

三次元モデルによる「堆積物の酸素消費速度に基づく養殖環境基準」の検証と養殖許容量推定の試み

阿保勝之[†], 横山 寿

Examination of the Environmental Criterion for Mariculture Based on Benthic Oxygen Uptake Rate and an Attempt to Evaluate Assimilative Capacity, by Using a Three-Dimensional Numerical Model

Katsuyuki ABO[†] and Hisashi YOKOYAMA

The Law to Ensure Sustainable Aquaculture Production that was established in the year 1999 determined an environmental criterion based on the relationship between benthic oxygen uptake rate (BOU) and organic matter loading rate. In this criterion, the maximum value of BOU against the organic matter loading is regarded as an indicator of the phase of the maximum biological mineralization process, and the acid volatile sulfide content of the sediment (AVS-S) corresponding to the BOU maximum is defined as the standard value. To examine the method for determining the standard value, we have developed a three-dimensional numerical model, which takes advection, dispersion, deposition and decomposition of organic matter from mariculture system into account. Numerical simulations by the model revealed that it was quite difficult to estimate the BOU maximum through *in situ* investigations, because it was greatly influenced by the water exchange and oxygen supply. We suggest that the numerical model should be used instead of *in situ* investigation to determine the standard value. We also applied this model to evaluate the assimilative capacity of existing fish farms in a basin.

Key words: assimilative capacity, benthic oxygen uptake, environmental criteria, fish farm, numerical model, the Law to Ensure Sustainable Aquaculture Production

はじめに

1999年5月に公布、施行された「持続的養殖生産確保法」では、持続的な養殖生産の確保をはかるために漁業協同組合等が漁場改善計画を作成するよう求めている。その運用に際しては漁場の改善目標の一つとして、「いけす等の養殖施設の直下の水底における硫化物量が、その漁場の水底における酸素消費量が最大となる時の硫化物量の値を下回っていること。」と農林水産省告示により定められている。この環境基準は、Omori *et al.* (1994) および武岡・大森 (1996) の考え方に基づいており、この考え方は一般に「大森・武岡理論」と言われている。彼らは、養殖漁場の持続性を目指した新しい環境基準とするために、養殖によって負荷された有機物が分解され生態系に組み込まれていく物

質循環に着目し、堆積物の酸素消費速度を指標とした魚類養殖の許容量決定法を提案した。彼らはずぎのように考えた。養殖による有機物負荷が加わると、堆積物の酸素消費速度は増加する。しかし、有機物負荷の増大に伴い海底の溶存酸素濃度が低下するため、堆積物の酸素消費速度はある最大値をとった後低下する。酸素消費速度が最大となるまでは養殖由来有機物は好氣的に盛んに分解され、生態系に円滑に組み込まれているので、この酸素消費速度の最大値に対応する負荷量を養殖負荷の限度とする。また、武岡・大森 (1996) は、現場調査から酸素消費速度の最大値を求めるための具体的手法を考案した。彼らは酸素供給能力により漁場を類型化し、それぞれの類型について酸素消費速度が最大となる硫化物量を求め、この値を適正養殖のための限界値とすることを提案している。

「大森・武岡理論」に基づき、現場調査により酸素消費速度の最大値を検出したとされる例として、愛媛県の宇和島湾 (Omori *et al.*, 1994) と下波湾 (愛媛県, 1995) の2例があげられる。前者の例では、通常の内湾・沿岸域におけ

2002年10月11日受付, 2003年2月14日受理

水産総合研究センター養殖研究所

National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency,
422-1 Nakatsuhamura, Nansei-cho, Mie 516-0193, Japan

[†] abo@fra.affrc.go.jp

る値の範囲 $0.3\sim 14.4 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ (Seiki *et al.*, 1989) あるいは香港の魚類養殖場で測定された $8\sim 50 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ (Wu *et al.*, 1994) を大きく上回る全酸素消費速度の最大値 $90\sim 220 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ が得られた。ただし、各地点で測定された硫化物濃度および酸素消費速度の値は大きくばらついており、両者の関係から酸素消費速度の最大値を明示したとは言い難い。後者の例では、湾軸に沿って配置された生簀直近の地点間に認められた酸素消費速度の相違が有機物負荷量の相違ではなく海水交換や酸素供給速度の相違に基づく可能性があり、そうであると環境基準値としての根拠とすることができなくなる。また、横山・坂見 (2002) は、全酸素消費の中で有機物の好氣的分解を反映する生物的酸素消費を測定すべきことを指摘し、三重県の五ヶ所湾において、海水流動や水深などの物理的条件が相似しかつ魚類養殖による有機物負荷の異なる数地点を選んで調査を行った。彼らが得た全酸素消費速度の値は通常の内湾・沿岸域における範囲内である $1.8\sim 3.4 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ であり、生物的酸素消費速度は全酸素消費速度の $27\sim 43\%$ であった。ただし、全酸素消費速度、生物的酸素消費速度ともに最大値を検出することはできなかった。以上の3例はいずれも同一湾内（あるいは一つの漁場内）の複数点での調査に基づいた研究であり、武岡・大森 (1996) が提案した漁場の類型化により酸素消費速度の最大値を求めた例はまだない。このように、現場において基準値が確実に求められた例をあげることはできず、この環境基準を運用するためには、「大森・武岡理論」の現場への適用性をさらに検証する必要があると考えられる。

本研究では、まず Omori *et al.* (1994) に従った鉛直1次元モデルを用いた計算により、酸素消費速度と有機物負荷量および酸素消費速度と海水交換速度との関係を整理し、漁場の類型化による環境基準値の決定方法についての問題点を指摘した。つぎに、3次元モデルを用いて、これまでに行われた同一湾内の複数点での現場調査による環境基準値の決定方法を検証した。さらに、五ヶ所湾の魚類養殖場における有機物負荷許容量（養殖許容量）を試算し、実養殖場への3次元モデルの適用の可能性を検討した。

方法

鉛直1次元モデル

Omori *et al.* (1994) は、鉛直1次元モデルにより有機物負荷と堆積物の酸素消費速度の関係を計算した。モデルでは、海水の上層（第1層）、海底を挟む海水下層（第2層）と堆積物上層（第3層）、および堆積物下層（第4層）の計4層を設定し、負荷有機物、溶存酸素、還元物質の鉛直1次元での平衡濃度を数値計算により求めている (Fig. 1)。モデルは次の方程式で表される。

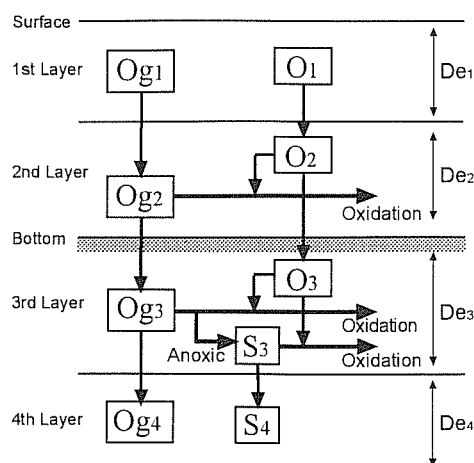


Figure 1. Flow chart of the vertical one-dimensional numerical model. Og_1 to Og_4 represent organic matter in the 1st to 4th layer, respectively. O_1 to O_3 represent dissolved oxygen in the 1st to 3rd layer, respectively. S_3 and S_4 represent reduced substances in the 3rd and 4th layer, respectively (after Omori *et al.* 1994).

$$\begin{aligned}
 &De_1 \cdot dO_1/dt = De_1 \cdot dOg_1/dt = 0 \\
 &De_2 \cdot dO_2/dt = (A_{12}/\Delta Z_{a12}) \cdot (O_1 - O_2) - B_2 \cdot De_2 \cdot (O_2 - C) - (A_{23}/\Delta Z_{a23}) \cdot (O_2 - O_3) \\
 &De_2 \cdot dOg_2/dt = G - B_2 \cdot De_2 \cdot (O_2 - C) \cdot Og_2 - I \cdot Og_2 \\
 &De_3 \cdot dO_3/dt = (A_{23}/\Delta Z_{a23}) \cdot (O_2 - O_3) - B_3 \cdot (O_3 - C) \cdot Og_3 - D \cdot S_3 \cdot O_3 \\
 &De_3 \cdot dOg_3/dt = I \cdot Og_2 - B_3 \cdot (O_3 - C) \cdot Og_3 - E \cdot Og_3 / (LO_3 + F) - (K/\Delta Z_{k34}) \cdot (Og_3 - Og_4) - H \cdot Og_3 \\
 &De_3 \cdot dS_3/dt = E \cdot Og_3 / (L \cdot O_3 + F) - D \cdot S_3 \cdot O_3 - (J/\Delta Z_{j34}) \cdot (S_3 - S_4) - H \cdot S_3 \\
 &De_4 \cdot dOg_4/dt = De_4 \cdot dS_4/dt = De_4 \cdot dO_4/dt = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 De_i , O_i , Og_i , S_i はそれぞれ第 i 層における層厚、溶存酸素濃度、有機物濃度および還元物質濃度、 G は第1層から第2層への有機物負荷速度、 A_{ij} と $\Delta Z_{a ij}$ はそれぞれ第 i 層と第 j 層間の溶存酸素の移流分散係数および境界層の厚さ、 B_2, B_3, C はそれぞれ第2, 第3層における有機物の好氣的分解に関する係数および定数、 I は有機物の沈降速度、 D は還元物質の化学的分解に関する係数、 E, L, F は有機物の嫌氣的分解に関する係数および定数、 $K, \Delta Z_{k34}$ は第3, 第4層間における有機物の移流分散係数および境界層の厚さ、 $J, \Delta Z_{j34}$ は第3, 第4層間における還元物質の移流分散係数および境界層の厚さ、 H は第3層から第4層への有機物および還元物質の移行速度である。なお、これらのパラ

メータについては、Omori *et al.* (1994) の値を参考にして設定した (Table1)。また、堆積物の中で鉛直混合が激しく起こる厚さは2~5cmである (堀越・菊池, 1976) ことを考慮し、本研究では第3層 (海底堆積層) の厚さ (De_3) を5cmとした。

本セクションでは、鉛直1次元モデルを用いて計算を行い、武岡・大森 (1996) が提案した漁場の類型化により酸素消費速度の最大値を求める方法の妥当性を検討した。ただし、計算においては、各物質濃度に適当な初期値を与えてその時間変化を計算し (非定常計算)、各濃度がほとんど変化しなくなるまで計算を続けて擬似的な平衡濃度を求めて、この値を平衡濃度 (定常解) とした。

3次元モデル

堆積物の酸素消費速度は酸素供給速度の影響を強く受けるため、海水交換や水深など条件が変われば有機物負荷が同じでも酸素消費速度は異なる。つまり、同一湾内においても湾口部、湾中央部、湾奥部の養殖場ではそれぞれ海水交換や酸素供給の条件が異なるため有機物負荷に応じた酸素消費速度の挙動は異なることになる。酸素消費速度に基づく環境基準を実際の養殖場に当てはめるためには、湾の地形、海水交換、養殖場の配置などを考慮した上で有機物負荷と酸素消費速度との関係を明らかにする必要がある。そこで、3次元モデルを構築し、水平方向の移流拡散を考慮

Table 1. Parameters of the numerical model.

Parameter	Unit	Value
$A_{12}/\Delta Z_{a12}$	cm/day	10-200
$A_{23}/\Delta Z_{a23}$	cm/day	10-200
B_2	cm ⁴ /μmol O ₂ /day	0.00524
B_3	cm ⁴ /μmol O ₂ /day	0.00524
C	μmol O ₂ /cm ³	0.028
D	cm ⁴ /μmol O ₂ /day	0.0584
E	—	0.0001
F	cm/day	1
G	μmol O ₂ /cm ² /day	0.1-500
H	cm/day	0.001
I	cm/day	15
$J/\Delta Z_{j34}$	cm ² /day	0.0536
$K/\Delta Z_{k34}$	cm ² /day	0.00777
L	cm ⁴ /μmol O ₂ /day	5
De_1	cm	—
De_2	cm	1000
De_3	cm	5
De_4	cm	—
O_1	μmol O ₂ /cm ³	0.257
O_4	μmol O ₂ /cm ³	0
Og_4	μmol O ₂ /cm ³	0.0001
S_4	μmol O ₂ /cm ³	0.0001

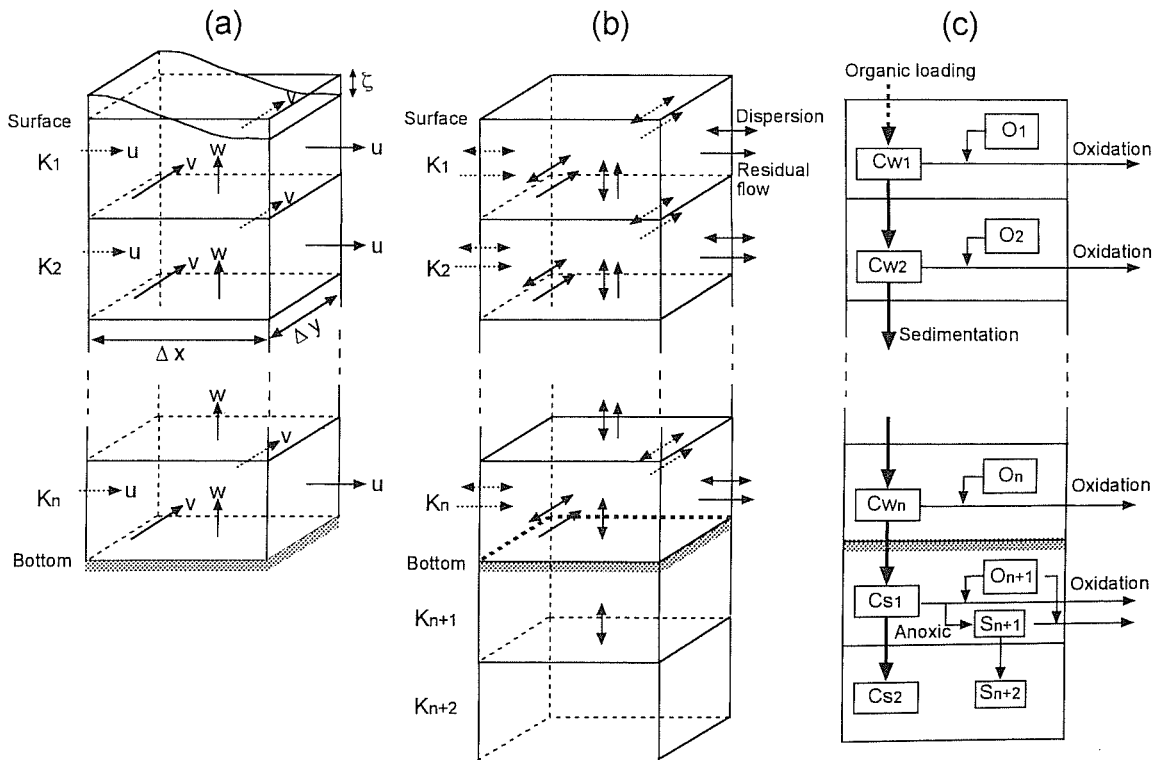


Figure 2. Schematic views of the three-dimensional numerical model. (a) Multi-level stratified flow model. (b) Advection and diffusion of organic matter and dissolved oxygen. (c) Flow chart of the sedimentation, oxidation and anoxic decomposition of organic matter.

して堆積物の酸素消費速度を計算した (Fig. 2). 後に示すように, まず潮流を計算して潮汐流および潮汐残差流 (恒流) を求め, その結果を用いて移流分散係数を求めた. さらに, これらの値を用いて有機物の拡散, 酸素消費速度, 溶存酸素濃度, 還元物質の生成を計算し, 各物質濃度の平衡濃度を求めた.

1) 潮流計算

多層レベル密度流モデル (武内, 1996) を用いて潮流計算を行った. このモデルは, 平面近似された回転地球上の粘性非圧縮性流体で, 鉛直的には静力学平衡, f -平面近似を仮定している. 基礎式は, x および y 方向の運動量方程式, 質量保存式, 自由表面の式, 熱量と塩素量の保存式と状態方程式である. 計算方法, パラメータ値の設定については武内 (1996) に準拠した.

2) 有機物の拡散・分解

潮流計算における海水層の計算格子に加えて海底堆積層を設定し, 海水中および海底堆積層中の有機物の拡散・分解を計算した. 海水中における有機物の拡散方程式は次のようになる.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot C_w) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot C_w) + \frac{\partial}{\partial z}\{(w + w_c)\} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \cdot \frac{\partial C_w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \cdot \frac{\partial C_w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \cdot \frac{\partial C_w}{\partial z}\right) - R_w + q \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, C_w は海水中の有機物濃度, u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速成分, w_c は有機物の沈降, K_x, K_y, K_z はそれぞれ x, y, z 方向の拡散係数, R_w は水中における有機物の分解, q は養殖に伴う負荷または陸域からの負荷を表す. 有機物の分解 R_w については, 分解速度 (酸素消費速度) が有機物濃度と酸素濃度の関数で表されるものとし, 前節の鉛直 1 次元モデルと同じパラメータを用いた. 沈降速度については, 武岡ら (1988) がハマチ養殖場の物質循環モデルで用いた 20 m/day を用いた.

このモデルでは長期間計算を行って平衡状態を求めるので, 流速成分 u, v, w については, 潮流計算により求めた残差流を用いた. また, 水平拡散係数 K_x, K_y については, 渦動拡散係数に加えて, 移流分散係数を考えた.

$$\left. \begin{aligned} K_x &= K'_x + K''_x \\ K_y &= K'_y + K''_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで, K'_x, K'_y はそれぞれ x, y 方向の渦動拡散係数, K''_x, K''_y はそれぞれ x, y 方向の移流分散係数である. 移流分散係数については, 潮汐流の往復運動に伴う物質の分散が流速の分散の大きさ σ_x, σ_y と密接な関係にあるとして次式を用いた.

$$\left. \begin{aligned} K''_x &= \alpha \cdot l_x \cdot \sigma_x = \alpha \cdot l_x \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\Gamma} (u - u_0)^2 dt} \\ K''_y &= \alpha \cdot l_y \cdot \sigma_y = \alpha \cdot l_y \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\Gamma} (v - v_0)^2 dt} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで, u, v はそれぞれ x, y 方向の流速, u_0, v_0 はそれぞれ x, y 方向の平均流, l_x, l_y は計算格子幅である. u, v, u_0, v_0 については潮流計算の結果を用いた. 係数 α については, $\alpha = 1.0$ とした (日本水産資源保護協会, 1988).

海底堆積層 (海底下第 1 層) における有機物の濃度は次式で表される.

$$D_e \cdot \frac{dC_s}{dt} = w_c \cdot C_w - R_b - R_s - \frac{\partial}{\partial z}\left(K_s \cdot \frac{\partial C_s}{\partial z}\right) - H \cdot C_s \quad (5)$$

ここで, D_e は海底堆積層の厚さ, C_s は海底堆積層の有機物濃度, w_c は有機物の沈降速度, C_w は下層水の有機物濃度, R_b は有機物の好氣的分解 (生物的酸素消費), R_s は有機物の嫌氣的分解, K_s は堆積層における有機物の拡散係数, H は海底深層への有機物の移行速度である. なお, 海底堆積層においては, 有機物の水平的な移流拡散は無視した. 有機物の好氣的分解 R_b および嫌氣的分解 R_s については, 分解速度が有機物濃度と酸素濃度の関数で表されるものとし, 鉛直 1 次元モデルと同じ関係式 (式 1) を用いた.

3) 溶存酸素

海水中における溶存酸素量 O の拡散方程式は次のようになる.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial O}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \cdot O) + \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot O) + \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot O) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \cdot \frac{\partial O}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \cdot \frac{\partial O}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \cdot \frac{\partial O}{\partial z}\right) - R_w - D_s \end{aligned} \quad (6)$$

ただし, R_w は海水中の有機物分解に伴う酸素消費, D_s は下層水と海底堆積層 (間隙水) との間の移流・拡散を表し, 鉛直 1 次元モデルと同様のパラメータを用いた. また, 海底堆積層の溶存酸素量は次式のようなになる.

$$D_e \cdot \frac{dO}{dt} = D_s - R_b - R_c \quad (7)$$

ここで, R_b は生物的酸素消費, R_c は化学的酸素消費であり, これら酸素消費についての関係式は鉛直 1 次元モデルと同じ式 (式 1) を用いた. また, 海面収支については, 表層の溶存酸素が常に飽和状態であると仮定した.

4) 環境基準の検証

ここでは, 同一湾内の複数点での現場調査から基準値を求

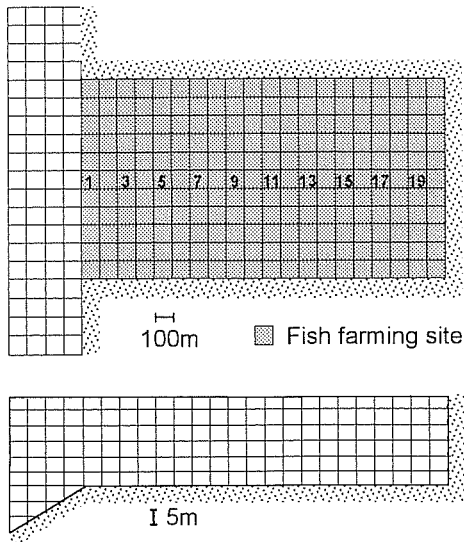


Figure 3. Plain view (upper figure) and sectional view (lower figure) of the model geometry (Case 1). Fish farming sites (dotted areas) are distributed equally in the basin. Numerals in the figure indicate the station numbers of the calculation grids.

めようとした2つの例について、それぞれ「大森・武岡理論」を適用することの問題点を、単純化した地形、生簀配置のもとで3次元モデルを用いて検証した。

まず、湾軸に沿って配置された生簀の直近の数地点における測定値から基準値を求めた例（愛媛県，1995）の妥当性を検討した（Case 1）。簡単のためFig. 3のような長方形の湾を想定し、湾内全域に養殖施設が配置されていると仮定して、湾内表層の各計算格子に等量の有機物負荷が加わるものとした。この有機物負荷量を変化させて、有機物の拡散・堆積、分解（酸素消費）を数値計算により求めた。

つぎに、湾軸に直交する測線上の数地点における測定値から基準値を求めようとした例（横山・坂見，2002）について検討する（Case 2）。彼らは、海水流動や水深などの物理的条件が一定している範囲内で養殖による有機物負荷の傾度を抽出するために、湾軸に直交する測線上において生簀から養殖場外に向けて順次間隔をとって調査地点を設定し、堆積物の酸素消費速度と堆積物中の硫化物量との関係解析により環境基準値を決定しようと試みた。この調査方法の妥当性を検討するため、Fig. 4のように湾内の片側に養殖施設が配置されている湾を想定し、湾軸に直交する線上（地点A～K）における堆積物の酸素消費速度を計算した。この線上では、海水交換条件はほぼ等しいと考えられ、養殖による有機物負荷については傾度が想定される。

なお、持続的養殖生産確保法における環境基準では、養殖由来有機物が好氣的に盛んに分解されて生態系へ円滑に組み込まれている状態を目標としているので、本研究では生物的酸素消費速度を環境基準の指標とする。また、持続

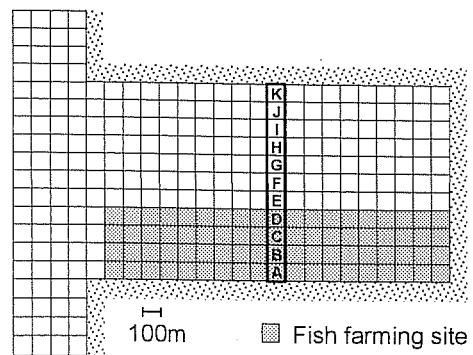


Figure 4. Plain view of the model geometry (Case 2). Alphabets in the figure indicate the station of the calculation grids. Dotted areas indicate fish farming sites. The sectional view is same as in Fig. 3.

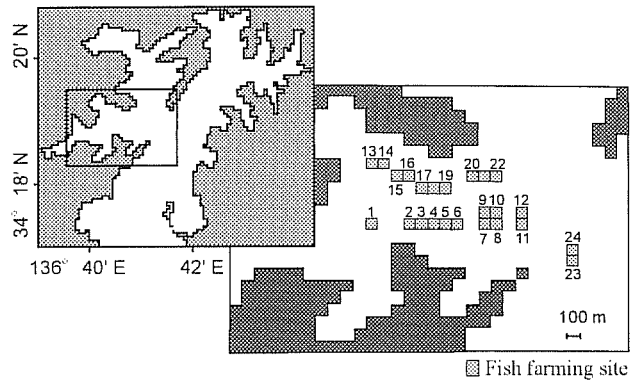


Figure 5. Model geometry of Gokasho Bay. Dotted areas indicate fish farming sites (Stations 1 to 24).

的養殖生産確保法において基準値決定の調査時期としている成層期末期を想定し、水温、塩分等の計算条件を設定した。

5) 実漁場への適用

3次元モデルを五ヶ所湾に適用し、堆積物の酸素消費速度に基づく養殖負荷許容量を試算し、3次元モデルの実漁場への適用性を検討した。五ヶ所湾はいくつかの枝湾により構成されており、魚類養殖は一つの枝湾内（迫間浦）に集中している。2000年の五ヶ所湾全体での魚類養殖生産量は1712tであり、このうち76%にあたる1301tがこの枝湾内で生産されている（東海農政局三重統計事務所，2001）。本研究では、計算格子を水平方向100m×100m、メッシュ数82×70とした（Fig. 5）。鉛直方向は層厚5m（最大6層）とし、さらに海底堆積層を設定した。潮流計算においては、五ヶ所湾の南端（湾口部）を開境界とし、水位境界として大潮時の潮位変動を与え、水温・塩分の境界として成層期末期（8月下旬）における湾口部の平年値を与えた。有機物および溶存酸素の計算においては、湾口部での溶存酸素

の境界として8月下旬における湾口部での平年値を与え、有機物境界としては有機物濃度0を与えた。また、表層(第1層)においては溶存酸素が常に飽和状態であるとした。さらに、枝湾内に養殖漁業区を設定し(養殖区1~24)、表層に養殖による有機物負荷を与えた。この有機物負荷量を変えたときの酸素消費速度の変化を計算し、有機物負荷限界量を求めた。

結果と考察

鉛直1次元モデル

ここでは、漁場の類型化により環境基準値を決定する場合の問題点について鉛直1次元モデルを用いて検討した。

有機物負荷速度と酸素消費速度、溶存酸素濃度、堆積物中の還元物質濃度との関係について、鉛直拡散に関するパラメータ $A_{12}/\Delta Z_{a12}=25$ (cm/day) とした場合の計算結果を Fig. 6 に示した。有機物負荷量が少ない時には、下層水の溶存酸素は十分にあり、酸素消費のほとんどは生物的酸素消費で占められる。生物的酸素消費速度は、有機物が負荷された当初は有機物負荷に比例して増加するが、負荷量が

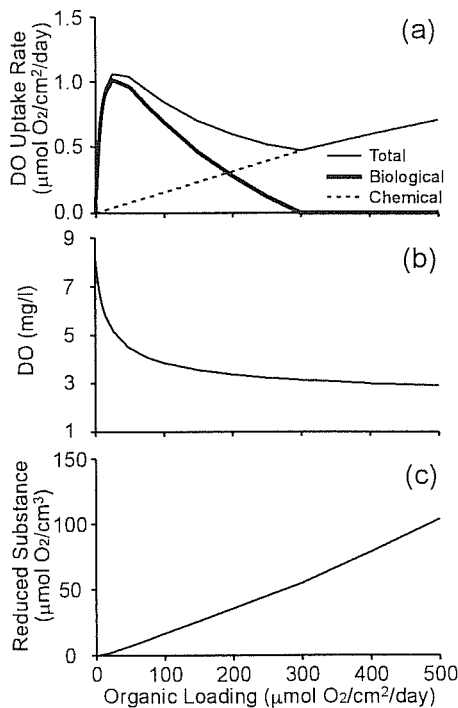


Figure 6. Results of the calculation by the one-dimensional model ($A_{12}/\Delta Z_{a12}=25$). (a) Relationship between benthic oxygen uptake rate and organic matter loading rate. Solid thin line, thick line and broken line indicate total, biological and chemical oxygen uptake rate, respectively. (b) Relationship between dissolved oxygen concentration in the second layer and organic matter loading rate. (c) Relationship between reduced substance concentration and organic matter loading rate.

さらに増加すると下層水の貧酸素化が進むことにより生物的酸素消費速度が押さえられる。その結果、有機物負荷がある値になると生物的酸素消費速度は極大値をとり、その後減少に転じて0となる。下層水の貧酸素化とともに、還元物質濃度が増加して化学的酸素消費速度が増大するため、全酸素消費速度は再び増大に転じる。

つぎに、鉛直拡散に関するパラメータの値を変えて、有機物負荷量と酸素消費速度との関係を計算した (Fig. 7)。ここで、パラメータ $A_{12}/\Delta Z_{a12}$ は値が大きいくほど拡散が大きく底層への酸素供給が大きいくことを表す。生物的酸素消費速度と全酸素消費速度はともに有機物負荷量に対して最大値を持ち、それらの最大値とそのときの有機物負荷量は大差ない。なお、本研究では生物的酸素消費速度を環境基準の指標として考え、これ以降は生物的酸素消費速度についてのみ述べる。生物的酸素消費速度は、鉛直拡散の値にかかわらず有機物負荷量に対して最大値を持つ。鉛直拡散 ($A_{12}/\Delta Z_{a12}$) が小さいときには少ない有機物負荷量で酸素消費速度は最大となるが、鉛直拡散が大きくなるほど酸素消費速度が最大となるときの有機物負荷量は多くなる。なお、酸素消費速度が減少に転じた後の速度の減衰は緩やかであり、最大値を特定することは難しい。また、酸素消費速度の値は拡散の大きさによって大きく変動し、拡散の小さいときには酸素消費速度は非常に小さく、拡散の大きいときには酸素消費速度は大きな値をとる。このことは、拡散の大きさが少しでも異なると、それぞれの場所で求めた酸素消費速度と有機物量との関係を比較できなくなることを

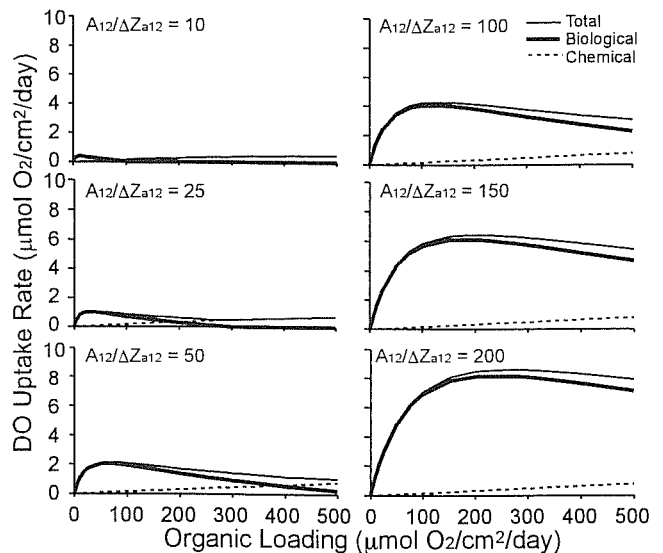


Figure 7. Relationship between benthic oxygen uptake rate and organic matter loading rate calculated by the one-dimensional model under various vertical diffusions ($A_{12}/\Delta Z_{a12}=10-200$ cm/day). Solid thin line, thick line and broken line indicate total, biological and chemical oxygen uptake rate, respectively.

意味する。酸素消費速度の最大値を求める場合には、鉛直拡散（酸素供給能力）が厳密に等しくなるように調査点を選択する必要がある。

武岡・大森 (1996) は、海底の単位面積当たりへの酸素供給能力 (OS) により漁場を類型化し、OSの近似した複数の漁場の酸素消費速度と有機物量との関係から酸素消費速度の最大値を求めるよう提案している。しかし、1次元モデルの結果は、酸素消費速度が鉛直拡散（酸素供給）の影響を強く受けることを示しており、酸素供給が少しでも変われば、各養殖場で求めた酸素消費速度と有機物量との関係を同一の座標軸において比較することができなくなることを示唆している。現実の養殖場では、酸素供給能力は地形や水深、流動など多くの要因によって決まり、鉛直拡散に伴う表層からの酸素供給だけでなく水平的な移流拡散に伴う酸素供給も考慮する必要がある。漁場の類型化により酸素消費速度の最大値を求めるためには、酸素供給能力が等しく、有機物負荷量が異なる養殖場を多数選ぶ必要があるが、現実的には非常に難しいと考えられる。

3次元モデルによる検証

ここでは、同一湾内の複数点での現場調査により環境基準値を決定することの妥当性について3次元モデルを用いて検証した。

1) Case 1

湾内全域に養殖施設がある場合 (Fig. 3) について、各地点における有機物負荷量と生物的酸素消費速度を計算した。Fig. 8にはそのうち地点1, 5, 9, 13, 17, 19における計算結果を示した。湾奥より（地点9~19）においては、有機物負荷の増大に伴い酸素消費速度は増加し、ある値（最大値）を超えると次第に減少する。これが環境基準で求めるべき酸素消費速度の最大値であり、有機物負荷の許容限界量を表す（図中の矢印）。この許容量は、湾口に近づくにしたがって大きくなる。しかし、地点5より湾口よりの地点では、想定した有機物負荷量の範囲 (1~100 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$) では酸素消費速度は増加する一方で最大値を持たない。湾口付近では許容量がもっと大きいことを示している。このように、酸素消費速度の最大値は測点毎に異なる値を持つ。3次元モデルを用いて、有機物負荷量を変化させて酸素消費速度を計算すれば、酸素消費速度が最大となる有機物負荷を測点毎に求めることができ、さらにそのときの堆積物中の還元物質濃度を計算することにより環境基準値を求めることが可能である。

つぎに、環境基準値の決定方法について検証する。現場調査では、ある現実の有機物負荷量のもとで、湾内の各地点において酸素消費速度と堆積物中の還元物質濃度との関係を調査することになる。Fig. 9は、有機物負荷量を変えて、各地点における生物的酸素消費速度を3次元モデルにより計算したものである。どの有機物負荷量においても、酸素消費速度は湾口部と湾奥部で小さく、その中間の地点

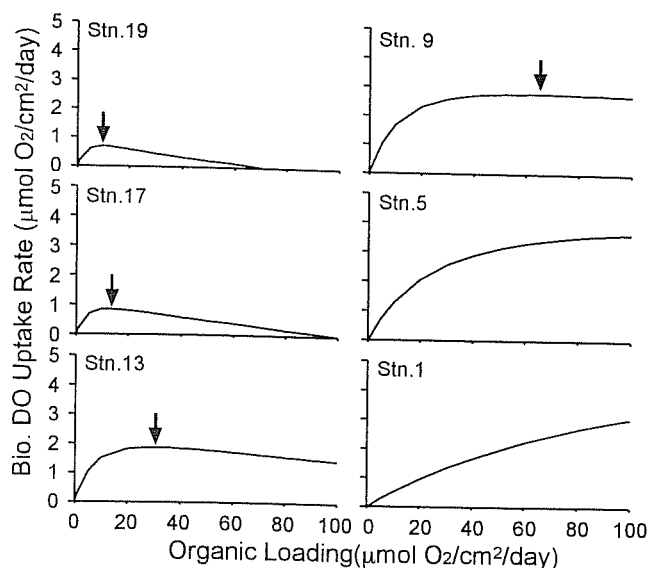


Figure 8. Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and organic matter loading rate at six stations (see Fig. 3), calculated by the three-dimensional model (Case 1). Arrows indicate the maximum of benthic oxygen uptake rate.

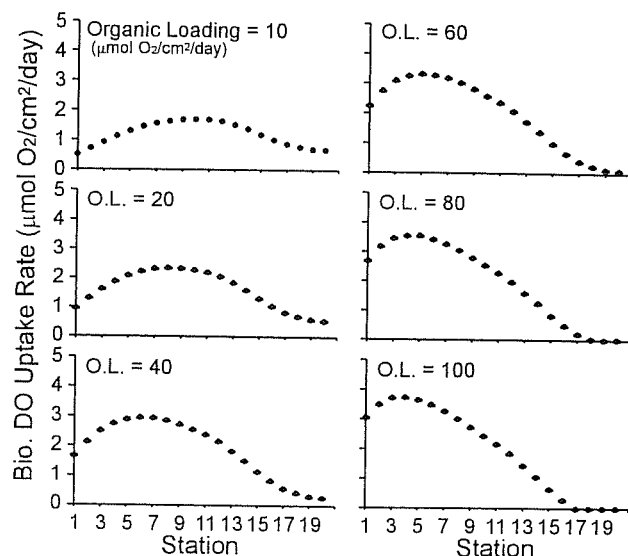


Figure 9. Benthic biological oxygen uptake rate at each station (see Fig. 3) under six cases of organic matter loading rate (10–100 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$), calculated by the three-dimensional model (Case 1).

で最大値が得られる。この計算結果を堆積物中の還元物質濃度と酸素消費速度との関係に置き換えたものが Fig. 10 である。酸素消費速度は還元物質濃度に対して最大値を持っている。湾内の複数の地点より酸素消費速度と堆積物中の還元物質濃度を求め、散布図を作成すれば、酸素消費速度が最大となる還元物質濃度が得られることになる。しかし、

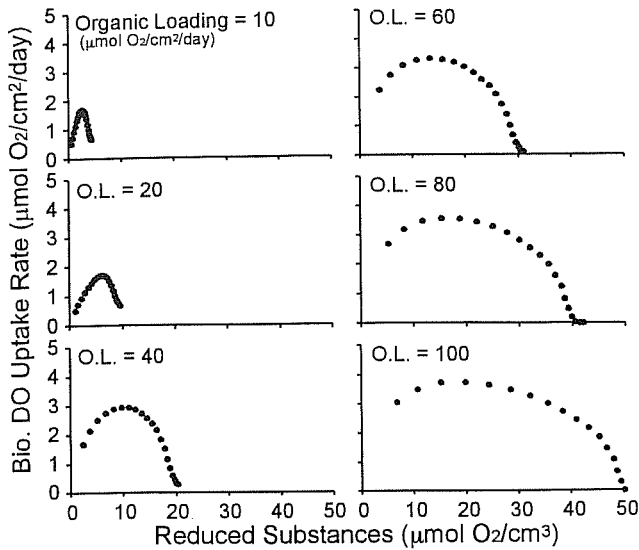


Figure 10. Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and reduced substances concentration at each station (see Fig. 3) under six cases of organic matter loading rates (10–100 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$), calculated by the three-dimensional model (Case 1).

この値を環境基準値とすることはできない。実際には、湾奥部では溶存酸素濃度が低くなるために酸素消費速度が小さくなり、湾口部では底層での有機物濃度が低くなるために酸素消費速度は小さくなる。このため、海面への有機物負荷量の多少に関わらず、結果的に湾の中央部で酸素消費速度が最大値を示すことになる。この酸素消費速度の最大値は環境基準とは関係のない見かけ上のものである。また、この最大値に対応した還元物質濃度は、有機物負荷量により異なる値を示している。例えば、有機物負荷量が $20 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ のときには最大値に対応する還元物質濃度は $6 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$ であるが、有機物負荷量が $80 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ のときには最大値に対応する還元物質濃度は $18 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$ である。このことは、現場の有機物負荷量が変われば、湾内の複数地点での調査から得られる酸素消費速度の最大値に対応した還元物質濃度が変化することを示している。環境基準値は物理条件が等しい限り一定であることを考えると、この酸素消費速度の最大値が環境基準とは関係のないものであることは明らかである。

Fig. 11は3次元モデルの計算結果を立体的に表したものである。ある地点について見ると、酸素消費速度はある有機物負荷で最大値をとる (Fig. 11b)。この負荷量が環境基準で求めるべき養殖許容量を表す。一方、ある一定の有機物負荷に対する各地点の酸素消費速度を見ると、湾中央付近で酸素消費速度が最大となる (Fig. 11c)。この最大値は環境基準とは関係のない見かけ上のものである。Fig. 12は、酸素消費速度の等値線図の上に環境基準で求めるべき酸素

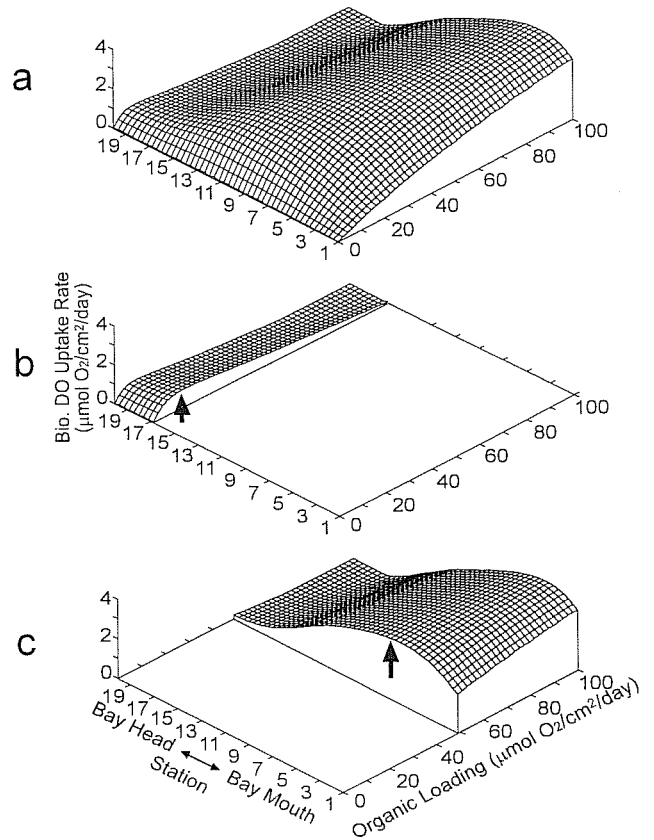


Figure 11. Three-dimensional views of the results of the calculation by the three-dimensional model (Case 1). (a) Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and organic matter loading rate at each station. (b) Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and organic matter loading rate at Station 17. Arrow indicates the limit of organic matter loading rate. (c) Biological oxygen uptake rate at each Station when organic matter loading rate is $50 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$. Arrow indicates the apparent maximum of the oxygen uptake rate.

消費速度の最大値 (図中の太線) および酸素消費速度の見かけの最大値 (図中の点線) を示したものである。現場調査により得られるのはこの見かけの最大値であり、環境基準で求めるべき酸素消費速度の最大値とは全く別のものである。したがって、湾軸に沿って調査点を設定した場合、現場調査からは環境基準値を決定することはできない。

2) Case 2

湾内の片側に養殖施設が配置されている場合 (Fig. 4) について計算を行い、湾軸に直交する測線上における有機物負荷量と生物的酸素消費速度との関係を検討する。まず、養殖施設から距離をとることによって有機物負荷量の傾度を設定した場合について計算を行った。湾軸に直交する測線上において生簀から養殖場外に向けて順次間隔をとって調査地点を設定した場合、これらの調査地点間では海水流動

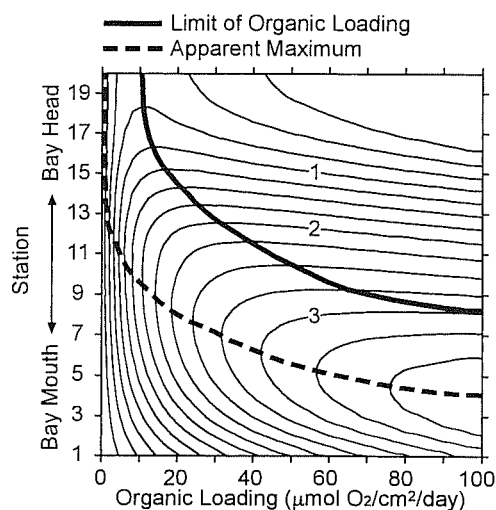


Figure 12. Benthic biological oxygen uptake rate ($\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$) as a function of organic matter loading rate and station. Thick line indicates the limit of organic matter loading rate. Broken line indicates the apparent maximum of oxygen uptake rate.

や水深などの物理的条件が近似し、かつ海底への有機物負荷が異なることが期待される。Fig. 13aは、湾軸に直交する測線上（地点A~K）における海底への有機物負荷量（堆積速度）の計算結果である。ただし、養殖施設海面への有機物負荷量は $100 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ としてある。海底への有機物負荷量は養殖施設が配置されている海域の岸側（地点A）で最も多く、地点Aから離れるに従って少なくなっており、測線上では有機物負荷の傾度が設定されることになる。また、海底への有機物負荷量と生物的酸素消費速度との関係をFig. 13b（図中の黒点）に、測線上（地点A~K）における海底への有機物負荷量と底層水の溶存酸素濃度との関係をFig. 13c（図中の黒点）にそれぞれ示した。ただし、養殖施設海面への有機物負荷量は $100 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ としてある。つぎに、実際に海面への有機物負荷量を変えた場合、湾軸に直交する測線上での溶存酸素濃度および酸素消費速度がどのようになるかを計算した。海面への有機物負荷量を0から $200 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ まで変化した場合について、海底への有機物負荷量と生物的酸素消費速度との関係をFig. 13b（図中の実線）に、養殖施設直下（地点D）における海底への有機物負荷量と底層水の溶存酸素濃度との関係をFig. 13c（図中の実線）にそれぞれ示した。

養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合と、実際に海面への有機物負荷量を変えた場合とについて計算結果を比較検討する。まず、海底への有機物負荷量と酸素消費速度との関係を比較する（Fig. 13b）。養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合（図中の黒点）には、酸素消費速度が最大となるのは

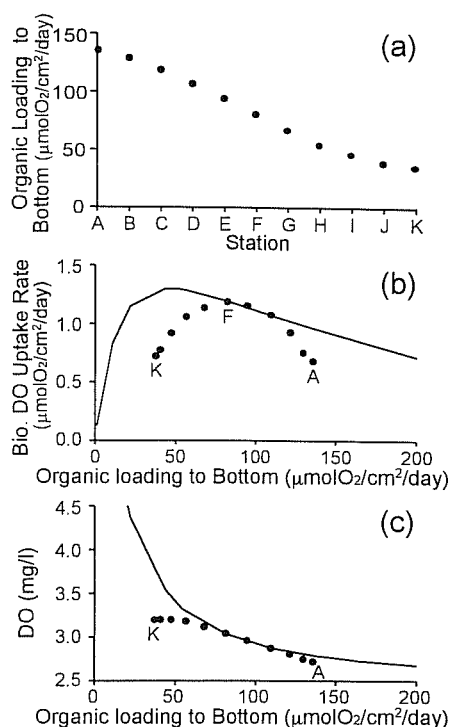


Figure 13. Results of the calculation by the three-dimensional model (Case 2). (a) Organic matter loading rate to the bottom at Stations A to K (see Fig. 4) when organic matter loading rate to the surface water of fish farming sites is $100 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$. (b) Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and organic matter loading rate to the bottom. Solid line: relationship at Station D when organic matter loading rate to the surface water of fish farming sites is changed from 0 to $200 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$. Solid circles: relationship at Stations A to K when organic matter loading rate to the surface water of fish farming sites is $100 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$. (c) Relationship between dissolved oxygen concentration of the bottom water and organic matter loading rate to the bottom. Solid line and solid circles denote same as in (b).

地点Fであり、そのときの海底への有機物負荷量は $80 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ である。一方、実際に海面への有機物負荷量を変えた場合（図中の実線）には、酸素消費速度が最大となるのは、海底への有機物負荷量が $50 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ のときである。この酸素消費速度の最大値が地点Dにおける環境基準として求めるべきものである。このことから、養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合に求まる酸素消費速度の最大値は環境基準として求めるべき最大値とは異なることが分かる。つぎに、海底への有機物負荷量と溶存酸素濃度との関係を比較する（Fig. 13c）。養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合（図中の黒点）には、地点Kでは海底への有機物負荷量が $40 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ であり、底層水

の溶存酸素濃度は3.2 mg/lである。一方、実際に海面への有機物負荷量を変えた場合(図中の実線)には、養殖施設直下(地点D)において海底への有機物負荷が40 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ となるときの底層水の溶存酸素濃度は3.9 mg/lと高い。これは、養殖施設から離れて海底への有機物負荷量が少なくなる地点Kにおいても、養殖施設近くの高い酸素消費速度の影響で溶存酸素濃度が低くなるためである。換言すると、養殖施設から離れた地点の酸素供給条件は、養殖施設直下の高い酸素消費速度と低い溶存酸素濃度の影響を受けている。つまり、養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合と、実際に養殖負荷量を変えた場合では、海底への有機物負荷量が同じであっても酸素供給条件が異なるため酸素消費速度が異なることになる。

湾軸に直交する測線上で堆積物の還元物質濃度と酸素消費速度を測定した場合にどのような結果になるかをシミュレートする。まず、養殖施設直下(地点A~D)における環境基準値を計算により求める。Fig. 14aは、海面への有機物負荷量を0から300 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ まで変化させたときの地点A~Dにおける堆積物中の還元物質濃度と酸素消費速度との関係を示したものである。地点A, B, C, Dにおける酸素消費速度の最大値に対応する還元物質濃度はそれぞれ70, 90, 110, 120 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$ であり、これらの値が各地点における環境基準値(堆積物中の還元物質濃度)であることを示している。つぎに、養殖施設からの距離によって有機物負荷量の傾度を設定した場合の堆積物の還元物質濃度と酸素消費速度との関係を計算する。Fig. 14bは、海面への有機物負荷量を50, 100, 200 ($\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$)とした場合の測線上(地点A~K)における還元物質濃度と酸素消費速度との関係をそれぞれ示したものである。いずれの有機物負荷量の場合においても、酸素消費速度は還元物質濃度に対して最大値を有していた。有機物負荷量50 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ の場合には、最大値を示したのは地点Eであり、そのときの還元物質濃度は約140 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$ であった。同様に、有機物負荷量が100, 200 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ の場合には、それぞれ地点F, Gにおいて酸素消費速度は最大値を示し、そのときの還元物質濃度はそれぞれ250, 430 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$ であった。これらの値は、前に求めた養殖施設直下の環境基準値(70~120 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^3$)とは一致しない。また、この還元物質濃度は、養殖施設海面への有機物負荷量によって値が変化することから、各点で固有の一定値であるべき環境基準値とすることはできない。以上のことから、湾軸に直交する測線上の複数地点における測定値からは環境基準値を求めることはできない。

実漁場への3次元モデルの適用

前節の3次元モデルによる解析により、同一湾内の複数地点での調査からは酸素消費に基づく環境基準値を決定できないことが明らかになった。また、1次元モデルの計算結

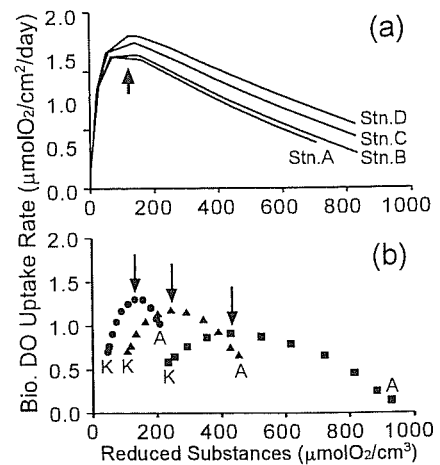


Figure 14. Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and reduced substances concentration of sediment based on the three-dimensional model (Case 2). (a) The relationship when organic matter loading rate to the surface water of fish farming sites is changed from 0 to 300 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ (Stations A to D). (b) The relationships at stations A to K when organic matter loading rate to the surface water of fish farming sites is 50 (solid circles), 100 (solid triangles) and 200 (solid square) $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$, respectively. Arrows indicate the maximum of oxygen uptake rate.

果からは、漁場の類型化に基づく調査による基準値の決定には困難が予想される。しかし、この環境基準を運用する方法として、数値計算により基準値を求める手法が残されている。3次元モデルにより有機物負荷量を変化させて酸素消費速度を計算し、酸素消費速度が最大となる有機物負荷量を求めることができれば、環境基準値の算出が可能となる。ここでは、五ヶ所湾の魚類養殖場に3次元モデルを適用し、有機物負荷量を変化させて酸素消費速度を計算し、各養殖区 (Fig. 5; 養殖区1~24) における堆積物の生物的酸素消費速度と有機物負荷量との関係を求めた。なお、各養殖区での有機物負荷量はすべて同じに設定してある。その計算結果の一部を Fig. 15 に示した。湾奥部の養殖区1においては、養殖による有機物負荷量が3 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ のときに酸素消費速度は最大となった。湾奥部ではこの有機物負荷量が許容量であり、湾内全ての養殖区の負荷量をこの値以下にしなければ環境基準を満たすことはできない。養殖区3, 5, 7, 9, 11においては、それぞれ有機物負荷量が5, 10, 25, 40, 95 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ のときに酸素消費速度が最大となり、この値が有機物負荷の許容量となる。また、最も外側に位置する養殖区23, 24においては、計算した有機物負荷量0~100 $\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ の範囲内では最大値を示さなかった。Fig. 16には、各養殖区における有機物負荷の許容量をまとめた。計算結果は、有機物負荷の許容量が枝湾口部で急激に変化することを示している。枝湾口付近

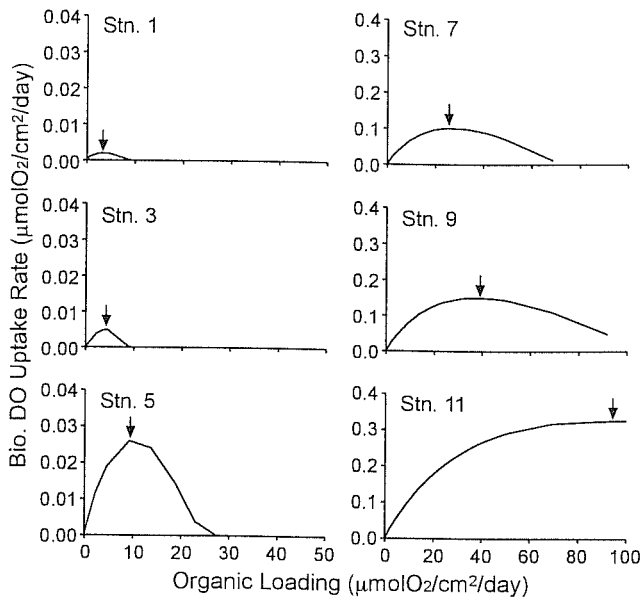


Figure 15. Relationship between benthic biological oxygen uptake rate and organic matter loading rate at six fish farming sites in Gokasho Bay (see Fig. 5), based on the three-dimensional model. Arrows indicate the maximum of oxygen uptake rate.

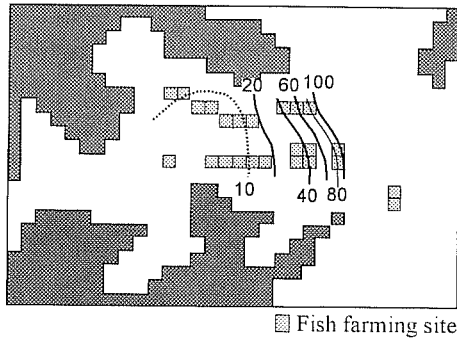


Figure 16. Isopleths of the limit value of organic matter loading rate ($\mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$) in Gokasho Bay, based on the three-dimensional model.

(養殖区 11, 12, 22) においては、全ての養殖区の有機物負荷量を $90 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ 以下にすれば基準値を満たすことができるが、200m内側の養殖区(養殖区 8, 10, 20)では約 $40 \mu\text{mol O}_2/\text{cm}^2/\text{day}$ と枝湾口付近の場合の半分以下に有機物負荷量を抑えなければ基準値を超えてしまう。枝湾中央部(養殖区 6, 19)では枝湾口付近における許容量の約5分の1以下、湾奥部(養殖区 4より奥部)では枝湾入口付近における許容量の10分の1以下に全養殖区の有機物負荷量を抑えなければ、基準値を満たすことができない。

酸素消費速度は酸素供給速度の影響を強く受けるため、堆積物の酸素消費速度に基づいて得られる有機物負荷の許

容量は酸素供給の多い湾口部では大きく、酸素供給の少ない湾奥部では小さな値となる。今回の計算結果では、約800mしか隔たっていない枝湾口部と湾奥部とでは許容量に10倍以上の差があり、同じ湾内であっても養殖区毎に養殖許容量は大きく変わることが示された。堆積物の酸素消費速度に基づいて養殖環境基準を考える場合には、養殖場全体を一様に扱うのではなく、養殖区あるいは施設毎に基準値を設定する必要がある。養殖施設毎の養殖許容量を設定することは、養殖施設の適正配置により養殖場の適正利用を図っていく上で重要であると考えられる。3次元数値モデルによる「堆積物の酸素消費速度に基づく養殖環境基準」の運用は、養殖場の持続的生産を確保する上で有効な手段になると期待できる。

まとめ

本研究では、堆積物の酸素消費速度に基づく養殖場の環境基準について、基準値の決定方法を検証した。3次元モデルを用いた解析の結果、同一湾内の複数地点での調査から基準値を決定することは不可能で誤っていることが明らかになった。武岡・大森(1996)や武岡(1998)は、漁場の酸素供給能力の違いを考慮する必要性を唱え、酸素供給能力により漁場を類型化しそれぞれの類型について酸素消費速度の最大値を求めるよう提案している。しかし、彼らが同一湾内の複数地点での調査結果を現場応用例として紹介していることもあり、酸素供給能力の重要性が十分認識されているとは言い難い。漁場の類型化に基づく基準値決定は、理論的には可能である。しかし、酸素消費速度は漁場の酸素供給能力により値が大きく異なることを1次元モデルは示唆している。酸素消費速度の最大値を検出するためには、酸素供給能力が近似し有機物負荷量が様々に異なる漁場を多数用意する必要がある。そのような理想的な類型化を行うことは現実には難しく、その実用化は容易ではないと考えられる。また、本研究では、基準値の決定には数値計算が有効であることを示し、五ヶ所湾における養殖許容限界量を3次元モデルにより試算した。ただし、これは数値計算による基準値決定の可能性を示したものであり、計算結果の妥当性については検討していない。実漁場へのモデルの適用については、今後、現場における有機物負荷量、酸素消費速度、還元物質濃度(硫化物量、AVS-S)を詳細に調査し、数値計算との整合性を検証するとともに、数値計算における各パラメータを再検討する必要がある。こうした数値モデルの改良を経て環境基準値の決定や適正養殖量の評価が実用可能になると考えられる。

謝辞

論文の校閲と助言をいただいた水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所の杜多 哲部長、査読していただいた愛媛大学沿岸環境科学研究センターの武岡英隆教授、並びに

潮流計算プログラムの使用を快諾していただいた水産総合研究センター水産工学研究所の武内智行部長に感謝の意を表す。なお、本研究の一部は水産庁事業「増養殖適正化総合調査委託事業」により実施したこと、及び数値計算には農林水産研究計算センターの科学技術計算システムを利用したことを付記する。

引用文献

- 愛媛県水産試験場 (1995) 平成6年度魚類養殖対策調査委託事業報告書, 全国かん水養魚協会。
- 堀越増興・菊池泰二 (1976) ベントス, 海藻・ベントス, 元田 茂編, 東海大学出版会, 東京, 149-451。
- 日本水産資源保護協会 (1988) 昭和62年度養殖漁場管理定量化開発調査報告書, pp. 276。
- Omori, K., T. Hirano and H. Takeoka (1994) The limitations to organic loading on a bottom of a coastal ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, **28**, 73-80。
- Seiki, T., H. Izawa and E. Date (1989) Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay. *Water Research*, **23**, 219-228。
- 武岡英隆 (1998) 養殖漁場環境の指標と基準, 沿岸の環境圏, 平野敏行監修, フジ・テクノシステム, 東京, 836-840。
- 武岡英隆・橋本俊也・柳 哲雄 (1988) ハマチ養殖場の物質循環モデル. *水産海洋研究*, **52**, 213-220。
- 武岡英隆・大森浩二 (1996) 底質の酸素消費速度に基づく適正養殖基準の決定法. *水産海洋研究*, **60**, 45-53。
- 武内智行 (1996) 内部潮汐を考慮した湾の海況予測シミュレーション. *海岸工学論文集*, **43**, 1141-1145。
- 東海農政局三重統計事務所 (2001) 三重県漁業地区別統計表, 三重農林統計協会, 津, pp. 58。
- Wu R.S.S., Lam K.S., D.W. MacKay, Lau T.C., Yam V. (1994). Impact of marine fish farming on water quality and bottom sediment: A case study in the sub-tropical environment. *Marine Environmental Research*, **38**, 115-145。
- 横山 寿・坂見知子 (2002) 五ヶ所湾魚類養殖場における環境基準としての酸素消費速度の検討. *日本誌*, **68**, 15-23。