

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¹⁾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^{2, 3)}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1200m²の中間育成施設が造成された。事業計画では、30mmサイ

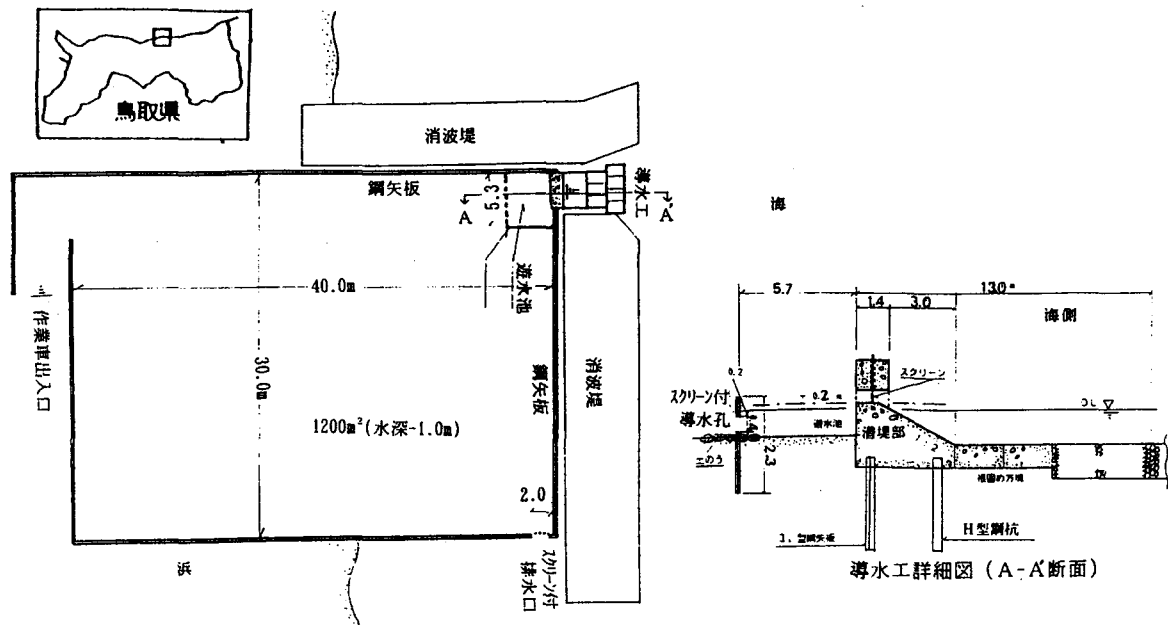


図1 中間育成池の概要図

* 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^{4, 5, 6)}

【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。

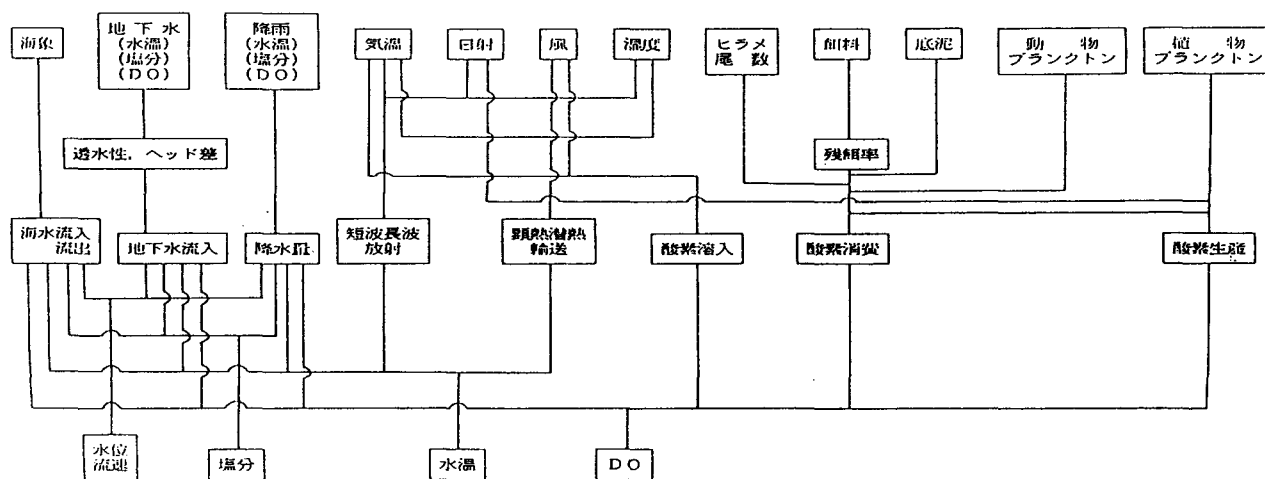


図2 ヒラメ中間育成池の水質環境予測モデルの組立

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、 ρ ：海水の密度、 p ：圧力、 u ：流速ベクトル、 c ：水質変数、 ν ：動粘性係数、 K ：拡散係数、 R ：増減項、 ∇ ：勾配ベクトル、 Δ ：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⁷⁾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 ϕ が分かれば計算可能であるが, ϕ 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

★

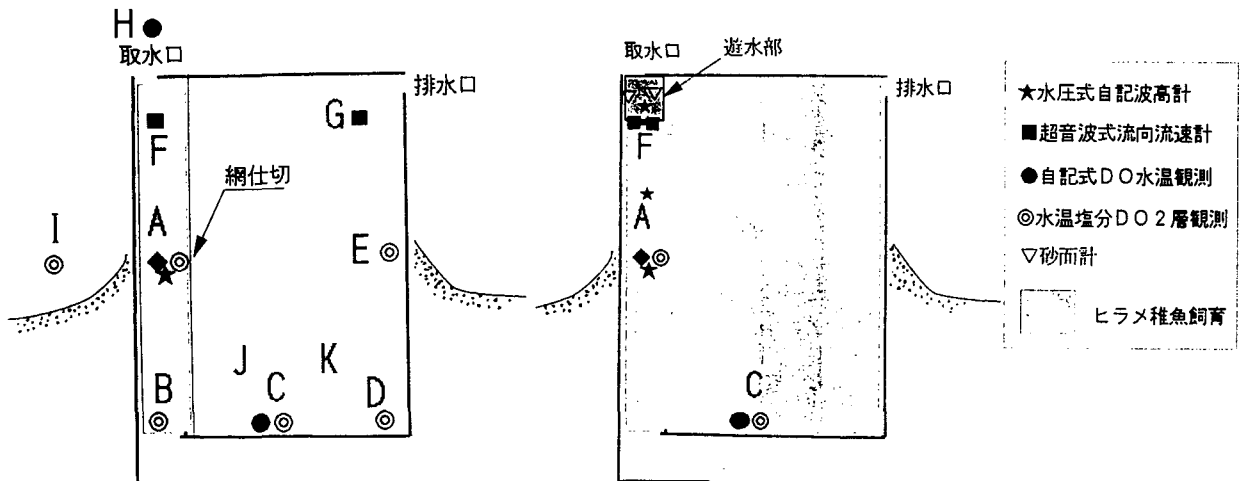


図3 調査機器とその配置 (1992年6月)

図4 調査機器とその配置 (1993年5,6月)

【導水量計算手法の改良】

不透過堤で潮位が潜堤基天端と一致している時の海溝導水量は(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水量の計算法を既報の実験よりまともな値にした。

$$Q_{in} = C_{in} \cdot (C_{in} \cdot (gH^3))^{1/2} \quad C_{in} = 0.022 \tanh(4.0A/(BH)) \quad \dots\dots\dots (10)$$

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 Δh は3つの部それぞれで $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ が費やされるが、

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

潜堤での流量 Q と水位差 Δh の関係は半管替堤の公式を準用すると、(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 cm/s^2) である。

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

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

$$h_2/h_1 < 0.71 \text{ の時 } C_{in} = 0.32$$

$$h_2/h_1 > 0.71 \text{ の時 } C_{in} = 0.45 \cdot h_2/h_1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

水頭差 Δh_1 と流量の関係はその間抵抗 R_1 とすると(14)式のようになる。

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

孔空き堤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 R_2 とすると(15)式となる。

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

出口の損失水頭 Δh_3 が無視できるほど小さいと仮定すると、

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

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

防波堤前面に潜堤を設けたことによる遊歩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		係数	設定値1	設定値2
流動 計算	水床摩擦係数	0.004	0.004 m ² /s	0.004 m ² /s
	海面摩擦係数	—	—	0.0013
	マンソグの粗度係数	0.025	0.025	0.025
水 質 計 算	水床粗粒流散係数	0.002	0.002 m ² /s	0.001 m ² /s
	雲量	7.5	7.5	7.5
	風速	0.7	0.7 m/s	0.27 m/s
	湿度	70%	70%	70%
日射量	—	—	1987年と1988年の8月の平均最高気温(32℃)と平均最低気温(22℃)を正弦曲線補間。 8月平均全日日射量440 cal/cm ² /day の2倍を日中の平均日射量、その5倍を最高値と正弦曲線補間。	
溶存 酸 素	水床粗粒流散係数	—	—	0.001 m ² /s
	溶存酸素による消費量	0.01	0.01 ml/m ² /時(安静時)	0.008 ml/m ² /時(26℃安静時)
	底泥による消費量	0.01	0.01 ml/s/m ²	0.01 ml/s/m ²
液相相物移動係数	1.0	1.0 × 10 ⁻⁹ m/s 無風	11.0 × 10 ⁻⁹ m/s 無風 9.9 × 10 ⁻⁴ m/s 風速3 m/s	

$$h \Delta h = 49.49(H' - 0.666h) \quad (h \geq 0)$$

$$h \Delta h = 49.49(H' - h) \quad (h < 0) \quad (18)$$

ここに、 H' : 有義波高の0.666倍(m), ただし、 $h > 1.551H'$ 又は $h < -H'$ の時は h を $1.551H'$ または、 $-H'$ 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に設定値1に示す。気温と田水量に関しては、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°C ・塩分 33.4% ・ DO 5ml/l)、地下水の水質(水温 16°C ・塩分 3% ・ DO 2ml/l)を用いた。地下水は、池地の陸側から $1/4$ の領域で湧出する条件を課した。海水量流量は $1000, 2000, 3000\text{cm}^3/\text{hr}$ 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 DO の分布図を示す。適正な中間育成を行うためには DO 濃度が 4ml/l 以上である必要があると海水流量と DO の200 ton/ha が必要となる。そのケースで、田中水温に関して最も上昇した時、 22°C 程度上昇したまま塩濃濃度の低下は 15% 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

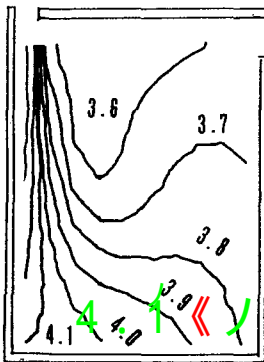


図6 1000 cm^3/hr 海水流入時の溶存酸素濃度の計算結果及び湧動時、地下水 $10\text{m}^3/\text{hr}$ 単位 ml/l

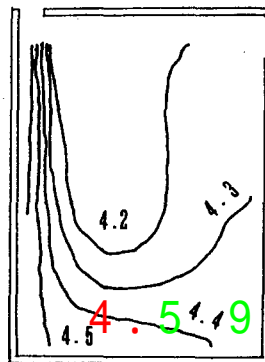


図7 2000 cm^3/hr 海水流入時の溶存酸素濃度の計算結果及び湧動時、地下水 $10\text{m}^3/\text{hr}$ 単位 ml/l



図8 3000 cm^3/hr 海水流入時の溶存酸素濃度の計算結果及び湧動時、地下水 $10\text{m}^3/\text{hr}$ 単位 ml/l

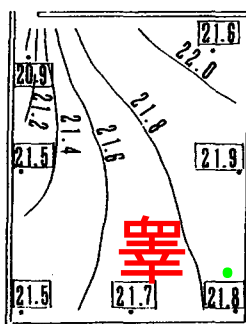


図9 水温の実測値と計算値の分布(1992年6月1日6時時)

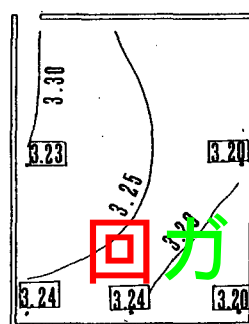


図10 塩分の実測値と計算値の分布(1992年6月1日6時時)

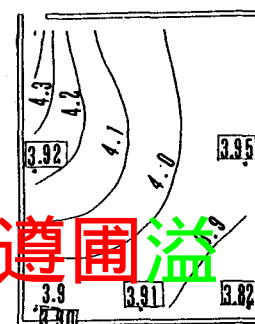


図11 DO濃度の実測値と計算値の分布(1992年6月1日6時時)

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33年度の結果

1) 0.0mの池での塩質変化を図12に示す。5日同時時29分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付近ではほぼ一定であった。一方Dの塩間排水中も減少を続け、16:20に2.9 g/mlとなった。湧出水のD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2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/m²/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)やヤドリ差(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) 平成年度調査結果¹⁾

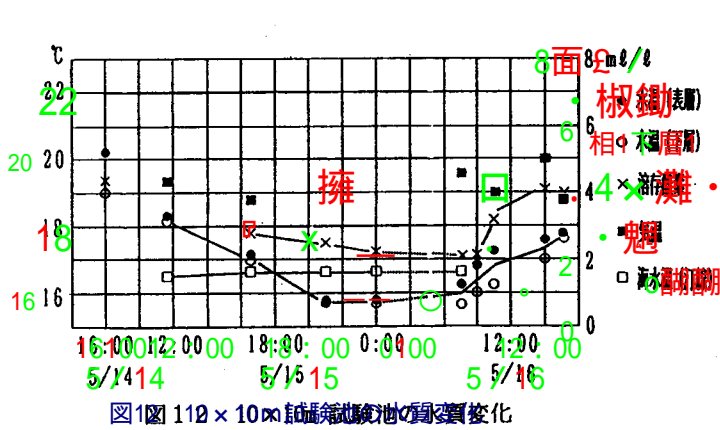


図12 112×10m 試験池の水温・塩質変化

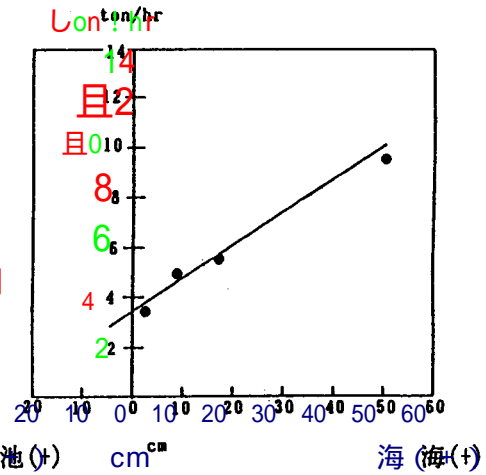


図13 池と海の水位差による湧水量の変化

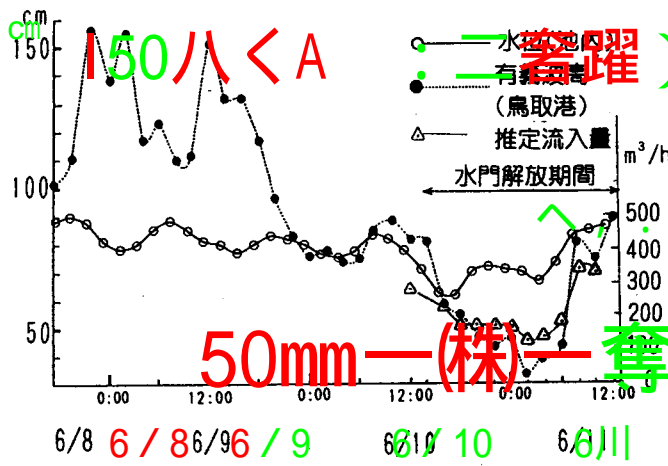


図14 池内池内の水面高と湧水量の経時変化(1992年6月)

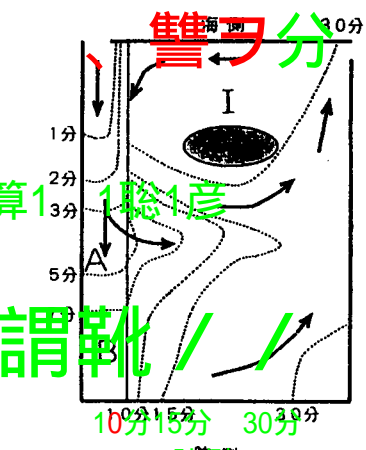


図15 染料染料分散状況

(1) 水位及び波高変化

図14は中間育成池の水位鳥取港波高データを示す。池内水位は10日9時頃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日にかけて特化状態で、北側の矢板からの越波が起っていた。その後徐々に波高は小さくなり、10日17時～11日3時まで50cm以下で穏やかであった。池内のA点での有機酸素は、観測期間中を平均15.5mg/l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。染料移動の速度は、投入後七分ほどに約16cm/s, 5分2.5cm/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時間経過後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、前面の矢板の背後であった。

(3) 水温変化

A・B・C・D・Eの水温は上下層層測定したが、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、放射熱で暖められていることが分かる。池内では、G地点では、14時～14時半頃に、A地点では15時半(21.88℃)に、陸側E～Dでは18時最高水温(21.78℃)が現れた。

(4) 塩分変化

図17は下層層池(池底100cm)の塩分変化を示す。池全体としては海水に比べ約1%程度低推推移しているが、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‰

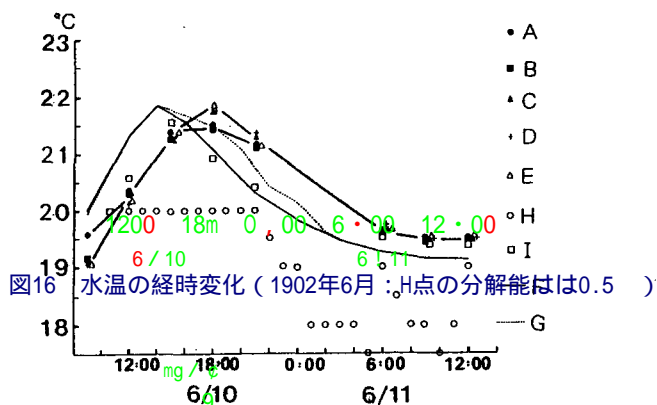


図16 水温の経時変化(1992年6月)A点の分解能は0.5℃

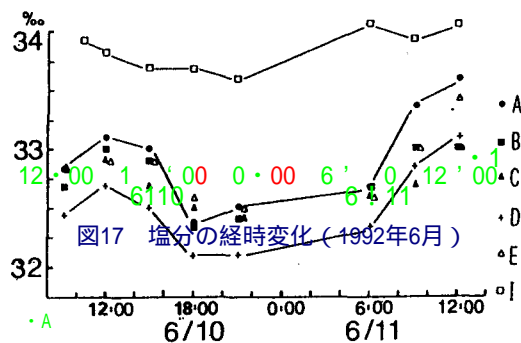


図17 塩分の経時変化(1992年6月)

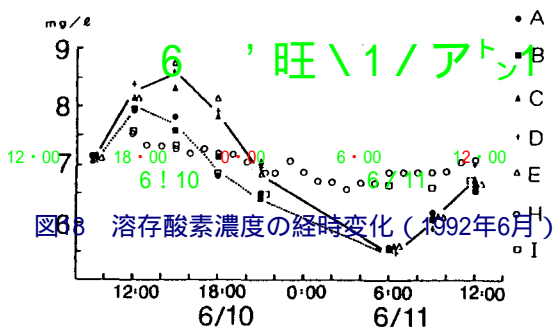


図18 溶存酸素濃度の経時変化(1992年6月)

で推移しており、外海水と1%ほどの差はないと考えられる。観測結果からD地点が他地点は比々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7cm³/hrと計算される。

(5) 溶存酸素濃度変化

図18 溶存酸素濃度変化を示す外海水(HIE)は、7~75mg/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はバラム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、水門を開けていた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点を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、0.097mg/l/hrとなる。

(7) 海海流流量推定

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、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量を計算するとおよそ220m³/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) 平成元年年度の調査結果

5月25日から6月1日までの観測期間中、流速計と水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0.1mまで板戸で塞がれていたが、6月3日午前中、高波の高さ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開けた。6月8日排水口の改修(排水口)鉄製戸を底から60~90cm、その出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。流速はかかる2m2m分布し、平均0.3m/sを示している。開口部は0.35m×0.14mの大きさのものが5口先板戸の継ぎ目が約0.1m²開いているので合計断面積は0.35m²となる。従って、平均導水量は約378m³/hrとなった。観測期間中、平均潮位低低かたため導水効率は低い(図20)。

(2) 任意波高

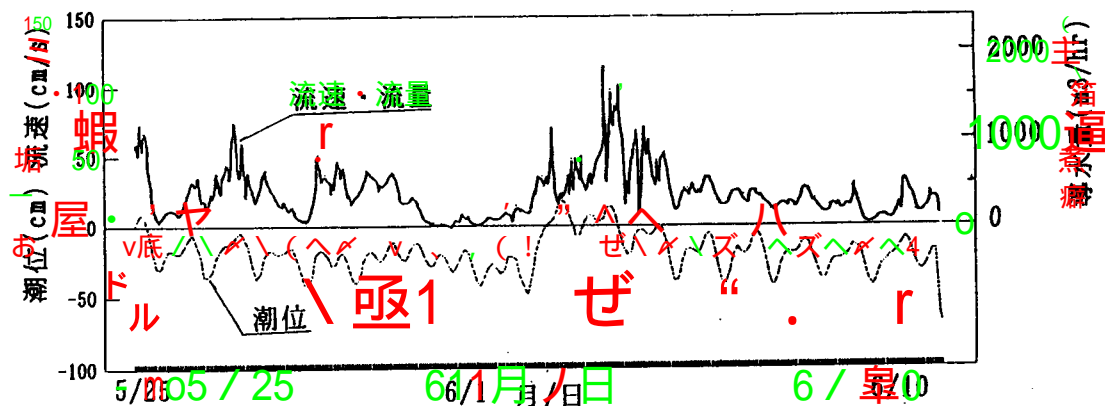


図19 給水給水孔の流入流速(流量)・潮位の時間変化

調整池内の波高と潮位の関係を図21に示す。調整池の仮定波高は13.32cmとなり、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 × 開閉断面比 × (1 - エネルギー損失損失係数) ² = 32cm × (0.1014 × 0.5) ² = 3cm ととなり、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。

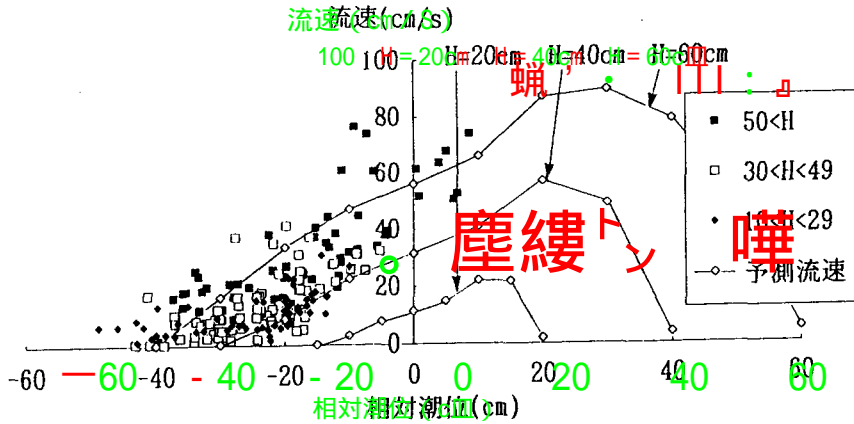


図20 0流流流速潮位の関係

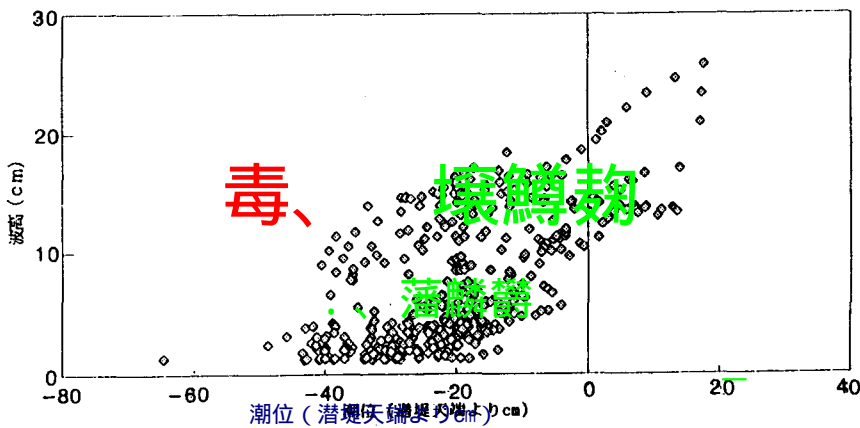


図21 1遊池池仮定波高と潮位の関係

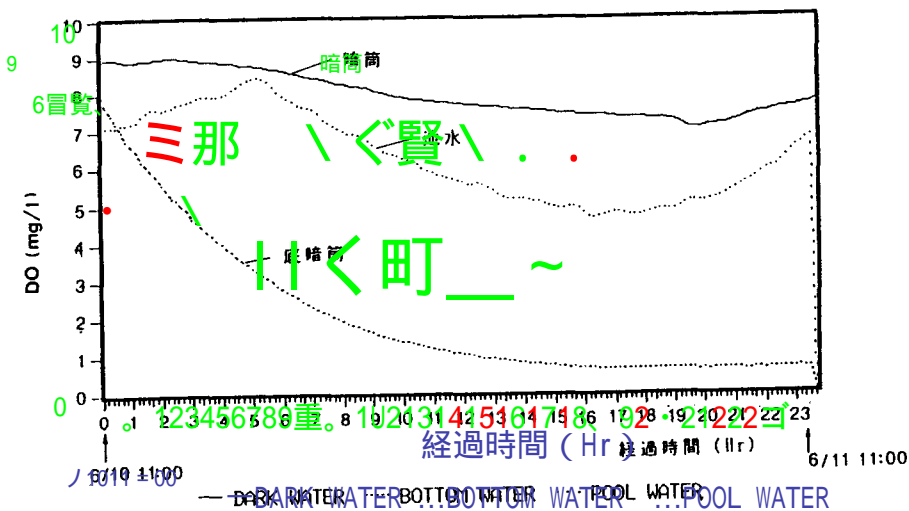


図22 2中圃圃育成池内の溶存酸素濃度の経時変化 (1993年6月)

(3) 溶存酸素量の変化と酸素消費速度

図21(2)池水の5日間間のDO経時変化を暗筒のデータと併せて示す。後午後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の濃度の減少率(暗筒中の消費速度)を調べて見ると図223のように、砂上の値は溶存酸素が15.6mg/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、暗筒水中は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(底泥に底泥に発生する消費速度は(1750-1.5)/hr=15.95%/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) × 水深高 = 0.155/hr × C(mg/l) × 10000/m³ / × 3.004m = 62 × C mg/m²/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、

$$62 \times 6.3 \text{ mg/m}^2/\text{hr} \times 24 \text{ hr/day} \times 1200 \text{ m}^2 = 111,249 \text{ g/day}$$

と餌の散布による量(4000g/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。

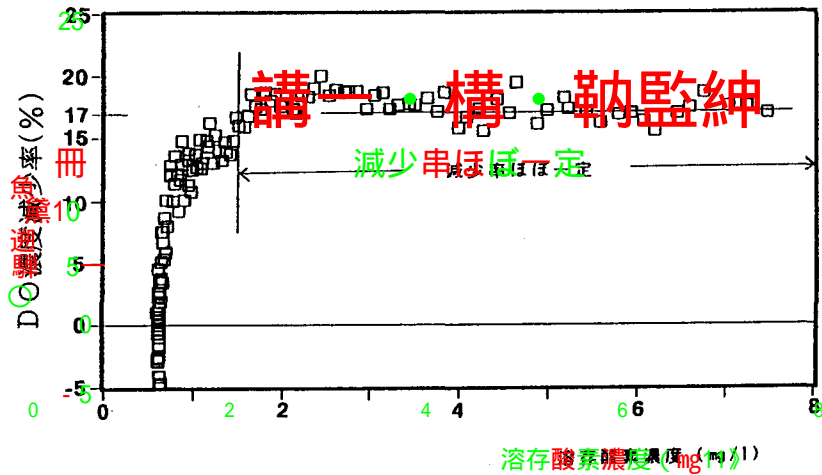


図223 溶存酸素濃度との減少率関係(1993年5月)

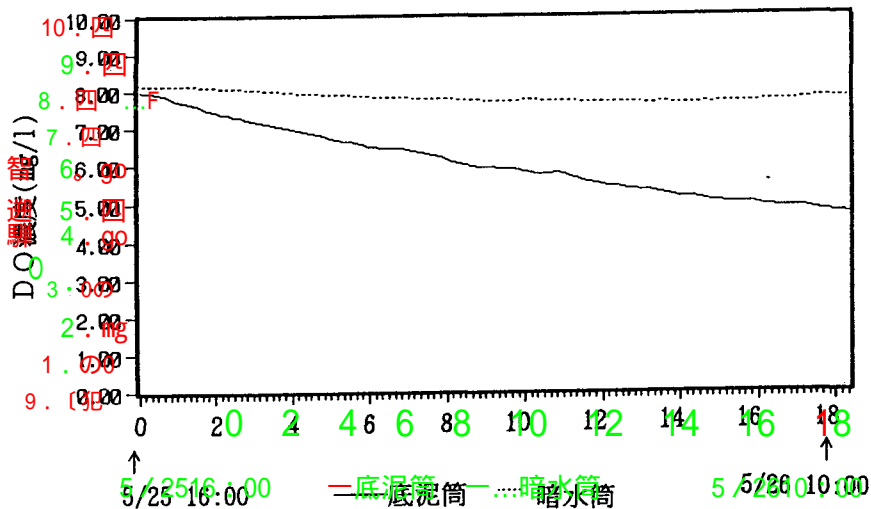


図224 中間層成池の溶存酸素濃度の経時変化(1993年5月)

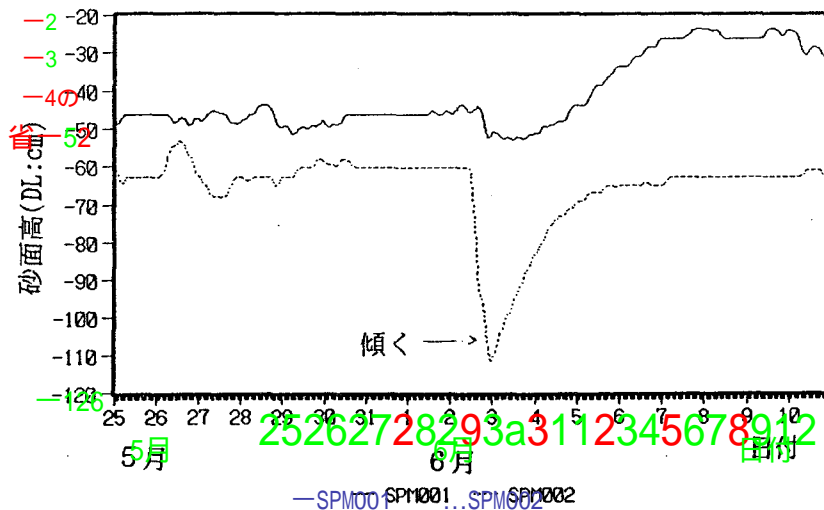


図2 5遊水部内の砂面高の経時変化

一方、図24は示すように計器は不調ではあるが、5月5日のエヌ放養直前測定値は砂暗箱で、 $2.8\%/hr$ 、海水暗箱で $0.9\%/hr$ を示した。これより、上と同様に単位面積あたりDCO消費速度を求めると、 $6.67mg/m^2/hr$ 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25に示す。6月8日は大波が来襲したため、砂面計の根元がDL-4m6mまで侵食され本は傾いたが、その後水位が上がりかきで急速に堆積した様子を示している。この前後のレベル測定の結果、16日間間で $544m^3$ の堆積があったが $0.0384m^3$ の漂砂の流況があり整流池は3ヵ月間機能保持できる計算となるが冬季波浪時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は有効である。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、砂浜帯の養殖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係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係数を求め、予測手法の妥当性を確かめた。

シミュレーションの結果は結果調査は調査水塊の移動移動水温、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、本中間育成池ではほぼ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、将来この調査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、池内外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計算する。溶存酸素収支式を以下のよう

に考える。

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

(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660m³/hr, 流入海水のDO濃度6.6mg/l, 流出海水のDO濃度6.25mg/l (排出口に近い区間の平均)とすると、
 $160 \times 660 \times (6.6 - 6.25) / (40 \times 30 \times 1.2) = 0.039 \text{ mg/l/hr}$ と計算される。

③大気からの溶入量：
 $(U(U_0 - U_s)(10/h_0)^{1/3}) \dots\dots\dots(20)(20)$

U₀: 地上10mの風速(m/s), h₀: 風速測定地点の高さ(m)
 上述した(4)~(6)式群を用いて大気からの溶入量を見積もる。まず地上1mの風速は、実測データより観測期間を通じておよそ2m/sであった。Nは10日21時と11日6時の平均値を考えるとN=N=4.418×10³mg/m³/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： 夜間のため生産量をゼロとみなす。

⑤ヒラメによる消費量： ヒラメの酸素消費量については、今まではいくつかの実験報告されている。11,12,13)しかし中間層育成施設する長30mmの稚魚に1日の実験データは少ないデータから今回は妥当な値として、平常態酸素消費量として5000ml/kg/hrを採用した観測期間中は、40mmのヒラメ2万尾が放流されていた40mmのヒラメの体重(21式28)を用いて計算できる。

$$W = 1.3551313 \times 10^5 L^2 \cdot 2.88984 \dots\dots\dots(21)$$

ここで、W 体重(g), L=全長(mm)である。よって2万尾分の総重量は69.1kgと計算されヒラメによる消費量は、
 $5000 \times 69.1 / (30 \times 40 \times 1 \times 2100000) / 0.7 = 0.309 \text{ mg/l/hr}$ と求められる。

⑥水中の酸素消費量： 暗箱瓶の実験データから0.0097mg/l/hrと求められる。

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、
 $-0.0119 = 0.039 + 0.013 - 0.034 - 0.097 - x, \quad x = 0.08 \text{ mg/l/hr}$
 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は留意すべきである。その誤差をこれ以上細かく論じることは出来ないため、ここではこの値はすべて底質の酸素消費量であると考えた。一般的な単位底面積あたりの消費量は単位換算すると、
 $0.00303 \times 30 \times 40 \times 1.2 \times 1000 / (30 \times 40) = 37.2 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 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割割を占めている。

これは対し平成年度のヒラメ稚魚の飼育中は(20)式で、

- ②海水流入量は、 $160 \text{ m}^3/\text{hr} \times 1000 / \text{m}^3 \times (6.6 \text{ mg/l} - 6.0 \text{ mg/l}) / (1200 \text{ m}^2 \times 1.2 \times 1000 / \text{m}^3) = 0.067 \text{ mg/l/hr}$ 。
- 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6.3mg/l × 0.015 = 0.095mg/l/hr。
- ⑦底質の酸素消費量は実測より62 × 6.3mg/m²/hr / (1200l/m²) = 0.325mg/l/hr

従って、①池内の酸素変化量の右辺は $67.0 - 0.067 \times 0.013 + 0.034 - 0.5095 - 0.2325 = 0.7374 \text{ mg/l/hr}$ と計算され、実測値(平均)の濃度×底質消費率 $= 0.3 \text{ mg} \times (0.0106) = 0.315 \text{ mg/l/hr}$ とほぼ等しい。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 $800 \text{ m}^3/\text{hr}$ 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剰に測定された例(15,16)では水温20℃前後で $100.8 \sim 53 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ である。よって平成4年度の $37.2 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ や5年度の育成前の $67 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 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 $389 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ 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残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、ヒラメ稚魚の育成に支障がなければ過剰な残餌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 0.06162 mg/l/hr となる。この値を用いるる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存酸素の生産がない場合、上述した値を用いると、次の収支式からほぼ $233 \text{ m}^3/\text{hr}$ の海水流入量が必要である計算される。

$$0.162 \text{ mg/l/hr} \times 440,000 \text{ l/mg} \times Q = 0.33232000 \times 233 \text{ m}^3$$

同様に、 0.0445 mg/l の消費速度の場合 $654654 \text{ m}^3/\text{hr}$ の導水が必要である。

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に減少する。減少速度を k 、時間を t とすると溶存酸素量 C_t は22式で表される。

$$C_t = C_0(1 - k)t \quad C_0: \text{溶存酸素濃度初期値} \dots \dots \dots (22)$$

鳥取県では、ヒラメが酸欠死する限界は約 0.7 mg/l (水温 $23 \sim 24^\circ\text{C}$)と報告されている(13)。平成5年度の値は $k = 0.117 \times 1.22 = 0.204$ 、 $C_0 = 5 \text{ ml/l}$ とすると、約2時間 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定期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、どの程度の波渡までヒラメの中間育成は許されるかの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)に関する観測データを月分かにするため現地調査を行った。さらに、波を用いた灌漑堤海溝導流効果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採用した灌漑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 $130340 \text{ m}^3/\text{hr}$ と計算された。平成5年度は $149140 \text{ m}^3/\text{hr}$ 平均 $378 \text{ m}^3/\text{hr}$ と観測された。
- ②水質環境の測定を行った結果、水深10m育成池の水温は2程の程外海より高くなる。池には10m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はより増加すると推定される。しかし、この湧出要素はヒラメ稚魚に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。ただし、水中や底質の酸素消費速度の推定が甘い。
- ④溶存酸素濃度は日変化が激しく、晴天の田中は過飽和状態で、夜間に減少し、その最低値は、早朝(

時頃)に現れた。通常、田中池飽和状態にあるので夜間の低下のみを予測すればよいであろう。

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、底質消費量が大幅に増えた。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と推察される。

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年度は $200\text{m}^3/\text{hr}$ 、平成5年度は $300\text{m}^3/\text{hr}$ 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、ここに話して御敬意を表します。

引用文献

- 1) 水産庁・福面法 日本養殖漁業協会 1992 平成4年度養殖漁業各種生産者手入派流集流(実績全国) p.132.
- 2) 三木教立・菊戸山俊克・大河原親親・柳原重臣・藤本義則, 1992 鳥取県鳥取地区におけるヒラメ中間育成池, 平成4年度水産工学研究推進全国会議講演集, p.11.
- 3) 静岡県養殖漁業センター 静岡県水産試験場 1990 平成4年度放流技術開発事業報告書(太平洋学大別班) 28287347.
- 4) 藤原正幸・久保敏・武内智行, 1991 砂浜海岸造成された中間育成池の水質環境測測そのの開発平成年度日本水産工学会学術講演論文集 13132.
- 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論文集 030404.
- 6) Masayuki FUJIMURA, Soshōki Bokuro Masakiya, YAMAMOTO MAROTO A. Numerical Models Resonable Inflow Rate in Nursery Aquaculture Pond 水産工学, 30+2, 119-128.
- 7) Donald M. Kuyard and Andrew W. K. Yek, 1980 Mass Transfer Coefficient Correlations for the Rate of Organic Sulfide Uptake from Water, Environ Sci Technol, 17, 211-217.
- 8) 山本正昭・申泉昌光・岡辺本文, 1988 海水導入を目的とした潜堤付防波堤の開発(Ⅰ)一機能と潜堤の形状の検討一, 水産工学研究所技報(水産土木) 10, 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, 13-30.
- 11) 日向野純也・安永義暢, 1986 酸素消費量から見たヒラメ稚魚 *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), 3, 33-39.
- 12) 本田晴明・菊池弘太郎 佐伯功 植本弘明 清水野康, 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 U88074, 1-19.
- 13) 鳥取県, 1994 希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47年度養殖漁業環境自家汚染防除技術開発試験一, III-1, pp. 1-48.
- 15) 田中啓陽 井井坐裕雄, 1968 昭和42年度農林水産省特別調査報告書(前井土編) 3, 73-82.
- 16) 静岡県豊前水産試験場, 1992 平成3年度養殖漁業環境自家汚染防除技術開発事業報告書, 12-12.