

# 港湾技研資料

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

No. 1004 June 2001

閉鎖性内湾の底層溶存酸素濃度に対する湾口防波堤の影響

岡	田	知	也
中	山	恵	介
宮	野		仁
古	川	恵	太

国土交通省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 大船渡湾と釜石湾の底層DO濃度の長期変動特性	4
3. 釜石湾の底層DO濃度の現状	6
4. 底層DO濃度計算の手法および条件	7
4.1 計算手法の大枠	7
4.2 海水交換率の算出	8
4.3 非静水圧3次元計算の境界条件	9
4.4 非静水圧3次元計算の計算グリッド	9
4.5 計算ケース	11
5. 計算結果	11
5.1 流速分布	11
5.2 各層の海水交換時間	13
5.3 水温と塩分	13
5.4 DO濃度	13
5.5 酸素消費速度と底層DO濃度の関係	13
5.6 酸素消費速度の推定	14
6. おわりに	15
参考文献	15

# **The Effect of Tsunami Protection Breakwater on Concentration of Dissolved Oxygen in an Enclosed bay**

**Tomonari OKADA\***  
**Keisuke NAKAYAMA\***  
**Masashi MIYANO\*\***  
**Keita FURUKAWA\*\*\*\***

## **Synopsis**

Tsunami protection breakwater is placed at the mouth of a bay in northern Japanese coast Sanriku to prevent from threats of tsunami disaster from Pacific sea side. After the tsunami protection breakwater is constructed, a degradation of water quality in a bay is anticipated by decreasing the exchange rate of seawater. In this study, concentration of dissolved oxygen is used as an index of the deterioration of water quality. This study examined the effect of the tsunami protection breakwater on the temporal change of the dissolved oxygen concentration in a bay. Field observation and numerical calculations are conducted for Kamaishi Bay where the tsunami protection breakwater is under construction.

We try to clarify the long-term change of the dissolved oxygen concentration by the installation of tsunami protection breakwater. First, Ohfunato Bay where the tsunami protection breakwater had already been set up was examined. A long-term trend of dissolved oxygen concentration change is not detected. Therefore, it can be considered that the dissolved oxygen concentration in the bay is controlled by a balance between seawater exchange and load for one year. Next, the estimation of dissolved oxygen concentration in Kamaishi Bay was carried out numerically.

A non-hydrostatic three-dimension model was used for the determination of the exchange rate of seawater. A one-dimensional vertical model was used for the prediction of dissolved oxygen concentration over a long period. The computations were carried out for five cases. Different settings of the breakwater include no breakwater case were examined.

When the exchange rate of seawater decreases due to the construction of the tsunami protection breakwater, dissolved oxygen concentration in deeper part decreases in summer seasons. However, no rapid decrease of dissolved oxygen concentration as a long-term trend is predicted under the completion of the tsunami protection breakwater.

**Key words :** tsunami protection breakwater, seawater exchange rate, dissolved oxygen concentration, anoxic water, sediment oxygen demand

---

\*Researcher of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division  
\*\*Trainee of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division (Environmental Consultant for Ocean and Human)  
\*\*\*Chief of Environmental Assessment Laboratory, Marine Environment Division  
3-1-1, Nagase Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-468-44-5018 Fax : +81-468-44-6243 e-mail:okada@ipc.phri.go.jp

# 閉鎖性内湾の底層溶存酸素濃度に対する湾口防波堤の影響

岡田 知也\*  
中山 恵介\*  
宮野 仁\*\*  
古川 恵太\*\*\*

## 要 旨

三陸沿岸のいくつかの湾には津波対策として湾口防波堤が建設もしくは計画されている。閉鎖性内湾に湾口防波堤が設置されると、湾の海水交換率は小さくなり、水質が悪化することが懸念されている。そこで本報では、水質指標として底層の溶存酸素を用いて、湾口防波堤の影響によって底層の溶存酸素濃度がどのように変化するかについての検討を行った。検討対象は現在湾口防波堤を建設中の釜石湾である。

まず、湾口防波堤が設置されたことによる湾内底層の溶存酸素濃度の変動特性を検討するために、既に湾口防波堤が設置されている大船渡湾について既に得られているデータを整理した。大船渡湾においては、防波堤設置後において長期的な溶存酸素濃度の低下傾向が見られないこと、冬期に溶存酸素濃度は一旦上昇することが示されている。このことから、湾口防波堤が設置された閉鎖性の湾においても、湾内の溶存酸素濃度は海水交換量と負荷量の1年間のバランスによって成立しており、長期的な溶存酸素の低下傾向は現われないことが考えられた。

この特性を踏まえて、釜石湾の底層溶存酸素濃度に対して湾口防波堤が海水交換率に与える影響を考慮した数値的検討を行った。計算手法としては、海水交換率の算定に三次元非静水圧モデル、湾内溶存酸素濃度の計算に鉛直次元モデルを用いている。計算ケースとして、①現状および②完成後の地形条件に加え、比較対照として③湾口防波堤がない場合、④マウンドのみの場合および⑤開口部のマウンドがない場合の5ケースを実施している。

計算を実施した結果、湾口防波堤が建設され始めたことによって海水交換率が低下し、夏期における底層部の溶存酸素濃度の最低値は低下する。しかしながら、湾口防波堤が完成しても現状の溶存酸素濃度のレベルから急変することはないと考えられる。

キーワード：湾口防波堤、湾口マウンド、海水交換、溶存酸素濃度、貧酸素水塊、酸素消費速度

\* 海洋環境部環境評価研究室

\*\* 海洋環境部環境評価研究室研修生（株式会社エコー）

\*\*\* 海洋環境部環境評価研究室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省港湾技術研究所

電話：(0468)44-5018 Fax：(0468)44-6243 e-mail:okada@ipc.phri.go.jp



## 1. はじめに

三陸沿岸のいくつかの湾には津波対策として湾口防波堤が建設もしくは計画されている。湾口防波堤が設置されると、湾の湾外との海水交換率は小さくなり、湾内底層の溶存酸素濃度（DO濃度）が低下することが懸念されている。湾口防波堤の事例としては、釜石湾と大船渡の事例がある。釜石湾の湾口防波堤の工事は1979年から始められ、既にマウンド部は完成、ケーソン部は5割程度設置されている。工事中から20年たった現在の釜石湾の底層DO濃度は最低値には4mg/lまで低下する。一方、大船渡湾の湾口防波堤は1967年に完成し、完成から既に30年以上経過している。その大船渡湾の底層DO濃度は夏期の最低時には3mg/lを下回り、日によっては無酸素状態となることもある。

そのような状況の下、湾口防波堤を現在建設中の釜石湾において、湾口防波堤が完成した後の底層DO濃度の今後の遷移が問題となっている。釜石湾の現在の底層DO濃度は、無酸素状態まで低下していないが、湾口防波堤が完成したことによってさらに低下するのではないかと心配である。そこで本研究では、釜石湾の底層DO濃度が、湾口防波堤が完成した影響によって、どのような変化傾向を示すのかについて検討する。

計算手法は岡田ら(2000)が大船渡湾に適用した研究例にならった。つまり、海水交換率には非静水圧3次元モデル、湾内水質（水温、塩分、DO濃度）には鉛直1次元モデルを用いる計算手法である。本計算手法では、湾内水質

は空間的に一様として取り扱っており、防波堤背後や湾奥等の局所的な水質は表現できない。本計算手法はあくまでも、今後の水質変化の方向を評価するという目的のために採用した平均的な湾内水質を評価する手法である。

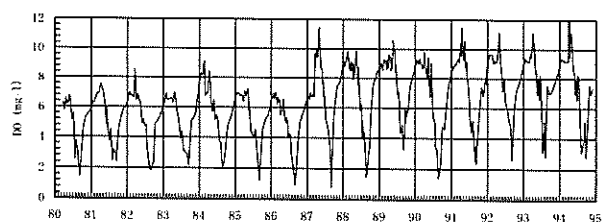
## 2. 大船渡湾と釜石湾の底層DO濃度の長期変動特性

大船渡湾における湾内の水質観測は、岩手県によって貝毒プランクトン調査として1978年から、DO濃度に加えて水温、塩分、栄養塩、クロロフィルa（植物プランクトン量）、*Dinophysis*属および*Alexandrium*属出現数調査等が実施されている。そこで、それらのデータを用いて大船渡湾の底層DO濃度の長期変動特性を捉えることによって、湾口防波堤設置後の底層DO濃度の変動に対する知見を得ることとする。

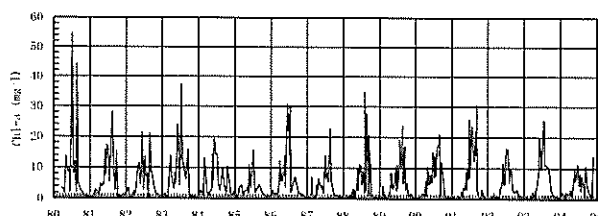
図-1(a)から(d)は1980年から1996年までの大船渡湾における、底層DO濃度、表層クロロフィルa、溶存態窒素およびリン酸態リンの時系列変化を示したものである。データは最低でも月に1度は採取されており、長期間のデータとしては非常に時間密度が高いデータである。

底層DO濃度は、1980年から1986年までの期間と1987年以降の期間では傾向が異なっているものの、長期的な低下傾向は示しておらず、安定した平衡状態を示している。また、底層DO濃度は夏期に低下しても、冬期に一旦上昇する傾向を示していることが分かる。この冬期の増加が前年の影響を次年に持ち越し底層DO濃度が経年的に低下することを抑えている要因と考えられる。

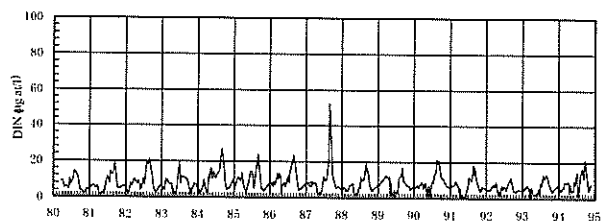
他の水質指標、表層クロロフィルa、底層の溶存態窒素、



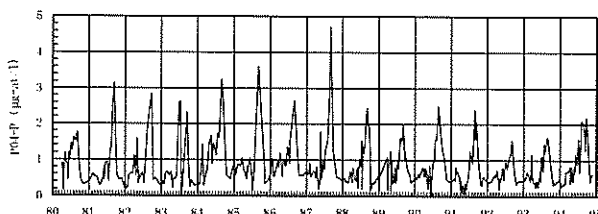
(a) 底層 DO 濃度



(b) 表層Chl-a



(c) 底層DIN



(d) 底層PO<sub>4</sub>-P

図-1 大船渡湾における長期間の各水質指標の変動（岩手県貝毒プランクトン調査より）。横軸は年代を示す。

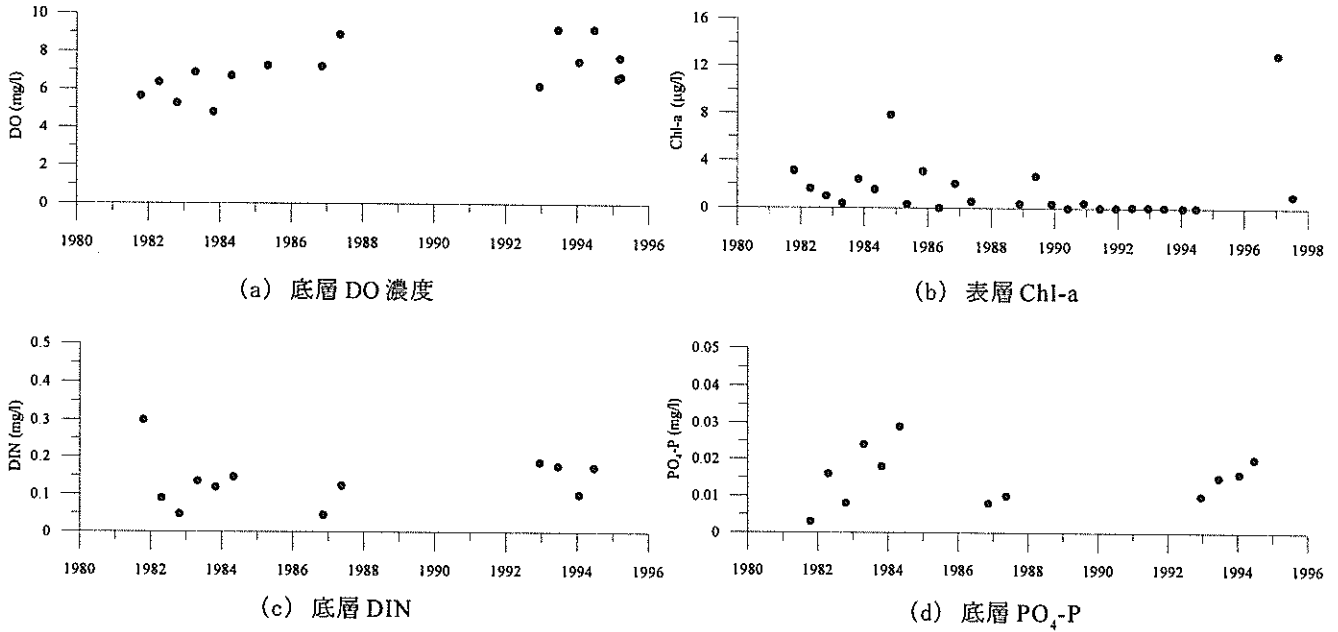


図-2 1981年から1996年までの各水質指標の変動（運輸省第二港湾建設局釜石港湾工事事務所）

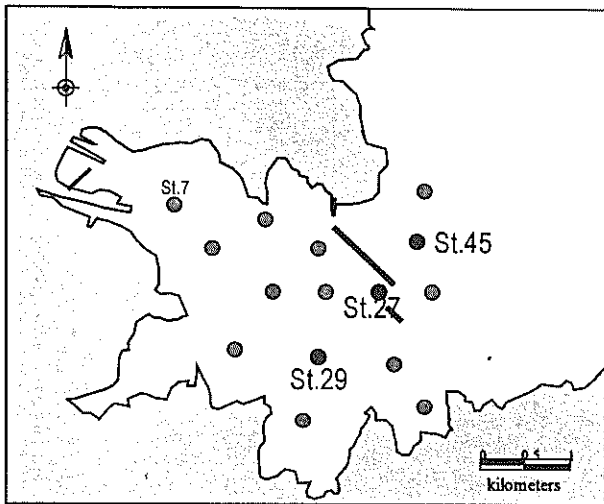


図-3 釜石湾の形状と観測地点. St. 29, 45は連続観測地点. 他の地点は釜石港環境調査（釜石港湾工事事務所, 2月, 9月実施）地点.

リン酸態リンに関しても, 長期的な増加傾向は示しておらず平衡状態を示している. また, 冬期に一旦低下する傾向も示している\*.

このようなことから, 湾口地形の変化が起きた後でも, 長期的には平衡状態にあると考えられる. そして, その平衡状態では底層DO濃度が冬期に一旦回復するという1年周期の変動を示し, 湾内の底層DO濃度は海水交換量と負

\* 水質指標として, DO濃度は大きい方が, クロロフィルa, 窒素およびリンは小さい方が水質としては良い. よって, 大小の表現が逆になっている.

表-1 釜石湾における調査実施項目

観測期間	2000年2月から11月まで
連続測定	
地点	St. 29, St. 45
頻度	10分間隔
調査項目	水温 塩分 DO濃度
測定水深	図-4参照
鉛直分布測定	
地点	St. 29, St. 45
頻度	1ヶ月に一度
調査項目	水温, 塩分, Chl-a, DO濃度, 濁度
測定水深	10cm毎に表層から底層まで

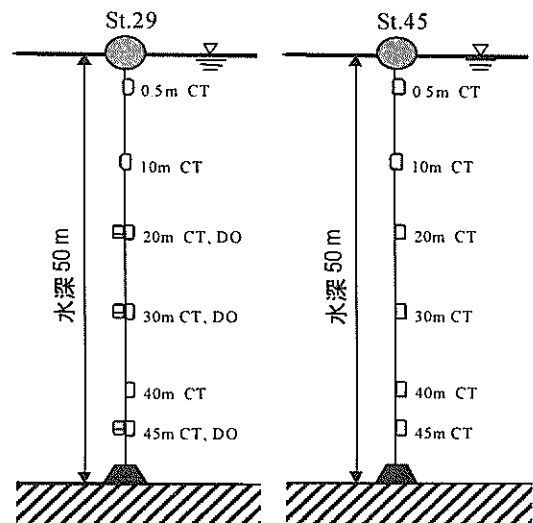


図-4 St.29および45における係留型水質計の設置状況

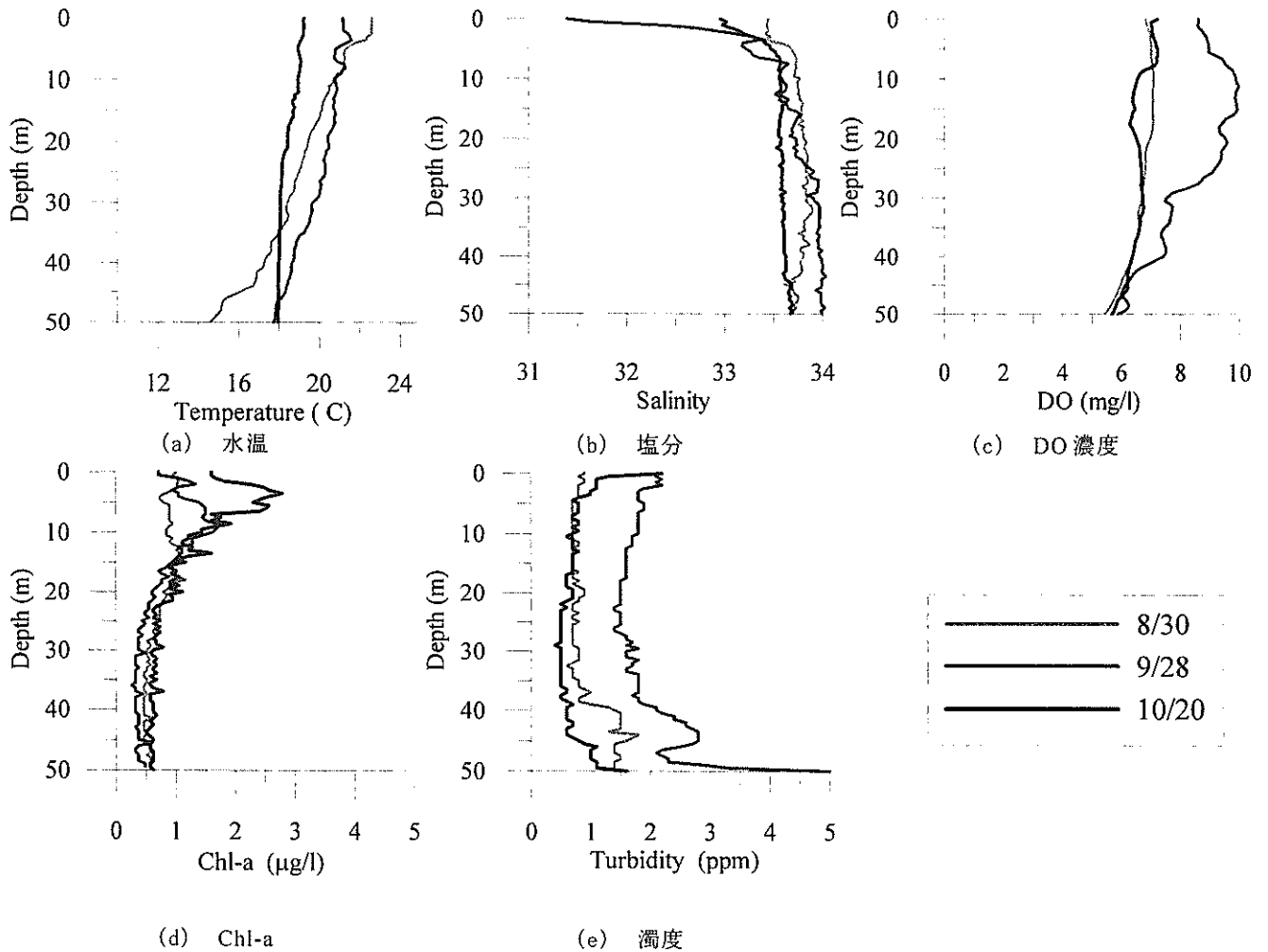


図-5 St. 29における各水質指標の鉛直分布 (2000年8月, 9月および10月)

荷量の1年間のバランスによって成立しているものと仮定することができる。

このことを考慮すると、湾口防波堤の底層DO濃度への長期的な変化傾向の評価に対しても、数値計算は底層DO濃度が一旦上昇する冬期からに1年分のみ実施することで評価できると考えることができる。

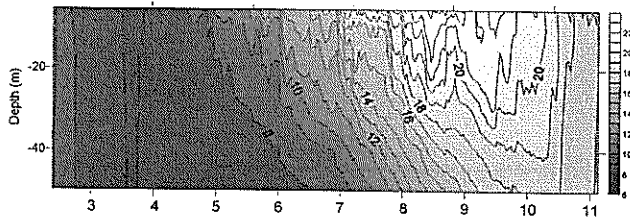
図-2(a)~(d)に釜石湾(図-3中St. 27)における1981年(湾口防波堤工事着工時)から1995年までの底層(水深:58m, 測定水深:57m)のDO濃度, 表層のクロロフィルa, 底層の溶存態窒素および底層のリン酸態リンの長期変動を示す。釜石湾における長期の水質調査は2月と9月の年2回のみの実施であるため年周期の変動までは見ることができない。1981年から1983年にかけて9月の底層DO濃度の値は5.5mg/lから4.5mg/lに低下しているが、その後長期的な低下傾向は見られない。また、9月の値と比較して2月の値は大きく、冬期における回復が示されている。他の水質指標に対しても、1984年までは増加傾向があるが、その後の長期的な増加傾向は見られない。ただし、

リン酸態リンに関しては、1992年以降に増加傾向が見られるが、それが、長期的傾向なのかについてはこれだけのデータだけでは判断できない。

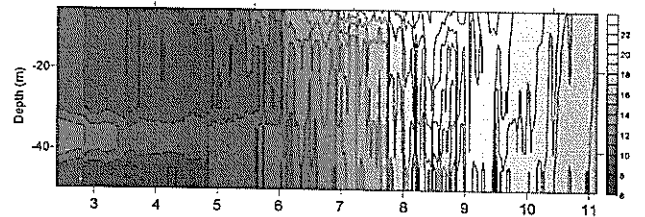
これらのことから、現状の釜石湾の底層DO濃度はある平衡状態に既に達しており、海水交換量と負荷量の1年間のバランスによって成立していると仮定しても良いと考えられる。よって、釜石湾における湾口防波堤の底層DO濃度への影響評価に対しては、湾口防波堤設置による海水交換率の変化に注目し、汚濁負荷等の他の環境条件が変化しないとして1年間分の計算を実施することとする。

### 3. 釜石湾の底層DO濃度の現状

湾口防波堤の湾内水への影響評価を検討する前に、対象とする釜石湾の水質の現状を示す。図-3中のSt. 29, St. 45において2000年2月から係留型の水質計による連続観測を実施した。観測項目を表-1に示す。図中のSt番号は釜石港湾工事事務所による釜石港環境調査のSt番号と同じで



(a) 湾内



(b) 湾外

図-6 水温鉛直分布の時系列変化, 横軸は月を示す。(単位: °C)

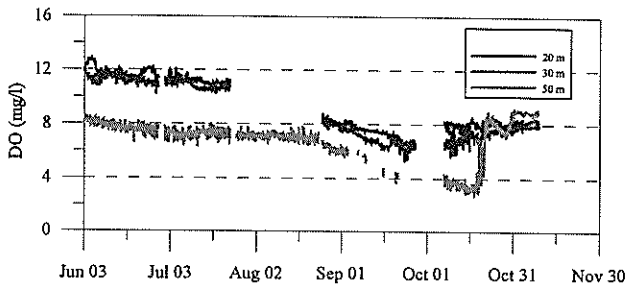


図-7 釜石湾におけるDO濃度の時系列変化(2000年6月~2000年11月)

ある。図-4にSt. 29およびSt. 45の係留計の設置状況を示す。係留型の水質計として塩分・水温計(アレック電子社製, MDS-CT), および溶存酸素計(離合社製, RMDO)を使用している。

図-5(a)~(e)はSt. 29における2000年8月, 9月および10月のDO濃度, 塩分, 水温, クロロフィルaおよび濁度の鉛直分布を示したものである。塩分躍層は水深5m付近の表層に形成されている。水温に関しては8月に水深5mおよび水深45m付近に形成されているが, 9月および10月には明確な水温躍層は形成されていない。底層のDO濃度は表層と比較すると低い値になっているものの, ベントス生存に影響が出ると言われている3mg/lを下回るに至っていない。クロロフィルaに関しては表層で3 $\mu$ g/lになるが, 大船渡湾の夏期における表層の値(5~10 $\mu$ g/l)よりは低い。

図-6(a)および(b)は2000年2月から10月までの湾の内(St. 29, 45)における水温の鉛直分布の時系列変化を示したものである。湾外における水温の時間変動は, 湾内における変動と比較すると緩やかになっている。この傾向は大船渡湾においても見られ, 湾外の水溫時間変動の激しさは黒潮・親潮・津軽暖流が混合する三陸沿岸の特徴と思われる。湾内の水温躍層は7月に強くなっている。図-7は湾内のDO濃度の時系列変化を示したものである。水深30mのデータが一部抜けている期間があるが, この期間は計器の不具合によるデータの欠測である。水深20mと30mのDO濃度は殆ど同じような値の変動を示す。それに対して, 水深50mのDO濃度はそれらと比較すると低く, 10月には最低値3.5mg/lになる。その後, 水深50mのDO濃度

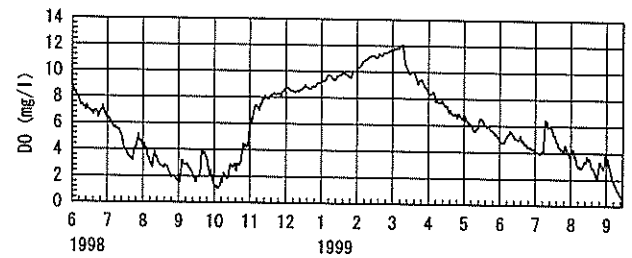


図-8 大船渡湾における底層DO濃度の時系列変化(1998年6月~1999年9月)

は急激に増加し, 水深20m, 30mの値と同じになる。このDO濃度の急激な上昇は水温の鉛直分布から推察されるように, 水温勾配の消滅によるためと考えられる。

図-8は大船渡湾の底層DO濃度の時系列変化を示したものである。釜石湾と大船渡湾の底層DO濃度の時系列変化を比較すると釜石湾においては, 大船渡湾のように3mg/lを下回ることもなく, またDO濃度の値が低い期間も短いことが分かる。

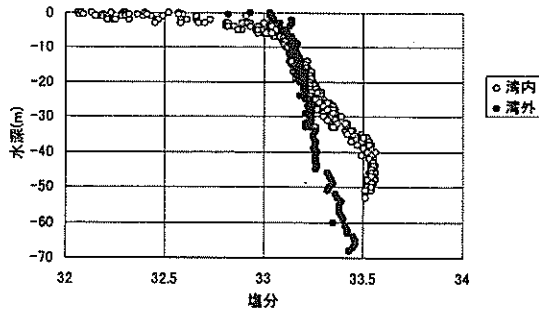
ところで, 釜石湾の底層DO濃度の値は10月中旬には上昇し8mg/l以上になることが示されている。このことは, 釜石湾の底層DO濃度はある平衡状態に既に達しており海水交換量と負荷量の1年間のバランスによって成立しているとの仮定を支持している。

#### 4. 底層DO濃度計算の手法および条件

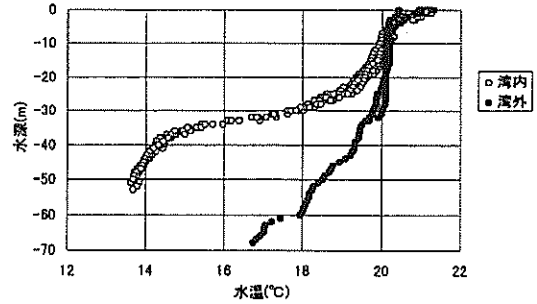
##### 4.1 計算手法の大枠

図-9は釜石港湾工事事務所によって1997年8月に釜石湾の湾内広域12地点(図-2参照)で実施された塩分および水温の実測結果を湾外と湾内に区別して示したものである。湾内のデータは湾内広域12地点のデータを含んでいるにもかかわらず非常にまとまりが良く湾内の空間的一様性を示している。他の月の観測データに対しても一様性の傾向を同様にみることができ, 釜石湾の水質は空間的に一様であると考えられる。また, 図-5に示したように釜石湾の湾外水の塩分および水温も大船渡湾の湾外と同様に時間的な変動が大きい。したがって, 計算は既報(岡田ら,





(a) 湾内



(b) 湾外

図-9 釜石湾における水温および塩分の鉛直分布, 1997年8月(運輸省第二港湾建設局)

2000)の大船渡湾と同様に,海水交換率の計算には非静水圧3次元モデル,湾内の水温,塩分およびDO濃度には鉛直1次元モデルを用い,水温および塩分の境界条件には実測値を用いる計算手法を使用する.本手法の利点は,密度流を考慮した海水交換量を正確に考慮でき,かつ,湾内の水温,塩分およびDO濃度の長期間の変動を容易に計算できることである.また,本報の計算には,前報の検討によって貧酸素水塊の生成・消滅に対する重要性が明らかにされた密度貫入のモデルも導入している.これによって,底層の海水交換の計算精度を高めている.

一方,本手法の欠点は,湾内水を水平空間的に一様として取り扱うところであり,防波堤背後や湾奥等の局所的な水質は表現できない.本計算手法はあくまでも水平空間的に平均化された湾内水質を評価する手法である.

非静水圧3次元モデルおよび鉛直1次元モデルの基礎式および乱流モデル等は前報と同じものを使用したため,ここでは詳細を省略する.なお今回の計算では,前報の非静水圧3次元モデルの簡略型として,計算グリッドが格子型のモデルを採用している.計算グリッドを格子型にすることによって,地形の細かな再現性の利点は失われるが,計算時間短縮の利点を得ている.

#### 4.2 海水交換率の算出

初期状態として,ある物質が湾内に濃度一様で分布しているとす.そのような湾において,潮汐によってある時刻 $t$ までに湾内から湾外に流出するある物質質量 $Q$ は次式で表現できる.

$$Q = \int (c_{ijk}|_{t=0} - c_{ijk}|_{t=t}) dV \quad (1)$$

ここで, $i, j, k$ は $x, y, z$ 方向のメッシュ位置, $c_{ijk}$ は各メッシュにおけるある物質の濃度, $V$ は湾内の体積である.また,開口部における開口部断面と垂直方向の流速を $u_{ijk}$ ,開口部におけるある物質の濃度を $\theta_{ijk}$ とすると,開口部にお

けるある物質濃度の各層のフラックス $f_n$ および全層のフラックス $f$ は次のように与えられる.

$$f_n = \int \int u_{ijk} \theta_{ijk} dS_n dt \quad (2)$$

$$f = \int \int u_{ijk} \theta_{ijk} dS dt \quad (3)$$

ここで, $S$ は開口部の面積である.本来ならば $Q=f$ であるべきであるが,本計算では $Q \neq f$ であった.それは,湾口部の値を湾内の値から計算過程において外挿する際に, $f$ は線形近似された濃度を用いており, $Q$ は3次スプライン近似された濃度を用いているためである.よって,本計算では,近似精度が高い $Q$ を全交換量として用いた.しかし, $Q$ は鉛直循環による各層の交換まで考慮した値であるため,厳密には開口部での水平方向の交換量を示していない.そこで,湾内から湾外へのある物質の流出量の全体量に対しては $Q$ を用いるが,各層の配分に対しては湾口部における鉛直分布に基づいている $f_n$ の鉛直分布を用いることにした.すると,各層における湾内から湾外への流出量 $q_n$ は次式で現される.

$$q_n = Q \cdot \frac{f_n}{f} \quad (4)$$

鉛直1次元モデルでは,第 $n$ 層のある濃度 $C_n$ は第 $n$ 層の海水交換率 $\lambda_n$ を用いて,次式で現される.

$$\frac{dC_{n_{in}}}{dt} = \lambda_n (C_{n_{out}} - C_{n_{in}}) \quad (5)$$

ここで, $n$ は層位置,添え字 $out$ および $in$ は湾外および湾内の指標であることを意味する.上式から第 $n$ 層の海水交換率 $\lambda_n$ は

$$\lambda_n = -\ln \frac{(C_{n_{out}} - C_{n_{in}})|_{t=0}}{(C_{n_{out}} - C_{n_{in}})|_{t=t}} \quad (6)$$

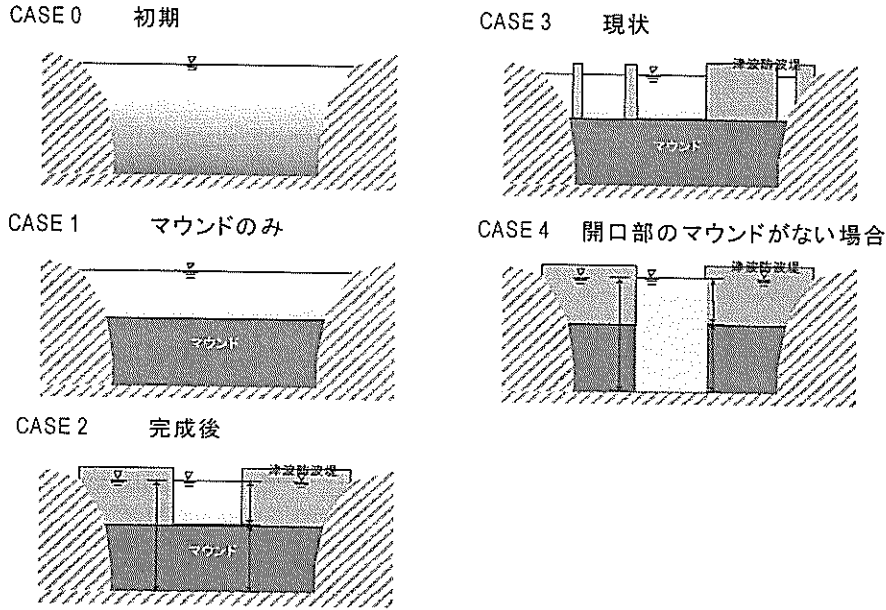


図-10 計算ケース

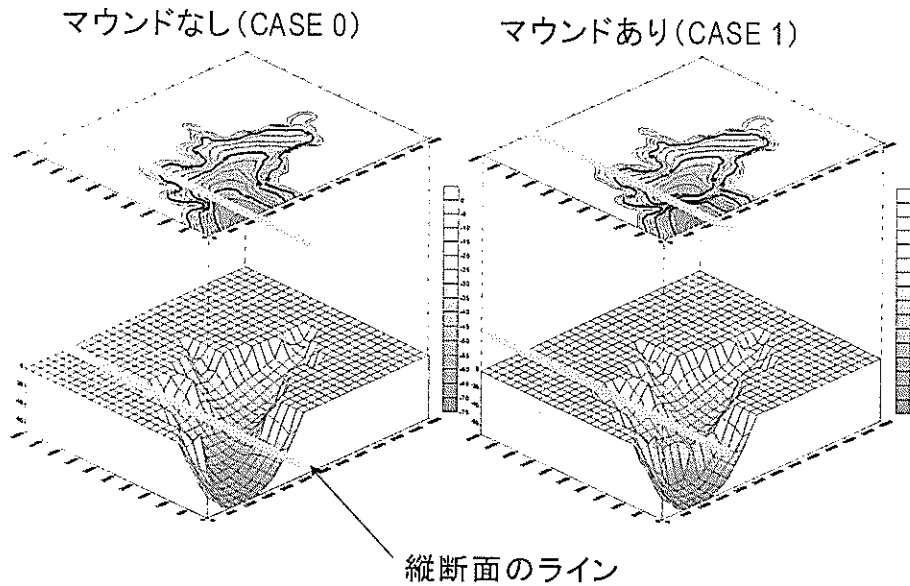


図-11 計算グリッド

のように現すことができる。ここで、湾外の濃度は常に一定で0とすると、

$$\lambda_n = -\ln \frac{C_{nm}|_{t=0}}{C_{nm}|_{t=T}} \quad (7)$$

に簡単化できる。第  $n$  層の海水交換率  $\lambda_n$  の算出は  $t=3$  周期で行ない、その逆数  $1/\lambda_n$  を第  $n$  層の本研究では海水交換時間とした。

#### 4.3 非静水圧3次元計算の境界条件

湾口部の境界条件として、釜石湾における調和常数表に

よると  $M_2=30.4\text{cm}$ ,  $S_2=13.7\text{cm}$  であるので、本計算では平均的な潮汐として周期12時間、振幅50cmの潮汐を与えることとした。なお、海流成分が短期的には潮汐成分と比較して無視できない場合も考えられるが、定常的には潮汐成分が卓越するものと仮定し、本計算では潮汐成分のみを考慮した。

また、釜石湾に流入する甲子川の流量は年平均20~30  $\text{t/s}$  と湾の体積に比べて小さいため、流れに与える影響は支配的ではないと判断し本計算では無視することとした。

#### 4.4 計算ケース

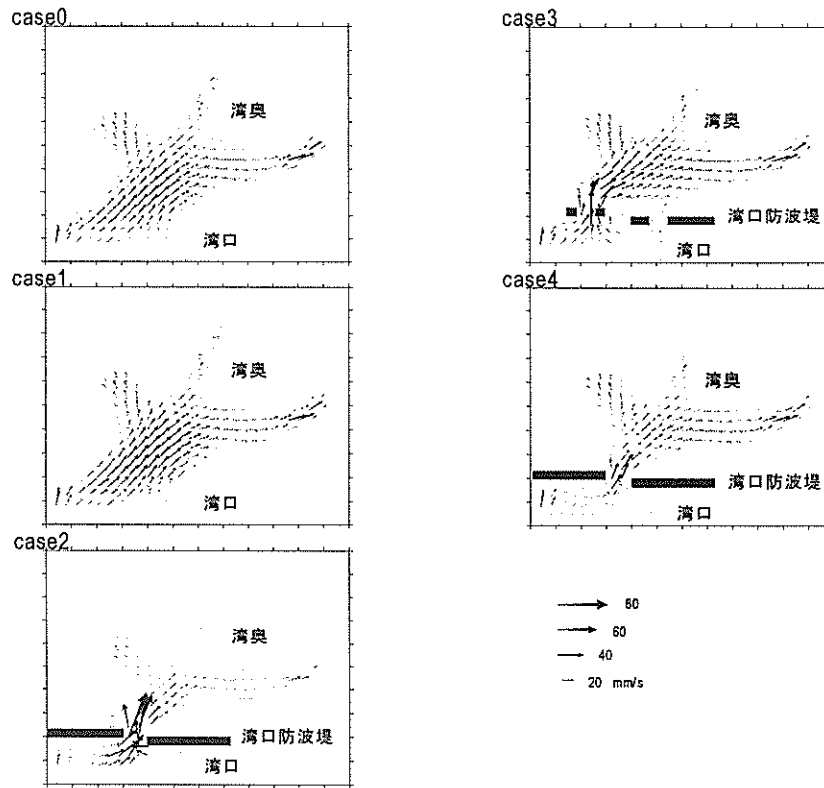


図-12 表層の平面流速分布

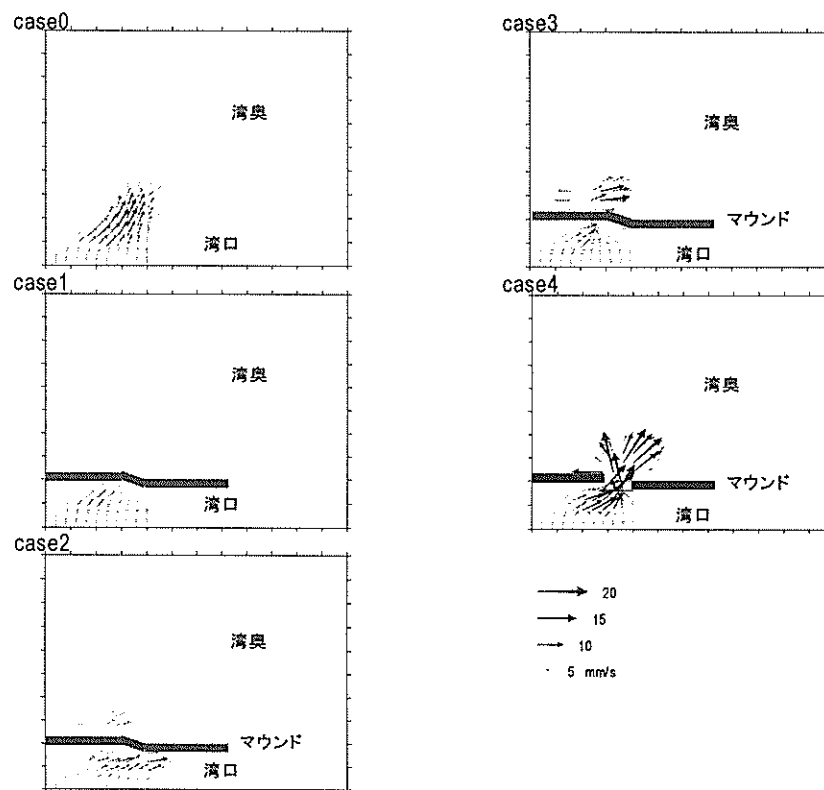


図-13 底層（水深50m）の平面流速分布

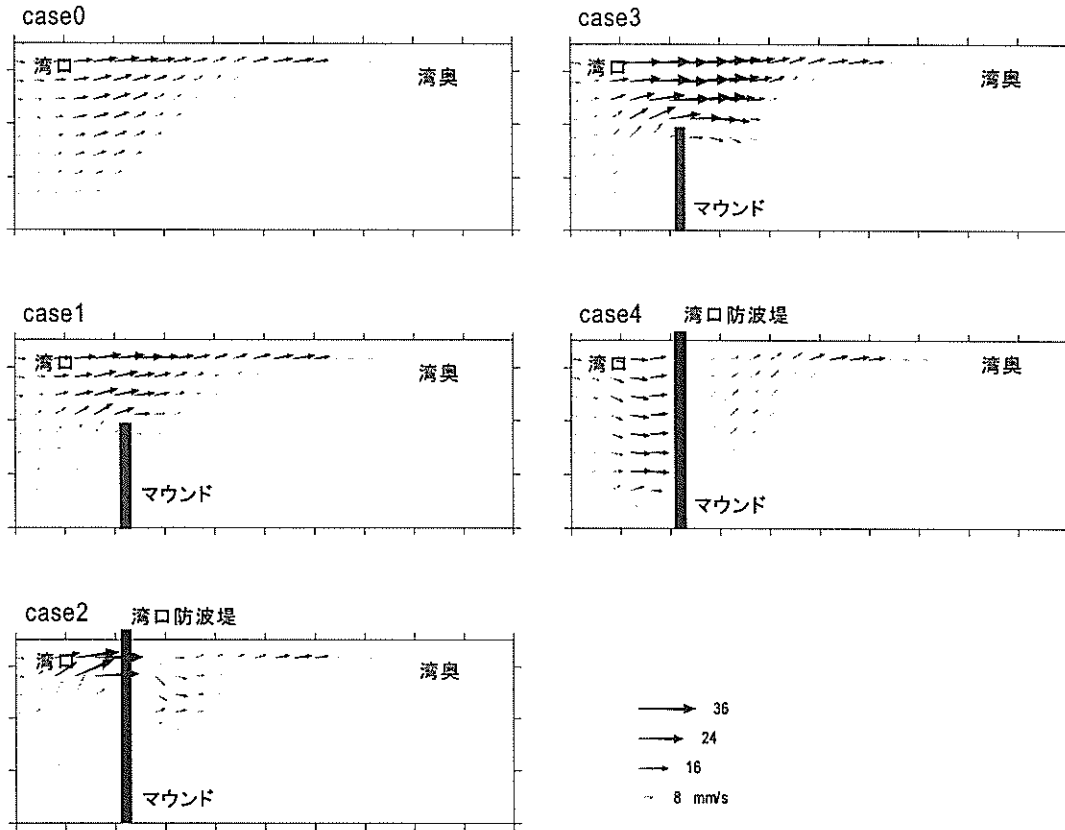


図-14 縦断面における流速分布

計算は5ケース行われた。各ケースの概念図を図-10に示す。①現状（ケース3）および②完成後（ケース2）の地形条件に加え、比較対照として③湾口防波堤がない場合（ケース0）、④マウンドのみの場合（ケース1）および⑤開口部のマウンドがない場合（ケース4）である。

#### 4.5 非静水圧3次元計算の計算グリッド

図-11に3次元計算に用いた計算グリッドのうち、ケース0とケース1に用いたものを示す。(a)がケース0に用いたものであり、(b)がケース1に用いたものである。左奥が湾奥部、右手前が湾口部に相当する。湾口部の図中のラインは後述の縦断面のラインである。

### 5. 計算結果

#### 5.1 流速分布

図-12(a)～(e)および13(a)～(e)に表層および底層の平面流速分布を示す。マウンドを設置したケース1の表層部の流速は、マウンドが無いケース0と比較して、湾口部の断面積がマウンド分小さくなったため大きくなっている。また、防波堤の建設が進むに連れ、湾口部の流速は大きくなっている。ケース3よりも、ケース2の方が大きい。一

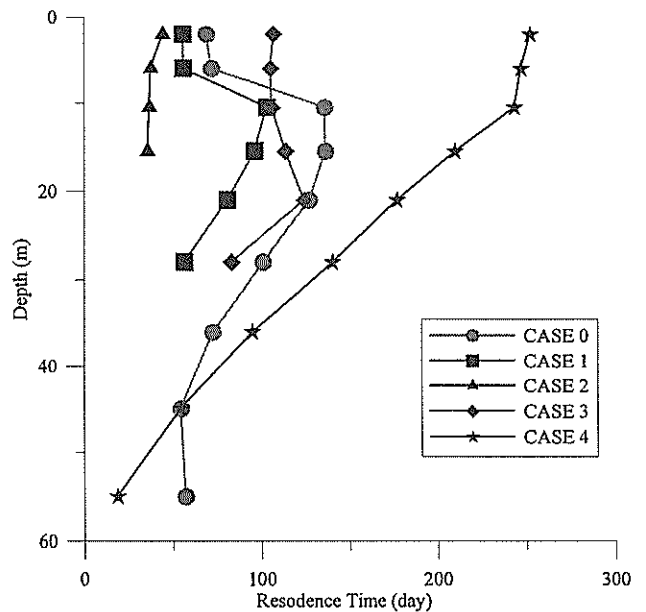


図-15 各層の海水交換時間

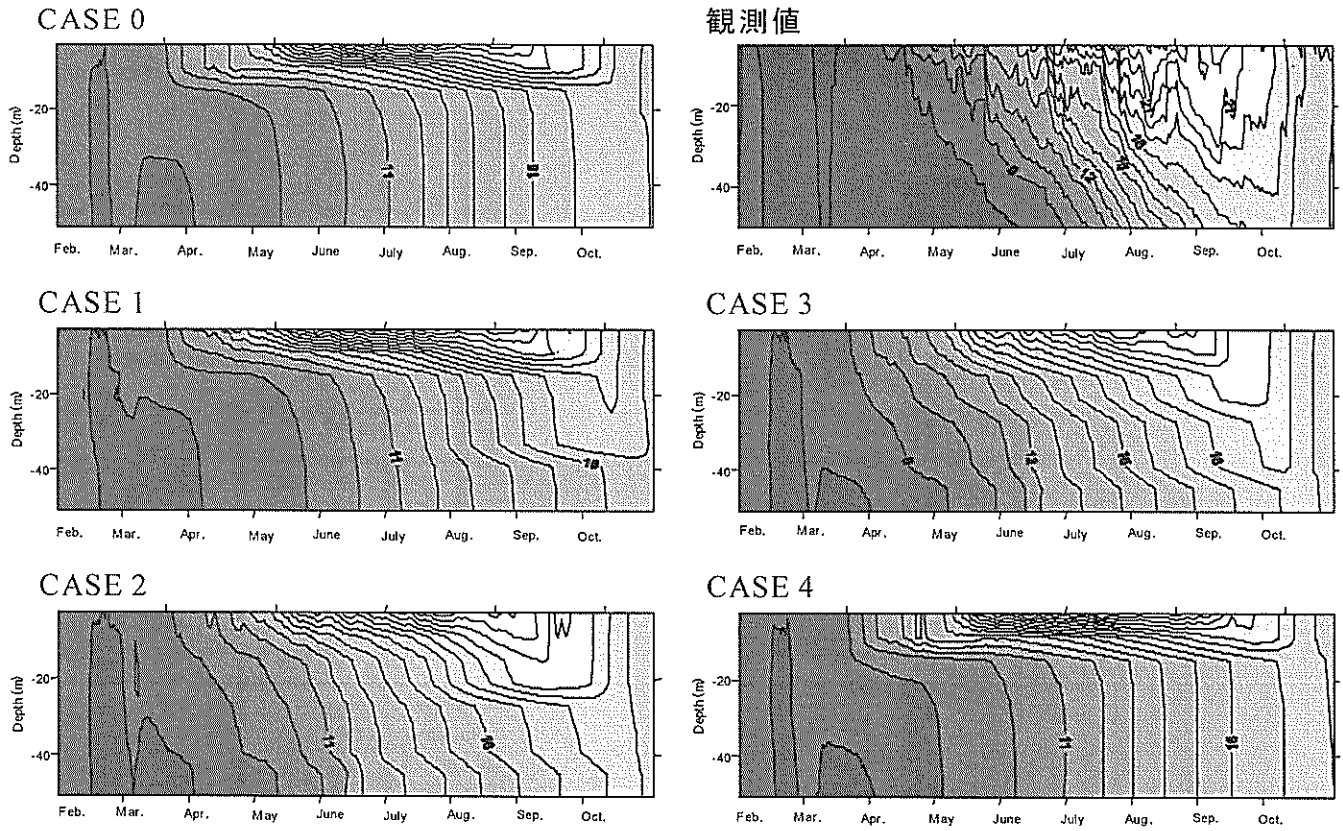


図-16 各ケースおよび観測値の水温度鉛直分布の時系列変化 (単位: °C)

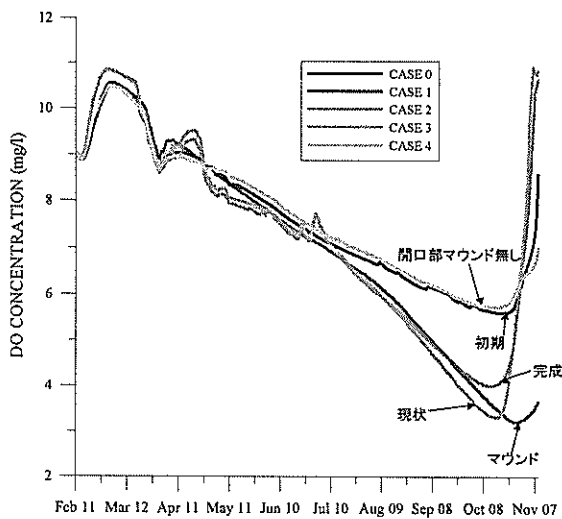


図-17 底層 DO 濃度の時系列変化

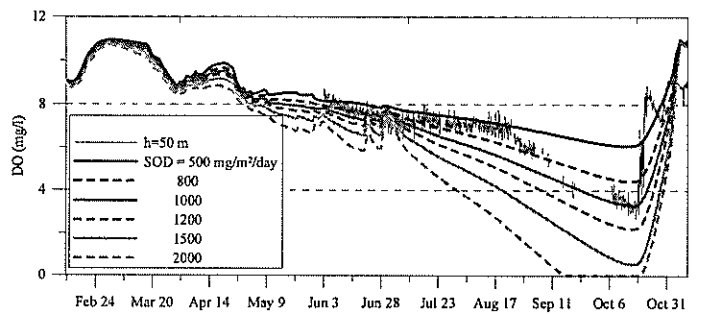


図-18 種々の酸素消費速度を用いた場合の底層 DO 濃度の時系列変化

方、ケース4では、湾口部のマウンドが無い場合、ケース2より小さな値になっている。

底層の流速は、マウンドが設置されたケース1からケース3において殆ど無い。ただし、湾口部が防波堤によって狭まると前述したように表層流速は高まり、それに伴う鉛直混合の影響により、5mm/s程度の流速が生じている。ケース4は開口部のマウンドが無い場合、20mm/sと比較的大きな流速が生じている。

図-14は図-11で示した縦断面における流速の鉛直分布である。図中の線はマウンドおよび防波堤を意味する。マウンドがある場合(ケース1, 2, 3)にはマウンドより上層の流速が、マウンドが無い場合(ケース0, 4)と比較して大きくなっていることが分かる。ケース4の下層の流速は小さいが、これは縦断面の位置が開口部とずれているためである。

## 5.2 各層の海水交換時間

図-15に計算によって得られた各ケース各層の海水交換時間を示す。一般的に、湾内水質の富栄養化を抑制するためには、海水交換は活発の方が好ましい。海水交換時間時間を指標とすると、水質に対しては海水交換時間が短い方が好ましく、長い方が好ましくない。

ここで、マウンドによって開口部が完全に閉ざされている場合には、マウンドに相当する層の海水交換率 $\lambda_n=0$ であり海水交換時間は無限大である。しかしながら、湾口部において底層の海水交換率 $\lambda_n=0$ であることは、湾内底層部の物理的交換が全く無いことを意味せず、湾内底層は鉛直混合によって湾内中層および上層と交換が行われている。鉛直1次元計算においても、この鉛直混合の効果は取り入れている。

湾口部に何も無いケース0と比べ、マウンドが設置されたケース1ではマウンドより上層における各層の海水交換時間は小さくなっている。このことは、流速が大きくなったことから理解できる。現状の形状を示すケース3では、防波堤が設置されたことによって、ケース2よりも各層の海水交換時間は長くなっている。一方、ケース2のような完成形まで防波堤を設置すると、海水交換時間は短くなる。このことは、ケース2まで開口部を狭めると開口部での流速が非常に大きくなり混合力は増すが、ケース3のような状態では流速は相対的に小さく、かつ、開口部面積も小さいため交換能力が減少したと考えられる。このような効果は村上(1998)によって実験的に示されており、また、グチ構造として古川ら(1994)によっても示されている。さらに、グチの開口部における詳細な流速分布および水面変動に関してはPark *et al.* (2000)によって数値的検

討がなされている。開口部のマウンドが無いケース4では、表層の交換時間は非常に長くなるが、底層の交換時間は何も無かったケース0よりも短くなっている。これは、マウンドが無い分だけ開口部の面積が広がり表層流速は低下し表層における交換時間は長くなるものの、底層部では直接的な湾外との交換が可能となり交換時間は短くなるためであると考えられる。

## 5.3 水温

図-16に水温の鉛直分布の時系列変化を示す。比較し易いように実測データを再掲する。現状形を示すケース3と実測データは比較的良好に一致している。完成すると(ケース2)マウンド上面付近の水深での躍層が強くなる傾向が出ている。開口部のマウンドが無い場合(ケース4)は開口部に何も無い場合と同じく、中層以下は鉛直方向に一様化の傾向を示している。

## 5.4 DO濃度

図-17は底層部のDO濃度の時系列変化を示したものである。ただし、ここでの計算には、底泥の酸素消費速度として、現状の値として推定したSOD20=1000mg/m<sup>2</sup>/dayを用いている。ここで、SOD20は水温20℃における酸素消費速度を意味する。また、本計算手法では、底層浮遊物の酸素消費分も底泥の酸素消費に含めて考えている。推定には酸素消費速度を幾つか変えて底層DO濃度の時系列変化の実測値と計算値が最も合う値を採用した(図-18参照)。湾口部が完全に開いていて海水交換が活発であった場合には有機物の堆積量は少なく酸素消費速度も小さかったことが推測されるが、正しい値の推定が困難なため小さな値を用いず現状の値を用いている。

湾口部に何も無い場合(ケース0)では、DO濃度の最低値は6mg/l程度である。一方マウンドが設置されることにより、DO濃度の最低値は3mg/l近くまで低下するようになる。防波堤が設置され始めるとDO濃度は全体的に増加し始め、現状(ケース3)ではDO濃度の最低値は3mg/l程度であるが、マウンドのみ(ケース1)よりは多少大きい。完成すると、DO濃度の最低値は4mg/l程度になる。しかしながら、ケース1, 2および3の差は有意の差とは言えず、3ケース共に同様な変動を示すと考えた方が妥当である。一方、開口部のマウンド部分を開けると、初期と同じくらいの値までしかDO濃度は低下しない。

## 5.5 酸素消費速度と底層DO濃度の関係

湾口が湾口防波堤によって閉じられたことによって海水交換率が低下し、有機物の堆積量が増加して底泥の酸素消



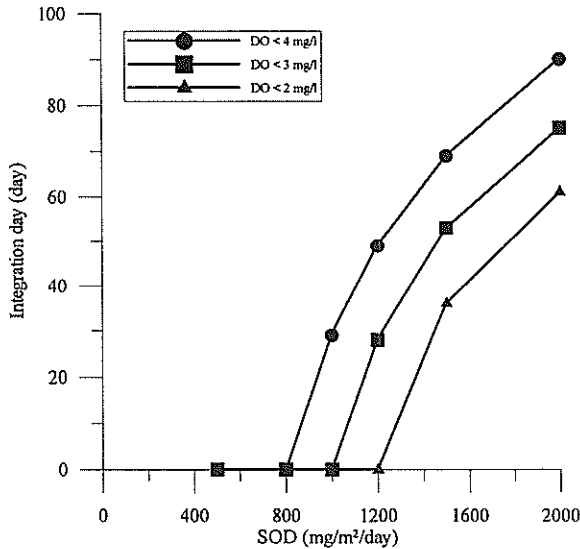


図-19 酸素消費速度と DO 濃度がある値以下になる積算日の関係

費速度が大きくなることが考えられる。Offider *et al.* (1984) によれば、酸素消費速度と一次生産の関係は次式のように示されている。

$$\left(-\frac{dc}{dt}\right)_t = k(t) \int_x^t \alpha p(t_0) \cdot \exp\left[-\int_{t_0}^t k(\tau) d\tau\right] dt_0 \quad (8)$$

ここで、 $k$  は次式の関係で示される減衰定数

$$\frac{dc}{dt} = -kc \quad (9)$$

$c$ : 底泥酸素要求量,  $p$ : 一次生産量である。この関係から湾内の一次生産が増加するほど、また、同じ一次生産量でも、底層への沈降量が多いほど底層の酸素消費速度は大きくなるが推測される。現状として、釜石湾の酸素消費速度を計算によって推定すると1000mg/m²/dayであったが(図-18参照)、大船渡湾で同様の推定を実施すると大船渡湾の酸素消費速度は1800mg/m²/dayであった。

図-19は釜石湾における底層 DO 濃度が1年間のうちある値以下になる日数を酸素消費速度をパラメータとして示したものである。例えば、一般に貧酸素化と言われる3mg/lを下回る日数は、SOD20=1000mg/m²/day以下では一日も無いが、1200mg/m²/dayで30日、仮に釜石湾の底層の酸素消費速度が大船渡湾レベル1800mg/m²/dayでは約70日間となる。このように、底層の DO 濃度によって酸素消費速度の大きさは非常に重要な因子であり、酸素消費速度が変化すれば、前述した底層 DO 濃度の長期的な平衡状態も変化

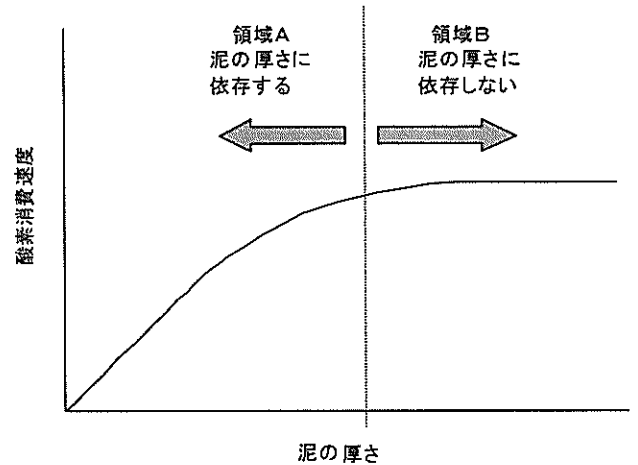


図-20 泥の厚さと酸素消費速度の関係の概念図。泥の直上水の水質に影響を与える泥の厚さはせいぜい数10cm程度である。したがって、泥の堆積当初は泥の厚と酸素消費速度の大きさには関連があるが、ある程度堆積すると、酸素消費速度の大きさに泥の厚さは関係無くなる。

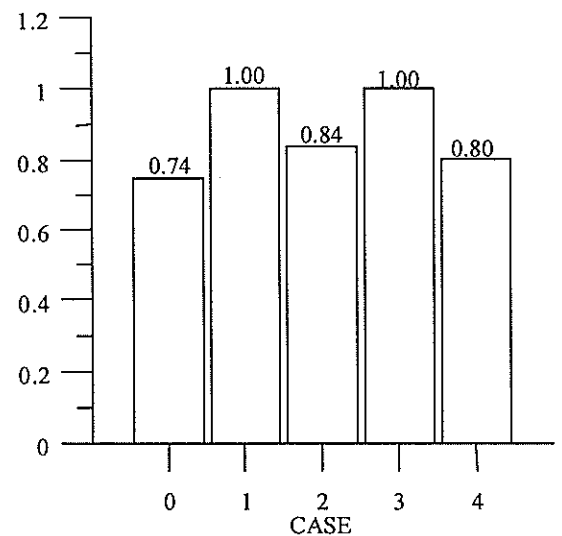


図-21 ケース1に対する各ケースの堆積量の比率

する。よって、酸素消費速度の変化について次節で検討する。

## 5.6 酸素消費速度の推定

本来ならば、酸素消費速度の定量的な推定をすべきであるが、定量的な推定方法がまだ確立していないので、ここでは定性的な議論に限定する。

式(8)および(9)で示すように、酸素消費速度と一次生産量の沈降量には正の相関があることは示されている。したがって、一次生産量が同量であっても沈降量が増加す

れば、酸素消費速度は増加し、沈降量減少すれば酸素消費速度は減少する。このことは図-20に示す領域Bに水域の泥の堆積状況が達している場合にはあてはまる。それでは、釜石湾の泥の状態がどちらの領域に属しているかは難しいところではあるが、前述したように釜石湾の底層DO濃度の長期的な平衡状態に既になっていると考えられること、また、湾奥(St.7,水深27m,図-3参照)において実施した底泥調査によると底泥の厚さは60cm以上であることから、釜石湾の泥の状態も領域Bに属しているものと推測される。

よって、有機物の一年間の沈降量の計算を各ケースに対して実施することにより、底層の酸素消費速度の変化の評価を行うこととする。

計算は、表層部に沈降性粒子を計算期間中一定量与え続け、その間の着底量を算出する手法を用いた。各ケース共に沈降速度として、植物プランクトンの沈降速度としてよく用いられる0.5m/dayを与えた。ここでは定性的な検討にとどめるため、沈降量の絶対量ではなく、相対的な関係と比較することとする。

図-21は現状(ケース3)を基準として各ケースの沈降量の比を示したものである。これから、防波堤が完成(ケース2)すると現状よりも沈降量は相対的に減少することが分かる。これは表層流速が強められ表層の海水交換が活発になるためと考えられる。

これから、湾口防波堤が完成しても酸素消費速度が大きくなることはなく、底層DO濃度は現状と類似の平衡状態を維持するものと考えられる。

また、マウンドのみの場合には、沈降量は現状と同じであった。これは表層流速が小さく海水交換が小さいためと考えられる。一方、湾口部のマウンドを開けた場合の沈降量は初期の状態の沈降量とほぼ同じであり、表層から底層にわたって海水交換率を保つことは沈降量を減少させるためには重要であることが分かる。

## 6. おわりに

釜石湾を対象として、湾口防波堤が完成した影響によって、底層DO濃度がどのような変化傾向を示すのかについて検討した。得られた主要な結果を以下に示す。

- (a) 大船渡湾において、最近15年間では底層DO濃度の長期的な低下傾向は見られない。また、底層DO濃度は冬期に一旦増加する。この冬期の上昇が前年の影響を次年に持ち越し底層DO濃度が経年的に低下することを抑えている要因と考えられる。湾内水質が1

年周期の平衡状態になった場合には、湾内の底層DO濃度は海水交換量と負荷量の1年間のバランスによって成立していると考えられる。

- (b) 釜石湾の長期の観測結果から、底層DO濃度の長期的な低下傾向はなく、冬期(2月)における回復が示されている。また、係留計による連続観測から、底層DO濃度の値は10月中旬には上昇し8mg/l以上になることが示されている。これらのことから、現状の釜石湾の底層DO濃度もある平衡状態に既に達しており、海水交換量と負荷量の1年間のバランスによって成立していると考えられる。
- (c) 汚濁負荷等の他の環境条件が変化せず、また、湾口では定常的には海流よりも潮流が卓越するものと仮定して防波堤形状のみ変化させた数値計算を行った。その結果から釜石湾においては、湾口防波堤が完成した影響によって、完成後の底層DO濃度が、現状のDO濃度のレベルから急変することはないと考えられる。

(2001年2月14日受付)

## 参考文献

- 岩手県水産技術センター(1980-1996):貝毒成分等モニタリング事業報告書。
- 運輸省第二港湾建設局,釜石港湾工事事務所,日本エヌ・ユー・エス株式会社(1981-1995):釜石港環境調査報告書。
- 岡田知也,中山恵介,日比野忠史,細川恭史(2000):大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価,港湾技術研究所報告,第39巻第2号,pp.73-98。
- 古川恵太,平野隆幸,細川恭史(1994):グチ式導流堤による流れの解析~模型実験と数値計算による検討~,港湾技術研究所報告,第33巻第1号,pp.37-66。
- 村上和男(1998):閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究,港湾技術研究所資料, No.900, pp.142。
- Officer, C. B., Biggs, R. B., Taft, J. L., Cronin, L. E., Tyler, M. A. and Boynton, W. R. (1984): Chesapeake Bay Anoxia: Origin, Development, and Significance, SCIENCE, Vol. 223, pp.22-27。
- Park, J. C., Okada, T., Furukawa, K., Nakayama, K., and Hosokawa, Y. (2000): Numerical Study on the Flow Characteristics of Tide-Induced Jet. Report of PHRI, Vol. 39, No. 2, pp.3-25。

港湾技研資料 No.1004

2001 . 6

編集兼発行人 国土交通省港湾技術研究所

発行所 国土交通省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 昭和情報プロセス(株)

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

Copyright ©(2001) 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.

この資料は、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。