



REPORT
OF
MARINE ECOLOGY RESEARCH INSTITUTE

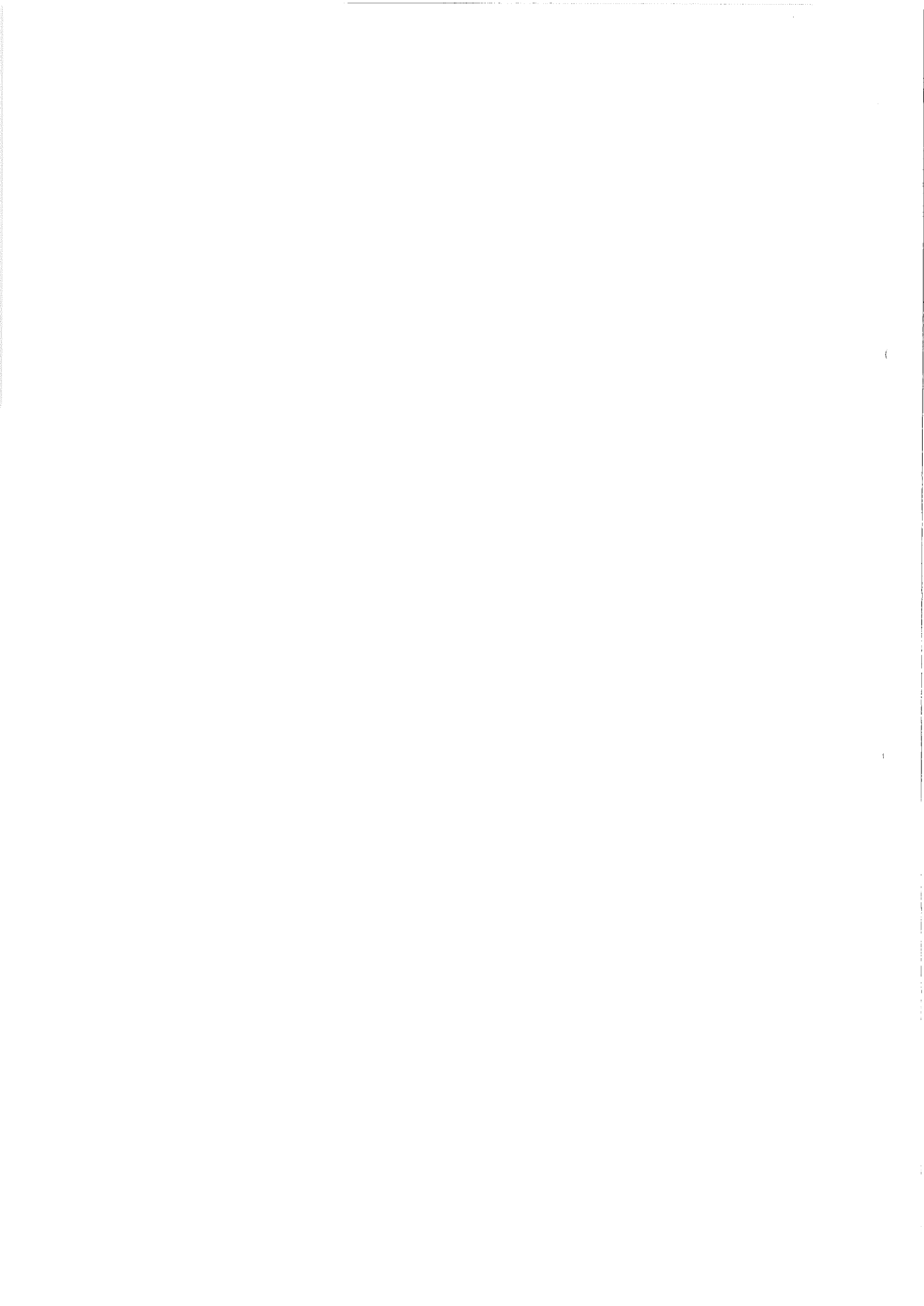
海洋生物環境研究所研究報告

No. 91203

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

平成3年12月

December, 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

中村幸雄¹・渡辺幸彦¹・土田修二

Evaluation of Swimming Performance of Seawater Fishes with a New Apparatus of Stamina Tunnel Type

Yukio Nakamura¹, Yukihiro Watanabe¹ and Shuuji Tsutida

Nakamura, Y., Watanabe, Y. and Tsutida S. (1991). Evaluation of the swimming performance of seawater fishes with a new apparatus of stamina tunnel type. Rep. Mar. Ecol. Res. Inst., No. 91203 : 1-33.

Abstract : Swimming performance was evaluated on three species of seawater fishes, *Seriola quinqueradiata*, *Trachurus japonicus* and *Oplegnathus fasciatus*, using a new apparatus of stamina tunnel type (L7,700mm×W990mm×H2,720mm). The experimental apparatus consisted of a circular tank and auto-control system to regulate water current and temperature. Test operations of the apparatus showed that the relationship between mean current velocities from 5 to 200 cm/s in the swimming flume and the impeller revolutions was linear, and the horizontal and vertical distributions of flow were relatively uniform throughout the swimming flume. The water temperature was also controlled to certain set values in the range of 5-35°C within ± 0.1°C by the main and auxiliary heat-exchangers.

Swimming performance of *S. quinqueradiata*, *T. japonicus* and *O. fasciatus*, 11.9-18.4cm in mean body length (L), was tested at acclimation temperatures from 14 to 28°C. Burst speeds (BS) and maximum sustainable speeds (MSS) for the three fishes ranged from 11.7 to 18.9 L/sec and 4.4 to 8.8 L/sec, respectively. There was no correlation between BS and temperature, while MSS, critical swimming speed (CSS) and swimming ability indices (SAI) for all the fishes increased with temperature in the range of 14-25°C. Comparing the swimming performance among these fishes within 14-28°C, *O. fasciatus* was the poorest swimmer. Furthermore, while the swimming performance above 25°C was much greater for *S. quinqueradiata* than for *T. japonicus*, the difference between the two was very small below 23°C. These results show that swimming performance of the three fishes is greatly dependent on water temperature and is closely related to respective ecological characteristics and locomotory habits.

Keywords : Stamina tunnel, Seawater fishes, Swimming performance, Water temperature, Swimming speed

1. 現在：(財)海洋生物環境研究所実証試験場 (〒945-03 新潟県柏崎市荒浜4-7-17)
Present address: Demonstration Laboratory, Marine Ecology Research Institute (4-7-17, Arahama, Kashiwazaki, Niigata Pref., 945-03, JAPAN)

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 : 1-33.

要約: 遊泳能力測定装置(スタミナトンネル, L7,700mm×W990mm×H2,720mm)を製作し, これを用いて海産魚類3種, ブリ, マアジ, イシダイの遊泳能力について検討した. 装置は, 大きく分けて回流水槽と流速および水温の自動制御部とから成る. 装置の性能試験では, 5~200cm/秒の範囲で流速とインペラー回転数との間に直線関係が認められ, 水路内の流速の水平・垂直分布も比較的均一であった. また, 回流水槽内の海水温度については, 大小2つの熱交換器によって, 5~35℃の任意の設定値を±0.1℃の精度で制御することが可能であった.

この装置を用いて, 14~28℃で定温馴致した平均体長11.9~18.4cmのブリ, マアジ, イシダイの遊泳能力を測定した. 3魚種の瞬間最大遊泳速度(BS)と最大持続遊泳速度(MSS)はそれぞれ11.7~18.9L/秒および4.4~8.8L/秒の範囲にあった. MSS, 臨界遊泳速度(CSS), 遊泳能力指数(SAI)は, いずれの魚種においても水温14~25℃の範囲では高温側で大きい値を示したが, BSについては水温に依存した一定の傾向のある差異は認められなかった. 14~28℃ではイシダイの遊泳能力がもっとも小さかった. また, 25℃以上ではブリの遊泳能力がマアジより顕著に大きかったが, 23℃以下では両者の遊泳能力に大きな差はなかった. これらの結果は3魚種の遊泳能力が水温に大きく依存し, それぞれの生態的特性や行動習性と密接に関係することを示す.

キーワード: スタミナトンネル, 海産魚類, 遊泳能力, 水温, 遊泳速度

目 次

要約	1	2) マアジ未成魚	17
I. まえがき	4	3) イシダイ1年魚	17
II. 試験方法	5	IV. 考察	18
1. 試験装置	5	1. 試験装置	18
2. 試験方法	8	2. 遊泳能力	18
1) 供試材料	9	1) 遊泳行動の特性	18
2) 試験手順	10	2) 遊泳速度	19
3) 遊泳能力指標の測定	11	3) 遊泳能力と水温	21
III. 試験結果	12	4) 魚類の遊泳能力と発電所 取水スクリーン衝突	22
1. 装置の性能	12	引用文献	24
2. 遊泳能力測定試験	14	付表	26
1) ブリ0年魚	15		

図 表 目 次

第1図 遊泳能力測定装置(回流水槽本体)の構造模式図	6
第2図 水温制御部の概略図	7
第3図 遊泳曲線式と各遊泳能力指標	8
第4図 試験手順の概要	10
第5図 大型狭水路横断面の流速分布	13
第6図 大型狭水路縦断面の流速分布	13
第7図 海産魚類3種における水温と遊泳速度との関係	15
第8図 海産魚類3種における水温と遊泳能力指数との関係	16

第1表	馴致および試験条件と供試魚の体長	9
第2表	海産魚類3種の遊泳曲線式と遊泳能力指標	14
付表1	ブリ0年魚の水温15℃における遊泳能力測定試験結果	26
付表2	ブリ0年魚の水温23℃における遊泳能力測定試験結果	26
付表3	ブリ0年魚の水温25℃における遊泳能力測定試験結果	27
付表4	ブリ0年魚の水温28℃における遊泳能力測定試験結果	27
付表5	マアジ未成魚の水温14℃における遊泳能力測定試験結果	28
付表6	マアジ未成魚の水温17℃における遊泳能力測定試験結果	28
付表7	マアジ未成魚の水温20℃における遊泳能力測定試験結果	29
付表8	マアジ未成魚の水温25℃における遊泳能力測定試験結果	29
付表9	マアジ未成魚の水温28℃における遊泳能力測定試験結果	30
付表10	イシダイ1年魚の水温15℃における遊泳能力測定試験結果	31
付表11	イシダイ1年魚の水温20℃における遊泳能力測定試験結果	31
付表12	イシダイ1年魚の水温25℃における遊泳能力測定試験結果	32
付表13	イシダイ1年魚の水温28℃における遊泳能力測定試験結果	32
付表14	共分散分析法による温度馴致群別の遊泳曲線回帰式の傾きと高さに関するF検定結果	33

I. ま え が き

魚類の遊泳能力に関しては、行動や生理・生態等の生物学的観点から広く研究が行われ、既に淡水産および海水産の魚種においてよく調べられている。これらの中には遊泳能力と呼吸代謝およびエネルギー代謝について論じた Brett (1964) の報告や、遊泳時の生理的变化を筋肉活動、呼吸・循環系、内分泌系等の諸機能に着目して調べた研究等 (Davie and Forster, 1980 ; Priede and Holliday, 1980 ; Tsukamoto, 1984a, b; Barrett and McKeown, 1988) がある。その他、魚類の遊泳能力に関する実験的研究については、Beamish (1978) の総説に詳しい。魚類の遊泳行動の解析は水産においても重要であり、魚の行動と環境水の流動との関連性、自然海域における稚仔魚の分布機構と行動生態、種苗生産時における稚仔魚の初期減耗と遊泳能力との関係等を取り扱った研究 (塚本・梶原, 1973 ; 岸田・福原, 1981; 安永, 1985a, b) が行われつつある。しかしながら、わが国沿岸域に分布する海産魚類の幼・成魚の遊泳能力を厳密に検討評価した知見は乏しく、また、それと環境要因との関係を調べた研究も見当たらない。

本研究は、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を目的として、1980年通商産業省資源エネルギー庁から財団法人 海洋生物環境研究所へ委託された『温排水生物影響調査』のうち、1981年から開始された「水流温度反応試験」の1984年までの実施成果の一部である。本報では製作した遊泳能力測定装置の構造および機能の概要と、この装置を用いて検討した海産魚類3種の遊泳能力とその水温依存性について報告する。

報告に先立ち、委託成果公表の許可を賜った通商産業省資源エネルギー庁に厚く御礼申し上げる。この研究の機会を与えられ、試験に際して多くの御助言をいただいた中央研究所古川 厚元所長並びに深滝 弘前々所長、本報告を刊行するにあたって御理解と援助をいただいた同所下茂 繁前所長並びに実証試験場木本直也前場長に心から厚く御礼申し上げる。また、本稿を校閲していただいた東京大学名誉教授羽生 功博士 (現在、当研究所非常勤顧問) に深謝の意を表す。さらにまた、供試材料の入手および飼育管理等については、中央研究所の瀬戸熊卓見主任技術員並びに箕輪 康技術員 (現在、実証試験場技術員) より多大の協力を得た。ここに記し、心より感謝する。

II. 試験方法

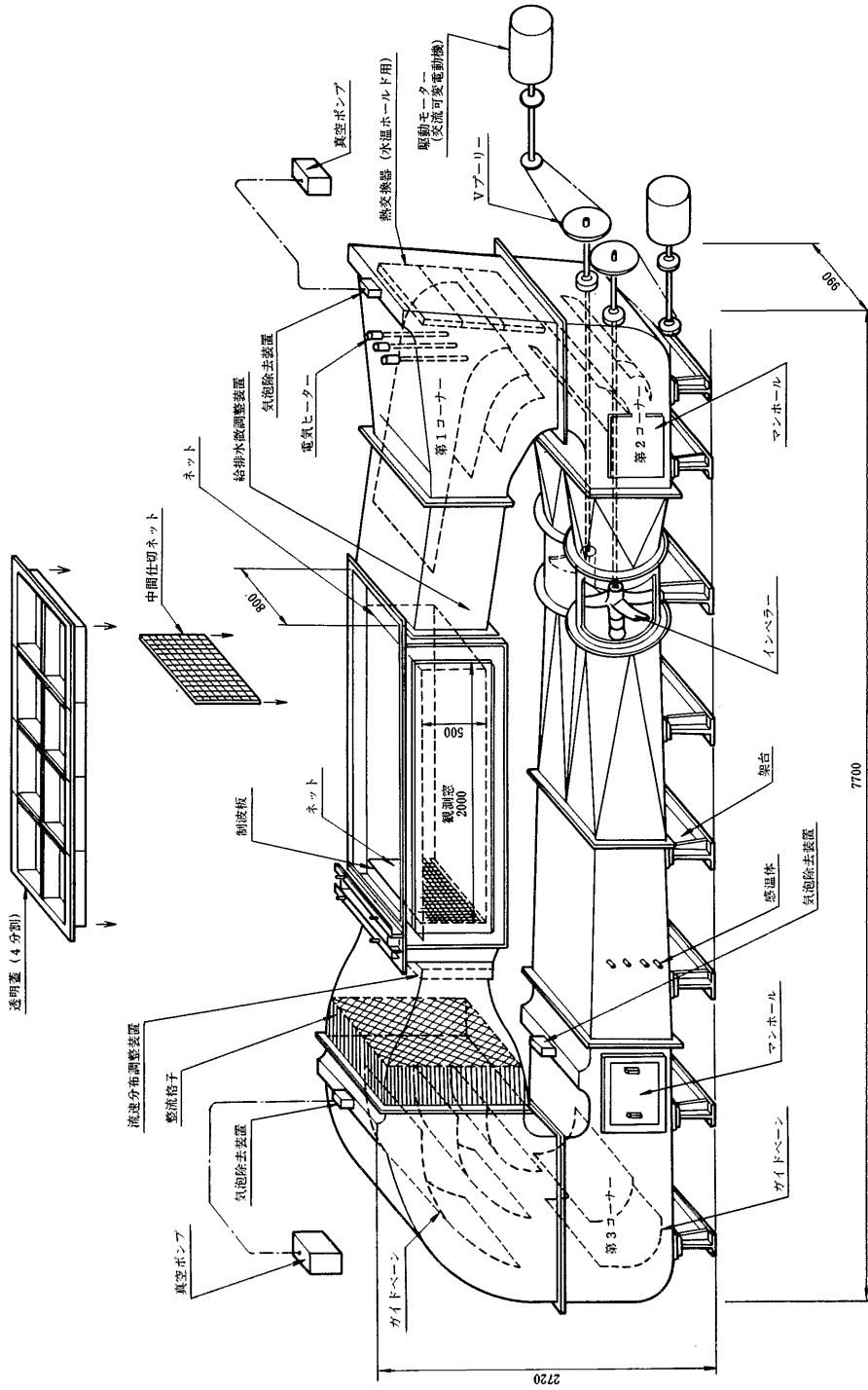
1. 試験装置

製作した遊泳能力測定装置(スタミナトンネル)の主要部分は回流水槽、流速制御部、水温制御部およびモニター・システムより構成される。回流水槽の構造と水温制御部の模式図をそれぞれ第1図と第2図に示す。

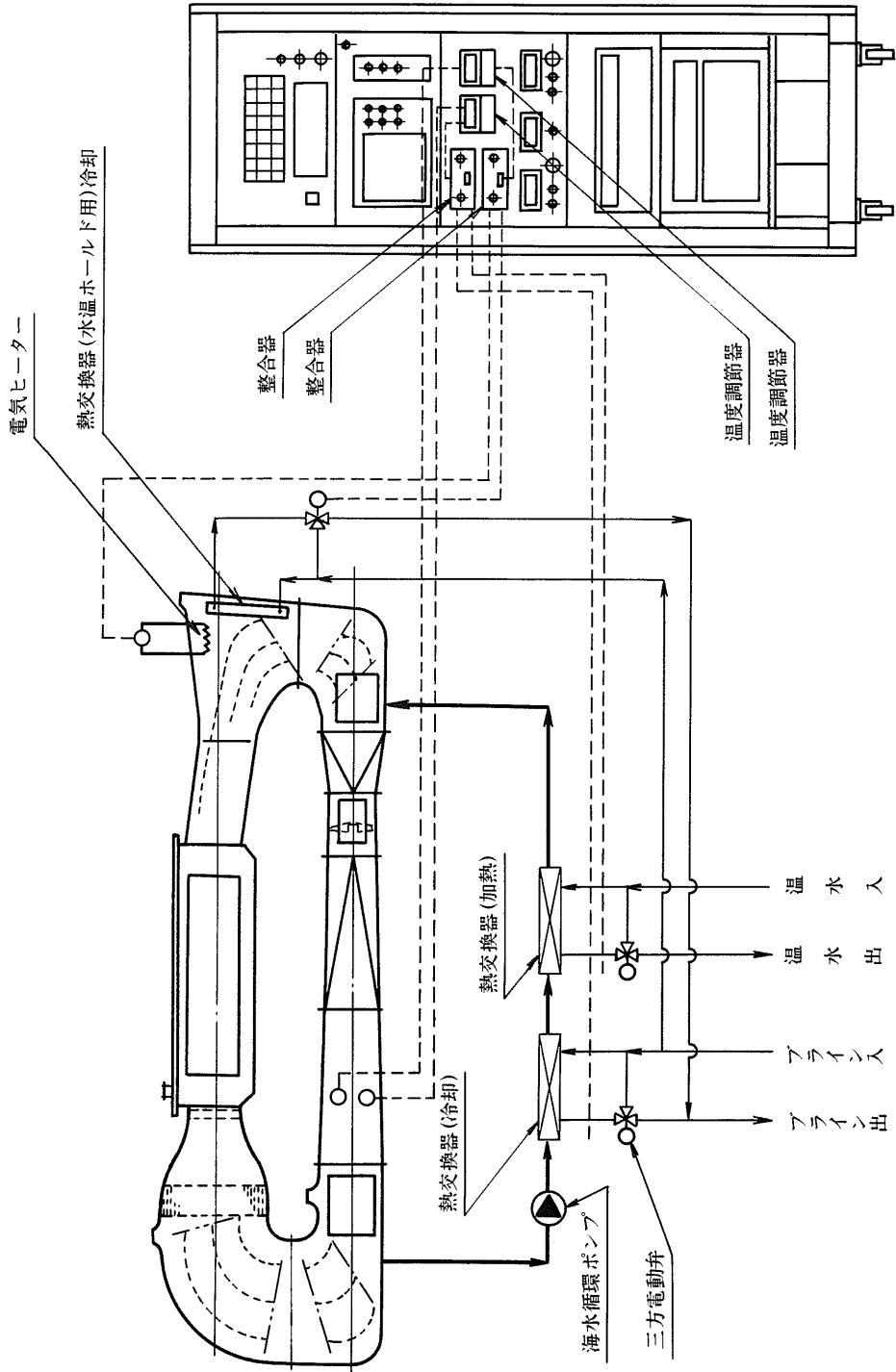
回流水槽は外形が長さ(L)7,700mm, 幅(W)990mm, 高さ(H)2,720mm, 使用海水量約9 m³のFRP製大型垂直循環型水槽で、上下の2層構造を有する(第1図)。水槽上部には試験水路部があり、その大きさはL2,000mm, W800mm, H500mmで、水路の上流側および下流側にはステンレス製ネットを設けた。下流側ネットは可動式とし、供試魚の大きさに応じて、水路部の長さを調整することができるようにした。さらに、この水路内には別途製作した狭水路(後述)を設置することとし、大型狭水路(L2,000mm×W250mm×H450mm)と小型狭水路(L1,000mm×W250mm×H450mm)を用意した。

第1図に示すように、回流水槽の下部には2機の送流用インペラーを設置し、それぞれ2台の交流可変モーター(112MH, 安川製作所)によって駆動した。流速の制御は周波数制御に基づいて制御盤を通じて行った。この流速制御系により試験水路内の流速を5~200 cm/秒の任意の値に設定することが可能であった。水路内の水流の乱れを減少させ、流速を出来るだけ均一に保持するために、水槽内の第1~4コーナーにはガイドベーンを、さらに水路上流側のステンレス製ネットの直前部には塩化ビニル製整流格子板、FRP製制波板、およびナイロン製ネットを張った流速分布調整装置等をそれぞれ設置した。また、海水中に混入する空気泡を除去するために、水槽上部の上流側と下流側に真空ポンプと連動させた気泡除去装置を設けた。

回流水槽内を流れる海水の水温制御部は大型制御系と小型制御系の2つによって構成される(第2図)。大型制御系は、循環ポンプによって回流水槽内から吸い出された海水が、加熱用(温水)および冷却用(ブライン)のチタン製プレート式大型熱交換器を経由して再び水槽内へ戻る回路である。小型制御系は、設定水温の微調整を行うためのもので、冷却用チタン製コイル式の小型熱交換器および加熱用の電気ヒーターからなり、両者とも水槽上部の下流側に設置した。海水温度の自動制御には、温度センサー用の白金測温抵抗体Pt100と、コンピューター室内に設置した温度調節器(REX-L1000, 理化学工業)および整合器(OS-2, チノ製作所)を用いた。



第1図 遊泳能力測定装置(回流水槽本体)の構造模式図



第2図 水温制御部の概略図

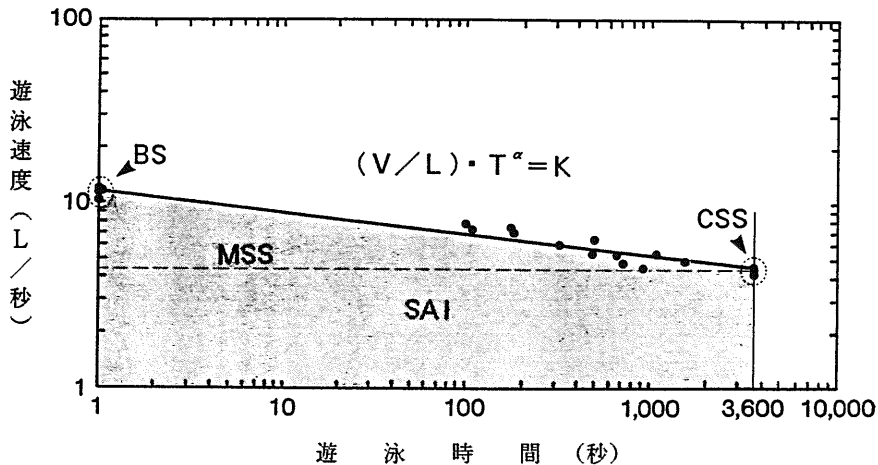
2. 試験方法

従来、魚類の遊泳能力の指標として、多くの場合に使用されている遊泳速度としては、瞬間最大遊泳速度(Burst Speed, BSと略)と最大持続遊泳速度(Maximum Sustainable Speed, MSSと略)の2つがある(Brett, 1964 ; 塚本・梶原, 1973). 前者は遊泳時間が数秒間であるような最大速度で突進速度とも呼ばれ、また、後者はかなり長時間の遊泳を維持できる速度の中の最大の速度である。

しかしながら、魚類の遊泳能力を総合的に評価するためには、単に、遊泳速度を基準とするだけでなく、遊泳速度と遊泳不能にいたるまでの遊泳時間との関係を明らかにすることが重要である。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検討し、遊泳速度Vと遊泳時間Tとの間には概ね以下に示す関係式が成り立つとし、これを遊泳曲線式と称した。

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

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、種々の遊泳能力指標とともに第3図に示す。



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)

CSS : 臨界遊泳速度, SAI : 遊泳能力指数 (灰色台形部分の面積)

さらに、塚本・梶原（1973）はこの式から得られる遊泳能力指数（Swimming Ability Index, S A I と略）が魚類の遊泳能力の指標値として有効であることを示した。そこで、本研究では魚種別・温度馴致群別にこれら遊泳速度、遊泳曲線式、遊泳能力指数を明らかにするための試験を以下の手順に従って行った。

1) 供試材料

ブリ0年魚は、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、静岡県網代の養殖業者から、千葉県内の活魚業者を通じて当研究所が1984年7月4日に入手したものである。マアジ未成魚は静岡県網代湾内で蓄養されていたものを、1984年9月8日に千葉県内の活魚業者を通じて入手した。また、イシダイ1年魚は、1983年6月に千葉県水産試験場(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温度馴致飼育を行った。各魚種についての馴致および試験条件と、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。温度馴致飼育は屋内のFRP製の500ℓ容流水式水槽内

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。

で行った。自然水温から所定の各馴致水温への移行は、供試魚に対する急激な変温ショックを避けるため、通常、1～3日をかけて段階的に行った。流水式水槽の海水置換率は1回/時間とした。また、前飼育および温度馴致飼育期間中には、いずれの魚種に対しても、餌料として市販の配合餌料に魚類の解凍鮮肉を混合したものを、モイストペレット状にして1日2回投与した。

2) 試験手順

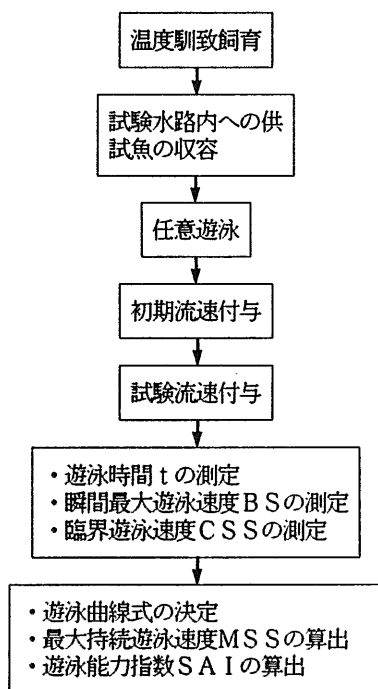
試験手順を第4図に示す。

ブリおよびマアジに関する試験では大型狭水路を、また、イシダイに関する試験では小型狭水路をそれぞれ水路内に設置し、その中に各回1尾の供試魚を収容した。

ブリおよびマアジでは、予備試験において下流端金網に尾鰭を接触させ、遊泳体勢を維持する個体や遊泳運動を休止する個体があった。そこで、これを防ぐために狭水路下

流側の金網直前部に透明塩化ビニル製の角筒トンネル(L200mm×W240mm×H330mm)を設置し、その流入口に上面と底面を結ぶ外径1mmの絹糸を2mm間隔で11本並行に張った。魚が流れに抗しきれず後退して、尾鰭が絹糸に触れた場合、余力がある魚は直ちに上流側へ溯るが、遊泳能力を喪失した個体は系列に完全に張りつくか、これを通過しトンネル内に後退した。このようにトンネルの設置によって遊泳運動の長時間休止が回避され、試験終了が的確に統一的に判定できた。

馴致水槽から取り上げた供試魚は、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



第4図 試験手順の概要

に収容し、透明塩化ビニル板製の蓋をした。供試魚が収容時の興奮から脱し、安定した遊泳行動が認められるようになった時点で、装置内の水温を一様に保持し、かつ、供試魚の流れに対する行動反応を良好な状態に保つために10~40cm/秒の穏やかな流れ（初期流速）を起動した。

供試魚を収容してから20~40分後、供試魚の遊泳が安定した時点で試験を開始した。流速を初期流速から1 cm/秒²の割合で上昇させて所定の試験流速 v に固定し、 v における遊泳時間 t を測定した。 t はブリ、マアジの場合には魚が遊泳不能となってトンネル入口に張った糸列に張りつくか、トンネル内に後退するまでを、また、イシダイの場合には下流側の金網に張りつくまでの時間とした。いずれの魚種についても、 v を7~10段階、各段階における供試尾数を4~7尾として試験を行った。なお、供試魚が所定の v において60分間完泳した場合には、Brett(1964)が示した臨界遊泳速度(Critical Swimming Speed, CSSと略)を測定した。

供試魚の遊泳行動は、試験水路部の直上方向から白色電球(約480w)によって照明し、モニター用ビデオカメラとモニターテレビによって遠隔観察した。狭水路内の流速の測定には電磁流速計(U E C M-200・ミニチュア型, ユニオンエンジニアリング)および流速計センサー(直径9 mm)を用いた。

3) 遊泳能力指標の測定

各遊泳能力指標を前出の第3図に示す。

BSについては、流速を初期流速から1 cm/秒²の割合で上昇させていき、魚が遊泳不能となった時点の v を測定し、これをBS($t = 1$ 秒)とした(第3図)。BSがこの装置の設定可能な最大流速200cm/秒を上回る場合には、流速を200cm/秒に固定したまま、この時の t を測定した。

60分間CSSは流速を60分(3,600秒)間おきに10cm/秒だけ段階的に順次上昇させ、供試魚が60分間完泳できた最高段階の流速(V , cm/秒)と、遊泳不能となった流速段階での遊泳時間(T , 秒)を次式に代入することにより算出される(Brett, 1964)。

$$60分間CSS = V + 10 \times (T / 3,600)$$

次に、数段階の v における t の測定値、BS($t = 1$)および上述のCSS($t = 3,600$)を $(v/L) \cdot t^\alpha = K$ に適用し、定数 α および K を求めた(第3図)。さらに、得られた

遊泳曲線式において $t=3,600$ として算出した v を 60 分間 M S S とした (第 3 図)。

塚本・梶原(1973)は遊泳曲線式に基づいて S A I を次のように定義した。遊泳能力を B S から M S S までの各遊泳速度における遊泳持続時間の総和によって示されるとすると、それは遊泳曲線によって囲まれる面積に相当する。これは $t=1$ から M S S の測定単位とした $t=3,600$ までの定積分として次式で示される。

$$S A I = \int_1^{3600} V dt \times 10^{-4} = \int_1^{3600} K \cdot t^{-a} dt \times 10^{-4}$$

本報告では、上式の V を v/L として魚種別・温度馴致群別に S A I を算出した (第 3 図)。 v と遊泳速度はそれぞれ $\text{cm}/\text{秒}$ と $L/\text{秒}$ で表した。後者は流速を魚の体長で除した値 (v/L) に用いる慣用的な単位である。 v/L は比流速と呼ばれ、異なる魚種間や同一の魚種でも体長が異なる個体間の遊泳能力を比較する場合の有効な指標として一般的に用いられる。

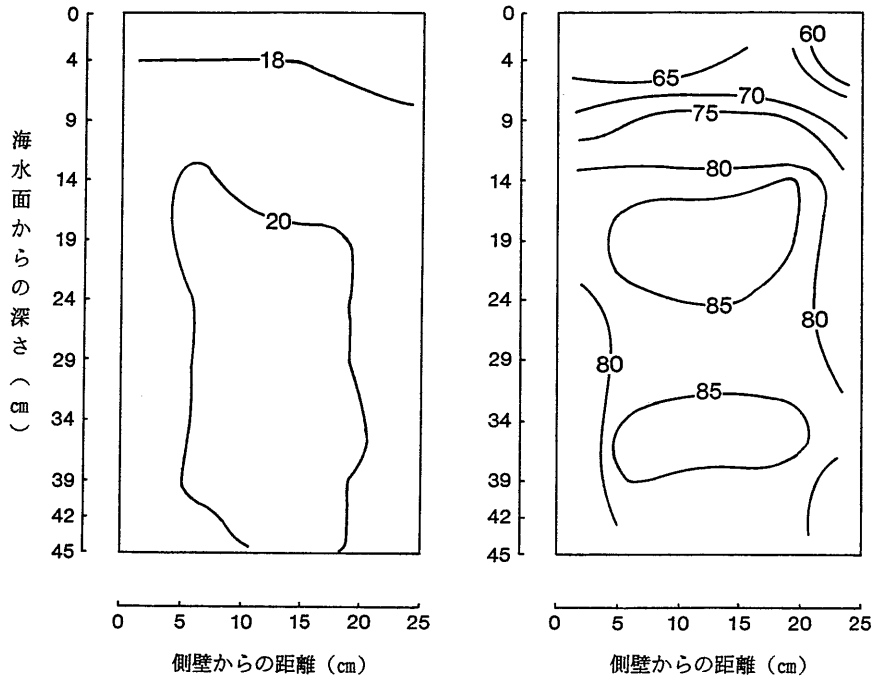
III. 試 験 結 果

1. 装置の性能

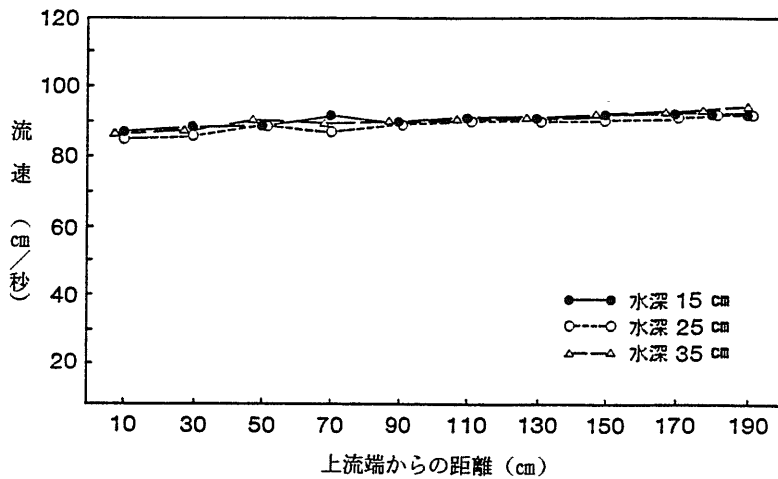
大型狭水路を水路内に設置して、狭水路内の流速とインペラー回転数との関係および水路内の横断面と縦断面の流速分布を調べた。

まず、インペラー回転数と流速との関係を確認するために、狭水路の下流端から 20cm 前方の横断面中心部に電磁流速計のセンサーを設置し、回転数を 20rpm から 400rpm まで、20rpm ずつ上昇させて測流を行った。その結果、インペラー回転数と狭水路内中心部における流速および平均流速の間には直線関係が認められた。

次に、狭水路の同じ横断面における流速分布を測定するために、狭水路の水平方向 9 列、鉛直方向 6 列の合計 54 点の測定点を設け、インペラー回転数を 38rpm と 148rpm の 2 段階として電磁流速計による測流を行った。測定結果を第 5 図に示す。狭水路横断面における流速分布では、10cm 以浅の表層部の流速が、狭水路中央部の値に比べ小さくなる傾向があり、これはインペラー回転数が大きい場合ほど、つまり流速が大きい場合ほど顕著であった。さらに、インペラー回転数を 156rpm に固定し、狭水路の長軸方向中央縦断面上の 11 点 \times 3 層 = 33 点で測流を行った。鉛直方向 3 層の測定水深は 15, 25, 35cm とした。測流結果を第 6 図に示す。狭水路内縦断面における流速分布では、鉛直方向に



第5図 大型狭水路横断面の流速分布. 図中の数字は流速 (cm/秒) を示す.
 左: インペラー回転数=38rpm, 右: インペラー回転数=148rpm



第6図 大型狭水路縦断面の流速分布
 インペラー回転数は156rpm.

は差がなかった。また、水平方向には上流端から下流端に向かって、流速がやや増大してゆく傾向が認められたが、その差は顕著ではなかった。小型狭水路を設置した場合の流速分布についても、大型狭水路の場合と概ね同様の測定結果が得られた。

以上、本装置においては、狭水路縦断面における流速分布にはほとんど差がないのに対して、横断面における流速分布に若干の不均一が認められた。そこで、今回の試験では、大小2つの狭水路について、それぞれ下流端から20cm前方の横断面における流速分布を数段階の回転数ごとに測定し、回転数と平均流速との関係式を算出して、これに基づいて流速制御を行った。

加えて、水温を5、20、35℃の3段階、流速の数段階を組み合わせさせた各条件下で、装置内の水温を最大約1時間にわたって2～10分毎に測定し、水温の安定性を調べた。その結果、いずれの場合にも、約1時間における測定水温の平均値に対する標準偏差は最大で±0.1℃であった。また、20℃から35℃および30℃から40℃への加温能力と32℃から5℃への冷却能力を調べた性能試験では、この装置が5℃/時を上回る加温・冷却能力を有することが確認された。

2. 遊泳能力測定試験

魚種別・試験水温別の遊泳能力測定試験結果を付表1～13に、それらの要約を第2表に示す。また、魚種ごとの試験水温とBSあるいはMSSとの関係を第7図に、試験水

第2表 海産魚類3種の遊泳曲線式と遊泳能力指標

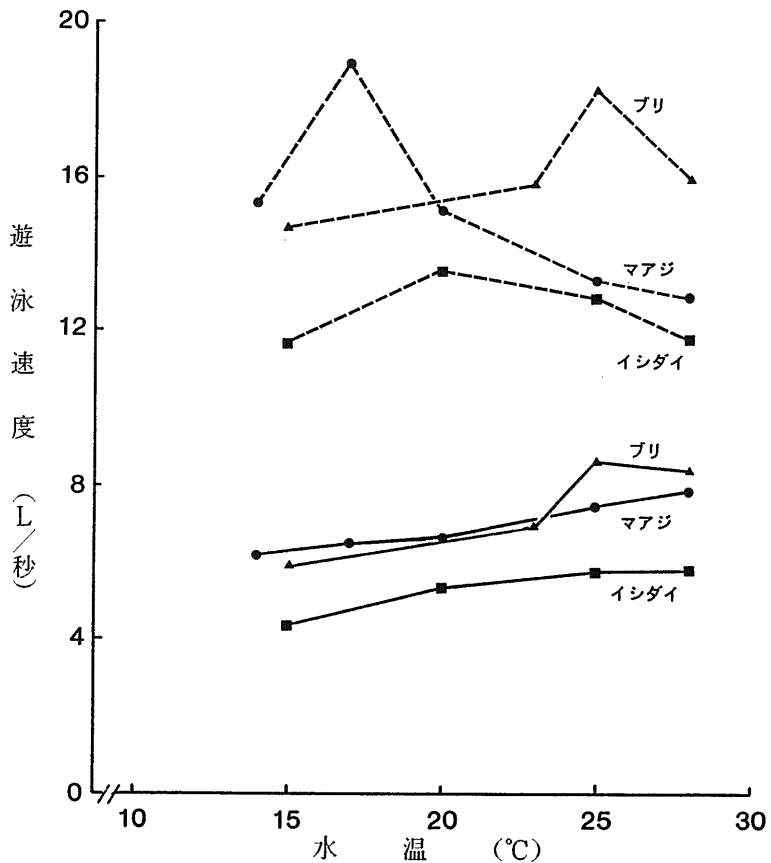
魚種	水温 (℃)	CSS** (L/秒)	遊泳曲線式	MSS (L/秒)	SAI
ブリ	15	6.4±0.6(3)	$(v/L) \cdot T^{0.11} = 14.7$	6.0	2.41
	23	7.3±0.1(3)	$(v/L) \cdot T^{0.10} = 15.8$	7.0	2.79
	25	9.0±0.5(3)	$(v/L) \cdot T^{0.09} = 18.3$	8.8	3.46
	28	8.7±0.7(4)	$(v/L) \cdot T^{0.08} = 15.9$	8.3	3.23
マアジ	14	6.4±0.3(5)	$(v/L) \cdot T^{0.11} = 15.3$	6.2	2.51
	17	6.8±0.5(4)	$(v/L) \cdot T^{0.13} = 18.9$	6.5	2.70
	20	7.4±0.5(5)	$(v/L) \cdot T^{0.10} = 15.1$	6.7	2.66
	25	7.7±0.6(5)	$(v/L) \cdot T^{0.07} = 13.3$	7.5	3.02
	28	8.2±0.5(8)	$(v/L) \cdot T^{0.06} = 12.9$	7.9	3.02
インダイ	15	4.3±0.1(4)	$(v/L) \cdot T^{0.12} = 11.7$	4.4	1.79
	20	5.4±0.4(4)	$(v/L) \cdot T^{0.11} = 13.6$	5.4	2.23
	25	6.0±0.4(5)	$(v/L) \cdot T^{0.10} = 12.9$	5.8	2.28
	28	6.0±0.4(8)	$(v/L) \cdot T^{0.09} = 11.8$	5.8	2.23

* : 平均値±標準偏差。()内の数値は供試尾数を示す。

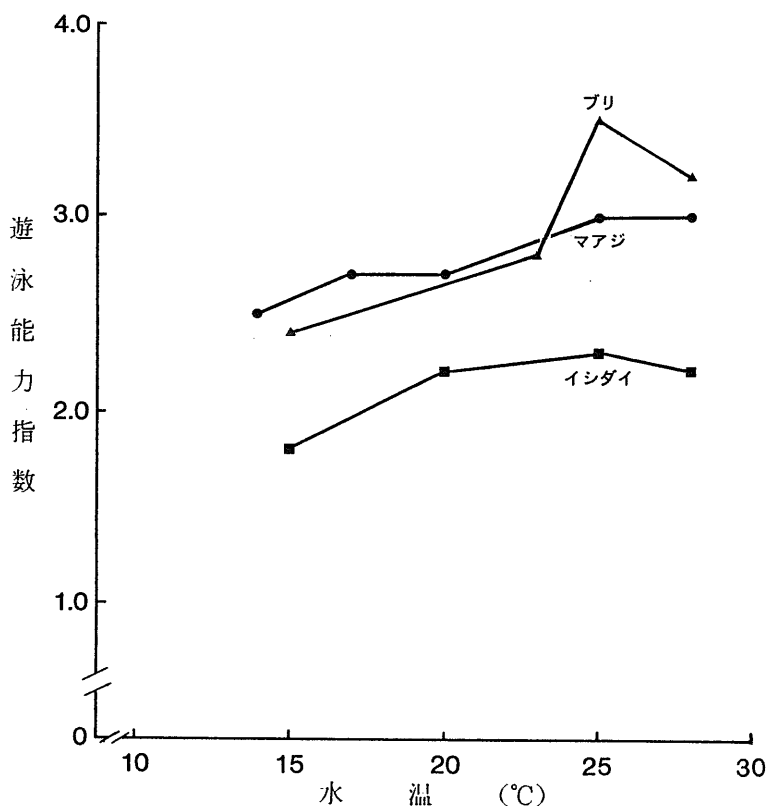
温とSAIとの関係を第8図に示す。直線回帰させた遊泳曲線式については、共分散分析法に基づき、F検定(Snedecor and Cochran, 1967)によってそれらの傾きと高さを各温度馴致群間で比較し、検定結果を付表14に示す。

1) プリ0年魚

水路への収容直後あるいは初期流速下において、15℃馴致群の供試魚のほとんどが遊泳行動を示さず、水路下流域の底層にて静止するものが多かった。一方、20℃、25℃および28℃馴致群は初期流速のもとで、上・中流域にて強い向流性を示した。



第7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を示し、実線は最大持続遊泳速度を示す。



第8図 海産魚類3種における水温と遊泳能力指数との関係

15°C馴致群の1例を除き、いずれの温度馴致群の供試魚も最大設定可能流速の200cm/秒において15~424秒間遊泳を継続した(付表1~4)。遊泳曲線式から推定したBS(定数K)を温度馴致群別に比較すると、25°C馴致群の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(第2表および第7図)。水温とMSSとの関係についても、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(第2表および第7図)。また、第8図に示すように、ブリのSAIは25°Cにおいて最大となり、低温側の15°C馴致群は低値を示した。

遊泳曲線式の直線の傾きに関する検定結果(付表14)では、15°C馴致群と28°C馴致群との間で差があった($P < 0.001$)。また、高さに関しては、25°C馴致群と28°C馴致群との間では差がないものの他の馴致群間では顕著な差がみられた($P < 0.001$)。

2) マアジ未成魚

水路内へ収容した直後の流れのない状態では、上流域と下流域の間の往復遊泳が認められた。一方、初期流速下ではいずれの温度馴致群においても、向流性が比較的強く、定位行動は水路内全域で認められた。

BSの実測値は、いずれの供試魚においても200cm/秒以上であって、遊泳曲線式から算出した比流速では12.9～18.9L/秒の範囲にあった(第2表, 付表5～9および第7図)。温度馴致群別に比較すると、17℃馴致群が最大となり、最小値は28℃馴致群の12.9L/秒であった。遊泳曲線式から算出した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す傾向があった(第2表および第7図)。第8図に示すように、マアジのSAIは水温の上昇にともなって増大し、最大は25℃および28℃馴致群であった。

各温度段階別の遊泳曲線式の直線の傾きに関する検定結果(付表14)では、17℃以下の馴致群と25℃以上の馴致群との間で差があった($P < 0.05$)。また、高さに関しては、14℃馴致群と他の4温度馴致群間および17℃馴致群と20℃馴致群との間に著しい差があった($P < 0.001 \sim 0.05$)。

3) イシダイ1年魚

いずれの温度馴致群においても、水路への収容直後および初期流速下で、供試魚は中流域と下流域間の往復遊泳および任意遊泳を示し、ブリおよびマアジの場合にみられたような向流性は観察されなかった。一方、MSS付近のvにおいて、供試魚の多くは水路下流端の金網直前で定位し、上流域で定位する個体は極めて少なかった。

BSについては実測値が10.4～14.9L/秒、遊泳曲線式より算出した値が11.7～13.6L/秒となり、温度馴致群別では20℃馴致群が最も大きい値を示した(第2表, 付表10～13および第7図)。一方、MSSは4.4～5.8L/秒の範囲にあり、高温側の25℃馴致群および28℃馴致群が比較的大きい値を示した(第2表および第7図)。第8図に示すように、イシダイのSAIは15℃において著しく小さく、25℃馴致群が最大値を示した。

各温度段階別の遊泳曲線式の直線の傾きに関する検定結果(付表14)では、20℃以下の馴致群と28℃馴致群との間で差がみられた($P < 0.01 \sim 0.05$)。また、高さに関しては、15℃馴致群と他の3温度馴致群間で著しい差がみられた($P < 0.001$)。

IV. 考 察

1. 試験装置

Beamish (1978)は、魚類の遊泳能力とその評価手法に関する総説の中で、既往知見にみられる種々の遊泳能力測定装置を整理し、それらの形状や機能等に基づいて3つのタイプに分けた。今回製作した装置は、この中に示されている Brett(1964)らが用いたものとはほぼ同じタイプの垂直循環型のスタミナトンネルである。

わが国において、これまでに報告されている試験装置としては、岩田ら(1972)が飼育用の水槽に水流発生器として船外機を取りつけた装置、Hanyu et al. (1979)が魚の遊泳時における種々の生理的变化を調べるために作成した小型スタミナトンネル、塚本・梶原(1973)や岸田・福原(1981)らが稚魚の遊泳能力を測定するために用いた水圧式水流発生器を備えた装置、安永 (1985b)が用いた稚魚用小型吹送式還流水槽等がある。いずれも使用目的に応じて種々の工夫がなされており、現在でもそれらの改良型が広く使われている。しかし、これらの多くは小型で、流速および温度制御等にも簡便な方法が採用されているため、幼・成魚を用いた試験や長時間にわたる試験には適さない等の欠点があった。

そこで、種々の魚類の幼・成魚を試験対象とした今回の試験では、装置を大型化し、試験中の流速および水温等の設定条件を精度良く、しかも長時間、安定した状態で維持できるように、流速・温度制御系を自動化した。流速および温度制御に関する性能試験では、装置内の海水の流速と水温は設定値近傍で極めて安定していた。水路内の流速分布に関しても、水路側壁および上面と下面近傍の流速が中央部付近より低値を示す傾向が認められたが、全体としては水槽内の流速分布は比較的均一であった。さらに、遊泳能力測定試験においても供試魚を入槽した直後を除けば、初期流速および試験流速下では供試魚の行動には異常が認められなかった。このように、今回作成した装置は魚類の遊泳能力、特に幼・成魚の遊泳能力や遊泳能力と水温との関係を明らかにするための試験装置として十分な機能を有していることが確認された。

2. 遊泳能力

1) 遊泳行動の特性

入槽直後および初期流速下における各魚種の遊泳行動についてみると、いずれの魚種

でも高温側馴致群の供試魚が活発で、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、強い向流性がみられ、定位位置がブリでは狭水路上・中流域に集中し、マアジでは水路全域にわたっていた。一方、イシダイの場合には上流域での遊泳は認められず、ほとんどの供試魚が下流域で滞泳し、最大持続遊泳速度付近の流速下においてのみ下流端の金網直前部で向流性を示した。

さらに、水槽内で強制遊泳させた場合にみられる各魚種の行動や遊泳形態では、次のような特徴が認められた。ブリは典型的な沿岸回遊性の魚類として知られるが本種の向流性はこれら3種の中で最も強く、遊泳位置も上流域が中心であった。一方、元来、沿岸域でも特に、海底の岩礁地帯に多く分布し、通称「根付き魚」として知られているイシダイでは向流性が最も弱く、遊泳位置も下流域に限られていた。さらに、マアジの遊泳行動はブリの場合に類似していたが、遊泳位置が水路全域にわたっているという点で、遊泳形態としてはブリとイシダイの中間型として区別できた。

2) 遊泳速度

ブリの遊泳能力に関して、岩田ら(1972)は遊泳時間と比流速との関係を明らかにするために、体長10cm以上のブリ27尾を用いて、水温20.7～27.8℃における遊泳曲線式を求めた。遊泳時間が1,000秒以下のデータについては、 $(V/L) \cdot T^{0.21} = 17.8$ が成り立つとし、この式より算出したBSが17.8L/秒、1,000秒間の遊泳が可能な比流速が4.2L/秒であった。また、遊泳時間が1,000秒以上のものについてはTの値の如何にかかわらず、 V/L の値はほぼ一定で、概ね、4L/秒であった。一方、本研究では、第7図に示すように、水温15～28℃における遊泳速度はBSが14.7～18.3L/秒、MSSが6.0～8.8L/秒、また、1,000秒間遊泳が可能な比流速が6.2～9.6L/秒の範囲にあった。

両者の結果から、岩田らが測定したブリのBSは今回の試験結果の範囲にあり、ほぼ14L/秒以上であると考えられるが、持続的な遊泳能力については、今回の結果が岩田らが算出した値を上回った。今のところ、両者間で差が生じた理由については明らかではないが、水温等の試験条件、使用した装置等の相違もその一因と考えられる。

安永・日向野(1985)はマアジが水路上流域での遊泳時間が他魚種に比べ多いことから、向流性が強い魚であることを指摘しており、これは本研究の観察結果と一致する。矢島ら(1963)は、ポンプの出水口にビニルホースを取りつけ、その中に体長8～14cmのマア

ジ未成魚を收容してポンプを駆動させ、ある流速のもとでマアジを2 m後退させるのに要する時間を測定した。この方法で得られた平均後退遊泳速度は50~200cm /秒の範囲にあった。また、Hunter(1971)によれば、全長13.4~16.6cmのアジ*T. symmetricus* 15尾は160cm/秒の流速下で120~360秒(平均204秒)間遊泳を維持した。さらに、全長24.2cmのムロアジは290cm/秒、12L/秒で泳いだという報告(井上, 1977)もみられる。これらアジ類の遊泳速度に関する既往の知見と今回の試験結果(第7図)は必ずしも一致しないが、マアジのBSは少なくとも10L/秒以上になるものと推察される。

一方、アジ類のMSSに関する報告は見当たらないが、前述のHunterの結果によれば、試験に供した一群のアジのうち、半数が6時間遊泳を継続できる速度の最大値は8.4L/秒であった。また、体長10.0~11.9cm(平均10.69cm)のアジ8尾について、水温18.5℃における遊泳能力を調べたところ、流速71cm/秒のもとではすべての供試魚が6時間の遊泳を継続した。この場合、比流速は概ね6.6L/秒となり、本研究の17~20℃におけるMSS(6.5~6.7L/秒)と一致した。

今回の試験では、イシダイの場合、BSが11.7~13.6L/秒、MSSが4.4~5.8L/秒、SAIがほぼ1.8~2.3であって、これらの値はいずれも上記2魚種に比べ顕著に小さかった(第7図および第8図)。

イシダイの遊泳行動の特性について、安永・日向野(1985)は水路内での移動性が乏しく緩流域、反流域での滞留が顕著であり、特に後者での滞留頻度が高い点を指摘した。さらに、彼らは平均体長16.0cmのイシダイを流速41.3cm/秒、比流速2.6L/秒という比較的穏やかな流れの中で遊泳させた場合でも、遊泳位置が水路内の後方に偏ることを観察した。また、高松ら(1966)は大型飼育水槽内における体長20~40cmのイシダイの平均的遊泳速度が74~92cm/秒であったとしている。この値はイシダイの自由遊泳時における遊泳速度であり、Beamish(1978)がまとめた遊泳行動の区分基準に従えば、巡航速度に匹敵する。換言すると、今回得られた最大持続遊泳速度(4.4~5.8L/秒)のもとでは、魚はいずれ疲労して遊泳不能となるのに対して、高松らが示した流速下では内的、外的環境条件が良好である場合には無期限に遊泳を継続できるものと考えられる。

今回用いたイシダイの成長段階は、自然海域においては生息分布域が表・中層から底層へ移行する時期にあたり、その行動特性もほとんど底生生活者のそれに類似してくる。つまり、イシダイの生態は比較的回遊性の強いブリやマアジの場合とは著しく異なっており、今回認められた魚種間での総合的な遊泳能力の差は、こうした生態的特性の相違

を反映するものと考えられる。

3) 遊泳能力と水温

第7図および第8図から明らかなように、ブリ、マアジ、イシダイのCSSおよびMSSは高温側の25~28℃で最大値を示し、また、SAIも高温側で大きくなる傾向が認められた。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℃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。

自然条件下において、魚は平常時、最大持続遊泳速度以下の遊泳速度で行動する。しかし、外敵からの逃避、捕食、急流での溯上等の諸行動においては突進速度の持つ意義は大きい(塚本・梶原, 1976)。この突進速度のような瞬発的な遊泳能力と水温との関係については統一的な見解が出されていないが、一般的には突進速度は水温の影響を受けないと考えられている。しかし、今回の試験では瞬間最大遊泳速度がブリの場合には最大持続遊泳速度と同様に25℃で、またマアジ、イシダイではそれぞれ17℃および20℃で最大値を示したことから、突進速度の水温依存性は魚種によって異なると考えられた。

一方、Beamish(1978)は魚類の遊泳能力、特に、持続的な遊泳を維持するための能力は、その魚種の生存限界水温範囲内であれば水温の上昇とともに増大し、限界水温の比較的高温側で最大値を示すと述べている。また、Beamish(1978)は一般に広温性の魚種では、持続的な遊泳能力が25~30℃で最大となり、狭温性魚類のうち冷水性魚種では15~20℃で最大となるとした。後者の例では、Brett(1971)が5~25℃の範囲の5段階の水温に馴致したギンザケについて、その最大持続遊泳速度を求めたところ、20℃馴致魚の値が最大であったとする報告がみられる。このように、温水性魚類でも、また、冷水性の魚種であるサケ科魚類でも、水温が生息可能な範囲にあるならば持続的な遊泳能力は高温側で最大となるものと推察される。

温度段階別の各遊泳能力指標の測定結果および遊泳曲線式の検定結果に基づいて、3魚種の総合的な遊泳能力と水温との関係について検討した結果を以下に示す。今回の試験では、3魚種とも低温側の14~15℃での遊泳能力が20~23℃以上の場合に比べて著しく小さいことが示され、このことは上に示した既往知見と一致した。このうち、イシダイおよびマアジでは、CSSおよびMSSが高温側で大きくなる傾向があったが、BSが17~20℃付近で最大となったため、結果的に両魚種とも17~20℃から28℃までの範囲

における温度段階別のSAIには大きな差がみられないこととなった。一方、ブリの場合には、BS, CSS, MSS, SAIのいずれもが25°Cにおいて最大値を示し、回帰直線の高さに関する検定結果でも25°C馴致群と15°Cおよび23°C馴致群との間に著しい差が認められた。このことから、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推定された。

各温度段階における総合的な遊泳能力を魚種間で比較すると、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以下ではマアジとブリの遊泳能力の間に大きな差はみられなかったが、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著しく上回った(第8図)。

今回用いた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する。つまり、こうした生態的特性も今回の試験でみられた高温側での遊泳能力の増大の一因として挙げられる。しかしながら、温水性・冷水性を問わず水温の上昇に伴って遊泳能力が増大することについては、代謝が活発化し、エネルギー供給が増すこと以外、その機構が解明されておらず、今後は筋肉生理、代謝生理等の生理学的側面からの実験的研究によって更に詳細に検討してゆく必要がある。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相違することも興味深い問題であろう。

4) 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生物の衝突は、既設発電所の運転がもたらす取水域で発生する現象の一つである。魚類の取水スクリーン衝突現象は衝突を起こす魚種の昼夜移動、季節的回遊、産卵・索餌回遊等の生態学的特性、行動特性、遊泳能力等の内的要因や環境要因によって左右されるので定量的な予測が極めて困難である(深滝, 1983)。欧米では、発電所の取水スクリーン衝突を起こす魚種について、それらの遊泳能力や行動生態を調べることにより、この現象の機構を解明する試みが行われている(Hocutt, 1973; Dorn et al., 1979; Turnpenny and Bamber, 1983)。一方、わが国においては、これまでこの分野の研究は皆無であり、本研究がその先駆けとなるものである。

Turnpenny and Bamber(1983)は、取水域における魚類の遊泳行動の観察では、取水流速に対して魚は強い向流性を示し、その遊泳は一般に安定した持続的な遊泳運動であるので、衝突現象を遊泳能力との関連から論ずる場合には、突進速度より持続的な遊泳速度を基準に考察することが適切であるとした。今回得られた3魚種のMSSは概ね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、流れに抗して向流性を示しながら上流域へ溯ることが可能である。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、それらの生息域における取水流速を40cm／秒より低く制御すること、あるいは取水流速が40cm／秒以上となるような流域への上記魚種の進入を防止すること等によって、回避あるいは軽減できるものと考えられる。

さらに、本研究において上記3魚種では向流性が強く、突進的な遊泳速度もほぼ10L／秒以上の値を示すことが明らかとなった。従って、魚の視覚目標となる人工構造物等を港湾、取水路、取水口等に設置して視覚刺激による魚の定位行動を触発し、向流性を増すこと等が、こうした魚類の取水スクリーン衝突を回避させる可能性もあろう。

わが国の発電所の場合、冷却水の取水方式や取水量は、立地点の環境特性や生物学的特性を考慮して設計されており、各発電所によって異なる。しかし実際には、発電所の取水行為による流れの影響が大きい場所は、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幼・成魚が、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。欧米では、主に河川域立地型発電所を対象として、生物の取水スクリーン衝突影響を軽減するための取水スクリーンの構造研究や、光、音、電気、気泡等の物理的刺激による魚類行動の誘導・回避技術調査(Hanson et al., 1977; Uziel, 1978)が行われているが、本格的な実用化までには至っていない。

魚種によってはそのスクリーン衝突量が季節的变化を示し、高水温期に少なく、低水温期に多い傾向がある(Lifton and Storr, 1978)。この現象にはスクリーン衝突を起こす生物種の生態的特性や季節的な環境変化等、種々の要因が関与するものと推察される。今回明らかにされた水温と遊泳能力との関係において、Beamish(1978)の指摘通り、3魚種とも水温の上昇とともに遊泳能力が顕著に増大する傾向が認められたことから、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主因となっているものと考えられる。このように、実際の魚類のスクリーン衝突現象を遊泳能力や行動特性に基づいて予測評価する場合には、それらと他の生物学的・理化学的要因との関係を十分明らかにしておく必要がある。

引用文献

- Barrett, B. A. and McKeown, B. A. (1988). Growth hormone response to sustained swimming in exercised acclimated steelhead trout, *Salmo gairdneri*. *J. Fish Biol.* **32**: 799-800.
- Beamish, F. W. H. (1978). Swimming capacity, *In*: "Fish physiology" (Hoar, W. S. and Randall, D. J., eds.), Vol. **4**, pp. 101-187. Academic Press, London, New York.
- Brett, J. R. (1964). The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **9** (6): 265-323.
- Brett, J. R. (1971). Energetic responses of salmon to temperature: a study of some thermal relations in the physiology and fresh-water ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Am. zool.*, **11**: 99-113.
- Davie, P. S. and Forster, M. E. (1980). Cardiovascular responses to swimming in eels. *Comp. Biochem. Physiol.*, **67A**: 367-373.
- Dorn, P., Johnson, L. and Darby, C. (1979). The swimming performance of nine species of common California inshore fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **108**: 366-372.
- Hanson, C. H., White, J. R. and Li, H. W. (1977). Entrapment and impingement of fishes by power plant cooling-water intakes: An overview. *Marine Fish. Rev.* **39** (10): 7-17.
- Hanyu, I., Tsukamoto, K., Yamamori, K., Ngan, P. V., Furukawa, K. and Hibiya T. (1979). Simultaneous recording of physiological information from swimming fish. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **45** (10): 1261-1265.
- Hocutt, C. H. (1973). Swimming performance of three warmwater fishes exposed to a rapid temperature change. *Chesapeake Science*, **14** (1): 11-16.
- 深滝 弘 (1983). スケトウダラ資源に及ぼす発電所取放水影響の予測. 海生研報告, No.83101: 1-54.
- Hunter, J. R. (1971). Sustained speed of jack mackerel, *Trachurus symmetricus*. *Fish. Bull.*, **69** (2): 267-271.
- 井上 実 (1977). I. 漁具・漁法, イワシ・アジ・サバの行動. イワシ・アジ・サバまき網漁業 (日本水産学会編), pp. 7-19, 恒星社厚生閣, 東京.
- 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. 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.
- 岸田 達・福原 修 (1981). マダイ稚仔魚の遊泳能力に関する実験的研究. 南西水研報, **13**: 9-17.
- Lifton, W. S. and Storr, J. F. (1978). The effect of environmental variables on fish impingement, pp. 299-311. *In*: Jesen, L. D. (ed.), Fourth National Workshop on Entrainment and Impingement. Ecological Analysts, Inc., Melville, New York. 424pp.
- Priede, I. G. and Holliday, F. G. T. (1980). The use of a new titling tunnel respirometer to investigate some aspects of metabolism and swimming activity of the plaice (*Pleuronectes platessa* L.). *J. Exp. Biol.*, **85**: 295-309.
- Snedecor, G. W. and Cochran, W. G. (1967). Statistical Method. 奥野忠一, 津村善郎訳: 統計学的方法, 岩波書店.
- 高松四朗・中島東夫・西源二郎 (1966). 回遊水槽における魚の行動. 大分生態水族館研究業績 (4): 43-48.
- 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.
- Tsukamoto, K. (1984a). The role of the red and white muscles during swimming of the yellowtail. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **50** (12): 2025-2030.
- Tsukamoto, K. (1984b). Contribution of the red and white muscles to the power output required for swimming by the yellowtail. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **50** (12): 2031-2042.

- Turnpenny, A. W. H. and Bamber. (1983). The critical swimming speed of the sand smelt (*Atherina presbyter* Cuvier) in relation to capture at a power station cooling water intake. *J. Fish Biol.*, **23** : 65-73.
- 矢島信一・吉牟田長生・三次信輔・田原陽三・川田三郎(1963). フィッシュポンプの利用に関する研究 I. アジサバの遊泳力および二, 三の吸込実験について, 日水誌, **29** (9) : 834-840.
- 安永義暢(1985a). 小型直水路によるヒラメ仔魚の遊泳速度の測定. 日水誌, **51** (2) : 227-231.
- 安永義暢(1985b). 小型還流槽によるヒラメ仔魚の遊泳持続性の検討. 日水誌, **51** (2) : 233-237.
- 安永義暢・日向野純也(1985). 2, 3の海産魚の走流性状に関する基礎的考察. 水工研報, **6** : 17-26.
- Uziel, M. S. (1978). Impingement. *J. Water Poll. Control Fed.*, **50** : 1553-1567.

付表1 ブリ0年魚の水温15℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0827-2	15.8	65.5	90	5.7	>3,600	7.1
0830-1	16.7	87.0	90	5.4	>3,600	5.7
0830-2	15.1	58.0	90	6.0	>3,600	6.4
0907-3	14.2	43.0	90	6.3	2,073	

0827-1	16.3	68.5	100	6.1	538	
0827-3	15.6	63.0	100	6.4	1,166	
0828-1	16.9	91.5	100	5.9	689	
0830-3	16.2	74.5	100	6.2	2,880	

0830-4	16.0	70.0	110	6.9	635	
0830-5	16.3	75.0	110	6.7	122	
0831-1	16.1	73.5	110	6.8	1,330	
0831-1	15.0	59.0	110	7.3	1,010	

0831-5	16.7	74.0	150	9.0	384	
0831-6	15.9	68.5	150	9.4	243	
0831-7	16.0	79.0	150	9.4	265	
0907-1	15.4	68.5	150	9.7	296	

0831-2	15.8	65.0	175	11.1	1	
0831-3	16.1	70.0	200	12.4	15	
0831-4	16.0	67.0	200	12.5	22	
0907-2	14.8	54.0	200	13.5	39	

付表2 ブリ0年魚の水温23℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0821-1	18.5	118.0	130	7.0	>3,600	7.3
0821-2	17.4	104.0	130	7.5	1,758	
0821-3	18.5	110.5	130	7.0	>3,600	7.1
0821-5	17.8	91.0	130	7.3	>3,600	7.4
0824-2	18.7	116.5	130	7.0	3,139	
0824-3	19.3	122.5	130	6.7	3,525	

0820-2	16.9	94.2	140	8.3	1,500	
0820-3	16.9	93.2	140	8.3	462	
0821-4	17.4	84.0	140	8.0	1,102	
0822-2	18.9	115.0	140	7.4	357	

0820-1	17.3	109.6	150	8.7	113	
0822-1	17.2	79.5	150	8.7	412	
0822-3	17.6	91.5	150	8.5	189	
0822-4	17.4	84.5	150	8.6	268	

0823-1	18.3	108.0	170	9.3	365	
0823-2	19.5	138.5	170	8.7	275	
0823-3	18.1	108.5	170	9.4	530	
0823-4	17.2	77.0	170	9.9	168	

0823-5	17.7	96.0	200	11.3	102	
0823-6	16.9	77.5	200	11.8	19	
0823-7	17.5	92.5	200	11.4	39	
0823-8	16.9	79.0	200	11.8	47	

付表3 プリ0年魚の水溫25℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 維持 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0730-3	16.1	63.0	130	8.1	>3,600	8.3
0731-1	15.4	62.0	130	8.4	>3,600	9.3
0731-2	14.2	47.0	130	9.2	>3,600	9.4
0801-5	15.8	66.5	130	8.2	2,565	
0730-1	16.0	69.5	140	8.8	2,328	
0730-2	15.0	56.0	140	9.3	2,080	
0731-3	15.5	63.0	140	9.0	2,891	
0802-1	17.0	85.0	140	8.2	1,390	
0731-4	15.8	62.0	150	9.5	542	
0801-1	15.3	57.0	150	9.8	313	
0801-2	14.3	52.0	150	10.5	380	
0802-2	16.2	76.5	150	9.3	1,788	
0801-6	15.8	65.0	170	10.8	374	
0801-7	15.6	63.0	170	10.9	284	
0801-8	15.8	63.5	170	10.8	395	
0801-9	14.9	53.0	170	11.4	175	
0731-5	16.7	83.0	200	12.0	150	
0801-3	15.4	60.5	200	13.0	93	
0801-4	16.0	66.0	200	12.5	113	
0802-3	17.0	87.5	200	11.6	71	

付表4 プリ0年魚の水溫28℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 維持 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0813-1	15.9	68.5	140	8.8	>3,600	9.1
0813-3	18.6	119.5	140	7.5	>3,600	7.8
0813-4	16.2	73.0	140	8.6	1,042	
0814-1	16.0	90.0	140	8.8	>3,600	9.5
0816-4	18.6	128.5	140	7.5	>3,600	8.4
0813-2	16.7	86.5	150	9.0	1,080	
0814-2	16.4	81.0	150	9.1	1,559	
0814-4	17.1	87.5	150	8.8	2,750	
0814-6	17.2	90.0	150	8.7	2,400	
0815-9	16.9	90.5	150	8.9	950	
0816-3	18.2	115.0	150	8.2	561	
0814-3	17.2	91.5	160	9.3	719	
0815-1	18.6	123.0	160	8.6	1,918	
0815-2	18.6	116.5	160	8.6	410	
0815-3	16.1	83.9	160	9.9	1,596	
0814-5	17.0	85.0	180	10.6	444	
0815-4	17.8	103.5	180	10.1	155	
0816-1	19.5	145.5	180	9.2	179	
0816-2	16.8	84.5	180	10.7	223	
0815-5	15.6	67.0	200	12.8	169	
0815-6	19.4	139.5	200	10.3	424	
0815-7	16.2	73.5	200	12.3	160	
0815-8	17.5	104.5	200	11.4	216	

付表5 マアジ未成魚の水温14°Cにおける遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
1108-3	19.0	118.5	110	5.8	2,379	
1108-4	18.7	129.5	110	5.9	>3,600	6.7
1109-1	17.8	105.0	110	6.2	>3,600	6.7
1109-4	18.8	132.5	110	5.9	>3,600	6.2
1105-3	20.2	162.0	120	5.9	>3,600	6.0
1105-4	18.4	113.0	120	6.5	>3,600	6.5
1106-4	17.9	114.5	120	6.7	1,837	
1107-5	18.6	123.0	120	6.5	1,071	
1108-1	16.7	86.5	120	7.2	1,821	
1108-2	19.4	142.0	120	6.2	1,793	
1107-7	17.1	92.0	120	7.0	1,515	
1105-1	17.8	107.0	130	7.3	476	
1105-2	19.0	136.5	130	6.8	691	
1107-4	18.2	103.5	130	7.6	660	
1107-8	18.5	118.0	130	7.0	876	
1106-6	18.3	120.5	160	8.7	431	
1106-7	18.4	124.0	160	8.7	266	
1107-2	18.2	103.5	160	8.8	262	
1107-6	16.6	86.0	160	9.6	173	
1106-3	16.9	86.5	200	11.8	65	
1106-5	17.4	96.0	200	11.5	3	
1107-1	19.8	153.5	200	10.1	58	
1107-3	20.4	151.0	200	9.8	111	

付表6 マアジ未成魚の水温17°Cにおける遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
1029-5	17.2	92.0	120	7.0	>3,600	7.2
1030-1	18.1	106.0	120	6.6	>3,600	6.8
1101-1	20.2	153.5	120	5.9	>3,600	6.0
1102-2	16.8	77.5	120	7.1	>3,600	7.3
1029-2	17.9	111.0	130	7.3	1,782	
1029-3	19.4	140.5	130	6.7	685	
1031-2	18.1	109.0	130	7.2	1,338	
1031-5	19.7	180.0	130	6.6	2,185	
1029-1	19.0	141.5	140	7.4	1,445	
1030-2	17.8	98.5	140	7.9	853	
1031-1	16.5	77.0	140	8.5	1,050	
1031-4	17.5	105.0	140	8.0	800	
1030-4	18.0	115.0	160	8.9	378	
1030-5	20.3	174.0	160	7.9	731	
1031-3	17.0	99.0	160	9.4	236	
1031-6	17.0	93.0	160	9.4	404	
1030-3	16.8	81.5	200	11.9	32	
1030-6	17.6	93.5	200	11.4	72	
1101-2	17.1	87.5	200	11.7	56	
1102-1	22.2	222.0	200	9.0	207	

付表7 マアジ未成魚の水温20℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨界 遊速 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
1022-6	17.3	89.0	120	6.9	>3,600	8.0
1023-1	17.6	104.5	120	6.8	1,519	
1023-2	18.0	113.0	120	6.7	>3,600	6.8
1023-5	16.8	98.5	120	7.1	>3,600	7.9
1022-2	17.5	110.5	130	7.4	827	
1022-3	17.2	90.0	130	7.6	>3,600	8.0
1022-5	16.6	86.5	130	7.8	519	
1024-3	18.0	121.5	130	7.2	>3,600	7.5
1025-6	18.1	115.0	130	7.2	519	
1022-1	19.4	124.0	140	7.2	331	
1022-4	17.7	99.0	140	7.9	92	
1024-2	18.6	126.5	140	7.5	1,029	
1025-3	18.8	144.0	140	7.4	1,605	
1024-1	17.2	88.5	160	9.3	305	
1024-4	17.0	89.5	160	9.4	266	
1025-1	22.1	205.0	160	7.2	842	
1025-4	18.6	126.5	160	8.6	469	
1023-3	19.4	140.0	200	10.3	175	
1023-4	18.8	137.0	200	10.6	106	
1024-5	18.7	112.5	200	10.7	57	
1025-5	17.8	102.0	200	11.2	99	
1025-2	17.5	75.5	200	12.3	93	

付表8 マアジ未成魚の水温25℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨界 遊速 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
1005-2	18.3	109.0	130	7.1	>3,600	7.7
1008-4	18.3	118.5	130	7.1	>3,600	7.2
1008-5	18.6	117.0	130	7.0	>3,600	7.1
1011-1	16.7	91.5	130	7.8	>3,600	7.9
1005-3	16.3	90.6	140	8.6	>3,600	8.7
1008-1	16.0	60.5	140	8.8	232	
1008-2	17.4	105.5	140	8.0	646	
1008-3	16.7	75.0	140	8.4	135	
1011-2	15.9	89.0	140	8.8	700	
1009-1	16.7	84.5	150	9.0	620	
1009-2	16.8	86.0	150	8.9	236	
1009-3	19.6	126.5	150	7.7	151	
1009-9	17.0	81.5	150	8.8	588	
1009-4	15.8	80.5	170	10.8	110	
1009-5	16.9	92.0	170	10.1	44	
1009-6	17.9	109.0	170	9.5	165	
1009-10	16.0	71.5	170	10.6	68	
1003-1	16.2	72.5	200	12.3	56	
1004-1	17.2	90.5	200	11.6	1	
1009-7	18.4	96.0	200	10.9	100	
1009-8	15.8	77.0	200	12.7	68	

付表 9 マアジ未成魚の水温28℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
1017-3	16.5	84.0	120	7.3	>3,600	7.5
1018-4	17.4	102.0	120	6.9	1,533	
1112-2	17.8	107.5	120	6.7	>3,600	8.2
1113-1	19.7	121.5	120	6.1	>3,600	7.5
1015-1	16.0	75.5	130	8.1	>3,600	8.8
1016-3	16.0	64.5	130	8.1	75	
1016-4	16.8	70.5	130	7.7	200	
1018-5	16.2	104.0	130	8.0	>3,600	8.1
1114-2	16.9	82.5	130	7.7	>3,600	8.0
1115-1	18.6	116.0	130	7.0	>3,600	8.8
1015-2	15.1	70.0	140	9.3	477	
1015-3	17.2	96.5	140	8.1	43	
1015-4	17.4	95.5	140	8.0	>3,600	8.3
1016-2	17.3	102.5	140	8.1	540	
1114-1	20.0	165.5	140	7.0	341	
1114-6	17.5	87.5	140	8.0	714	
1113-2	17.2	85.5	160	9.3	387	
1113-3	18.7	127.0	160	8.6	156	
1113-4	19.0	115.5	160	8.4	540	
1114-3	17.1	94.5	160	9.4	334	
1114-5	19.7	155.5	160	8.1	571	
1018-1	15.3	66.5	200	13.1	88	
1018-2	16.6	85.5	200	12.0	104	
1018-3	16.1	84.5	200	12.4	53	
1112-1	15.7	71.5	200	12.5	1	
1114-4	18.5	137.0	200	10.8	81	

付表10 イシダイ1年魚の水温15℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0612-2	11.9	66.5	50	4.2	>3,600	4.4
0612-3	11.8	68.0	50	4.2	>3,600	4.4
0613-1	13.1	104.5	50	3.8	>3,600	4.1
0613-3	12.8	74.5	50	3.9	>3,600	4.3
0611-5	12.5	69.0	60	4.8	1,520	
0611-6	13.3	111.0	60	4.5	916	
0612-1	12.4	96.5	60	4.8	719	
0612-4	11.3	95.5	60	5.3	1,085	
0611-3	11.6	81.5	70	6.0	319	
0611-4	13.2	99.5	70	5.3	486	
0612-5	10.8	53.5	70	6.5	495	
0612-6	13.2	94.5	70	5.3	667	
0612-7	11.7	68.0	90	7.7	101	
0613-2	12.3	71.0	90	7.3	107	
0613-4	12.4	86.5	90	7.3	174	
0613-5	13.1	105.0	90	6.8	80	
0611-1	12.4	83.5	147	11.9	1	
0611-2	12.3	87.0	128	10.4	1	
0613-6	13.7	91.5	157	11.5	1	
0613-7	12.4	86.0	142	11.5	1	

付表11 イシダイ1年魚の水温20℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0515-1	12.0	84.0	60	5.0	>3,600	5.3
0515-2	12.2	85.5	60	4.9	>3,600	5.3
0516-1	12.8	83.5	60	4.7	>3,600	4.9
0517-1	10.6	47.0	60	5.7	>3,600	6.1
0515-3	12.0	75.5	70	5.8	1,457	
0515-4	12.8	75.0	70	5.5	1,090	
0515-5	12.2	60.5	70	5.7	535	
0516-7	11.6	63.0	70	6.0	422	
0514-4	12.0	66.0	80	6.7	294	
0514-5	11.4	66.0	80	6.8	515	
0516-6	12.2	69.0	80	6.6	510	
0516-8	10.7	58.5	80	7.5	273	
0516-2	10.7	53.0	100	9.3	169	
0516-3	11.9	59.0	100	8.4	77	
0516-4	11.6	64.0	100	8.6	209	
0517-2	11.8	67.0	100	8.5	185	
0514-1	13.6	89.0	155	11.4	1	
0514-2	12.0	69.5	167	13.9	1	
0514-3	13.0	92.5	173	13.3	1	
0516-5	10.0	43.0	149	14.9	1	

付表12 イシダイ1年魚の水溫25℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0522-4	13.4	95.0	70	5.2	>3,600	5.4
0523-1	12.2	75.0	70	5.7	>3,600	6.1
0524-2	11.8	70.0	70	5.9	>3,600	6.4
0525-4	13.3	103.0	70	5.3	>3,600	5.6
0522-1	13.4	110.0	80	6.0	2,436	
0523-2	12.9	109.5	80	6.2	459	
0524-1	13.2	95.5	80	6.1	>3,600	6.3
0525-5	12.3	79.5	80	6.5	1,001	
0523-3	12.6	89.5	90	7.1	261	
0523-4	12.7	78.0	90	7.1	132	
0524-3	12.6	73.5	90	7.1	436	
0525-3	11.9	77.0	90	7.6	336	
0523-5	13.2	98.5	110	8.3	125	
0523-6	13.4	126.5	110	8.2	64	
0524-4	12.8	99.0	110	8.6	170	
0525-1	12.2	84.0	110	9.0	95	
0522-2	12.7	91.0	175	13.8	1	
0522-3	11.8	78.5	161	13.6	1	
0524-5	13.1	114.0	163	12.4	1	
0525-2	13.1	89.5	162	12.4	1	

付表13 イシダイ1年魚の水溫28℃における遊泳能力測定試験結果

供試魚 No	供 試 魚		試験 流速 (cm/秒)	比流速 (L/秒)	遊泳 持続 時間 (秒)	臨 界 遊 泳 速 度 (L/秒)
	体長 (cm)	体重 (g)				
0605-1	12.0	69.5	60	5.0	>3,600	6.0
0605-2	12.3	74.5	60	4.9	>3,600	6.3
0608-5	13.2	94.0	60	4.5	>3,600	5.7
0608-6	12.2	80.0	60	4.9	>3,600	5.6
0604-6	12.5	75.0	70	5.6	511	
0604-7	12.4	79.0	70	5.6	690	
0605-3	12.7	92.0	70	5.5	1,540	
0606-1	14.1	99.0	70	5.0	>3,600	5.2
0606-2	12.4	74.0	70	5.6	>3,600	5.9
0606-5	12.2	79.5	70	5.7	>3,600	6.1
0607-6	13.4	107.0	70	5.2	>3,600	6.1
0604-4	12.6	83.0	80	6.3	140	
0604-5	12.0	72.0	80	6.7	428	
0606-3	12.1	80.0	80	6.6	559	
0606-4	11.8	69.5	80	6.8	571	
0607-1	12.5	80.5	90	7.2	416	
0607-2	10.8	47.5	90	8.3	207	
0607-3	11.4	59.5	90	7.9	177	
0607-5	12.9	102.5	90	7.0	124	
0607-4	12.1	73.5	110	9.1	193	
0608-1	11.3	77.0	110	9.7	9	
0608-2	13.3	86.5	110	8.3	178	
0608-3	12.6	79.5	110	8.7	97	
0604-1	11.8	59.0	129	10.9	1	
0604-2	12.6	87.5	146	11.6	1	
0604-3	11.8	71.0	160	13.6	1	
0608-4	12.8	85.5	150	11.7	1	

付表14 共分散分析法による温度馴致群別の遊泳曲線回帰式の傾きと高さに関する
F 検定結果

ブリ0年魚, *S. quinquerediata*

	28°C馴致群		25°C馴致群		23°C馴致群	
15°C馴致群	***	***	—	***	—	***
23°C馴致群	—	***	—	***		
25°C馴致群	—	—				

マアジ未成魚, *T. japonicus*

	28°C馴致群		25°C馴致群		20°C馴致群		17°C馴致群	
14°C馴致群	*	**	***	***	—	*	—	**
17°C馴致群	*	—	*	—	—	*		
20°C馴致群	—	—	—	—				
25°C馴致群	—	—						

イシダイ1年魚, *O. fasciatus*

	28°C馴致群		25°C馴致群		20°C馴致群	
15°C馴致群	**	***	**	***	—	***
20°C馴致群	*	—	—	—		
25°C馴致群	—	—				

左側が傾きに関する検定結果, 右側が高さに関する検定結果.

—: 有意差なし, *: P < 0.05, **: P < 0.01, ***: P < 0.001.

