

特集 海生動物行動実験装置

回流式水槽

— ブリ, マアジ, イシダイの遊泳能力の評価 —

中村幸雄^{*1§}・伊藤康男^{*2}・渡辺幸彦^{*3}・土田修二^{*3}

Circulating Water Channel

— Evaluation of Swimming Activity of *Seriola quinqueradiata*,
Trachurus japonicus, and *Oplegnathus fasciatus* —

Yukio Nakamura^{*1§}, Yasuo Itoh^{*2}, Yukihiro Watanabe^{*3} and
Shuji Tsuchida^{*3}

要約: 海産魚類の遊泳能力を調べるため遊泳能力測定装置 (スタミナトンネル: L7,700mm×W990mm×H2,720mm) を製作し, ブリ, マアジ, イシダイの遊泳能力を調べた。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/s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°Cの任意の設定値を±0.1°C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°C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。遊泳能力を水温・魚種別に比較するための遊泳速度として, 実際に測定した遊泳速度 (V) を実験に供した魚の体長 (L) で除した比流速 (L/s) を用いた。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11.7~18.9 L/sおよび4.4~8.8 L/sの範囲にあった。水温14~28°Cではイシダイの遊泳能力がもっとも小さかった。また, 25°C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°C以下では両者の遊泳能力に大きな差はなかった。以上の結果から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が明らかとなった。

キーワード: スタミナトンネル, 回流式水槽, 魚類, 遊泳能力, 水温

まえがき

わが国の漁業においては漁獲技術開発のための応用研究として魚類の遊泳行動や群行動に関する研究が広く行われてきた。例えば, 漁具漁法などの改良・開発を目的として, 魚類の行動生態が良く調べられている (有元, 1995)。また, 近年, 海洋資源開発, 気候変動に伴う海域環境変化など

による魚類の摂餌・産卵, 回遊, 分布などへの影響が懸念されており, それらの行動生態の解明が急務となっている。しかしながら, 海産魚類の行動生態のうち, 遊泳速度や遊泳能力を定量的に計測・評価した研究は少ない。

筆者らは1980年代から十数年間にわたって, 発電所の冷却用海水の取水に伴って起こる魚類の取水スクリーン衝突現象を生物学的側面から調査研

(2013年11月26日受付, 2014年2月7日受理)

- *1 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階)
§ E-mail: nakamura@kaiseiken.or.jp
*2 公益財団法人海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜4-7-17)
*3 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)

究してきた。すなわち、取水口に設置したスクリーンに衝突する魚の種類や衝突量などを予測・評価するための基礎情報として沿岸性魚類24種の遊泳能力を調べた。本稿では魚類の遊泳能力を測定するために製作した装置の概要と、これを用いて調べた海産魚類3種の遊泳能力に関する研究成果の一部を報告する。なお、それらの詳細については中村ら（1991）の研究論文に詳しい。

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・システムから成る。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9m³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）。水槽上部には実験水路部があり、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。

第1図に示すように、回流水槽の下部に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（安川製作所、112MH）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実験水路内の流速を5～200cm/sの任意の値に設定することが可能である。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、水槽内にはガイドバーン、整流格子板、制波板、流速分布調整装置、気泡除去装置を設けた。

第2図に示すように、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つから成る。大型制御系では加熱用（温水）および冷却用（ブライン）のチタン製プレート式的大型熱交換器により水温調節を行う。また、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る。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、観察室内に設置した温度調節器（REX-L1000、理化工業）および整合器（チノ製作所、OS-2）を用いた。

方 法

遊泳能力指標の種類 魚類の遊泳能力を評価するための指標として一般的には以下の遊泳速度が用いられる（Brett, 1964；塚本・梶原, 1973）。

- ・瞬間最大遊泳速度（Burst Speed, BSと略）
- ・最大持続遊泳速度（Maximum Sustainable Speed, MSSと略）
- ・遊泳能力指数（Swimming Ability Index, SAIと略）

BS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る。MSS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。この二つの速度は、遊泳速度V（cm/s）と遊泳時間T（s）との間に成立する以下の関係式を求め、両対数上に示した切片がBS、所定の時間（3,600s）遊泳を持続できる最大遊泳速度がMSSとなる。

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

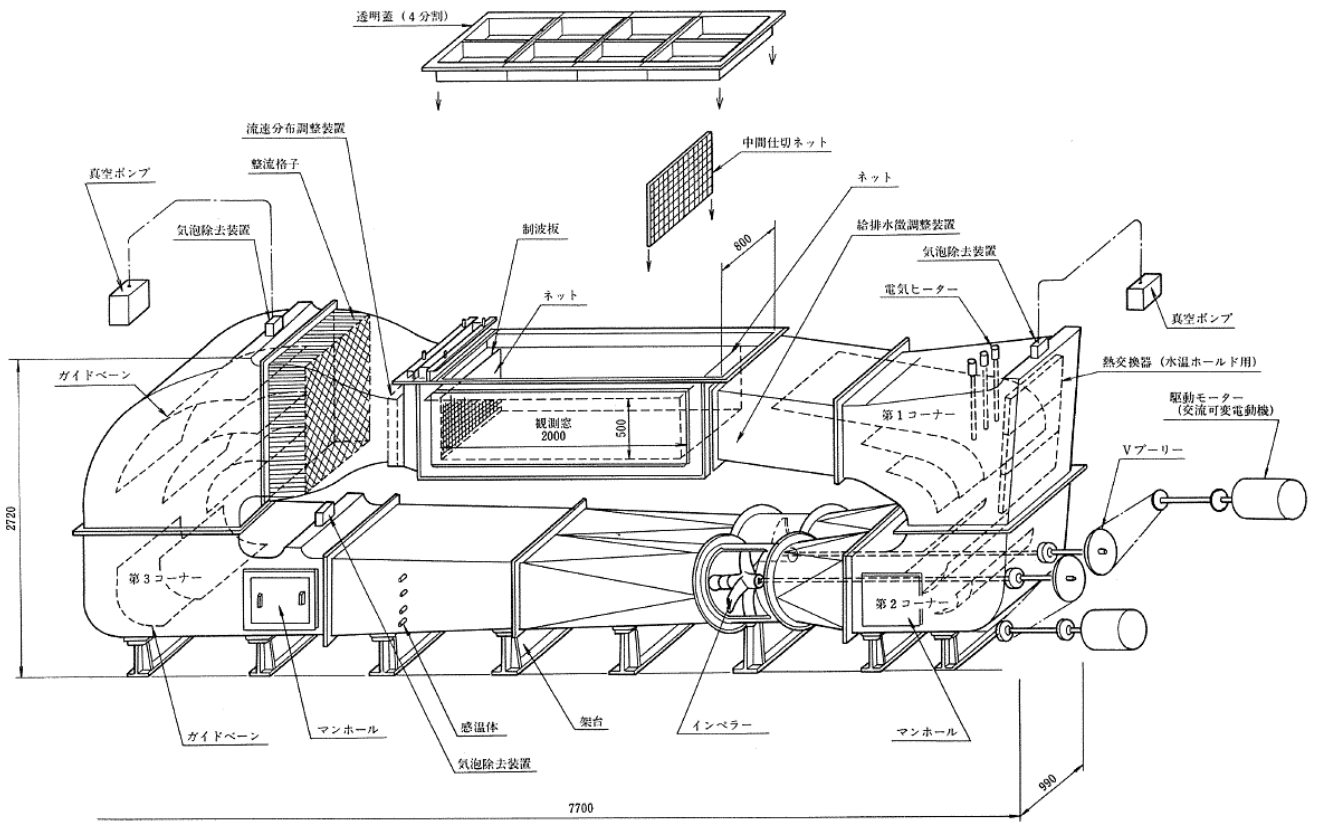
ここで、Lは魚の体長、 α およびKは定数である。上の式のV/Lは流速（V）を魚の体長（L）で除した値（単位としてL/s）で、比流速と称される。この値は、多くの魚で遊泳能力が体長に比例して大きくなることから、魚種内あるいは魚種別に遊泳能力を比較する場合に有効な値とされている（塚本・梶原, 1973）。

塚本・梶原（1973）は上記の遊泳曲線式に基づいてSAIを次のように定義した。遊泳能力をBSからMSS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MSS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。

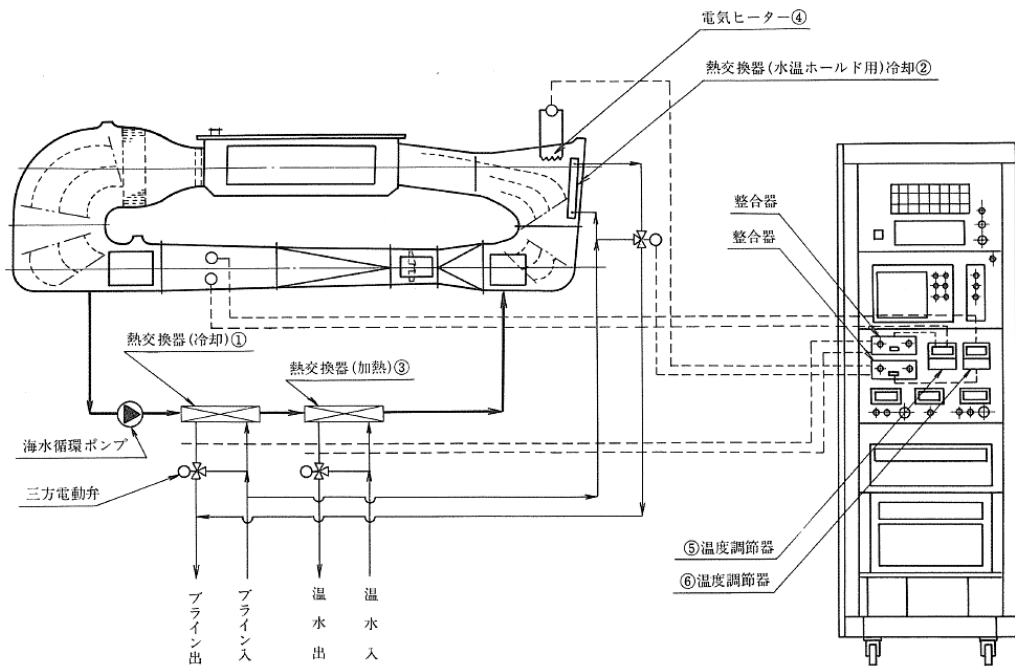
$$SAI = \int_1^{3,600} (V/L) dt \times 10^{-4} = \int_1^{3,600} K \cdot T^{-\alpha} dt \times 10^{-4}$$

さらに、塚本・梶原（1973）は上の式から得られるSAIが魚類の遊泳能力の指標値として有効であるとしている。そこで、本研究では魚種別・水温別にこれら遊泳曲線式から算出したBS、MSS、SAIを明らかにするための実験を以下の方法で行った。

遊泳能力指標の測定方法 いずれの魚種および水温段階でも以下の同様の方法を用いた。BSの実測値（遊泳曲線式から算出したBSと区別するため、以降、実測BSと記述）については、流速Vを初期流速から1cm/s²の割合で上昇させていき、魚



第1図 装置の構造模式図 (中村ら, 1991より引用)。



第2図 装置の水温制御部の概略図 (中村ら, 1991より引用)。

が遊泳不能となった時点のVを測定し、これを実測BS (T=1) とした (①)。実測BSがこの装置の設定可能な最大流速200cm/sを上回る場合には、流速を200cm/sに固定したまま、この時のTを測定した。次に、流速を初期流速から1cm/s²の割合で上昇させていき、数段階のVに固定して各VにおけるTを測定した (以上②)。この際固定したVのもとで60分間遊泳できた場合には、さらに10cm/sだけ流速を上昇させて60分間泳がせる操作を、魚が後部金網に張り付き遊泳不能となるまで繰り返した。そして、魚が60分間の遊泳をできなかった最終の流速段階におけるTを測定した (③)。

Brett (1964) は、③の操作により算出される遊泳速度を60分間臨界遊泳速度 (Critical Swimming Speed, CSS) と称し、以下のように求めた。つまり、CSSとは、流速を60分間おきに10cm/s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/s) と、遊泳不能となった流速段階での遊泳時間 (T, s) を次式に代入して得られた遊泳速度と定義した。

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

上記の①～③の実験で得られたTとV、すなわち、①のT=1とした時の実測BS、②の数段階のVにおけるTの測定値、および③の60分間CSS (T=3,600の時のV) を、Vについては各実験魚のLで除した比流速 (単位はL/sと表記) に換算して両対数グラフ上にプロットし、遊泳曲線式 $(V/L) \cdot T^\alpha = K$ を適用して定数 α およびKを求めた。さらに、得られた遊泳曲線式においてT=3,600とした時のV/Lを前述のMSSとし、V/LをT=1からT=3,600まで積分した値をSAIとした。

供試魚 前述の実験装置を用いて、平均体長11.9～18.4cmのブリ *Seriola quinqueradiata*、マアジ *Trachurus japonicus*、イシダイ *Oplegnathus fasciatus* の各未成魚を養殖業者および活魚業者などから入手し用いた。魚は、実験前には所定の実験水温で約2週間馴致飼育した。実験水温は14～28℃の間の4～5段階とした。

手順 ブリおよびマアジでは手製の大型狭水路を、また、イシダイでは小型狭水路をそれぞれ回流水槽の実験水路内に設置し、その中に各回1～5尾の実験魚を収容した。馴致水槽から取り上げた魚は、あらかじめ馴致飼育時と同じ水温に調節し

た回流水槽の狭水路内に収容し、透明塩化ビニル板製の蓋をした。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、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/sの穏やかな流れ (初期流速) を起動した。

いずれの水温段階および魚種についても以下の同様の方法で実験を行った。魚を収容してから20～40分後、収容した魚の遊泳が安定した時点で実験を開始した。まず、複数尾について実測BSを測定した。次いで、Vを7～10段階に固定したまま各段階における遊泳時間Tを4～7尾について測定した。この際、所定の流速で60分間完泳した実験魚では上述のように60分間CSSを調べた。遊泳時間の終了は、原則、下流部の金網に張りつくまでの時間とした。その後、各水温段階で遊泳曲線式を決定し、遊泳曲線式から算出したT=1の時のBS、T=3,600の時の60分間MSS、SAIの3種の指標値に基づいて魚種別・水温別の遊泳能力を比較した。

実験魚の遊泳行動は、実験水路部の直上方向から白色電球 (約480w) によって照明し、遊泳状態を水槽の前面に設置したモニター用ビデオカメラを通じて、実験水槽とは別の部屋の観察室に設置した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 (ユニオンエンジニアリング, UECM-200・ミニチュア型) および流速計センサー (直径9mm) を用いた。

結果および考察

装置の性能 装置の性能試験では、5～200cm/s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。

3魚種の遊泳能力 この装置を用いて、14～28℃で温度馴致した平均体長11.9～18.4cmのブリ、マアジ、イシダイの遊泳能力を評価した。遊泳曲線式より求めた3魚種のBSとMSSはそれぞれ11.7～18.9L/sおよび4.4～8.8L/sの範囲にあった。MSS, CSS, 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。

謝 辞

この研究の機会を与えられ、試験に際して多くの御助言及び本稿の校閲をいただいた海生研諸先輩方に心から厚く御礼申し上げます。また、供試魚の入手および飼育管理等については、(公財)海洋生物環境研究所中央研究所の瀬戸熊卓見総括技術員並びに箕輪 康技術員(現在、実証試験場主任技術員)より多大の協力を得た。ここに記し、

心より感謝する。この論文は、経済産業省資源エネルギー庁から委託された温排水生物影響調査・水流温度反応試験のうち、既に許可を得て公表したものの一部であり、関係各位に謝意を表す。

引用文献

- 有元貴文 (1995). 魚類の遊泳行動と漁法. 「魚の行動生理学と漁法」(有元貴文・難波憲二編), 恒星社厚生閣, 東京, 60-73.
- Brett, J. R. (1964). The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **9**, 265-323.
- 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. 海生研研究報告, **No.91203**, 1-33.
- 塚本勝巳・梶原 武 (1973). 魚類の遊泳速度と遊泳能力. 水産土木, **10**, 31-36.