

## マアジの酸素消費量と遊泳能力について

横田源弘<sup>1†</sup>, 山元憲一<sup>2</sup>, 平 雄一郎<sup>1</sup>, 半田岳志<sup>2</sup>, 森元映治<sup>1</sup>

### Oxygen Consumption and Swimming Ability of *Trachurus japonicus*

Motohiro Yokota<sup>1†</sup>, Ken-ichi Yamamoto<sup>2</sup>, Yuichiro Taira<sup>1</sup>, Takeshi Handa<sup>2</sup>  
and Eiji Morimoto<sup>1</sup>

**Abstract** : As a basic study for practical realization of enclosed circulating flow type land culture for *Trachurus japonicus*, this study investigated effects of swimming speed and seawater temperature on oxygen consumption, the relationship between the swimming number and the Reynolds number, and the relationship between body length and body weight. The following results were obtained. (1) There are two cases in the relationship between swimming speed and oxygen consumption: that in which oxygen consumption increases with swimming speed gradually, and that in which oxygen consumption increases drastically with swimming speed. (2) Oxygen consumption increases with seawater temperature. (3) The maximum swimming speed, at which maximum oxygen consumption is obtainable, is 4.5 body lengths per second at 15–30°C. (4) Results show that the breeding flow rate fit for flowing cultivation is about two body lengths per second. (5) The relationship between the swimming number  $S_w$  and the Reynolds number  $R_r$  is represented as  $S_w = 2.40 \times 10^{-2} \cdot R_r^{0.282}$ ; the swimming number varies from 0.50 to 0.76. (6) The relationship between body length ( $BL$ [mm]) and body weight ( $BW$ [g]) is represented as  $BW = 1.95 \times 10^{-5} \cdot BL^3$ .

**Key Words** : Oxygen consumption, Swimming, Temperature, Swimming ability, Swimming number, Recirculating system, Raceway culture, *Trachurus japonicus*

### はじめに

大衆魚としてなじみが深いマアジは刺身、塩焼き、干物など用途が広く、水産上重要な種類である。アジの需要増加という社会情勢と餌付けがしやすく成長も良好なことからアジ養殖は急速に発展し、生産量を伸ばしてきた。アジ養殖はハマチ養殖に比べてミンチ肉の使用頻度が高いため、養殖環境への汚染負荷が大きい。養殖アジは天然アジに比べ脂が多く、肉質が軟らかく味に乏しいことが指摘されている。

過密養殖からの脱却と海洋環境に有機物を排出しないために、海から離れて陸上で海水を循環させる陸上養殖の技術開発も進んでいる。実用化も始まった閉鎖循環式陸上養殖は海洋汚染の防止に加えて水質管理が徹底できること、さらに海洋からのウイルス感染がないため病害が低いこと

など利点が多く、期待されている<sup>1)</sup>。また、運動負荷を与える「流水養殖」は肉質向上が期待できる。

この養殖法を実用化するために、流水速度が魚体にどの程度影響を与えるのかを知る必要がある。そこで前報<sup>2)</sup>ではトラフグ *Takifugu rubripes*、マダイ *Pagrus major* およびメジナ *Girella punctata* の酸素消費量に及ぼす遊泳速度と水温の影響について調査した。引き続き本報では、マアジ *Trachurus japonicus* を用いて、酸素消費量に及ぼす遊泳速度と水温の影響、遊泳能力および体長と体重の関係について調べたので報告する。

### 実験装置および方法

実験に供したマアジは、山口県下関市永田本町の水産大学校付近の海で2003年および2004年の9～10月に釣って畜

2007年10月9日受付。Received October 9, 2007.

1 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

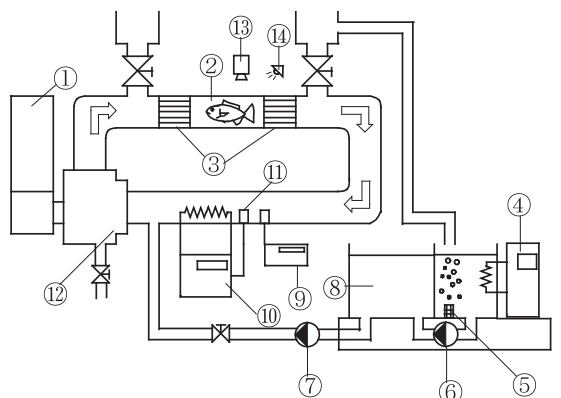
2 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (corresponding author) : yokota@fish-u.ac.jp

養したものである。実験時の供試魚の体長 $BL$ と体重 $BW$ は $BL=164\sim 206\text{mm}$ ,  $BW=88\sim 176\text{g}$ の範囲であった。同一の目的に対する一連の実験には、体の大きさがほぼ等しいものを選び、しっかり遊泳したものだけをデータとして扱った。実際に $12^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , および $30^\circ\text{C}$ の場合はそれぞれ4個体, 16個体, 13個体, 15個体および9個体であった。供試魚は飼育施設で飼育し、餌料としてはハマチ用の配合飼料を与えたが、実験の当日と前日は給餌しなかった。

実験に用いた装置は密閉回流式スタミナトンネルである。Fig. 1には実験装置の概略を示す。装置は供試魚に流れを与え、酸素消費量を計測するための遊泳魚体酸素消費実験水槽(長さ $4400\text{mm}\times$ 幅 $850\text{mm}\times$ 高さ $2400\text{mm}$ , 水量 $0.214\text{m}^3$ ) ②とろ過および酸素供給するための小型飼育用水槽(長さ $1430\text{mm}\times$ 幅 $445\text{mm}\times$ 高さ $730\text{mm}$ , 水量 $0.20\text{m}^3$ ) ⑧をビニルホースでつなぎ、循環ポンプ⑦により海水が循環するようにした。遊泳魚体酸素消費実験水槽は回流水槽に温度調節装置(水温調整範囲:  $5\sim 30^\circ\text{C}$ ) ⑩, 溶存酸素計⑨および温度計⑪が付属したもので、渦巻きポンプ⑫により回流するようになっている。小型飼育用水槽⑧は温度調節装置(水温調整範囲:  $5\sim 30^\circ\text{C}$ ) ④, 酸素供給装置⑤, 循環ポンプ⑥が付属したものである。また、遊泳運動を調べる際にはデジタルビデオカメラ⑬と照明⑭を追加した。

酸素消費量の測定方法は密閉流水式とし、溶存酸素濃度は隔膜式ガルバニ電池法の溶存酸素計(東亜ディーケーケーDO-25A)で測定した。実験に際しては一個体ずつ流



① Control panel and motor ② Circulating water channel  
 ③ Honey comb ④ Control panel( Heater and Cooler )  
 ⑤ Oxygen supply apparatus ⑥ Circulatory pump  
 ⑦ Circulatory pump ⑧ Small breeding tank  
 ⑨ Dissolved oxygen meter ⑩ Cooler  
 ⑪ Temperature sensor ⑫ Centrifugal pump  
 ⑬ Digital video camera ⑭ Lamp

Fig. 1. Experimental apparatus

水式により測定した。流速は $0\sim 1.2\text{m/s}$ まで可変速が可能で、遊泳部(観測部:長さ $600\text{mm}\times$ 幅 $200\text{mm}\times$ 深さ $200\text{mm}$ )の断面流速を均一にするため、格子型整流装置③を採用している。

供試魚は、実験水槽に慣れさせるために実験開始の12~15時間前に実験水槽に入れ、所定の水温に保持した。その際、常に酸素が飽和した海水を供給するため、2個の水槽(②と⑧)を循環させておいた。また、供試魚は大変神経質なので水槽の周りを黒いシートで囲った。本実験での流速は供試魚の体長を基準にし、各流速で15~30分当たりの酸素消費量を測定した。測定する際には、2個の水槽間の循環を止め、流速が安定した状態から測定を開始した。各回の実験中の水温変化は、 $1.0^\circ\text{C}$ 以内であった。

遊泳運動の測定は、酸素消費量の測定と同様の手順を踏み、遊泳状態を上方よりデジタルビデオカメラを用いて毎秒体長の $1.0\sim 4.5$ 倍の速度までそれぞれについて撮影した。撮影した映像を見て、尾鰭の振動周波数と振幅を測定した。高速度域でまれに振幅運動を止め突進をすることがあったが、これは一時的なもので解析には除外した。ビデオ撮影に用いたマアジは5個体で、体長 $BL$ , 体重 $BW$ , 水温 $T$ はそれぞれ $BL=196\sim 204\text{mm}$ ,  $BW=132\sim 156\text{g}$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ であった。

実験結果と考察

酸素消費量に及ぼす遊泳速度と水温の影響

Fig. 2には、水温 $T=12^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , および $30^\circ\text{C}$ での各遊泳速度における単位時間・単位体重あたりの

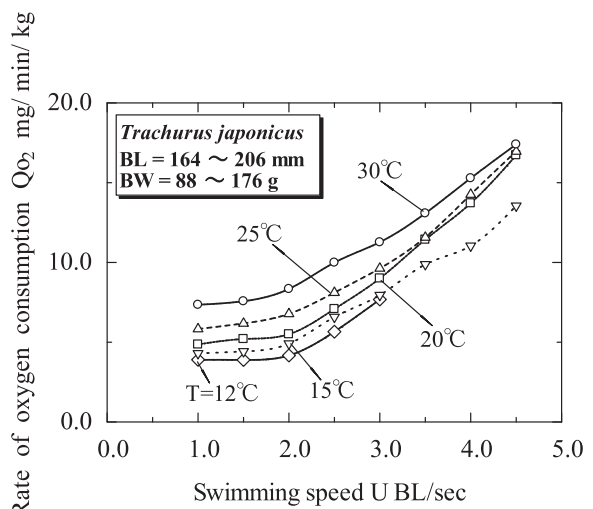


Fig. 2. Relation between rate of oxygen consumption and swimming speed for various seawater temperatures

酸素消費量を示す。以下の議論はすべて単位時間・単位体重あたりの酸素消費量について行う。遊泳速度 $U$ については1秒あたりの体長比速度 [BL/sec] で表す。例えば、 $U = 3$  BL/secの場合、遊泳速度が毎秒体長の3倍の距離を進む速さであることを意味する。図から、いずれの水温でも酸素消費量は体長の2倍前後の遊泳速度までは速度とともに緩やかに増加するが、それを超えると流れの速さとともに著しく増加し、水温 $T$ が15~30℃の場合体長の4.5倍程度の遊泳速度で最大に達している。このことから、マアジの場合最大の酸素消費量を示す遊泳速度（以下、最大遊泳速度という）までは少なくとも15~30分間、水中から酸素を摂取し体組織でこれを利用して好氣的運動を行っていることになる。

アジ科魚類の中でも、比較的小型のマアジでは各筋節は副筋節に分節することなく単一で、動・静脈交互分布の単線式配列であること、筋節数が少ないため推進力の元となる体筋節が相対的に厚い筋節によって構成されていること、筋節の厚みが増せばその収縮周期ならびに血流抵抗が増大すると考えられるので、高速遊泳に不利な条件下にあることになると板沢<sup>3)</sup>は述べている。確かに本実験でも遊泳速度が体長の4.5倍（最大遊泳速度）を越えると、目測ではあるがマアジはかなり疲労しており、水槽の上下左右に振られ、流されて突進を繰り返す状態であった。マアジは体表が弱く、突進状態が続くと前方あるいは後方に激突し死亡することもあるので、実際は様子がおかしくなった時点で実験を中止した。以上のように、実験では流速が体長の5倍以上になると安定した遊泳が困難であった。この事実はマアジが高速遊泳に不利という板沢<sup>3)</sup>の考えを支持するものである。

つぎに、水温と酸素消費量の関係のみをみる。各水温における最大遊泳速度までは、水温の上昇とともに酸素消費量が増加する傾向を持っている。一般に魚類の酸素消費量は、他の変温動物のそれと同様、温度の上昇とともにほぼ直線的に増加することが知られているが<sup>1)</sup>、本結果もそれとほぼ一致する。最大遊泳速度における酸素消費量を見ると、20~30℃でのそれはほぼ同じ値を示している。この状態は激しく運動している時の酸素消費量であるから、マアジの適温を超える高温が関係していると考えられる。前報<sup>2)</sup>でも述べたが、基礎代謝量は温度が高いほど増大し、血液の酸素解離曲線が右に傾くため血液中に酸素を取り込みにくくなること、また高温では水に含み得る酸素量が少なくなることからそれだけ鰓換水量を増大させる必要があり、またそれだけ鰓での水中から血中への酸素摂取の効率が低

下するなどの原因で、呼吸には不利になる<sup>3)</sup>。

流水養殖時の飼育流速であるが、供試魚を高速で常に泳がすことは高い代謝を要求することになるから、成長速度が小さくなるため産業上は有利とはならない。しかし、適度な運動を与えて成長を促すことを目指すのであれば飼育流速を大きくする必要はない<sup>2)</sup>。そこで、適度な流速を与える観点からマアジの場合、体長の2倍程度の流水速度を与えることが望ましいと考える。

さらに、前報の結果<sup>2)</sup>と比較するために、Fig. 3には20℃におけるトラフグ、マダイ、メジナおよびマアジの結果を示す。明らかにマアジの酸素消費量はトラフグ、マダイおよびメジナのそれに比べて数倍以上高いことがわかる。この理由として、マアジは他の魚に比べて体が小さく、活発に遊泳するためと考えられる。魚の生理的・行動的活動度にも依るが、小魚類は大型の魚類よりも強い呼吸をすること<sup>4)</sup>、また異種間においても各組織の代謝活性が大型種になるほど低くなる傾向が一般的にあること<sup>3)</sup>などが原因であろう。

## 遊泳能力

様々な種類の魚は、体形や運動形式が異なり、それぞれ特有の遊泳能力を持つ。それらの特徴を活かした魚ロボットの開発は重要な課題である。そのような背景に基づき、魚の泳法の研究が進められている<sup>6,7)</sup>。そこで、アジ型推進<sup>6)</sup>の代表種としてマアジの遊泳運動を調査することにした。まず、遊泳体の泳動能力を表示する量として、永井らが提案している泳動数<sup>8)</sup>を用いて検討する。

泳動数 $S_w$ およびレイノルズ数 $Re$ は尾鰭振動周波数 $f$  [Hz]、体長 $BL$  [m]、遊泳速度 $U$  [m/s]、海水の動粘度 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]を

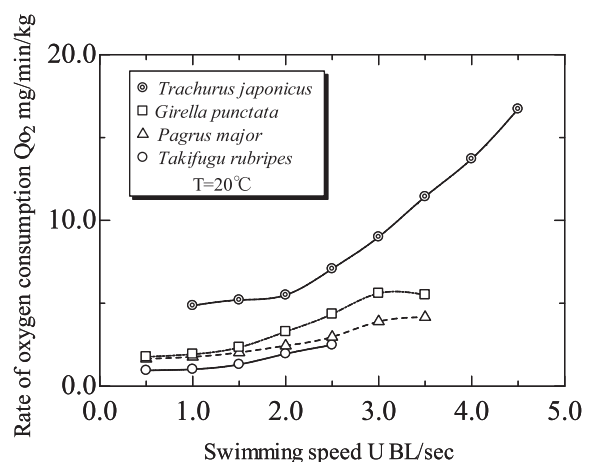


Fig. 3. Relation between rate of oxygen consumption and swimming speed for various fishes

用いて次式で定義される。

$$Re = U \cdot BL / \nu \quad \dots \dots (1)$$

$$S_w = U / (f \cdot BL) \quad \dots \dots (2)$$

すなわち、泳動数は尾鰭運動の1周期で体長の何倍進行するかを示す尺度<sup>6)</sup>であり、数値が大きいほど遊泳能力が高いことを示している。

Fig. 4には泳動数とレイノルズ数の関係を示す。図から、マアジの泳動数はレイノルズ数の増加とともに増加し、平均値で示すと0.50から0.76の範囲で変化している。特に、高速遊泳時に限定するとマアジの泳動数は0.70~0.76であった。文献<sup>6,8)</sup>によると、高速遊泳時におけるティラピア *Tilapia mossambica*、ウグイ *Tribolodon hakonensis*、コイ *Cyprinus carpio*、ミナミバンドウイルカ *Tursiops truncatus* の泳動数はそれぞれ0.58, 0.63, 0.70, 0.82と報告されている。したがって、マアジはティラピア、ウグイ、コイより遊泳能力は優れているが、イルカのそれと比較すると有意に低いといえることができる。

Fig. 4の結果から、泳動数はレイノルズ数の関数であると考え、最小二乗法により近似式を求めた結果、次の式を得た。

$$S_w = 2.40 \times 10^{-2} \cdot Re^{0.282} \quad (R=0.856) \quad \dots \dots (3)$$

ここで、実験式(3)が他のアジ型推進魚に適用可能かを検証してみた。ウグイとコイなどの高速魚はアジ型に分類される。ウグイとコイの高速遊泳時のレイノルズ数はそれぞれ $1 \times 10^5$ ,  $1.6 \times 10^5$ 付近である<sup>6,8)</sup>から(3)式に代入すると、計算によって予測された泳動数はそれぞれ0.62, 0.70となり、文献<sup>6,8)</sup>の実験値と一致することになる。

徐ら<sup>9)</sup>は、マアジの遊泳速度の測定に関する水槽実験の結果から、遊泳速度と尾鰭振動周波数、尾又長との関係を検討し、マアジの遊泳速度を表示する関係式を求めている。

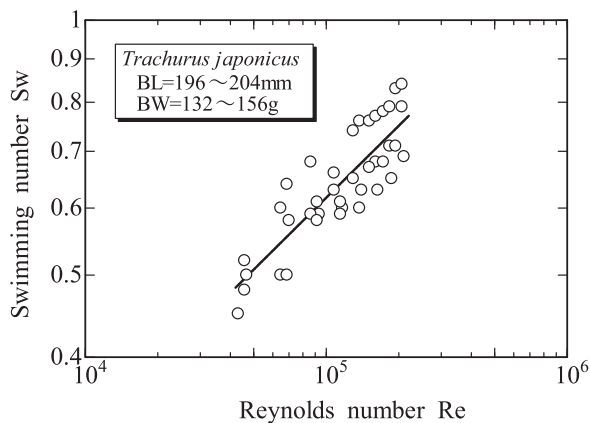


Fig. 4. Relation between swimming number and Reynolds number

る。その結果によると、Bainbridge<sup>8)</sup>の提示した式で近似した場合泳動数に相当する遊泳係数が0.73であること、一方Hunter and Zweifel<sup>10)</sup>が提示した式で近似した場合それが0.77であることから<sup>9)</sup>、本研究の結果は妥当であると言える。

遊泳運動は低速遊泳時では尾鰭の振動振幅を大きくとり徐々に小さくなる振り方を繰り返し、そのまま泳ぎが止まる事もあった。一方、高速遊泳時では尾鰭の振動振幅はほぼ一定で、常に尾鰭を規則的に振動させていた。また、遊泳速度が流水速度に追いつかないときには突進することも見られた。このことから、遊泳速度に応じて尾鰭の振動振幅と振動周波数を変えることにより、より効率的な泳ぎをしていると考えられた。

### 体長と体重の関係

体重は給餌量、各種栄養素の飼料への添加量および病気になった際の投薬量の基準となるため、成長状況を常に把握しておく必要がある。その際、魚を採取して測定する場合魚に過大な負荷を与えることになる。アジは“スレ”に弱い魚であるため、タモ網による取り扱いをなるべく避ける必要がある。体表を傷つけ、病気の原因になるので好ましくない。そこで海中で泳いでいる映像からマアジの体重を知るために、マアジの体長と体重の関係を調べた。

Fig. 5には体長BL[mm]と体重BW[g]の関係を示す。図中、BL-BW曲線は体重BWが体長BLの3乗に比例するとして最小二乗法で求めた回帰曲線である。マアジのBL-BW曲線は次式で示される。

$$BW = 1.93 \times 10^{-5} \cdot BL^3 \quad (R=0.853) \quad \dots \dots (4)$$

ただし、BW:体重[g], BL:体長[mm], R:相関係数。つぎに、遊泳運動との関連で、魚の体形指標(細長度)

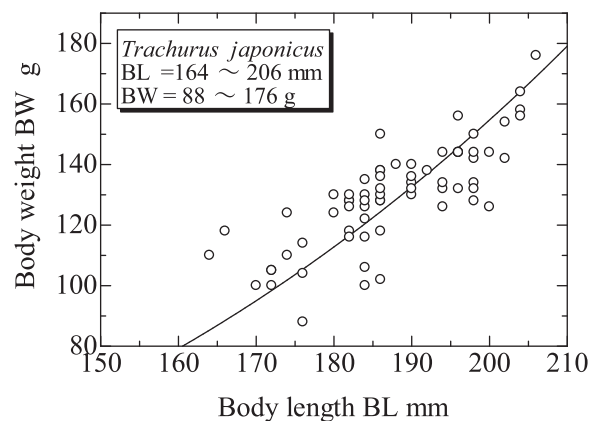


Fig. 5. Relation between body weight and body length

である $BL^3/BW$ を計算したところ、マアジで $52 [cm^3/g]$ であることがわかった。トラフグの $31 [cm^3/g]$ 、マダイの $33 [cm^3/g]$ 、メジナの $28 [cm^3/g]$ と比較すればマアジの体型は細長で、コイの $55 [cm^3/g]$ に近い<sup>6)</sup>。

### おわりに

流水養殖の実用化に向けて、マアジの酸素消費量に及ぼす遊泳速度と水温の影響、泳動数とレイノルズ数の関係、体長と体重の関係について調査した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 遊泳速度と酸素消費量の関係は、緩やかな増加期、急激な増加期の2つに区分できる。
- (2) 酸素消費量は水温の上昇とともに増加する。
- (3) 水温が $15\sim 30^\circ C$ の場合、体長の4.5倍の遊泳速度までは $15\sim 30$ 分程度遊泳可能である。
- (4) 流水養殖に適した飼育流速は、マアジの場合体長の2倍程度の速度であると考えられる。
- (5) マアジの泳動数とレイノルズ数の関係は式(3)で表され、泳動数は $0.50\sim 0.76$ の範囲で変化した。
- (6) マアジの体長と体重の関係は式(4)で表される。

### 謝 辞

本研究の実験遂行にあたり、元水産大学校海洋機械工学科学生茶木賢治君および元水産学研究科学生白石敬一郎君の助力に感謝する。

### 文 献

- 1) (社) マリノフォーラム21水産養殖研究会：閉鎖循環式陸上養殖システムの開発（環境創出型養殖技術）技術資料. MF21, 技術資料No.52 (2003)
- 2) 横田源弘, 山元憲一, 平 雄一郎, 半田岳志：トラフグ, マダイおよびメジナの酸素消費量に及ぼす遊泳速度と水温の影響. 水大研報, **56**, 261-265 (2008)
- 3) 板沢靖男：総説 魚類の呼吸と血液循環. 日水誌, **67**, 634-639 (2001)
- 4) シュミット・ニールセン：動物の生理学（柳田為正訳）, 岩波書店, 東京 (1975)
- 5) 板沢靖男, 小栗幹郎, 田村 保, 羽生 功：魚類生理学. 田村 保（編）, 恒星社厚生閣, 東京 (1994)
- 6) 永井 實：イルカに学ぶ流体力学. オーム社出版局, 東京 (2000)
- 7) 平田宏一, 春海一佳, 瀧本忠教, 田村兼吉, 牧野雅彦, 児玉良明, 富田 宏：魚ロボットに関する基礎研究. 海上技術安全研究所報告, **2**, 1-27 (2003)
- 8) Bainbridge R: The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat. *J Exp Biol*, **35**, 109-133 (1958)
- 9) 徐 剛, 有元貴文, 井上 実：マアジ *Trachurus japonicus* の遊泳速度の測定. 日水誌, **54**, 1493-1497 (1988)
- 10) Hunter J R, Zweifel J R: Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude and size in jack mackerel, *Trachurus symmetricus* and other fishes. *Fish Bull*, **69**, 253-266 (1971)