

全長および流速がニホンウナギの突進速度に及ぼす影響

九州工業大学大学院 学生会員

○下江 海斗

九州工業大学大学院 正会員

鬼東 幸樹

1. はじめに

近年ウナギ属の突進速度に関する研究が開始された。ウナギ属の突進速度は全長 T_L で除した全長倍遊泳速度で表記されることが多く、流速 U_m も同様に全長倍流速で表記される。Russon & Kemp¹⁾は平均全長 661mm のヨーロッパウナギの全長倍突進速度を $2.63 \sim 3.21T_L/s$ 、矢田谷ら²⁾は平均全長 58mm のニホンウナギの全長倍突進速度を $6.2 \sim 9.7T_L/s$ と求めた。

上記のようにウナギ属の突進速度の研究は行われているものの、流速および全長ごとの値は未解明である。本研究では平均全長を 150~300mm, 最小全長倍流速を $0T_L/s$, 最大全長倍流速を $6 \sim 3T_L/s$ に変化させ、ニホンウナギの突進速度の定式化を試みた。以後ニホンウナギをウナギと呼称する。

2. 実験装置および実験条件

図-1 に示す長さ $L=1.50m$, 幅 $B=0.30m$, 高さ $H=0.20m$ の水路を用いた。水深を $h=0.05m$ に保持した。流下方向に x 軸, 横断方向に z 軸をとり, 水路始端から x 方向に $0.20m$ までの区間を upstream area と命名した。表-1 に実験条件を示す。平均全長 \bar{T}_L が $150 \pm 16, 200 \pm 13, 250 \pm 11, 300 \pm 19mm$ の 4 種類のウナギに対する全長倍流速 U_m/\bar{T}_L を 5 種類に変化させた合計 20 ケースの実験を行った。各全長 30 尾のウナギを用いた。全長倍流速 U_m/\bar{T}_L の最小値はすべての全長で $0(1/s)$ とし, 最大値は全長の短い順からそれぞれ 6, 5, 4, $3(1/s)$ とし, 両者間にほぼ均等な 3 種類の流速が発生するように設定した。

水路下流端から $0.30m$ 上流の水路中央に直径 $0.30m$ の円筒形金網を設置し, 1 尾のウナギを投入した。馴致を確認した後に金網を取り上げ, 水路上部に設置したビデオカメラで撮影を開始した。開始 10s 後に撮影を終了するが, 10s 以内であってもウナギが upstream area に到達した場合もしくは水路下流端から流出した時に場合はその時点を終了した。上記の実験を各ケースで 30 回, 合計 600 回行った。

撮影した動画を $0.05s$ 刻みで分割した画像を基に解析を行った。画像データ総数を N_{all} , upstream area に到達したウナギの画像データ数を N_r とした。対地速度と流速によって構成される遊泳速度 U_f を全長 T_L で除した値を全長倍遊泳速度 U_f/T_L とした。

3. 実験結果および考察

(1) ウナギの突進速度の推定

測定開始後のウナギの挙動を観察すると, upstream area に到達した個体, 水路内で 10s 以上遊泳を続けた個体, および水路下流端から落下した個体に大別された。3 形態の個体をそれぞれ, 「上流到達ウナギ(reaching upstream)」, 「水路中間遊泳ウナギ(swimming in open-channel)」, 「下流落下ウナギ(dropping from downstream)」と呼称する。各形態のウナギにおける全長倍遊泳速度 U_f/T_L の $1(1/s)$ 刻みごとの画像データ数を N_{ur} , N_{us} , N_{ud} とし, それぞれ画像データ総数 N_{all} で除した全長倍遊泳速度 U_f/T_L の頻度 N_{ur}/N_{all} , N_{us}/N_{all} , N_{ud}/N_{all} の一例(TL150-U6)を図-2 に示した。水路中間遊泳ウナギおよび下流落下ウナギは全長倍遊泳速度 U_f/T_L が $5 \sim 6(1/s)$ 付近で最頻値を示すのに対し, 上流到達ウナギは全長倍遊泳速度 U_f/T_L が $8 \sim 9(1/s)$ 付近で最頻値を示している。上流到達ウナギの全長倍遊泳速度 U_f/T_L が全長倍突進速度 U_B/T_L と見なせるか否かを検証するため, 有意水準を両側確率 5% に設定し, 一元配置分散分析(ANOVA)を行った。その結果は $p=1.14 \times 10^{-6} < 0.05$ であり, 各形態のウナギの全長倍遊泳速度 U_f/T_L の差は統計的に有意であった。以上のことから, 上流到達ウナギの遊泳速度を突進速度と見なすことができると判断した。

(2) ウナギの突進速度

全長倍突進速度 U_B/T_L の $1(1/s)$ 刻みごとの画像データ数を N_b とし, 画像データ数 N_r で除した値を全長倍突進速度 U_B/T_L の頻度 N_b/N_r とした。図-3(a)~(d)に全長倍突進速度 U_B/T_L の頻度 N_b/N_r を全長倍流速 U_m/\bar{T}_L および平均全長 \bar{T}_L 別に示す。すべての平均全長 \bar{T}_L において, 全長倍突進速度 U_B/T_L のピーク値は全長倍流速 U_m/\bar{T}_L の増加に伴い増加している。一方, 同一の全長倍流速 U_m/\bar{T}_L において, 全長倍突進速度 U_B/T_L は平均全長 \bar{T}_L の増加に伴い減少している。また, 式(1)のガンマ分布を採用し, 図-3(a)~(d)中に曲線で示す。係数 α , λ は最小二乗法より算出した。

$$f(U_B/T_L) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \alpha^\lambda (U_B/T_L)^{\lambda-1} e^{-\alpha U_B/T_L} \quad ; \quad \Gamma(\lambda) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\lambda-1} dx \quad (1)$$

(3) ウナギの突進速度の定式化

Barbin & Krueger³⁾は平均全長 $56 \pm 32mm$ のアメリカウナギの遊泳挙動を観察し, 全長倍流速 U_m/\bar{T}_L と全長倍遊泳速度 U_f/\bar{T}_L との関係式(2)を提案した。

$$U_f/T_L = 1.03 U_m/\bar{T}_L + 0.15 (2.1 \leq U_m/\bar{T}_L \leq 7.5, \bar{T}_L = 56 \pm 32mm) \quad (2)$$

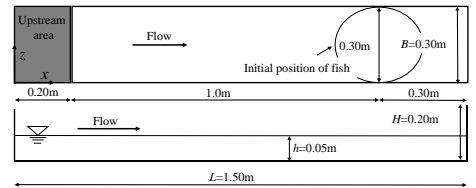


図-1 実験水路

表-1 実験条件

		Total length of <i>Anguilla japonica</i> \bar{T}_L (mm)			
		150	200	250	300
U_m/\bar{T}_L (1/s)	0	TL150-U0	TL200-U0	TL250-U0	TL300-U0
	0.5	-	-	-	TL300-U0.5
	1	TL150-U1	TL200-U1	TL250-U1	TL300-U1
	2	TL150-U2	TL200-U2	TL250-U2	TL300-U2
	3	-	TL200-U3	TL250-U3	TL300-U3
	4	TL150-U4	-	TL250-U4	-
	5	-	TL200-U5	-	-
6	TL150-U6	-	-	-	

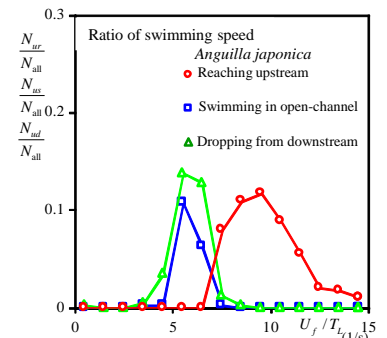


図-2 ウナギの遊泳速度の頻度分布

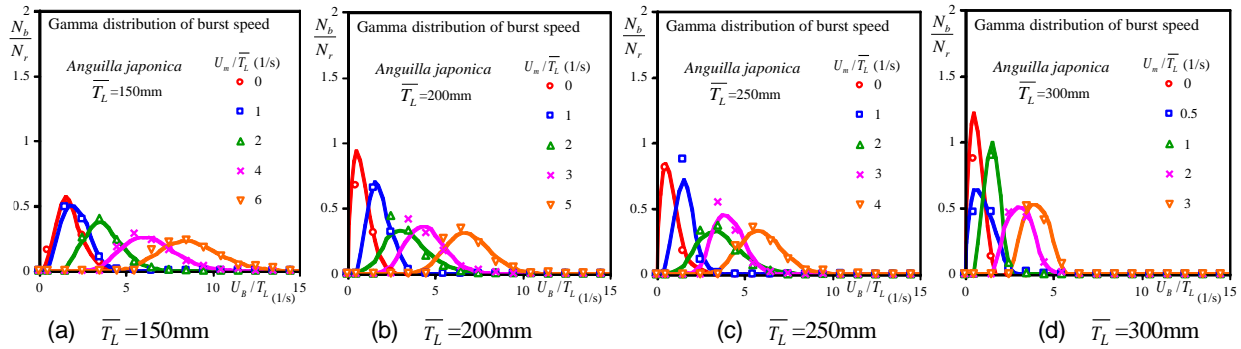


図-3 ウナギの突進速度のガンマ分布

本研究では全長倍流速 U_m/\bar{T}_L と全長倍突進速度の最頻値 \hat{U}_B/\hat{T}_L との関係式(3)を提案する. 傾き a_2 および切片 b_2 はそれぞれ最小二乗法より算出した.

$$\hat{U}_B/\hat{T}_L = a_2 \times U_m/\bar{T}_L + b_2 \quad (3)$$

各平均全長 \bar{T}_L における全長倍流速 U_m/\bar{T}_L と全長倍突進速度の最頻値 \hat{U}_B/\hat{T}_L との関係式(4a)~(4d)を示す.

$$\hat{U}_B/\hat{T}_L = 1.06U_m/\bar{T}_L + 0.42 \quad (\bar{T}_L = 150 \pm 16\text{mm}) \quad (4a)$$

$$\hat{U}_B/\hat{T}_L = 1.03U_m/\bar{T}_L + 0.87 \quad (\bar{T}_L = 200 \pm 13\text{mm}) \quad (4b)$$

$$\hat{U}_B/\hat{T}_L = 1.09U_m/\bar{T}_L + 0.06 \quad (\bar{T}_L = 250 \pm 11\text{mm}) \quad (4c)$$

$$\hat{U}_B/\hat{T}_L = 0.94U_m/\bar{T}_L + 0.30 \quad (\bar{T}_L = 300 \pm 19\text{mm}) \quad (4d)$$

矢田谷ら²⁾の研究から得られた全長倍流速 U_m/\bar{T}_L と全長倍遊泳速度 U_f/\bar{T}_L との関係式(5)を示す.

$$U_f/\bar{T}_L = 0.73U_m/\bar{T}_L + 3.01 \quad (\bar{T}_L = 58 \pm 2\text{mm}) \quad (5)$$

図-4 に本実験で得られた全長倍流速 U_m/\bar{T}_L と全長倍突進速度の最頻値 \hat{U}_B/\hat{T}_L との関係性を平均全長 \bar{T}_L 別に, 既往の研究^{2,3)}から得られた全長倍流速 U_m/\bar{T}_L および全長倍遊泳速度 U_f/\bar{T}_L の実験値をプロットで示すと共に, 式(2), (4a)~(4d) および(5)を示す. 本実験におけるすべての平均全長 \bar{T}_L において, 全長倍突進速度の最頻値 \hat{U}_B/\hat{T}_L は全長倍流速 U_m/\bar{T}_L の増加に伴い増加傾向を示している. これは既往の研究結果^{2,3)}に類似している. また, 同一の全長倍流速 U_m/\bar{T}_L において, 平均全長 \bar{T}_L の増加に伴い全長倍突進速度の最頻値 \hat{U}_B/\hat{T}_L は多少の減少傾向を示す. 傾き a_2 および切片 b_2 は平均全長 \bar{T}_L によって異なる値を有するため, 平均全長 \bar{T}_L と傾き a_2 および切片 b_2 との関係式(6a), (6b)を示す.

$$a_2 = -0.30 \times 10^{-3} \bar{T}_L + 1.11 \quad (150 \leq \bar{T}_L \leq 300\text{mm}) \quad (6a)$$

$$b_2 = -0.18 \times 10^{-2} \bar{T}_L - 0.41 \quad (150 \leq \bar{T}_L \leq 300\text{mm}) \quad (6b)$$

図-5 に本実験, 既往の研究^{2,3)}から得られた平均全長 \bar{T}_L と傾き a_2 および切片 b_2 との関係性をプロットで示すと共に, 式(6a), (6b)を示す. 本実験における傾き a_2 および切片 b_2 は平均全長 \bar{T}_L の増加に伴い減少傾向にある. また, 平均全長 \bar{T}_L が 58~300mm のウナギの傾き a_2 および切片 b_2 に着目すると, 傾き a_2 は平均全長 \bar{T}_L が 58~150mm の増加に伴い増加傾向にあり, 平均全長 \bar{T}_L が 150~300mm の増加に伴い減少傾向にある. 切片 b_2 は平均全長 \bar{T}_L の増加に伴い減少傾向を示している. 傾き a_2 が大きい場合, 遊泳力が大きいと判断されるため, ウナギの遊泳力は平均全長 \bar{T}_L が 58~150mm に増加すると大きくなり, 平均全長 \bar{T}_L が 150~300mm に増加するにつれ小さくなること示唆される. 魚種間の比較として, 平均全長 \bar{T}_L が 58mm のウナギおよび平均全長 \bar{T}_L が 56mm のアメリカウナギの傾き a_2 および切片 b_2 に着目する. 傾き a_2 は平均全長 \bar{T}_L が 56mm のアメリカウナギが平均全長 \bar{T}_L が 58mm のウナギよりも大きく, 切片 b_2 は平均全長 \bar{T}_L が 58mm のウナギが平均全長 \bar{T}_L が 56mm のアメリカウナギよりも大きい. したがって, 平均全長 \bar{T}_L が 56mm のアメリカウナギについては同全長のウナギと比較して遊泳力が大きい可能性がある.

4. おわりに

本研究では平均全長を 150~300mm, 最小全長倍流速を $0T_L/s$, 最大全長倍流速を $6\sim 3T_L/s$ に変化させ, ニホンウナギの突進速度の定式化を試みた. 得られた知見を以下に示す.

- (1) ニホンウナギの全長倍突進速度は全長倍流速の増加に伴い増加傾向にある. これは既往の研究結果^{2,3)}に類似している. また, ニホンウナギの全長倍突進速度は平均全長の増加に伴い減少傾向にある.
- (2) 平均全長 \bar{T}_L (mm) を与えることで傾きおよび切片を求め, それらの値と全長倍流速とを代入することでニホンウナギの全長倍突進速度の算出が可能となる式(3), (6a)および(6b)を提案した.

謝辞: 本研究で用いた実験魚を無償提供していただいた株式会社丸翔に謝意を表す.

参考文献

- 1) Russon & Kemp: *J. Fish Biol.*, Vol.78, No.7, pp.1965-1975, 2011.
- 2) 矢田谷ら: 土木学会論文集 G(環境), Vol.76, No.6, pp.II_109-II_114, 2020.
- 3) Barbin & Krueger: *J. Fish Biol.*, Vol.45, No.1, pp.111-121, 1994.

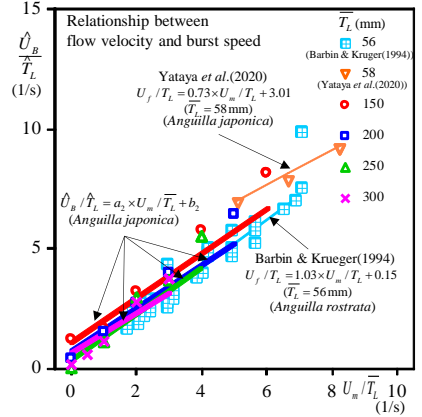


図-4 全長倍流速と突進速度との関係

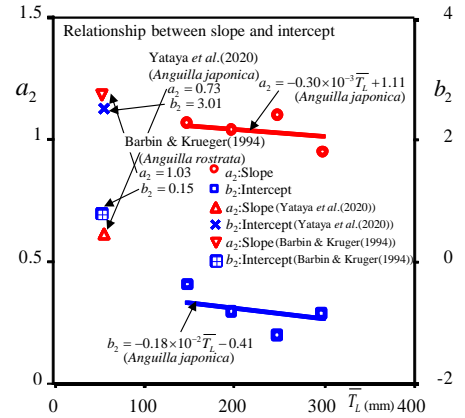


図-5 全長と傾きおよび切片との関係