

原著論文

発電所温排水による昇温に対するブリの行動反応

三浦雅大^{*1 §}・山田 裕^{*2}・原 猛也^{*3}

Behavioral Responses of Yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) to
Thermal Effluent from Coastal Power Plants

Masao Miura^{*1 §}, Hiroshi Yamada^{*2} and Takeya Hara^{*3}

要約: 漁獲サイズのブリの温排水による昇温に対する行動反応を把握するため、円筒形大型生け簀を発電所温排水拡散域内(実験区)および拡散域外(対照区)に設置し、生け簀内におけるブリの行動を比較した。水温の鉛直変化の乏しい対照区の生け簀では、ブリは表層~底層の広い範囲を遊泳する場合が多く、季節的な変化もあまり見られなかった。一方、表層に温排水による昇温層が形成されている実験区の生け簀では、ブリは特定の水深範囲を選択的に遊泳し、季節によってその範囲が変化した。1~2月の低水温期には、昇温層内を集中的に遊泳する傾向が見られたが、対照的に8~9月の高水温期には、昇温層よりも深い層を選択的に遊泳する傾向があった。また、1~2月および12月には遊泳水深に日周変化が見られ、特に12月には夜間は昇温層内を主に遊泳したが、昼間は昇温層より深い層を選択的に遊泳する行動が見られた。この日周変化は、昼間には明るすぎる表層を忌避する反応が昇温層を選好する反応よりも強く現れたためと考えられ、光の影響のない夜間の結果の方が、より本来の昇温層に対する行動反応を反映しているものと推察される。実験区の夜間の結果に基づき、選択度指数(Jacobs, 1974)を用いて水温に対する選択性について解析した結果、自然水温(温排水拡散域外の水温)とブリが選好する水温範囲の上限値および下限値の間には有意な正の相関が見られた。また、実験区の生け簀の水温範囲とブリの選好範囲の比較から、低水温期には温排水による昇温層を選好するが、自然水温が高くなるにつれて次第に昇温層を忌避するようになると考えられる。

キーワード: 温排水, 発電所, ブリ, 野外実験, 行動反応

Abstract: To examine the behavioral responses of catch-size yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) to the temperature rise caused by thermal effluent from coastal thermal and nuclear power plants, large cylindrical fish cages were set up inside the thermal effluent diffusion area (the experimental area) and outside the diffusion area (the control area), and the behavior of yellowtail inside the cages was compared. In the control area, where there was little vertical change in water temperature, yellowtail often swam over a wide range from the surface to the bottom layers, and little seasonal change in the behavior was observed. On the other hand, in the experimental area, where the warm water layer had formed on the surface due to thermal effluent, yellowtail selectively swam at specific depths, depending on the season. During the low water temperature period in January and February, fish tended to concentrate in the warm water layer, but in contrast, during the high water temperature period in August and September, fish tended to selectively swim in areas deeper than the warm water layer. In addition, diurnal changes in swimming depth were observed in January, February and December, and in December in particular, fish mainly swam within the warm water layer at night but selectively swam in areas deeper than the warm water layer during the daytime. The behavior of moving to deeper layers during the daytime is thought to be an avoidance response to the too bright surface layer. Therefore, it is assumed that the results at night, when there is no influence of light, more accurately reflect the actual behavioral response to the warm water layer. Based on the night-time results in the experimental area, we analyzed the selectivity for water temperature using a selection index (Jacobs, 1974). The results showed a significant positive correlation between natural water

(2024年11月11日受付, 2025年1月16日受理)

*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

§ E-mail: m-miura@kaiseiken.or.jp

*2 元公益財団法人海洋生物環境研究所職員

*3 公益財団法人海洋生物環境研究所フェロー

temperatures (outside the thermal effluent diffusion area) and the upper and lower limits of the water temperatures preferred by yellowtail. Comparing the water temperature range in the cages in the experimental area with the preferred temperature range of the yellowtail, it is suggested that the yellowtail preferred the warm water layer due to the thermal effluent during periods of low water temperature but gradually began to avoid it as the natural water temperature increased.

Key words: thermal effluent, power plant, yellowtail, *Seriola quinqueradiata*, field experiment, response behavior

まえがき

発電所温排水の海域環境や海生生物に対する影響として、沿岸水温の上昇とそれによる周辺漁場からの魚類の逸散が懸念される。これまでに、寒ブリ（冬季に漁獲されるブリで市場価値が高い。）の漁獲量の不振と温排水の関係や、原子力発電所の建設に際して、近隣河川へのサケ類の遡上に対する温排水影響について議論されたことがある。

（公財）海洋生物環境研究所では、このような温排水による水温上昇が魚類の行動に及ぼす影響を予測・評価するための基礎的知見として、これまで多くの海産魚類について、室内試験によって温度反応行動の知見を蓄積してきた（土田, 2002）。しかし、試験装置に収容できる供試魚のサイズが限定されるため、発育・成長に伴って選好温度が変化する例（McCauley and Read, 1973; Otto *et al.*, 1976; Kwain and MacCauley, 1978; Reynolds and Casterlin, 1978; Cautant, 1987; 土田・田端, 1997）があることを考慮すると、大型の魚種については、室内試験の結果のみに基づい

て実際の海域において漁獲対象となっている成魚サイズの個体の行動を予測・評価するのは不十分である可能性がある。

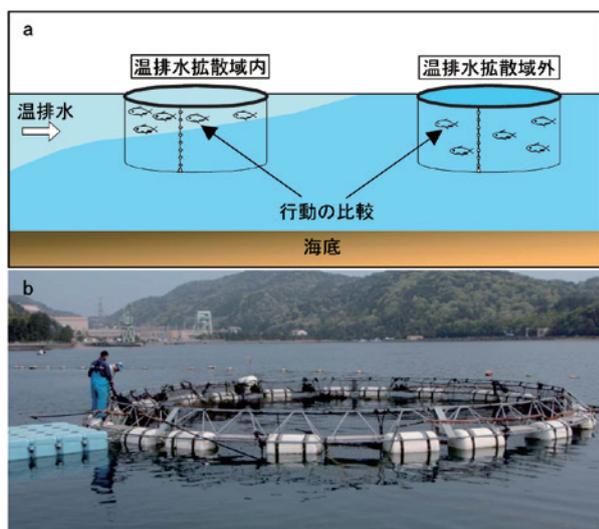
そこで、漁獲サイズの大型魚類の温排水に対する行動反応を把握するために、大型生け簀を用いた野外実験手法を考案した（三浦ら, 2014）。第1図のように、発電所前面の表層に温排水による昇温が発生している海域（温排水拡散域内）に大型の生け簀を設置してその内部に供試魚を収容した場合、表層の昇温層に対してどのように反応するか（選好あるいは忌避）を、温排水による昇温が発生していない対照区（温排水拡散域外）に設置した生け簀に収容した供試魚における行動との比較を通して確認しようというものである。本研究では、このような大型生け簀を用いた野外実験により、温排水による昇温に対する漁獲サイズのブリ (*Seriola quinqueradiata*) の行動反応を確かめた。

材料と方法

野外実験の実施海域 野外実験の実施海域については、実験区と対照区において、温排水による水温変化以外の環境要因の差が生じないことを理想とし、ごく近い範囲に双方を設置することが望まれるが、そのような海域を設定することは困難であった。そこで、本実験の実施海域を選定するにあたっては、以下の条件を考慮した。

- ・実験区については、表層に温排水による昇温層が存在すること（温排水拡散域内）
- ・対照区については、温排水による昇温層がないこと（温排水拡散域外）
- ・波浪による生け簀の損壊、流出の危険がないこと（静穏海域）
- ・水質が良好で、供試魚の行動に悪影響を及ぼさないこと
- ・近隣で定置網等の漁業が行われており、供試魚の入手が容易であること

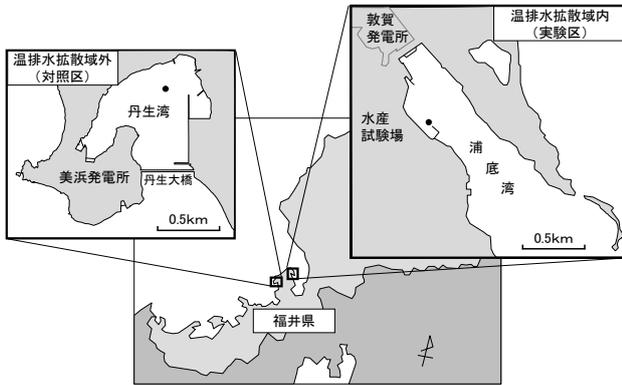
これらの条件を満たす海域として、実験区につ



第1図 大型生け簀を用いた野外実験の概要（三浦ら, 2014 より引用）

a: 野外実験のイメージ, b: 試験生け簀の外観

いては福井県敦賀市の浦底湾内の日本原電株式会社敦賀発電所1号機放水口前面海域（福井県水産試験場の前面）を、対照区については、敦賀半島を挟んで実験区と反対側に位置する美浜町丹生湾内を選定し、第2図に示した位置にそれぞれ試験生け簀を設置した。



第2図 試験生け簀の設置場所
●：生け簀の設置位置

実験区の生け簀の設置場所として選定した浦底湾は、奥行約1.8km（湾奥から東側の明神崎先端までの距離）、湾口部の幅約0.7km、最深部の水深約23mの細長く、比較的開放的な湾である。湾奥部に敦賀発電所が位置し、1、2号機が、それぞれ約20m³/s、80m³/sで冷却水を取水しており、1号機は温排水を湾内表層に放流しているが、2号機は温排水を湾外に放流している。試験生け簀の設置場所は、1号機の温排水放水口からおよそ300m離れた福井県水産試験場の占有海域内で、放出された温排水の主な流路に位置する（水深約10m）。

対照区の生け簀の設置場所として選定した丹生湾は、湾口から湾奥までの距離約1km、湾口部の幅約0.4km、最深部の水深約13mであり、浦底湾に比べて浅く、やや閉鎖的な湾である。関西電力株式会社的美浜発電所が隣接しているが、湾内から冷却水を取水して湾外に温排水を放出しているため、湾内においては温排水による昇温は観測されない。発電所の取水によって表層の海水交換は比較的良好であり、湾内ではブリ、トラフグ (*Takifugu rubripes*) 等の蓄養や養殖が行われている。試験生け簀の設置場所は、丹生湾のほぼ最深部（水深約13m）にあたる。

野外実験の実施時期・回数 温排水による昇温層に対するブリの行動反応の季節変化を見るために、低水温期、高水温期およびこれらの過渡期（水

温上昇期および水温下降期）に合計7回の実験を実施した。各実験の期間は9～28日間の範囲であり、発電所の稼働状況等に応じて調整した。特に2004年の6～7月の実験では、6月23日まで敦賀発電所1号機による温排水の放出がなく、放出再開前後の供試魚の行動変化を見るために28日間をわたる長期の実験を実施した。各実験の実施期間等を第1表に示す。

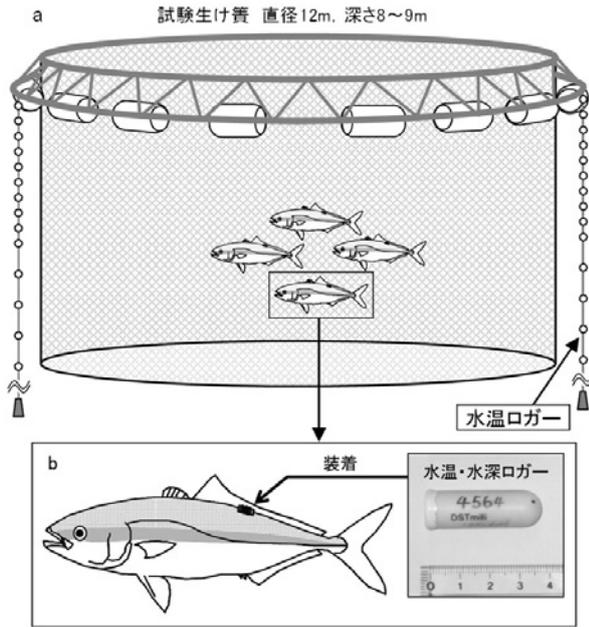
第1表 生け簀実験の実施時期

実施時期	実施年	期間	日数
低水温期	2003年	1月24日～2月2日	9
	2005年	1月11日～1月24日	13
水温下降期	2003年	12月2日～12月18日	16
	2004年	12月2日～12月17日	15
水温上昇期	2003年	5月27日～6月13日	17
	2004年	6月10日～7月8日	28
高水温期	2003年	8月26日～9月11日	16

試験生け簀 第3図aに試験生け簀の概要を示す。生け簀枠は、強化スチール製の直径12mの円筒形とし、生け簀網は目合い4.5cmのポリエチレン製で、底網までの深さは実験区では9mとしたが、対照区については、海底に設置された漁礁に接触しないよう、やや浅い8mとした。生け簀網は実験実施期間中のみ設置し、実験終了後には清掃して倉庫に保管した。

試験生け簀内の水温の測定法 第3図aに示したように、生け簀上部の鉄枠の2箇所（生け簀周囲の流れの上流側と下流側）から垂下したロープに水深別に水温ロガー（Onset社製Tidbit）を取り付けて10分間隔で水温の鉛直分布を測定した。測定層は、水温の鉛直変化が大きい海面下0.5～5.0mまでは0.5m間隔、水温の変化が乏しい海面下5.0mより下層については1.0m間隔とし、各層の2箇所の測定値の平均を生け簀内の水温と見なした。

その他の環境要因と測定法 水温以外の環境要因による供試魚の行動への影響を検討するために、試験生け簀近傍において、実験実施期間中に光量子束密度、塩分、溶存酸素量、濁度、流向・流速を測定した。光量子束密度については、水温計と同様に試験生け簀の2箇所から垂下したロープに光量子計（アレック電子社製MDS-MkV/L）を設置し、海面下0.5m、2.0m、4.0m、8.0mにおいて10分間隔で測定した。塩分、溶存酸素、濁度、流向・



第3図 試験生け簀の概要（三浦ら，2014 より引用）
a: 試験生け簀と測器の配置，b: 水温・水深ロ
ガーを装着した供試魚

流速については，実験実施期間中毎日1回，試験生け簀近傍において水質計（アレック電子社製 ACL1183L-PD）および流向・流速計（アレック電子社製 ACM210D）を用いて鉛直測定を行った。測定層は，海面下 0.5m, 1.0m, 2.0m, 4.0m, 6.0m, 8.0m または 9.0m（それぞれ，丹生湾，浦底湾の生け簀の底網の深さ），10.0m, 12.0m と海底上 1.0m とした。

供試魚と遊泳層の水深・水温の測定法 実験に使用したブリの個体数および体サイズを第2表に示す。供試魚については，福井県敦賀市，美浜町等の定置網で漁獲されたもの，もしくは漁獲後に数

週間から数カ月間蓄養されていたものを入手し，一回の実験当たり5～13個体を実験区および対照区の各生け簀に収容した。供試魚のサイズは実験実施時期によってばらつきがあったが，各実験における尾叉長と体重の平均値は，それぞれ80cm 台，体重7～9kg 台の場合が多かった。なお，実験実施期間中は基本的に給餌を行わなかったが，2004年の6～7月の実験については，約一カ月間の長期の実験を実施したため，6月11日～22日の間のみ，冷凍アジの切り身を毎日1回飽食するまで投与した。

生け簀内における供試魚の遊泳層の水深と水温を把握するために，第3図bに示すように，供試魚の第二背鰭基底部にデータロガー（Star-Oddi社製 DST milli）を装着し，1～2分間隔で水深と水温を記録した。実験終了時にデータロガーを回収し，内部に記録されたデータを取得した。

水温に対する供試魚の選好・忌避の解析法 実験区と対照区のそれぞれにおける供試魚の行動を比較するとともに，実験区の生け簀内における供試魚の遊泳層の水温（以下，遊泳水温）および環境水温（生け簀内の水温）の頻度分布のデータを用いて，下式により温度階級毎の選好度指数（Jacobs, 1974）を求めた。

$$Dt = (rt - pt) / (rt + pt - 2rt \cdot pt) \quad -1 \leq Dt \leq 1$$

rt：遊泳水温の温度階級 t における頻度

$$(0 \leq rt \leq 1)$$

pt：環境水温の温度階級 t における頻度

$$(0 \leq pt \leq 1)$$

なお，生け簀内の水温と供試魚の遊泳水温の

第2表 供試魚の魚体測定結果

実施時期		実験区			対照区		
年	月	個体数	尾叉長 (mm)	体重 (g)	個体数	尾叉長 (mm)	体重 (g)
2003	1-2	5	692 ± 20	6,480 ± 652	5	718 ± 21	6,770 ± 325
	5-6	7	857 ± 35	8,171 ± 635	6	842 ± 113	7,870 ± 2,158
	8-9	7	834 ± 26	7,786 ± 874	7	834 ± 41	7,786 ± 861
	12	9	846 ± 43	9,733 ± 1,367	9	863 ± 32	9,200 ± 688
2004	6-7	11	842 ± 50	8,732 ± 1,351	11	845 ± 26	8,914 ± 787
	12	13	675 ± 129	4,892 ± 3,338	13	645 ± 99	4,477 ± 2,556
2005	1	10	852 ± 20	9,355 ± 557	9	865 ± 21	9,678 ± 651

尾叉長と体重については，平均値 ± SD を示した。

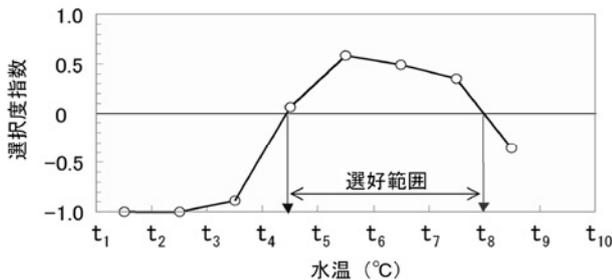
データについては、以下のような抽出や区分を行なった後に集計し、階級幅1°Cの頻度分布を求めて選択度指数の計算に用いた。

- ・生け簀内の水温：水温ロガーで水深別に測定したデータのうち、海面から1m間隔のデータを抽出して使用した（海面の水温については海面下0.5mの測定値を使用）。
- ・供試魚の遊泳水温：実験終了時に大きな外傷が見られた個体、明らかに異常と思われる行動（水面や底網付近への滞留等）を示した個体を除く各個体の遊泳水温のデータを用いた。
- ・解析の対象とした水深範囲：浦底湾の生け簀の深さは、設計上海面下9mまでであるが、底網の中央部が自重により若干垂れ下がる傾向があり、供試魚は海面下10mの範囲まではかなり出現した。また、海面下10mより深い範囲にデータの集積が見られる場合もあったが、これは温度反応行動と言うよりは、鉛直的な移動が底網

によって制限されたためと考えられた。これらのことから、生け簀内の水温、遊泳水温ともに、海面～海面下10mまでの範囲のデータを解析に用いた。

- ・解析の対象とした期間：供試魚を生け簀に収容してから暫くの期間、底網付近への滞留や不規則な深浅移動等、生け簀内の環境に不馴れなためと思われる行動が見られる場合があった。そこで、供試魚が生け簀に馴れ、水温の鉛直分布に対応した行動が見られるようになった以後の期間のデータを解析に用いた。なお、2004年6～7月の実験のみ給餌を行ったが、給餌によって昇温への行動反応が攪乱される可能性があるため、給餌を行った期間のデータについては解析から外した。
- ・昼夜による時間帯分け：昼夜による遊泳層の変化が認められたので、昼間（日出～日没）と夜間（日没～日出）の時間帯に分けて解析を行った。なお、日出時刻、日没時刻については、国立天文台暦計算室による敦賀市の時刻を参照した。また、日出・日没時刻のおよそ前後30分間のデータについては、解析対象から外した。

このようにして各温度階級について計算した選択度指数は、-1～1の範囲の値となり、プラスならば選好、マイナスならば忌避と見なすことができる。そこで、第4図のように、各階級の選択度指数の計算結果に基づいて、高温側および低温側において選択度指数が0となる水温を推定し、これを選好範囲の上限および下限値とした。



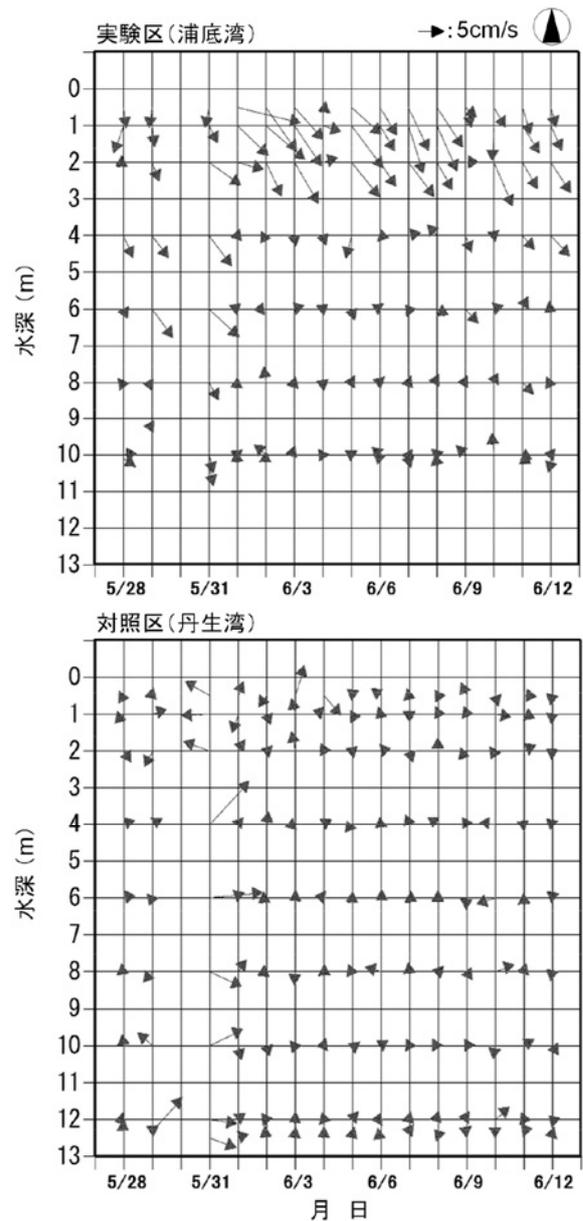
第4図 選好する水温範囲の推定方法

結 果

試験生け簀設置場所における環境要因 実験区および対照区それぞれの生け簀近傍における流向・流速の鉛直分布の観測例を第5図に示す。実験区では、温排水の放出による流動が海面下4m付近までの表層で観測され、10~20cm/s程度の湾口に向かう流れが卓越する場合が多かった。一方、対照区では実験区ほどの流動はほとんど観測されず、表層の流速は数cm/s程度である場合が多かった。

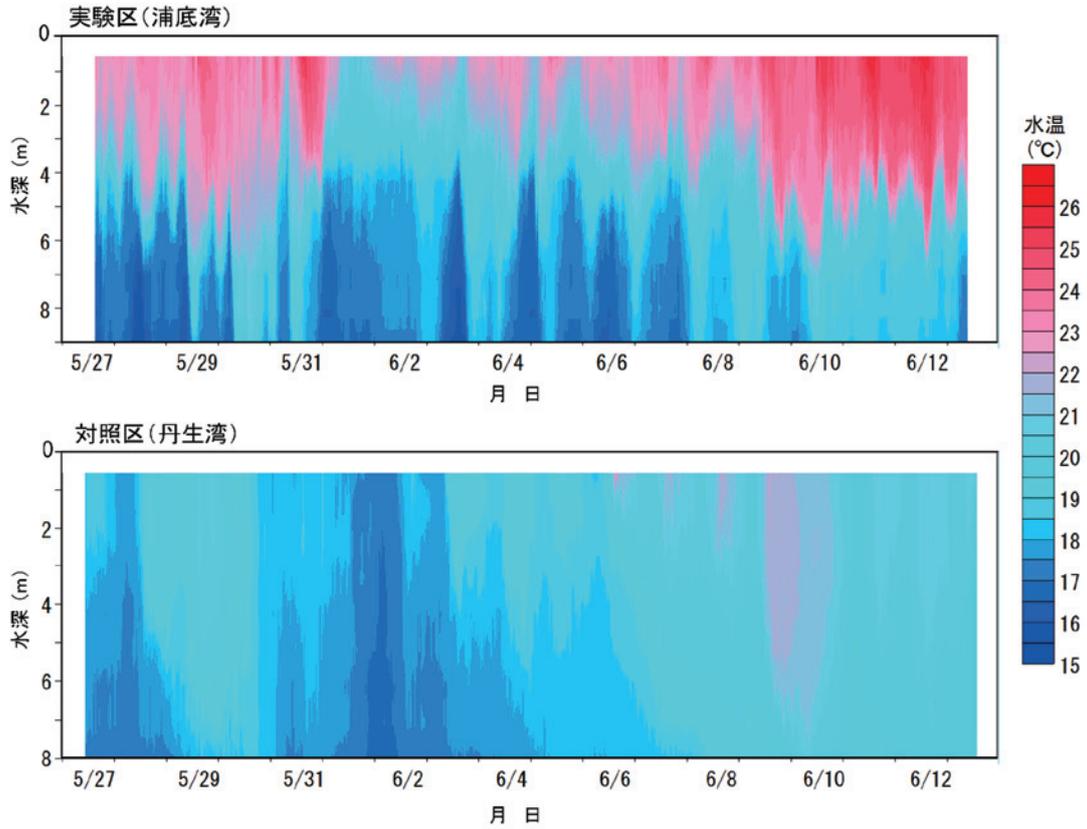
実験区および対照区それぞれの生け簀内における水温の鉛直分布の観測例を第6図に示す。実験区の表層には温排水による昇温層が形成され、海面直下の水温は、昇温層よりも深い層の水温に比べて4~6℃高い場合が多かった。昇温層の厚さは、海面下4~5m付近までの場合が多かったが、潮汐や風況によって変動した。一方、対照区の海面付近の水温は、実験区よりもおよそ3~6℃低く、水温の鉛直的な変化は実験区に比べて微弱であった。

実験区および対照区それぞれの生け簀内における光量子束密度の観測例を第7図に示す。光量子束密度は、実験区、対照区ともに日周期的に変化し、両生け簀の間で大きな差は無かった。

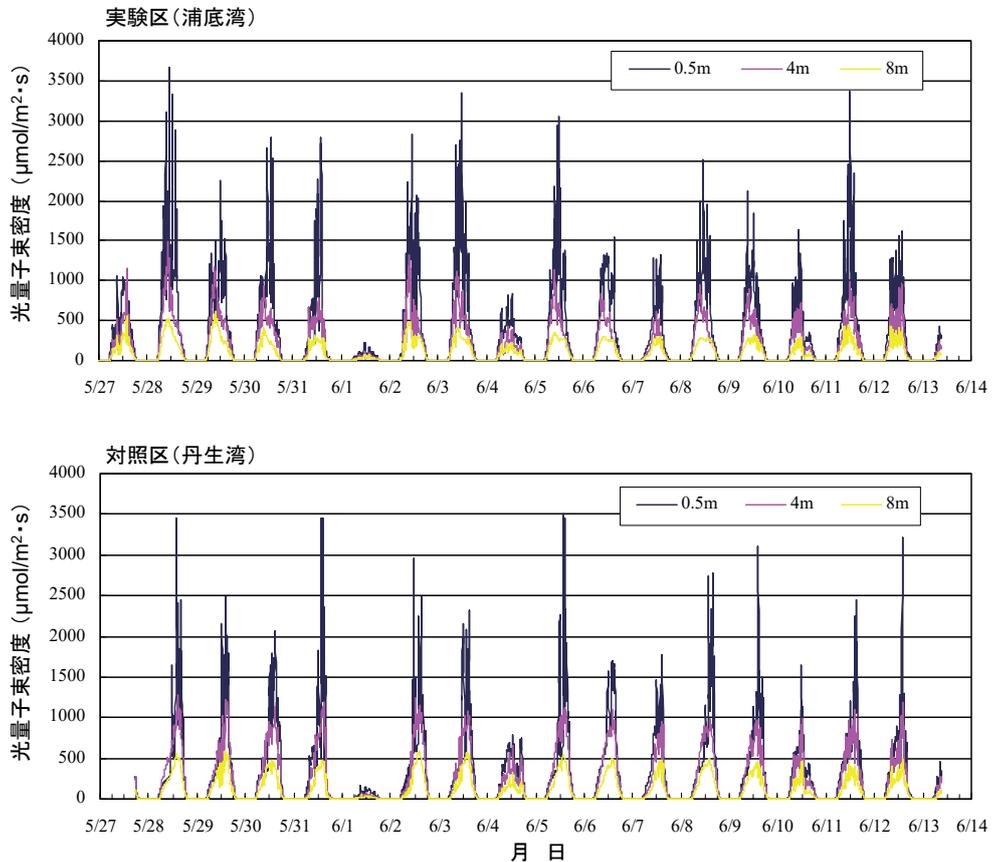


第5図 実験区および対照区の試験生け簀における流向・流速の鉛直分布（2003年5~6月の観測例）

三浦ら：温排水に対するブリの行動



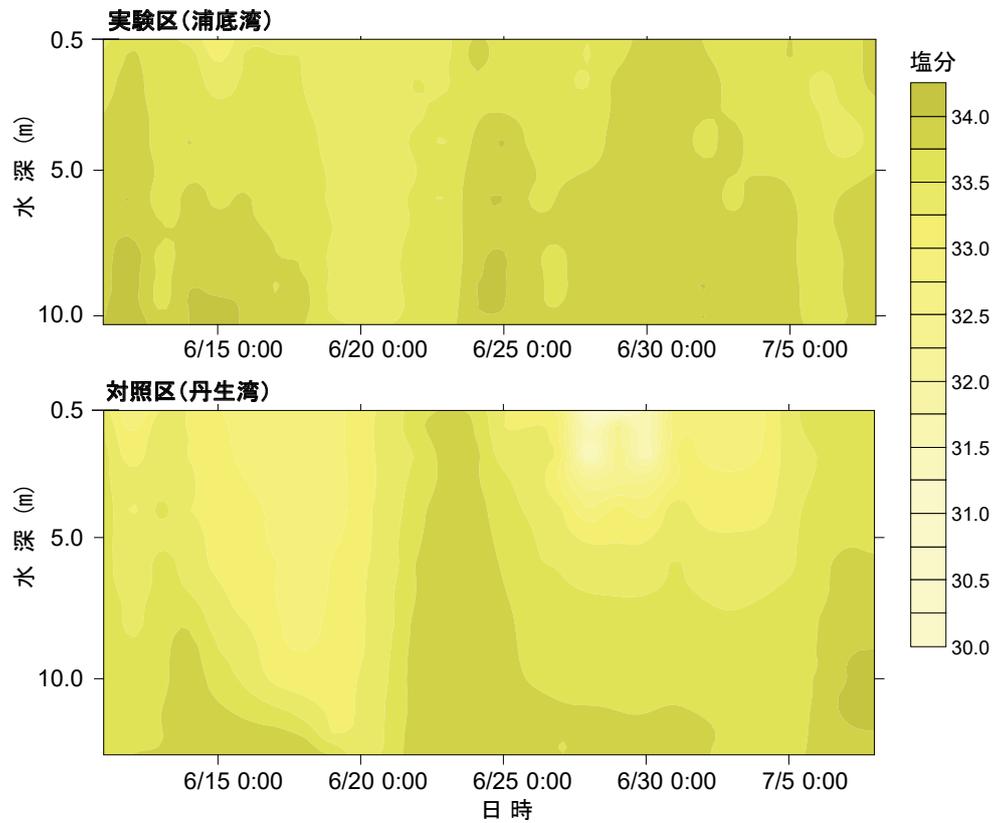
第6図 実験区および対照区の試験生け簀における水温の鉛直分布 (2003年5~6月の観測例)



第7図 実験区および対照区の試験生け簀における測定層別の光量子束密度 (2003年5~6月の観測例)

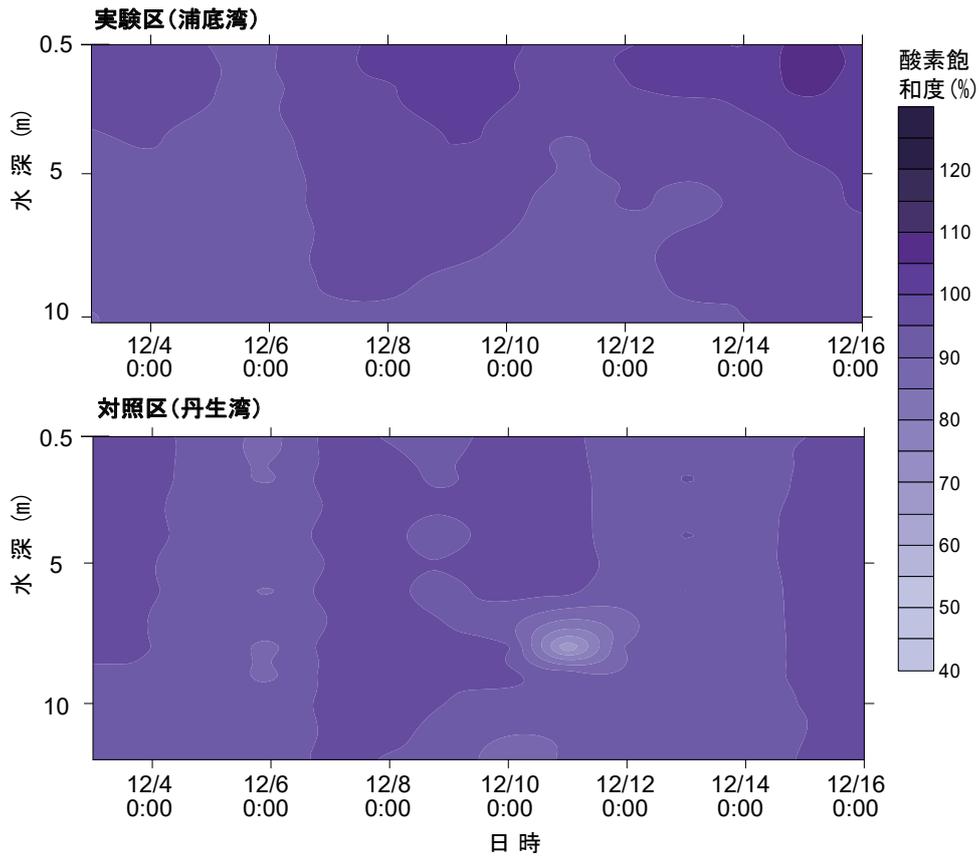
実験区および対照区それぞれの生け簀内における塩分、酸素飽和度、濁度の鉛直分布の観測例をそれぞれ第8, 9, 10図に示す。なお、これらの環境要因の観測結果には、上述の流況、水温、光量子束密度のような一定の鉛直的变化あるいは時間的变化は見られなかったため、実験区と対照区の間で明瞭な差が見られた事例を示す。塩分については、実験区では大きな変化は見られなかったが、設置場所の湾内に小規模河川が流入している対照区においては、降雨の後に表層の塩分が30台にま

で低下する場合があった（第8図）。酸素飽和度、濁度については、高水温期の対照区の海底付近において貧酸素になり、濁度も高まる場合があったが、海面から生け簀の底網までの範囲では、供試魚の行動に影響を及ぼす恐れのある変化はほとんど見られなかった。ただし、2004年12月の実験期間中の12月6日においてのみ、表層から底層の広い範囲内において、やや酸素飽和度が低く（90%弱）、濁度が高い状態（第9, 10図）が観測された。

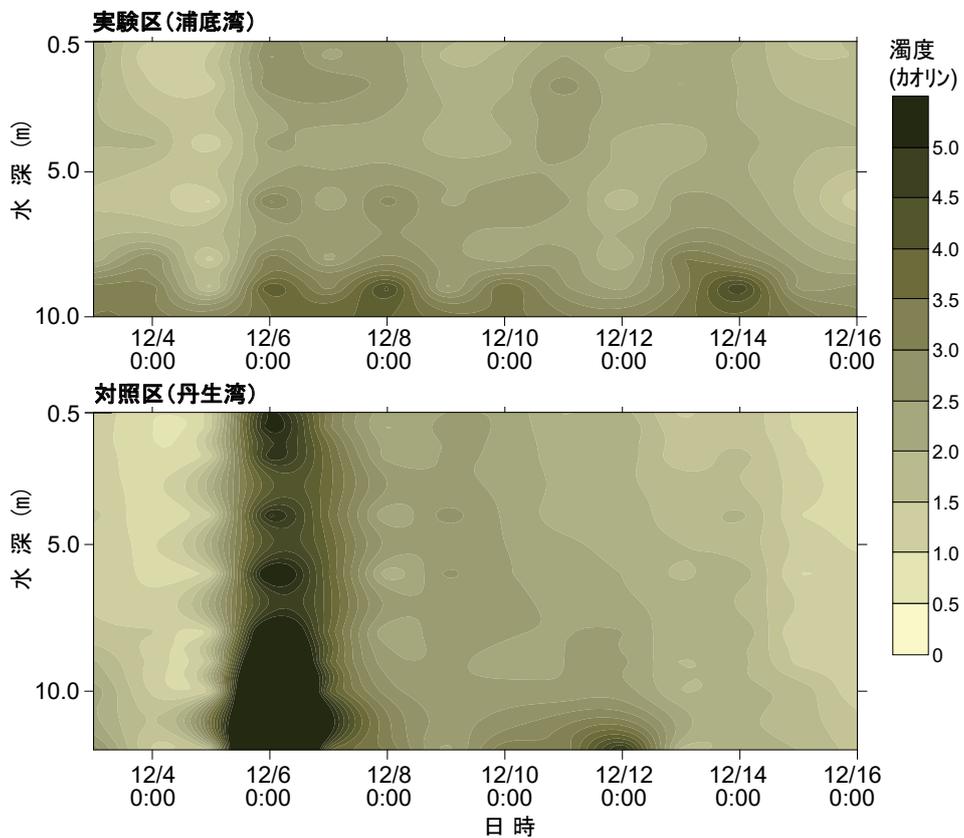


第8図 実験区および対照区の試験生け簀における塩分の鉛直分布（2004年6～7月の観測例）

三浦ら：温排水に対するブリの行動



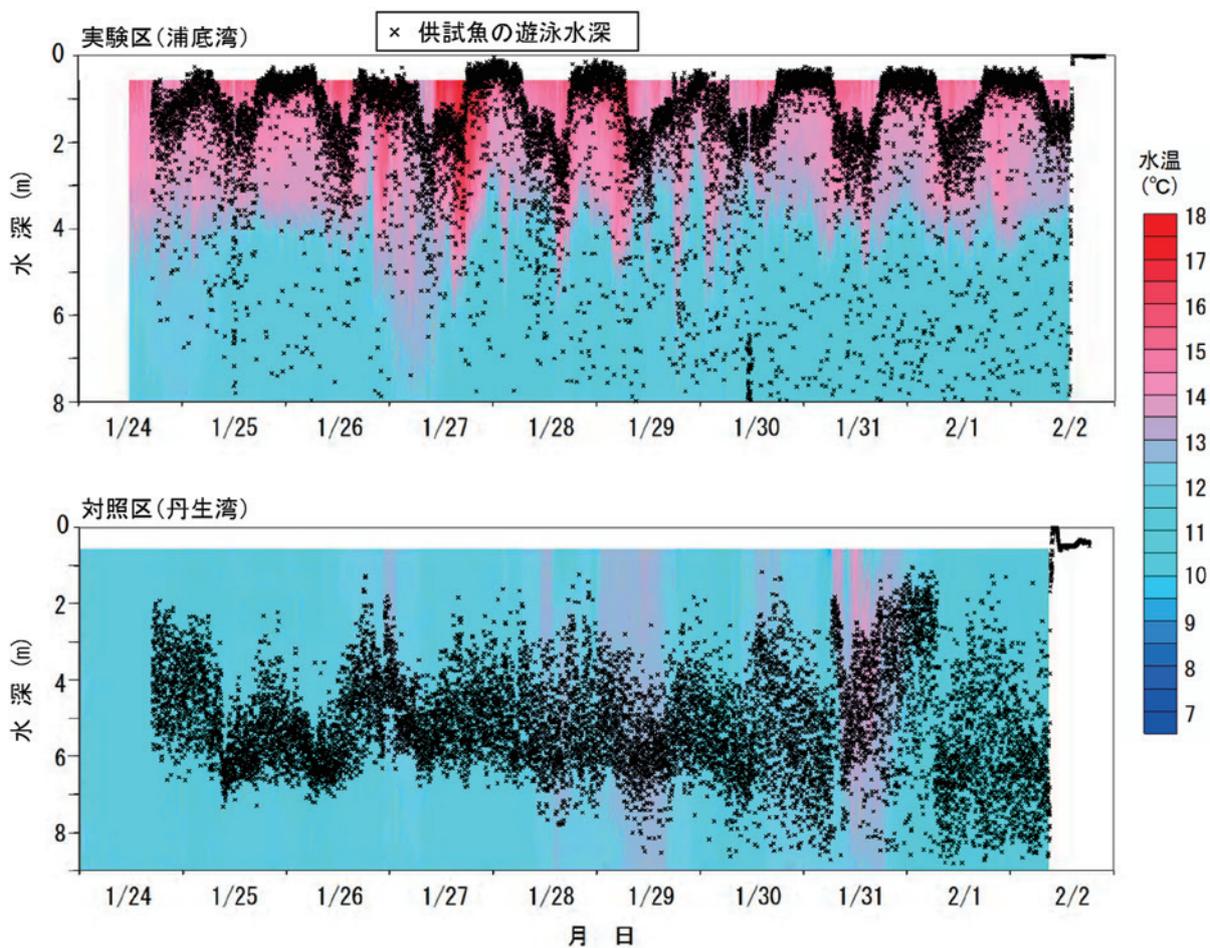
第9図 実験区および対照区の試験生け簀における酸素飽和度の鉛直分布 (2004年12月の観測例)



第10図 実験区および対照区の試験生け簀における濁度の鉛直分布 (2004年12月の観測例)

温排水による昇温層に対する行動反応 低水温期の2003年1～2月に実施した実験における試験生け簀内の水温の鉛直分布とブリの遊泳水深を第11図に示す。なお、試験生け簀内のブリは群れで遊泳する機会が多いことから、図中の遊泳水深については同時刻に測定された供試魚全個体の遊泳水深の平均値を示した（他の実験結果についても同様）。対照区の生け簀内の水温範囲（実験実施期間内の全測定値の範囲、以下、生け簀内の水温範囲の記載については全て同様）はおよそ10～14℃であり、水温の鉛直的な勾配はほとんど見られな

かった。一方、実験区の生け簀の水温範囲はおよそ10～17℃であり、表層の水温が温排水によって上昇していた。供試魚は、対照区ではおよそ海面下1～9mの範囲を幅広く遊泳したが、実験区では表層（海面～海面下約4m）の昇温層内（水温約13℃以上）を主に遊泳した。また、供試魚の遊泳水深は、昇温層内において日周期的に変化し、昼間に深く夜間に浅くなった。2005年1月に実施した実験でも同様の結果が得られ、浦底湾の供試魚は、およそ12～19℃の水温の鉛直勾配の中で、14℃以上の昇温層内を主に遊泳した。

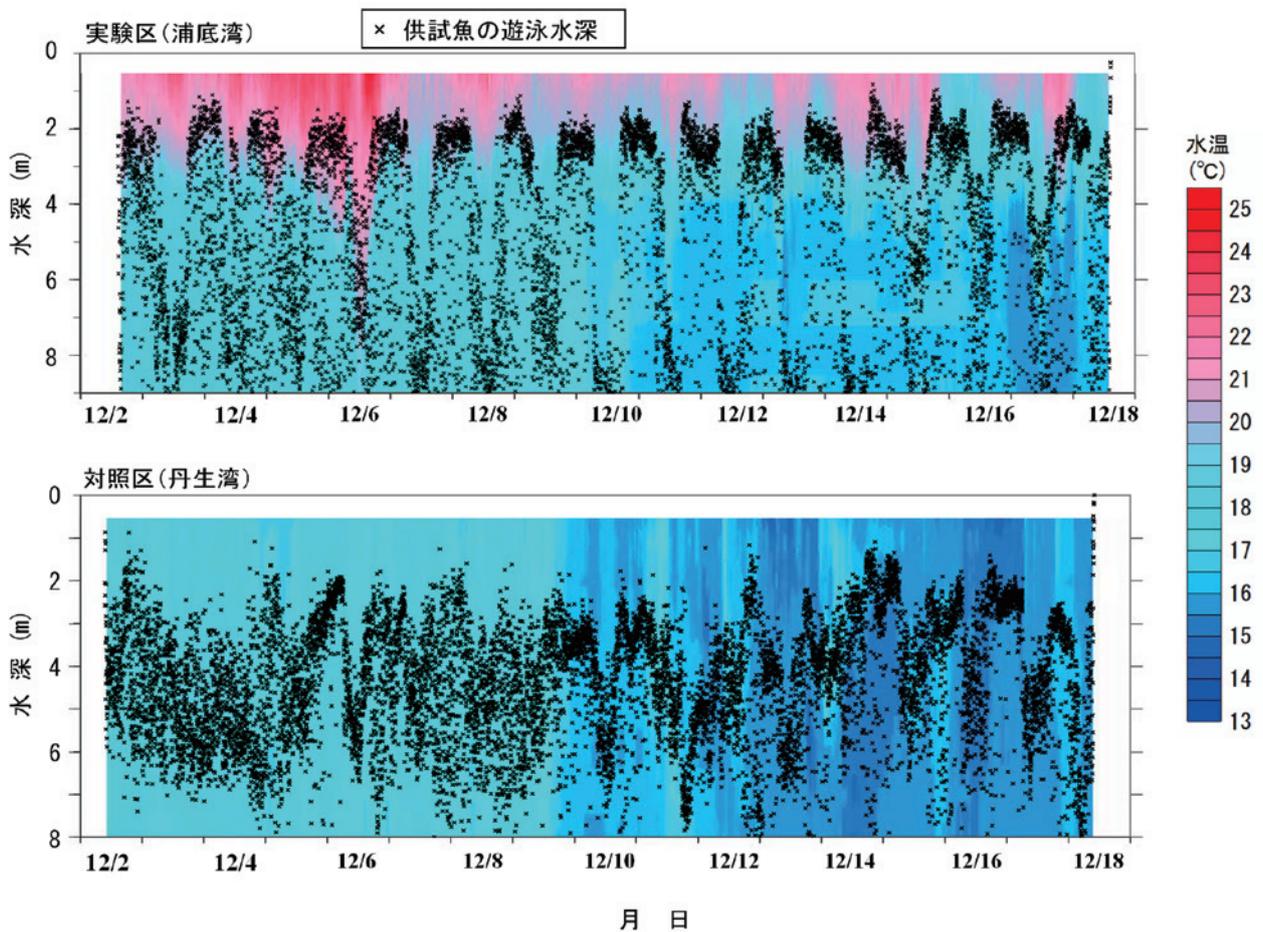


第11図 2003年1～2月の実験における試験生け簀内の水温の鉛直分布とブリの遊泳水深（各個体の平均値）

三浦ら：温排水に対するブリの行動

水温下降期の2003年12月に実施した実験の結果を第12図に示す。実験区の生け簀内の水温範囲はおよそ15~24℃，対照区ではおよそ14~18℃であった。対照区の供試魚は，海面下およそ1~8mの広い範囲を遊泳し，夜間に遊泳水深が浅くなる傾向があったが，観測日による変動が大きかった。これに対して，実験区では極めて明瞭な日周期的な遊泳水深の変化が見られ，夜間は海面下1

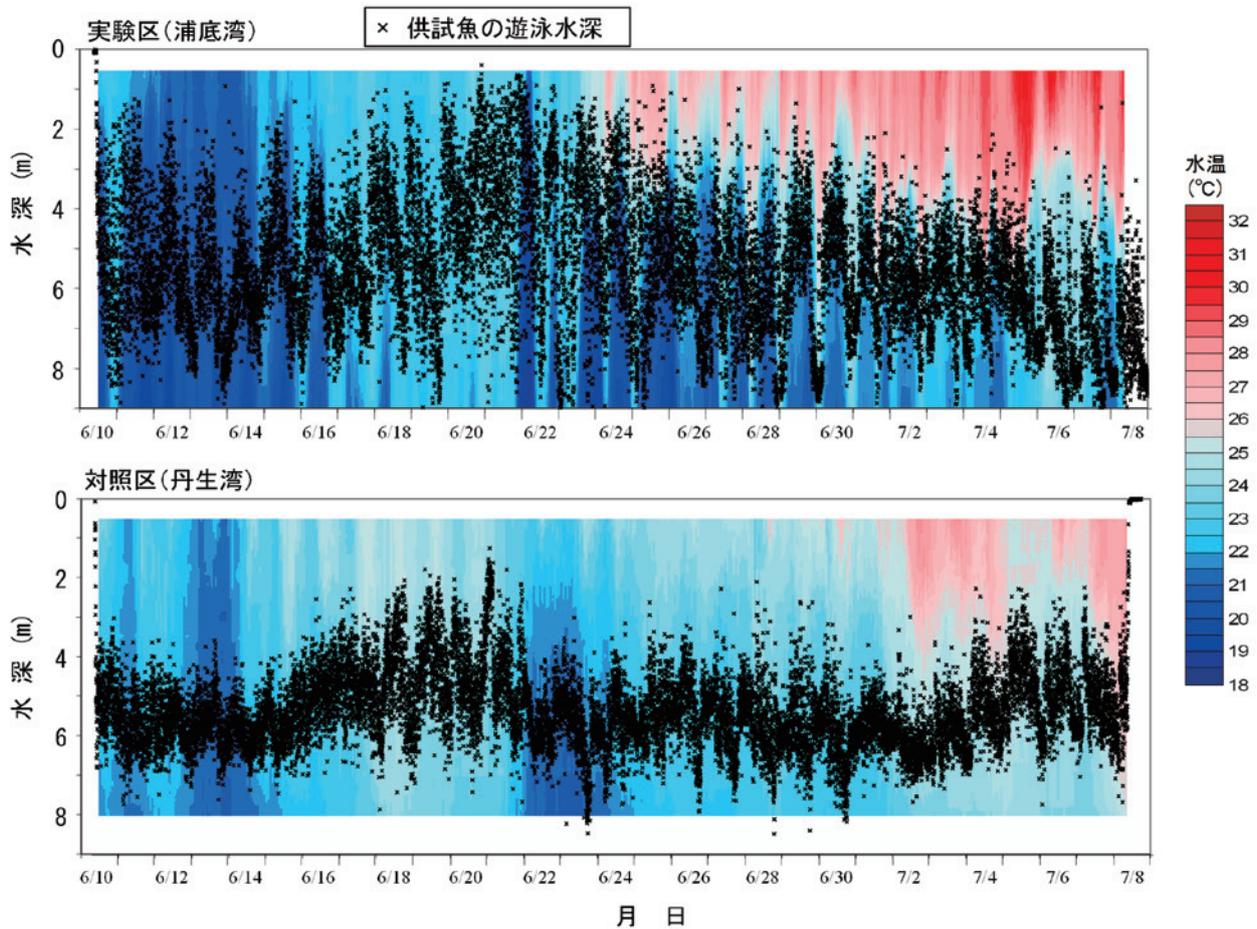
~3mの昇温層内を主に遊泳したが，昼間は昇温層よりも深い範囲を遊泳した。これは温度躍層を越える大きな変化であるため，遊泳水温にも昼夜で明瞭な差が見られ，昼間は主に16~18℃，夜間は18~21℃であった。同様の温度躍層を越える遊泳水深の大きな日周期的変化は，2004年の12月に実施した実験（実験区の水温範囲約16~23℃）においても見られた。



第12図 2003年12月の実験における試験生け簀内の水温の鉛直分布とブリの遊泳水深（各個体の平均値）

水温上昇期の2004年6～7月に実施した実験の結果を第13図に示す。なお、この実験では、実験区において6月23日まで温排水の放出がなく、24日の放出再開以後に生け簀内の表層の水温が上昇した。実験区の生け簀内の供試魚は、6月23日までは、表層から底層までの広い範囲を遊泳していたが、24日以後に温排水による温度勾配が形成される（生け簀内の水温範囲はおおよそ20～30℃）と、供試魚は約25℃以上の昇温層にはほとんど進入せ

ず、遊泳水深は昇温層の厚さの変動に応じて変化した。また、下層の約21℃以下の層も避ける傾向があった。一方、対照区の水温範囲はおおよそ22～27℃で、供試魚の温度に対する明瞭な行動反応は見られなかった。これよりもやや低い水温条件下で実施した2003年5～6月の実験（実験区の生け簀の水温範囲約17～26℃）では、供試魚は昇温層内の24℃以上の層にはほとんど進入しなかった。

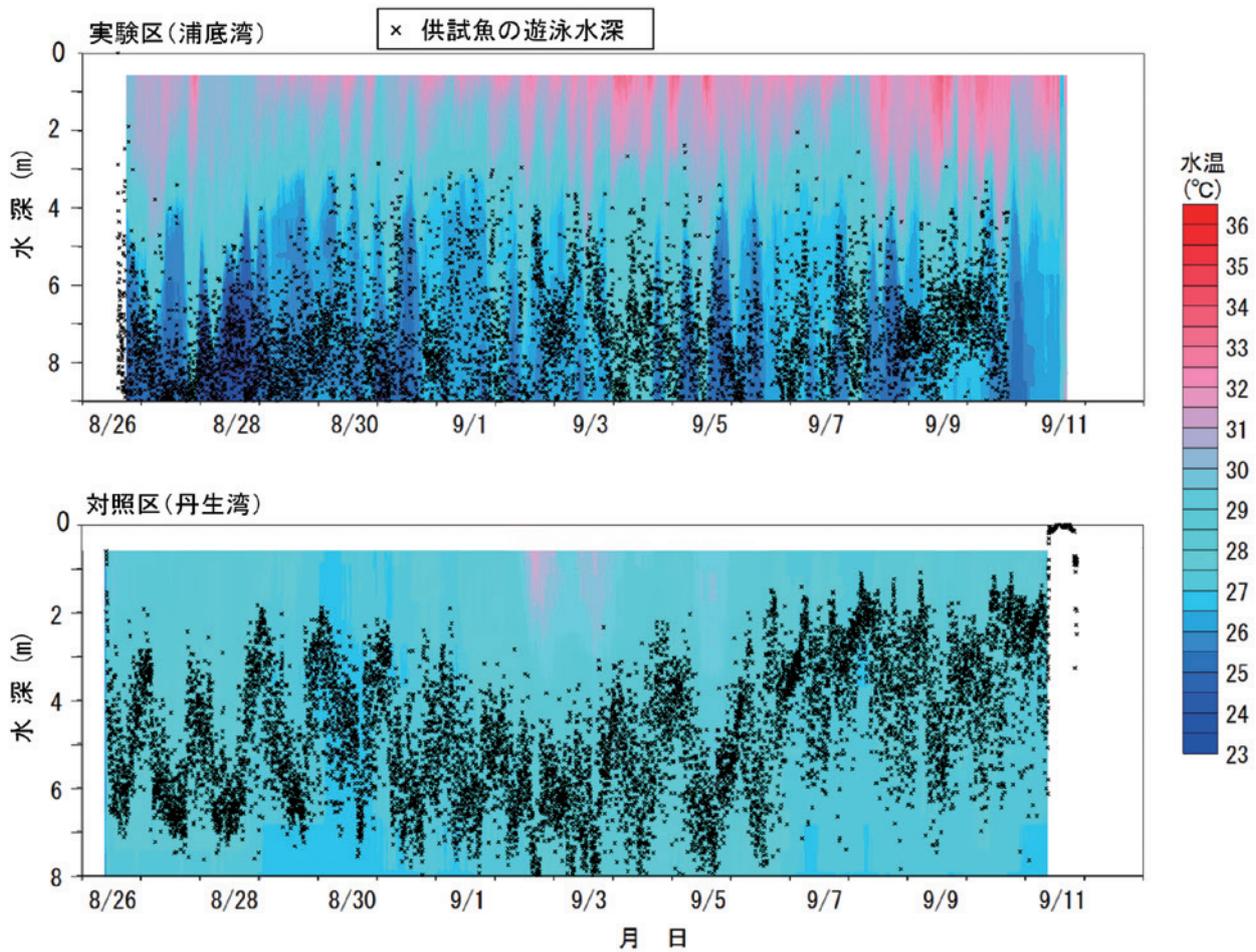


第13図 2004年6～7月の実験における試験生け簀内の水温の鉛直分布とブリの遊泳水深（各個体の平均値）

三浦ら：温排水に対するブリの行動

高水温期の2003年8～9月に実施した実験の結果を第14図に示す。実験区の生け簀内の水温範囲はおよそ23～32℃，対照区ではおよそ26～30℃であった。実験区の供試魚は，ほとんど昇温層内に進入せず，主に海面下4m付近の水温躍層より深

い水温23～28℃の範囲を遊泳した。対照区では，供試魚はおよそ海面下1～8mの広い範囲を遊泳したが，表層の水温が上昇し（温排水の影響ではなく自然の変化），29℃以上となった際には，これを避けるような遊泳水深の変化が見られた。



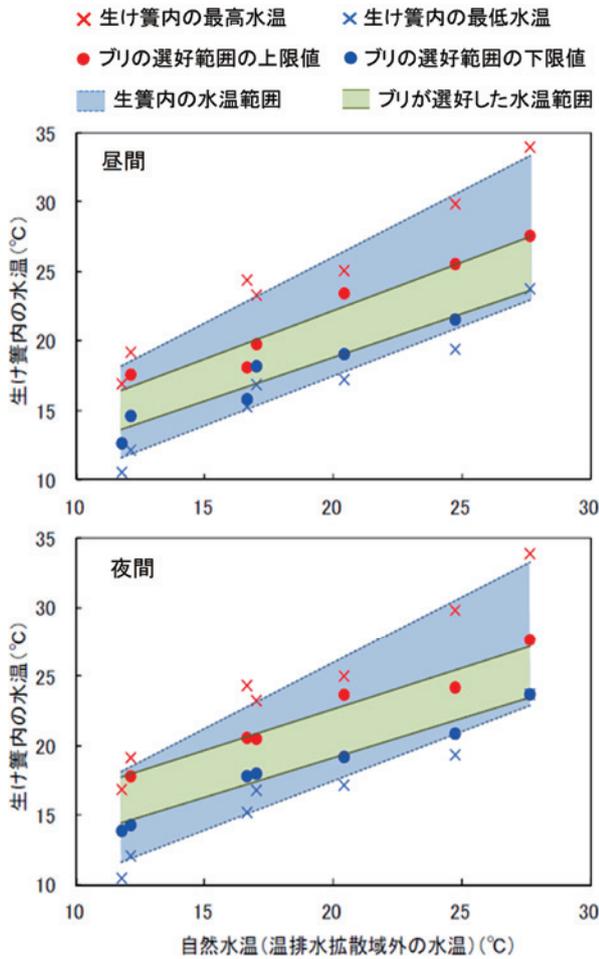
第14図 2003年8～9月の実験における試験生け簀内の水温の鉛直分布とブリの遊泳水深（各個体の平均値）

選好水温範囲 第15図に各実験実施時期の自然水温（温排水による昇温の無い水温）に対する実験区の試験生け簀内で観測された最高・最低水温、およびブリが選好した水温の上限値および下限値（供試魚各個体について第4図の方法によって推定

した選好範囲の上限値および下限値をそれぞれ平均した値）の関係を示す。なお、自然水温については、各実験実施期間中における対照区の試験生け簀内の海面～海面下10mの範囲の平均水温とした。また、昼夜で遊泳行動の変化が見られる場合があったので、昼間と夜間の結果を分けて示した。

実験区の生け簀内の最高・最低水温およびブリの選好した水温範囲の上限・下限値は、全て自然水温が高くなるにつれて上昇した。各データに回帰直線を当てはめたところ、全て有意な関係性が認められ（ $P < 0.05$ ）、自然水温とブリの選好した水温範囲の上限・下限の関係は、第3表の回帰式で表され、昼間よりも夜間のデータの方が R^2 の値が大きかった。

生け簀内の水温範囲とブリの選好範囲の関係を見ると、夜間の結果では、ブリは低水温期には生け簀内の水温範囲のうちの高い水温を選好するが、自然水温が上昇するにつれて、次第に生け簀内の水温範囲のうちの低い水温を選好するようになる傾向が明瞭であった。一方、昼間の結果では、低水温期において、夜間よりも低い水温を選好する傾向があったため、生け簀内の水温範囲に対する選好範囲の季節的な変化は、夜間の場合ほど明瞭ではなかった。



第15図 自然水温と実験区の生け簀内の水温範囲、ブリが選好する水温範囲の関係

第3表 自然水温に対するブリが選好する水温範囲の上限値・下限値の回帰式

時間帯	反応温度	回帰式	R^2
昼間	選好範囲の上限	$y = 0.70x + 8.13$	0.943
	選好範囲の下限	$y = 0.63x + 6.23$	0.924
夜間	選好範囲の上限	$y = 0.60x + 10.70$	0.958
	選好範囲の下限	$y = 0.57x + 7.76$	0.972

考 察

供試魚の行動に影響する環境要因 温排水拡散域内の実験区と温排水拡散域外の対照区のそれぞれの試験生け簀内におけるブリの行動には差が見られた。水温の鉛直的な変化の乏しい対照区では、表層～底層の広い範囲を遊泳する 경우가多く、時期的な変化もあまり見られなかった。これに対して、温排水によって水温の鉛直勾配が発達している実験区の生け簀では、生け簀内の特定の層を遊泳する傾向が見られるとともに、実験の実施時期によって遊泳層が変化した。このような実験区と対照区における供試魚の行動の差は、温排水による昇温の有無によるところが大きいと考えられるが、水温以外の環境要因の影響についても以下のように検討した。

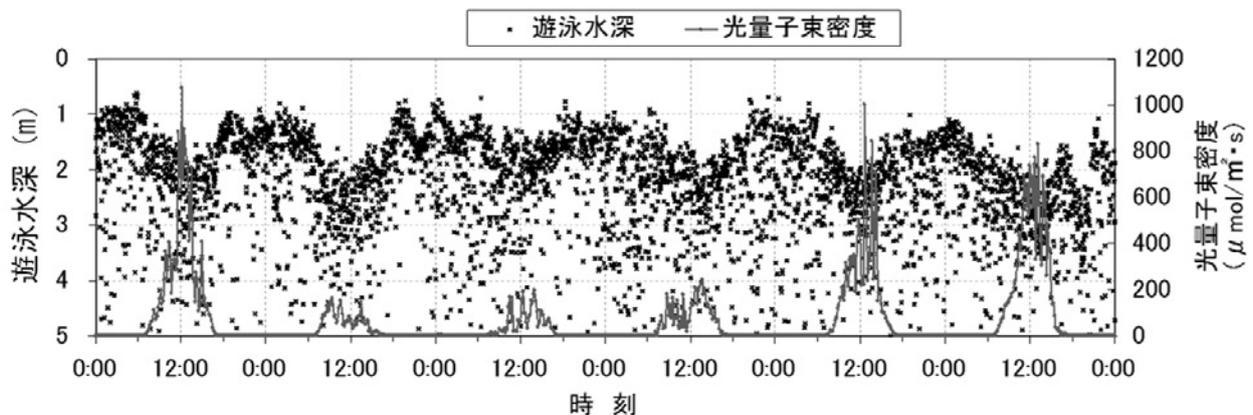
流向・流速は、水温と同様に実験区と対照区で差があり、実験区では、表層の昇温層内において温排水の放水による流動が発生しているのに対して、対照区の表層の流れは数cm/s程度の微弱なものであった。従って、実験区においては表層の流れに反応している可能性があるが、季節によって表層の昇温層を選択的に遊泳する場合と逆の場合があることから、流動よりも水温に対する反応が強く表れるものと考えられる。

実験区と対照区間の供試魚の行動の大きな差として、実験区では12～2月に明瞭な遊泳水深の日周期的変化が見られたのに対して対照区では不明瞭であることが挙げられる。実験区の海面下0.5 m層における光量子束密度とブリの遊泳水深を照

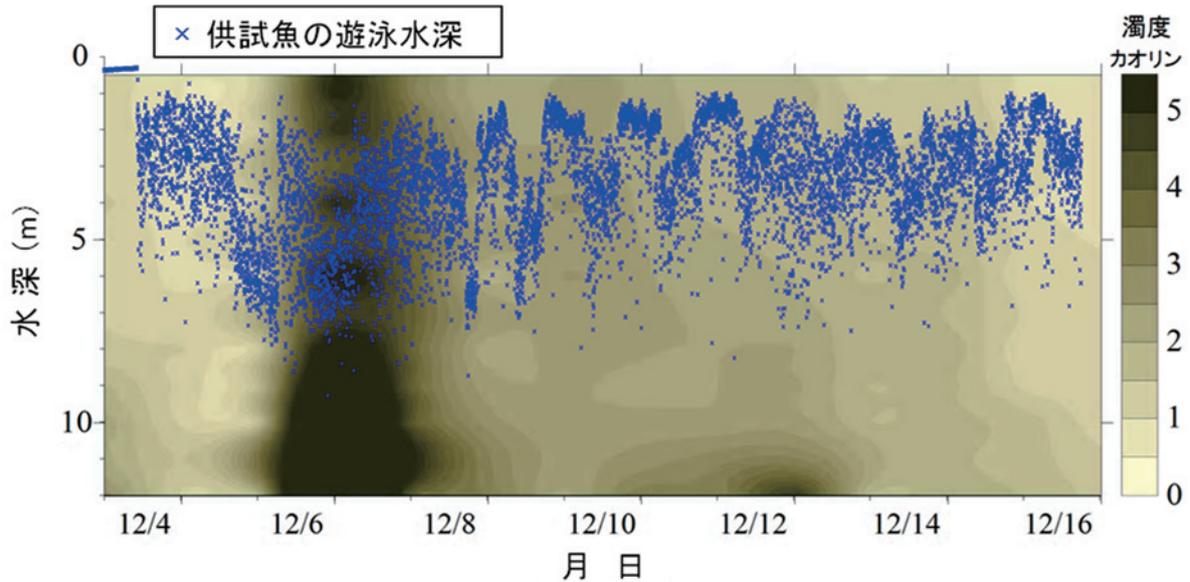
合してみると（第16図）、ブリは表層の光量子束密度がほぼ $0 \mu \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ となる時間帯により浅い層を遊泳しており、光条件の日周期的変化に伴って遊泳水深を変えていると考えられる。特に12～2月の低水温期に明瞭な日周変化が見られるのは、ごく表層の昇温層を選択的に遊泳する時期ほど光条件の影響を受けやすいためと推測され、昼間に遊泳水深が深くなることから、昼間の表層の明るすぎる条件を忌避するものと考えられる。また、1～2月より12月の方が遊泳水深の変化の幅が大きいのは、1～2月は昇温層より深い水深の水温が低すぎるために水温への反応が優先され、昇温層内での変化に留まるが、12月は比較的水温が高いため光への反応の方が優先され、より深い層へと移動するものと考えられる。

その他の環境要因（塩分、酸素飽和度、濁度）の影響については、2004年12月の実験期間中に、対照区において表層から底層の広い範囲内において、濁度が高く（5度以上）、酸素飽和度がやや低い（90%弱）状態になり、これと同時期に供試魚の主な遊泳範囲が水面下1～4mから5～8mに変化した（第17図）。この事例以外は、海面から試験生け簀の底枠の水深までの範囲内では大きな水質変化はほとんど見られず、供試魚の行動との関連も見出せなかった。

以上のことから、生け簀内のブリの行動に影響していた主な環境要因は、水温と光であり、昼間よりも光による攪乱のない夜間の実験結果の方が、本種の本来の温度反応を示しているものと思われる。



第16図 実験区の生け簀の海面下0.5m層における光量子束密度とブリの遊泳水深の日周期的変化 (2005年1月の観測例)



第17図 対照区の生け簀における濁度の鉛直分布とブリの遊泳水深（2004年12月の観測例）

温排水による昇温がブリの行動に及ぼす影響 実験区における夜間の実験結果に基づくブリが選好した水温範囲の季節変化を見ると、その上限値および下限値は、ともに自然水温の上昇に伴って高くなる。魚類の選好温度は、馴致温度（供試魚が実験実施前に経験した水温）によって変化することが知られており（Reynolds, 1977; Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1980），今回得られたブリの選好する水温範囲の季節変化もブリが生活していた環境水温の季節変化に応じたものと思われる。このように、選好する水温範囲は自然水温の上昇とともに高温側にシフトするものの、生け簀内の水温範囲との関係を見ると、ブリは低水温期には生け簀内の水温範囲のうちの高い水温を選好する（昇温層を選好する）が、自然水温が高くなるにつれて、次第に生け簀内の水温範囲のうち低い水温を選好する（昇温層を忌避する）ようになる。従って、温排水による昇温がブリの行動に及ぼす影響は季節によって異なるが、低水温期には昇温層を選好することから、少なくとも寒ブリが温排水による昇温によって漁場から逸散することは考え難いと言えよう。このように、生け簀実験によって魚類の水温の選好範囲とその季節変化を把握することは、温排水による魚類の行動への影響を予測するための有用な手法となり得ると考えられる。

謝 辞

本研究の実験の実施にあたっては、日本原子力発電株式会社および同社敦賀発電所、福井県水産試験場、福井県漁業協同組合連合会、敦賀市漁業協同組合、美浜町漁業協同組合の方々に多大なご支援とご協力を頂いた。また、本稿のとりまとめに関しては、公益財団法人海洋生物環境研究所の顧問 石丸隆博士（東京海洋大学名誉教授）ならびに清野通康博士に貴重なご助言を賜るとともに、役職員の方々に多くの励ましや有益なご意見を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。なお、本稿は、経済産業省原子力安全・保安院（当時）からの委託事業（平成14～16年度および平成18年度大規模発電所取放水影響調査 大型魚類温排水影響基礎調査）の成果の一部をとりまとめたものであり、事業の遂行に関してご指導頂いた検討委員各位をはじめとする関係諸氏にお礼申し上げます。

引用文献

- Coutant, C. C. (1970). Biological aspect of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effect. *CRC. Crit. Rev. Environ. Cont.*, 1, 341-381.

- Coutant, C. C. (1987). Thermal preference: when does an asset become a liability? *Env. Biol. Fish.*, **18**, 161-172.
- Jacobs, J. (1974). Quantitative measurement of food selection: a modification of the forage ratio and Ivlev's electivity index. *Oecologia*, **14**, 413-417.
- Kwain, W. and MacCauley, R. W. (1978). Effects of age and overhead illumination on temperature preferred by underyearling rainbow trout, *Salmo gairdneri* in a vertical temperature gradient. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **35**, 1430-1433.
- McCauley, R. W. and Read, L. A. A. (1973). Temperature selection by juvenile and adult yellow perch (*Perca flavescens*) acclimated to 24°C. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **30**, 1253-1255.
- 三浦雅大・藤澤俊郎・山田 裕・原 猛也 (2014). 生け簀による野外実験—大型ブリの水温に対する行動反応の解明—。海生研研報, **No.18**, 47-50.
- Otto, R. G., Kitchel, M. A. and Rice, J. O. (1976). Lethal and preferred temperature of the alewife (*Alosa pseudoharengus*) in Lake Michigan. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **105**, 96-106.
- Reynolds, W. W. (1977). Temperature as a proximate factor in orientation behavior. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 734-739.
- Reynolds, W. W. and Casterlin, M. E. (1978). Ontogenetic change in preferred temperature and diel activity of the yellow bullhead, *Ictalurus natalis*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **59A**, 409-411.
- Reynolds, W. W. and Casterlin, M. E. (1980). The role of temperature in the environmental physiology of fishes. In "Environmental physiology of fishes." (ed. Ali, M. A.), Plenum Press, New York, 497-518.
- 土田修二・田端重夫 (1997). インダイ幼稚魚の成長に伴う選好温度の変化. 日水誌, **63**, 64-69.
- 土田修二 (2002). 沿岸性魚類の温度選好に関する実験的研究. 海生研研報, **No.4**, 11-66.