水工学論文集,第51巻,2007年2月

静止流体中の魚の突進速度に関する実験的研究
EXPERIMENTAL STUDY ON BURST SPEED OF FISH IN STATIC WATER

鬼束幸樹[1]・秋山壽一郎[2]・飯國洋平[3]・山本晃義[4]
Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yohei IIGUNI and Akiyoshi YAMAMOTO

[1]正会員　博(工)　九州工業大学助教授　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
[4]学生員　九州工業大学　工学部建設社会工学科

Fish can migrate through fishways, when the maximum velocity in fishways is smaller than fish's burst speed. The burst speed depends on fish kind, body length of fish and flow velocity. Although, there is little information on the burst speed, it is known that burst speed is nearly estimated as ten times of body length. In this study, investigation on the burst speed of several fish kinds, i.e., *zacco temminckii*, *zacco platypus*, *carassius aurafus* and *plecoglossus altivelis altivelis*, in the condition that flow velocity is zero was conducted. It was found that the swimming speed increases rapidly after starting swimming and acceleration decreases gradually. Finally, the swimming speed reaches to the burst speed. A new formula which can predict the swimming speed is suggested. The approach time and swimming acceleration before reaching the burst speed are also investigated on the basis of a suggested formula.

Key Words : *burst speed, swimming ability, acceleration, fish, approach time, static water*

１．はじめに

平成2年に「多自然型川づくり」のパイロット事業が開始され，河川に生息する生物の生息環境を確保することに注意が注がれるようになった．また，平成3年に「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業」が開始され，特に魚類の生活環境の保全が注目された．平成17年には「魚がのぼりやすい川づくりの手引き」が国土交通省河川局から公表された．これは，魚の遡上を助けるために設置される魚道の設計指針について記されたものである．魚が魚道内を遡上するためには，魚道内の流速が魚の最大遊泳速度，すなわち突進速度以下の必要がある．

魚の遊泳に関する研究は主として海水魚について行われてきた．Blaxter[1]は魚が1秒～数秒間しか維持できない最大の遊泳速度を突進速度と定義した．長時間遊泳可能な速度は巡航速度と呼ばれる．Brett[2),3)], Blaxter & Dickson[4]は巡航速度は水温の影響を受けるが，中村[5]は突進速度は水温の影響を受けないと指摘した．Lindsey[6]は推進器官と可動部の広さの関係に基づき，魚の遊泳型を遊泳のために尾ひれを用いないグループと尾ひれを用いるグループに大別した．さらに，後者においては，遊泳による進行波と体長との比によって詳細に分類し，この比が1.0以下となる遊泳型をウナギ型，1～2の値となる遊泳型をマグロ型，さらに，ウナギ型とマグロ型の中間的な遊泳型をアジ型および準アジ型に分類した．Katopodis[7]は魚種の相違にかかわらず，遊泳型および体長が同一であれば遊泳能力が等しいと述べている．ところが，塚本・梶原[8]が得たアユおよびニジマスのデータはKatopodisの説を再現できない[5]．これは，遊泳型および体長が同一であっても魚種によって遊泳能力が異なることを示唆している．そのため，魚種別に突進速度を整理する必要がある．

まず，アユの突進速度についてレビューする．白石[9]は体長10cmの場合，突進速度が体長の20倍(cm/s)であることを示した．小山[10]は体長4.5および7cmの場合は，それぞれ体長の13.3および15.7倍となることを示し，農業水利施設の魚道整備の手引き[11]によると体長6，8，10cmの場合の突進速度は，それぞれ体長の18.3，16.3および17.0倍と記されている．

カワムツについては，体長0.8cmの突進速度が体長の20.6倍というデータ[12]がある一方，体長9cmでは体長の2.2倍というデータ[9]もある．

オイカワについては，体長9cmの場合に突進速度が体長の11.1倍という小山[9]のデータ以外は知られていない．

魚道の設計マニュアル[5,9,11,12]においても魚の突進速度については上述のデータを集約し，一般的に体長の10倍，アユは12〜18倍と記すにとどまっている．

以上のように，河川に生息する魚の突進速度に関して，既往のデータが極めて少ないことおよび同一魚種で同一体長であっても研究者によって提示している突進速度が異なり，魚道の設計に採用すべき突進速度が不明確であるという問題点がある．後者の問題点が発生した原因として次のように推測される．小山[13]は水路内の流速を系統的に変化させ，少なくともアユの突進速度は周囲の流速に依存することを示した．この結果は他の魚でも同様と考えられる．ところが，既往の突進速度を示した研究において，与えた流速がほとんど明記されていない．すなわち，既往の研究で突進速度を得る際に与えた流速がまちまちであるため，得られた突進速度にばらつきが生じたものと考えられる．

本研究は突進速度を解明する第一歩として，静止流体中においてオイカワ，カワムツ，ワキンおよびアユの突進速度を解明したものである．

２．魚の突進速度に関する既往の研究

河川に生息する魚の種類は外来種を除くと160種程度存在するため，ここでは，水産資源価値が高いもの，あるいは我が国で広い分布域を持ち，しかも生息数が多いものという観点から，アユ，オイカワ，カワムツ，フナに関する突進速度のみに着目する．なお，1969年に従来からカワムツと呼んでいたものに亜種が存在することが発見され，カワムツA型およびカワムツB型に分類された．さらに，2003年にカワムツA型がヌマムツに，カワムツB型がカワムツに名称変更になったが[14]，既往の研究では「カワムツ」と表記されているのがほとんどである．

表-1に既往の研究で求められているアユ，オイカワ，カワムツおよびフナの体長 B_L (cm)と突進速度 B_S (cm/s)を体長 B_L で除したものを示す．ただし，カワムツが旧名称のカワムツA型あるいはカワムツB型のどちらを示したものかは不明である．また，フナを改良して作られたキンギョのデータも掲載しているが，種類は不明である．同表より，水産価値の極めて高いアユの突進速度すら報告例が極めて少ないことが理解される．なお，これらの突進速度が得られた時の流速は不明である．以上のように，河川に生息する魚の突進速度はほとんど解明されていないことが認識された．

３．実験装置および実験方法

表-1 既往の突進速度の研究

魚種	B_L (cm)	B_S/B_L	文献番号
アユ	14.4	12.4	15)
	10	20	9)
	8.5	11.5	13)
	7.5	10.4	13)
	7	15.7	16)
	6.6	18.2	15)
	6.5	9.5	13)
	5.5	4.4	13)
	4.5	13.3	16)
	-	15	17)
	-	15.3	18)
オイカワ	9	11.1	9)
	-	10	17)
カワムツ	9	2.2	9)
	0.8	20.6	12)
	-	10	17
キンブナ	17.5	5.1	9)
ギンブナ	12.5	6	9)
キンギョ	10.1	11.2	15)

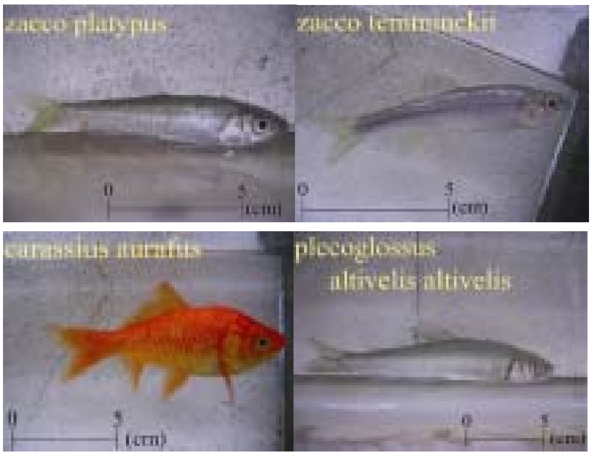

写真-1 実験に使用した魚

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*)，同科同属のカワムツ(*zacco temminckii*)，コイ科コイ亜科フナ属のワキン(*carassius aurafus*)および山口県椹野川漁協から入手したアユ科アユ属の養殖アユ(*plecoglossus altivelis altivelis*)を用いた．なお，ワキンはフナ尾，三つ尾，サクラ尾および四つ尾の4種に分類されるが，この中で最もフナの体型に近いフナ尾を実験に用いた．実験に用いた魚の写真を**写真-1**に示す．

図-1に実験に用いた56匹のオイカワ，71匹のカワムツ，70匹のワキンおよび13匹のアユの体長 B_L のヒストグラムを示す．オイカワおよびカワムツは共に5〜8月に孵化するが，2年魚のために孵化年の異なる個体を選べば**図-1**のように系統的な体長のサンプルを得ることができる．一方，アユは年魚のため，ほぼ同一体長のサンプルしか

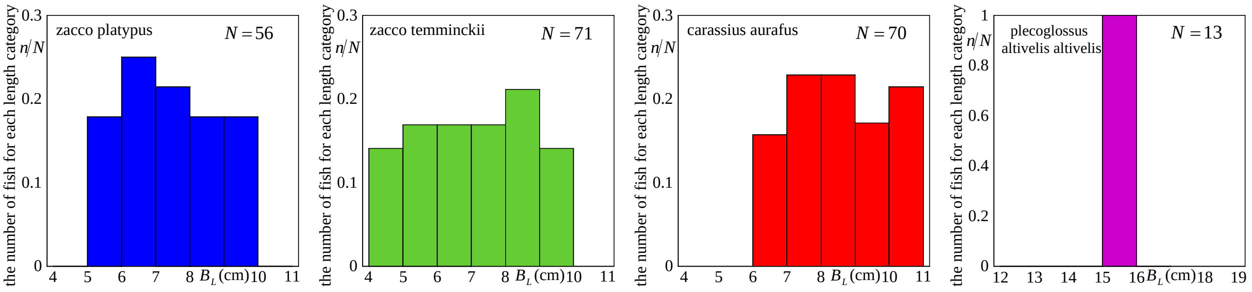

図-1　魚種別ヒストグラム

得ることができなかった．

魚の筋肉には血合筋と普通筋があり，突進速度に到達するには普通筋を使用する必要がある．ところが，普通筋は緊急時以外は使用しないため，魚に緊急事態が迫っていると認識させることが必要になる．魚も視覚，聴覚などを有している．そのため，突然照明を魚に浴びせる，水槽外で音を立てる，水槽に振動を与える，タモで追いかけるなどの方法を試みたが，いずれの方法も初めは効果があるもののすぐに学習し，間もなく効果がなくなった．そのため，電気ショックを用いた．静止中のアユは10Vではほとんど反応せず，20Vで忌避行動が見られ，30Vで瞬時の忌避行動をとり，40Vで痙攣を起こすとの報告がある[19]．しかし，予備実験を行った結果，20Vではほとんど忌避行動が見られず，いずれの魚も45Vで最も忌避行動が顕著になることが判明した．

全長1.5m，高さ0.3m，幅0.1mの水平なアクリル製水槽において，水温24℃のカルキ抜きした水道水を注ぎ，水深を0.2mにした．**図-1**に示した全ての魚を1匹ずつ水槽に入れ，45Vのパルス波を与えた．このとき，水路の側岸に設置した高速ビデオカメラで魚の軌跡を撮影した．録画速度はワキンが120フレーム/sで，その他の魚が240フレーム/sとした．画素数はワキンが720×240で，その他の魚が360×240である．撮影後に動画をコマ送りして魚の口の先端の軌跡をトレースし，遊泳速度を算出した．また，水槽の真上からの撮影も各魚で数匹ずつ行った．

４．実験結果および考察

(1)　遊泳開始直後の挙動

写真-2に水槽真上から撮影した遊泳開始直後の挙動を示す．B_L は体長である．いずれの魚も左右の尾を振った後に急に加速していることがわかる[20]．なお，今回用いた魚の遊泳型は全て，準アジ型であった．

(2)　魚の加速特性および定式化

図-2に体長別，魚種別に遊泳速度 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上下してい

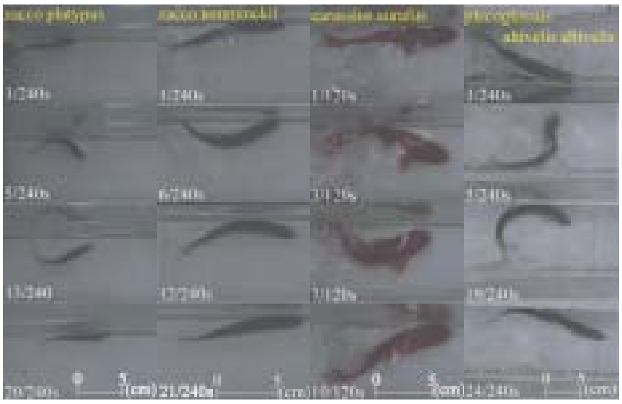

写真-2　遊泳開始直後の挙動

る．これは，**写真-2**に見られたように尾を左右に振っているので，それに伴い頭部の速度が上下しているからである．ただし，巨視的に見ると速度が急激に上昇し，その後，次第に速度変化が緩やかになり，ついには定常状態，すなわち，突進速度 B_s に達している様子が窺える．そこで，遊泳速度 V_f の変化を次式で表現する．

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

ここに，遊泳速度 V_f の単位はcm/sとし，t は遊泳開始からの時間で単位はsとし，α，β は係数である．当然，式(1)において時間 t を無限大にすれば，突進速度 B_s に漸近する．実測された遊泳速度 V_f に式(1)が最もフィットするように係数 α，β を算出し，**図-2**中に式(1)を示した．魚種および体長に関わらず，式(1)によって遊泳の挙動が再現されていると判断される．同様の解析を全てのデータに対して行い，得られた係数 α および β について，体長1cmごとの平均値を求めて**表-2**に示した．

(3)　魚の助走特性

近年，魚の遊泳状態をシミュレーションする試みも行われており[21),22]，速度だけでなく，それに到達するまでの時間(以下，助走時間と呼称する)や加速度を求めることは魚の遊泳シミュレーションの発達に貢献する．ところが，**図-2**に見られるように，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．また，式

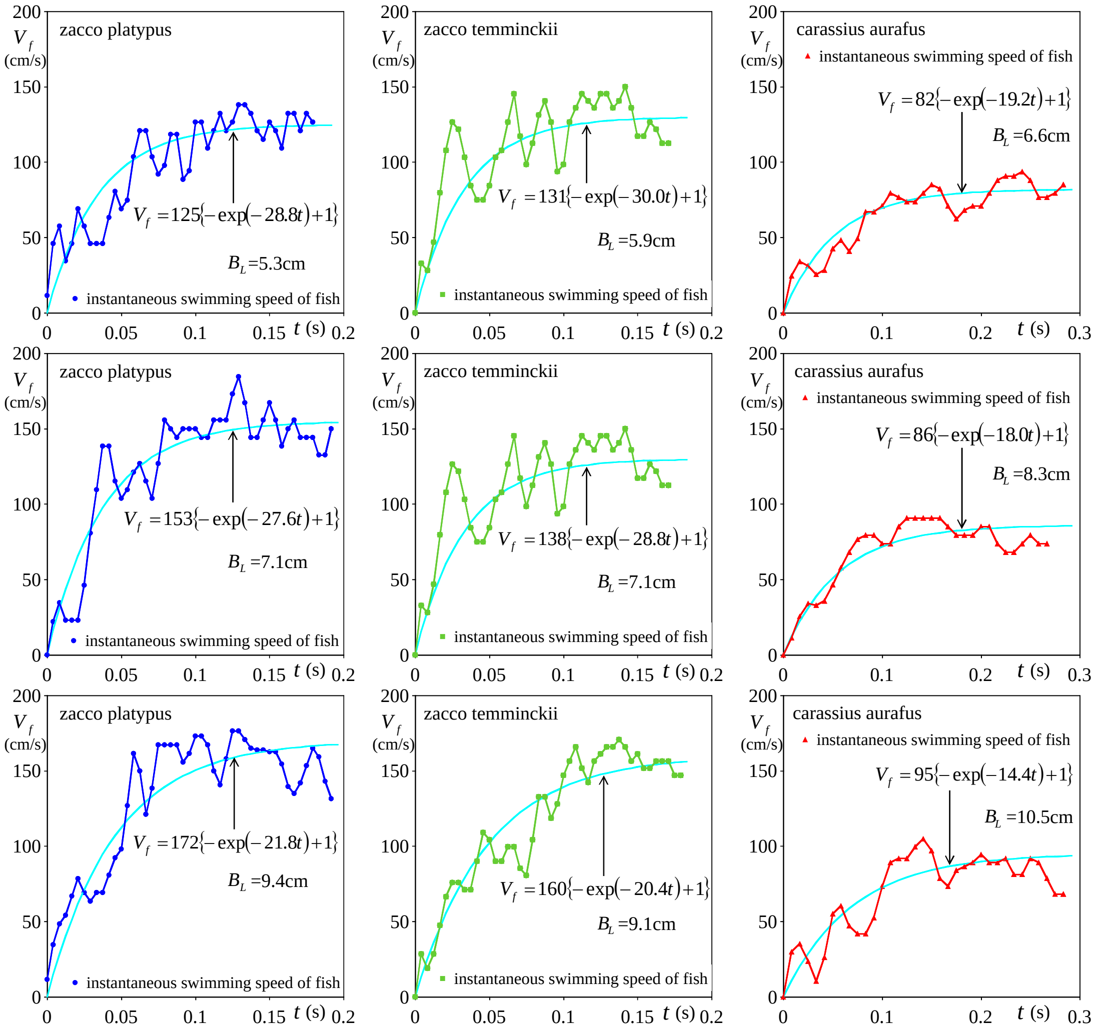

図-2　体長別，魚種別に示した遊泳速度の変化

表-2　魚種別の α，β の値

	オイカワ		カワムツ		ワキン		アユ	
	α	β	α	β	α	β	α	β
4~5cm	-	-	30.5	116.2	-	-	-	-
5~6 cm	24.4	126	29.4	131.8	-	-	-	-
6~7 cm	25.1	146.3	25.7	150	18.4	78.3	-	-
7~8 cm	26.4	146.5	26.3	148.9	17.7	82.8	-	-
8~9 cm	23.6	154.3	26.1	144	15.7	85.8	-	-
9~10 cm	22.5	159.4	19.4	148	13.4	88.3	-	-
10~11 cm	-	-	-	-	13.1	95.4	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
15~16cm	-	-	-	-	-	-	23.1	158.8

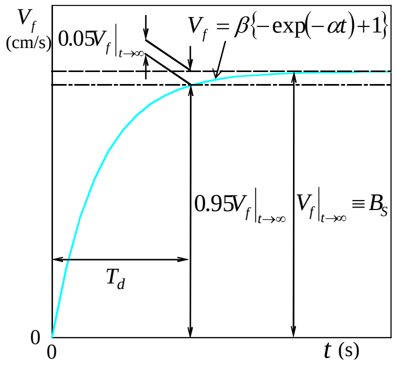

図-3　助走時間 T_d の説明図

(1)が突進速度に到達するのは数学的には無限大の時間となってしまう．そこで，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(**図-3**)．

a)　助走時間

助走時間 T_d は**表-2**を考慮して式(1)を積分すれば求めることできるが，**表-2**に示された各体長間の値が不明であり利便性が低いため，次のような解析を行った．**図-4**に各魚種の1cmごとに平均して求められた体長 B_L と助走時間 T_d の関係を片対数表示した．プロットの上下方向に伸びた線はデータのばらつきの範囲を示す．オイカワ，カワムツおよびワキンの助走時間 T_d は体長 B_L の増加に伴って増加する傾向にあり，その増加率はオイカワおよびカワムツよりもワキンの方が顕著となっている．しかし，データのばらつきが極めて広いため，体長 B_L と助走時間 T_d との関係を線形式で求める場合，得られる傾きと切片の精度は低い．特に計測された体長よりも

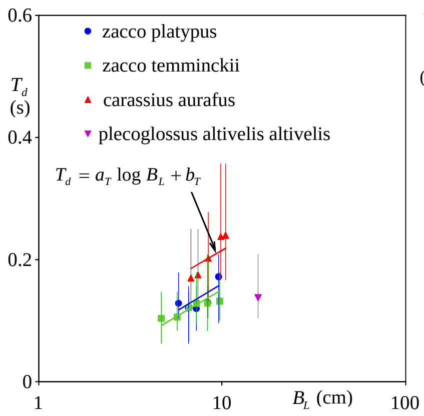

図-4　体長 B_L と助走時間 T_d の関係

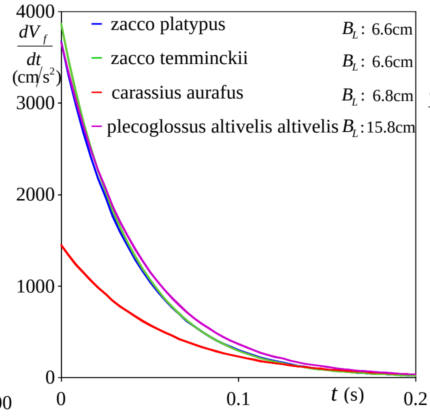

図-5　加速度の時間変化

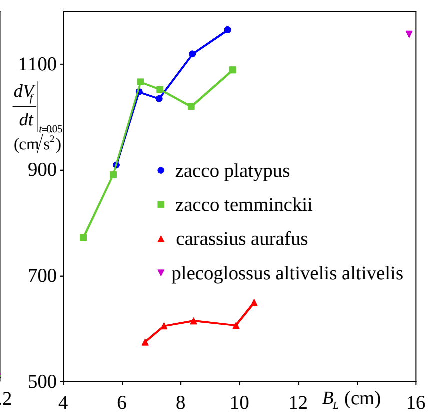

図-6　t=0.05sにおける体長と加速度の関係

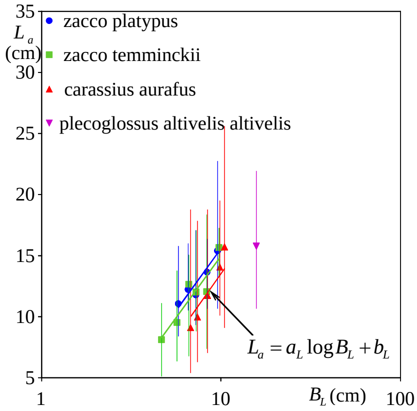

図-7　体長 B_L と助走距離 L_a の関係

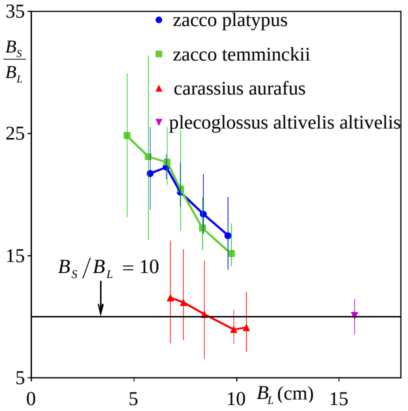

図-8　体長 B_L と突進速度 B_s/B_L との関係

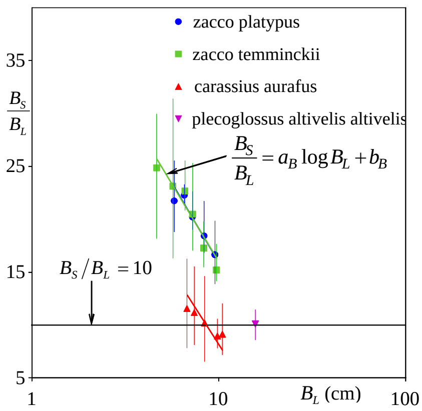

図-9　体長 B_L と突進速度 B_s/B_L の関係

小さい個体および大きい個体の助走時間を外挿で求める場合，精度は極めて低いと言わざるを得ない．そこで，今回は増加率が魚種によらず一定と仮定し次式より平均的な傾き a_T を得た．

$$T_d = a_T \log B_L + b_T \tag{2}$$

続いて，各魚種でそれぞれの切片 b_T を求めた．**図-4**中に式(2)を示し，**表-3**に得られた係数 a_T および b_T を示す．今後，実験ケースを増やし，再解析を行う必要がある．

b)　加速度

突進速度に達するまでの加速度 dV_f/dt は式(1)を微分することで得られる．

$$\frac{dV_f}{dt} = \alpha\beta \cdot \exp(-\alpha t) \tag{3}$$

式(3)から求められた加速度 dV_f/dt の時間変化の一例を**図-5**に示す．遊泳開始直後で最も加速度が大きく，その後，徐々に減少していることがわかる．ほぼ同様な体長のオイカワ，カワムツおよびワキンの結果を比較すると，ワキンの加速度が低いことがわかる．

図-6に t =0.05sにおける加速度 dV_f/dt の体長別変化を示す．体長が増加するほど加速度が増加していることが理解される．

c)　助走距離

魚が突進速度に到達するまでに必要な助走距離を求めることは魚道を設計する上で必要な情報である．久保田[23]は，階段式水路においてプール長を系統的に変化させて体長6～24cmの30尾のイワナをプールに放流し，遡上数を調べた結果，イワナが遊泳遡上するためには，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事に基づいた結果であり，魚の挙動の観察に基づいた結論ではない．さらに，周囲流の流速条件なども不明である．

表-3　遊泳特性に関する係数

	オイカワ	カワムツ	ワキン
a_T	0.1772	0.1772	0.1772
b_T	-0.014	-0.026	0.040
a_L	20.39	20.39	20.39
b_L	-4.773	-5.390	-6.899
a_B	-27.44	-27.44	-27.44
b_B	43.91	43.46	35.64

助走距離 L_a は遊泳を開始して突進速度 B_s の95%に達するまでに遊泳した距離と定義した．**図-7**に魚種別に助走距離 L_a と体長 B_L との関係を片対数表示した．かなりばらついているものの，平均値は体長に対して増加傾向にある．そこで，次式を用いて両者の関係を求めた．

$$L_a = a_L \log B_L + b_L \tag{4}$$

助走時間T_dに関する式(2)と同様に，今回は傾きa_Lを魚種によらず一定と仮定し，切片b_Lを求めた．**表-3**に得られた係数a_Lおよびb_Lを示す．同様な体長ではオイカワおよびカワムツではほぼ同様な助走距離で，ワキンは若干短い距離で突進速度に達することが理解される．ただし，ワキンの突進速度はオイカワおよびカワムツのものよりも低いことに留意されたい．

(4) 魚の突進速度

図-8に体長B_Lと突進速度B_sを体長B_Lで除した値との関係を魚種別に示した．オイカワ，カワムツおよびワキンについては，体長の増加に伴いB_s/B_Lの値が低下している．これは，既往の指摘[24]と一致する．また，一般に魚の突進速度は体長の10倍として知られているが，**図-7**よりオイカワおよびカワムツについてはそれより遙かに大きな値であることが明らかとなった．

図-9に魚種別に体長B_LとB_s/B_Lとの関係を片対数表に示した．オイカワおよびカワムツの突進速度はほぼ同様で，ワキンの突進速度が遅いことが理解される．また，これら3種の魚種とも体長B_Lの増加に伴い突進速度B_sが増加している．そこで，助走時間T_dおよび助走距離L_aと同様に，傾きa_Bが魚種によらず一定と仮定し，切片b_Bを求めることで次式より両者の関係を求めた．

$$\frac{B_s}{B_L} = a_B \log B_L + b_B \qquad (5)$$

表-3に得られた係数a_Bおよびb_Bを示す．式(5)より，オイカワ，カワムツおよびワキンの突進速度が解明されたが，これは特定の範囲の体長であり，しかも，静止流体なので，今後，体長をさらに広範囲にさせ，周囲流体の流速を変化させて突進速度を求めたい．

5．おわりに

本研究は，オイカワ，カワムツ，ワキンについて，静止流体中の突進速度および突進速度に至るまでの助走時間，遡上距離などをハイスピードカメラを用いて初めて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) 遊泳開始から突進速度に至るまでの遊泳速度の変化を記述するものとして，式(1)を提案した．

(2) オイカワおよびカワムツの突進速度については，一般論として言われている体長の10倍が成立せず，それよりも大きな値をとることを解明した．

(3) オイカワ，カワムツ，ワキンについて，体長の増加に伴う助走距離，助走時間および突進速度の変化を再現する式を，式(2)，(4)および(5)のように提案し，係数を**表-3**に示した．ただし，これらの結果は静止流体中のものである．有限の流速中では異なる結果が予備実験で得られているため，今後，有限流速中の突進速度を解明する必要がある．

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)17760408(代表：鬼束幸樹)の援助を受けた．魚の飼育方法を御教授いただいた(有)アクアシティの花田一氏，北九州市立水環境館，槻野川漁協および実験に御協力いただいた本学学部生の渡邉拓也氏，白石達郎氏に謝意を表す．

参考文献

1) Blaxter, J.H.S.: *FAO Conference on Fish Behaviour in Relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, pp.1-32, 1967.
2) Brett, J.R.: *Trans. R. Soc. Can.*, Vol.4, No.1, pp.441-457, 1963.
3) Brett, J.R.: *J. Fish. Res. Bd. Can.*, Vol.24, pp.1731-1741, 1967.
4) Blaxter, J.H.S. and Dickson, W.: *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.: *Fish Physiology*, Vol.7, pp.1-100, 1978.
7) Katopodis, C.: *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：日本水産学会誌，第41巻，第7号，pp.733-738，1975.
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) 小山長雄：にほんのかわ，No.24~27，1983.
11) 農業水利施設魚道整備検討委員会：農業水利施設の魚道整備の手引き，1994.
12) 国土交通省河川局：魚がのぼりやすい川づくりの手引き，2005.
13) 小山長雄：木曽三川河口資源調査団，1965.
14) Hosoya, K., Ashiwa, H., Watanabe, M., Mizuguchi, K. and Okazaki, T.: *Ichthyological Research*, Vol.50, No.1, pp.1-8, 2003.
15) 石田力三：アユその生態と釣り―アユのすべてがわかる本，つり人社，1988.
16) 小山長雄：アユの生態，中公新書，1978.
17) 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.
18) 関谷明，下村充，坂本裕嗣，甲田篤史，福井吉孝：水工学論文集，第46巻，pp.1133-1138，2002.
19) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚を取水施設に迷入させないための試み，2001.
20) Wardle, C.S.: *Nature*, Vol.255, pp.725-727, 1975.
21) 大橋弘道，清水康行：水工学論文集，第48巻，pp.1597-1602，2004.
22) 橋本麻未，後藤仁志，原田英治，酒井哲郎：水工学論文集，第49巻，pp.1477-1482，2005.
23) 久保田哲也：水工学論文集，第42巻，pp.487-492，1998.
24) 内外出版社：磯釣りスペシャル，2001年3月号，2001.

(2006.9.30受付)