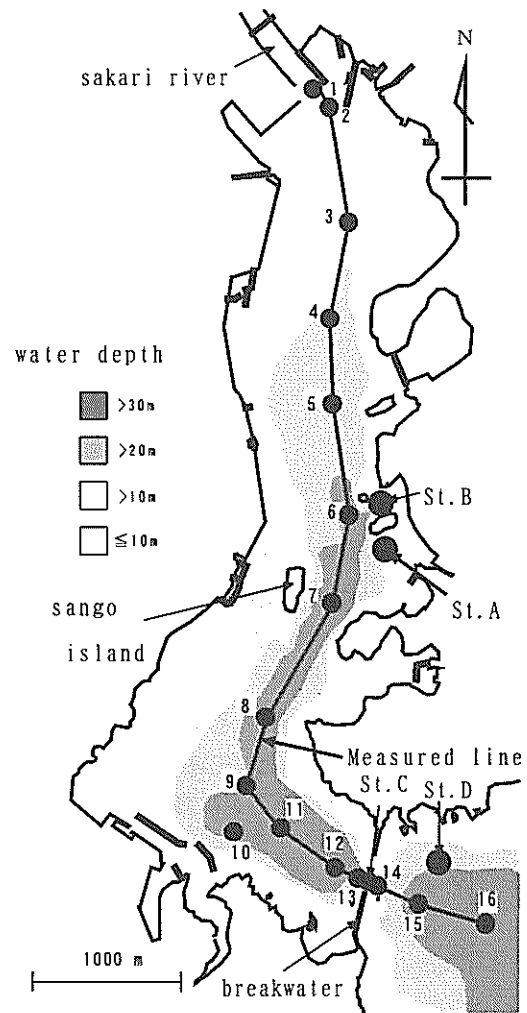
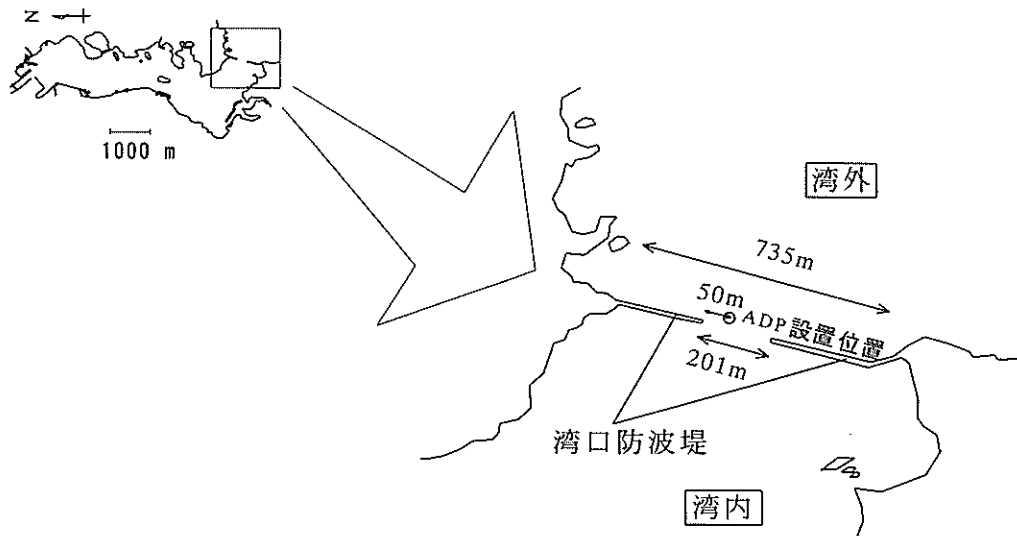
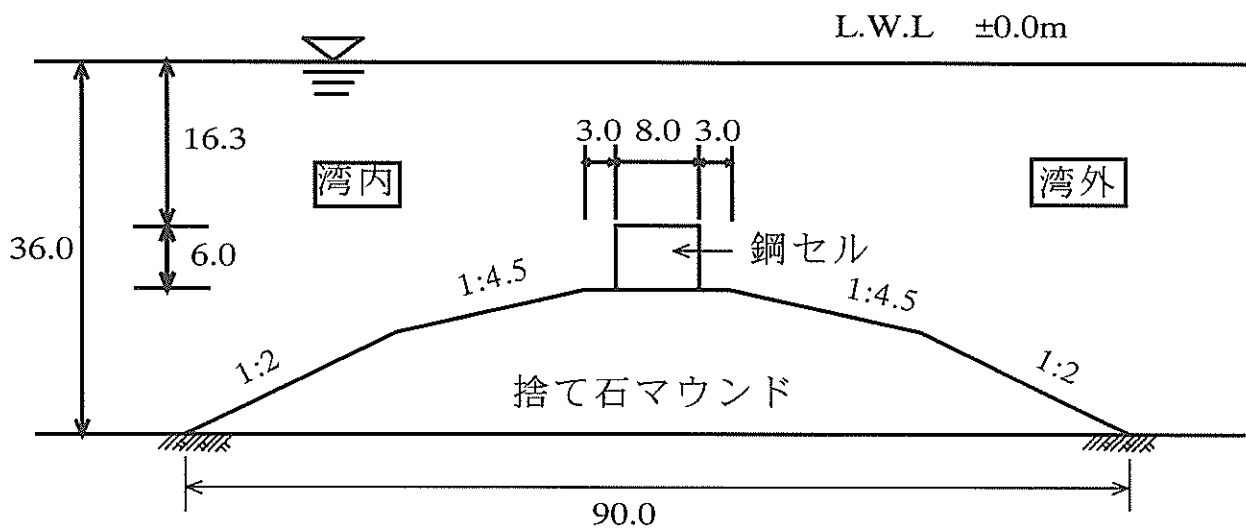


図-1 大船渡湾の概要

1.5kmの南北に細長い湾であり、最大水深約40m、平均水深約16mの空間スケールを有している。なお、図中の数字および記号(St.)は観測地点を示している。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 $90^\circ$ に屈曲する部分があり、湾の中心部には珊瑚島がある。1960年のチリ地震津波で甚大な被害を受けた教訓から湾口部に津波防波堤が建設され、1967年に完成した。防波堤の構造は混成堤であり、図-2に示すように、海底から水深約22mのところまで捨て石マウンドとなっている。湾口部中央の約200mを除いて、コンクリートケーソンが設置されており、中央にある開口部のマウンド上には捨て石の洗掘防止のために鋼セルが設置されている。



a) 湾口部拡大図



図中の単位は、m (メートル)

b) 開口部マウンド部分の断面図

図-2 湾口部津波防波堤の概要

## 2.2 観測の概要

1996年から図-1中のStで示す測点における水温(MDS-T:アレック電子(株)製)、塩分(MDS-CT:アレック電子(株)製)、溶存酸素(ADO-8M:アレック電子(株)製、DATASONDE4:Hydrolab社製)、照度(MDS-L:アレック電子(株)製)の定点係留連続観測および図中の観測線(実線)でのADCP(DR/SC型:RD Instrument社製)を用いた移動観測を行ってきた<sup>4)</sup>。また、1998

年4月、5月、7月、8月、9月、10月、12月に計7回の水質移動観測(ACL-1183PDK:アレック電子(株)製)と採水(栄養塩量の測定)を行った。採水はSt.2,4,6,12,14,Dで水深方向に10mごとに行い、NH<sub>4</sub>-N(アンモニア態窒素)、NO<sub>2</sub>-N(亜硝酸態窒素)、NO<sub>3</sub>-N(硝酸態窒素)、PO<sub>4</sub>-P(リン酸態リン)、T-N(全窒素)、T-P(全リン)の6項目について測定した。溶存態物質(前の4項目)については、船上でフィルターによる濾過を行い、

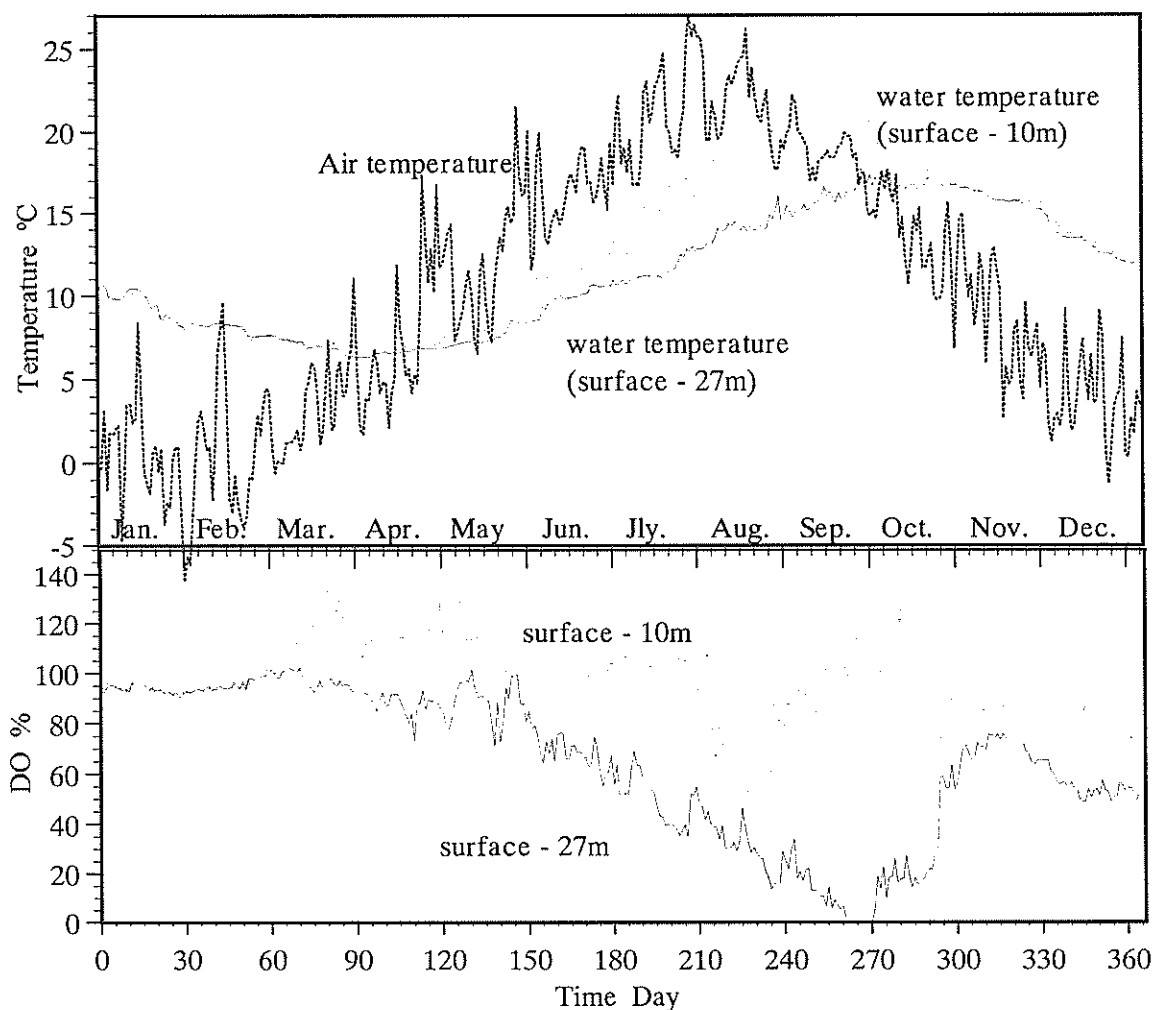


図-3 湾内における水温・溶存酸素および気温の変化（1997年）

実験室に持ち帰り、オートアナライザーで分析を行った。さらに、貧酸素水塊が発達する1998年7月16日から9月2日まで防波堤開口部（図-2参照）にADP（スタンドアローン型、0.5MHz：NORTEK社製）を設置し、防波堤開口部の一点において鉛直方向に流速の測定を行った。

### 2.3 大船渡湾内の水質の現状

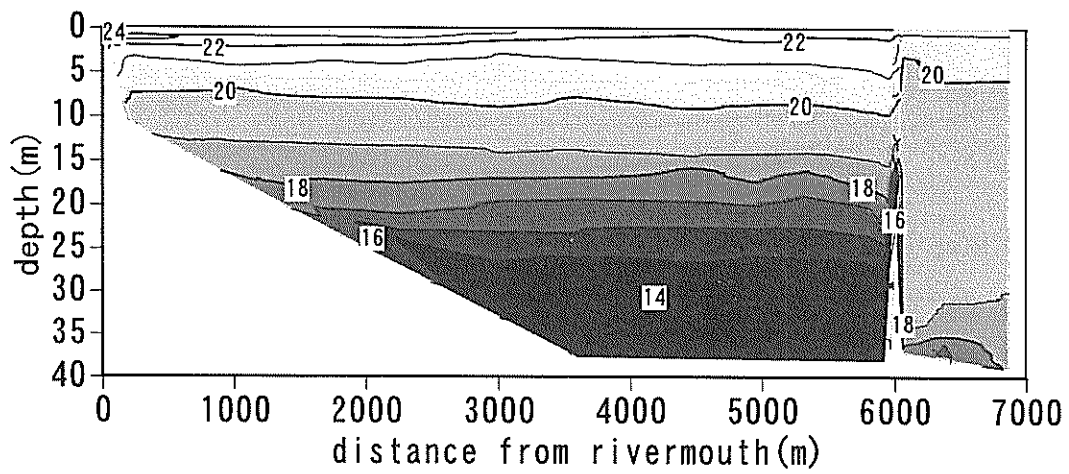
#### (1) 水温・塩分・溶存酸素量の年間変動特性

図-3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の経時変化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月頃に上下層の水温差は最大となっている。また、溶存酸素量を見ると、10mでは、貧酸素化はみられないが、27mでは、

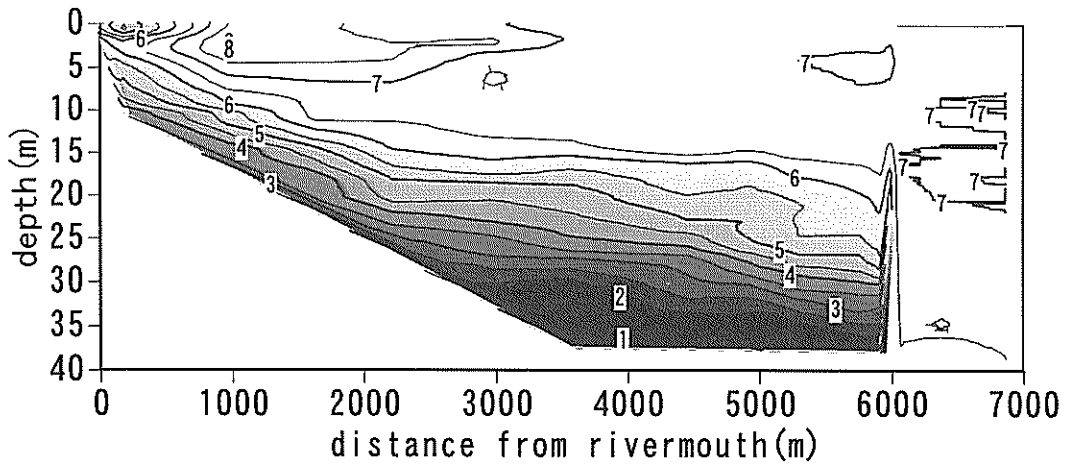
温度躍層の形成とともに貧酸素化が進行しており、温度躍層が最強となる9月頃には無酸素状態になっている。その後、温度躍層の消滅とともに、底層の貧酸素化は約1ヶ月で急激に解消されている。貧酸素水塊の形成・消滅は、温度躍層の形成・消滅と密接な関係があるといえる<sup>5)</sup>。

#### (2) 貧酸素期の水温・溶存酸素量の湾内分布

図-4は、1997年9月2日の湾軸ライン上での水温・溶存酸素量の分布である。水温については、湾外では鉛直方向にほぼ一様の分布を示しているのに対し、湾内では明確な躍層がみられ、上下層の差は約10℃である。溶存酸素量については、湾外では水温と同様、鉛直方向にほぼ一様の分布を示しているのに対し、湾内では底層部にいくほど溶存酸素量は減少し、20m以深では貧酸素状態（ $2.5\text{ml/l}=3.6\text{mg/l}$ 以下）<sup>6)</sup>になっている。



(a) 水温 °C



(b) 溶存酸素量 (mg/l)

図-4 貧酸素期における水温・溶存酸素の分布 (1997. 9. 2)

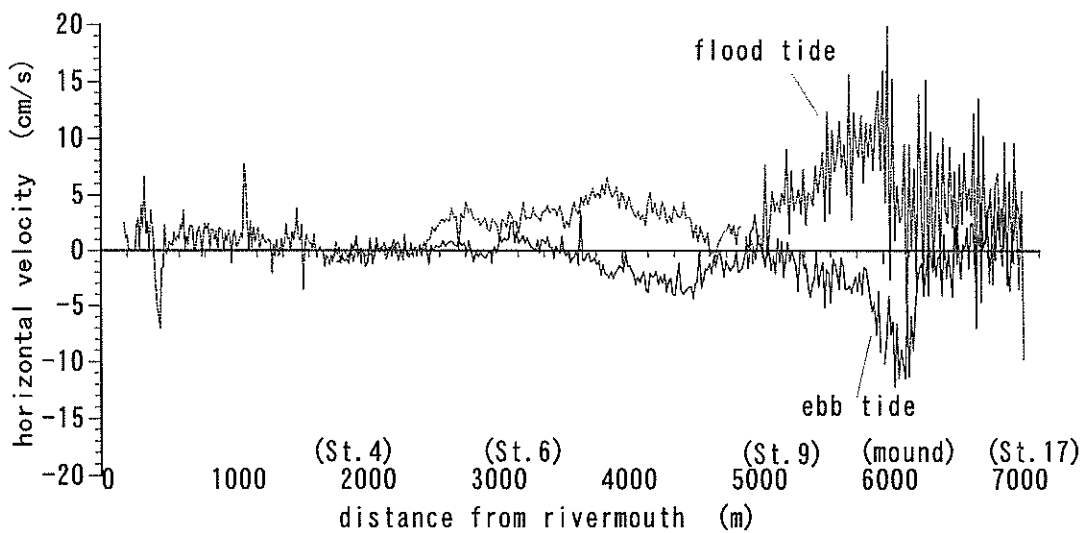


図-5 湾軸ライン上の断面平均流速分布 (1997. 9. 30)



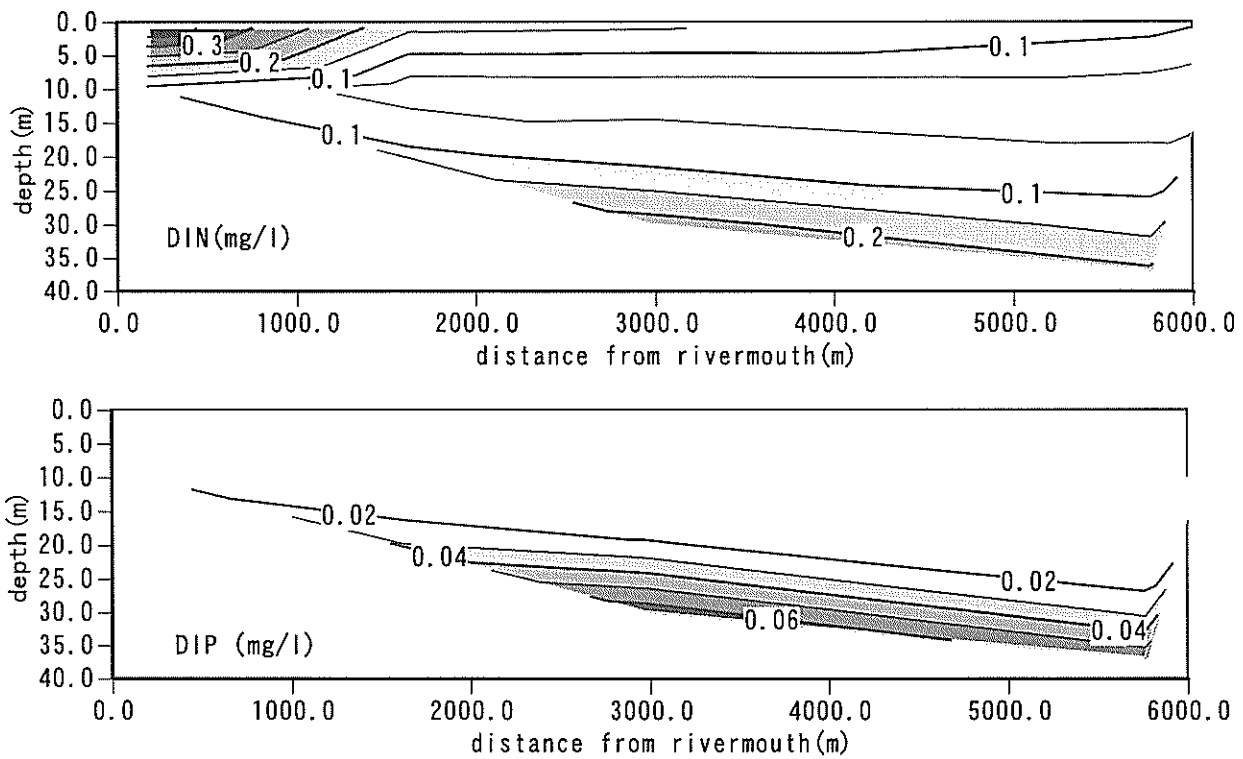


図-6 貧酸素期における溶存態窒素・リンの分布

### (3) 湾軸方向の流速の分布

図-5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（図-1中の実線）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（Sl.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、再び珊瑚島付近（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流速は、上げ潮時に比べて小さく、珊瑚島より湾奥での流れはほとんどない。

### (4) 貧酸素期の窒素・リンの湾内分布

図-6に湾内における栄養塩分布（DIN, DIP）の貧酸素期（7, 8, 9, 10月）の平均値を示す。窒素については、河口近傍で大きい値を示しており、その値は底泥からの溶出があると考えられる底層部より大きい。一方、リン

については、表層部よりも底層部で大きな値を示しており、貧酸素水塊が底泥からのリンの溶出を促進していることがわかる。これらの結果は、Hayakawa<sup>9)</sup>が整理した1979年から1989年の10年間の平均値と同じ傾向である。また、DIPの分布図から、溶出したリンは温度躍層の存在により上層へ浮上することなく底層にとどまっているのがわかる。

## 3. 下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出

### 3.1 成層の強さと湾内底層水排出の関係

図-7に(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）の下げ潮時と上げ潮時における湾外（Sl.15）での水温分布、図-8に下げ潮時の湾口防波堤付近における水温分布を示す。図-7をみると、9月2日、9月30日には、上げ潮時には全層ほぼ一定の水温を示しているのに対し、下げ潮時には底層部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、11月17日には全層ほぼ一様水温であるため、潮汐の上げ下げにともなう水温分布に

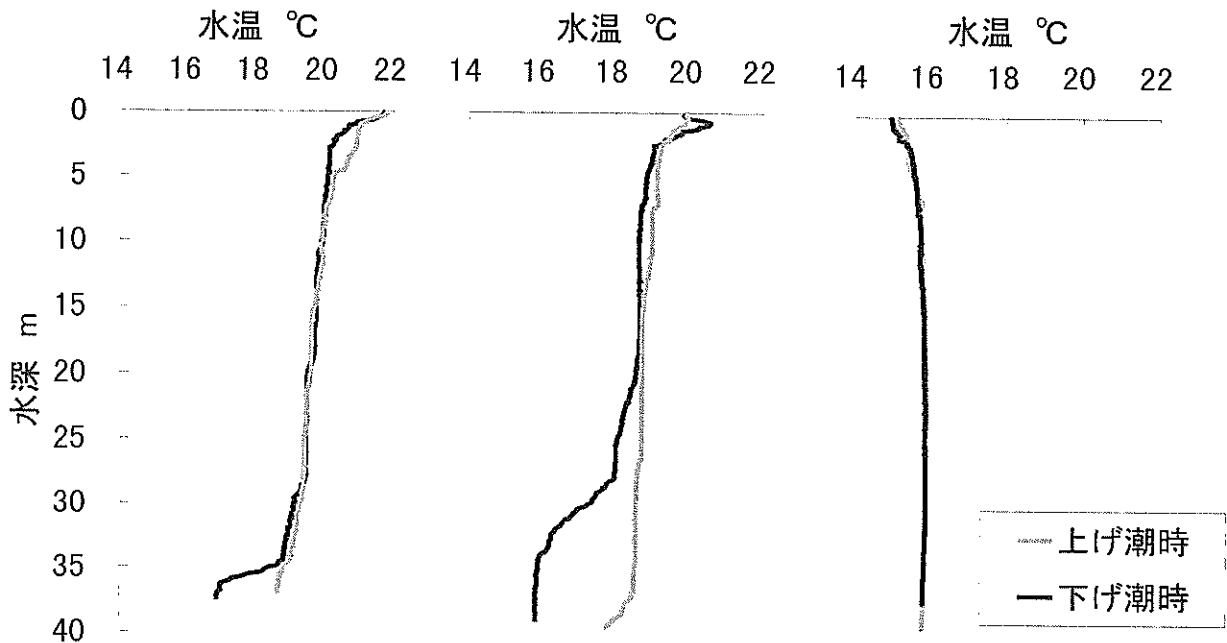


図-7 湾外 (St. 15) における上げ潮時と下げ潮時の水温分布

差はみられない。図-8をみると、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。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。湾内水の水温勾配の大きさは、9月2日、9月30日、11月17日の順であり図-8の左に示した湾内底層水の浮上距離の大きさが逆の順番になっていることから、下げ潮にともなう湾内底層水の排出量は湾内水の水温勾配が小さいほど大きくなることがいえる。

### 3.2 2レイヤー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法を用いて陽的に計算を進めた。なお、各層の水平渦動粘性係数は、 $10\text{m}^2/\text{s}$ としている。図-9(a)に、海底地形と計算条件を示す。初期条件として、密度界面を静水面から23m下方にあるとし、上層の密度を $1024.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、下層の密度を $1024.75\text{kg}/\text{m}^3$ 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。図-9(b)に満潮時から干潮時までの

内部界面の挙動、図-10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。図-10(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、図-5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、図-10(a)に示すように珊瑚島より湾奥での流速は小さくなっている。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、図-9(b)と図-10(b)から、密度界面は、2.0km、6.0km付近を腹、4.2km付近を節とした振動<sup>9)</sup>を示しており、この結果は参考文献4)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、図-8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。

### 3.3 湾内底層水塊排出量の算定

貧酸素期の湾内底層水の湾外への排出量を算定することを最終目的として、まず、防波堤開口部での断面流速分布の観測結果から潮汐の上げ下げによる海水交換量を算出する。

図-11は1998年7月16日から7月22日までの防波堤開口

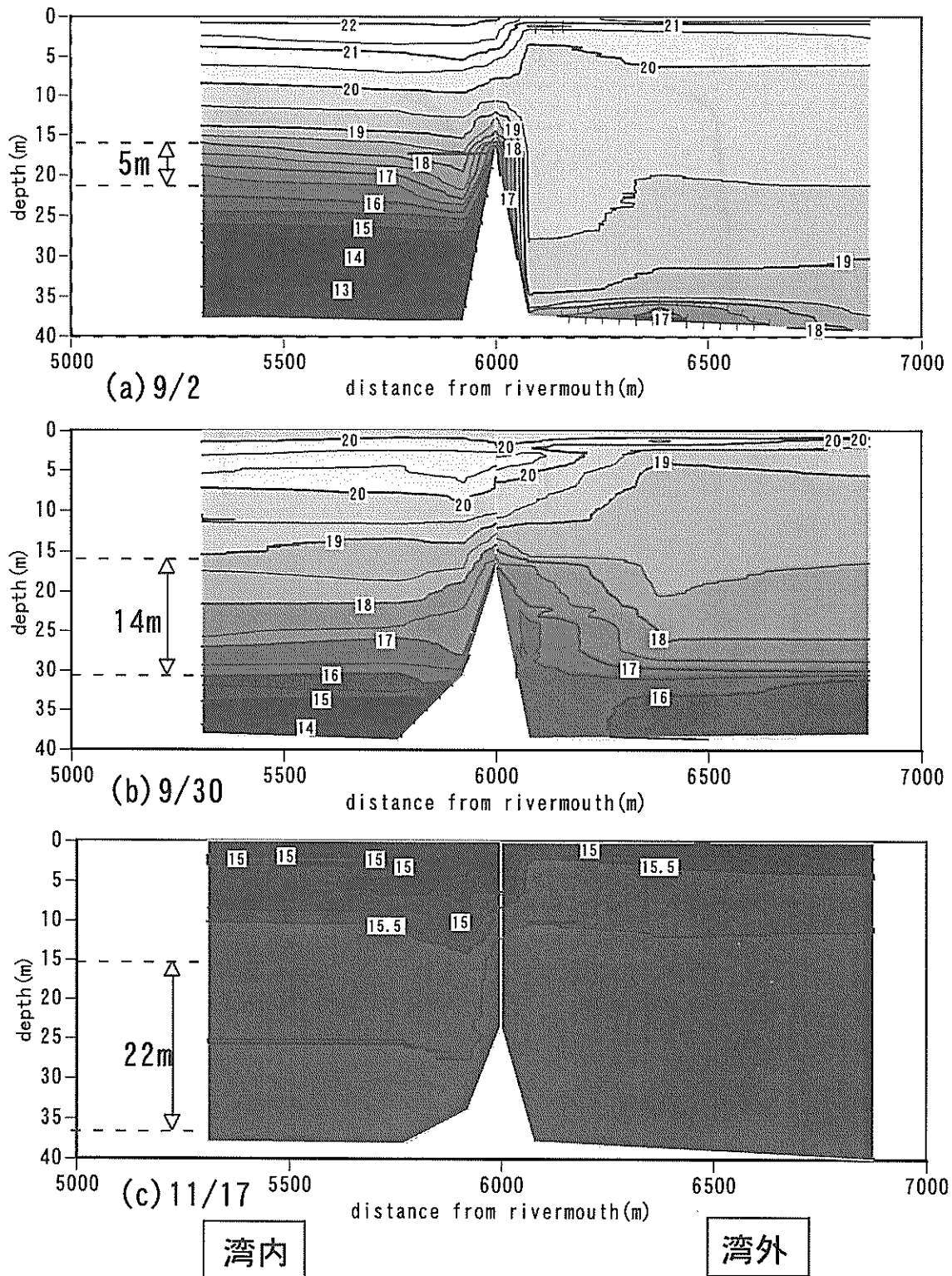
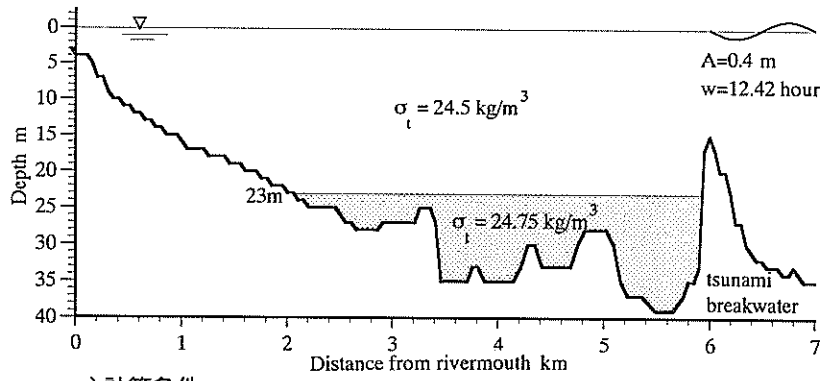
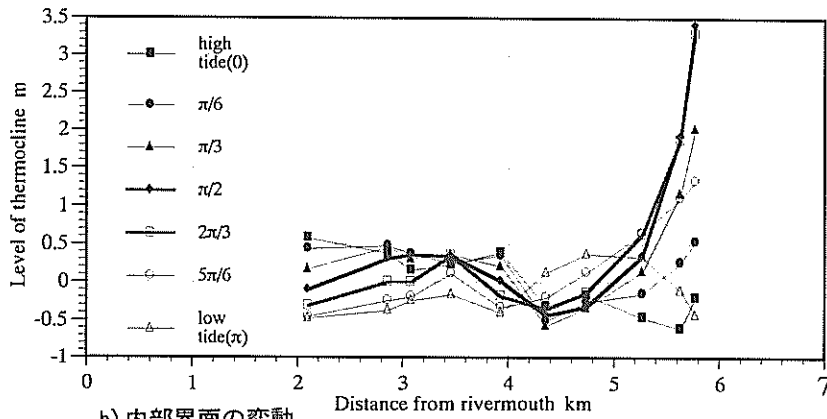


図-8 下げ潮時における湾口防波堤近傍の水温分布

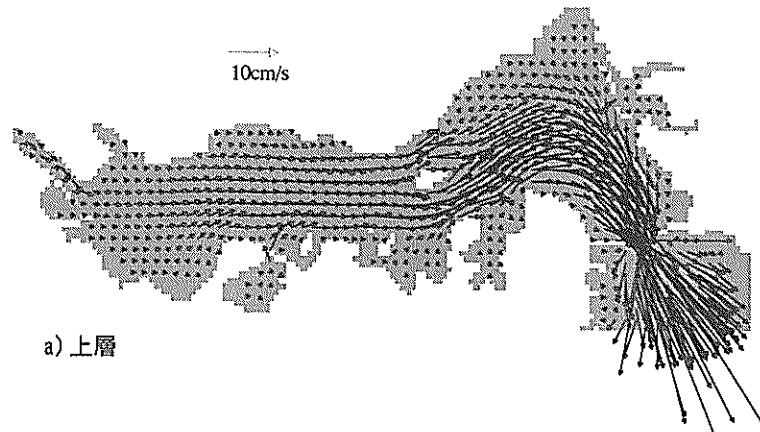


a) 計算条件

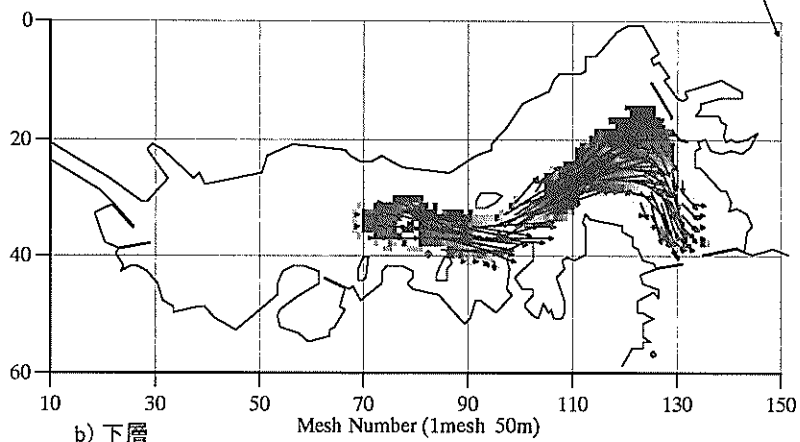


b) 内部界面の変動

図-9 2層レイヤーモデルによる内部界面の計算結果



a) 上層



b) 下層

図-10 下げ潮時における流速ベクトルと内部界面の変動

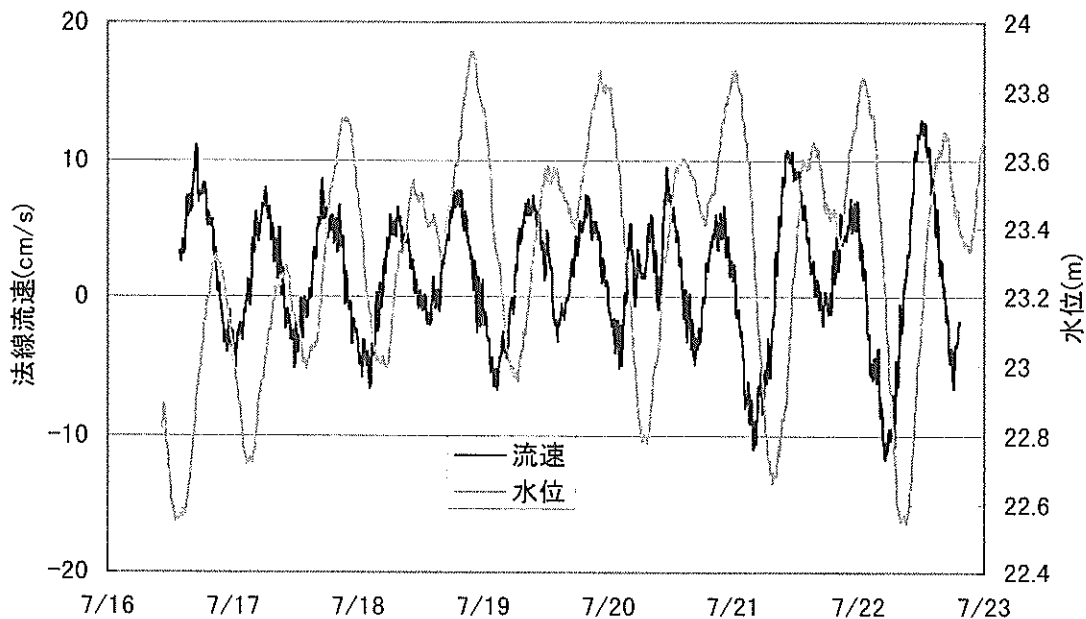


図-11 防波堤開口部における断面平均流速と水位変化

表-1 湾内水の流量収支

	7月	8月
上げ潮時の防波堤開口部における流入水量(m <sup>3</sup> )	6.13 × 10 <sup>7</sup>	8.13 × 10 <sup>7</sup>
下げ潮時の防波堤開口部における流出水量(m <sup>3</sup> )	2.21 × 10 <sup>7</sup>	6.88 × 10 <sup>7</sup>
下げ潮時の流出水量/上げ潮時の流入水量(%)	36.1	84.6
河川からの流入水量(m <sup>3</sup> )	8.17 × 10 <sup>5</sup>	9.36 × 10 <sup>6</sup>

部における法線方向の断面平均流速と水位の変化である。なお、流速については、湾外から湾内への流入を正としており、水位については海底に設置した流速計にとりつけた水位計によって測定されたものである。水位の変化にともなって流速は変化しており、上げ潮時に流入、下げ潮時に流出傾向を示している。全体量で見ると、流入が流出に比べて多くなっており、日潮不等による水位の減少量が小さいときは、下げ潮時にもかかわらず流出流速はほとんどみられない。

表-1に7月16日(小潮)から7月22日(大潮)および8月22日(大潮)から8月29日(小潮)のそれぞれ12潮汐間での断面平均流速から求めた防波堤開口部での水量の収支および河川からの流入量を示す。河川からの湾内への流入水量は開口部での流出入量と比べて1~2オーダー

小さくなっている。防波堤開口部では、7月、8月ともに上げ潮時の流入流量が下げ潮時の流出流量より大きく、8月観測は流出流量が流入流量の約85%であるが、7月観測では約36%となっており7月観測では12潮汐間の湾内水の収支が合っていないといえる。

図-12に表-1に示した期間中の断面流速図を示す。7月の流量の収支に問題があるとはいえ、7,8月ともに下げ潮時は表層・底層から流出、上げ潮時は中層からの流入となっていることがわかる。この結果は、成層期の防波堤開口部の海水交換機構を示していると考えられる。

図-13に表-1に示した期間中のそれぞれ12回の上げおよび下げ期間での潮位差と流量の関係を示す。図中の直線は、水位の変化量と湾内の表面積から求めた流量を示している。上げ潮時・下げ潮時ともに水位の変化量から

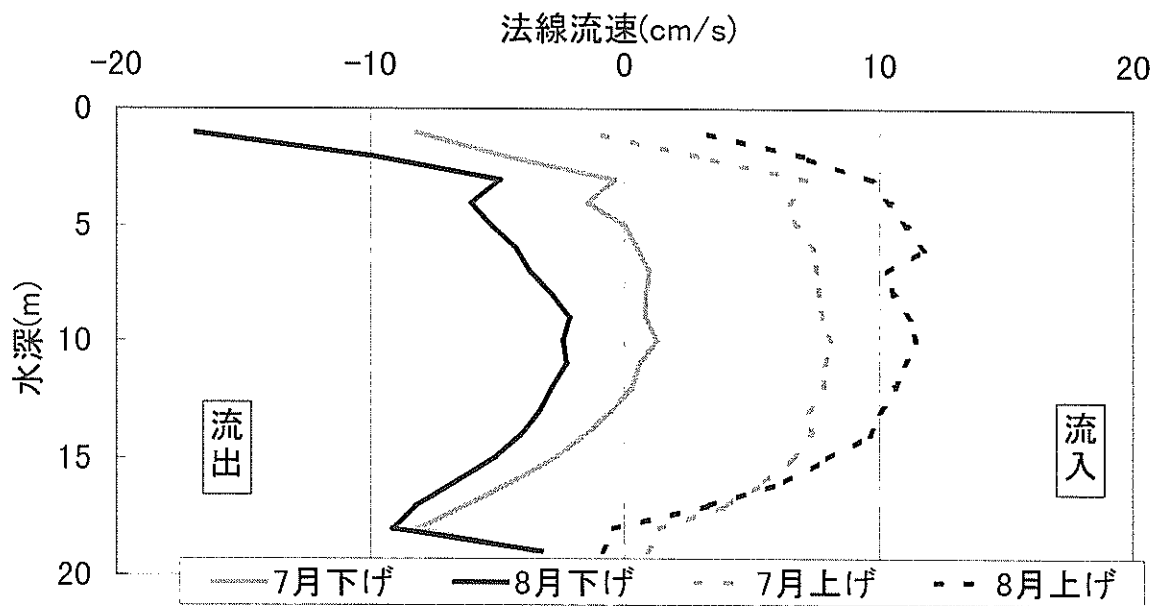


図-12 12 潮汐間の防波堤開口部における断面流速分布

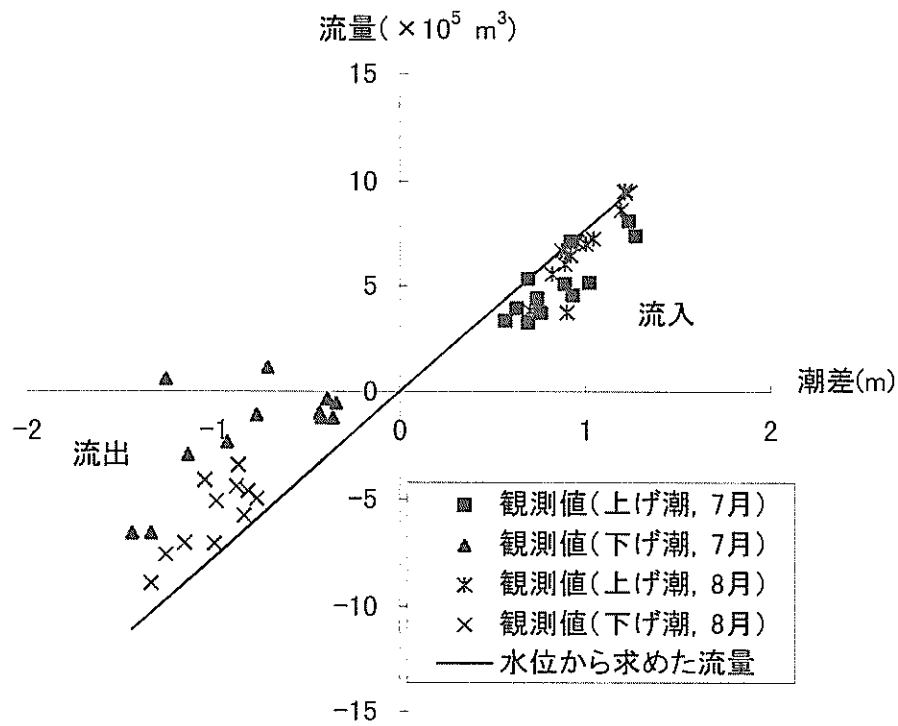


図-13 潮差と海水交換量の関係

求めた流量よりも小さい流量となっており、その差は上げ潮時に比べて下げ潮時の方が大きく、特に7月の下げ潮時には流出量が小さくなっている。このことから、本観測で求めた防波堤開口部での流量収支が合わない理由として、図-2中の測点では下げ潮時に開口部の断面平均

流速と大幅に異なる流速になっていたことが考えられる。

図-14は7月観測における12潮汐間の各水深(1m)ごとの流速の南北成分・東西成分をプロットしたものである。なお、図中の直線は防波堤開口部の法線であり、水面から0~5mを表層、6~15mを中層、16~23mを底層と定義

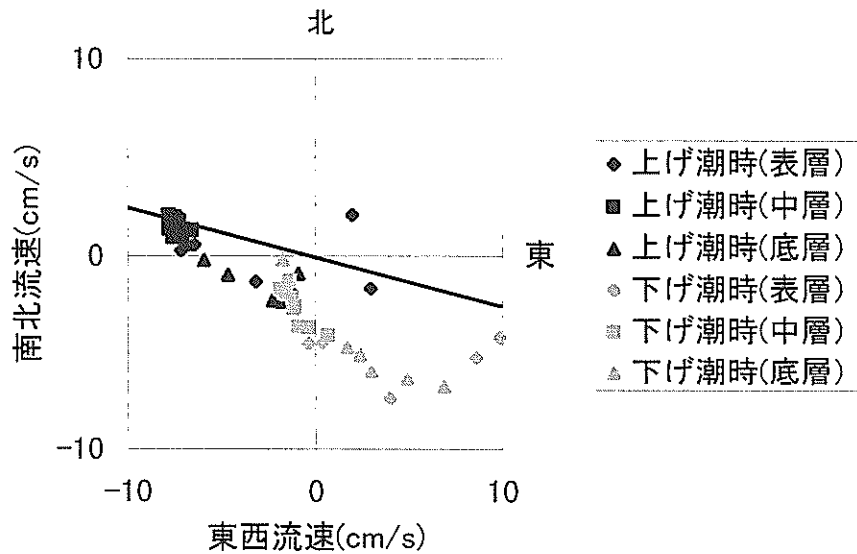


図-14 防波堤開口部での各水深における流速の向き

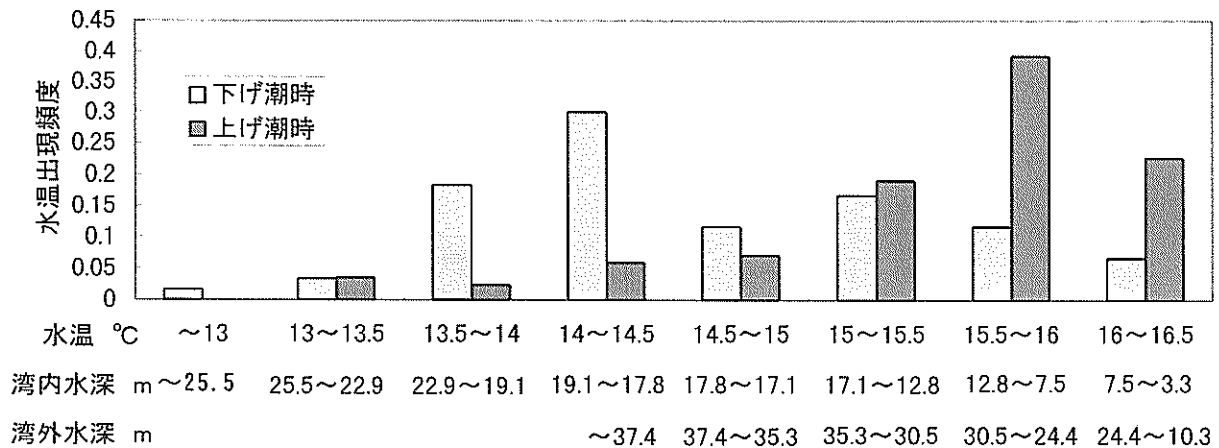


図-15 防波堤開口部における水温の頻度分布

した。上げ潮時には流入が大きい中層で開口部の法線方向に流入している。一方、下げ潮時には全層にわたって開口部の法線よりも南東方向へ流出している。この傾向は、1996年の観測<sup>4)</sup>でも同様である。下げ潮時の断面平均流速を見積もるにあたり、防波堤開口部の南側からの流出が大きいにもかかわらず図-2に示すようにADP（流速計）を防波堤開口部の北寄りにおいたため、流出流速を過小に評価している可能性があるといえる。つまり、防波堤付近における流れの平面分布の偏りが本観測により得られた流量収支の不釣り合いにつながる一つの要因であるということである。

図-15に7月16日の13時10分から7月17日の13時30分までADP設置位置（水深23m、図-2）で10分おきに測定した

水温の頻度分布を示す。なお、横軸の水温の下に、その水温に対応する下げ潮時における湾内の水深および上げ潮時における湾外の水深をあわせて示している。下げ潮時に13.5~14.5℃が多く現れているのに対し、上げ潮時には15~16.5℃が多く現れている。このことは、図-8に示した下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出機構が存在することを裏付けており、14℃以下の水が湾外に存在しないにもかかわらず湾外の水深23mのところには14℃以下の水が存在していることから考えると、湾内の水深20m付近の水塊がマウンド（水深16.3m）をこえて湾外へ流出していることがわかる。

図-15から14.5℃以下の水塊を湾内底層水と定義し、その排出量を算定した。湾内底層貧酸素水塊を20m、23m、

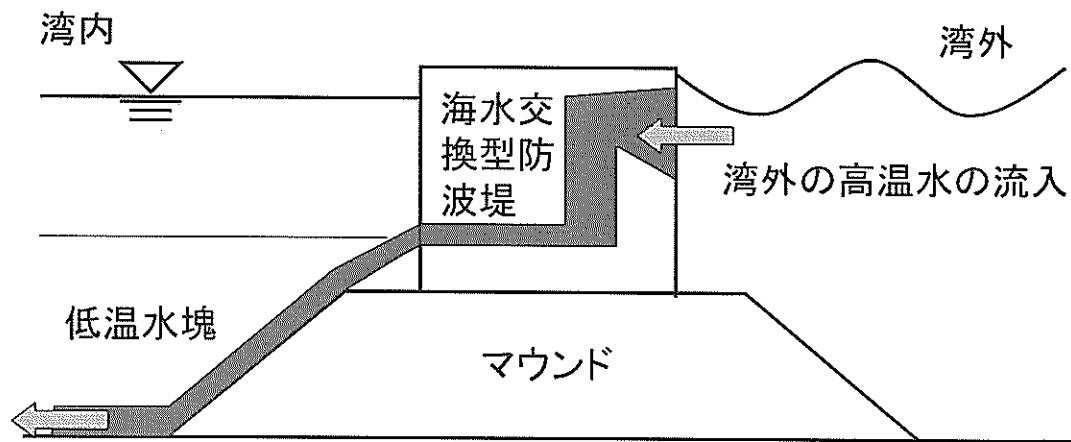


図-16 海水交換型防波堤

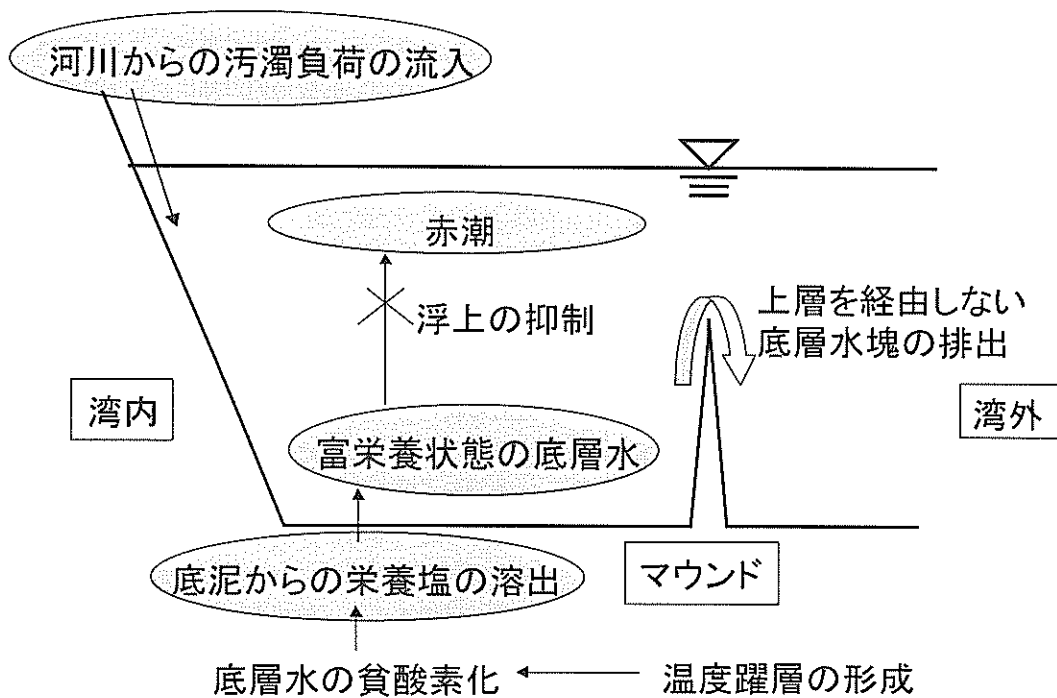


図-17 潮汐を利用した水質管理手法

27m以深の水塊の3通りで定義すると、下げ潮時の湾内底層水排出機構による湾外排出量は、それぞれ一潮汐あたり湾内全体の貧酸素水塊の0.4、0.8、1.2%と求まった。ただし、湾内の25m以深に存在する13℃以下の水塊は、ADP設置位置ではみられなかった。

#### 4. 水質管理手法の検討

##### 4.1 赤潮の抑制

大船渡湾では、温度躍層の存在により上下層の水塊が混合されにくいと、図-6に示すように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。



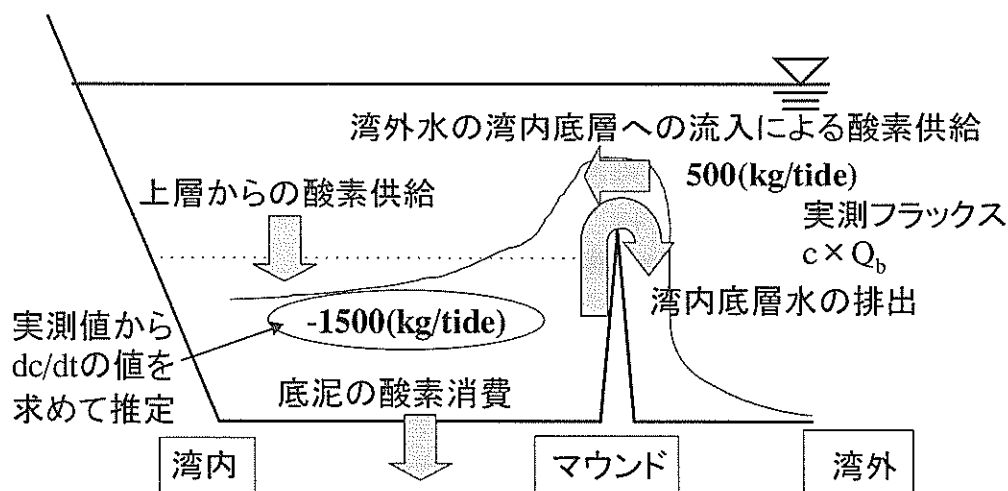


図-18 湾内底層水の溶存酸素量変化の模式図(1998年7月)

#### 4.2. 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

内湾と外洋の海水交換を促進させるために、運輸省第二港湾建設局では図-16に示すような海水交換型防波堤を開発中である。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、図-17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。

#### 4.3 湾内底層水の排出が貧酸素水塊に及ぼす影響

上述の海水交換機構の促進が貧酸素水塊にどの程度影響を及ぼすかをみるために、1998年7月を例として、図-18に示すように湾内底層水の排出を補償する湾外水の湾内底層への酸素供給量と湾内底層の酸素消費量を見積もった。なお、計算にあたって、湾内底層の貧酸素水塊を20m以深とし、湾内底層の酸素消費量はS1.Aの水深27m地点での7月16日から22日までの溶存酸素量の値(c)を直線近似した傾き( $dc/dt$ )から求めた。また、湾外から供給される溶存酸素量は7(mg/l)とした。その結果、湾外水の湾内底層への酸素供給量は湾内底層の酸

素消費量の約1/3という値を得た。このことから、下げ潮時に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少し促進すれば、夏季における貧酸素水塊の形成の抑制に役立つ可能性があることがわかった。

#### 5. おわりに

本論文では、まず、大船渡湾における流れ場および水質の現状について調べた。次に、下げ潮に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から明らかにし、2レイヤーモデルによる再現計算を行った。さらに、防波堤開口部における流速の連続観測結果から下げ潮にもなって湾外に排出される底層水量を見積もった。結論を以下に示す。

- (1) 湾内においては、4月中旬から温度躍層が形成される。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、珊瑚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。
- (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わかった。

- (5) 夏期における防波堤開口部での流速は、下げ潮時には表層・底層から流出し、上げ潮時には中層から流入の傾向を示している。
- (6) 防波堤開口部における流速の平面分布は一様ではなく、とくに下げ潮時には開口部の南側から湾内水が流出している。
- (7) (3)の機構による湾内底層水の湾外排出量を計算した結果、一回の下げ潮で湾内底層に存在する貧酸素水塊の0.4~1.2%が湾外に排出されていることがわかった。
- (8) 現在、第二港湾建設局で開発中の海水交換型防波堤は、下げ潮時における湾内底層水塊の湾外への排出機構を促進させる可能性があり、水質改善手法の一つのオプションとして考えることができる。また、この機構にともなう湾内底層水の溶存酸素量の変化を簡単に見積もった結果、この機構を促進させることにより、湾内底層水の貧酸素化の抑制につながる可能性があることがわかった。

(1999年3月31日受付)

## 謝辞

盛川の流量データについては岩手県鷹生・綾里川ダム建設事務所から提供を受けた。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 運輸省港湾局：環境と共生する港湾（エコポート）＜新たな港湾環境政策＞，大蔵省印刷局，1994年10月，p.7.
- 2) 宮沢公明，早川康博：大規模構造物と環境収容力—人工構造物（大船渡湾湾口防波堤）が湾内に及ぼす影響—，沿岸海洋研究ノート，第32巻，第1号，1994年，pp.29-38.
- 3) 柏井 誠：久見浜湾における無酸素水塊解消の試み，沿岸海洋研究ノート，第26巻，第2号，1989年，pp.129-140.
- 4) 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，第44巻(2)，1997年，pp.1066-1070.
- 5) 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，第43巻，1999年，pp.1073-1078.
- 6) 柳哲雄：シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ，沿岸海洋研究ノート，第26巻，第2号，1989年，pp.141-145.
- 7) 細川恭史・三好英一・堀江毅：栄養塩溶出速度の温度・DO依存性について，港研資料NO.405，1981年12月.
- 8) Yasuhiro Hayakawa：Mean Seasonal Changes of Dissolved Inorganic Nutrients in the Ofunato Estuary, Nippon Suisan Gakkaishi, vol.56,1990,pp.1717-1729.
- 9) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，1993年，p.342.

港湾技研資料 No.938

1999.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 シーケン

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(1999) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。