

# 砂浜海岸におけるヒラメ中間育成施設の 海水交換に関する造成手法の研究

水産工学研究所水産土木工学部

山本正昭\*・藤原正幸\*\*・久保敏\*\*\*・川俣茂\*

共同調査機関：鳥取県水産試験場

調査実施年度：平成2年度～5年度

## 緒 言

現在全国各地でヒラメ種苗の量産体制が確立され、平成2年には1400万尾<sup>1)</sup>の放流が行われているにもかかわらず、ヒラメの漁獲量は低迷状態が続いている。そのため被食圧などの初期減耗を最小限に抑さえようと様々な試みが続けられ、放流サイズを大きくすることや自然環境（水理・底質および餌料）に近い条件下で低密度で飼育して野生化させること<sup>2, 3)</sup>が有効であることが分かってきた。しかし、囲い網による方法は潮流・波浪等に弱く、また施設の設置および一日数回の海上給餌作業や網替え等の管理労力を要すること、網外への逃逸そして食害生物の侵入等の難点がある。また、よく行われている陸上水槽での中間育成は、水槽の面積的に大きな水槽が必要なこと、並びに曝気や水の浄化に多大の動力を必要とするため、ヒラメのサイズが大きくなるにつれて経済的に不利となる。

このような背景から省エネルギーかつ省力化を目指して、放流海岸に中間育成池を造成し、その中でサイズおよび質の両面を満足させることを目的とした中間育成を実施しようとする海域特性総合利用技術開発調査事業が鳥取県泊村宇谷地区海岸で進められている。ひらめ中間育成施設検討委員会で検討の結果、ここに図1のような波による導水工付きの1200m<sup>2</sup>の中間育成施設が造成された。事業計画では、30mmサイ

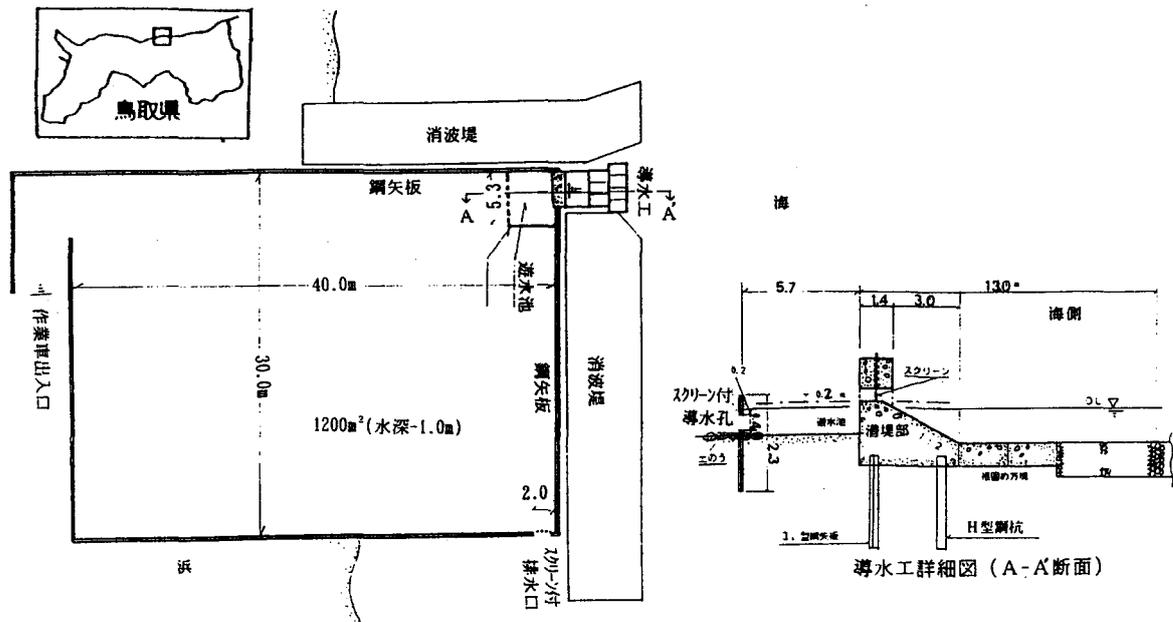


図1 中間育成池の概要図

\* 開発システム研究室

\*\* 元漁場水理研究室(現愛媛大学農学部)

\*\*\* 漁場水理研究室

ズ15万尾を収容し、育成馴致した後、50mmサイズ10万尾を生産放流することになっている。育成期間は約1カ月でそれを2回実施する計画を立てた。調査では、鳥取県と共同研究を行い、水産試験場はヒラメの中間育成手法や馴致判定を、水産工学研究所は海水交換と水質環境の把握をそれぞれ担当し、中間育成池の海水取水計画手法と造成後の池の水質環境予測に関する研究を実施した。

砂浜海岸に造成されたこのような中間育成池の水質環境は、気象・海象の影響を受け、海中に設置された囲い網等に比べると独立した水質環境を形成し、かつ地下水など陸からの影響を受けるため、水質環境予測が不可欠となる。水質としては、特に水温・塩分・溶存酸素が重要となる。これらは海水流入量が多ければ、ほぼ海水と同じレベルに保たれるため、問題はないと考えられるが、どれほどの導水量で池の水質環境がどうなるか予測する手法を開発し、最適な計画のために、最低限必要な導水量とそれを確保するのに必要な施設量を決定する手法を明らかにすることを調査の目的とした。

## 調査方法

4年間の調査は次の4段階に分けられる。

平成2年度：中間育成池の水質環境変化予測モデル作成（県では中間育成池の計画検討）

平成3年度：砂浜掘込み実験池での地下水の影響調査（県では中間育成池の設計と建設）

平成4年度：中間育成池での環境調査（県ではヒラメ稚魚の池内飼育試験と野生化調査）

平成5年度：中間育成池追加調査と導水量計算手法の改良（県では施設の改良，飼育試験，野生化調査）

1) 中間育成池水質環境予測モデル<sup>4, 5, 6)</sup>

### 【基礎方程式】

図2のように水質変化の要因として、海水の流出入と地下水の湧出、水温に関しては水面を通しての熱の出入り（短波・長波放射、潜熱・顕熱輸送）、DOに関しては水面からの溶入、飼育生物、水中及び底泥に因る消費を考慮した。厳密には植物プランクトンに因る生産を考慮する必要があるが、検証の為の実測データが整備されていない現段階でモデルを複雑にするのは得策ではないと考え、今後の課題とした。

中間育成施設内の水質環境が均質であると仮定すると、基礎方程式としては物質の収支式のみで比較的シンプルであるが、そうでない場合は、水深は約1mであるため、各方程式を水深方向に積分した平面二次元単層モデルを採用した。すなわち、施設内を計算の基本単位となるセルに分割し、数値シミュレーションを行う。基本となる方程式は連続方程式、運動方程式、移流拡散方程式（水温・塩分・溶存酸素）、状態方程式である。実際の計算には、セル内で積分した方程式を用いる。以下に基礎方程式系を表記する。

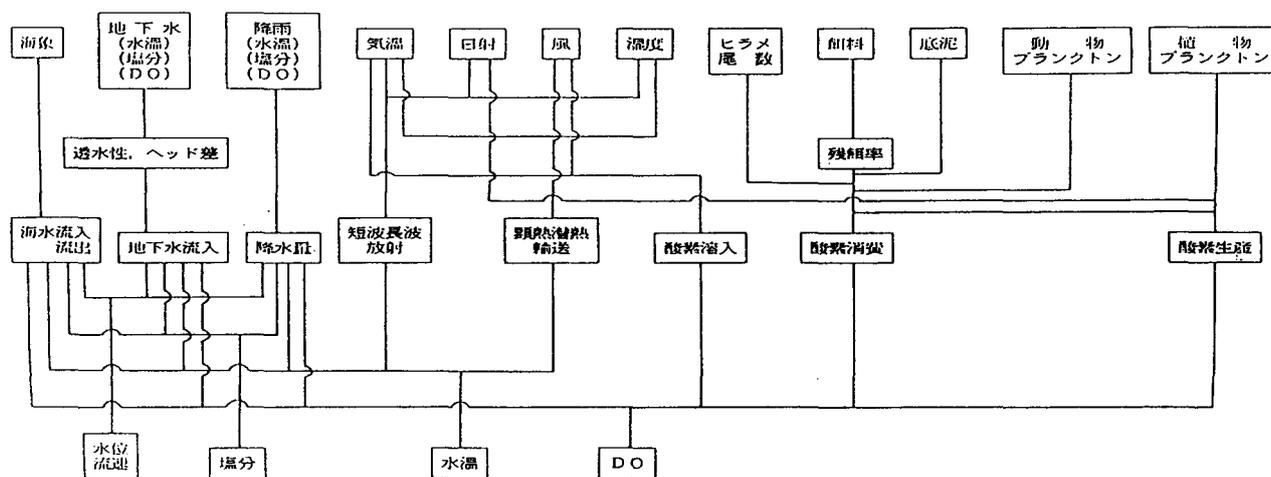


図2 ヒラメ中間育成池の水質環境予測モデルの組立

状態方程式は水温と塩素量から密度を計算するクヌーセン式が一般に用いられる（表記は省略）。

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad \dots\dots(1)$$

$$D u / D t = -p / \rho + \nu \Delta u \quad \dots\dots(2)$$

$$D c / D t = K \Delta c + R \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $\rho$ ：海水の密度、 $p$ ：圧力、 $u$ ：流速ベクトル、 $c$ ：水質変数、 $\nu$ ：動粘性係数、 $K$ ：拡散係数、 $R$ ：増減項、 $\nabla$ ：勾配ベクトル、 $\Delta$ ：ラプラス演算子

$D / D t$ ：ラグランジュ微分

【移流拡散方程式における増減項】

(1) 塩分に関する増減項

降雨・蒸発・地下水の湧出等によって塩分濃度は変化するが、それらは連続方程式および移流の項で考慮されるため、増減項はゼロとなる。

(2) 水温に関する増減項

水面を通しての熱の出入り( $Q_s$ )を考える必要がある。 $Q_s$ には太陽からの短波放射、水面からの長波放射、蒸発による潜熱輸送、対流や伝導による顕熱輸送の4つの形態がある。それらは一般にバルク公式で計算される。しかしバルク公式には日射量、気温、海面の飽和水蒸気圧、大気の水蒸気圧、風速等の多くの観測データが必要となる。

降雨・地下水等の取り扱いは(1)と同じである。

(3) 溶存酸素に関する増減項

中間育成施設内での溶存酸素に関する増減項で表現される主な要因を列挙すると以下のようになる。

①大気からの溶入

大気からの溶入量に関しては、物理過程のみで説明することができ、基本的には大気中と水中での濃度差に比例した形で定式化される。しかしその比例定数(物質移動係数)は水域の流況や水面の状態また風などによって変化するため、いくつかの実験式や経験式が提案されてはいるが、実測データも多くないことから現段階で決定的なものはないようである。今回は風速との関係で定式化されたMackay and Yeunの式<sup>7)</sup>を用いた。

$$N = k (D O^* - D O) \quad \dots\dots(4)$$

$$k = 1.0 \times 10^{-6} + 34.1 \times 10^{-4} U^* \cdot S_{cL}^{-0.5} \quad (U^* > 0.3)$$

$$1.0 \times 10^{-6} + 144 \times 10^{-4} U^{*2.2} \cdot S_{cL}^{-0.5} \quad (U^* < 0.3)$$

$$\dots\dots(5)$$

$$U^* = (6.1 + 0.63 U_{10})^{0.5} \cdot U_{10} \times 10^{-2} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $N$ ：単位面積、単位時間あたりの移動量、 $k$ ：物質移動係数、 $D O^*$ ：飽和溶存酸素濃度、 $D O$ ：溶存酸素濃度、 $U^*$ ：摩擦速度、 $S_{cL}$ ：シュミット数(粘性係数/拡散係数=500)、 $U_{10}$ ：地上10mでの風速(m/s)

③中間育成生物の呼吸

一般に水産生物の酸素消費量 $R_f$ は体重 $W_b$ と水温によって大きく異なることが知られている。 $R_f$ と $W_b$ の関係は以下のように表される。

$$R_f = L W_b^m \quad \dots\dots(7)$$

ここで  $L$ 、 $m$ ：水産生物と水温による定数

(6)式で計算される酸素消費量は安静時での値であり、接餌時等の活動時や平常の活動時での酸素消費量は、実験手法が難しく、ほとんど得られていない。

④プランクトンの呼吸

プランクトンの呼吸による酸素消費量はプランクトン濃度が分かれば計算可能である。

$$R_p = r_p P + r_z Z \quad \dots\dots(8)$$

ここで  $R_p$  : 呼吸による酸素消費量,  $r_p$  : 植物プランクトンの呼吸速度,  $P$  : 植物性プランクトン濃度,  $Z$  : 動物プランクトン濃度,  $r_z$  : 動物プランクトンの呼吸速度

⑤有機物の分解に伴う消費

単位体積当たり有機物を分解するために必要な酸素消費量  $c_o$  と分解速度  $\phi$  が分かれば計算可能であるが,  $\phi$  はプランクトンの死亡速度と関係し, 確立した値はなく, 観測データとのフィッティングによって同定されるため, あらかじめ決定することは困難である。

$$R_b = c_o \cdot \phi S \quad \dots\dots(9)$$

ここで  $R_b$  : 有機物の分解に伴う酸素消費量,  $S$  : 有機物濃度 (デトリタス濃度)

以上述べてきたように溶存酸素に関する増減項には, 変動機構が明らかになっていないため, 不確定なパラメータが多く, 現段階で考えられる要因をすべてモデルに組み込んでも, それによって精度が向上するという保証はない。よって個々の機構に立ち入ることなしに, 明暗瓶法等の方法で中間育成施設全体としての酸素生産・消費速度を見積もることも一つの方法である。ただし, その場合計画中の施設と良く似た環境の施設での現地観測データが必要となる。このように変動機構の一つ一つを解明して, モデルを構築するにしても, またそれとは対照的に変動機構をブラックボックスとして, 一つにまとめて取り扱うにしても, 実験及び現地観測データの蓄積が不可欠となる。

本報では, 理論計算からの予測が困難な海岸地下水の湧出量などの現場常数を現地観測結果から推算し, その影響を考慮したシミュレーションを行い, 必要とする海水流入量について検討した。

【モデルの境界条件と収支式の定数】

中間育成池内の流動, 水質(水温, 塩分, DO)を予測するため図2のようなシステムを考え, 数値計算プログラムを作成した。

- ① 海水流入 : 海象条件と取り入れ口の構造から, 計算された値を境界条件として入力する。
- ② 地下水流入: 現地観測された地下水位と透水係数を用い, 計算された値を境界条件として入力する。
- ③ 降水量 : 実測値を境界条件として入力する。

2) 平成3年度現地観測

波による海水導入の対案として残っていた地下水利用の可能性を探る目的で, , 海岸地下水の湧出量及びその水質を明らかにするため, 1991年5月14~16日に10m四方の試験池(矢板で囲まれ水深1mの海水の出入りがない池)において現地観測を行った。ポンプで池の水を汲みだし, その後回復させながら, 水質

★

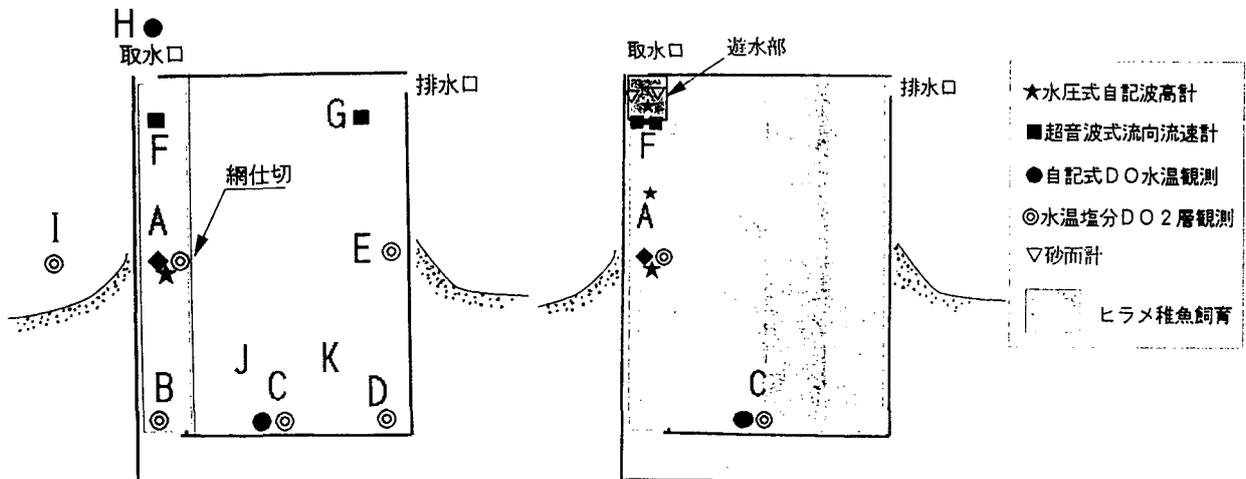


図3 調査機器とその配置 (1992年6月)

図4 調査機器とその配置 (1993年5,6月)

(水温、塩分、溶存酸素量) および湧水量の変化を潮位変化とともに観測した。

### 3) 平成4年度調査

1992年6月8日～11日にかけて、図3に示す位置で水位、流速、水温塩分、溶存酸素量について現地観測を行った。その他、日射量風向風速、クロロフィル量、流況、水準測量、浮遊砂濃度を測定した。

①水位は水圧式波高計、流速は超音波流速計で2時間間隔、20分間自動計測した。

②水温・塩分は位置A, B, H, C自動連続観測、位置A, B, C, D, Eでは上下2層、3時間間隔で観測した。

③溶存酸素は位置H, Cで自動連続観測、位置A, B, C, D, Eでは水温・塩分と同じ。

④酸素生産量及び酸素消費量は明暗瓶法で観測した。

### 4) 平成5年度調査

#### 【現地観測】

#### (1) 調査項目と手法

今年度の中間育成池の調査項目を次の3点とした。測定位置は中間育成池内外の図4の通り。

① 導水量、波の測定は、流量観測のため自記流速計(AICM-2)2台を用いて給水孔部の流速を計測。池内外の潮位・波高観測のため自記波高計(MTW-2)3台を用いて水圧観測した。

② 底泥酸素消費量の測定は、池内の酸素消費量を見積もるため、底泥の酸素消費速度と水中の酸素消費速度を、図5のようにDOセンサを取り付けた2つの円筒型チャンバにより現地観測した。底泥の酸素消費速度はその差をとって算出した。

③ 池内堆砂量の測定： 漂砂流入量を計測するため、自記砂面計(SPM-3)2台を用いて遊水部の砂面変化測定とレベル測量を行った。

#### (2) 実施時期

ヒラメの育成前と飼育中にまたがる様に時期を設定し、約2週間において2度水質等の測定を行った。波高計、流速計などの自動観測機器はその間観測を継続した。

波浪観測、流速自動観測、砂面計自動観測；5月25日～6月11日

底泥DO観測、深淺測量(遊水部)；5月25～26日、6月10～11日

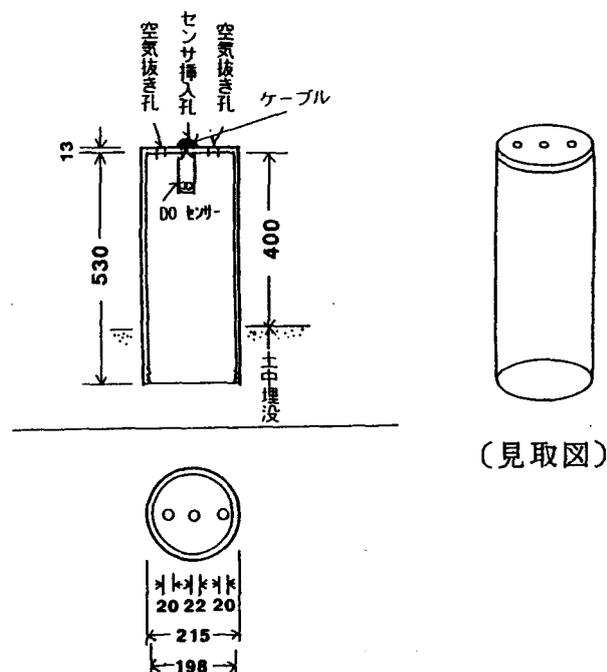


図5 底質酸素消費速度観測筒

【導水量計算手法の改良】

不透過堤で潮位が潜堤天端と一致している時の海水導入量は(10)式で算定できた。ここでは潮位が変化した場合適用できる海水導入量の計算法を既報<sup>8)</sup>の実験よりまとめ直した。

$$Q_{in} = (C_{in} \cdot (gH^3))^{1/2} \quad C_{in} = 0.2 \tanh(4.0A/(BH)) \quad \dots\dots\dots(10)$$

導水施設は、水理計算上、潜堤部、孔空き堤部、排水部を含む3つの流路を通る間に、潜堤で発生した水位上昇量 $\Delta h$ は3つの部それぞれで $\Delta h_1$ 、 $\Delta h_2$ 、 $\Delta h_3$ だけ費やされる。すなわち、

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 \quad \dots\dots\dots(11)$$

潜堤での流量 $Q$ と水位差 $\Delta h_1$ の関係は半潜り堰の公式を準用すると<sup>9)</sup>、(12)式となる。ここに、 $h_1$ 、 $h_2$ は潜堤天端上の上下流の水位、 $B$ は堤の長さ、 $g$ は重力の加速度( $980\text{cm/s}^2$ )である。

$$Q = (C_1 h_1 B) \cdot (2g \cdot \Delta h_1)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

不透過堤の実験結果データから流量係数 $C_1$ は(13)式で表わされる。

$$\begin{aligned} h_2/h_1 < 0.71 \text{の時} \quad C_1 &= 0.32 \\ h_2/h_1 > 0.71 \text{の時} \quad C_1 &= 0.45 \cdot h_2/h_1 \quad \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

水頭差 $\Delta h_1$ と流量の関係はその間の抵抗を $R_1$ とすると(14)式のようになる。

$$\Delta h_1 = 1 / \{2g \cdot (C_1 h_1 B)^2\} \cdot Q^2 = R_1 \cdot Q^2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

孔空き壁部の損失水頭は流量係数を $C_2$ 、断面積を $A$ 、通過流量を $Q$ 、抵抗を $R_2$ とすると(15)式となる。

$$\Delta h_2 = 1 / \{2g \cdot (C_2 A)^2\} \cdot Q^2 = R_2 \cdot Q^2 \quad \dots\dots\dots(15)$$

出口の損失水頭 $\Delta h_3$ が無視できるほど小さいと仮定すると、

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 = (R_1 + R_2) \cdot Q^2 \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$Q = \{ \Delta h / (R_1 + R_2) \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

防波堤前面に潜堤を設置したことによる遊水部の水位上昇量の算定式は(18)式で表わされる。

表1 計算に用いた各パラメータ値

		係 数	設 定 値 1	設 定 値 2
流動 計算		水平渦動粘性係数	0.004m <sup>2</sup> /s	0.004m <sup>2</sup> /s
		海面摩擦係数	—	0.0013
		マンニングの粗度係数	0.025	0.025
水 質 計 算	水 温	水平乱流拡散係数	0.002m <sup>2</sup> /s	0.001m <sup>2</sup> /s
		雲 量	7.5	7.5
		風 速	0 m/s	0, 2.7m/s
		湿 度	70%	70%
	気 温	—	1987年と1988年の8月の平均最高気温(32°C)と平均最低気温(22°C)を正弦曲線で補間。	
	日 射 量	—	8月平均全天日射量440cal/cm <sup>2</sup> /dayの2倍を日中の平均日射量,その1.5倍を最大値とし正弦曲線で補間。	
	溶 存 酸 素	水平乱流拡散係数	0.001m <sup>2</sup> /s	0.001m <sup>2</sup> /s
		ヒラメによるDO消費量	0.01ml/m <sup>2</sup> /s 安静時 0.02ml/m <sup>2</sup> /s 活動時	0.0088ml/min/尾 (26°C) 安静時 0.024ml/min/尾 (26°C) 活動時 (安静時の約3倍を仮定)
		底泥によるDO消費量	0.01ml/s/m <sup>2</sup>	0.01ml/s/m <sup>2</sup>
		液相の物質移動係数	1.0×10 <sup>-6</sup> m/s 無風	1.0×10 <sup>-6</sup> m/s 無風 9.0×10 <sup>-4</sup> m/s 風速3m/s

$$\Delta h = 0.49(H' - 0.66h) \quad (h \geq 0)$$

$$\Delta h = 0.49(H' - h) \quad (h < 0) \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $H'$  : 有義波高の0.66倍(m), ただし、 $h > 1.51H'$  又は、 $h < -H'$  の時は  $\Delta h = 0$  とする。また、波が斜めから来た場合、潜堤長 $B$ は潜堤長さの波向きに直角成分をとる。

### 調査結果

#### 1) モデルによる計算結果

このモデルによる感度試験を行った。計算に用いたパラメータの値を表1設定値1に示す。気温と日射量に関しては、中間育成期間(6月上旬~7月上旬)中に考えられる最悪の気象条件を入力した。流入境界条件として、海水の水質(水温 $21.5^{\circ}\text{C}$ ・塩分33.4%・ $\text{DO}$ 5ml/l), 地下水の水質(水温 $16^{\circ}\text{C}$ ・塩分3%・ $\text{DO}$ 2ml/l)を用いた。地下水は、池の陸側から1/4の領域で湧出する条件を課した。海水流入量は100,200,300ton/hrの3ケースで計算を行った。図6~8に各ケースに対応した $\text{DO}$ 分布図を示す。適正な中間育成を行うためには $\text{DO}$ 濃度が4ml/l以上であるとすると、海水流入量として200ton/hr必要となる。そのケースで、日中水温に関して最も上昇した時、 $2^{\circ}\text{C}$ 程上昇した。また塩分濃度の低下は1.5%程度である。流況図では左回りの渦ができ、残餌等は渦の中心に集まる可能性が考えられる。

次に、平成4年度の調査結果を用いて、モデルの精度の検証を行った。この結果と実測値を図9~11

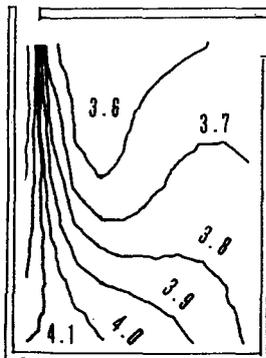


図6 100m<sup>3</sup>/hr海水導入時の溶存酸素濃度の計算結果(ヒマ活動時、地下水10m<sup>3</sup>/hr:単位ml/l)

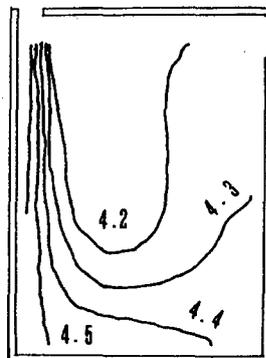


図7 200m<sup>3</sup>/hr海水導入時の溶存酸素濃度の計算結果(ヒマ活動時、地下水10m<sup>3</sup>/hr:単位ml/l)

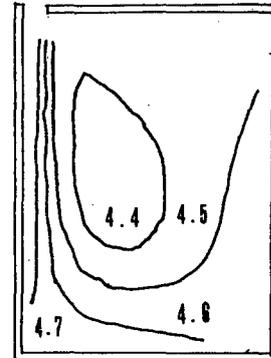


図8 300m<sup>3</sup>/hr海水導入時の溶存酸素濃度の計算結果(ヒマ活動時、地下水10m<sup>3</sup>/hr:単位ml/l)

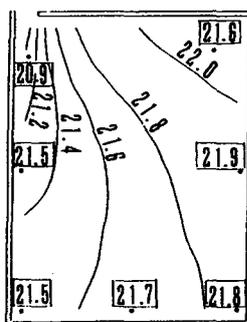


図9 水温の実測値と計算値の分布(1992年6月10日18時)

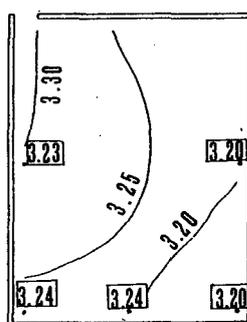


図10 塩分の実測値と計算値の分布(1992年6月10日21時)

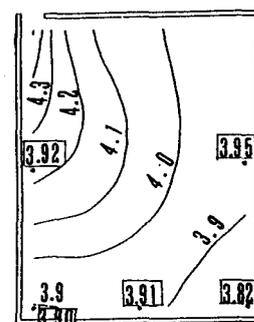


図11 DO濃度の実測値と計算値の分布(1992年6月11日6時)

に示す。また、計算に用いた各種の係数と境界条件を表1の設定値2に示す。

### 2) 平成3年度の結果

10m角の池での水質変化を図12に示す。15日16時20分に池の水位がポンプアップできないほどに低下したため排水をやめ、16日0時には海岸地下水の湧出により、池の水位はほぼ回復した。その間水温は海水温より1度低い15.8°C付近でほぼ一定であった。一方DOは昼間の排水中も減少を続け、16:20に2.9ml/lとなった。湧出水のDOはこれ以下であると判断した。また、ある程度水位が回復した21時と24時のデータから消費速度を単純に計算すると43.2ml/m<sup>3</sup>/hと見積もることができる。塩分は全期間通じて1.0~1.3%と低かった。

池と海の水位差と湧水量の関係を図13に示す。陸域からの湧水量は海と池の水位が等しい状態での値であると考え、3.5ton/hrと見積もることができる。池の周囲長(7/4倍)やヘッド差(1.5倍)を考慮して実際に造成される中間育成池には10ton/hrの湧水量があると推定した。この結果、浅層から湧出する地下水は量質とも飼育に適さないことが判った。

### 3) 平成4年度調査結果<sup>10)</sup>

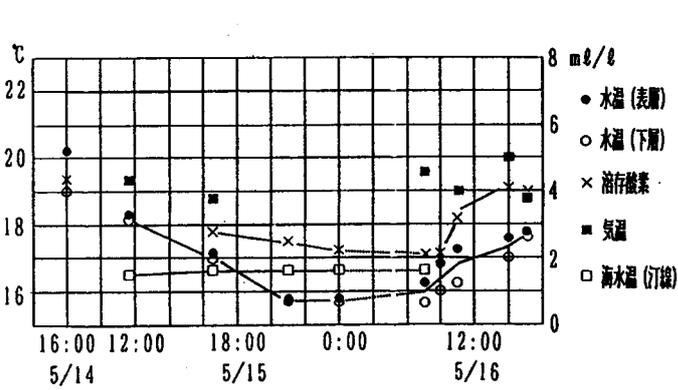


図12 10×10m 試験池の水質変化

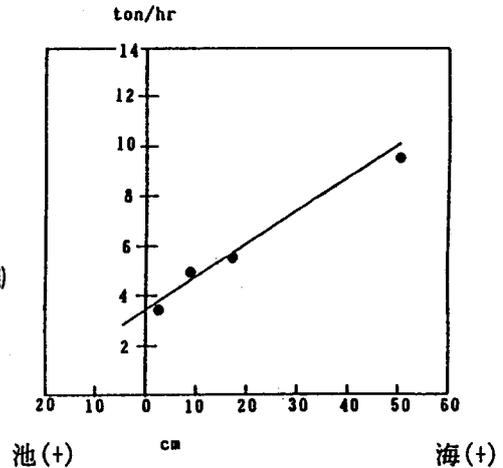


図13 池と海の水位差による湧水量の変化

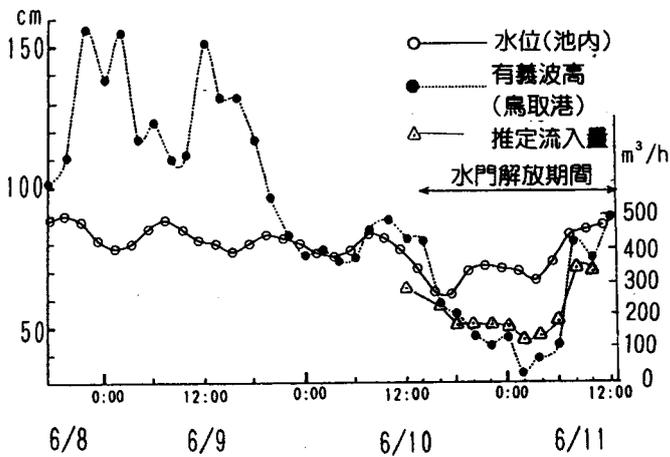


図14 池内の水位と有義波高の経時変化(1992年6月)

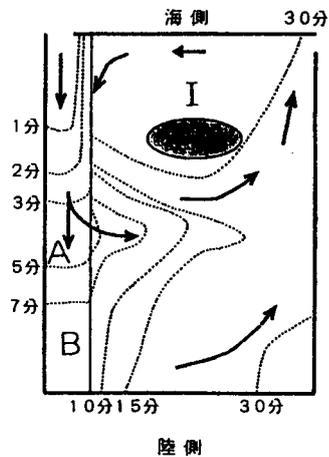


図15 染料の分散状況

(1) 水位及び波高変化

図14に中間育成池の水位と鳥取港の波高データを示す。池内水位は10日9時から半日程度、水位の低い状態が続き、その後回復した。波高に関しては8日から9日にかけて時化状態で、北側の矢板からの越波が起こっていた。その後徐々に波高は小さくなり、10日17時～11日6時までには50cm以下で穏やかであった。池内のA点での有義波高は、観測期間中を通じ5～12cm程度であった。

(2) 流況

中間育成池の取入口は10日13時～11日13時まで最も西側の1孔だけ開放した。中の仕切り網が吹かれるようになったため、午後には取入口を閉めた。

池内の流動を調べるために取入口に染料を投入し、その分散状況(図15)を観察した。仕切り網が壁のようになり側方には拡散が抑えられている。染料先端の速度は、投入後1分ごとに約16cm/s, 12.5cm/s, 8.7cm/sであった。染料は、初め取入口から陸側に向かって進み、1時間後には染料が池全体に広がった。最も染料の分散が遅い領域は、前面矢板の背後であった。

(3) 水温変化

A・B・C・D・E・Iの水温は上下二層で測定したが、水温差はほとんどないので平均して図16に示す。汀線部の水温は沖側(H点)に比べ、輻射熱で暖められていることが分かる。池内F, G地点では、14時～14時半頃に、A点では16時半(21.8℃)に、陸側C～Eでは18時に最高水温(21.7～8℃)が現れた。

(4) 塩分変化

図17に下層(池底上10cm)の塩分変化を示す。池全体としては外海水に比べ1%程度低く推移しているが、CTDによって連続観測したA点のデータから、10日は特別に塩分が低く、その他の日は33.78%

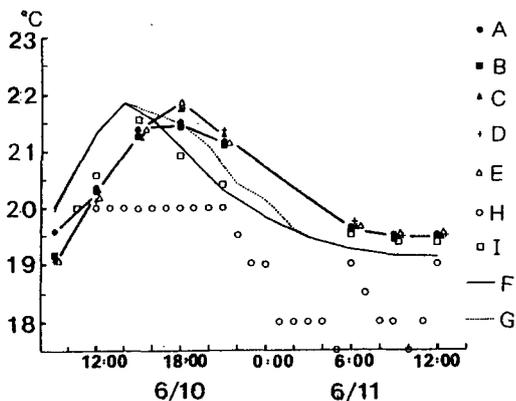


図16 水温の経時変化(1992年6月:H点の分解能は0.5℃)

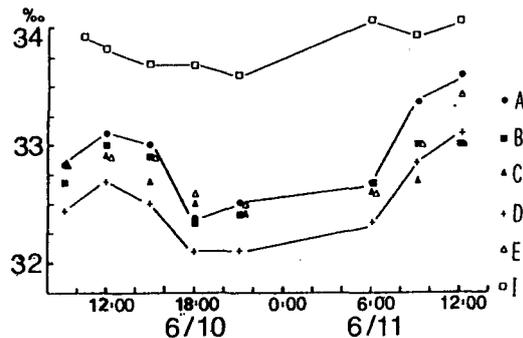


図17 塩分の経時変化(1992年6月)

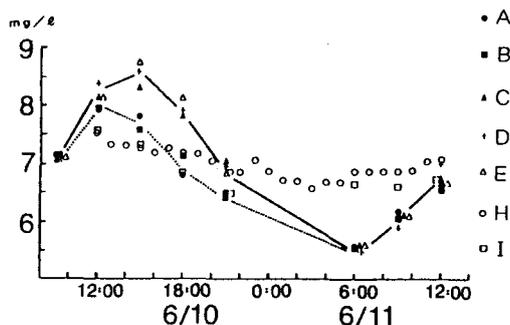


図18 溶存酸素濃度の経時変化(1992年6月)

で推移しており、外海水と1%もの差はないと考えられる。観測結果からD地点が他点に比べ少し低くこの付近より地下水の湧出があると考えられる。湧水は淡水と仮定し池内の塩分低下量より湧水量を推定すると、平均 $7\text{m}^3/\text{hr}$ と計算される。

#### (5) 溶存酸素濃度変化

図18に溶存酸素濃度変化を示す。外海水(H・I)は、 $7\sim 7.5\text{mg}/\text{l}$ の範囲内で変動幅は小さい。外海水が入ってくるA・Bは12時で最高値が現れ、その後低下していく。A・Bはヒラメが放流されている場所でもある。C・D・Eは、15時で最高値が現れ、その後減少する。3日間自動観測していたC点でのデータより最低値は早朝(午前5~6時頃)に出現し、水門を閉めていた10日の早朝には飽和度がほぼ60%まで減少した。また快晴の日中(午後3時頃)では池の陸側で110%程度まで上昇した。流入海水よりも池内の方が濃度が日中高くなっているのは、植物プランクトンが酸素を生産しているからであり、夜間にこれが酸素消費に転じる。

#### (6) 溶存酸素法

酸素瓶を用いて、FとG点のそれぞれ上層と下層で測定した結果、暗瓶による酸素消費速度は、G点下層の値を除外して平均すると、 $0.097\text{mg}/\text{l}/\text{hr}$ となる。

#### (7) 海水流入量の推定

今回の現地観測において、流速の測定が不備であったため、染料パッチの先端速度を最大流速と見なして噴流公式より流入部の流速を推定し、取水幅と水深を乗じて流入量を計算するとおよそ $220\text{m}^3/\text{hr}$ となる。また、波高より算出した流量は図14に併記した。

#### 4) 平成5年度の調査結果

5月25日から6月11日までの観測期間中、流速計と砂面計は計測できたが、波高計のうち整流池に設置したもののみ計測できたの2台は欠測となった。その間、次のような測定条件の変化があった。5月27日午後整流口にネットスクリーンを取り付けた。排水口は観測当初、水底からDL+0mまで板戸で塞がれていたが、6月3日午前中に高波高により排水口角落としが破れた。高波に対処するため6月4日18時から8日18時まで取水側の水門を閉めた。6月8日に排水口の改修に掛かり鉄製戸を底から60~90cm、その上にグレーチングを取り付けた。

#### (1) 導水量

調整池開口部における平均流入流速の経時変化を図19に示す。流速は0から1.2mに分布し、平均 $0.3\text{m}/\text{s}$ を示している。開口部は $0.35\text{m}\times 0.14\text{m}$ の大きさのものが5口と矢板の継ぎ目が約 $0.1\text{m}^2$ 開いているので合計断面積は $0.35\text{m}^2$ となる。従って、平均導水量は約 $378\text{m}^3/\text{hr}$ となった。観測期間中、平均潮位が低かったため導水効率は低い(図20)。

#### (2) 伝達波高

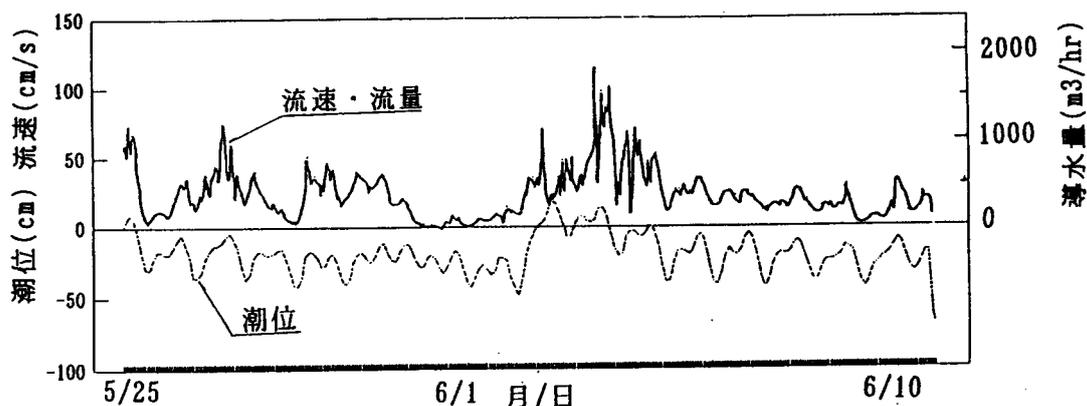


図19 給水孔よりの流入流速(流量)・潮位の時間変化

調整池内の波高と潮位の関係を図 2 1 に示す。調整池への伝達波高は1~32cmとなった。育成池の波高は欠測となったが、エネルギーの分散を考慮すると育成池内側の噴き出し口周辺での最大波高は、凡そ次のように算定できる。

調整池波高×{開口断面比×(1-エネルギー損失係数)}<sup>1/2</sup> = 32cm×(0.014×0.5)<sup>1/2</sup> = 3cm となり、導水口からの侵入波はないものとみなせる。従って、池内の波は排出口からの回折波や矢板壁からの越波が主体となる。

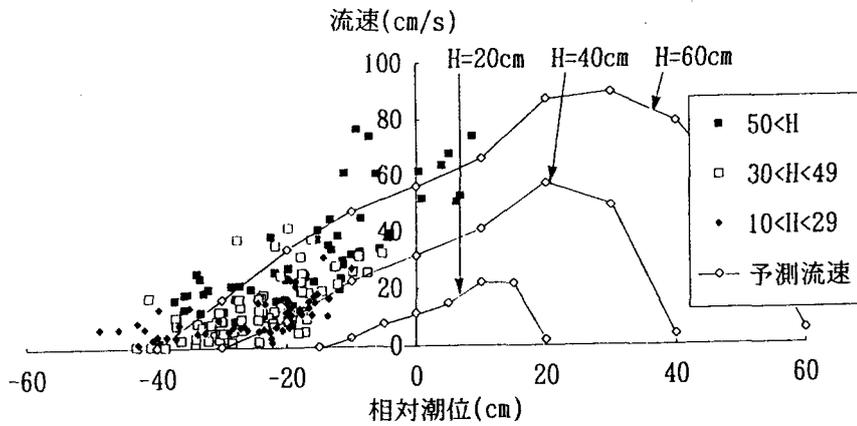


図 2 0 流入流速と潮位の関係

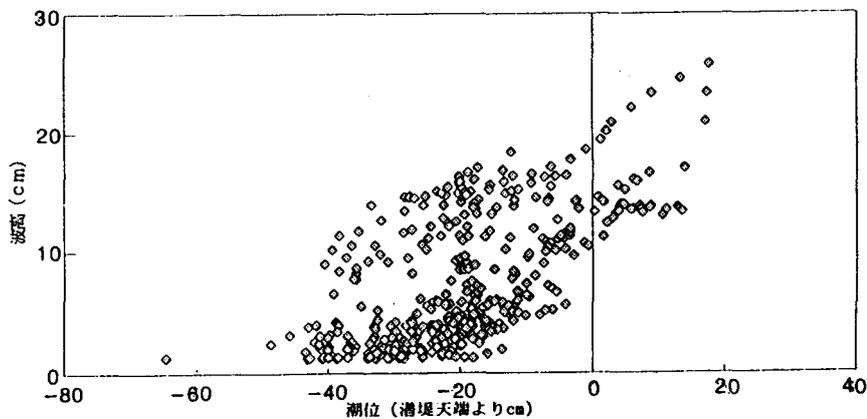


図 2 1 遊水池伝達波高と潮位の関係

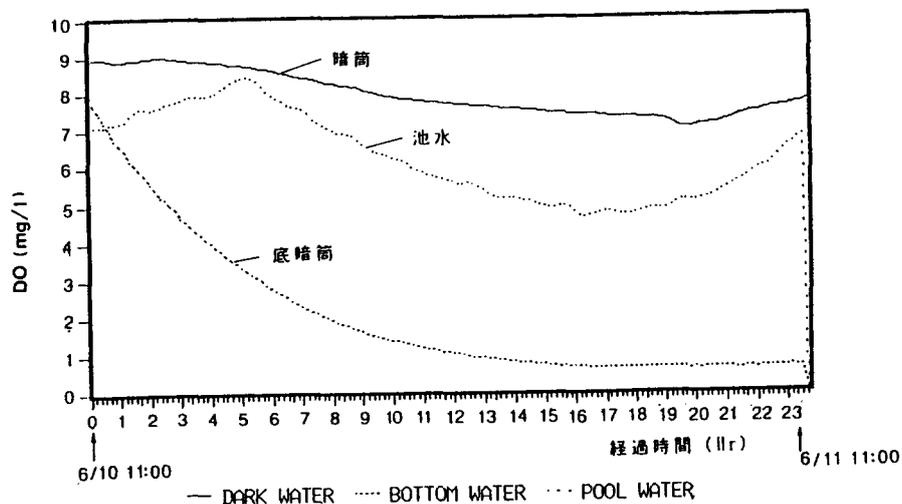


図 2 2 中間育成池内の溶存酸素濃度の経時変化 (1993年 6月)

### (3) 溶存酸素量の変化と酸素消費速度

図22に池水の1日間のDO経時変化を暗筒のデータと併せて示す。午後4時頃最大値(8.4mg/l)となり、朝4時頃最低値(4.7mg/l)を示した。暗筒の方で上方の実線は水中、下は砂上の値であり、後者の低下率が大きくかつ指数関数的である。そこで、DO濃度の減少率(暗箱中の消費速度)を調べて見ると図23のように、砂上の値は溶存酸素が1.5mg/l以上では一定値(17.0%/hr)を示した。また、池水の夜間のDO消費速度は約6%/hr、暗箱水中は1.5%/hrを示した。

すなわち、砂上の値から水中の値を差し引くと、底泥による消費速度は(17.0-1.5)%/hr=15.5%/hrとなる。これより底泥の単位面積当たりDO消費速度を算出すると、  
 底泥によるDO消費速度×C(DO濃度)×水柱高 = 0.155/hr × Cmg/l×1000l/m<sup>3</sup> × 0.4m = 62×C mg/m<sup>2</sup>/hr

この値から1日間の平均のDO濃度を用いて池全域の消費速度を求めると、

$$62 \times 6.3 \text{mg/m}^2/\text{hr} \times 24 \text{hr/day} \times 1200 \text{m}^2 = 11,249 \text{g/day}$$

と餌の散布による量(4000 g/day:消費する酸素も同程度)より多くなるので不合理な点もある。この底の影響が池水にも影響を与え、6%/hrという高い値を示したのではないかと推察される。

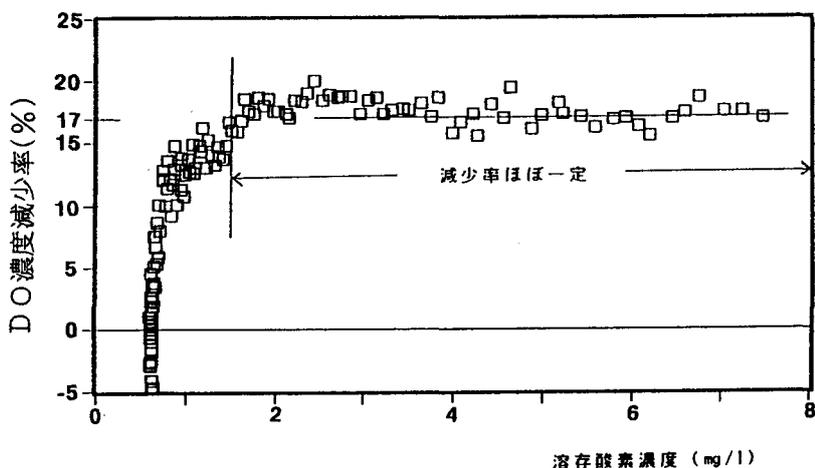


図23 溶存酸素濃度とその減少率の関係 (1993年6月)

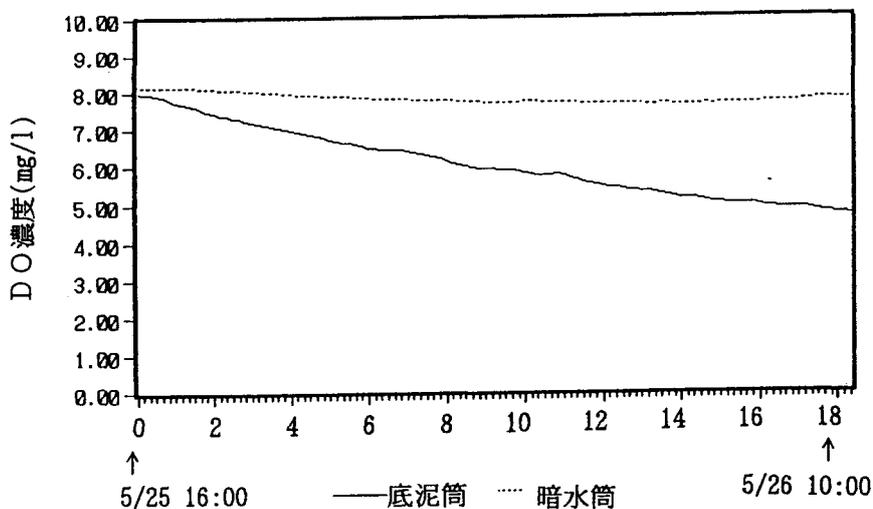


図24 中間育成池内の溶存酸素濃度の経時変化 (1993年5月)

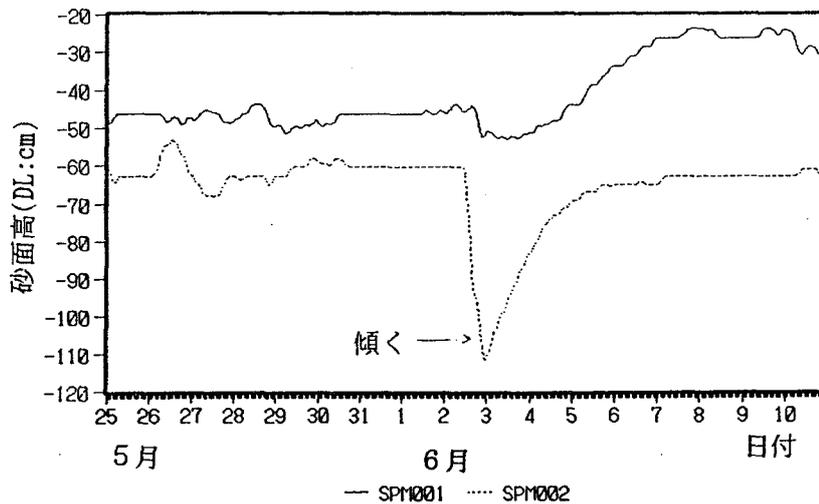


図 2 5 遊水部内の砂面高の経時変化

一方、図 2 4 に示すように計器は不調ではあるが、5月のヒラメ放養直前の測定値は砂上暗箱で 2.8%/hr、海水暗箱で 0.7%/hrを示した。これより、上と同様に単位面積あたり DO 消費速度を求めると、67mg/m<sup>2</sup>/hr となり、放養開始前は 1/6であったことが分かる。

#### (4) 整流池の砂面変化と体積量

整流部に設置した 2 本の砂面計の経時変化を図 2 5 に示す。6 月 3 日に大波が来襲したため、砂面計の根元が DL-1.6m まで侵食され 1 本は傾いたが、その後時化が治まりかけて急速に堆積した様子を示している。この前後のレベル測量の結果、16 日間で 5.4m<sup>3</sup> の堆積があった。0.34m<sup>3</sup>/日の漂砂の流入があり、整流池は 3 カ月間は機能保持できる計算になるが、冬季波浪時には維持できないであろう。

## 考 察

### 1) 池の水質環境モデル

このモデルは、出口など波浪による拡散の影響が強い部分を除いて、池内の水質分布予測に有効である。このモデルにより必要な導水量を求めることが出来た。さらに、このモデルは養殖場の水質予測にも適用できる。しかし、池の形状が単純で、分布が一様な場合や一様勾配になる場合は、単純にその平均値（1 ボックスモデル）で推定できるであろう。また、このモデルにより次のことが確かめられた。①浅い池では、通常の風速で DO を上げ、水温を下げるのに効果がある。②導水量に比べて地下水湧水量は小さければ、砂浜帯の素堀池でも水質への影響度は大きくない。このモデルを実用的なものにするには、水質環境モデルに用いる各種現場常数を求める必要がある。

### 2) 現地調査

水質環境モデルに用いる各種現場常数を求め、予測手法の妥当性を確かめた。シミュレーション結果は、流況調査より、水塊の移動、水温、酸素濃度、塩分など、ほぼ妥当な値となった。ただ排出口付近は侵入波による拡散が表現されていない。地下水による塩分の低下は、本中間育成地では 1% 程度なので塩分耐性があるヒラメ稚魚には問題がないと考えている。この海岸地下水の湧出量を適切に予測する調査手法の確立は、将来この造成手法が各地で広く採用されるようになった場合に、不可欠となるであろう。ヒラメ稚魚の中間育成が 6 月までなら、池内水温の上昇も障害になるほどではないであろう。最も制約となる条件は溶存酸素である。

### 3) 酸素消費速度

中間育成池内の溶存酸素収支における各要因の大きさについて試算する。溶存酸素収支式を以下のよう

に考える。

$$\text{池内の酸素変化量(①)} = \text{海水流入量} \times (\text{流入濃度} - \text{流出濃度})(\text{②}) + \text{大気からの溶入量(③)} + \text{植物プランクトンによる生産量(④)} - \text{ヒラメによる消費量(⑤)} - \text{水中の酸素消費量(⑥)} - \text{底質の酸素消費量(⑦)} \\ \dots\dots\dots(19)$$

(19)式では、⑦項以外については実測値もしくは実験値を基にして独立に見積もることが可能であるが、⑦項は今回測定を行っていない。よって図18より溶存酸素濃度は夜間のその変化が小さい区間ではほぼ直線的に減少すると仮定して、10日21時から11日6時までのデータから(19)式を用いて推定した。

①池内の酸素変化量： 図18より10日21時から11日6時まで、1mg/lの減少である。1時間あたりでは0.11mg/l/hrとなる。

②海水流入量×(流入濃度－流出濃度)： 海水流入量は計算により平均160m<sup>3</sup>/hr、流入海水のDO濃度6.6mg/l、流出海水のDO濃度6.25mg/l(排出口に近いE点の平均)とすると、  
 $160 \times (6.6 - 6.25) / (40 \times 30 \times 1.2) = 0.039 \text{mg/l/hr}$ と計算される。

③大気からの溶入量：

$$(U_{10} = U_0(10/h_0)^{1/7}) \dots\dots\dots(20)$$

U<sub>0</sub>：地上10mでの風速(m/s)， h<sub>0</sub>：風速測定地点の高さ(m)

上述した(4)～(6)式群を用い、大気からの溶入量を見積もる。先ず地上1mの風速は、実測データより観測期間を通じておおよそ2m/sであった。Nは10日21時と11日6時の平均値と考えると、 $N = 4.41 \times 10^{-3} \text{mg/m}^3/\text{s}$ となる。他の項と比較するため単位を統一すると、0.013mg/l/hrとなる。

④植物プランクトンによる酸素生産量： 夜間のため生産量はゼロとみなす。

⑤ヒラメによる消費量： ヒラメの酸素消費量については、今までにいくつかの実験が報告されている。<sup>11, 12, 13)</sup>しかし、中間育成を実施する全長30mm～60mm程度の稚魚についての実験データは少ない。数少ないデータから今回は妥当な値として、平常酸素消費量として500ml/kg/hrを採用した。観測期間中は、40mmのヒラメ12万尾が放流されていた。40mmのヒラメの体重は(21)式(28)を用いて計算できる。

$$W = 1.35113 \times 10^{-5} L^{2.88984} \dots\dots\dots(21)$$

ここで、W：体重(g)， L：全長(mm)である。よって12万尾分の総重量は69.1kgと計算され、ヒラメによる消費量は、 $500 \times 69.1 / (30 \times 40 \times 1.2 \times 1000) / 0.7 = 0.034 \text{mg/l/hr}$ と求まる。

⑥水中の酸素消費量： 暗瓶での実測データから、0.097mg/l/hrと求まる。

⑦底質の酸素消費量： 以上求めた値を(19)式に代入し、底質の酸素消費量をxとおくと、

$$-0.11 = 0.039 + 0.013 - 0.034 - 0.097 - x, \quad \therefore x = 0.031 \text{mg/l/hr}$$

と求まる。しかしこの値には、それぞれの要因の推定に伴う誤差が含まれていることに留意すべきである。その誤差をこれ以上細かく論じることは出来ないで、ここではこの値はすべて底質の酸素消費量であるとする。一般的な単位底面積あたりの消費量に単位換算すると、 $0.031 \times (30 \times 40 \times 1.2 \times 1000) / (30 \times 40) = 37.2 \text{mg/m}^2/\text{hr}$ となる。

酸素消費要因の比率では、水中の酸素消費つまり動植物プランクトンの呼吸、溶存・懸濁態有機物のバクテリアによる酸化、化学的酸化(矢板から溶け出した鉄イオンの酸化等)等による消費がもっとも大きく全体の6割を占め、ヒラメの呼吸による消費と底質の消費がそれぞれ2割を占めている。

これに対し平成5年度のヒラメ稚魚の飼育中は、(20)式で、

②海水流入量は、 $160 \text{m}^3/\text{hr} \times 10001/\text{m}^3 \times (6.6 \text{mg/l} - 6.0 \text{mg/l}) / (1200 \text{m}^2 \times 1.2 \text{m} \times 10001/\text{m}^3) = 0.067 \text{mg/l/hr}$ 。

③大気からの溶入量は前年と同じ0.013mg/l/hr。

④植物プランクトンによる生産量は夜間なので0とした。

⑤ヒラメによる消費量は前年と同じ0.034mg/l/hrとした。

⑥水中の酸素消費量は実測より $6.3 \text{mg/l} \times 0.015 = 0.095 \text{mg/l/hr}$ 。

⑦底質の酸素消費量は実測より $62 \times 6.3 \text{mg/m}^2/\text{hr} / (12001/\text{m}^2) = 0.325 \text{mg/l/hr}$

従って、①池内の酸素変化量の右辺は、 $0.067+0.013+0-0.034-0.095-0.325$ mg/l/hr= $-0.374$ mg/l/hr と計算され、実測値（平均DO濃度×低減率= $6.3$ mg× $(-0.06)$ ）= $-0.375$ mg/l/hr）とほぼ一致した。この内、マイナス分は $0.454$ mg/l/hrとなり、底質の消費分が71%を占める。このため、池内の水質を良好に保つためには概算で $800\text{m}^3$ /hrの導水が必要となる。

底質の酸素消費速度に関しては、養殖場等において過去に測定された例<sup>14, 15, 16)</sup>では水温 20°C前後で $10.8\sim 53$ mg/m<sup>2</sup>/hrである。よって平成4年度の $37.2$ mg/m<sup>2</sup>/hrや5年度の育成前の $67$ mg/m<sup>2</sup>/hrという消費速度は、ほぼ妥当と考えられるが、5年度育成期間の $391$ mg/m<sup>2</sup>/hrという値は異常に高い。平成4年度までは、進入波浪による振動流で、腐泥成分が浮遊しやすくなるため分散・流亡しやすかったが、遊水部を設けて進入波を消したことにより、残餌や排泄物のみでなく、水中浮遊物の堆積が生じ底質の悪化が早まったのではないかと懸念される。そのほか投餌を池全体に拡げたことによる摂餌率の低下はなかったろうか。中間育成池は養殖場のように投餌を行うので、ヒラメが効率よく捕食することと、残餌や排泄物を池外に排出機能を維持するため、ヒラメ稚魚の成育に支障がなければ過剰な静穏化は避けるべきであろう。

#### 4) 溶存酸素の単純な収支計算

中間育成池全体としての酸素消費速度は、 $0.162$ mg/l/hrとなる。この値を用いると最低限必要な海水流入量が単純ではあるが簡単に求めることができる。例えば、導水した水の溶存酸素濃度が排水口で $1$ mg/l減少することを許容するとすると、不安定な風による溶入や酸素の生産がない場合、上述した値を用いると、次の収支式からおおよそ $233\text{m}^3$ /hrの海水流入量が必要であると計算される。

$$0.162\text{mg/l/hr} \times 1,440,000\text{l} = 1\text{mg/l} \times Q \quad \therefore Q = 233,200\text{l} = 233\text{m}^3$$

同様に、 $0.454$ mg/lの消費速度の場合、 $654\text{m}^3$ /hrの海水導入が必要である。

一方、最悪の場合を想定し風も酸素生産も導水も止まった場合、溶存酸素量は指数関数的の減少する。減少速度を $k$ 、時間を $T$ とすると、溶存酸素量 $C$ は(22)式で表される。

$$C = C_0(1-k)T \quad C_0: \text{溶存酸素濃度初期値} \cdots \cdots \cdots (22)$$

鳥取水試によると、ヒラメが酸欠死する限界は約 $0.7$ mg/l(水温 $23\sim 24^\circ\text{C}$ )と報告されており<sup>13)</sup>、平成5年度の値は  $k=0.17 \times 1.2=0.204$ 、 $C_0=5$ mg/lとすると、約9時間で $0.7$ mg/lを切ることになる。最悪の場合でもこれを避ける何らかの手段を講ずる必要がある。今回の観測はヒラメ放流後投餌を始めて10日後であり底質は投餌を続ける限り経時的に汚染されるものであるから、継続して監視を行う必要がある。さらに、どの程度の波浪までヒラメの中間育成に許されるか検討が必要であろう。

## 摘 要

砂浜海岸に造成されたヒラメ中間育成池の海水交換手法を確立するため、中間育成場の水質環境に適したモデルを改良作成し、その水質環境（特に流動・水温・塩分・溶存酸素）に関する現場常数を明らかにするため現地調査を行った。さらに、波を利用した潜堤付海水導入効の導水能力を再評価し、算定式を改良した。その結果、以下のことが明らかになった。

①採用した潜堤付導入工の海水流入量は、潮位と波高によって変化する。平成4年度の観測期間中は $130\sim 340\text{m}^3$ /hrと計算された。平成5年度は $0\sim 1400$ 、平均 $378\text{m}^3$ /hrが観測された。

②水質環境の測定を行った結果、水深1mの育成池の水温は $2^\circ\text{C}$ 程外海より高くなる。池には $10\text{m}^3$ /hr 未満で海岸地下水が湧出する。この量は水位が低下することにより増加すると推定される。しかし、これらの要素はヒラメ稚魚に悪影響を及ぼす程ではない。従って、必要な導水量を規定するのは、一般に池の溶存酸素濃度である。

③環境変化予測モデルも池の環境をよく予想していた。ただ、水中や底質の酸素消費速度の推定がむずかしい。

④溶存酸素濃度は日変化が激しく、晴天の日中は過飽和状態で、夜間に減少し、その最低値は、早朝（

時頃)に現れた。通常、日中は飽和状態にあるので夜間の低下のみを予測すれば良いであろう。

⑤池全体としての酸素消費速度は平成4年度は0.162mg/l/hrと推定され、その内訳は水中で消費される割合が6割、ヒラメの呼吸が2割、底質で消費される割合が2割であった。平成5年度の現地観測データから、0.454mg/l/hrとなり、底質の消費分が7割を占めた。この変化の原因は漁場の老化というよりも、遊水部を設けて波浪を抑える改変を行ったことによるのではないか。

⑥このため、池内の水質を良好に保つためには概算で平成4年度は200m<sup>3</sup>/hr、平成5年度は800m<sup>3</sup>/hrの導水が必要となる。

築堤式中間育成池の水理環境の予測手法と波を利用した潜堤付海水導入工の導水能力などを明らかにした。また、ヒラメ稚魚の波に対する耐性など生態学的知見のほか、工学的にも潮位変動時の導水量の向上や漂砂の侵入量の削減対策など改良点が残されている。さらに研究を行えば、その海域に合ったより経済的な構造物の計画設計が可能であろう。また、導水量が豊富なことから小湾の水質底質改良にも利用できるであろう。

## 謝 辞

貴重な意見を戴いたヒラメ中間育成施設造成技術開発調査検討委員会委員の方々、そして現地調査に御協力戴いた鳥取県水産課、同水産試験場栽培漁業部の方々に対して、ここに記して謝意を表します。

## 引用文献

- 1)水産庁・社団法人日本栽培漁業協会,1992:平成2年度栽培漁業種苗生産,入手・放流実績(全国),p132.
- 2)三木教立・鶴戸口俊克・大河原禎親・柳原重臣・藤本義則,1992:鳥取県泊地区におけるヒラメ中間育成場,平成4年度水産工学研究推進全国会議講演集,p.11.
- 3)静岡県栽培漁業センター・静岡県水産試験場,1990:平成元年度放流技術開発事業報告書(太平洋ヒラメ班),287-347.
- 4)藤原正幸・久保敏・武内智行,1991:砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境予測モデルの開発,平成3年度日本水産工学会学術講演会論文集,31-32.
- 5)藤原正幸・久保敏・山本正昭,1992:海岸地下水を考慮した中間育成池の水質環境予測シミュレーション,平成4年度日本水産工学会学術講演会論文集,103-104.
- 6) Msasayuki FUJIWARA,Satoshi KUBO and Masaaki YAMAMOTO,1993:A Numerical Model on Estimating Reasonable Inflow Rate in Nursery Aquaculture Pond.水産工学,30-2,119-128.
- 7)Donald Mackay and Andrew T.K.Yeun,1983:Mass TransferCoefficient Correlations for Volatili-zation of Organic Solutes from Water, Environ. Sci. Technol,17,211-217.
- 8)山本正昭・中泉昌光・間辺本文,1988:海水導入を目的とした潜堤付防波堤の開発(I)-機能と潜堤の形状の検討-,水産工学研究所技報(水産土木),10,39-55.
- 9)山本正昭:潜堤付海水導入工の計画と設計,水産工学研究所技報,16,1-12,1994.
- 10)藤原正幸・久保敏・山本正昭,1993:砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境,水産工学研究所技報,15,17-30.
- 11)日向野純也・安永義暢,1986:酸素消費量から見たヒラメ仔魚*Paralichthys olivaceus*の低塩分耐性について,水産工学研究所技報(水産土木),7,33-39.
- 12)本田晴朗・菊池弘太郎・佐伯功・植本弘明・清野通康,1988:飼育実験と酸素消費量より推定したヒラメの飼育限界密度,電力中央研究所報告 U87074,1-19.
- 13)鳥取県,1994:ヒラメ中間育成施設造成技術開発調査報告書.
- 14)高知県水産試験場,1977:昭和51年度魚類養殖環境自家汚染防除技術開発試験-III-,pp.1-48.
- 15)田中啓陽・井上裕雄,1968:昭和42年度農林水産業特別研究報告書(前川・井上編),73-82.
- 16)福岡県豊前水産試験場,1992:平成3年度負酸素水塊被害防止対策事業報告書,1-12.