

大船渡湾における水質特性と 湾水制御効果の検討

STUDY ON THE WATER QUALITY CHARACTERISTIC AND SEAWATER EXCHANGE SYSTEMS USING NEGATIVE PRESSURE IN OFUNATO BAY

高橋研也¹・佐藤博信²・柏舘信子³・野村宗弘⁴・沢本正樹⁵

Kenya TAKAHASHI, Hironobu SATO, Nobuko KASHIWADATE, Munehiro NOMURA
and Masaki SAWAMOTO

¹正会員 修(工) 五洋建設株式会社 名古屋支店(〒460-8614 名古屋市中区錦3-2-1)

²学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

³学生会員 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

⁴正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科助手(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

⁵フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科教授(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

Ofunato Bay in Northeast part of Japan has tsunami protection breakwaters at the mouth of the bay, which decrease seawater exchange rate to outside and degrade the water quality such as hypoxia and eutrophication. These are frequently due to the formation of the density stratification in summer. In order to solve these problems, a seawater exchange system using negative pressure has been installed for the first time on the inner bay side rubble-mound in the world since September 21, 2004. However, it is necessary to investigate the water control effect of this system because this is still a stage of the demonstration experiment.

In this study, the field observation was performed to understand vertical water quality structures in Ofunato Bay in summer, 2003-2004. Consequently, the difference of the intrusion depth by the density current was acquired by ADCP. And, we simulated the present condition and examined the amount of the optimal exchange in bottom layer using a one-dimensional vertical model based on this observation.

Key Words : Ofunato Bay, field observation, ADCP, density stratification, seawater exchange, one-dimensional vertical model

1. はじめに

内湾などの閉鎖性水域では海水交換率が小さいために流動が停滞する傾向にあり、水質悪化が進みやすい。近年では防災意識の向上により防潮堤や防波堤といった港湾施設の整備などが目立ち、閉鎖度がさらに増加している水域も少なくない。閉鎖性水域における水質構造は海水交換率に支配されていることから、各地で海水交換に関する研究および現地観測が行われている。

永澤ら¹⁾は宮城県志津川湾内流動の鉛直構造が、湾水と湾外水の水温に起因する密度流によって決定されることを示した。山本ら²⁾は高知県野見湾において夏季の内部潮汐と秋季の“水止まり”現象とを比較し、成層状態の遷移過程の傾向を示している。岡島ら³⁾は宮城県長面

浦における現地観測より、海水の貫入する高さの変化に応じて、水質が改善される層の高さが変化することを確認している。このように、海水交換は水質構造に重要な役割を与えていることが明らかにされている。そこで、人為的に海水交換を底層に発生させ、貧酸素水塊を湾外に排出する負圧利用型海水交換装置⁴⁾が考案されている。しかし、水質改善に必要な揚水量や、装置の設置が湾内水質におよぼす正負の影響を量的に把握することが必要であるが、海水交換量を大きく変えたときに起こりうる負の影響に関してはこれまで議論がない。

そこで、本研究では負圧利用型海水交換装置が世界で初めて設置された岩手県大船渡湾を対象に現地観測を行い、湾内の水質構造を解明するとともに湾水制御効果について数値シミュレーションを行い、今後の湾内環境保全の基礎資料を作成することを目的とする。

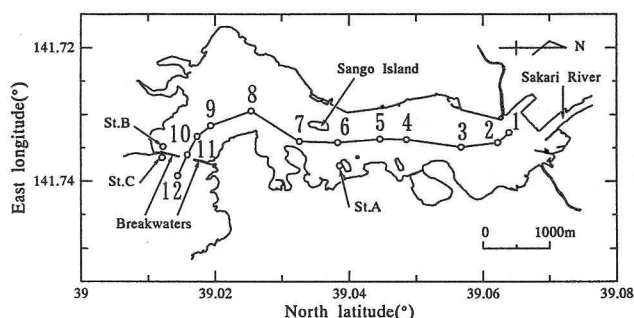


図-1 大船渡湾の形状と観測地点

2. 対象領域および現地観測

(1) 対象領域

本研究では岩手県南部三陸海岸に位置する大船渡湾（北緯 $39^{\circ}02'$ ，東経 $141^{\circ}44'$ ）を対象とした。図-1に大船渡湾の形状を示す。大船渡湾は南北方向に細長く入り組んだ閉鎖性湾であり，水表面積は 7.89km^2 ，全長は 6km である。典型的なリアス式海岸を形作っているため規模に対して水深は大きく，最大水深は湾口中央部付近において 38m ，平均水深は 16.3m となっている。湾中央には珊瑚島があり，湾内を湾奥部と湾口部とに二分している。湾奥部には二級河川盛川その他，須崎川や後ノ入川など数本の小河川が流入する。また，県全体の半分以上の貨物を取り扱う重要港湾大船渡港が整備されている。

湾口部には1960年のチリ地震津波の教訓から津波防波堤が建設され，開口部が 200m にまで狭まり閉鎖度指標が 1.4 から 14.04 に激増した。これにより静穏な水域が確保され，カキ，ノリ，ワカメ，ホタテなどの養殖漁場として多面的に利用されているが，その閉鎖度から水質の悪化が懸念されている。

(2) 現地観測

これまでも大船渡湾における現地観測^{5),6)}はいくつも行われてきているが，湾全域にわたる流況を捉えた例は見られない。そこで，著者らは2003年より以下の要領で，特に成層期における現地観測⁷⁾に着手している。

まず，図-1中のSt. A, B, Cの各層にそれぞれ小型メモリー式水質計（COMPACT-CT等：アレック電子社製）を係留し，水温，塩分濃度，DO濃度，光量子などの定点観測を行った（2003年8月29日～9月30日，2004年5月28日～10月22日）。表-1に水質計の係留状況を示す。また，定期的に現地に赴き（半月～1ヶ月間隔），上げ潮時・下げ潮時の1日2回，測線上の各測点においてTPM CLOROTEC（ACL2180-TPM：アレック電子社製）等を用いて水温，塩分濃度，DO濃度，光量子などのプロファイル観測を行った。それと同時に，走航式超音波ドップラー流速計（WH-ADCP：RD Instruments社製）を観測船に機装し，測線上を定速（ $4\sim5$ ノット）で航行しながら流向・流速プロファイルの移動観測を行った。表-2に現地観測の実施日と潮の概況を示す。

表-1 各測点での水質計の係留状況（CT：塩分濃度，水温）

St. A (25m)	St. B (35m)	St. C (20m)
1m (CT, DO)	1m (CT, DO)	
12m (CT, DO)	17m (CT, DO)	10m (CT, DO)
22m (CT, DO)	32m (CT, DO)	

表-2 現地観測の日時と潮の概況

年	月日	潮汐	年	月日	潮汐
2003年	7月28日	大潮	2004年	5月28日	小潮
	8月29日	大潮		6月21日	中潮
	9月14日	中潮		7月23日	小潮
	9月30日	中潮		9月1日	大潮
	10月17日	小潮		9月28日	大潮
	11月17日	小潮		10月22日	小潮

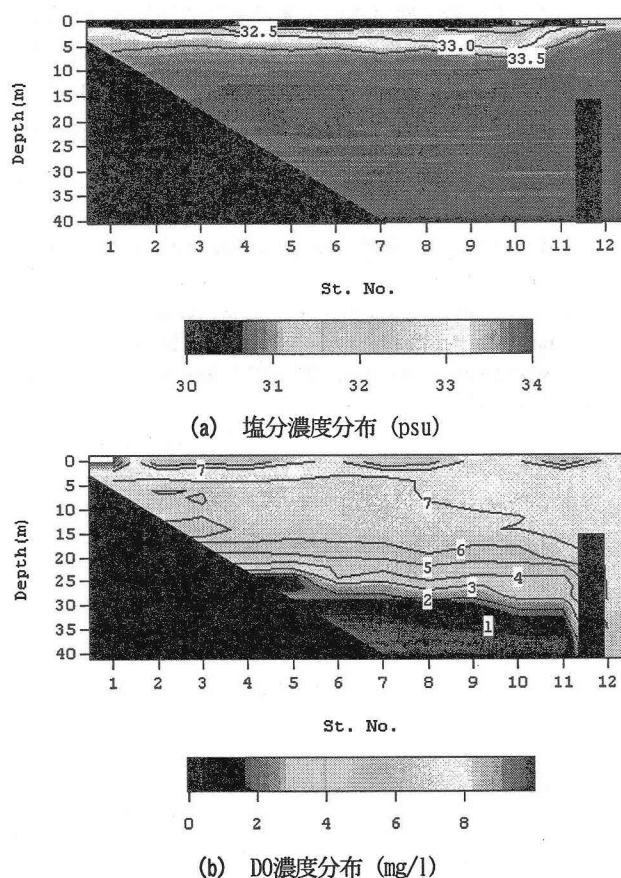
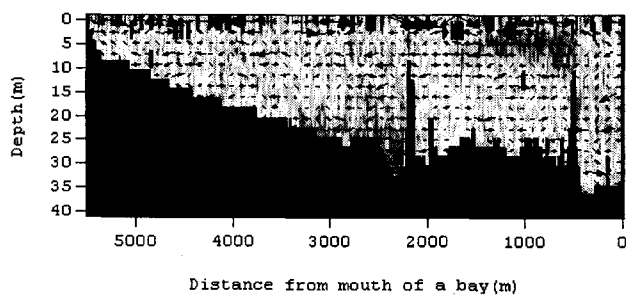


図-2 2004年9月28日（満潮）におけるプロファイル観測結果

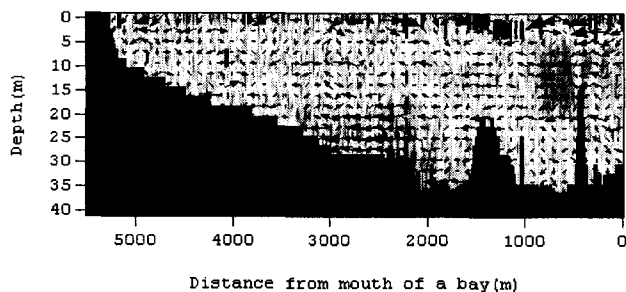
3. 水質構造に関する調査

(1) 水質構造

図-2に2004年9月28日午後の満潮時における(a)塩分濃度および(b)DO濃度の観測結果を示す。(a)から，湾奥部に流れ込んでいる河川水により，表層部において低塩分の一次躍層が形成されており，この低塩分層が湾外にまで張り出していることが分かる。これより，流れ込んだ河川水はそのまま湾外へ流出していると考えられる。

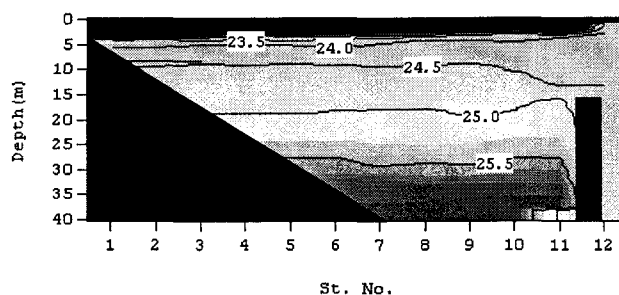


(a) 2004年7月23日 (上げ潮)

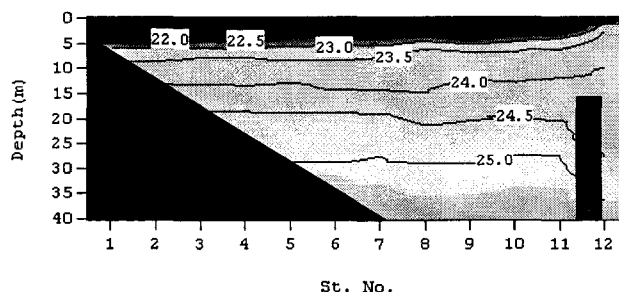


(b) 2004年9月1日 (上げ潮)

図-3 流向分布 (北0°, 東90°, 南180°, 西270°)



(a) 2004年7月23日 (上げ潮)



(b) 2004年9月1日 (上げ潮)

図-4 σ_t 分布 (kg/m³)

表-3 海水交換率 (/day)

2003年	7月28日	8月29日	9月14日	9月30日	10月17日	11月17日
$1/T_\lambda$	0.076	0.106	0.037	0.183	0.075	
2004年	5月28日	6月21日	7月23日	9月1日	9月28日	10月22日
$1/T_\lambda$			0.031	0.056	0.033	

また(b)より、潜堤マウンドが存在し底層水塊が貧酸素化していることが分かる。これらの図より、湾内水質は湾軸方向にほぼ一様であることが認められる。

(2) 密度貫入

図-3にADCPにより得られた流向、図-4に σ_t の分布を示す。(a)は2004年7月23日、(b)は2004年9月1日の上げ潮時における観測結果である。

閉鎖性水域に外海水が流入する際、水域内の同一密度層を選択して浸入する性質がある。図-4から、湾外水との同一密度層は(a)では5m付近の表層部であるのに対し、(b)では5~15mの中層部であることが分かる。ここで図-3を見ると、それぞれの同一密度層において北西方向の流れが卓越している。大船渡湾は湾口を南東方向に開いていることを考えると、これは密度貫入による流れであると言える。

このように、湾内外の密度構造により貫入水深は変化するが、この流れはいずれも湾口部のみに止まっている。これは、流入時に流れは噴流の特性を持ち周囲の流体と混合することに加え、湾の形状がL字型であるためちょうど屈曲部に当たる1500m付近で流れがさらに乱されることによると考えられる。

(3) 海水交換率

図-3で示した通り、ADCPにより密度貫入現象を捉えることができたが、閉鎖性水域における水質構造に与える重要な因子となるのは、対象とする海域の海水交換量である。ここでは、図-2(a)のような湾内外の塩分濃度分布より海水交換率を推定する。海水交換率は、湾内水全体に対する交換量の割合と定義した。図-2よりSt.11に防波堤マウンドが位置しており、水質の急変部に当たるため、ここを境界に湾内外を区別することができる。

大船渡湾を単純に湾内と湾外の二つのボックスに分割すると、交換効率を導くための式は(1)式で表される⁸⁾。

$$S_{in} = S_{out0} + \Delta S_{out} \frac{t}{T} + (S_{in0} - S_{out0}) \exp\left(-\frac{t}{T_\lambda}\right) - \Delta S_{out} \frac{T_\lambda}{t} \left\{1 - \exp\left(-\frac{t}{T_\lambda}\right)\right\} \quad (1)$$

ここで、 S_{in} : 湾内塩分 (psu), S_{out} : 湾外塩分 (psu), T_λ : 交換時間 (day), t : 時間 (day), S_{out0} : 湾外初期塩分 (psu), ΔS_{out} : 湾外塩分の変化量 (psu), T : 観測期間 (day), S_{in0} : 湾内初期塩分 (psu) である。

表-3より海水交換率は、2003年10月以外は3~10%である。

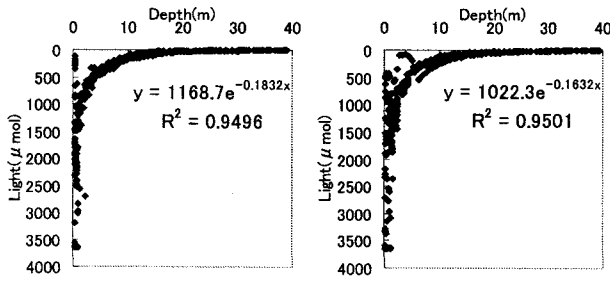


図-5 2004年9月1日におけるSt. 10の光量子プロファイル

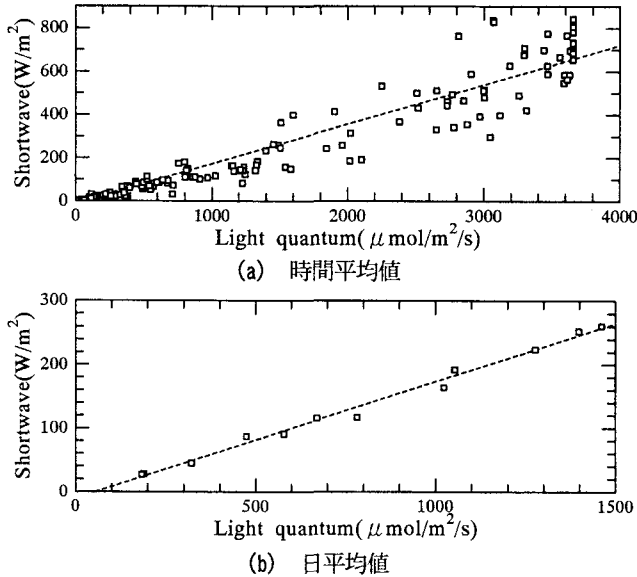


図-6 光量子と全天日射量との関係

(4) 消散係数

図-5に2004年9月1日におけるSt. 10の光量子プロファイルを示す。左図が午前、右図が午後の観測結果である。値に多少のばらつきは見られるが、水面に達してから消散係数0.15～0.20 (/m) の範囲で減衰していることが分かる。これら光量子から算定された消散係数の全平均値は0.163 (/m) となった。

(5) 全天日射量

大船渡湾において観測された光量子データを全天日射量として用いることを考える。しかし、光量子は物理学・光合成分野で盛んに用いられているものの、その関係を単純に示した例は見当たらない。そこで、ビルの屋上に光量子計を取り付け、仙台管区気象台における全天日射量の観測値と比較した(2004年9月15日～26日)。

図-6(a)に光量子と全天日射量の時間平均値を、(b)に日平均値を示す。(a)時間平均値のままではばらつきが多いのに対し、(b)日平均値として用いることにより相関が高まることから、光量子と全天日射量の関係を次式で線形近似できる。

$$S^{\dagger} = 0.1834\varepsilon - 10.237 \quad (R^2 = 0.9902) \quad (2)$$

ここで、 $S^{\dagger}$ ：全天日射量 (W/m^2)、 ε ：光量子 ($\mu mol/m^2/s$) である。

4. 水温成層・水質構造のモデル化

(1) 基礎方程式

内湾の成層化モデルは数多くあり、大船渡湾においてもいくつかの適用例がある。村上ら⁹⁾は非常に粗い条件ではあるが鉛直一次元の1ボックスモデルにより海水交換の感度解析を行っている。また、片岡ら¹⁰⁾は養殖力キを生態系モデルに組み込むことにより、底層の貧酸素現象を再現している。さらに、日比野ら¹¹⁾は一次元モデルを基本に湾口で実測された流速分布を用いることで準二次元モデルへと拡張し、湾内への流入量を推定している。

ここでは、前述したように湾内水質が湾軸方向にほぼ一様であることが認められることに加え、人為的湾水交換量を変化させた場合の水質構造に与える影響を評価することが目的であるため、最も単純な鉛直一次元モデルを採用し、得られたデータの再現計算を行う。

鉛直一次元モデルの基礎方程式を次式で表す^{9), 11), 12), 13)}。

$$V_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial A_i Q(z)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + \alpha Q (T_{OUT} - T_i) \quad (3)$$

$$Q(z) = (1 - \beta)(1 - ref) Q_s \exp(-\kappa(\lambda)z) \quad (4)$$

$$V_i \frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + \alpha Q (S_{OUT} - S_i) \quad (5)$$

$$V_i \frac{\partial C_{DOi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_i K_{zi} \frac{\partial C_{DOi}}{\partial z} \right) + P + \alpha Q (C_{DOOUT} - C_{DOi}) \quad (6)$$

ここで、 z ：鉛直座標(下向き正)、 t ：時間(s)、 T ：水温($^{\circ}C$)、 S ：塩分濃度、 C_{DO} ：DO濃度(mg/l)、 V ：容積(m^3)、 A ：水面積(m^2)、 K_z ：鉛直渦動拡散係数(m^2/s)、 Q ：潮汐プリズム(m)、 β ：吸光係数($=0.4$)、 ref ：アルベド($=0.08$)、 Q_s ：全天日射量(W/m^2)、 κ ：消散係数($/m$)、 ρ_w ：密度(kg/m^3)、

c_w ：比熱($J/kg/K$)、 a ：海水交換率($/day$)であり、添え字の“ i ”は層、“ OUT ”は湾外水を意味する。 P ：DOの生成・消滅項であり、本研究では細田ら¹⁴⁾による動物プランクトンまで含んだ低次生態系モデルを用いる。

また、海面表層に熱収支式を与え、バルク法を用いて海面温度を算定する¹⁵⁾。

$$\beta(1 - ref) Q_s - (Q_L + Q_H + Q_E) = 0 \quad (7)$$

ここで、 Q_L ：長波放射量(W/m^2)、 Q_H ：顕熱フラックス(W/m^2)、 Q_E ：潜熱フラックス(W/m^2)である。

(2) 計算条件

鉛直渦動拡散係数は風応力と勾配型Richardson数の関係から算定する¹⁶⁾。

$$K_z = K_{z0} f(R_i) \quad (8)$$

表-4 計算条件

水深	35.0m	鉛直層数	35層
空間格子間隔	$dz=1.0m$	時間格子間隔	$dt=600s$
気象データ	大船渡測候所日別値および時別値		
湾外	St. Cの25時間移動平均値 (10m)		
水面	水面熱収支 (パルク法)		
河川	盛川日平均流量		
計算期間	2004年5月29日～10月22日 (146日間)		
海水交換率	0.1 (/day)		
消散係数	0.163 (/m)		

$$f(R_i) = \left(1 + \frac{10}{3} R_i\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (9)$$

ここで、 K_{z0} ：中立状態における鉛直渦動拡散係数 (m^2/s)、 R_i ：Richardson数である。また、密度は水温および塩分濃度からUNESCO (1981) の状態方程式を用いて計算し、成層が不安定な場合は水面から次式で定義される水深 z_c (m) まで瞬時に対流混合が発生し、密度一定の混合層が形成されるとする。

$$\int_0^{z_c} \rho dz = z_c \rho_{ave} \quad (10)$$

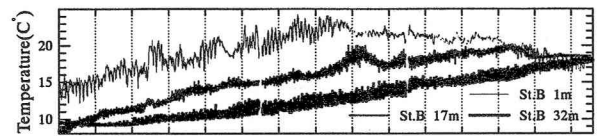
ここで、 ρ_{ave} ：混合層の密度 (kg/m^3) である。

その他の計算条件を表-4に示す。水深はm単位でグリッドを切り計35層に分割し、600s間隔で計算した。計算期間は2004年5月29日～10月22日までの146日間である。気象データとして大船渡測候所における海面気圧・気温・相対湿度・風速・降水量・日照時間を、潮位データとして気象庁による潮汐観測資料を用いた。初期条件として計算開始前日である2004年5月28日午後の現地観測で得られたSt. 6における鉛直プロファイルを与え、湾外の境界条件としてSt. Cにおける観測値の25時間移動平均値を与えた。また、前述した観測結果より、海水交換率は0.1 (/day)、消散係数は0.163 (/m)を用いた。

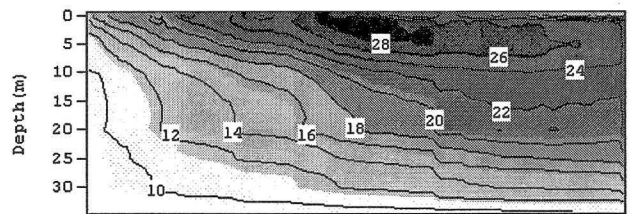
図-3で示した通り、大船渡湾では上げ潮時における密度貫入現象が顕著であるため、海水交換は湾内外の同一密度層において生じるものと仮定した。また図-2(a)より、河川水は常に表層へ流出するものとした。

(3) 計算結果

図-7に水温、図-8にDO濃度の(a) St. Bにおける観測結果と(b)計算結果を示す。図-7より、春季から夏季にかけて水温成層が発達し、秋季に成層が徐々に破壊される傾向が再現されている。しかし、表層水温が観測値よりも高く算出されていることから、式-10で示される密度の大小のみで決定される対流混合過程に問題があると思われる。つまり、特に夏季には表層部が高温・低塩分の非常に安定した一次躍層を形成するため、低層へ効率よく熱輸送が行われたことが考えられる。図-8においても底層水塊が貧酸素化する傾向を再現しており、湾

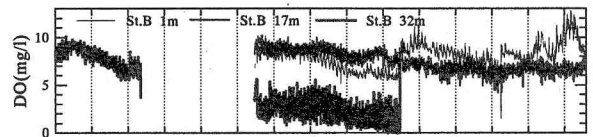


(a) St. Bにおける水温の観測結果

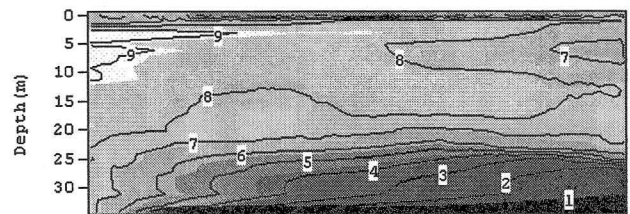


(b) 水温の計算結果

図-7 水温の観測結果と計算結果との比較 (°C)

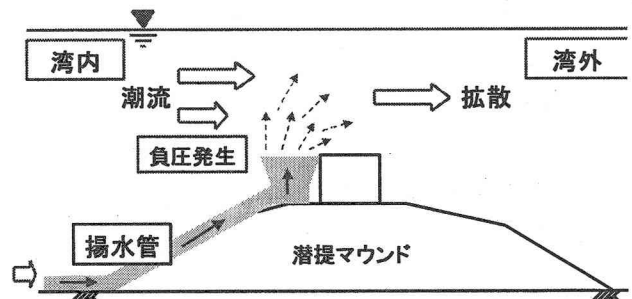


(a) St. BにおけるDO濃度の観測結果

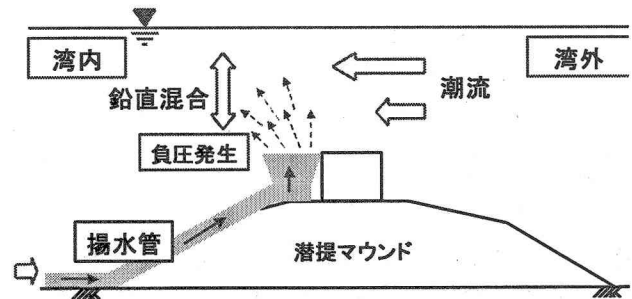


(b) DO濃度の計算結果

図-8 DO濃度の観測結果と計算結果との比較 (mg/l)



(a) 下げ潮時



(b) 上げ潮時

図-9 負圧利用型海水交換装置の概念図

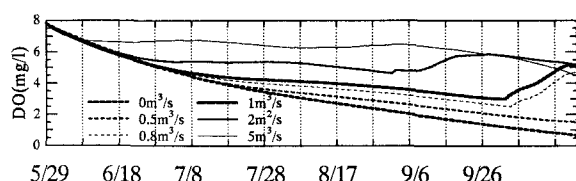


図-10 各揚水量における底層DO濃度の計算結果（水深32m）

内環境を評価する上で十分な精度を持つモデルである。

5. 制御方法の検証

大船渡湾においては2004年9月21日より潜提マウンドへ負圧利用型海水交換装置が設置されている。図-9(a)下げ潮時および(b)上げ潮時における負圧利用型海水交換装置の概念図を示す。潜提上の潮流によりベルヌーイの定理に従って揚水管上部に負圧が発生し、貧酸素化した底層水塊を吸い上げるというシンプルな構造である。ここでは、上記のように構築された鉛直一次元モデルにおいて揚水量を変化させ、底層DO濃度が改善するために必要となる最適交換量について検討する。潜提上に揚水された底層水塊は次の2通りの挙動をとると考えられる。

- (a) 下げ潮時に揚水された底層水塊は湾外に拡散流出
- (b) 上げ潮時に揚水された底層水塊は湾内中層に浸入

この仮定を用いて揚水量を変化させた場合の水深32mにおけるDO濃度の計算結果を図-10に示す。揚水量が0～0.5m³/sの場合はDO濃度が減少し続けるのみであるが、0.8～1 m³/sまで増やすとDOの回復時期が早くなる。なお、2 m³/s以上揚水した際に秋季にDOが減少しているが、揚水量の増加により、秋季に水温が大きく上昇し、DO消費が大きくなり、減少につながったものと考えられる。

6. まとめ

- (1) 大船渡湾においては、上げ潮時に外海水が水域内の同一密度層を選択して浸入する、密度貫入現象が生じている。その海水交換率は3～10%である。
- (2) 光子より消散係数および全天日射量を推定した。
- (3) 密度貫入および生態系モデルを考慮し、湾内環境を精度良く再現できる鉛直一次元モデルを構築した。
- (4) 底層水の最適交換量は1～2m³/sであり、これ以上揚水すると秋季にDO濃度が低下する。装置の揚水量は22000m³/本/dayであり、最適本数は4～5本となる。これらより、必ずしも揚水量を上げることが水質改善にはつながらないと結論づけることができる。

謝辞：本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学工学部）：研究課題「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究（研究代表：小野沢元久）」の一環として実施した。また、科学研究費補助金基盤A（代表：澤本正樹）の援

助を受けた。盛川の流量は岩手県大船渡地方振興局土木部鷹生ダム建設事務所より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 永澤豪，田中仁，村松勝之，山路弘人：ADCPを用いた志津川湾内流動の観測，海岸工学論文集，第45巻，pp.396-400，1998.
- 2) 山本潤，佐伯信哉：野見湾での初夏の流況と水質変動及び赤潮発生を捉える現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp.951-955，2004.
- 3) 岡島直也，田中仁，金里学，高崎みつる，山路弘人：長面浦における溶存酸素の変動機構，海岸工学論文集，第51巻，pp.936-940，2004.
- 4) 小沢大造，平出友信，古川恵太，中村聡志，小林茂雄，国栖広志：負圧を利用した海水交換潜提の揚水特性の基礎的検討，海岸工学論文集，第47巻，pp.1161-1165，2000.
- 5) 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，海岸工学論文集，第44巻，pp.1066-1070，1997.
- 6) 日比野忠史，鶴谷広一，板橋直樹：大船渡湾での水構造の季節変動特性と海水交換量の定量評価，土木学会論文集，No. 761/II-67，pp.69-80，2004.
- 7) 佐藤博信，高橋研也，野村宗弘，沢本正樹：大船渡湾における海水密度変動による海水交換と流況変動に関する検討，水工学論文集，第49巻，pp.1315-1320，2005.
- 8) 中山恵介，岡田知也，野村宗弘，日比野忠史，細川恭史，古川恵太：大潮，小潮期における湾外水の影響，海岸工学論文集，第47巻，pp.421-425，2000.
- 9) 村上和男，長坂猛：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.1126-1130，1996.
- 10) 片岡真二，田中昌宏，小林英一，小島洋：数値シミュレーションによる閉鎖性湾の浄化対策の検討—大船渡湾を対象として—，海岸工学論文集，第46巻，pp.1106-1110，1999.
- 11) 日比野忠史，駒井克昭，鶴谷広一，岡田知也：湾口における高密度水塊の貫入機構のモデル化と海水交換量の推定，海岸工学論文集，第49巻，pp.976-980，2002.
- 12) 新井正：地域分析のための熱・水収支水文学，古今書院，2004.
- 13) R.P. Midgley, J.H. Simpson, P. Hyder and T.P. Rippeth : Seasonal Cycle of Vertical Structure and Deep Water Renewal in the Clyde Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **53**, pp.813-823, 2001.
- 14) 細田尚，細見知彦：琵琶湖北湖の水質鉛直分布の季節変化に関する簡易モデルと温暖化の影響への適用，河川技術論文集，第8巻，pp.495-500，2002.
- 15) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—，朝倉書店，1994.
- 16) 尹鍾星，中辻啓二，伊藤渉，村岡浩爾：閉鎖性水域における鉛直一次元水温成層モデルに関する一考察，水工学論文集，第37巻，pp.325-330，1993.