

海生研リーフレットNo. 7

海産魚類3種の遊泳能力と水温



平成5年3月

財団法人海洋生物環境研究所

本冊子は、通商産業省資源エネルギー庁の委託により昭和57年度から昭和59年度まで実施した研究成果の一部を取りまとめたものである。

海産魚類 3 種の遊泳能力と水温

目 次

はじめに.....	2
試験装置.....	2
遊泳能力の評価方法.....	4
供試材料.....	6
試験手順.....	8
結果と考察.....	9
おわりに.....	15
参考文献.....	15

はじめに

魚がどのような遊泳行動を示し、どの位の遊泳能力を持っているかについては古くから興味が持たれ、生物学、行動学、水産学など、幅広い観点から多くの研究が行われている。こうした研究は、臨海発電所取水スクリーンへの魚類の衝突現象を明らかにする上でも重要である。すなわち、衝突を起こす魚類が流れに対して反応する性質つまり走流性の強さや、流れに抗してどれほど泳げるか、さらに、それらは成長に伴ってどう変わるかなどに関する知見は、発電所周辺海域における取水流動や取水設備などに対する魚類の反応や行動を予測したり、スクリーン衝突の回避・軽減化を図る上で基礎データとなるであろう。

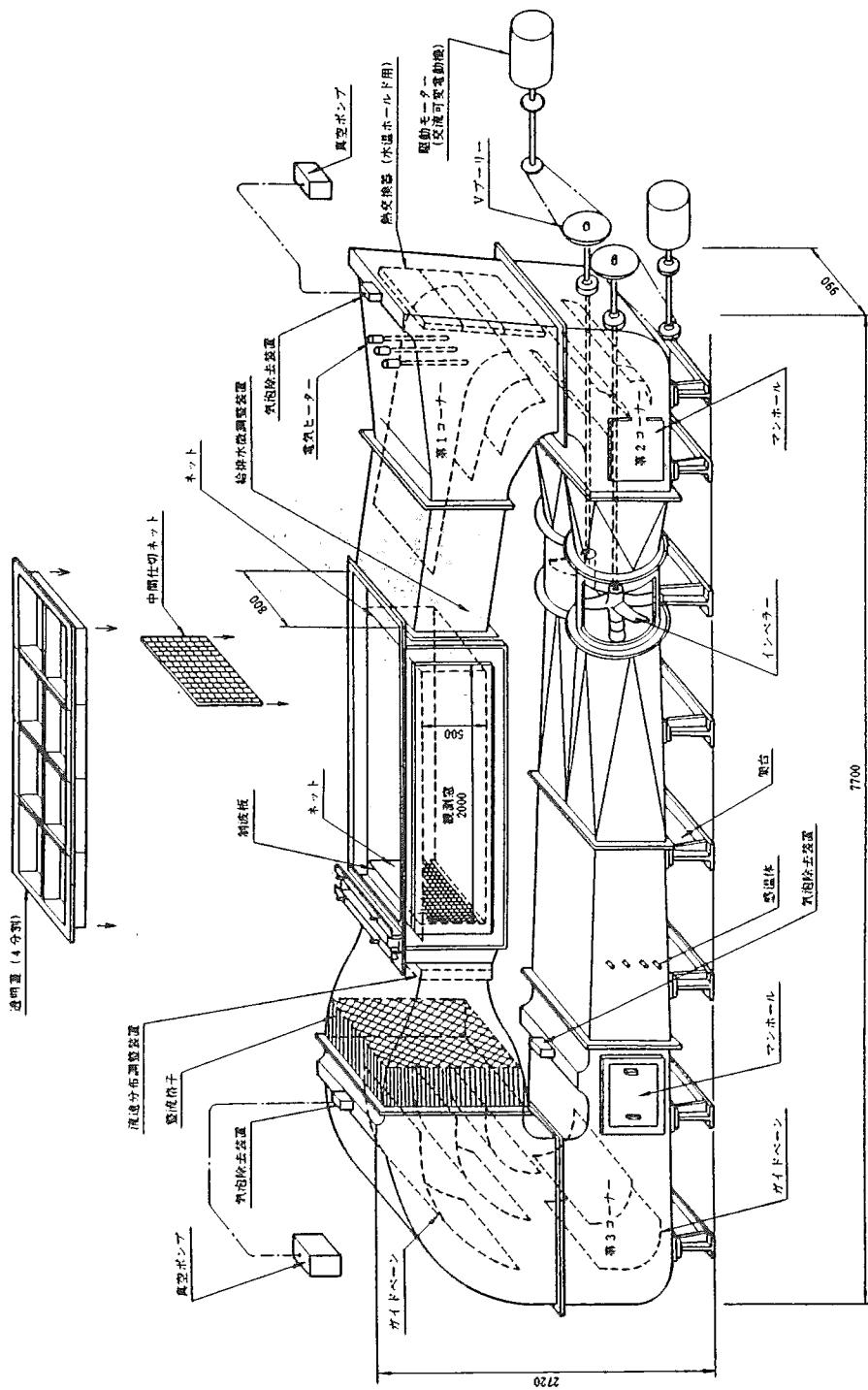
海生研は、通商産業省資源エネルギー庁から委託を受けた『温排水生物影響調査』の一環として、昭和57年度から「水流温度反応試験」を実施している。反応試験の目的は、火力・原子力発電所における魚類のスクリーン衝突影響を予測評価するための基礎的知見を得ることである。

この小冊子は昭和57年度から昭和59年度までに行った研究の一部、特に、上記の目的で製作した遊泳能力測定装置の構造および機能の概要と、本装置を用いて検討した我が国沿岸域に分布する海産魚類3種の遊泳能力とそれらに及ぼす水温の影響について述べたものである。

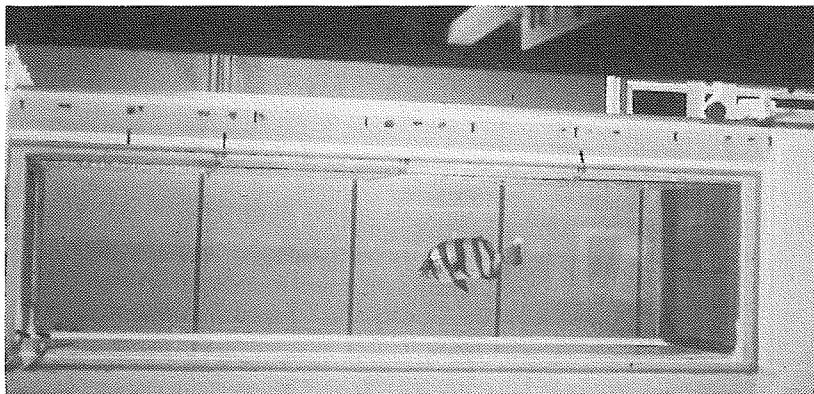
試験装置

本試験のために製作した遊泳能力測定装置（中村ら、1991）はいわゆるスマナトンネルで、その構造模式図を第1図に示す。装置の本体である回流水槽

第1図 遊泳能力測定装置(本体:垂直循環式回流水槽)の構造模式図



は外形が長さ7.7m、幅1.0m、高さ2.7m、使用海水量約9 m³の大型の垂直循環型水槽で、上部の中央には長さ2.0m、幅0.8m、高さ0.5mの試験水路部がある。試験を行う際には、この水路部内に別途製作した狭水路を置き、その中に供試魚を入れる。第2図はイシダイを入れた試験水路部を正面から見たところである。



第2図 遊泳能力測定装置(スタミナトンネル)の回流水槽試験水路部と
収容中のイシダイ

水路内の海水の流速は、回流水槽の下部に取り付けた2機の送流用インペラーアと交流可変モーターによって、5～200cm／秒の範囲で設定できる。また、水路の各箇所には水流の乱れを減少させ、流速をできるだけ均一にし、海水中の気泡を取り除くための種々の装置がセットされている。海水の水温は、大小2つの制御システムにより5～35°C間の任意の値に設定することができる。

遊泳能力の評価方法

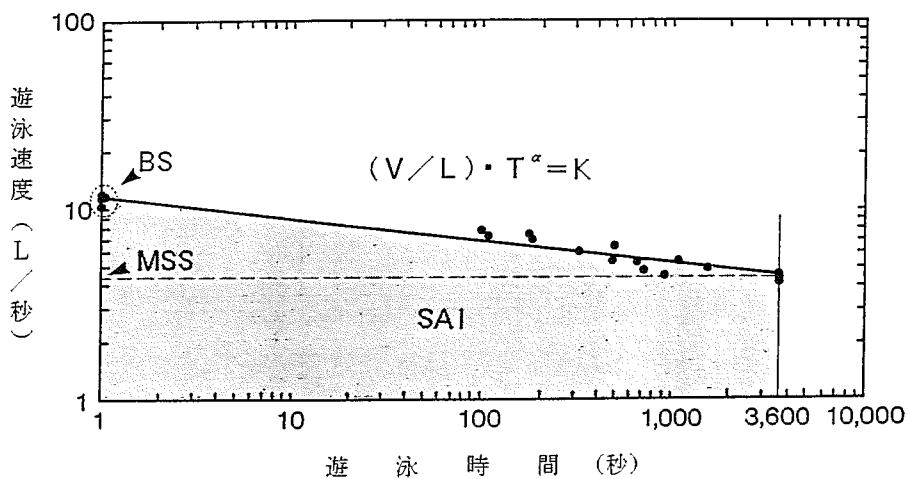
普通、魚の遊泳速度を論ずる場合に持ち出される概念は2つある。その一つは魚が瞬時に発揮しうる最大速度がどれ位かということで、これは魚が驚いて逃げたり、餌を追いかける時の遊泳速度に相当し、突進速度とか瞬間最大遊泳

速度(BSと略)と呼ばれている。もう一つは、魚が疲労困ぱいせずに比較的長い時間(数十分から数時間以上)泳ぎ続けることのできる速度で、研究者の定義の仕方によって耐久速度、最大持続遊泳速度(MSSと略)、臨界遊泳速度などと称されている。

また、魚類の遊泳能力を総合的に調べるためにには、単に、遊泳速度を測定するだけでなく、どの遊泳速度ならどの位の時間耐えていられるか、つまり、遊泳速度と遊泳時間との関係をも明らかにすることが必要である。このような観点から、岩田ら(1972)や塚本・梶原(1973)らは、幼・成魚の遊泳能力について、遊泳速度Vと遊泳時間Tとの間には下に示す遊泳曲線式が成り立つとした。

$$(V/L) \cdot T^\alpha = K$$

ここで、Lは体長、 α およびKは定数である。例として、上記の遊泳能力測定装置



第3図 遊泳曲線式と各遊泳能力指標

図中にはイシダイ 1年魚の水温15°Cにおける遊泳曲線式を示す。

V:流速, L:魚体長, T:遊泳時間, α およびK:定数

BS:瞬間最大遊泳速度, MSS:最大持続遊泳速度(破線)

SAI:遊泳能力指標(灰色台形部分の面積)

$$SAI = \int_1^{3,600} K \cdot T^{-\alpha} dt \times 10^{-4}$$

置を用いて求めたイシダイ 1年魚の水温15°Cにおける遊泳曲線式を、遊泳能力を表す種々の指標とともに第3図に示す。なお、変温動物である魚の遊泳能力は、当然、環境水温に左右されるので、水温の特定が必要となる。

この遊泳曲線式は、体長Lの魚が流速Vのもとでどれ位の時間泳いでいられるか（遊泳時間：T）を、数段階の流速において測定し、縦軸を流速Vあるいは V/L 、横軸をTとした図の中にその値をあてはめ、最小二乗法によって求めることができる。この場合、流速Vのもとで水路内を遊泳する魚の遊泳速度はほぼVであると仮定する。図中の V/L は流速Vを魚体長Lで割った値で、遊泳速度が体長の何倍に当たるかを表す。これは体長の違う個体間や異なる魚種間で遊泳能力を比較する際に便利で、単位は $L/\text{秒}$ となる。

第3図の遊泳曲線式において、瞬間最大遊泳速度BS（1秒間の遊泳を持続できる最大の遊泳速度で右辺のKに等しい）はTを1秒とした場合の V/L に、最大持続遊泳速度MSS（60分間の遊泳を持続できる最大の遊泳速度）はTを3,600秒とした場合の V/L に相当する。

さらに、遊泳能力の総合的な指標として遊泳能力指数SAIがある。このSAIは、遊泳能力を各遊泳速度における遊泳時間の総和によって示しうるとすると、第3図の灰色台形部分の面積を算出することによって求めることができる。今回の試験では、瞬間最大遊泳速度BS、最大持続遊泳速度MSS、遊泳能力指数SAIの3つの指標を用いて、魚種間での遊泳能力の比較や遊泳能力と水温との関係を調べた。

供試材料

試験対象となった魚種はブリ0年魚、マアジ未成魚、イシダイ1年魚である。

ブリは、三重県沖でモジャコ採捕業者によって漁獲された天然産で、千葉県内の活魚業者を通じて入手したものである。マアジは静岡県網代湾内で蓄養されていたものを入手した。また、イシダイは千葉県水産試験場（千倉町）から提供された受精卵を、当研究所で孵化させ、その後自然水温の条件下で飼育養成したものである。

各供試魚とも試験に供する前に少なくとも2週間以上、一定の水温のもとで飼育し、その水温に馴らした。各魚種についての馴致条件および試験条件と、各試験の終了時に測定した供試魚の体長等を第1表に示す。

第1表 馴致および試験条件と供試魚の体長

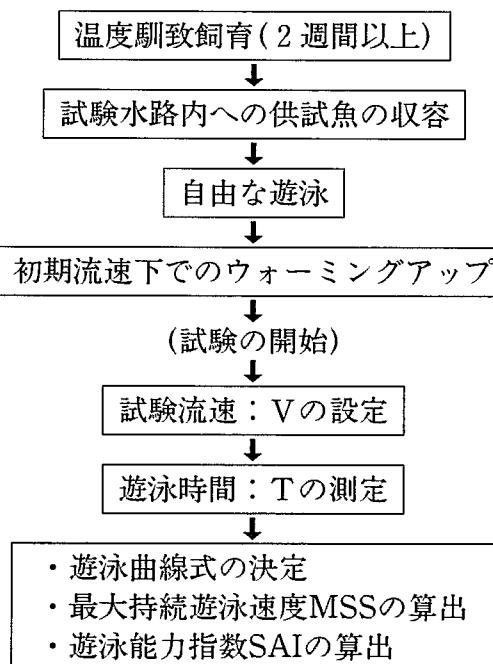
魚種	馴致 水温 (°C)	馴致 期間 (日)	供試 尾数 (尾)	供試魚* 平均 体長 (cm)	設置 水路	初期 流速 (cm/秒)	初期流 速付与 時間 (分)	試験 流速 (cm/秒)
ブリ	15	23-24	20	15.9±0.7	大型 狭水路	30	20	90~200
	23	20-24	22	17.8±0.8				130~200
	25	16-19	20	15.7±0.7				130~200
	28	25-28	23	17.3±1.1				140~200
マアジ	14	22-26	23	18.4±1.0	大型 狭水路	40	10 ~ 20	110~200
	17	29-33	20	18.2±1.5				120~200
	20	22-26	22	18.1±1.2				120~200
	25	19-27	21	17.1±1.1				130~200
	28	23-26	26	17.3±1.3				120~200
イシダイ	15	17-19	20	12.4±0.7	小型 狭水路	10	20	50~90
	20	17-20	20	11.9±0.9				60~100
	25	17-20	20	12.7±0.5				70~110
	28	15-23	27	12.4±0.7				60~110

* : 平均値±標準偏差

温度馴致飼育は屋内の容量500ℓの流水式水槽で行った。自然水温から各馴致水温への水温変化は、供試魚にショックを与えないよう1~3日かけて徐々に行なった。流水式水槽の海水は1回/時間の率で入れ換えた。また、この飼育期間中には、いずれの魚種に対しても、市販の配合餌料に魚類の解凍鮮肉を混合したモイストペレットを1日2回与えた。

試験手順

試験の手順を第4図に示す。馴致水槽から取り上げた供試魚1尾を、あらかじめ馴致水温と同じ水温に調節した回流水槽の狭水路内に移し、透明の塩化ビニル製の蓋をした。収容した魚が当初の興奮からさめ、安定した遊泳行動に移った時点で、水路に10~40cm/秒の穏やかな流れ（初期流速）を起こし、魚をこれに馴らした。



第4図 試験手順の概要

初期流速のもとで魚の遊泳が安定した時点（収容後20~40分）で測定を開始した。先ず、流速を初期流速から1秒間に1cm/秒の割合で上昇させて試験流速Vに固定した。次いで、その流速において魚が流れに対抗できなくなり狭水路の下流端の金網に張りつくまでの遊泳時間Tを測定した。試験を終了した魚は体長、体重などを測定し、以降の試験には用いなかった。どの魚種に対して

も、試験流速Vを7～10段階に設定し、各段階につき4～7尾の遊泳時間を測ってみた。

結果と考察

遊泳行動の特徴

水路に収容した直後や緩い初期流速のもとで遊泳している魚の行動をみると、いずれの魚種でも高温に馴らした供試魚が活発で、しかも安定した遊泳行動を示した。ブリおよびマアジでは、両魚種とも流れに逆らって泳ぐ性質が強く、泳ぐ位置もブリでは狭水路の上・中流域に集中し、マアジでは水路全域を遊泳していた。一方、イシダイの場合には上流域で遊泳することは稀で、ほとんどの供試魚が下流域で遊泳した。

さらに、試験を開始して、比較的速い流れのもとで遊泳させた場合にも、典型的な沿岸回遊性の魚類として知られるブリでは、流れに逆らって泳ぐ行動が頻繁にみられ、遊泳する位置も試験水路部内の上流域が中心であった。一方、元来、沿岸域でも特に、海底の岩礁地帯で生活し、通称「根付き魚」として知られているイシダイでは流れに逆らう性質が最も弱く、遊泳位置も下流域であった。また、マアジの遊泳行動はブリの場合に似ていたが、遊泳する位置が水路全域にわたっているという点で、遊泳の特徴はブリとイシダイの中間型であった。

遊泳速度と水温

試験の結果を魚種別・試験水温別にまとめて第2表に示す。

ブリの遊泳速度に関して、水温15～28°CにおいてBSは14.7～18.3L／秒、

第2表 海産魚類3種の遊泳曲線式と遊泳能力指標

魚種	水温(°C)	遊泳曲線式*	MSS(L/秒)	SAI
ブリ	15	(V/L) · T ^{0.11} = 14.7	6.0	2.41
	23	(V/L) · T ^{0.10} = 15.8	7.0	2.79
	25	(V/L) · T ^{0.09} = 18.3	8.8	3.46
	28	(V/L) · T ^{0.08} = 15.9	8.3	3.23
マアジ	14	(V/L) · T ^{0.11} = 15.3	6.2	2.51
	17	(V/L) · T ^{0.13} = 18.9	6.5	2.70
	20	(V/L) · T ^{0.10} = 15.1	6.7	2.66
	25	(V/L) · T ^{0.07} = 13.3	7.5	3.02
	28	(V/L) · T ^{0.06} = 12.9	7.9	3.02
イシダイ	15	(V/L) · T ^{0.12} = 11.7	4.4	1.79
	20	(V/L) · T ^{0.11} = 13.6	5.4	2.23
	25	(V/L) · T ^{0.10} = 12.9	5.8	2.28
	28	(V/L) · T ^{0.09} = 11.8	5.8	2.23

* : 前述のように、遊泳曲線式のK値はT = 1秒とした時のV/L、つまり、BSに相当する。

MSSは6.0~8.8L/秒の範囲にあった。BSを水温別に比較すると、25°C馴致群（水温25°Cで馴致飼育・試験を行った魚）の18.3L/秒が最大となり、最小値は15°C馴致群の14.7L/秒であった。MSSにおいてもBSの場合と同様の傾向が認められ、25°C馴致群の8.8L/秒が最大となり、最小値は15°C馴致群の6.0L/秒であった。さらに、第2表に示すように、ブリのSAIは25°Cにおいて最大となり、低温側の15°C馴致群は低い値を示した。

マアジのBSは12.9~18.9L/秒の範囲にあった。水温別に比較すると、17°C馴致群が最大となり、最小値は28°C馴致群の12.9L/秒であった。また、MSSは6.2~7.9L/秒の範囲にあり、全体的には高温側で大きい値を示した。さらに、SAIは水温の上昇にともなって増大し、最大は25°Cおよび28°C馴致群であった。

イシダイのBSは11.7~13.6L/秒の範囲にあり、水温別では20°C馴致群が最も大きい値を示した。MSSは4.4~5.8L/秒の範囲にあり、高温側の25°C馴致群および28°C馴致群が比較的大きい値を示した。第2表に示すように、イシダ

イのSAIは15°Cにおいて著しく小さく、25°C馴致群が最大値を示した。

以上のように、水温14~28°Cにおける3魚種の遊泳速度は、BSが体長の10倍以上(10L/秒以上)、MSSも体長の4倍以上(4.0L/秒以上)であることが明らかとなった。また、魚種別ではブリ、マアジ、イシダイの順で遊泳速度が大きかった。こうした魚種間での遊泳能力の差は、それらの天然海域での行動上の性質が異なることを反映しているものと考えられる。すなわち、イシダイは移動性の少ない魚として知られているが、ブリは典型的な回遊性の魚種であり、マアジも遊泳性の強い魚である。

遊泳能力と水温

魚種ごとの試験水温とBSおよびMSSとの関係を第5図に、試験水温とSAIとの関係を第6図に示す。

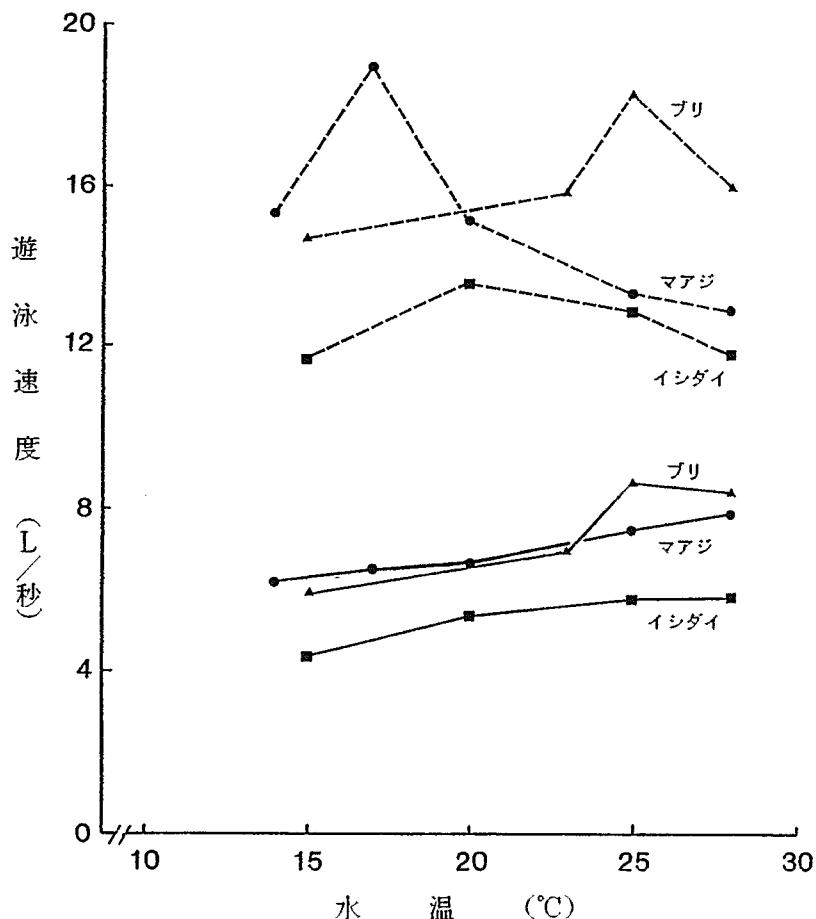
第5図および第6図から明らかなように、ブリ、マアジ、イシダイのMSSは高温側の25~28°Cで最も大きい値を示し、また、SAIも高温側で大きくなる傾向があった。一方、水温とBSとの関係については、3魚種に共通の傾向はなく、ブリではBSの最大値がMSSと同様に25°C付近に、マアジとイシダイではMSSの場合より低温側にあった。

自然の条件のもとでは、魚は平常時、突進速度以下の遊泳速度で行動する。しかし、外敵から逃げたり、餌を捕らえたり、急流を遡ったりするなどの行動において、突進速度が大きいことは魚にとって有利である。一般的には突進速度は水温の影響を受けないと言われているが、今回の試験では瞬間最大遊泳速度BSが、ブリの場合には最大持続遊泳速度MSSと同様に25°Cで、マアジとイシダイではそれぞれ17°Cおよび20°Cで最大値を示した。このことから、突進速度と水温との関係は魚種によって異なると考えられた。

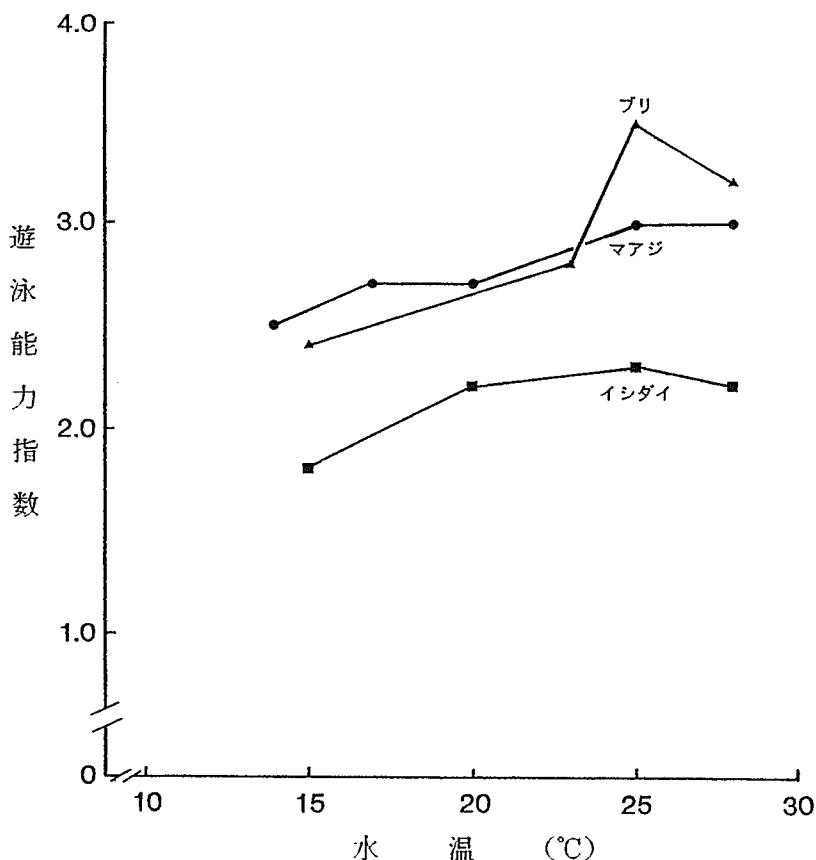
一方、長時間にわたり遊泳を持続できる能力は、その魚種の生存可能な水温

の範囲内であれば、水温が上昇するにつれ大きくなると言われている。今回の試験でも、3魚種とも20~23°C以上の場合の遊泳能力が14~15°Cの場合より大きかった。特に、ブリではBS、MSS、SAIのいずれもが25°Cで最も大きい値を示しており、ブリ0年魚の遊泳能力は25~28°C付近で最大になるものと考えられた。

各魚種の総合的な遊泳能力の指標であるSAIを水温別に比較すると、水温14~28°Cにおいてはイシダイの遊泳能力がもっとも小さかった。また、23°C以



第5図 海産魚類3種における水温と遊泳速度との関係
破線は瞬間最大遊泳速度(BS)を示し、実線は最大持続遊泳速度(MSS)を示す。



第6図 海産魚類3種における水温と遊泳能力指数(SAI)との関係

下ではマアジとブリの遊泳能力の間に大きな差はなかったが、25~28°Cの高温側ではブリの遊泳能力がマアジの遊泳能力よりも大きく上回った。

今回対象とした3魚種の生息・分布域は、日本沿岸の比較的温暖な海域を中心としている。このことは今回の試験で明らかとなつた高温側での遊泳能力増大の要因の一つとして挙げられる。しかしながら、温水性、冷水性を問わず水温の上昇に伴つて遊泳能力が増大することについては、不明の点もあり、更に詳細な検討が必要である。また、今回明らかにされた突進速度と水温との関係が魚種により異なることも興味深い知見であろう。

魚類の遊泳能力と発電所取水スクリーン衝突

発電所の取水スクリーンに対する魚類の衝突は、衝突を起こす魚種の昼夜の移動、季節的に起こる産卵・索餌のための回遊行動などのいろいろな行動上の性質や遊泳能力、さらには水温、光などの環境要因によって左右される(Uziel, 1978)。このため、欧米では以前から、スクリーン衝突現象の機構解明や影響の回避・軽減化を図るために、衝突を起こす魚種の遊泳能力や行動の性質などを調べる研究が続けられており、本稿で紹介する水流温度反応試験もそれらの事例に倣うところが多い。

今回の試験で得られた3魚種のMSSはいずれも4L／秒以上であった。魚は、このMSSよりも低い流速であれば長時間の遊泳が可能であり、流れに逆らって上流域へ溯ることも可能である。すなわち、体長10cm以上のブリ、マアジ、イシダイのスクリーン衝突は、それらが生息している場所の取水流速を40cm／秒より低くすること、あるいは取水流速が40cm／秒以上となるような流域へのこれらの魚の進入を防ぐことなどによって、衝突を回避あるいは軽減できるものと考えられる。

さらに、本研究において3魚種の突進的な遊泳速度もほぼ体長の10倍以上、例えば、体長10cmの魚では1m／秒以上の値を示すことが明らかとなった。従って、MSSまたはそれ以上の流速に取り込まれた魚でも、何らかの刺激によりBSに近い瞬発力を發揮し、危険域から脱出する場合があるのではなかろうか。また、魚を人工刺激するやり方も考えられるが、刺激の種類や与え方は今後検討を要する問題である。

魚種によっては、そのスクリーン衝突量が季節的に変化し、高水温の時期に少なく、低水温の時期に多い傾向があるものがある。今回明らかにされた水温と遊泳能力との関係でも、3魚種とも水温の上昇とともに遊泳能力が大きくなる傾向が認められており、このことが高水温期におけるスクリーン衝突量の減

少の要因となっている可能性がある。

おわりに

わが国の発電所の場合、冷却水の取水方式や取水流速は、立地点の理化学的な環境特性や生態学的な特性をも充分考慮して設計されている。また、実際には、発電所の取水行為による流れの影響がおよぶ場所は、いずれの発電所においても比較的狭い範囲に限定されるので、遊泳力のある上記魚種の若・成魚が、頻繁に発電所の専用港湾内や取水口にまで引き込まれ多量にスクリーン衝突を起こすといった事態は生じ難いものと考えられる。

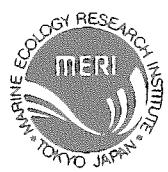
今回得られた魚類の遊泳行動の特性に関する研究成果は、今後、魚類の発電所取水スクリーンへの衝突影響を予測評価する場合や取水設備を設計する際の科学的データとして利用されるばかりでなく、水産学、海洋工学などの研究の基礎的資料として幅広く利用されるであろう。

参考文献

- 岩田清二・福田博之・萩原正昭・山根正信・千田哲資・福田富男 (1972). 流れに対する魚類の行動と、魚類に及ぼす流れの影響II. 本州四国連絡架橋漁業影響調査報告, pp.49-52, 日本水産資源保護協会.
- 中村幸雄・渡辺幸彦・土田修二 (1991). 新しい遊泳能力測定装置による海産魚類の遊泳能力の評価. 海生研報告, No.91203, 33pp.
- 塚本勝己・梶原 武(1973). 魚類の遊泳速度と遊泳能力. 水産土木, 10(1):

31-36.

Uziel, M. S. (1978). Impingement. J. Water Poll. Control Fed., 50 : 1553-1567.



事務局 〒101 東京都千代田区内神田1-18-12 北原ビル ☎(03)3233-4173
中央研究所 〒299-51 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地 ☎(0470)68-5111
実証試験場 〒945-03 新潟県柏崎市荒浜4-7-17 ☎(0257)24-8300