

流速および体長別のオイカワの突進速度

VARIATION OF BURST SPEED OF ZACCO PLATYPUS WITH CHANGING BODY LENGTH AND FLOW VELOCITY

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・山本晃義³・飯國洋平³
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Akiyoshi YAMAMOTO and Yohei IIGUNI

¹正会員 博(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

The burst speed is the highest swimming speed of fish. Fish can migrate through fishways, when the maximum velocity in fishways is smaller than the burst speed. Therefore it is necessary to understand the burst speed of fish. In this study, an investigation on the burst speed of *Zacco platypus* under the condition that the body length and flow velocity are changed was conducted. The results show the swimming speed increases rapidly after starting swimming and acceleration decreases gradually. Finally, the swimming speed reaches to the burst speed. The burst speed divided by the body length decreases with an increase of the body length and increases with an increase of the flow velocity. The burst speed is generally known as a value ten times of the body length of fish. However, it was found that the burst speed of *Zacco platypus* is up to 30 times or more of the body length from the present experiments.

Key Words : burst speed, swimming ability, *Zacco platypus*, body length, flow velocity

1. はじめに

治水や利水を目的にダムや堰などが作られてきたが、これらの構造物によって河川の連続性が阻害されるため、アユやサケに代表される通し回遊魚は海と川とを行き来することが困難になった。そのため、平成3年に河川の自然環境や景観の改善を目的とした「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業」が旧建設省から公表された。平成17年には魚の生活史に視点を置いた「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」が国土交通省から公表された。この手引きには、「魚道内の最大流速は、対象とする魚種のうち最も遊泳力の小さい魚の突進速度以下になるように設定することを基本とする」と記されている。

Blaxter¹⁾は1秒～数秒間しか持続できない最大遊泳速度を突進速度と定義した。Brett²⁾、Blaxter & Dickson⁴⁾および中村⁵⁾は突進速度が水温の影響を受けないことを明らかにした。Lindsey⁶⁾は遊泳の際に用いる尾鰭および躯幹の大きさによって魚の遊泳型を16種類に分類した。Katopodis⁷⁾は遊泳型および体長が同一であれば、魚種の相違に関わらず遊泳能力が等しいと述べている。しかし、塚本ら⁸⁾が得たアユおよびニジマスのデータに基づけば、遊泳型および体長が同一でも魚種によって遊泳能力が異

なるという結論に達する。そのため、魚種別に突進速度を整理する必要がある。

我が国の河川に生息する魚種数は外来種を除くと160種程度といわれている。突進速度が求められている魚種は、アユ^{9,14)}、オイカワ^{9,11,15)}、ウグイ^{9,11,16)}、カワムツ^{9,11)}、キンブナ⁹⁾、ギンブナ⁹⁾、コイ^{9,10)}、ウナギ^{9,11)}およびドジョウ^{9,10)}である。小山⁹⁾は体長9cmのオイカワの突進速度を体長の11.1倍(cm/s)と示しているが、測定時の流速を記していない。小山¹³⁾は流速の増加に伴いアユの突進速度が変化すると指摘している。小山¹³⁾の結果はオイカワにも該当すると考えられるため、突進速度を測定する際には流速も明示する必要がある。泉ら¹⁵⁾はスタミナトンネルを用いた実験で、オイカワの突進速度のみならずトンネル内流速も測定した。その結果、トンネル内流速が91cm/s～195cm/sでは、平均体長8.1cmの突進速度が体長の約27倍であることを解明した。しかし、体長および流速を系統的に変化させていない。魚道を設計する上では、魚種、体長および流速が既知の時に突進速度が得られることが求められるが、泉ら¹⁵⁾の結果からはこれが必ずしも容易ではない。

前報¹⁷⁾では数魚種を対象として、流速ゼロ時の突進速度を体長別に測定した。本研究では流速およびオイカワの体長を系統的に変化させて突進速度を求めた。

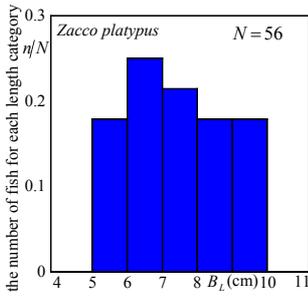


図-1 オイカワのヒストグラム

表-1 体長別限界流速

体長	オイカワ (<i>Zacco platypus</i>)
5~6cm	130cm/s
6~7cm	130cm/s
7~8cm	150cm/s
8~9cm	170cm/s
9~10cm	170cm/s

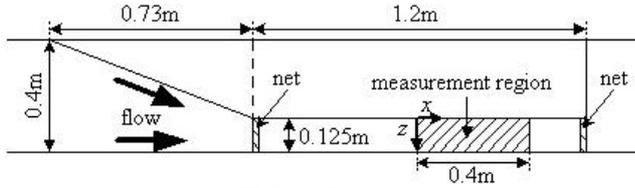


図-2 実験水路

2. 実験装置および実験条件

(1) 実験魚

実験には北九州市を貫流する2級河川の板櫃川で採取したコイ科ダニオ亜科オイカワ属のオイカワ(*Zacco platypus*)を用いた。図-1に実験に用いた56匹のオイカワの体長 B_L のヒストグラムを示す。体長は5cm~10cmの範囲に均等に分布している。

(2) 実験装置

全長4.2m, 幅0.4m, 高さ0.3mの亚克力製可変勾配型直線水路の上流側から1.5m離れた位置に、図-2に示すような長さ0.73mの縮流部を設置した。縮流させることにより主流速分布が矩形に近づき、乱れ強度分布が断面内で一様に近づくことが期待される¹⁸⁾。縮流部の下流側に長さ $l=0.4m$, 幅 $B=0.125m$ の測定区間を設けた。測定区間の始端を基準に流下方向に x 軸を、 x 軸に直角上向きに y 軸を、横断方向に z 軸をとる。水深 h を0.087mとし、水温24°Cのカルキ抜きをした水道水を用いた。流量および水路床勾配を変化させることで、流速を0cm/s, 40cm/s, 80cm/s, 120cm/sおよび限界流速の5パターンに変化させた。限界流速とは各体長(5cm~10cm)のオイカワが、遊泳可能な最大流速のことであり、限界流速を超えると魚は流下方向へ押し流される。表-1に予備実験より得られた体長別の限界流速を記す。

測定区間の最下流位置にオイカワを1匹ずつ入れ、遊泳の様子を水路の側岸に設置された高速ビデオカメラで撮影した。流速の速い場合では水路に入れたオイカワは直ちに上流方向に遊泳を開始したが、流速が遅く遊泳を開始しない場合は電気ショック¹⁷⁾を用いて遊泳を開始させた。ビデオカメラの録画速度は流速0cm/sでは240フレーム/s, 流速を加えたときは120フレーム/sであり、画素数はそれぞれ360×240, 720×240ピクセルである。撮影後に動画をコマ送りして、魚の口の先端¹⁹⁾をトレース

表-2 測定点の位置

x/l	0.0	0.33	0.65	0.99			
y/h	0.11	0.23	0.34	0.46	0.57	0.69	0.80
z/B	0.08	0.20	0.32	0.44	0.56	0.68	0.80

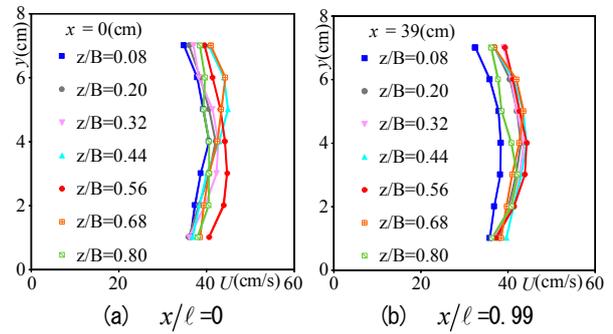


図-3 流下方向別流速分布

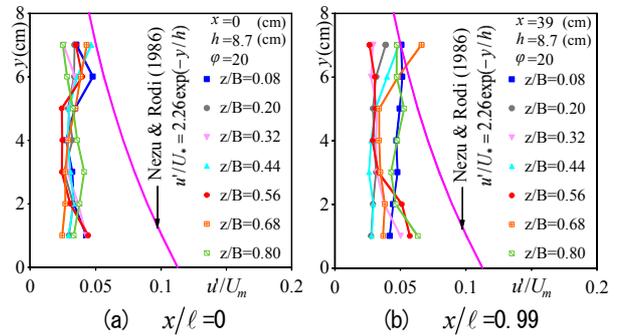


図-4 流下方向別乱れ強度分布

して遊泳速度を算出した。なお、5ケースの体長および5ケースの流速においてそれぞれ50回程度(合計約1250)の測定を行い、それぞれのケースで遊泳速度の速い上位10ケース(合計250)を採用した。

(3) 流速測定

表-2に示すような鉛直方向(y)の7点、横断方向(z)の7点、流下方向(x)の4点で構成される格子点において、電磁流速計を用いて x 方向の瞬間流速 $\tilde{u} = U + u$ を0.05s間隔で51.2s計測した。 x 方向の時間平均流速を U とし、変動成分を u で示す。なお、流速測定時には魚を水路に入れていない。

3. 実験結果および考察

(1) 測定区間の水理特性

図-3に $x/l=0$ および0.99における、流速を40cm/sに設定した場合の時間平均流速 U の断面内分布の流下方向変化を示す。 $x/l=0$ における各測定点の時間平均流速 U は、鉛直方向(y)および横断方向(z)にほとんど変化しておらず、設定流速40cm/sとの差は10%程度である。 $x/l=0.99$ における平均流速 U は、側壁付近の $z/B=0.08$ において急激に減少している。しかし、 $z/B=0.08$ は側



写真-1 遊泳開始直後の挙動 (流速40cm/s)

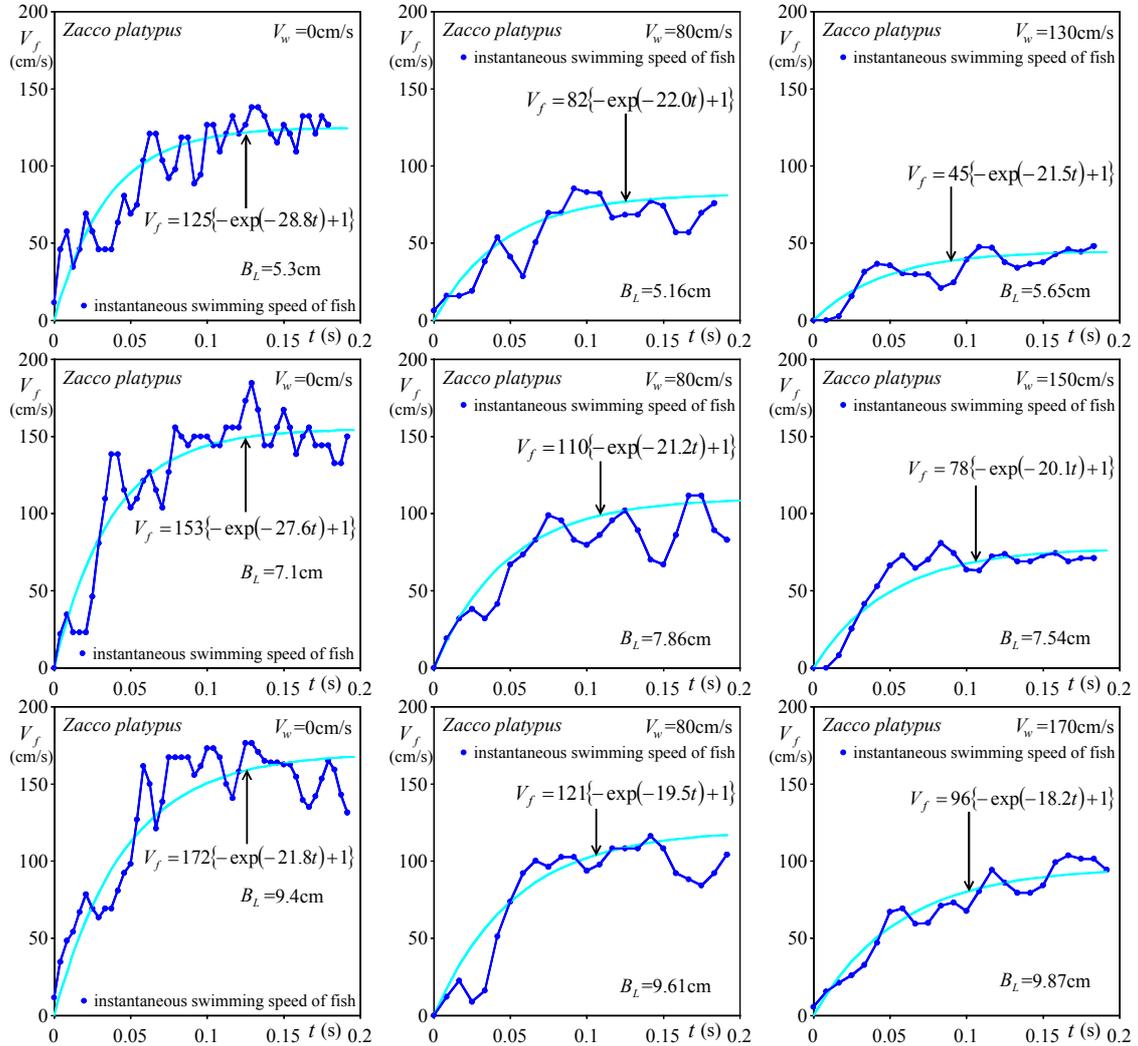


図-5 オイカワの体長および流速別に示した遊泳速度の変化

壁からの実スケールが $z=1\text{cm}$ であり、この領域ではオイカワはほとんど遊泳しない。 $x/l=0.33$ および 0.65 においても、 $x/l=0.99$ の場合と同様な結果が得られた。

突進速度は周囲流速だけでなく、乱れ強度にも依存することが中村⁵⁾ および Lupandin²⁰⁾ によって指摘されている。図-4に図-3と同ケースの x 方向乱れ強度 u' の断面内分布の流下方向変化を示す。図中の曲線は Nezu & Rodi²¹⁾ が提案した乱れ強度分布式である。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-\lambda_u \frac{y}{h}\right) \quad (1)$$

ここで、 $D_u=2.26$ 、 $\lambda_u=0.88$ は Nezu & Rodi²¹⁾ の LDA 計測で得られた経験定数で、 U_* は摩擦速度を表している。予備実験を行なった結果、水路の流速係数 ϕ ($\equiv V_w/U_*$) が約 20 であったため、摩擦速度 U_* を断面平均流速 V_w に

基づき算出し、式(1)を図中に示している。同図より $x/l=0$ における乱れ強度 u' は、鉛直方向 (y) および横断方向 (z) にほとんど変化していないことが分かる。しかし $x/l=0.99$ における乱れ強度 u' は、側壁付近の底面および水面付近で局所的に増加している。測定区間を短くすればこの乱れ強度のばらつきをなくすことが可能であるが、突進速度に達するまでの距離を考慮した結果、測定区間の長さを $\ell=0.4\text{m}$ とした。

以上より、乱れ強度については多少のばらつきが見られるものの、流速に関しては差違が 10% 以内の一定値であると判断できる。

(2) 遊泳開始直後の挙動

写真-1に水路上方から撮影した、流速40cm/sにおける

表-3 オイカワの α , β の値

体長	$V_w=0(\text{cm/s})$		$V_w=40(\text{cm/s})$		$V_w=80(\text{cm/s})$		$V_w=120(\text{cm/s})$		$V_w=\text{限界流速}$	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
5~6 cm	24.4	126	23.2	116.7	22.1	96.6	20.6	79.2	19.6	58.7
6~7 cm	25.1	146.3	22.2	120	21.8	116.6	20.4	88.6	19.2	72
7~8 cm	26.4	146.5	23.1	126.2	21.7	117.3	20.2	101.8	18.9	77.2
8~9 cm	23.6	154.3	22.2	127.4	21.3	125.6	19.6	107.6	18.4	80.2
9~10cm	22.5	159.4	21.1	146.4	20.8	126.4	19.3	103.6	18.3	87.6

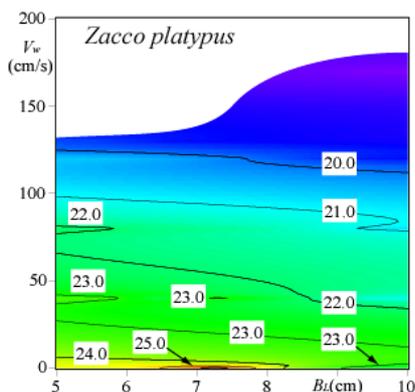


図-6 α のコンター図

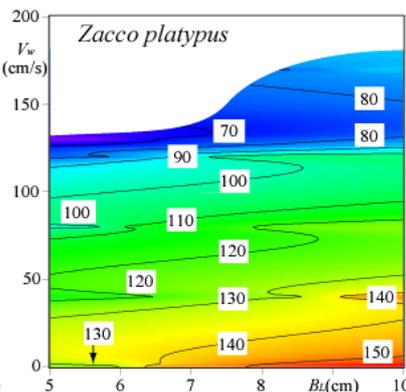


図-7 β のコンター図

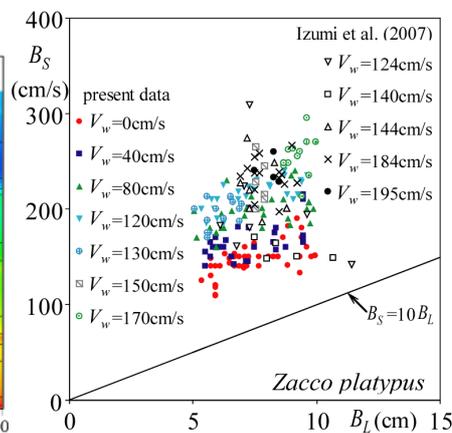


図-8 体長 B_L と突進速度 B_s の関係

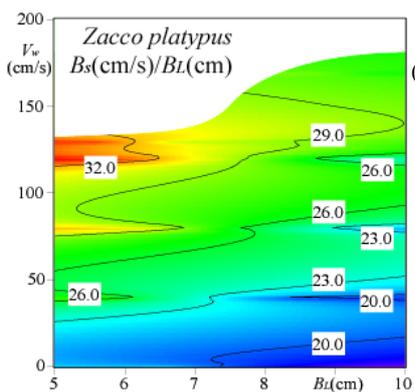


図-9 B_s/B_L のコンター図

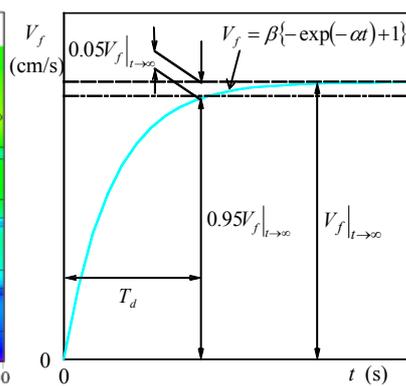


図-10 助走時間 T_d の説明図

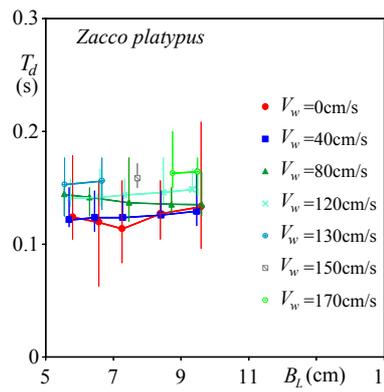


図-11 体長 B_L と助走時間 T_d の関係

遊泳開始直後の挙動を示す¹⁷⁾。この写真より、オイカワは頭部と尾鰭を左右に大きく振りながら、急激に加速し突進速度に到達することがわかる²²⁾。

(3) 魚の加速特性および定式化

図-5に体長別、流速別にオイカワの対地速度 V_f の変化の例を示す。多くのケースで遊泳開始直後に速度が増減している。これは、写真-1に見られるように頭と尾鰭を左右に振っており、それに伴い魚の頭部の速度が増減しているからである。この図を巨視的に見ると、速度が急激に上昇し、その後、速度変化が緩やかになり、最終的に定常状態に達していることが分かる。そこで、対地速度の変化を次式で表現する¹⁷⁾。

$$V_f = \beta \{ -\exp(-\alpha t) + 1 \} \quad (2)$$

ここに、対地速度 V_f の単位は cm/s であり、 t は遊泳開始からの時間で単位は s とし、 α および β は係数である。

実測された対地速度 V_f に式(2)が最も適合する係数 α および β を算出し、図-5中に式(2)を示した。全てのデータに対して同様の解析を行い、係数 α および β の体長 B_L および流速ごとの平均値を求めた。表-3に α および β の値を示すと共に、図-6および図-7にコンター図をそれぞれ示した。 α の値は体長 B_L および流速 V_w の増加に伴い、それぞれ微減および減少している。これは、体長 B_L および流速 V_w の増加に伴い、突進速度に達するまでの時間が増加することを意味している。 β の値は体長 B_L の増加および流速 V_w の減少に伴い増加している。これは、体長 B_L の増加および流速 V_w の減少に伴い、式(2)の時間 t を無限大にして得られる最大対地速度 $V_{f\infty}$ が増加することを意味している。突進速度 B_s は最大対地速度 $V_{f\infty}$ と断面平均流速 V_w を加算したものであり、次式で表される。

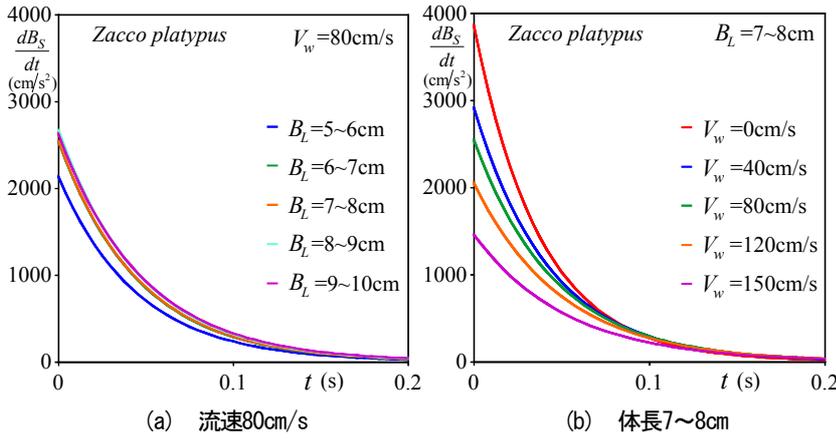


図-12 加速度の時間変化

$$B_s = V_{f\infty} + V_w \quad (3)$$

図-8に本実験で得られた突進速度 B_s と、泉ら¹⁵⁾のスタミナトンネルを用いた実験で得られた突進速度 B_s を示す。一般的に突進速度は体長の10倍である⁵⁾といわれている。

$$B_s = 10B_L \quad (4)$$

図-8に式(4)を直線で示した。本実験における流速150cm/sの結果と泉ら¹⁵⁾の流速144cm/sの結果を比較すると、同様の結果が得られている判断される。よって、本研究結果の信頼性が高いことが示された。

図-9に体長 B_L と B_s/B_L との関係を表したコンター図を示す。全ての条件において B_s/B_L は10以上の値を示しており、既往の知見⁵⁾とは異なる結果となった。また、体長 B_L の増加に伴い B_s/B_L は減少し、流速 V_w の増加に伴い B_s/B_L も増加傾向にあることが分かった。

(4) 魚の助走特性

魚が魚道内を遡上するためには、魚道内の流速を突進速度以下に設定するだけでなく、魚が突進速度に到達するまでの助走区間を魚道内に確保する必要がある。久保田²³⁾は、階段式水路のプール長を系統的に変化させることで、イワナが遡上するためには、体長の2倍程度の助走距離が必要と述べた。しかし、プール長と遡上数との関係を求めて、プール長が体長の2倍以上では遡上数が一定となったことに基づいた結論であり、魚の挙動に基づいた結論ではない。よって、突進速度に到達するまでの魚の挙動を解明する必要がある。また、この検討結果は、近年開始された魚の遊泳シミュレーション^{19), 24), 25)}の発達にも貢献すると考えられる。

a) 助走時間

図-5で示したように、魚は遊泳を開始した直後に速度を増して、その後徐々に突進速度に漸近するため、助走時間を正確に判別することは困難である。式(2)から助走時間を求めようとする、無限大の時間になってしまう。そこで、図-10に示すように、助走時間 T_d を突進速度の95%の速度に到達するまでの時間と定義する¹⁷⁾。

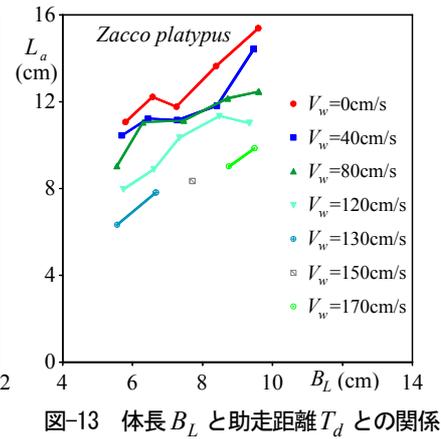


図-13 体長 B_L と助走距離 T_d との関係

図-11に各流速における、体長 B_L と助走時間 T_d との関係を示す。プロットの上下方向に伸びた線はデータのばらつき範囲を示す。図より体長 B_L の増加に伴い、助走時間 T_d は増加する傾向にあることが分かる。これは図-7で見られたように、体長 B_L の増加に伴い最大対地速度 $V_{f\infty}$ が増加するため、助走時間 T_d が増加したものと考えられる。同一体長においては、流速 V_w の増加に伴い、助走時間 T_d が増加する傾向にある。また、0.1~0.2sという短い時間で突進速度に到達している。

b) 加速度

突進速度に達するまでの加速度は式(2), (3)より、次式で表される¹⁷⁾。

$$\frac{dB_s}{dt} = \alpha\beta \cdot \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

図-12に流速80cm/sにおける体長別の加速度と、体長7~8cmにおける流速別の加速度を示す。遊泳開始直後の加速度が最も大きく、その後、徐々に減少していることが分かる。また、体長別の図より、体長 B_L の増加に伴い加速度も増加傾向にあることが分かる。流速別の図では、流速 V_w の増加に伴い、加速度は減少している様子が窺える。

c) 助走距離

助走時間 T_d に遊泳した距離には、実質距離と対地距離があり、後者に流速 V_w と助走時間 T_d を乗じた距離 $V_w \times T_d$ を加えると前者になる。ここでは、魚道の設計に利用しやすい対地距離を助走距離 L_a と定義する。

図-13に各流速における、体長 B_L と助走距離 L_a との関係を示す。いずれの流速でも、体長 B_L の増加に伴い助走距離 L_a が増加する。助走距離は最大対地速度に達するまでの距離であるため、最大対地速度および助走時間の影響を受けると考えられる。よって図-7および図-11で見られたように、体長 B_L の増加に伴い最大対地速度 $V_{f\infty}$ および助走時間 T_d が増加するため、助走距離 L_a が増加したものと考えられる。同一体長においては、流速 V_w の増加に伴い、助走距離 L_a が減少していることが

分かる。これは、図-11で見られたように流速 V_w の増加に伴って助走時間 T_d が増加するものの、図-7で見られたように最大対地速度 V_{fo} が減少したことが原因と考えられる。全体的に見てみると、助走距離は流速に関わらず、体長の2倍程度の長さがあれば十分であることが理解できる。これは久保田²³⁾の結果と一致する。

4. おわりに

本研究は、多くの河川に生息するオイカワについて体長および流速を系統的に変化させ、突進速度および突進速度に到達するまでの助走時間、加速度、助走距離などを詳細に検討したものである。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) オイカワの突進速度 B_s/B_L は体長の増加に伴い減少し、流速の増加に伴い増加することが分かった。また、一般的に体長の10倍と言われている⁹⁾が、最大で体長の30倍以上という結果が得られた。この結果は泉¹⁵⁾の結果と一致する。
- (2) 助走時間は体長および流速の増加に伴い増加し、およそ0.1~0.2sという短い時間で突進速度に到達していることが分かった。
- (3) 加速度は遊泳開始直後が最も大きく、その後は徐々に減少していくことが分かった。また、加速度は体長の増加に伴い増加し、流速の増加に伴い減少することが分かった。
- (4) 助走距離は体長の増加に伴い増加し、流速の増加に伴い減少することが分かった。また、助走距離は体長の2倍程度の長さがあれば十分であり、この結果は久保田²³⁾の結果と一致する。

謝辞：本研究を実施するに当たり、科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた。また、魚の飼育方法を御教授していただいた(有)アクアシティの花田一氏、および榎野川漁協に謝意を表す。

参考文献

- 1) Blaxter, J.H.S.: Swimming speeds of fish, *FAO Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, pp.1-32, 1967.
- 2) Brett, J.R.: The energy required for swimming by young sockeye salmon with a comparison of the drag force on a dead fish, *Trans. R. Soc. Can.*, Vol.4, No.1, pp.441-457, 1963.
- 3) Brett, J.R.: Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature, *J. Fish. Res. Bd. Can.*, Vol.24, pp.1731-1741, 1967.
- 4) Blaxter, J.H.S. and Dickson, W.: Observations on the swimming speeds of fish, *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, Vol.24, pp.472-479, 1959.
- 5) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995.
- 6) Lindsey, C.C.: Form, function, and locomotory habits in fish, *Fish*

Physiology, Vol.7, pp.1-100, 1978.

- 7) Katopodis, C.: Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants, *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu*, pp.19-28, 1990.
- 8) 塚本勝巳，梶原武，益田信之，森由基彦：放流時における人口種苗アユの分散，日本水産学会誌，第41巻，第7号，pp.733-737，1975.
- 9) 農業土木学会：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，2002.
- 10) 石田力三：アユその生態と釣りーアユのすべてがわかる本，つり人社，1988.
- 11) 九州地方建設局河川部：魚道設計参考資料(案)(魚道設計の考え方)，1997.
- 12) 小山長雄：アユの生態，中央公論社，1978.
- 13) 小山長雄：木曾三川河口資源調査団，1965.
- 14) 関谷明，下村充，坂本裕嗣，甲田篤史，福井吉孝：アユの行動特性と迷入防止策について，水工学論文集，第46巻，pp.1133-1138，2002.
- 15) 泉完，矢田谷健一，東信行，工藤明，加藤幸：自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験，水工学論文集，第51巻，pp.1285-1290，2007.
- 16) 泉完，矢田谷健一，東信行，工藤明：河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について，農業土木学会論文集，第244号，pp.171-178，2006.
- 17) 鬼束幸樹，秋山壽一郎，飯國洋平，山本晃義：静止流体中の魚の突進速度に関する実験的研究，水工学論文集，第51巻，pp.1267-1272，2007.
- 18) 今本博健，藤井良啓，藤井義文：開水路断面変化部における流れの水理特性について(2)，京大防災研年報，第20号B-2，pp.309-329，1977.
- 19) 二瓶泰雄，福永健一，小澤喜治：実際の魚体運動を反映した魚周辺の流動シミュレーション，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.55-66，2004.
- 20) Lupandin, A.: Effect of flow turbulence on swimming speed of fish, *Biology Bulletin*, Vol.32, No.5, pp.461-466, 2005.
- 21) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a Laser Doppler anemometer, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986.
- 22) Wardle, C.S.: Limit of fish swimming speed, *Nature*, Vol.255, pp.725-727, 1975.
- 23) 久保田哲也：砂防施設の魚道における溪流魚の行動と魚道の実態，水工学論文集，第42巻，pp.487-492，1998.
- 24) 大橋弘道，清水康行：数値計算による魚道内における魚の挙動の解析，水工学論文集，第48巻，pp.1597-1602，2004.
- 25) 橋本麻未，後藤仁志，原田英治，酒井哲郎：Boid型魚群行動モデルに基づく数値魚道の開発，水工学論文集，第49巻，pp.1477-1482，2005.

(2007. 9. 30受付)