

(27) 沿岸開発にともなう貧酸素水塊発生がマコガレイの挙動に与える影響の実験的研究

Experimental study on the influence of hypoxia on marbled sale in coastal construction area

関根雅彦^{*}、上浦慎太郎^{*}、山本義男^{**}、濱田悦之^{***}、浮田正夫^{*}

Masahiko Sekine^{*}, Shintaro Ueura^{*}, Yoshio Yamamoto^{**}, Etsuyuki Hamada^{***}, Masao Ukita^{*}

ABSTRACT; Coastal construction works tend to change current and create dead water areas, which may cause hypoxia in enclosed water areas. Hypoxia has a critical effect to aquatic life, and sometimes cause a serious damage on fishery. Although the tolerance of aquatic life to hypoxia is known, there is no information how a mortality of fish is caused by hypoxia, because fish can swim and avoid it. In this paper, we release marbled sale in an hypoxic area and track it by a boat. At the same time, we examine the location of the fish by GPS and the vertical profile of DO, salinity and temperature. We also conduct a series of preference tests for DO, salinity and temperature in a laboratory and decide preference parameters. By using these results, we obtain equations to predict the behavior of marbled sale when hypoxia occurs. By combining our results and a water quality simulation model, we will be able to predict a mortality of fish by hypoxia.

KEYWORDS; marbled sale, hypoxia, environmental preference, coastal area

1 はじめに

沿岸開発事業がもたらす影響を予測する環境影響評価の重要性が近年広く認識されている。中でも内湾における埋め立てなどの開発は死水域の増大を招きやすく、陸域からの栄養塩負荷の増大と相まって貧酸素水塊を発生させる可能性がある。貧酸素水塊は、特に底層ならびに近底層に生息する水生生物の生存に強い影響を与え、時に水産に多大な被害を与えるため、その影響評価は重要である。ところが、魚類の貧酸素耐性の情報^{1,2)}は整理されつつあるものの、魚類は遊泳能力を持つため貧酸素水塊から逃避することが可能であり、どのような条件下で貧酸素が魚の斃死事故に至るかはまったく明らかになっていない。

本研究では、貧酸素水塊の発生とその拡大に対する魚類（マコガレイ）の忌避行動を実水域で追跡調査することにより、魚類の忌避行動の様態を明らかにするとともに、忌避する際の移動速度などの定量的な情報を得て、貧酸素水塊発生が水産被害に至る過程を明らかにする。さらに、室内実験においてマコガレイの環境選好性の定式化を行い、貧酸素がマコガレイの挙動に与える影響の予測を試みることを目的とした。

本研究結果を数値モデルなどによる水質シミュレーション結果と組み合わせることにより、漁業被害の未然防止を可能とすることを最終的な目標としている。

^{*} 山口大学工学部社会建設工学科 〒755 宇部市常盤台 2557

Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755 Japan

^{**} 八千代エンジニアリング

Yachiyo Engineering

^{***} 東京水産大学海洋生産学科漁業工学講座

Lab of Fishing Technology and Engineering, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan

2 現地追跡調査

調査は1996年6月3日～6月5日（貧酸素水塊が発生していない状態：以下「6月調査」）と8月17日～8月19日（貧酸素水塊が発生している状態：以下「8月調査」）にA湾湾奥部で行った。

試験魚は当該水域に生息する代表的底魚であるマコガレイである。試験魚は、1996年5月中旬に現地海域にて刺し網漁により約20尾（8月調査時、全長30～32cm、重量約400g）、同時期に別海域で10尾（6月調査時、全長29～38cm、重量400～780g）捕獲した。後述する追跡用の装置を装着するためにはできるだけ大型の個体が望ましいため、6月調査では別海域産のマコガレイを使用した。また8月調査の時点では大型の試験魚を新たに捕獲することが困難であることが予想されたため、5月に捕獲した現地産のマコガレイを調査時まで蓄養した。蓄養時には、現地近郊に設置した水槽にて濾過した天然海水をかけ流し、飼料としてアオイソメおよびオキアミを毎日1回与えた。蓄養時の水温は6月で約15℃、8月では約23℃であった。

試験魚を対象海域に放流し、これを漁船で追跡することにより、試験魚の位置の時間変化を記録するとともに、溶存酸素濃度（以下DO）、塩分、水温の鉛直分布をマルチ水質ロギングシステムYSI3800を用いて測定した。

追跡用の装置として、6月調査では、濱田（東京水産大学）の研究³⁾で使用されたピンガー（超音波発信器、Vemco社製、直径8.5mm、長さ33mm、水中重量2.7g）を、8月調査では、発光ウキ（日本化学発光株式会社製ケミホタル120スーパーロング、直径7.5mm、長さ120mm、水中重量0g+発泡スチロール約4×4×2cm）を使用した。

ピンガーあるいは発光ウキを装着するためのタグ（ナイロン製値札用タグ）は、一般的には調査の一週間前に装着し、一旦薬浴した後馴致期間をとり、経過を見て健康なものを調査に供するが、マコガレイなどの底魚は装着したタグと水底との摩擦により体表が傷つく可能性が考えられたため、6月調査では調査の2日前、8月調査では調査直前に取り付けた（図1）。

発光ウキの装着状態を図2に示す。中央の発光棒が視認可能な場合は、マコガレイが表層を泳いでいると判断した。

2.1 6月調査

6月調査は貧酸素が発生していない状態でマコガレイがどのように動くのかを調査することが主な目的であった。当時A湾では植物プランクトンの光合成によってDOが過飽和状態になっており、水面近くではDO=15mg/l程度、底泥直上ではDO=8 mg/l前後であった。

6月調査結果より、マコガレイは湾口部に向かうように見受けられた（図3、図4、図5）。湾口部に向かう理由としては、水温、水深、塩分、DO、流向などが考えられる。



図1 ピンガー、発光ウキ取り付け位置

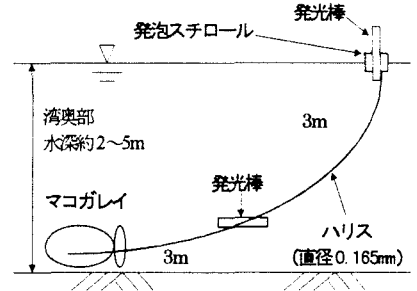


図2 発光ウキ装着状態

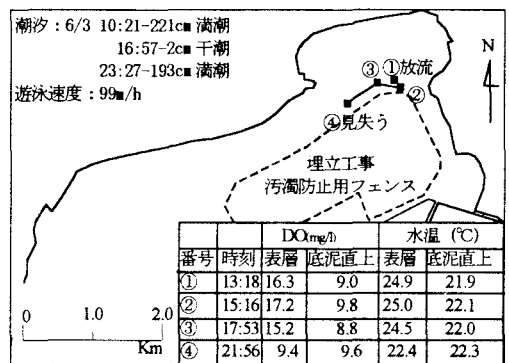


図3 追跡調査結果（6月：No.2 マコガレイ）

追跡日時：H8 6/3 13:18-21:56 追跡方法：ピンガー

また、今回放流した全てのマコガレイをほぼ同じ地点で見失ったところから、当該水域にはなんらかの障害物が存在することが予想される。マコガレイを見失った原因として以下に示す事が考えられた。

- 大型船を使用したため小回りが利かず、また水深3m以浅の箇所に近づく事ができなかった。
- アオサなどの海藻・浅瀬・溝等の地理的条件により受信範囲が小さくなる。
- マコガレイが底泥中に潜って発信機が埋まり、信号が届きにくくなる。
- 予想よりマコガレイの移動速度が速い。

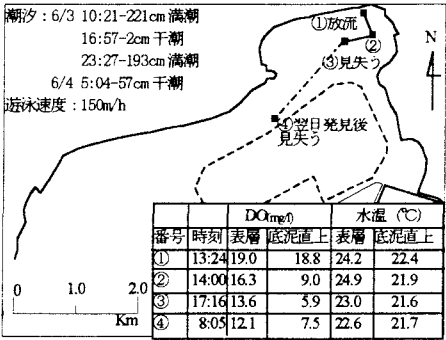


図4 追跡調査結果（6月：No.3 マコガレイ）
追跡日時：H8 6/3 13:24-6/4 11:38
追跡方法：ピンガー

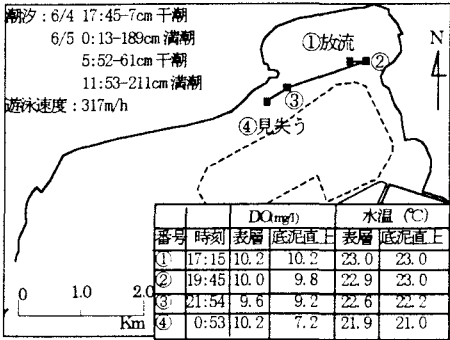


図5 追跡調査結果（6月：No.4 マコガレイ）
追跡日時：H8 6/4 17:15-6/5 7:00
追跡方法：ピンガー

2.2 8月調査

8月調査は貧酸素水塊が発生している状態でマコガレイがどのように動くのかを調査するのが主な目的であった。8月調査は6月調査の反省をもとに、以下の条件を変更した。調査時間については、マコガレイが夜行性であることから夜間（日没後から日の出まで）のみ追跡する事とし、6月調査で使用した大型船（水質調査用）および小型船（追跡調査用）とに分担して行った。小型船では、DO、水温および塩分を鉛直方向50cm毎に測定しつつマコガレイの追跡を行った。大型船は、小型船がマコガレイを追跡している時間中、定点のDO、水温および塩分のプロフィールを測定した。マコガレイの追跡方法については、発光ウキを用いた。

当時A湾では、6月調査の時と同じく表層DOは過飽和状態になっており、水面近くでは夜間でもDO=15mg/l程度あった。しかし、表層から2m以下ではDOが極端に低くなり底泥直上ではDO=0.5mg/l程度まで下がっていた（図6）。水温と塩分については、上下層で密度成層が形成されており、貧酸素水塊も十分発達してA湾の下層全体が貧酸素状態になっていた（図7、図8）。このような状況下でマコガレイを放流すれば間もなく死亡するだろうと予想していたが、マコガレイは死亡することなく水面近くを泳いで湾口部を目指して移動した（図9、図11）。

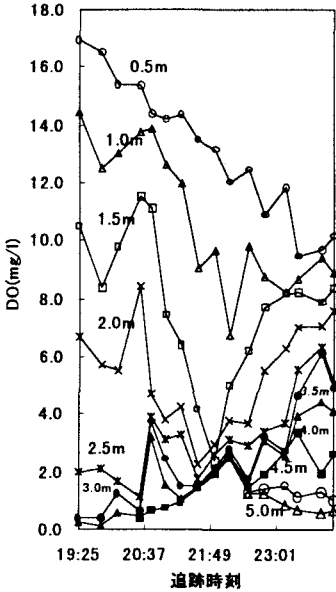


図6 追跡時のDO鉛直プロフィール
（8月：No.6 マコガレイ）

8月調査結果より、マコガレイは湾口部に向かうように見受けられた。また、マコガレイは水温が低く塩分の高い場所へ向かって移動したことが判明した(図10、図12)。これらの要因はマコガレイの移動要因として挙げることができよう。DOは着底に対する阻害要因であるように思われる。水深に関わりなくマコガレイは上層部を泳いでいたところから、水深はマコガレイの移動の主要な要因ではない。No.5マコガレイは下げ潮で、No.6マコガレイは上げ潮で湾口方向に移動したので、向流性については影響は少ないと考えられる。ただし、No.5マコガレイについては、放流直後はほぼ満潮ながらも上げ潮時間帯に入っており、移動開始時の方向決定に潮流が影響した可能性はある。また、水面近くを泳ぎ続けたということは明らかに貧酸素状態を嫌ったためと考えられる。

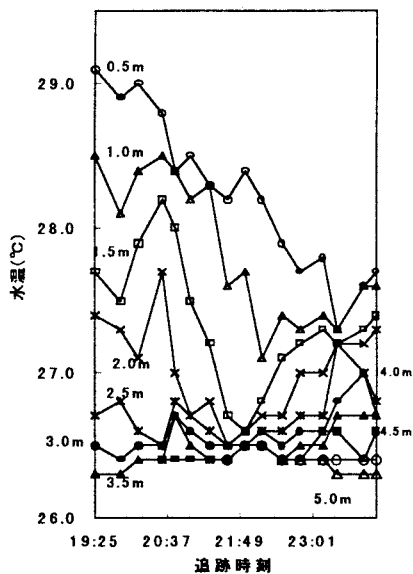


図7 追跡時の水温鉛直プロフィール
(8月: No.6 マコガレイ)

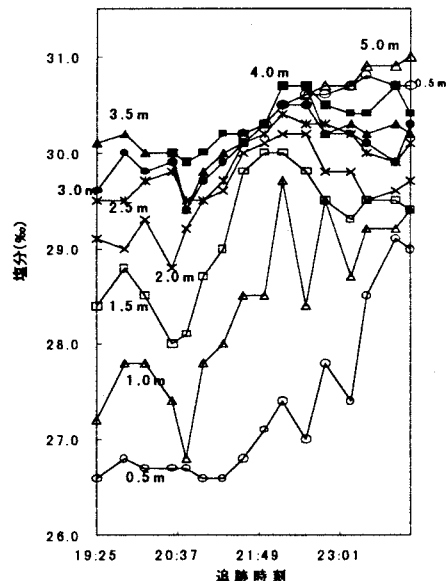


図8 追跡時の塩分鉛直プロフィール
(8月: No.6 マコガレイ)

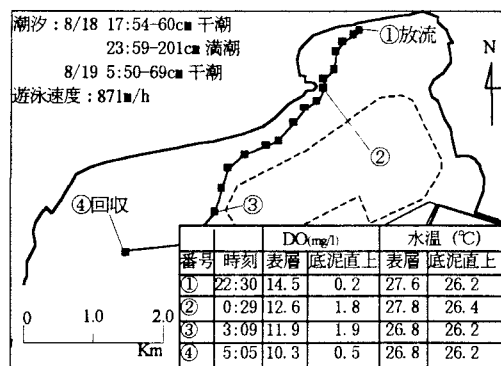


図9 追跡調査結果 (8月: No.5 マコガレイ)
追跡日時: H8 8/18 22:30 8/19 5:05
追跡方法: 発光ウキ

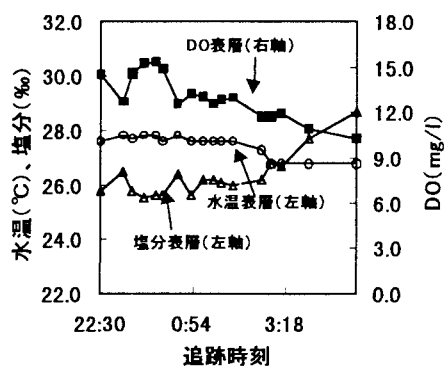


図10 追跡時のDO、塩分、水温(表層)
(8月: No.5 マコガレイ)

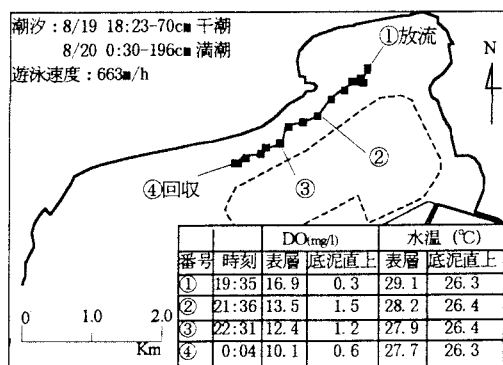


図 11 追跡調査結果 (8月：No.6 マコガレイ)

追跡日時：H8 8/19 19:25-8/20 0:04

追跡方法：発光ウキ

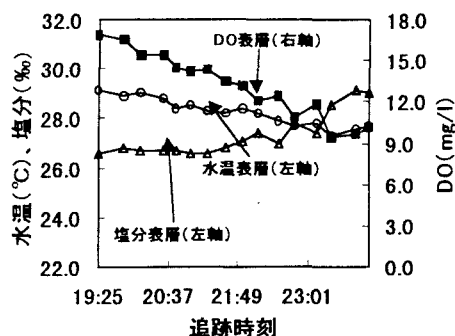


図 12 追跡時の DO、塩分、水温 (表層)
(8月：No.6 マコガレイ)

一方、B 漁港で放流したマコガレイは放流後、半径 5m くらいの円を描きながら表層を遊泳して進行方向が定まらなかった (図 13)。港内の塩分、水温の水平分布はほぼ均一であるところから、塩分、水温の水平分布の勾配が小さいとマコガレイは逃避方向を定める事ができないと考えられる。また、港内では潮流がほとんど存在しないことも追跡調査との違いとして挙げられる。先に向流性の影響は少ないと述べたが、流れが移動の初期に何らかの影響を与えている可能性は否定できない。この点は今後の課題としたい。

3 選好性実験

実験装置を図 14 に示す。試験魚を入れる水路は縦 (上下流の水路長) 方向に 70cm、横 (1つの水路幅) 方向に 35cm、高さ (水深) 方向に 20cm で左右に 2 つの水路がある。左右の水路は下流端で接合されており、接合部分の幅は、35cm である。実験水路の周りには、高さ約 140cm のフレームを作り、暗幕 (遮光性のカーテン) を張った。その内部に照明として 7w の白熱電球 1 個を取り付けた。実験水路水面位置での照度は 10lx であった。

試験魚は、8 月調査時に用いたものと同様の全長約 30cm 重量約 400g のマコガレイ 6 匹である。飼育水槽は、ろ過装置、循環装置、曝気装置、クーラーが装備されている。飼料はアオイソメおよびオキアミを毎日 1 回、夕方に与えて水温 20℃にて飼育した。実験装置の水温は飼育水槽と等しくなるようクーラーを用いて $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った。流速はマコガレイが底魚であることを考慮して 1cm/sec とした。予備実験より蓄養水槽から実験装置に試験魚を移動させてから約 1 時間で試験魚の挙動

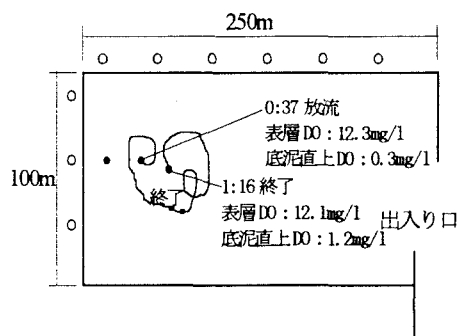


図 13 B 漁港内追跡結果 (8月：No.7)

追跡日時：H8 8/20 0:37-1:16

追跡方法：発光ウキ

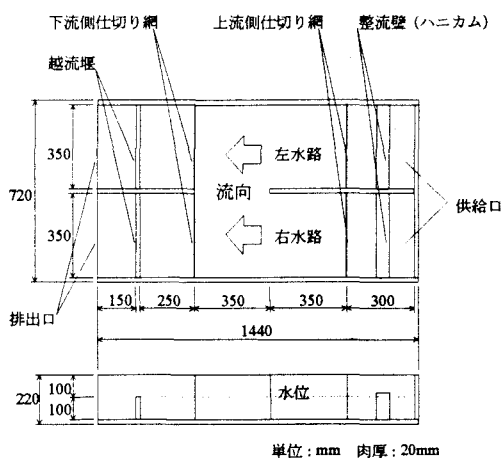


図 14 実験装置

が安定することを確認した。馴致時間は1時間、実験時間は20分間とし、実験には、飼育水槽から実験毎に2匹ずつ任意に選んで用いた。実験水路にマコガレイを2匹投入し馴致させた後、左右の水路の環境を種々変化させて、マコガレイの挙動をビデオ撮影し、マコガレイの口の位置を基準として、1分毎の存在位置を記録した。分布率の算出については、1分毎のマコガレイの左右分布数を計数して、20分間の平均分布率を1実験の結果とした。貧酸素、水温そして塩分の環境因子をそれぞれ単独に変化させた単一因子実験、これらの環境因子を組み合わせた複合因子実験、および静水中での貧酸素耐性実験を行った。

マコガレイの選好性実験結果を図15に示す。貧酸素因子実験から $DO=2\text{mg/l} \sim 3\text{mg/l}$ 、水温因子実験から $24^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ の時が忌避行動を起こすか起こさないかの境界であることが確認された。また、塩分因子実験から現地追跡調査時の塩分差ではマコガレイの選好性に影響がないことが明らかとなった。

貧酸素耐性実験では呼吸回数・異常挙動回数（痙攣・反る・鼻上げ）・移動回数に着目した（図16、図17）。実験結果から、 $DO=1.0\text{ mg/l}$ 以下で異常挙動回数や移動回数が増加し始め、 $DO=0.5\text{mg/l}$ では30分以内に行動不能になることが確認された。

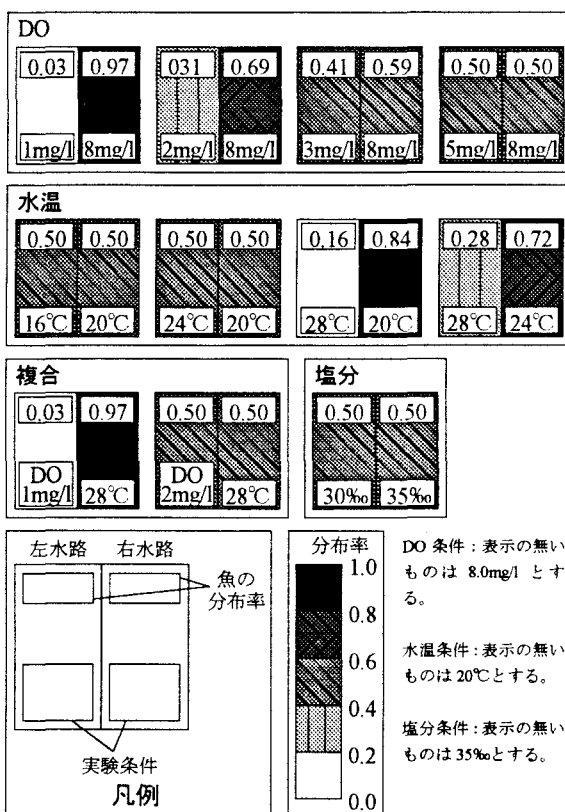


図15 室内実験結果

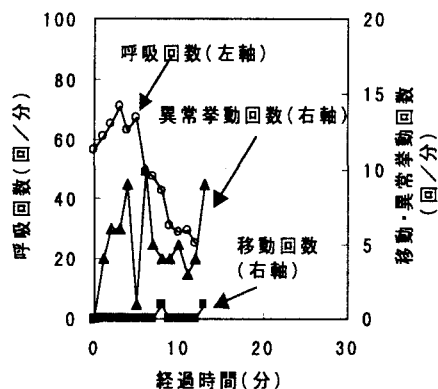


図16 貧酸素耐性実験結果($DO=0.5\text{mg/l}$)

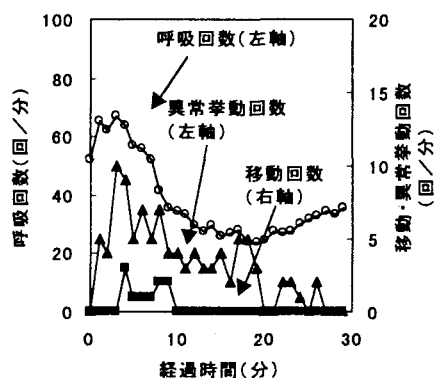


図17 貧酸素耐性実験結果($DO=1.0\text{mg/l}$)

4 環境選好性の定量化

単一の環境因子に対する選好強度の表現には、図 18 に示すパターンを用いた⁵⁾。グラフの縦軸は選好強度、横軸は環境因子の値である。選好強度値は、環境因子が閾値 t1 を越えるまでは v1、t1 から t2 までは直線的に変化し、t2 以降は v2 となる。図 18 に示した以外にも様々な選好強度の定式化があり得るが、本研究では実験精度や実験実施数に対する定式化精度のバランスを考慮し、単純性を重視している。また、本研究では複数の水域 i における魚の分布率 D_{ji} は、水域 i における環境因子 j についての選好強度 P_{ji} を用いて

$$D_i = \frac{\prod_{j=1}^J (P_{ji})^{\frac{W_j}{W_{\max}}}}{\sum_{i=1}^I \left\{ \prod_{j=1}^J (P_{ji})^{\frac{W_j}{W_{\max}}} \right\}} \quad (1)$$

$$W_{\max} = \begin{cases} \max_{j \in J'} (W_j) & V \neq \phi \\ \infty & V = \phi \end{cases} \quad (2)$$

$$V = \{j | (\exists i, i') (P_{ji} \neq P_{ji'})\} \quad (3)$$

で表現されたと考えた。ここに W_j は因子 j についてのウェイト（因子ウェイト）、 $W_{\max}$ は水域 i 間で選好強度に違いが存在する因子に対するウェイトのうち最大値をとるウェイトである。本式は、

- 新たに環境因子を付け加えても、それ以前に求めた選好強度式や因子ウェイトを変更する必要がない。
- 選好強度式と因子ウェイトを別々に求めることができる。

という極めて優れた特徴を持つ。本水路における単一因子実験の場合水域 (i) の数は 2 であるから、式 (1) より因子 j についての分布率 D_{ji} は

$$D_{ji} = \frac{P_{ji}}{\sum_{i=1}^I \{P_{ji}\}} \quad i = 1, 2 \quad I = 2 \quad (4)$$

と表記される。 D_{ji} は単一因子実験結果より知ることができるため、式 (4) を用いて P_{ji} の未知パラメータ値を定めることができる。

モデル式による係数探索の結果を図 19 に示す。また、選好強度に対する因子ウェイトは、DO (1mg/l、2mg/l) と水温 (20℃、28℃) を組み合わせた複合環境条件における分布比率より求めた。実験より求めた因子ウェイト値を表 1 に示す。

表 1 選好強度の因子ウェイト値

条件	ウェイト値
DO	1.0
水温	0.66

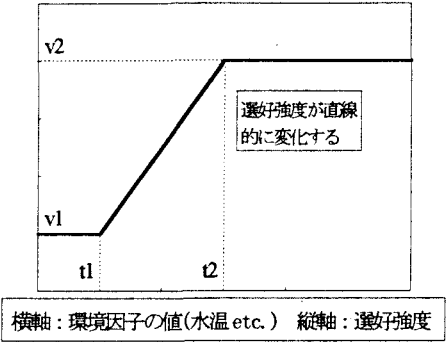
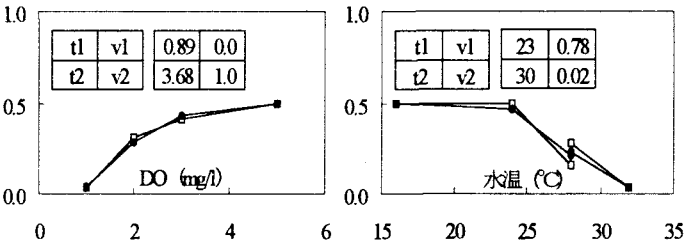


図 18 選好強度式



横軸：環境因子の値 ■計算値 □実験値
縦軸：環境因子に対する魚の分布率

図 19 実験値と計算値の比較

5 室内実験結果を用いた魚の挙動予測

室内実験結果より求めた選好強度式とウェイト値を組み込んだモデルを用い、現地追跡調査時における湾内のマコガレイの挙動予測を行った。ここでは、DO と水温の 2 条件を考慮した。

調査時の定点での DO、水温および塩分のプロフィールをもとに、湾奥部を 14BOX に分割し、各 BOX の表層と底泥直上について、それぞれ選好強度を求め、最大選好強度（DO=8mg/l、水温 16℃であるときの選好強度）が 1 になるように無次元化した。図 20 に BOX 分割図を示す。

図 21 より、底泥直上の選好強度が表層に比べて極端に低いため、計算結果については表層のものだけを載せた。この結果から調査当時マコガレイが上層を泳いでいた理由が選好強度によって示された。各 BOX 表層の選好強度を図 22、図 23 に示す。計算結果から、マコガレイは表層における選好強度の高い方向に向かって泳いだことが確認された。

なお、図 22 では BOX2、図 23 では BOX 2,3 など、マコガレイの放流点から見て湾奥側 BOX の選好強度が高くなっているにもかかわらず、マコガレイは湾口側に移動した。湾奥側では低酸素域がより水面近くまで上昇していること（図 24）、あるいは先述の潮流の影響などが湾奥に向かわなかった原因とも考えられるが、BOX の水平分割スケールが粗く、この原因を詳細に議論することは現段階では難しい。

図 25 はマコガレイ追跡と同時に測定した水質データにおける選好強度を計算した結果を示す。この計算結果からも、おおむね選好強度の高い方向に向かって泳いでいることがうかがえた。

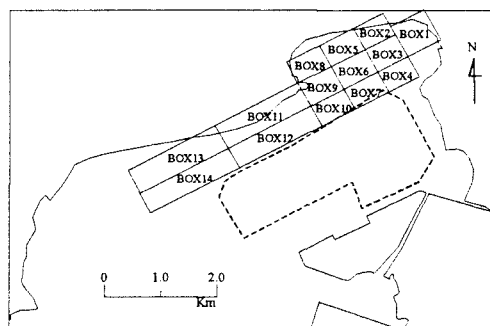


図 20 BOX 分割図

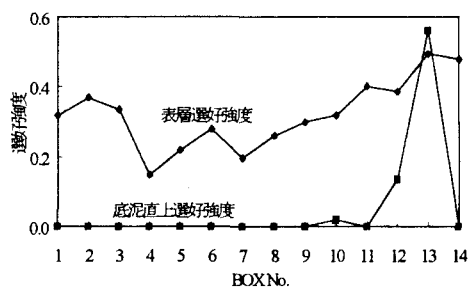


図 21 各 BOX における表層および底泥直上の選好強度

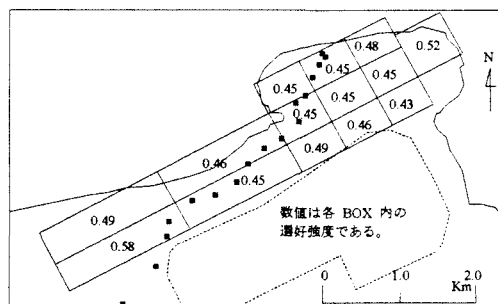


図 22 各 BOX 表層の選好強度
(8月: No.5 マコガレイ)

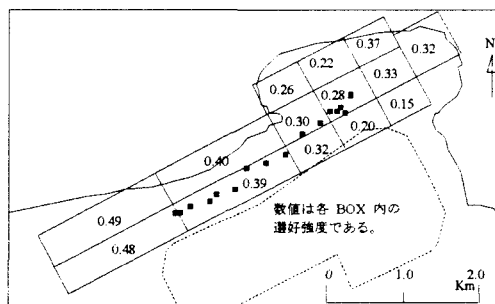


図 23 各 BOX 表層の選好強度
(8月: No.6 マコガレイ)

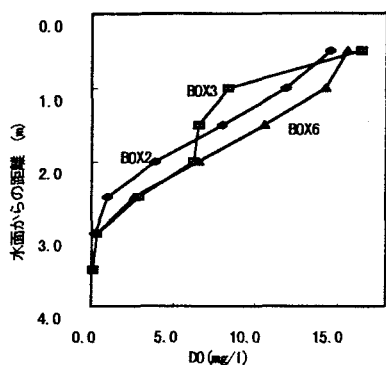


図 24 BOX2,3,6 の DO プロフィール
(8 月 : No.6 マコガレイ)

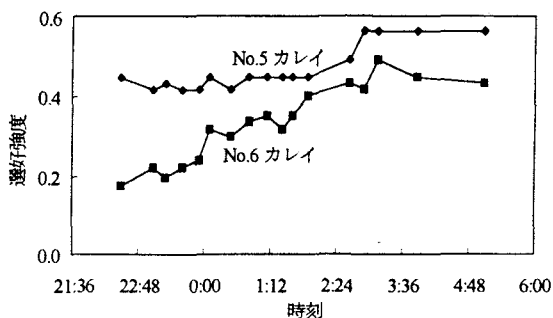


図 25 追跡調査時の水質の選好強度

6 おわりに

追跡調査により、底層で貧酸素が発生した場合においても、表層に酸素濃度の高い部分があれば、底魚であるマコガレイでも表層を泳いで逃避できることが明らかになった。通常時のマコガレイの移動速度は約 100～320m/hr、貧酸素時のマコガレイの移動速度は約 660～980m/hr であった。以上の結果より、貧酸素水塊が水面まで達し、かつその拡大速度がマコガレイの移動速度を上回った場合に、マコガレイの大量死が発生する可能性があることが示唆された。ただし、対照実験である 6 月調査には追跡方法の問題などがあり、今後再確認する必要がある。

室内実験により DO、水温、塩分と行動の関係を明らかにし、実験結果に合致した環境選好性の定式化を行うことができた。また、求めた選好強度式で、調査結果をある程度説明することができた。よって、生態系モデルと水質予測モデルを組み合わせるにより、マコガレイについては死亡事故発生を事前に予測できる可能性が示唆された。

もちろんこの結果は全長 30cm 以上のマコガレイにのみ適用されるものであり、他の魚種、あるいはマコガレイの稚魚などでは異なった環境要因がその行動を支配しているかもしれない。今後、これらの問題についても確認する必要がある。

<参考文献>

- (1) 日本水産資源保護協会：水生生物生態資料、1981
- (2) 日本水産資源保護協会：続水生生物生態資料、1983
- (3) 韓軍、宮本佳則、濱田悦之、中村善彦：魚の行動解析のための同期法超音波ピンガー追跡システム、日本水産学会誌、61(3)、369-374、1995
- (4) 関根雅彦、浮田正夫、中西弘、内田唯史：河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性の定式化、土木学会論文集、503/II-29、177-186、1994