

魚類の行動・形態が遊泳能に及ぼす影響

澄川 太皓

博士(工学)

岩手大学

理工学研究科

システム創成工学専攻

令和5年度

(2023)

目次

第1章 序論.....	4
1-1 魚類の遊泳・形態と遊泳能の関係.....	4
1-2 魚類におけるバイオメカニクス.....	5
1-3 軟骨魚類におけるバイオメカニクス.....	6
1-4 本論文の目的と構成.....	7
第2章 ギンガメアジのタンデム遊泳と流体力特性の関係.....	8
2-1 背景と目的.....	8
2-2 方法.....	10
2-2-1 解析モデル.....	11
2-2-2 流体解析.....	13
2-3 結果.....	18
2-4 考察.....	23
2-4-1 抗力低減効果と相対距離の関係.....	23
2-4-2 リミテーション.....	25
2-4-3 生態学的な重要性と流体力学への貢献.....	26
第3章 サメ類の形態・泳動作と流体力特性の関係.....	27
3-1 背景と目的.....	27
3-2 方法.....	29
3-2-1 解析モデル.....	29
3-2-2 解析モーション.....	32
3-2-3 流体解析.....	33
3-3 結果.....	38
3-3-1 2つのアスペクト比と流体力特性の関係.....	38
3-3-2 モデル周辺の渦度とQ値の分布.....	42
3-4 考察.....	45
3-4-1 尾鰭形態によって推力が異なるメカニズム.....	45
3-4-2 流体力学的特性と生息域の関係.....	46
3-4-3 リミテーション.....	47
3-4-4 生態学的な重要性と水中ロボットへの応用.....	49
第4章 エイ類の泳動作と流体力学特性の関係.....	50
4-1 背景と目的.....	50
4-2 方法.....	52
4-2-1 解析モデル.....	53
4-2-3 流体解析.....	57

4-3 結果.....	60
4-3-1 モデル表面に作用する力.....	60
4-3-2 渦構造と推進効率.....	63
4-4 考察.....	66
4-4-1 左右の胸鰭動作の位相差が遊泳能に及ぼす影響.....	66
4-4-2 位相差があることによって作用する力が変化するメカニズム.....	67
第5章 総合考察.....	68
5-1 本研究で得た成果のまとめ.....	68
5-2 今後の展望.....	70
付録.....	71
付録1 Blender を用いた解析モデルの作成.....	71
付録2 pimpleFoam の妥当性の検証.....	74
付録3 overPimpleDyMFoam の妥当性の検証.....	78
業績リスト.....	82
謝辞.....	85
引用文献.....	86
要旨.....	95

第1章 序論

1-1 魚類の遊泳・形態と遊泳能の関係

魚類の遊泳方法は BCF(Body and caudal fin)法と MPF(Median and pectoral fin)法に大別される(Breder 1926). 前者はマグロなどのように胴体と尾鰭を前方から後方へうねらせる泳法であり, 後者はフグやエイのように, 胸鰭や尻鰭, 背鰭などを主推進器官とする泳法である. BCF, MPF 法の両方において推力・揚力生成メカニズムが研究されており, 後方に生成された逆カルマン渦列によってできるジェット流の反作用や, 負荷質量, 胸鰭や尾鰭の前縁に形成される前縁渦などが推力や揚力を生成している事が明らかにされている(Tytell et al. 2008; Borazjani and Daghooghi 2013; Fish et al. 2016; Huang et al. 2020; Thekkethil et al. 2020; Su et al. 2021).

形態に関しても研究では, 魚類の形態は抵抗が少なくなるような流線形をしており, 遊泳モーションにあわせて遊泳速度と移動コストが最適になるような胴体形状をしている(Tokić and Yue 2012). BCF 法の主推進器官である尾鰭の形態は, 三日月型は推進効率が高く遊泳性の高い魚類に多く, 円形は推力生成に優れており加速力が高い魚類に多く見られることが明らかにされている(Webb 1984; Chang et al. 2012). また, MPF 法の主推進器官である胸鰭の形態は, エイの場合, 底生種はアスペクト比が低く, 外洋性種はアスペクト比が高いことが明らかにされている(Rosenberger 2001).

魚類の行動や形態の違いによる流体力特性の違いの原因を調べるためには, 流体力特性の計測や渦などの周囲流体の挙動を可視化することが重要である(Russo et al. 2015). そのため, 近年, 魚類の遊泳メカニズムを解明するために, 流体解析や風洞実験, PIV などを用いた多くの研究が行われている(Borazjani et al. 2012; Witt et al. 2015; Payne et al. 2016; Wang et al. 2020; Zhang et al. 2020).

1-2 魚類におけるバイオメカニクス

魚類にとって遊泳は捕食を回避し、採餌や繁殖を行うために不可欠な行動である (Langerhans et al. 2004). そのため進化の過程で魚類はその形態と行動を局在化させ、加速力や持久力など特定の能力に秀でた形態・行動を獲得してきた (Langerhans et al. 2004; Langerhans 2009; Ingley et al. 2016; Payne et al. 2016; Moran et al. 2018; Caiger et al. 2021; Downie et al. 2021; Freudiger et al. 2021). 従来、遊泳の進化機構や生態の研究では形態のみから行動や遊泳能が推察されることが多かった。しかし、近年、力学的な視点を取り入れて、行動や遊泳能と生態との関係を明らかにしようとする研究が展開されている。そのような例としてヒラシユモクザメの遊泳行動の研究があげられる。ヒラシユモクザメは 90% もの時間を体を体軸周りに 50~75° 傾けて遊泳を行うことが観察されている。Payne らは風洞解析を用いて体を傾けた場合と傾けない場合で移動コストがどのように変化するかを調べ、体を傾けた場合の方が移動コストが約 10%削減されることを明らかにしている (Payne et al. 2016).

魚類は高速旋回や高速遊泳といった既存の水中ロボットよりも優れた遊泳能を持っている (Moored et al. 2011). また、魚類は深海にも生息しており、大きな水圧下においても圧力容器などがなくとも問題なく遊泳することが可能である (Li et al. 2021a, 2023). そのため、魚類の遊泳メカニズムの解明は水中ロボットなどの工学応用の観点からも注目されている。

このように生態学と工学の両方の観点から魚類の行動・形態のバイオメカニクスを解明することは重要である。

1-3 軟骨魚類におけるバイオメカニクス

魚類の中でもサメやエイなどの軟骨魚類は脊椎動物の中で最も古い系統の一つであり、脊椎動物の進化の過程を理解するうえで系統的に重要な位置にいる動物群である(Stein et al. 2018). 軟骨魚類は、淡水、沿岸から遠洋、深海まで、ほとんどの生息域において高次捕食者である(Compagno 1990). このように軟骨魚類が繁栄してきた理由の一つは、その運動器官の多様性にあると考えられている(Lauder and Di Santo 2015). 例えば、サメはBCF法で泳ぐのに対し、エイは胸鰭を用いたMPF法で遊泳を行う。サメの形態もノコギリザメやシュモクザメなどをはじめとして多様であり、エイの形態も胸鰭形態が円形に近いものから、菱形に近いものまで多様である(Lauder and Di Santo 2015). したがって軟骨魚類は泳法や形態、生息域が多様であることから生態と行動・形態との関係を調べるうえでは理想的なグループであると考えられる。また、軟骨魚類のほとんどは硬骨魚類と異なり浮袋を有していないため、負の浮力を持っている(Payne et al. 2016). さらに、軟骨は硬骨よりも軽いいため、軟骨魚類は少ないエネルギーで長距離を泳ぐ事ができるといわれている(Ocean 2014). このため軟骨魚類に求められる遊泳能は硬骨魚類のものとは異なると予想される。しかし、絶滅危惧種や体長が大きいものが多く、動物実験を行うことが困難であることなどから軟骨魚類の遊泳能に関する研究は硬骨魚類などに比べて進んでいないのが現状である。特に軟骨魚類の遊泳時のエネルギーに関する研究は少なく、行動や形態の異なる様々な種を網羅的に調べる事が重要であると指摘されている(Lauder and Di Santo 2015).

1-4 本論文の目的と構成

以上のような背景を踏まえ、本博士論文では、軟骨魚類の行動・形態が流体力特性に及ぼす影響について流体解析を用いて形態や行動のバイオメカニクスを解明する。本論文では行動が流体力特性に及ぼす例としてギンガメアジとジンベエザメの併泳とエイの遊泳を対象とし、形態が流体力特性に及ぼす例としてサメの尾鰭形態とエイの胸鰭形態を対象とした。

本論文は本章および他 4 章からなる。第 2 章ではギンガメアジとジンベエザメのタンデム遊泳に着目し、ジンベエザメとのタンデム遊泳がギンガメアジの移動コストに与える影響について調べた。第 3 章はサメの尾鰭形態の違いが流体力特性に及ぼす影響について調べた。第 4 章ではエイの遊泳時の左右の胸鰭動作の位相差が流体力特性に与える影響について調べた。第 5 章では総合考察として、第 2, 3, 4 章で得られた成果をまとめ、硬骨魚類との違いについても議論する。

第2章 ギンガメアジのタンデム遊泳と流体力特性の関係

2-1 背景と目的

序論で述べたように生態と形態や行動には関係があり、形態の機能や遊泳行動に関する研究が数多く行われてきた(Tytell et al. 2008; Borazjani and Daghooghi 2013; Farina and Summers 2015; Fish et al. 2016; Huang et al. 2020; Thekkethil et al. 2020; Su et al. 2021). 群泳や数匹での遊泳に関する研究はそのような研究テーマの一つである.

二匹の魚類が併泳することの効果を観察した研究では、前方の個体は移動コストが高いが、後方の個体よりも早く餌を発見できるというトレードオフの関係があることが報告されている(Marras et al. 2015). また、数値流体解析を用いた研究では、二匹以上で泳ぐことにより、移動コストの削減が可能であることが明らかにされている(Weihs 2004; Khalid et al. 2016; Verma et al. 2018; Chao et al. 2019). これはタンデム遊泳を行うことにより二個体間の渦構造や圧力分布が変化するためである(Zhang and Zheng 2009). 移動コスト以外にも、後方の個体が前方の個体によって変化した渦構造や圧力差を感知することで、水中が濁っていたり夜間であったりしても前方の個体の位置を把握することが可能であると考えられている(Zhang and Zheng 2009). 従来のタンデム遊泳における研究では、個体間の位置関係が重要であることが示されている(Weihs 2004; Zhang and Zheng 2009; Khalid et al. 2016; Chao et al. 2019). しかし、大きさが異なる魚類同士のタンデム遊泳に関する研究は我々が調べた限りない.

ブリモドキ(*Naucrates ductor*)はパイロットフィッシュという英名がつくほど、大型魚類の前方を泳ぐことが知られている(Fontes et al. 2023). ブリモドキが大型魚類の前方を泳ぐ理由は敵から身を守るためや餌のおこぼれをもらうためであると考えられている. さらに輸送コストも小さくなるだろうと予想されている(Fontes et al. 2023).

株式会社海遊館ではギンガメアジ(*Caranx sexfasciatus*)が、約 20 倍の体長があるジンベエザメ(*Rhincodon typus*)の前方を遊泳することが観察されている. しかしながら、体長差

があるタンデム遊泳において流体力学的効果を調べた研究は我々が調べた限りはなく、大型魚類の前方を遊泳することで小型魚類がどのような恩恵を受けているのか/受けていないのかは不明である。そこでギンガメアジがジンベエザメの前方を遊泳することで、単独で遊泳をするときよりもエネルギーを抑えて泳ぐことができるという仮説を立てた。また、前方を泳ぐ小型魚類と後方を泳ぐ大型魚類の距離によって得られる効果は異なるだろうと予想した。

2-2 方法

本研究では小型のギンガメアジが大型のジンベエザメの前方を泳ぐことで流体力学的な恩恵を受けているのか/いないのかを明らかにするため、ギンガメアジとジンベエザメの前後方向の位置関係がギンガメアジの流体力特性に及ぼす影響について数値流体解析を用いて調べ、ギンガメアジの単独遊泳の結果と比較した。

2-2-1 解析モデル

魚類の遊泳解析に用いられる 3D モデルは、3D スキャンを用いて構築されることが多い(Van Wassenbergh et al. 2015; Tanaka et al. 2019)。しかし、ジンベエザメは非常に大きいため、その身体形状をスキャンすることは困難である。そこで本研究では、図 1 に示すように、Blender2.79 を用いて写真からできるだけ正確に魚類モデルを構築した(Blender Foundation 2023)。Blender はオープンソースの 3D モデル作成ソフトであり、映画などでリアルなキャラクターを作成する際などに使用されている。Blender を用いたモデルの構築に関する詳細な情報は付録 1 で説明する。この方法の問題点は、モデルが 3D スキャナーで作成されたモデルに比べて実物に忠実な形態になっていないことである。しかし、身体形状を長方形やラグビーボール形状に単純化した併泳の研究もおこなわれており、本研究で使用するモデルは単純化したモデルに比べると実物に近いものとなっている(Weihs 2004; Khalid et al. 2016; Verma et al. 2018; Chao et al. 2019)。

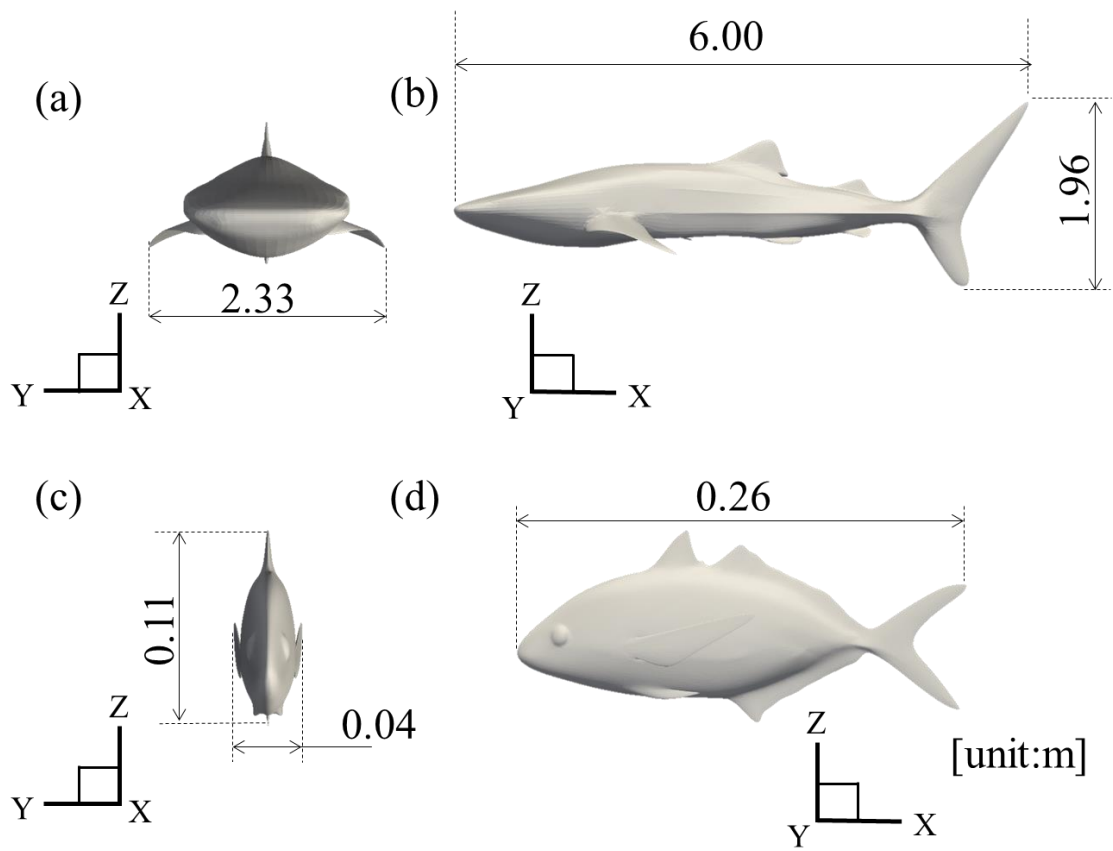


図1 解析対象のモデルと寸法

(a) 正面からみたジンベエザメモデル, (b)側面からみたジンベエザメモデル, (c)正面から見たギンガメアジモデル(d)側面から見たギンガメアジモデル.

2-2-2 流体解析

ギンガメアジとジンベエザメの3Dモデルを用いて流体解析を行い、ギンガメアジに作用する抗力を求めた。図2に示すように、ギンガメアジとジンベエザメの間の距離を R_d とし、 R_d が 0.04m (Case 1), 0.10m (Case 2), 0.23m (case 3), 0.36m (case 4) の解析を行った。0.10m から 0.36m (case 2 から Case 4) までの R_d の増加量はギンガメアジの体長の半分とした。また、ジンベエザメの鼻先付近での影響を詳細に調べるために、 R_d が 0.04m の条件 (Case 1) での解析を追加で行った。さらに単独遊泳の場合と比較を行うために、ギンガメアジ単体の条件 (Case 0) での解析も行った。なお、本解析では簡単のため泳動作を考慮せず、ギンガメアジ、ジンベエザメともに泳動作のない解析を行った。支配方程式は下記に示す連続の式と3次元非圧縮レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) + \nabla \cdot \left[\nu \left\{ (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right\} \right], \quad (2)$$

ここで \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 p は圧力、 ρ は密度、 ν は動粘度、 \mathbf{I} は単位テンソルである。

また、レイノルズ数を下記の式のように計算した。

$$Re = \frac{UL}{\nu}, \quad (3)$$

ここで $U(\text{ms}^{-1})$ は一様流速、 $L(\text{m})$ は魚類(ギンガメアジとジンベエザメ)の体長、 ν は 20°C における水の動粘度 ($1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2\text{s}^{-1}$) である。レイノルズ数はギンガメアジの体長を $L(\text{m})$ とすると 284,860、ジンベエザメの体長を $L(\text{m})$ とすると、6,573,705 であり、これを考慮して k-omega shear stress turbulence model (k-omega SST) を用いた (OpenCFD Ltd 2022a)。K-omega SST はレイノルズ平均モデルの一種であり、魚類の遊泳の研究で広く使用されている (Chang et al. 2012; Riedeberger and Rist 2012; Li et al. 2017; Chao et al. 2019; Macias et al. 2020)。OpenFOAM での k-omega SST モデルは Menter らの手法に基づいている (Menter et al. 2003)。ギンガメアジとジンベエザメの平均無次元距離 y^+ は、それぞれ 8 と 180 であ

る。壁関数モデルは OpenFOAM の `omegaWallFunction` と `KqRWallFunction` を使用した。これらの壁関数モデルでは粘性サブレイヤーと慣性サブレイヤーの交点の y^+ を推定し、その y^+ よりも小さいか大きいかで散逸率を求めるモデル式を切り替えている (Menter et al. 2003; OpenCFD Ltd 2022b)。シミュレーション中のタイムステップはクーラン数が 0.2 となるように調整した。解析領域は長さ $60L$ (L はギンガメアジの長さ 0.26m)、高さ $25L$ 、幅 $16L$ とした (図 3)。OpenFOAM の `snappyHexMesh` を用いてヘキサメッシュを生成した。解析対象の周囲には 5 層の境界層メッシュを作成した。最小メッシュの体積は $5.6 \times 10^{-11} \text{m}^3$ 、最大メッシュの体積は 0.084m^3 であり、メッシュ総数は 8.6×10^5 である。格子依存度を調べるために、medium, fine, dense の 3 種類のメッシュで解析を行い、抗力係数を比較した。それぞれのメッシュ数は、medium メッシュは 5.1×10^5 、fine メッシュは 8.6×10^5 、dense メッシュは 1.4×10^6 である。図 4 に示すように、dense メッシュと fine メッシュの抗力係数の差は 5.68% であった。解析時間と精度を考慮してすべての解析ケースで fine メッシュを用いた。入口境界にはジンベエザメの実際の巡航速度である 1.1ms^{-1} で流入流速を与えた (Motta et al. 2010)。出口境界には平均相対圧力が 0Pa を適用した。ギンガメアジとジンベエザメのモデル表面は滑りなし壁面とし、すべての解析ケースで同じ境界条件を用いた。

抗力係数 C_D は下記の式で求めた。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S}, \quad (4)$$

ここで D は流体解析により求めた抗力、 S はギンガメアジの x 軸方向の投影面積、 ρ は 20°C の水の密度 (998kgm^{-3}) である。抗力は OpenFOAM のサンプリングユーティリティである `sampleDict` によって別々に出力された摩擦抗力と圧力抗力から計算された。本解析手法の妥当性を評価するため、静止した NACA0012 の CFD 解析を行い、Ohtake らの NACA0012 に作用する抗力の測定実験と比較を行った (Tomohisa et al. 2007)。本研究で使用した 284,860 および 6,573,705 の Re 数付近では、それぞれ 7.3% と 8.0% の差があった。検証に用いたメッシュ、解析領域の大きさ、流速などの詳細な情報は付録 2 に記載する。

ジンベエザメとギンガメアジの相対的な距離と抗力の関係を定量的に評価するために、抗力低減比 η_D を次式で定義する。

$$\eta_{D,R_d} = \left(\frac{C_{D,single} - C_{D,R_d}}{C_{D,single}} \right) \times 100 \quad (R_d = 0.04, 0.10, 0.23, 0.46), \quad (5)$$

ここで、 $C_{D,single}$ はギンガメアジが単独で遊泳した場合の抗力係数、 C_{D,R_d} はジンベエザメと併泳した場合にギンガメアジにかかる抗力係数である。

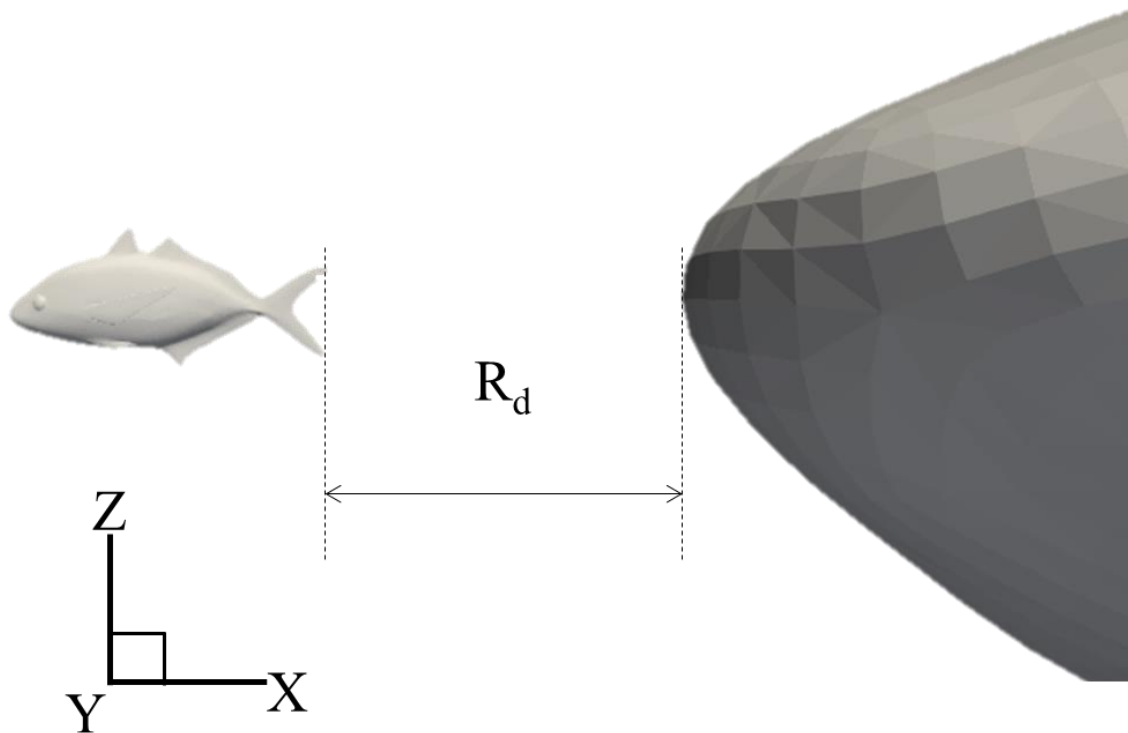


図2 ギンガメアジとジンベエザメの相対距離(R_d)

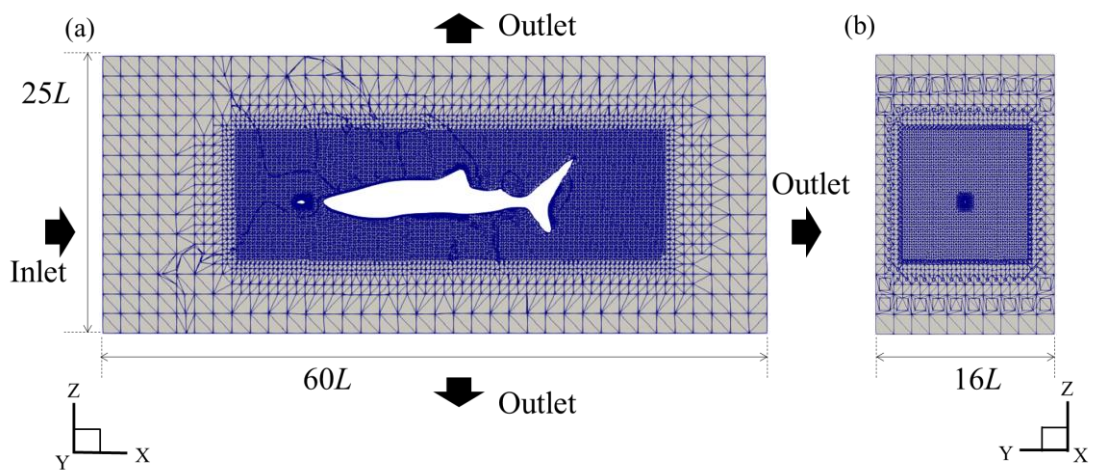


図3 流体解析に用いたメッシュ

(a) 流体領域全体の矢状面のメッシュ. (b) ギンガメアジの体中央部における流体領域の正面断面.

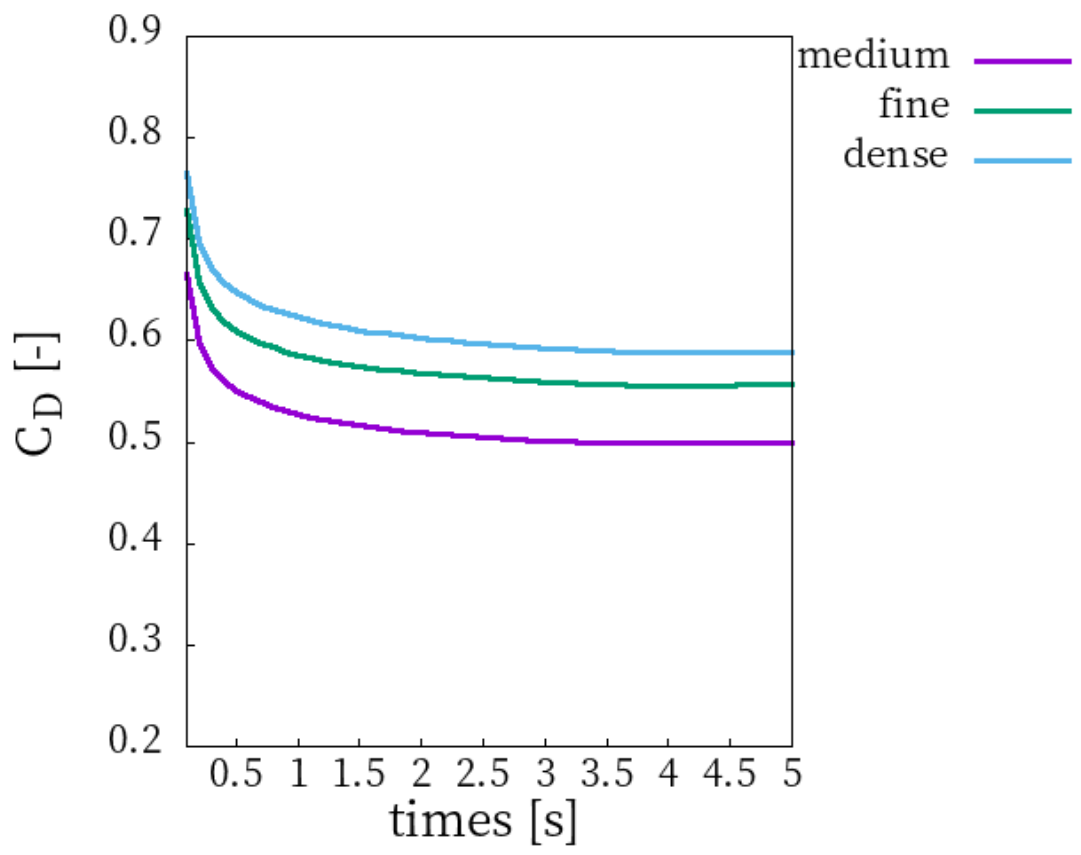


図4 ギンガメアジの抗力係数の medium メッシュ, fine メッシュ, dense メッシュでの比較

2-3 結果

図 5a は、各 Case の抗力係数の 5 秒間の結果である。タンデム遊泳のすべての条件(Case 1~4)において、ギンガメアジの抗力係数は単独遊泳の場合(Case 0)の抗力係数よりも小さい。最初は、どの Case でも 2 秒前後まで抗力係数が減少し、2 秒後には Case 2 と 4 で抗力係数の値が収束するが、Case 1 は不安定である。図 5b に示すように、相対距離が大きくなると、抗力係数も大きくなった。Case 2 から 4 までの相対距離の増加量は線形であるが、抗力係数の増加量は線形ではなかった。2次元タンデム遊泳の先行研究でも、魚類間の間隔と抗力係数の関係は線形ではなく指数関数的であり、本研究は先行研究と類似の傾向を示した(Khalid et al. 2016)。加えて、Case 1 の最小値と最大値の差が他の Case に比べて大きいのは、他の Case が 2 秒後に収束するのに対し、Case 1 は不安定な挙動を示すからである。

図 6 は Rd/Lp (Lp はギンガメアジの体長) と抵抗低減率の関係を示しており、線型な変化ではなく、指数関数的な変化になっている。抗力低減率の最大値は、相対距離が最も近い Case 1 の 51.01% であり、最小の抗力低減率は Case 4 の 2.30% である。すべての Case におけるギンガメアジとジンベエザメ間の速度ベクトルの分布を図 7 に示す。すべての Case においてギンガメアジを前方に押し出すような流れは観察されなかった。尾鰭後方の流れはジンベエザメに沿った流れになっており、それ以外の領域では後方へ向かって流れのベクトルが向いている。また、ギンガメアジ周辺の流速の大きさにも違いがあり、Case 1 は他の Case よりも周辺の流速が小さい。ギンガメアジとジンベエザメ周りの圧力分布を図 8 に示す。よどみ点がジンベエザメの鼻先付近にできており、よどみ点によってギンガメアジ後方の圧力はタンデム遊泳の場合の方が単独遊泳の場合よりも高くなっている。よどみ点の大きさは魚類間の距離ではなく、ジンベエザメの大きさに依存するため、相対距離に関係なくほぼ一定である。したがって、ギンガメアジがジンベエザメに近づくほど、ギンガメアジ後方の圧力は大きくなる。

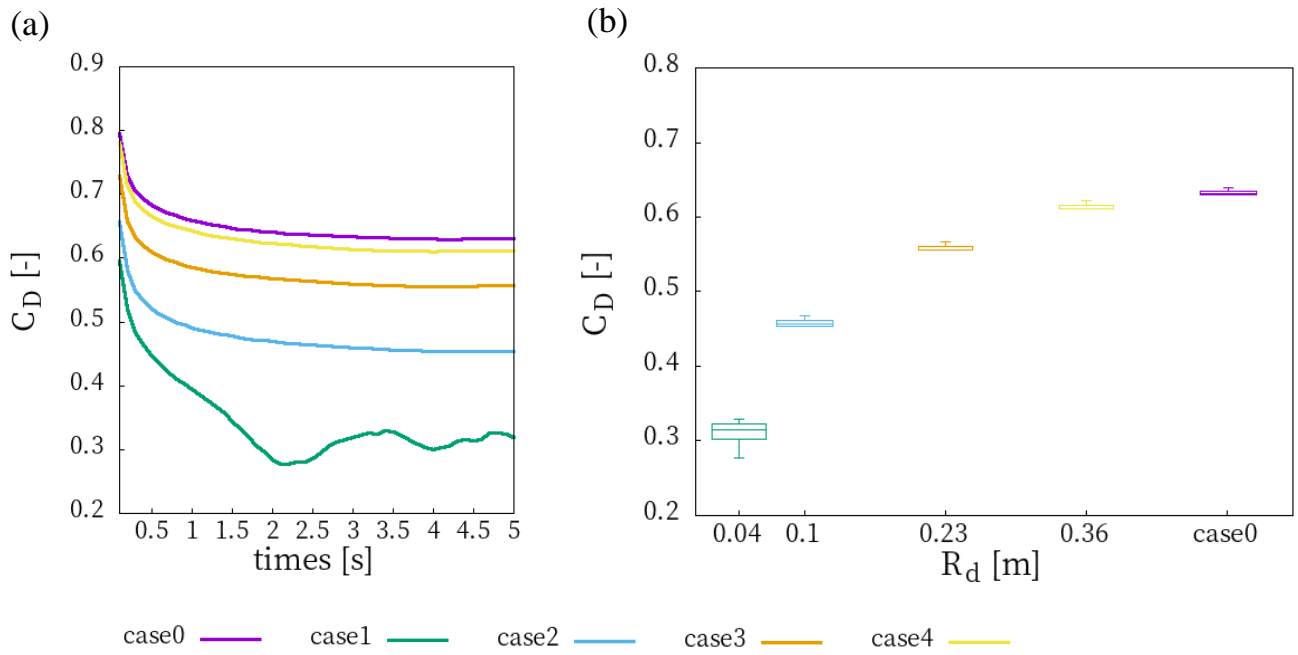


図5 ギンガメアジに作用する抗力係数

(a) ギンガメアジの抗力係数の時間変化, (b) 抗力係数と相対距離の関係. (2.1 秒から 5.0 秒のデータから計算)

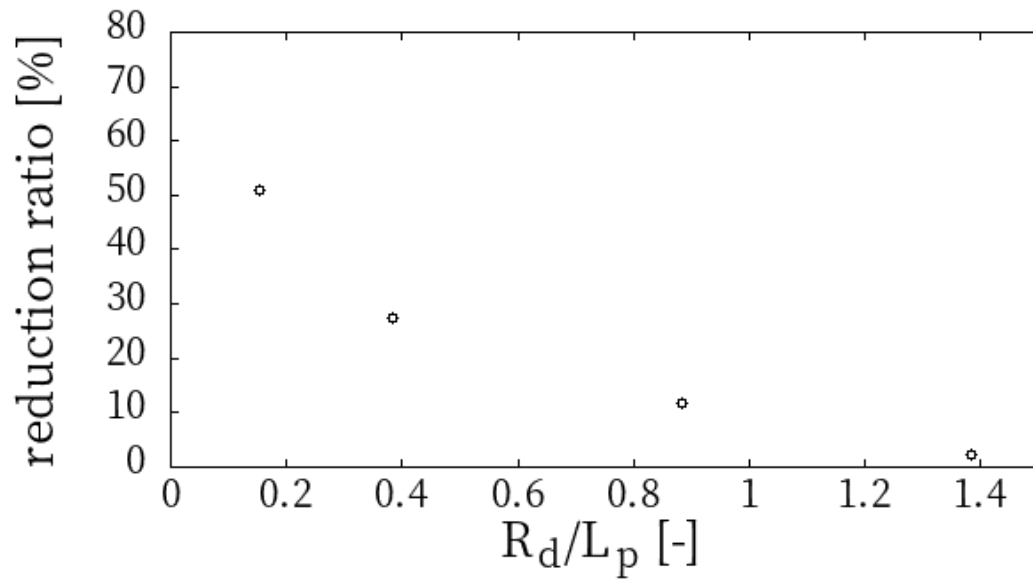


図6 抵抗減少率と R_d/L_p の関係

R_d はギンガメアジとジンベエザメの相対距離, L_p はギンガメアジの体長.

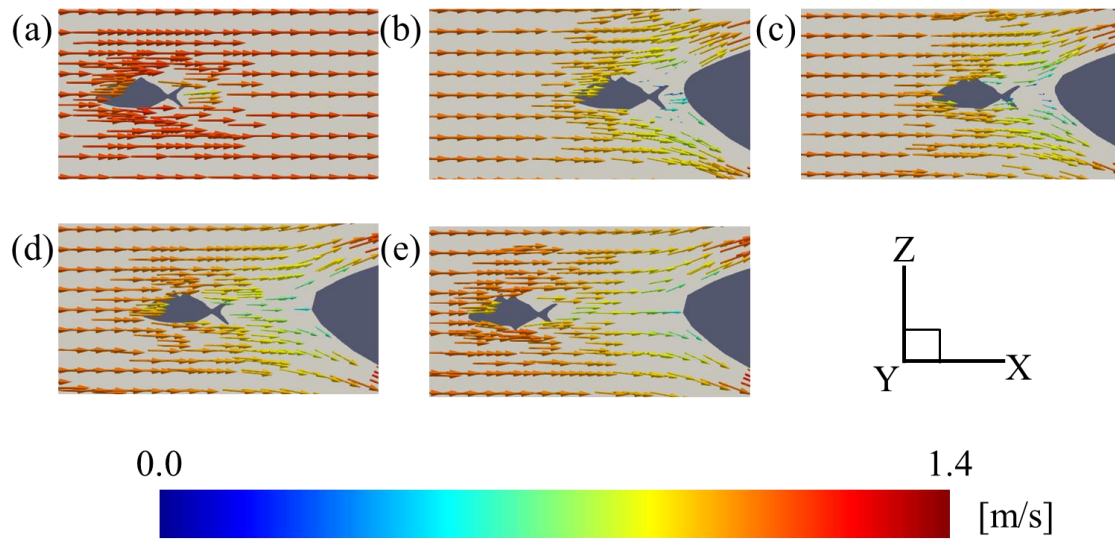


図7 ギンガメアジ周辺の流速ベクトル分布

それぞれ 5.0s における (a)は Case 0, (b)は Case 1, (c)は Case 2, (d)は Case 3, (e)

Case 4. ギンガメアジとジンベエザメの y 方向の中心での断面.

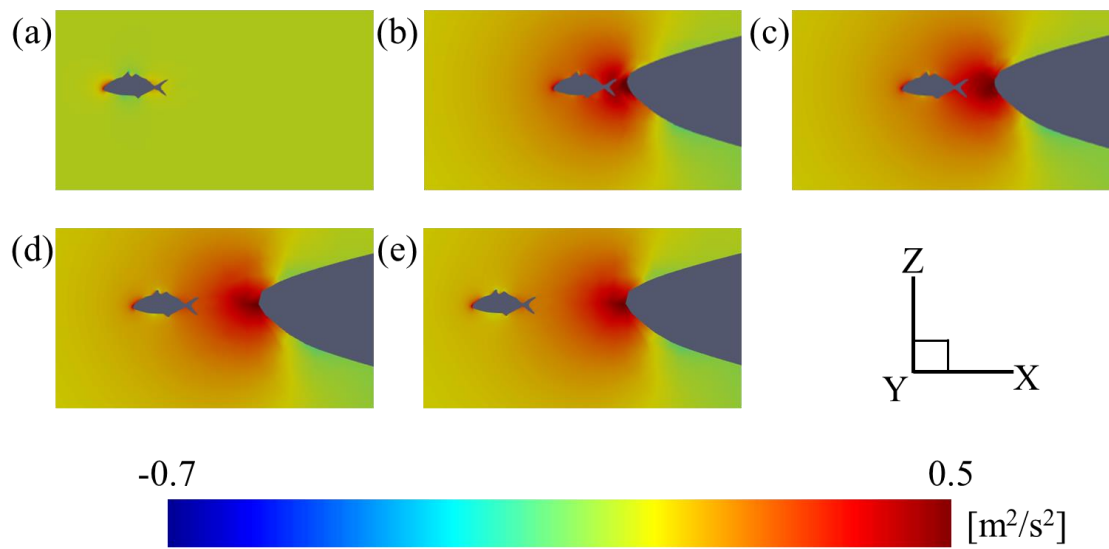


図8 ギンガメアジ周辺の圧力分布

それぞれ 5.0s における (a)は Case 0, (b)は Case 1, (c)は Case 2, (d)は Case 3, (e)

Case 4. ギンガメアジとジンベエザメの y 方向の中心での断面.

2-4 考察

2-4-1 抗力低減効果と相対距離の関係

ギンガメアジがジンベエザメの前方を遊泳することで、単独で遊泳をするときよりも効率的に泳ぐことができるという仮説を立て、ギンガメアジとジンベエザメの相対的な距離を変化させながら 3 次元流体解析を行った。その結果、ギンガメアジはジンベエザメとタンデム遊泳すると単独遊泳する場合よりもギンガメアジに作用する抗力が小さくなり、我々の仮説は支持された。水中で物体に作用する抗力には摩擦抗力と圧力抗力の 2 種類がある。前者は対象物表面の粗さ、材質、流れの状態などに依存する。本研究ではギンガメアジ表面の粗さ、材質、壁関数等を同条件で解析しているため、摩擦抗力が変化するとは考えにくい。後者は対象物の後方と前方の圧力差に起因する。本研究ではジンベエザメの鼻先に生成されるよどみ点によってギンガメアジ後方の圧力が増加する。したがって、ギンガメアジの後方と前方の圧力差が小さくなるため、圧力抗力が小さくなり、ギンガメアジ全体の抗力も小さくなったと考えられる。このメカニズムはイルカが船首の前方で波乗りをするケースと同じである (Fish and Hui 1991)。イルカの場合でも船首の前方に発生するよどみ点によって、イルカに前方へ力がかかり抗力係数が減少している。しかし、イルカのケースではイルカと船首の間の距離と抗力低減の関係が本解析とは逆の結果となっている。本解析ではギンガメアジがジンベエザメから遠ざかるにつれて抗力低減効果は減少した。しかし、イルカの先行研究ではイルカが船から遠ざかるにつれて抗力係数が減少している。この差の原因は船とジンベエザメの速度の差や、イルカとギンガメアジの体長差にあるのではないかと考えているが、詳細に調べた研究がないため今後の課題である。

異なる体長で併泳をする事例としては、親イルカと新生児のイルカの遊泳に関するものがある (Weihs 2004)。この研究では新生児のイルカが親イルカと一緒に泳ぐと親イルカと新生児のイルカの間吸引力によって、新生児のイルカが泳ぐのに必要な推力が減少すると主張している。上記の現象が起こるメカニズムとしてベルヌーイの効果を上げている。新

生児のイルカと親イルカの距離が近いほどその間の流速が速くなり、その結果その間の圧力が小さくなり引っ張る力が発生すると主張している。今回の研究では抗力低減のメカニズムは吸引ではないため、体長が異なる併泳であっても、相対位置によってメカニズムが異なることが示唆された。また同じ体長のヒメマスのタンデム遊泳では前後のヒメマスの距離が近くなるについて、前方のヒメマスの抗力係数が小さくなることが報告されている (Khalid et al. 2016)。Khalid らは 2 次元解析を行い、抗力低減メカニズムとして後方の個体が前方の個体から生成された渦を打ち消しているからであると主張しており、今回の研究のメカニズムとは異なる。Khalid らの研究による前方の魚類の抗力低減率は 40%、 Re 数は 500 であり、今回の解析同様に、前後の魚類との距離が小さくなるにつれて前方の魚類の抗力係数は小さくなった。タンデム遊泳を行う魚類間の距離が小さくなると抗力係数が小さくなるか大きくなるかは、タンデム遊泳の速度や体長などに依存する可能性がある。しかしながら、Khalid らの研究と本研究では Re 数のオーダーや前後の魚類の体長比、2 次元解析と 3 次元解析の違いなど他の要因についても考える必要があり、今後の研究課題とする。

2-4-2 リミテーション

この解析にはいくつかのリミテーションが存在する。一つ目は魚類の遊泳動作を考慮していないことである。先行研究では遊泳動作によって発生する渦が流体力学的相互作用を引き起こすことが示されている(Khalid et al. 2016)。したがって、遊泳動作を考慮すると抗力が周期的に変化することが予想される。しかし、ギンガメアジがジンベエザメに近づくと抗力が小さくなるという点が変わらないと考える。主な理由を3つ下記に挙げる。まずイルカと船の先行研究において、船がうねっていないにも関わらずイルカは抗力低減効果を得ている(Fish and Hui 1991)。また、遊泳動作を考慮したタンデム遊泳の先行研究では前後の魚類の遊泳動作の差は前方の魚類の抗力係数を変化させるが、泳動作の違いよりも距離の方が支配的な効果を持つことが示されている(Khalid et al. 2016)。本研究では体長差が20倍以上あるため、ギンガメアジによって発生した渦がジンベエザメに影響を与えるとは考えにくい。さらにギンガメアジはタンデム遊泳中にほとんど動かないことが観察されている。しかしながら、遊泳動作によって抗力係数が変化することが先行研究で示されているため、前後の魚類の体長差が大きいタンデム遊泳において遊泳動作を考慮した解析は今後の課題とする(Khalid et al. 2016)。

二つ目のリミテーションは解析モデルの忠実度についてである。本件では3Dモデリングソフトを使って写真から解析モデルを作成したため、実際の魚類とは細部の形状が異なる。しかし、ギンガメアジと形状が異なるイルカでも同様の効果が確認されていることと、細部の形態まで考慮すると抗力係数の値が多少変わるかもしれないが、タンデム遊泳と単独遊泳で同形状の解析モデルを用いているため、タンデム遊泳時のギンガメアジに作用する抗力係数が単独遊泳に比べて減少するという傾向は変わらないと考える。

2-4-3 生態学的な重要性と流体力学への貢献

併泳に関する研究は以前から行われてきた(Woodcock 1948; Fish and Hui 1991; Weihs 2004; Zhang and Zheng 2009; Marras et al. 2015; Khalid et al. 2016; Verma et al. 2018; Chao et al. 2019). しかし, 体長差が大きいタンデム遊泳に関する研究は少なく, 体長差が 20 倍以上もある個体同士のタンデム遊泳が前方の個体に与える影響についてはこれまで明らかにされてこなかった. 我々はギンガメアジ(0.26m)とジンベエザメ(6.0m)の CFD 解析を行い, 体長差の大きい個体間のタンデム遊泳では前方の個体の抗力係数が減少することを明らかにした. 本研究結果からギンガメアジは効率的に泳ぐためにジンベエザメの前方を遊泳していることが示唆された. これらの知見はギンガメアジの生態や行動の理解に貢献する.

流体力学的な視点として, 前後の魚類間の距離と抗力低減効果の関係が Khalid らの先行研究とは傾向が一致していたが, Fish らの先行研究と正反対であった(Fish and Hui 1991; Khalid et al. 2016), 両方の先行研究と比較すると本研究はレイノルズ数, 遊泳速度, 体長比などが異なっており, これらの要因が前後の魚類間の距離と抗力低減効果の関係に影響を及ぼしている可能性がある. これらの関係を詳細に調べることで, タンデム遊泳における流体力特性をより深く理解することができると思う.

第3章 サメ類の形態・泳動作と流体力特性の関係

3-1 背景と目的

魚類の中でもサメは高次捕食者であり、沿岸から遠洋、深海まで、ほとんどの海洋生息域で見られる (Iosilevskii and Papastamatiou 2016). サメが繁栄してきた理由の一つは、その運動器官の多様性にあると考えられている (Lauder and Di Santo 2015). サメの主な推進器官は尾鰭であり、他の硬骨魚類とは異なり、上下非対称の形態をしている。上下対称の尾鰭は後方に一つの渦輪を生成する一方で、上下非対称のサメの尾鰭は遊泳時に後方に 2 つの渦輪を生成する事が明らかにされている (Wilga and Lauder 2004; Flammang et al. 2011). また、後方に生成される逆カルマン渦列が上下非対称の尾鰭では斜め後方へ生成されるため、揚力が産生されることが示されている (Simons 1970; Wilga and Lauder 2002). また、サメの尾鰭形態は上下非対称という共通の特徴を持つが、種によって形態は異なる。サメの尾鰭形態に関する研究では Thomson と Simanek は形態学的特徴によって尾鰭形態を 4 つのグループに分類した (Thomson and Simanek 1977). また、Kim らは骨格構造によって尾鰭形態を 4 つに分類しており、どちらの研究でも似た形態の尾鰭形態を持っているサメの生態は似ていることが明らかにされている (Kim et al. 2013). したがって、サメの尾鰭形態は特定の目的に適した形態になっていると推測できる。上記に示したように、上下非対称の尾鰭形態の流体力学的な研究は行われているが、扱われている尾鰭形態は限られており、数十種の尾鰭形態間の流体力学的特性の違いは明らかにされていない。例えば、サメの尾鰭形態の中で、どの尾鰭形態が推進力が大きいのか、どの尾鰭形態が推進効率が高いのかなどは明らかにされていない。しかし、様々な尾鰭形態の流体力学的特性を調べる事は、その尾鰭形態をもつサメがどのような遊泳能に特化しているのかを理解するうえで重要である。また、魚型水中ロボットの尾鰭形態の選定や、サメの尾鰭形態が多様である理由の解明にも用いることができる。

本研究ではサメの尾鰭形態と流体力学的特性の関係を明らかにすることを目的とし、数

値流体解析を用いて、各尾鰭形態の流体力特性と周囲流体の挙動を可視化した。

3-2 方法

3-2-1 解析モデル

Thomson の研究で取り上げられている 4 目 20 種に、残りの 5 目 10 種を加えた 30 種の尾鰭形態を解析対象とした(Thomson and Simanek 1977)(図 9, 表 1). 本研究では尾鰭形態の違いに着目するため、胴体形状は背鰭と胸鰭を切除したラグビーボール形状とした. 解析モデルは Blender2.79 を用いて作成した(Blender Foundation 2023). 尾鰭形態は fishbase の写真を参考にした(FishBaseTeam 2023a). 胴体形態は長さ 1.0m の NACA0012 の中心線を回転中心として、 x 軸周りに 360° 回転させ、前方 90% を胴体部とし、後方 10% 切り落として作成した(Airfoil Tools.com 2023). モデル表面は Blender の“Subdivision Surface”機能で滑らかにした. また、先行研究で定義されている、上葉と下葉の角度を本研究でも尾鰭形態の特徴量として用いた(Kim et al. 2013).

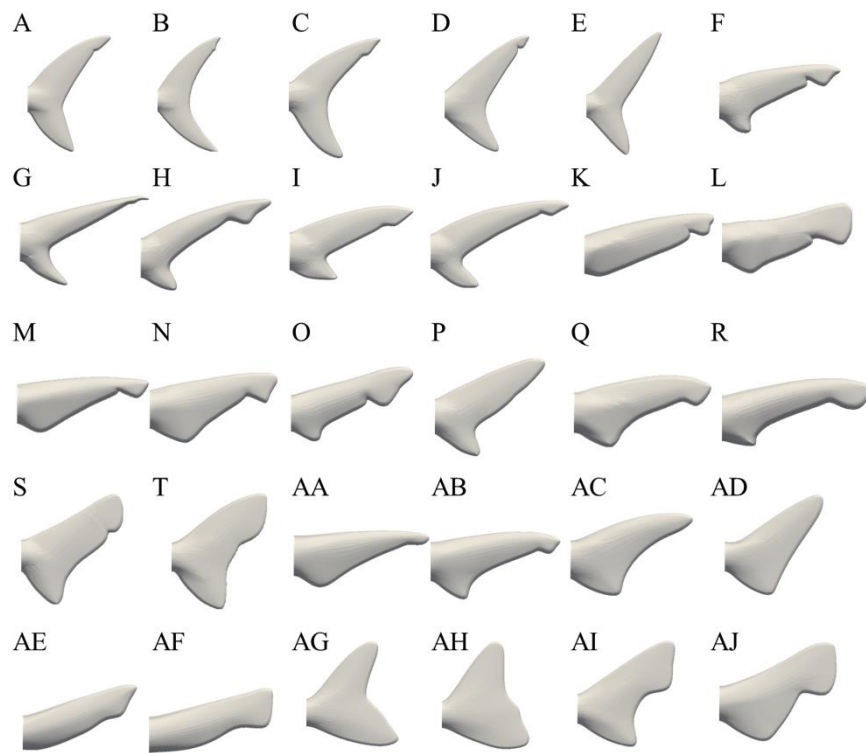


図9 9目30種の尾鰭形態モデル

表1 分析種の学名, 目, 科, 生息地

Symbol	Scientific name	Order	family	Habitat
A	<i>Lamna nasus</i>	Lamniformes	Lamnidae	oceanic
B	<i>Isurus oxyrinchus</i>	Lamniformes	Lamnidae	oceanic
C	<i>Carcharodon carcharias</i>	Lamniformes	Lamnidae	oceanic
D	<i>Cetorhinus maximus</i>	Lamniformes	Cetorhinidae	oceanic
E	<i>Rhincodon typus</i>	Orectolobiformes	Rhincodontidae	oceanic
F	<i>Carcharias taurus</i>	Lamniformes	Carchariidae	reef-associated
G	<i>Galeocerdo cuvieri (cuvier)</i>	Carcharhiniformes	Galeocerdonidae	benthopelagic
H	<i>Rhizoprionodon terraenovae</i>	Carcharhiniformes	Carcharhinidae	demersal
I	<i>Negaprion brevirostris</i>	Carcharhiniformes	Carcharhinidae	reef-associated
J	<i>Carcharhinus falciformis</i>	Carcharhiniformes	Carcharhinidae	reef-associated
K	<i>Ginglymostoma cirratum</i>	Orectolobiformes	Ginglymostomatidae	reef-associated
L	<i>Scyliorhinus boa</i>	Carcharhiniformes	Scyliorhinidae	bathydemersal
M	<i>Apristurus profundorum</i>	Carcharhiniformes	Pentanchidae	bathydemersal
N	<i>Pseudotriakis microdon</i>	Carcharhiniformes	Pseudotriakidae	bathydemersal
O	<i>Mustelus canis</i>	Carcharhiniformes	Triakidae	demersal
P	<i>Squalus acanthias</i>	Squaliformes	Squalidae	benthopelagic
Q	<i>Centroscyllium fabricii</i>	Squaliformes	Etmopteridae	bathydemersal
R	<i>Etmopterus hillianus</i>	Squaliformes	Etmopteridae	oceanic
S	<i>Centroscyllium coelolepis</i>	Squaliformes	Somniosidae	bathydemersal
T	<i>Isistius brasiliensis</i>	Squaliformes	Dalatiidae	benthopelagic
AA	<i>Chlamydoselachus anguineus</i>	Hexanchiformes	Chlamydoselachidae	bathydemersal
AB	<i>Hexanchus griseus</i>	Hexanchiformes	Hexanchidae	bathydemersal
AC	<i>Echinorhinus brucus</i>	Echinorhiniformes	Echinorhinidae	bathydemersal
AD	<i>Echinorhinus cookei</i>	Echinorhiniformes	Echinorhinidae	benthopelagic
AE	<i>Pliotrema annae</i>	Pristiophoriformes	Pristiophoridae	demersal
AF	<i>Pristiophorus japonicus</i>	Pristiophoriformes	Pristiophoridae	demersal
AG	<i>Squatina africana</i>	Squatiniiformes	Squatinae	demersal
AH	<i>Squatina dumeril</i>	Squatiniiformes	Squatinae	bathydemersal
AI	<i>Heterodontus japonicus</i>	Heterodontiformes	Heterodontidae	demersal
AJ	<i>Heterodontus francisci</i>	Heterodontiformes	Heterodontidae	demersal

3-2-2 解析モーション

BCF 遊泳は、主に anguilliform, carangiform, thunniform に分類され、thunniform はサメの遊泳運動の一つとして知られている(Scaradozzi et al. 2017). また、下葉が柔らかいため、尾鰭を左右に振った際に下葉よりも上葉が先に左右に振られることが観察されている(Cui et al. 2018). そこで、thunniform とひねり動作の2つの運動を組み合わせたモーションを解析に用いた。Thunniform 運動は次式で与えた。

$$y = \alpha H(x) \sin(\omega t - \lambda x) = \alpha(ax^2 + bx + c) \sin(\omega t - \lambda x) \quad (6)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{t}{T_s} & (t < T_s) \\ 1 & (t \geq T_s), \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ は尾ひれの周波数、 T_s は周期、 λ は波数、 $H(x)$ は振幅エンベロープであり、Cui らの先行研究をもとに $a=0.2, b=-0.12, c=0.02$ とした(Cui et al. 2018). 式7に示すように、振幅は動き初めは小さく、1周期の間に徐々に増加していくように作成した。

ひねり動作は下記のように与えた。

$$\phi = \alpha\theta \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \left(t > \frac{T_s}{4}, x > 0.85L_s \right), \quad (9)$$

ここで θ は最大ひねり角(20°), ω は周波数($2\pi f, 1.5\text{Hz}$)である。なお周波数は先行研究で示されているように実際にサメが取りうる値となっている(Di Santo et al. 2021; Li et al. 2021b). y' と z' はそれぞれ移動後のモデル表面の y と z の座標をあらわし、 $L_s(\text{m})$ はモデルの長さである。なお、 ϕ は頭部先端の挙動と同位相となっている。

正中線上の点の間隔が変形の前後で変化しないように、以下の式を与えた

$$(x'_{i+1} - x'_i)^2 + (y'_{i+1} - y'_i)^2 = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (10)$$

ここで、 (x_i, y_i) は正中線上の任意の点の座標を表している。'がついているものは変形後の座標であり、ついていないものは変形前の座標である。

3-2-3 流体解析

流体解析ソフトは OpenFOAM を用いた。OpenFOAM の詳細については第一章を参照ください。レイノルズ数は下記式のように定義した

$$Re = \frac{U_s L_s}{\nu} \quad (11)$$

ここで、流入速度 U_s は参考文献から $0.55L_s \text{ms}^{-1}$ とした(Lowe 1996)。本研究におけるレイノルズ数は 5.5×10^5 であったため、k-omega SST モデルを用いて解析を行った。K-omega SST モデルの詳細については第一章を参照ください。解析対象の平均無次元距離 y^+ は、4.62 である。解析には重合格子法を用いた。シミュレーション中のタイムステップはクー乱数が 0.2 になるように調整した。計算領域は長さ $5.0L_s$ 、高さ $2.4L_s$ 、幅 $2.4L_s$ とした。メッシュは OpenFOAM のヘキサメッシュ生成ソルバである snappyhexMesh を用いて作成した。図 10 に示すように、解析領域は重合格子領域と背景格子領域に分かれており、重合格子領域はサメの動きに合わせて移動・変形する。解析対象表面には 1 層の境界層メッシュを作成した。最小メッシュ体積は $3.0 \times 10^{-10} \text{m}^3$ であり、最大メッシュ体積は $9.2 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 、総メッシュ数は 3.7×10^6 である。出口境界には平均相対圧力が 0Pa を適用し、モデル表面は滑りなし壁面とした。

推力係数を下記の式で計算した

$$C_T(t) = \frac{-D(t)}{\frac{1}{2} \rho U_s^2 S_s} \quad (12)$$

$$\bar{C}_T = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} C_T(t) dt \quad (13)$$

ここで $D(t)$ は計算された抗力、 S_s は y 軸方向の尾鰭の投影面積(モデルの 90%より後方部分)、 \bar{C}_T は一周期での平均推力係数である。先行研究で示されているように推進効率 η は出力パワー P_o と入力パワー P_e の比として下記のように定義した(Zhou et al. 2016)

$$P_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} -D(t) U_s dt \quad (14)$$

$$P_e = -\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [\Sigma_A \{D'(t)\dot{x}(t) + l'(t)\dot{y}(t) + L'(t)\dot{z}(t)\}] dt \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_e}, \quad (16)$$

ここで、 $D'(t)$ は微少メッシュに作用する抗力、 $l'(t)$ は微少メッシュに作用する横力、 $L'(t)$ は微少メッシュに作用する揚力、 A は解析モデルの表面全体を意味している。 $\dot{x}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ は微少メッシュの各軸方向への移動速度である。また、Li らの研究で示されているように移動コストを調べるために、下記のように Cost of Transport を定義した(Li et al. 2021b)

$$\Omega = \frac{P_e}{U_s m}, \quad (17)$$

ここで m は体重である。先行研究で尾鰭形態を議論する際に、表面積を考慮したアスペクト比と、考慮していないアスペクト比の、主に二つのアスペクト比が用いられている(Thomson and Simanek 1977; Crofts et al. 2019)。そのため本研究でも二つのアスペクト比を定義し、評価に用いる。

$$AR_S = \frac{h_c L_c}{S_s} \quad (18)$$

$$AR_L = \frac{h_c}{L_c}, \quad (19)$$

ここで、 L_c は尾鰭の長さ(0.1m)、 h_c は尾ひれの高さである。

図 11(a)は異なる周期におけるモデル A の推力係数の時間変化である、9 周期目と 10 周期目の傾向はおおむね一致しており、周期的な定常状態が達成されている。したがって、以下の解析ではすべて 9 周期まで行い、9 周期目のみのデータを用いて推力係数などを導出した。また、coarse メッシュ、fine メッシュ、dense メッシュを用いて格子依存度調査を行った。coarse メッシュは 1.6×10^6 、fine メッシュは 3.7×10^6 、dense メッシュは 5.2×10^6 である。図 11(b)に示すように、fine メッシュと dense メッシュでは推力係数はほとんど変わらず、平均誤差は 2.66% である。精度と計算時間を考慮しすべての解析ケースで fine メッシュを用いた。2 つのアスペクト比と各流体力特性との関係を調べるために 2 次多項式回帰

モデルを用いた。具体的には、Scikit-Learn ライブラリの PolynomialFeatures モジュールを使用して多項式項を求め、LinearRegression モジュールを用いて線形回帰を適用した(scikit-learn developers 2023a, 2023b)。

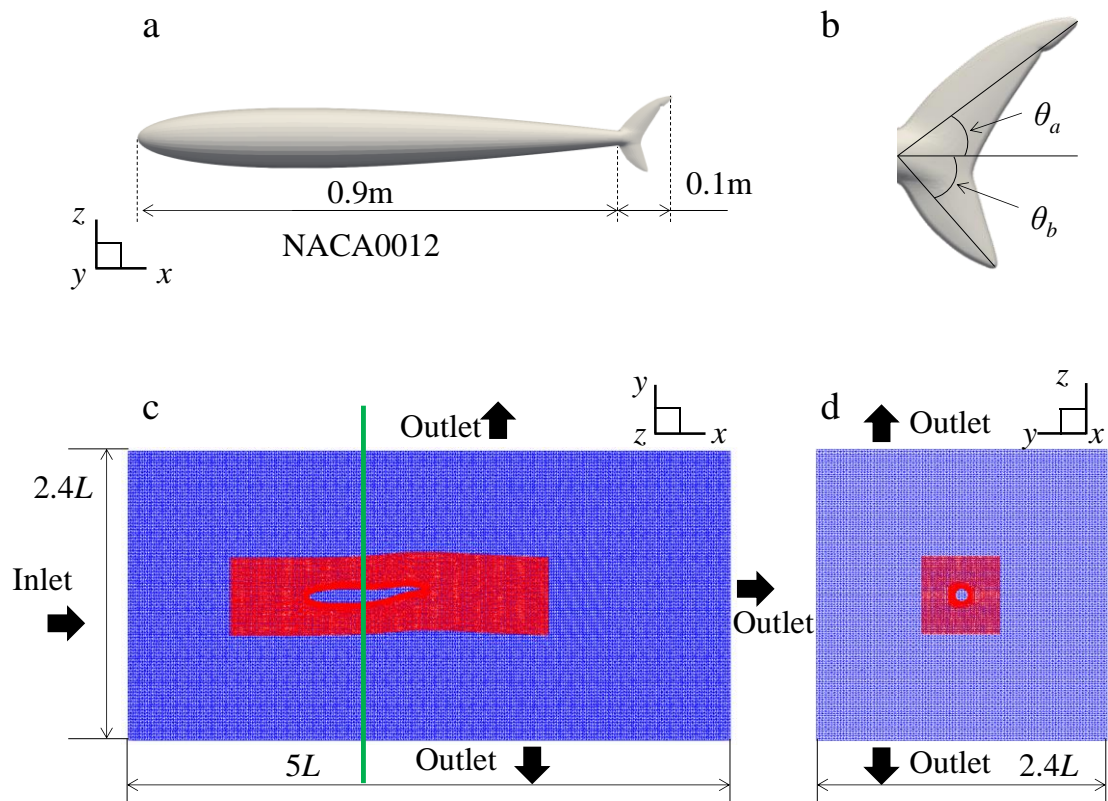


図10 モデルの寸法と解析領域.

(a) 解析に使用したモデル全体の寸法、(b) 上葉と下葉の角度、(c) 流体領域全体の冠状面におけるメッシュ、(d) (c)の緑線における y - z 断面；魚の頭部から 0.5m.

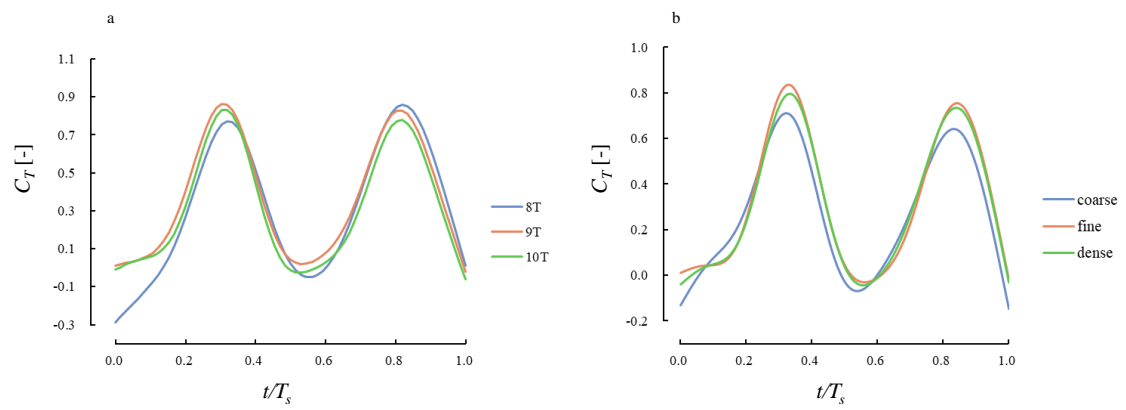


図 11 推力係数の時間変化.

(a) 3 つの周期での推力係数の時間変化. (b) coarse メッシュ, fine メッシュ, dense メッシュの推力係数の比較

3-3 結果

3-3-1 2つのアスペクト比と流体力特性の関係

図 12, 13 にアスペクト比と各流体力特性との関係を示す。推力係数, 推進効率, 移動コストと AR_S との相関係数は, それぞれ-0.19, -0.57, 0.05 である(図 12(a)~(c))。推力係数, 推進効率, 移動コストと AR_L との相関係数は, それぞれ 0.75, 0.33, 0.92 である(図 13(a)~(c))。推進効率は AR_S と強い相関があり, 推力係数と移動コストは AR_L と強い相関がある。推進効率と移動コストは硬骨魚類の場合と同様に AR_L が増加するにつれて増加している(Yeh and Alexeev 2016; Krishnadas et al. 2018)。生息域の違いに着目すると外洋性種はモデル R を除いてすべての流体力特性で似た値を示している。一方, 他の生息域では分散しており, 流体力特性は生息域よりも形態に依存している。図 14 は AR_S と AR_L の関数としての流体力特性(推力係数, 推進効率, 移動コスト)のヒートマップである。推力係数と推進効率は同様のヒートマップ分布を示し, AR_S が大きくなると値が小さくなり, AR_L が大きくなると値が大きくなる。一方, 移動コストは AR_L に強く依存するため, ヒートマップは縦方向よりも横方向に変化する。

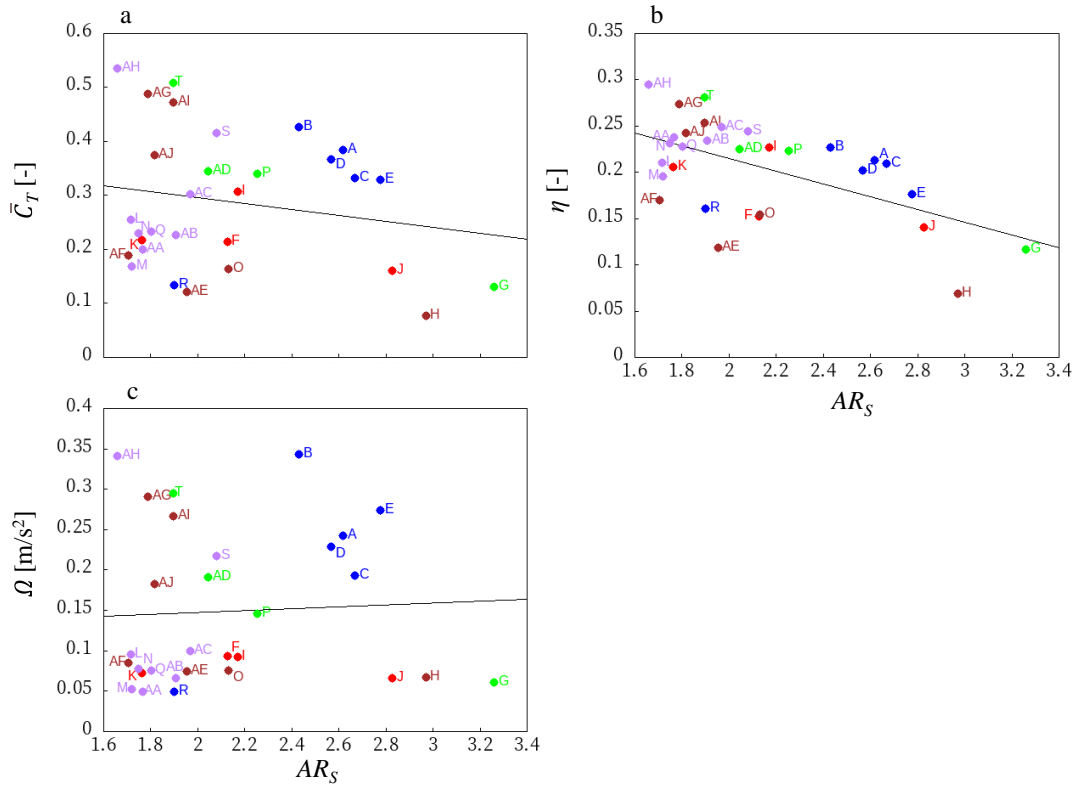


図12 アスペクト比 AR_S と流体力学的特性の関係。

(a) AR_S と推力係数の関係, (b) AR_S と推進効率の関係, (c) AR_S と移動コストの関係. ドットの色は生息域を示す(青は oceanic, 赤は reef-associated, 緑は benthopelagic, 茶は demersal, 紫は bathydemersal).

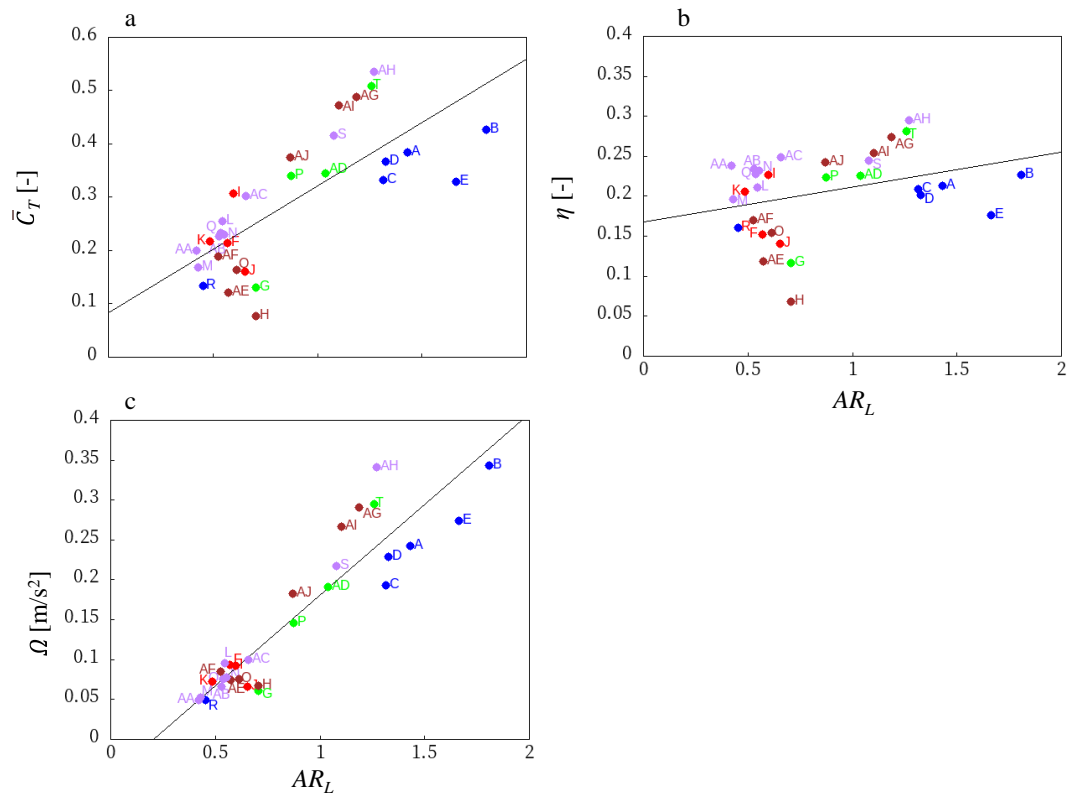


図13 アスペクト比 AR_L と流体力学的特性の関係。

(a) AR_L と推力係数の関係, (b) AR_L と推進効率の関係, (c) AR_L と移動コストの関係, ドットの色は生息域を示す (青は oceanic, 赤は reef-associated, 緑は benthopelagic, 茶は demersal, 紫は bathydemersal)

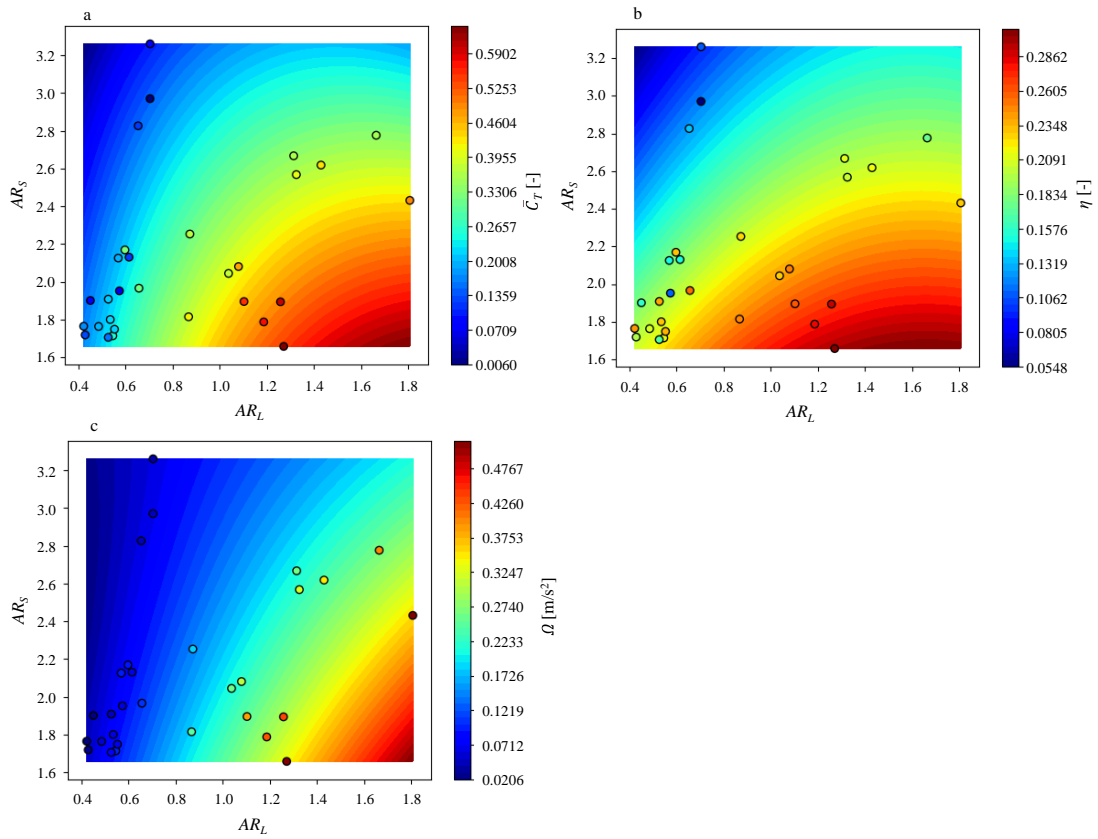


図14 AR_L , AR_S と流体特性（推力係数、推進効率、移動コスト）のヒートマップ。

(a) AR_L , AR_S と推力係数の関係, (b) AR_L , AR_S と推進効率の関係, (c) AR_L , AR_S と移動コストの関係. 等高線は回帰曲面の値, ドットは尾鰭の流体力学的特性の解析値を示す.

3-3-2 モデル周辺の渦度と Q 値の分布

推力係数の違いの原因を探るために、推力平均値が最も大きかったモデル AG と AH, 推力平均値が最も小さかったモデル H と I の z 軸周りの渦度分布と Q 値を図 15 に示す(Wu et al. 2010). いずれのモデルにおいても、モデル後方に逆カルマン渦が発生している(図 15(a)~(d)). Q 値を比較すると、推力係数が大きいモデルほど後方の渦が体長方向に長くなっている(図 15(e)~(i)). 図 16 は尾鰭後方の x - z 平面における渦度分布である. Y 軸周りに二つの渦が見られ、斜め下方向にジェット流が形成されている. この傾向は Lauder らによる先行研究と同様である(Wilga and Lauder 2002). 逆カルマン渦が確認でき、 y - z 平面における渦構造は先行研究で観測されたものと類似しており、本研究の手法が妥当であったと確認できる.

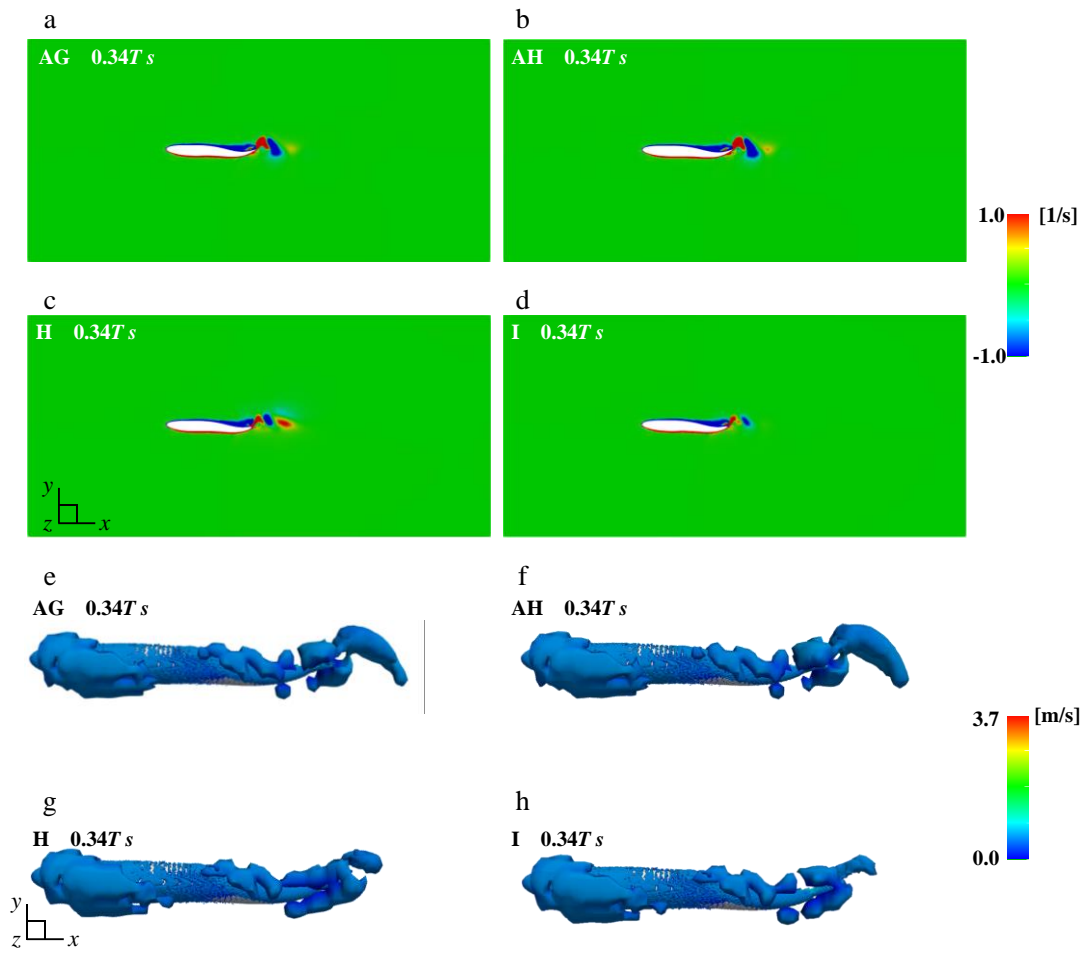


図 15 z 軸周りの渦度分布と Q 値. (a)~(d)はモデルの冠状面における分布. (e)~(h)は各モデルの Q 値.

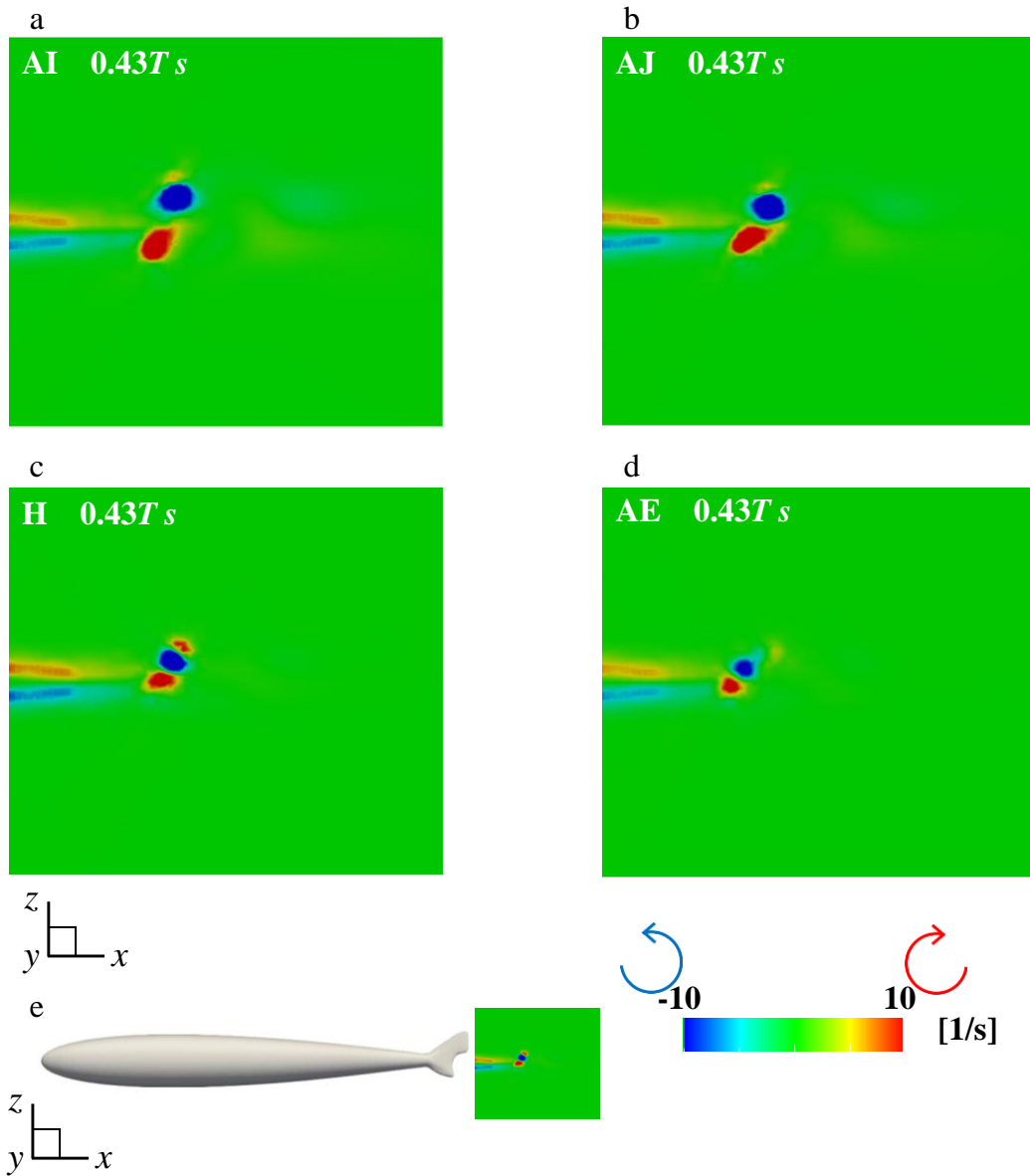


図 16 尾鰭後方の渦度分布. (a)~(d)は各モデルの渦度分布. (e)は断面の位置の模式図.

3-4 考察

3-4-1 尾鰭形態によって推力が異なるメカニズム

尾鰭後方に発生する逆カルマン渦の反作用が推力生成の一因である(Tytell et al. 2008). 図 15 に示すように推力の大きい種では後方の逆カルマン渦が大きい. 硬骨魚類は前縁角度が小さいほど剥離域が大きくなるため発生する渦が大きくなることが報告されている(Krishnadas et al. 2018). AR_L と θ_a の間には高い相関があった($R=0.83$). 図 15 に示すように前縁角($90^\circ - \theta_a$)が小さいほど渦は大きくなる. 角度の定義の仕方は硬骨魚類とは異なるが本研究でも θ_a が大きいほど剥離領域が大きくなるため AR_L が大きいほど推力も大きくなる. 一方で, AR_L と θ_b の相関は低かった($R=-0.01$). したがって尾鰭の捻りを考慮した今回の解析では θ_a は推力や移動コストに大きな影響を与えるが θ_b の影響は小さい. 図 16 に示すようにサメの尾鰭後方に形成される逆カルマン渦は斜め下向きのジェット流を形成することが明らかにされている(Wilga and Lauder 2002). 推力の大きい種の渦は大きく発生するジェット流の方向が推力の小さい種よりも推進方向に近い.

3-4-2 流体力学的特性と生息域の関係

図 12, 13 に示すように流体力学的特性は生息域で類似していない。外洋性の種はすべての流体力学的特性で同じような値を示すが、他の種は生息域に関係なく異なる値を示す。外洋性のサメが、モデル R を除いて同じような値を示しているのはモデル R だけが実際とは異なるモーションになっているからだと考えられる。本研究では、尾鰭形態の流体力学的特性を比較するため胴体の形態とモーションを一定とした。しかしサメは大きく二つの体型に分類でき生息域によってモーションも異なることが明らかにされている (Sternes and Shimada 2020)。また外洋性と底生では尾鰭以外の鰭の形質も異なる。尾鰭形態が類似している種は生息域も類似していると報告されていることから流体力学的特性も類似している可能性が高いと予想される。本研究は上記の解析条件を考慮していないため生息域ごとに似たような値にはならなかったと予想される。生態まで論じるのであれば体型の違い、尾鰭-胴体比の違い、モーションの違いを考慮した流体解析が必要であり今後の課題である。

3-4-3 リミテーション

本研究では尾鰭形態の違いに焦点を当てたため、いくつかのリミテーションがある。1つは本解析では胴体形状の種間差を考慮していないことである。これまでの研究でサメの胴体形状は底生種と外洋種の二つに大別できることが知られている (Sternes and Shimada 2020)。胴体形状の違いによって尾鰭に流入する流れ場が変化する可能性があり、胴体形状と尾鰭形態を一緒に考えなければ実際のサメの尾鰭形態の流体力学的特性が正確に再現されているとは言い難い (Zhao and Dou 2019)。2つ目は本研究では胴体と尾鰭の長さ比を一定としたが実際は種によって異なる。例えば本研究で用いた *Ginglymostoma cirratum* は明らかに体長と尾鰭の長さ比が 1:9 ではない (FishBaseTeam 2023b)。流体力学的特性は尾鰭の長さによって変化することが知られているため流体力学的特性を論じる上で尾鰭と胴体の長さ比は重要である (Bamba et al. 2021)。3つ目は流体解析手法についてである。本研究では、解析対象の位置を固定し前方から流速を与えて遊泳を模擬している。この方法は一般的な手法であるが実際の魚類の遊泳を再現するためには自己推進解析を行う必要がある (Zhou et al. 2016; Zhang et al. 2020; Li et al. 2021b)。自己推進を行っている先行研究と各流体力特性を比較すると、本研究の推進効率 η は 0.05~0.3 であるのに対し、先行研究では約 0.2 である。移動コストは本研究では 0.05~0.35 [ms^{-2}] であるのに対し、先行研究では正確な値が読み取れないが 1 [ms^{-2}] より小さい値となっている (Li et al. 2021b)。また、結果の章でも述べたように後方の渦構造は先行研究と類似していることから、本解析は自己推進解析ではないが尾鰭形態の流体力特性を議論するうえでは問題がないと考える。3つ目は表面摩擦の違いについてである。サメの抵抗は体表面の各部位によって異なり、その分布は種によっても異なる (Gabler-Smith et al. 2021)。本研究では、尾鰭形態による流体力特性の違いを調べる事を目的としたため、体表面の抵抗は全モデルで一様とした。種ごとの表面摩擦を考慮した解析は今後の課題とする。最後はモーシヨンの違いである。これまでの研究で外洋性種と底生種ではモーシヨンが異なることが示されている (Sternes and Shimada 2020)。

モーションの違いは流体力に直接影響を与えるため重要な要素であるが、本研究では尾鰭形態の差異に着目したため、同じ体型、同じモーション、同じ胴体-尾鰭比で解析を行った、これは尾鰭形態以外のパラメータ(モーション、胴体-尾鰭比、体型)を一致させないと、得られた流体力特性の違いが、尾鰭形態の違いによるものなのか、他のパラメータの違いによるものなのか判断できないと考えたためである。しかし、尾鰭形態と生態との関係を明らかにするためには、上記の条件を考慮する必要があるため、今後の研究課題とする。

3-4-4 生態学的な重要性と水中ロボットへの応用

魚類の尾鰭形態の流体力特性に関する研究は古くから行われている (Simons 1970; Lauder 2000; Wilga and Lauder 2002, 2004; Tytell et al. 2008; Flammang et al. 2011; Yeh and Alexeev 2016; Zhou et al. 2016; Krishnadas et al. 2018; Crofts et al. 2019; Zhao and Dou 2019; Wang et al. 2020; Bamba et al. 2021). しかし、サメの尾鰭形態の流体力特性に関する研究は硬骨魚類に比べると少なく、その少ない研究のほとんどは数種の比較に留まっている (Simons 1970; Wilga and Lauder 2002, 2004; Flammang et al. 2011; Crofts et al. 2019). そのため、上下非対称の尾鰭形態を持つサメの推力と揚力発生メカニズムは詳細に研究が行われているが、異なる形態が流体力特性に及ぼす影響はほとんど解明されていない。本研究ではサメの尾鰭形態による流体力特性の違いを明らかにすることを目的とした。流体解析を用いて 30 種類のサメの尾鰭形態の推力、推進効率、移動コストを調査した。その結果、 AR_S と AR_L が三つの流体力特性に影響を及ぼすことが分かった、具体的には AR_L が大きい尾鰭形態は推力と移動コストが大きく、 AR_S が小さい尾鰭形態は推進効率が高い。これらの知見は魚類の生態や行動の理解に貢献すると考える。ただし、本研究では体型や尾鰭-体長比、モーションの違いを考慮していないため今後の研究で検証し、サメの尾鰭形態と生態の関係をより深く理解する必要がある。

本研究の結果は魚類型水中ロボットの尾鰭形態を決定するうえでも有用であると考えられる。図 14 は AR_S と AR_L の組み合わせにより、推力、推進効率、移動コストのどれを最大化するかを決定できることを示している。長距離移動を目的としたロボットと加速を必要とするロボットで要求される性能は異なるため、用途に合わせた性能を最大限に発揮できる尾鰭形態を決定するうえでも有用であると考えられる。

第4章 エイ類の泳動作と流体力学特性の関係

4-1 背景と目的

多くの魚類が BCF 法を用いて遊泳するのに対し、エイは MPF 法を用いて遊泳する (Breder 1926). エイの遊泳法は鳥のように羽ばたく mobuliform と、前方から後方へ波を伝搬させる rajiform の二つに大別されている (Webb 1994). エイの生態解明や工学応用を目的として、エイの二つの遊泳法に関する研究が行われている。

これまでの研究で、エイの遊泳法やメカニズムが明らかにされている。Bottom らは淡水エイである *Potamotrygon orbignyi* の遊泳行動を調査し、前縁渦が推進効率に大きな影響を与えることを明らかにしている (Bottom et al. 2016). また、Santo らは、スケートの遊泳速度と泳動作との関係を調べ、振幅と波数が増加すると遊泳速度も増加することを発見した (Di Santo et al. 2017). Moya と Pable は、単純化したモデルを用いて付加質量と循環のどちらが推力生成に貢献しているかを調べ、循環が推力生成において高い割合を占めていることを示した (Moya and Valdivia y Alvarado 2021). さらに、Thekkethil らは胸鰭のアスペクト比と遊泳能の関係を調べ、アスペクト比が大きくなるにつれて推進効率と推力が向上することを明らかにした (Thekkethil et al. 2020). 他にも羽ばたきとうねりの両方において、地面効果を利用することで推進効率が向上することや、生息域や種によってエイの遊泳動作が異なることが明らかにされている (Rosenberger 2001; Gao and Lu 2008; Su et al. 2013; Quinn et al. 2014; Park et al. 2017).

日本最大級の水族館である海遊館ではホシエイとヤジリエイが左右の胸鰭動作に位相差をつけながら泳いでいる。ホシエイとヤジリエイの遊泳動作は rajiform であり、左右の胸鰭動作の違いは遊泳するエイの旋回や操縦性に影響を与えることが示唆されている。Shi らは、左右の胸鰭に異なる動作を与えたり、波の伝播方向を逆にしたりした場合の遊泳への影響を調べ、胸鰭動作に左右差があると旋回能力が向上することを示した (Shi and Xiao 2021). また、Yang らは左右の胸鰭動作の伝播方向を逆にしたり、左右の胸鰭動作の振幅を変化さ

せたりすることで方向転換が可能であることを示した(Yang et al. 2009). さらに, Liらはエイロボットを用いて左右の胸鰭の波の伝播速度を変化させることで移動方向を制御できることを示した(Li et al. 2021c). しかし, 海遊館では直進遊泳を行っている際にも左右の胸鰭動作に位相差が観察されることがある. 我々の知る限り, 左右の胸鰭動作の位相差が直進遊泳に及ぼす影響を調べた研究はない. 上記に示したように, 左右の胸鰭動作の違いに着目した先行研究では左右の位相差がエイの旋回能力や操縦性に影響を与えることが明らかにされている(Yang et al. 2009; Shi and Xiao 2021; Su et al. 2021). そこで我々は直進遊泳時の左右の胸鰭動作の位相差は遊泳の安定性に影響を与えるという仮説を立てた. ホシエイやヤジリエイは頻繁に左右の胸鰭動作に位相差がある直進遊泳を行うため, 左右の胸鰭動作の位相差が直進遊泳に及ぼす影響を解明することは, うねり動作型のエイの行動生態を理解するうえで重要である. また, エイ型水中ロボットの遊泳性能向上にも有用である. プロペラを使わないエイ型ロボットは海藻やプラスチック破片が多い海域では絡まる危険が少ないため注目されている(Low 2009; Li et al. 2021a).

4-2 方法

本研究では、胸鰭動作の位相差が遊泳能に与える影響を明らかにすることを目的とする。左右の胸鰭動作に厳密に位相差を与えるために、実際のエイを観察するのではなく、流体解析を用いた、エイのモデルに作用する力を計算し、左右の胸鰭動作の位相差が推進効率や遊泳安定性に与える影響を調べる。

4-2-1 解析モデル

海遊館で飼育されている, 胸鰭形態の異なる2種類の rajiform 型のエイ(ホシエイ *Dasyatis matsubarae*, ヤジリエイ *Dasyatis acutirostra*)を解析対象とした(図 17(a),(b)). Blender2.79 を用いて写真からモデルを作成した. Blender でのモデル作成については第一章を参照ください. 今回は胸鰭動作に着目するため, 先行研究のように胴体形状は考慮しなかった (Shahzad et al. 2016; Shi and Xiao 2021). すべてのモデルでモデルの厚さを 0.01m, ディスク幅(DW)を 0.04mとした(Kajiura et al. 2000; Schwartz 2007). 各モデルの体長は写真の縦横比より決定し, ヤジリエイが 0.348m, ホシエイが 0.344mである(Fernando 2010; Fish Base 2023).

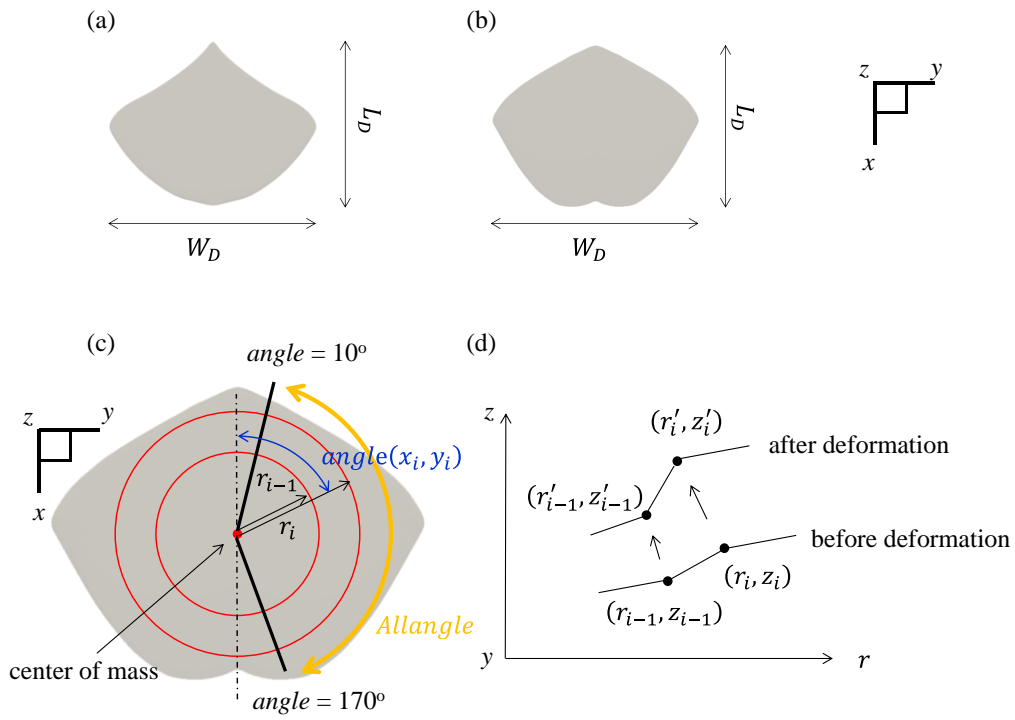


図 17 解析対象とモーシヨンの説明

(a) *D. acutirostra* の解析モデル. (b) *D. matsubarai* の解析モデル.

(c) モーシヨンの説明, (d) 変形前後の表面上の任意の 2 点間の関係.

4-2-2 解析モーシヨソ

下記に示す式を満たすようにモーシヨソを与えた.

$$z = \begin{cases} A_e \sin \left(\omega \left(t - kT \left(\frac{\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ}{\text{Allangle}} - \theta \right) \right) \right) h_1 h_2 & (10^\circ \leq \text{angle}(x_i, y_i) \leq 170^\circ) \\ A_e \sin \left(\omega \left(t - kT \left(\frac{350^\circ - (\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ)}{\text{Allangle}} \right) \right) \right) h_1 h_2 & (190^\circ \leq \text{angle}(x_i, y_i) \leq 350^\circ) \end{cases} \quad (20)$$

$$h_1 = ar_i^3 + br_i^2 + cr_i \quad (21)$$

$$h_2 = \begin{cases} \begin{cases} d(\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ)^2 \\ +e(\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ) \end{cases} & (10^\circ \leq \text{angle}(x_i, y_i) \leq 170^\circ) \\ \begin{cases} d(350^\circ - (\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ))^2 \\ +e(350^\circ - (\text{angle}(x_i, y_i) - 10^\circ)) \end{cases} & (190^\circ \leq \text{angle}(x_i, y_i) \leq 350^\circ) \end{cases} \quad (22)$$

$$(r_i - r_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2 = (r'_i - r'_{i-1})^2 + (z'_i - z'_{i-1})^2 \quad (23)$$

$$\text{angle}(x_i, y_i) = \text{angle}(x'_i, y'_i). \quad (24)$$

式 20 はモデル表面の z 軸方向の移動量を表し, A_e は胸ビレ先端の振幅, ω は角速度, t は時間, k は波数, T は周期, $\text{angle}(x_i, y_i)$ は回転中心と点 (x_i, y_i) を結んだ線と x 軸とのなす角度, Allangle はモーシヨソを与えた角度 (160°), θ は左右の胸ビレ動作の位相差である (図 17(c)). h_1 は回転中心から円周方向への重みづけ, h_2 は円周方向への重みづけである.

式 23 は任意の隣あう 2 点間の距離が変形前と変形後で等しいことを示しており, r は回転中心から任意の点 (x_i, y_i) までの距離 $\sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ を表している (図 1 (d)). 式 24 は変形前と変形後で $\text{angle}(x_i, y_i)$ が一定であることを示しており, 変形後の変数は'をつけて表している (図 17(c)). 解析で用いた変数はそれぞれ $A_e = 0.089\text{m}$, $T = 0.499$, $k = 1.270$, and $\omega = 12.599 \text{ rad/s}$

である. これらの値はエイの遊泳を観察した先行研究を参考に決定した(Rosenberger 2001).

4-2-3 流体解析

異なる胸ビレ形状における左右の胸ビレ動作の位相差の影響を調べるために、2つの胸ビレ形状と4つの位相差の、計8条件の解析を行った。

オープンソースの流体解析ツールボックスである OpenFOAM(OpenCFD 2023)を用いて、エイに作用する、各軸方向、各軸周りの力を計算した。レイノルズ数はエイの遊泳に関する先行研究(Bottom et al. 2016)と同様に下記のように定義した。

$$Re = \frac{U_D L_D}{\nu}, \quad (25)$$

ここで、 $U_D(\text{ms}^{-1})$ は流速($1.5 \times L_D \text{ms}^{-1}$ ($L_D(\text{m})$ はエイモデルの体長))である。Re数は 1.8×10^5 であり、これを考慮して、魚類の遊泳解析においてよく用いられているレイノルズ平均モデルである、k-omega SST モデルを用いた。流体解析の詳細については第一章と第二章を参照ください。解析領域は高さ、幅、奥行きが $5.4 W_D$ の直方体とした(図 18(a), (b))。

OpenFOAM の snappyHexMesh を用いてヘキサメッシュを作成した(OpenCFD Ltd 2022c)。解析領域は重合格子領域と背景領域に二つに分けられ、重合格子領域はエイの動きに合わせて移動・変形する。最小メッシュ体積は $7.3 \times 10^{-10}(\text{m}^3)$ 、最大メッシュ体積は $2.6 \times 10^{-2}(\text{m}^3)$ 、総メッシュ数は 9.0×10^5 である。入口境界は固定流入条件、出口境界は自由流出条件、エイモデル表面は滑りなし壁面とした(図 18(a), (b))。抗力係数、横力係数、揚力係数、 x 軸周りのトルク係数、 y 軸周りのトルク係数、 z 軸周りのトルク係数を下記の式を用いて導出した。

$$C_D(t) = \frac{D(t)}{\frac{1}{2} \rho U_D^2 L_D W_D} \quad (26)$$

$$C_l(t) = \frac{l(t)}{\frac{1}{2} \rho U_D^2 L_D W_D} \quad (27)$$

$$C_L(t) = \frac{L(t)}{\frac{1}{2} \rho U_D^2 L_D W_D} \quad (28)$$

$$C_{mx}(t) = \frac{M_\psi(t)}{\frac{1}{2}\rho U_D^2 L_D^2 W_D} \quad (29)$$

$$C_{my}(t) = \frac{M_\phi(t)}{\frac{1}{2}\rho U_D^2 L_D^2 W_D} \quad (30)$$

$$C_{mz}(t) = \frac{M_\theta(t)}{\frac{1}{2}\rho U_D^2 L_D^2 W_D}, \quad (31)$$

ここで $D(t)$ は抗力, $l(t)$ は横力, $L(t)$ は揚力, $M_\psi(t)$ は x 軸周りのトルク, $M_\phi(t)$ は y 軸周りのトルク, $M_\theta(t)$ は z 軸周りのトルクである.

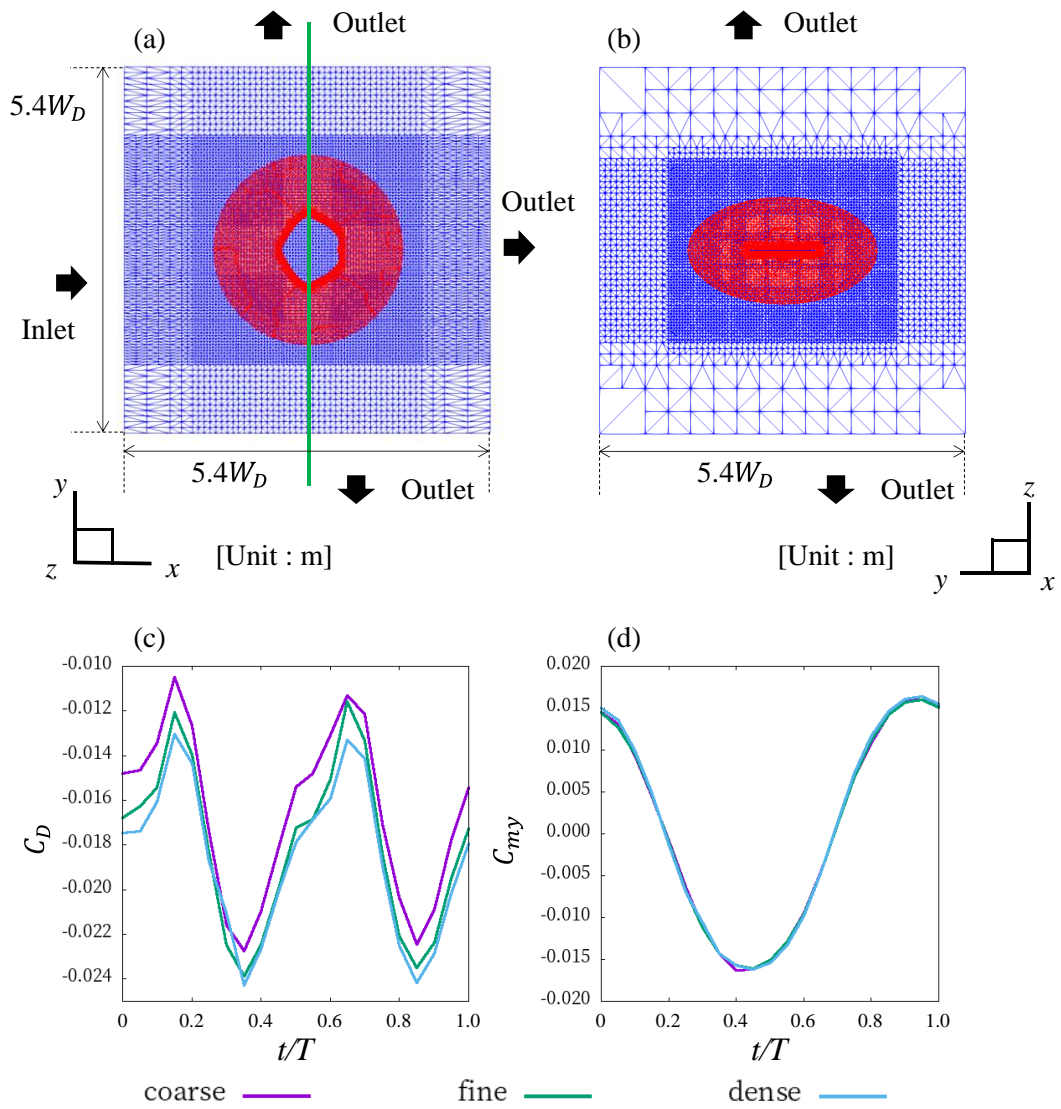


図 18 解析領域と格子依存度調査.

(a) 流体領域全体の冠状面におけるメッシュ. (b) (a)の緑の線における流体領域の正面断面. 赤い領域はオーバーセット領域. (c), (d) *D. matsubarai* の瞬時抗力係数と y 軸周りのモーメント係数の coarse メッシュ、fine メッシュ、dense メッシュの比較.

4-3 結果

4-3-1 モデル表面に作用する力

胸鰭動作の位相差がエイに作用する力に与える影響を調べるため、胸鰭動作の位相差を変更した解析を行った。図 19, 20 はそれぞれ、ヤジリエイとホシエイの表面に作用する各軸方向と各軸周りの力である。本研究では x 軸負の方向が進行方向であるため、負の抗力は推力が発生していることを意味している。

ヤジリエイでは位相差が $0.25T$ と $0.75T$ の場合、抗力係数の振幅は小さく、ピークは他の位相条件の 2 倍であった(図 19(a),(d))。一方、ホシエイはヤジリエイほど差がなかった。(図 20(a),(d))。横力係数の振幅はどちらの胸鰭形態においても $0.25T$ と $0.75T$ の差が他の位相条件よりも大きかった。(図 19(b),(e), 図 20(b),(e))。また、 $0T$ と $0.5T$ の場合では 1 周期を通して値がほぼ 0 となった。揚力係数はいずれの胸鰭形態においても位相が $0.5T$ の条件のみ 1 周期を通して値がほぼ 0 となった(図 19(c)(f), 図 20(c)(f))。他の位相条件では振幅は時間とともに変化し、位相条件や胸ビレ形態によって変化の仕方も様々であった。 x 軸周りのモーメント係数は、どちらの胸鰭形態でも位相差 $0T$ の方が他の条件に比べて振幅が小さくなった(図 19(g),(j), 図 20(g),(j))。 y 軸周りのモーメント係数については $0.5T$ の条件の振幅が他の条件の振幅よりも小さくなった(図 19(g),(h), 図 20(g),(h))。 z 軸周りのモーメント係数は $0T$, $0.5T$ の位相差ではどちらの胸鰭形態でも 1 周期を通して値がほぼ 0 となった。一方で $0.25T$ と $0.75T$ の位相差では時間とともに変化した(図 19(b),(e),(i),(l), 図 20(b),(e),(i),(l))。

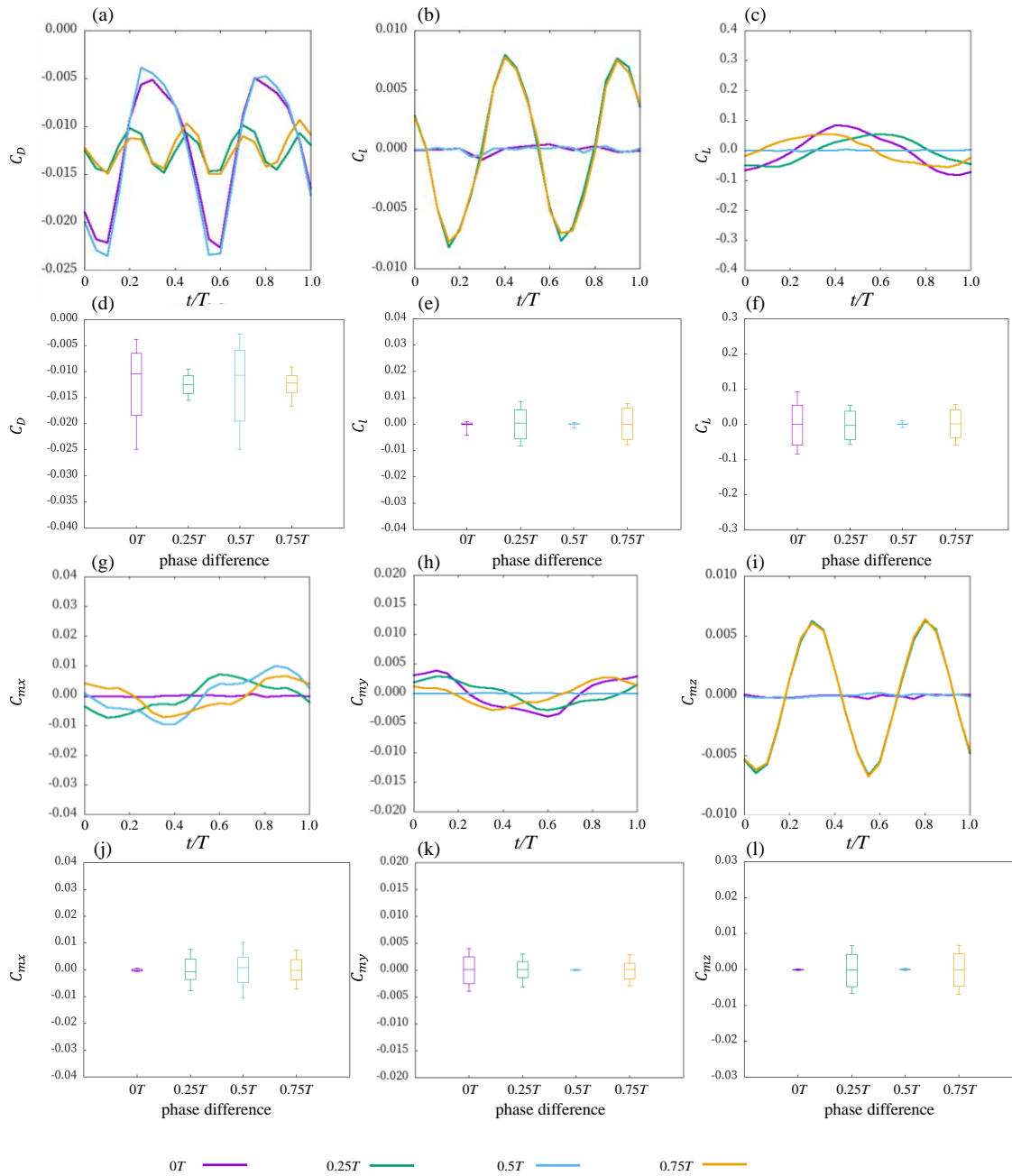


図 19 *D.acutirostra* の直進遊泳における 1 周期中の瞬時力と箱ひげ図。

(a), (d) 抗力係数, (b), (e) 横力係数, (c), (f) 揚力係数, (g), (j) x 軸周りのモーメント係数, (h), (k) y 軸周りのモーメント係数, (i), (l) z 軸周りのモーメント係数。

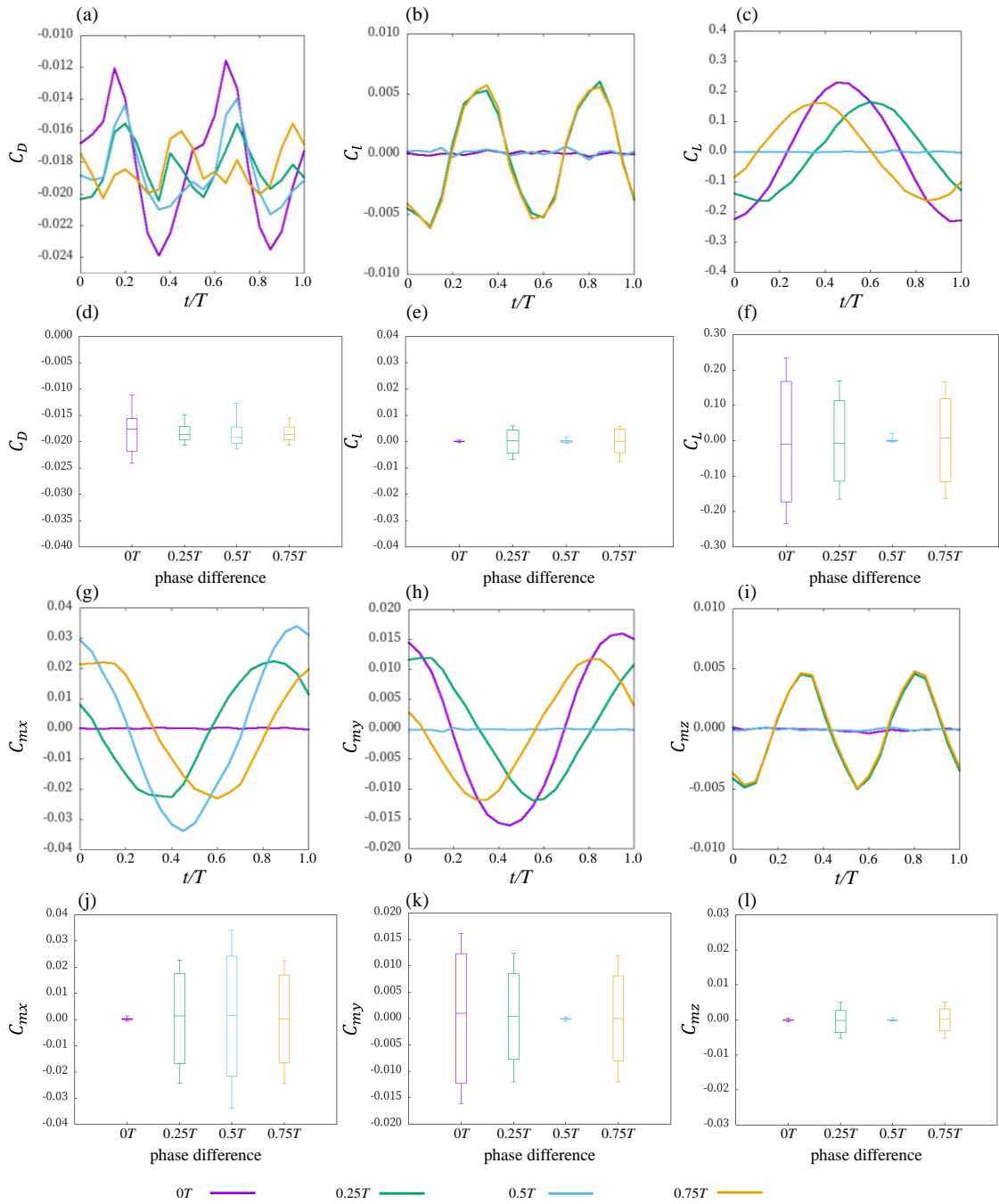


図 20 *D. matsubaraei* の直進遊泳における 1 周期中の瞬時力と箱ひげ図。

(a), (d) 抗力係数, (b), (e) 横力係数, (c), (f) 揚力係数, (g), (j) x 軸周りのモーメント係数, (h), (k) y 軸周りのモーメント係数, (i), (l) z 軸周りのモーメント係数.

4-3-2 渦構造と推進効率

エイの後方にリング状の渦列が形成されていることが確認できた(図 21)。渦構造の様子は先行研究の結果と類似している(Thekkethil et al. 2020)。胸鰭動作に位相差があるため、後方に形成される渦も非対称となっている。また、左右の胸鰭から発生する渦は互いに干渉していなかった。

左右の胸鰭動作の位相差が推進効率に与える影響を表 2 に示す。推進効率は胸鰭形態によって異なったが、どちらの胸鰭形態でも位相差による推進効率の差はみられなかった。推進効率の値は Bottom らの先行研究(22.87%)よりも大きく、Thekkethil らの研究(波長 1.27, アスペクト比 1.0 の条件下で約 38%)に近い値となった(Bottom et al. 2016; Thekkethil et al. 2020)。

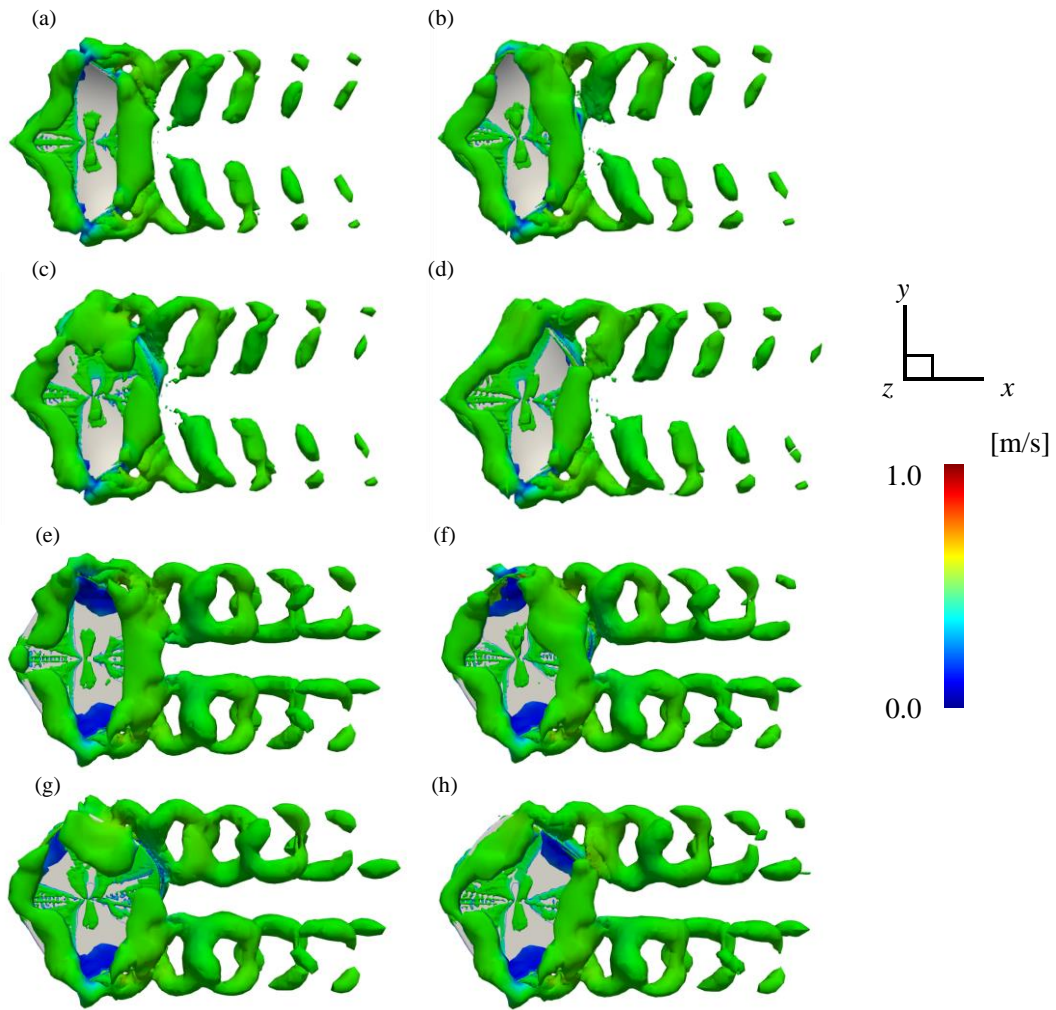


図21 $t=4.98$ における *D. acutirostra* の3次元渦構造. それぞれ位相差が(a)0T, (b)0.25T, (c)0.5T, (d)0.75T. $t=4.98$ における *D. matsubarae* の3次元渦構造. それぞれ位相差が(e)0T, (f)0.25T, (g)0.5T, (h)0.75T.

表2 左右の胸鰭動作の位相差と推進効率の関係 (T は周期)

Scientific name	$0T$	$0.25T$	$0.5T$	$0.75T$
<i>D. acutirostra</i>	42.26%	42.83%	42.83%	42.65%
<i>D. matsubaraii</i>	38.57%	39.20%	39.75%	39.23%

4-4 考察

4-4-1 左右の胸鰭動作の位相差が遊泳能に及ぼす影響

異なる 4 つの位相差の条件で流体解析を行い、各軸方向に作用する力と各軸周りのモーメントを比較した。その結果、左右の胸鰭動作の位相差によってそれぞれの力の振幅と周期が変化することがわかった(図 19, 20)。エイに作用する力の振幅は、遊泳中のエイの体の変動に影響を与えると予想される。したがって、作用する力の振幅が小さければ、遊泳中の体の変動量は小さいと予想される。解析を行った位相条件では 0.5T の位相差が身体の変動を抑えるのに最も適している。これは x 軸周りのモーメントと抗力を除くすべての力の振幅が最も小さくなるためである。一方、0.25T と 0.75T の位相差ではほとんどの力の振幅が他の位相条件よりも大きくなった。力の振幅が大きいとエイの遊泳の操縦性が向上すると予想される。したがって、今回の結果から位相差 0T と 0.5T ではエイの遊泳安定性が向上し、位相差が 0.25T と 0.75T ではエイの遊泳操作性が向上すると予想される。

4-4-2 位相差があることによって作用する力が変化するメカニズム

図 21 に示すように、左右の胸鰭から発生する渦は干渉していない。一方、左右の胸鰭動作の位相差によって、後方に発生する渦構造は異なる。例えば、位相差が $0T$ の場合、左右の渦構造は矢状面で面対象である(図 21(a),(e))。しかし、 $0.5T$ の条件下では左右の渦構造が上下対称となっている(図 21(c),(g))。さらに、 $0.25T$ と $0.75T$ の位相差では、左右の渦が x 軸方向にずれている(図 21(b),(d),(f),(h))。左右の胸鰭動作に位相差があると、左右の胸鰭によって生成される力のタイミングがずれるため、位相差があるとエイに作用する左右の胸鰭の合力が変化したと考えられる。

第5章 総合考察

5-1 本研究で得た成果のまとめ

本博士論文では、軟骨魚類の行動・形態が遊泳能に及ぼす影響を流体解析によって調べた。

第2章では、ギンガメアジとジンベエザメのタンデム遊泳について調べた。その結果、ギンガメアジはジンベエザメとタンデム遊泳を行ったほうが、単独遊泳を行うよりも抗力を低減できることが明らかになった。これまでもタンデム遊泳によって移動コストが削減されることは多くの研究で明らかにされてきているが、今回の事例のように前後の魚類に体長差があるような事例は調べた限りない(Woodcock 1948; Fish and Hui 1991; Weihs 2004; Zhang and Zheng 2009; Marras et al. 2015; Khalid et al. 2016; Verma et al. 2018; Chao et al. 2019)。本研究によって体長差があったとしても前方の魚類の移動コストが削減されることが示唆された。これより、ギンガメアジは移動コストを削減するためにジンベエザメの前方を遊泳していると予想される。

第3章ではサメの尾鰭形態の違いが流体力特性に与える影響について調べた。サメの尾鰭形態の指標として二つのアスペクト比を用い、 AR_L (尾鰭の水平方向長さに対する垂直方向長さの比) が大きい尾鰭形態は推進力と移動コストが高く、 AR_S (尾鰭の長さとおよび高さの積の表面積に対する比) が小さい尾鰭形態は推進効率が高いことがわかった。アスペクト比が異なることによって流体力特性が異なるメカニズムは硬骨魚類同様に前縁角の大きさの違いによる剥離域の大きさの違いであることが示唆された。流体力特性に関しても硬骨魚類の尾鰭形態と同様に、上下非対称であっても移動コストと推力の間にトレードオフの関係があることが示唆された(Webb 1984; Chang et al. 2012)。

第4章では直進遊泳におけるエイの左右の胸鰭動作の位相差が遊泳能に与える影響を調べた。その結果左右の胸鰭動作の位相差は、遊泳の安定性や操縦性に影響を与えるが推進効率(移動コスト)には影響を与えないことが示唆された。BCF法を用いる魚類では姿勢、深度、遊泳軌道の安定化には追加のコストがかかることが知られている(Webb 2002)。エイ特

有の泳動作である rajiform を用いた場合は、左右の胸鰭動作の位相差を調整することによって移動コストを抑えつつ安定性や操縦性を変化させることが可能であることが示唆された(Elsevier B.V. 2023).

冒頭で述べたように硬骨魚類の泳動作・形態のバイオメカニクスの研究に比べて軟骨魚類のバイオメカニクスの研究は観察や動物実験の困難さなどから少ない。また、流体解析などを用いた非侵襲的な手法を用いる場合も、魚類の生物学的な知識と流体力学などの工学的な知識の両方が必要となるため研究が進みにくい分野であると指摘されている(Green et al. 2021)。しかし、生物の形態と行動は、捕食や逃避の成功率、エネルギー収支を介して適応度にまで影響を与えることが指摘されている(Kikuchi 2021; Yoshida et al. 2021)。適応度をあげるためには、繁殖や成長にエネルギーをまわし、その他のエネルギーをなるべく抑える必要がある。特に水中では水の粘性があるため、陸上の生物と比較して移動コストがかかる。そのため、魚類にとって移動コストを抑えることは重要であり、移動コストを含めた流体力特性を調べる事は魚類の生態を理解するうえで有用である(Yoshida et al. 2021)。また、既存の水中ロボットよりも遊泳能が優れている魚類の遊泳メカニズム解明は水中ロボットの高性能化の観点からも注目されている(Moored et al. 2011)。そのため魚類の行動・形態のバイオメカニクスの解明は生態学と工学の両方で重要である。本博士論文では軟骨魚類特有の特徴が流体力特性に及ぼす影響を調べ、軟骨魚類の先行研究や硬骨魚類との違いを示した。本研究結果は流体力学的な視点からの魚類の行動生態や進化過程の理解を深めるとともに、水中ロボットの高性能化への貢献が期待される。

5-2 今後の展望

本研究では、定量的な観察をしておらず、また、生態や系統との関連性を深く議論できていない。エイの位相差の研究では位相差によって安定性や機動性が変わることは示唆できたが、実際のエイがどのような状況下で位相差を使い分けているかまでは明らかにすることができていない。また、サメの尾鰭形態の研究でも生息域との関係について文献をもとに少し議論はしているが、食性や体長、系統関係などのより詳細な生態的特性を考慮することができていない。しかし、実際にエイがどのような場面で位相差のある遊泳をしているかや、サメの食性などは、エネルギー収支(エネルギーを何から得て、何に使っているか)を考えるうえで重要である。今後の研究では、定量的な行動観察やより多くの生態的特性との関係性を調べることで、流体力特性が行動生態や進化プロセスに与える影響を明らかにすることができると考える。

また、本研究では工学応用の提案はしているが、実際にプロトタイプ等を作製し検証するところまでは行うことができていない。今後の研究では実際にプロトタイプを作製し、水中ロボットの性能を向上させることができるのかどうかを検証していきたい。

付録

付録1 Blender を用いた解析モデルの作成

Blender は無料で公式サイトから入手することができるオープンソースのモデリングソフトである(Blender Foundation 2023). 写真から 3D モデルを作成する方法については多くのチュートリアルや書籍, ブログで解説されているため, ここではその要点のみを述べる(Blender Institute 2023; WikiBooks 2023).

まず, 対象の魚類を正面, 側面, 上面から撮影する(図 S1). 次にこれらの写真を Blender に取り込み立方体上のメッシュを作成する(図 S2). 正面, 側面, 上面から見た時に写真とメッシュの外側の点が重なるように, メッシュ上の点を移動させる(図 S3). 写真にメッシュ上の点を重ねる作業が完了したら, 泳いでいるときの動画や写真を見ながら, 細かい部分や鰭などを作成した. 最後に表面が滑らかになるようにメッシュを細分化した.

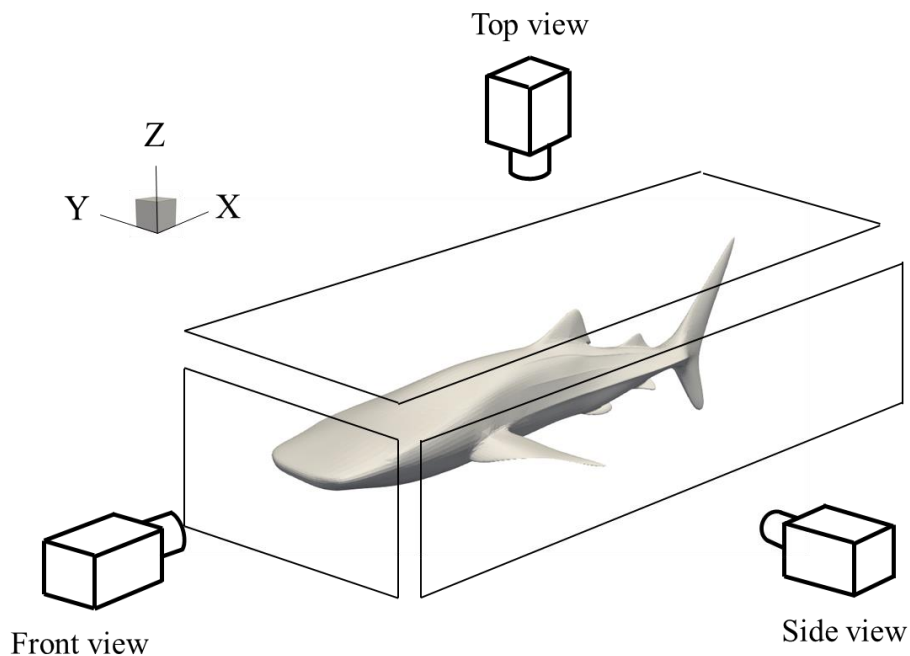
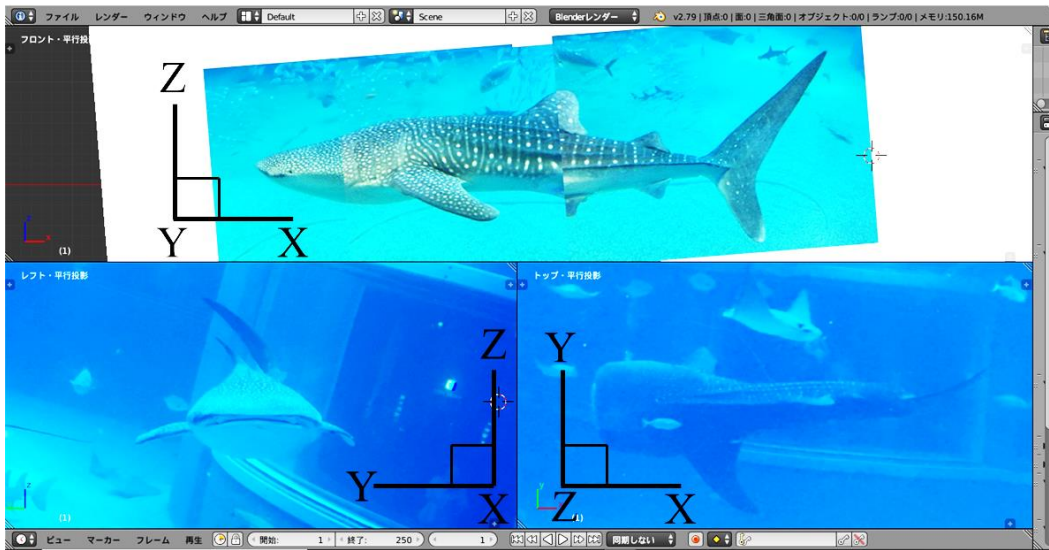


図 S1 三方向からの写真撮影.

Side view

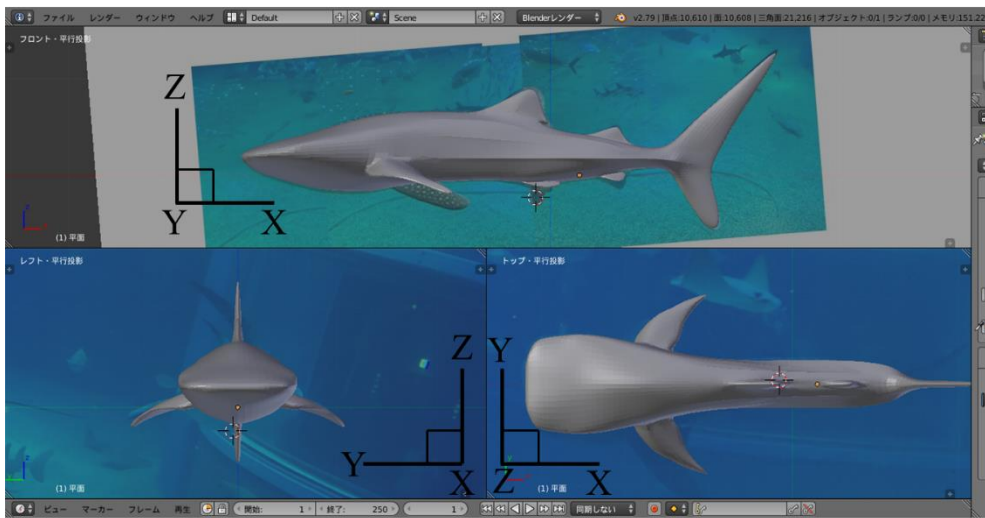


Front view

Top view

図 S2 正面，上面，側面からの写真を取り込んだ様子.

Side view



Front view

Top view

図 S3 モデルを写真に合わせこむ。

付録2 pimpleFoam の妥当性の検証

NACA0012 のモデルは Blender2.79 を用いて作成した。NACA0012 の形状データは Airfoil Tools.com から取得した(Airfoil Tools.com 2023)。作成した NACA0012 の翼弦長は 0.75m, 幅は 3.0m である。

OpenFOAM を用いて NACA0012 モデルの CFD 解析を行い, 抗力を先行研究と比較した(Tomohisa et al. 2007)。支配方程式は連続の式と 3次元非圧縮レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式である。レイノルズ数は次のように定義した：

$$Re = \frac{U_n L_n}{\nu}, \quad (S1)$$

ここで, $U_n(\text{ms}^{-1})$ は一様流速, $L_n(\text{m})$ は NACA0012 の翼弦長, ν は 20°C における水の動粘度である($1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)。乱流モデルには k-omega SST モデルを用いた。解析領域は長さ $16L_n \text{ m}$, 高さ $4L_n \text{ m}$, 幅 $4L_n \text{ m}$ とした。OpenFOAM の snappyHexMesh で六面体メッシュを作成した(図 S4)。解析領域は解析対象周辺を細かいメッシュ, 周辺領域を粗いメッシュで作成し, 解析対象周辺は 5 層の境界層メッシュを作成した。最小メッシュ体積は $1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, 最大メッシュ体積は $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, でありメッシュ総数は 1.7×10^6 である。入口境界は一定流入速度, 出口境界では平均相対圧を 0 Pa とし, モデル表面と周囲の壁は滑りなし壁面とした。

抗力係数は下記のように求めた

$$C_D = \frac{D_n}{\frac{1}{2} \rho U_n^2 L_n d_n}, \quad (S2)$$

ここで, D_n は計算された抗力, d_n は NACA0012 の幅, ρ は 20°C における水の密度である。解析中のタイムステップは最大クーラン数が 0.2 になるように調整した。

レイノルズ数が 1.0×10^5 and 1.0×10^6 の 2 条件で解析を行った結果を図 S5 に示す。抗力係数が収束する 40~50 秒($Re = 1.0 \times 10^5$)と 4~5 秒(1.0×10^6)の間の NACA0012 の平均抗力係数は 0.0161 と 0.0046 であった。先行研究との誤差はそれぞれ約 7.3%と 8.0%である

(Tomohisa et al. 2007).

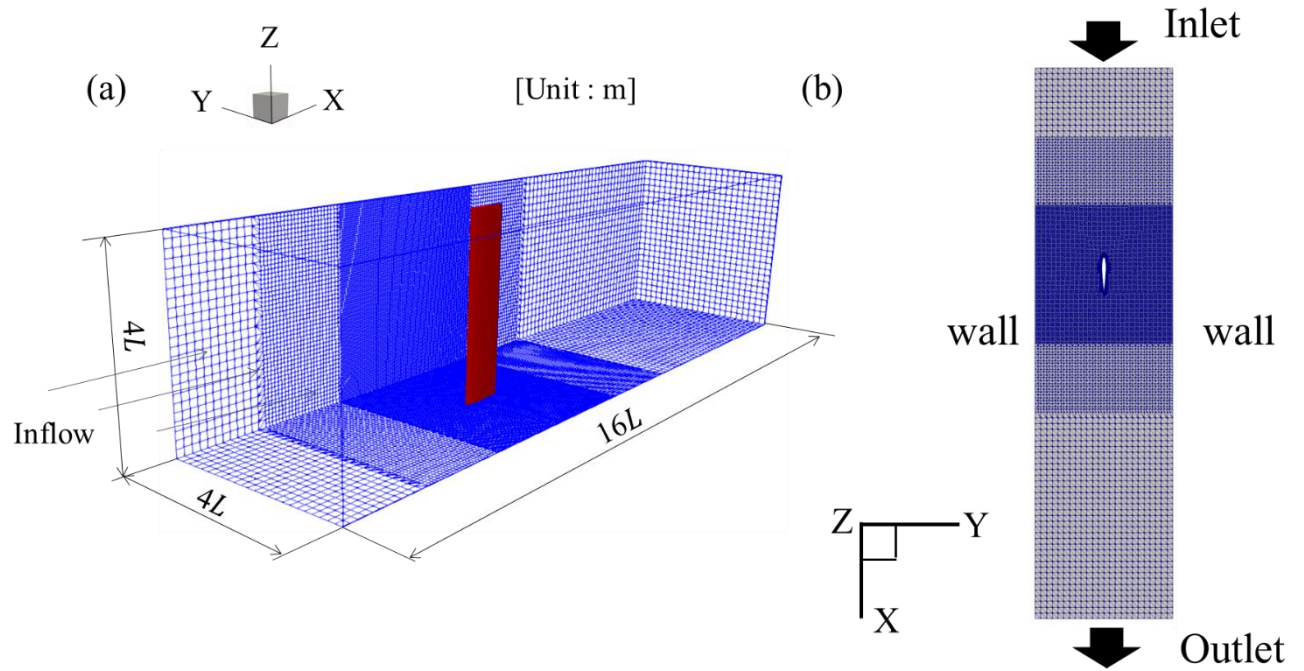


図 S4 解析領域と解析モデル. (a)解析領域と寸法, (b)NACA0012 の z 方向中心断面におけるメッシュ.

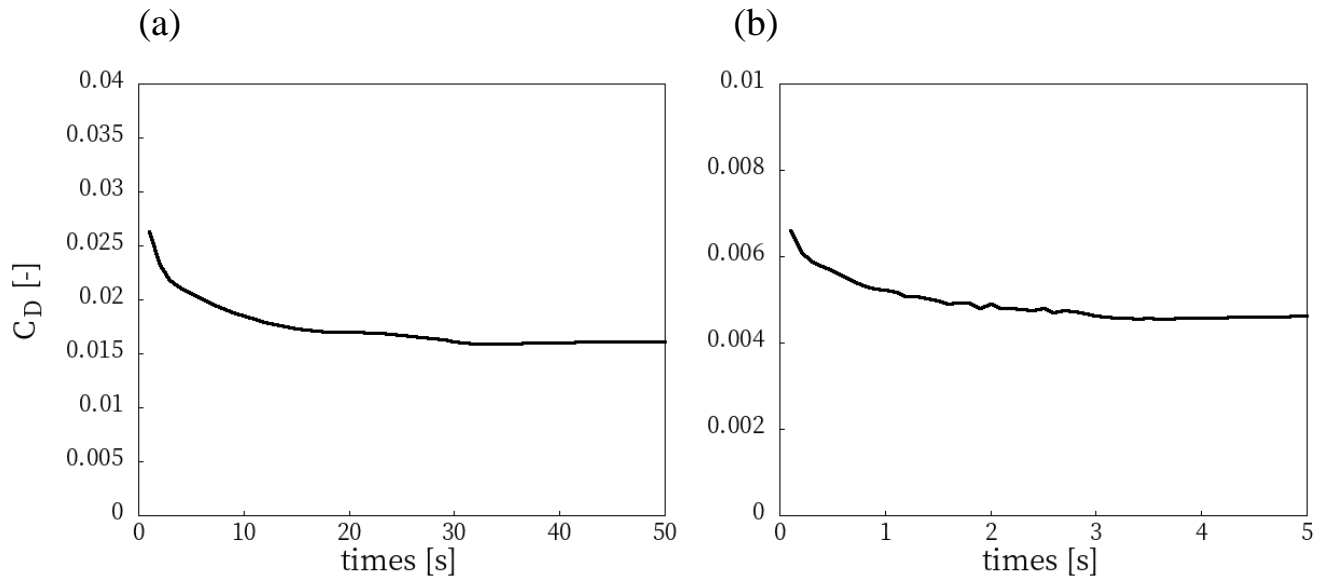


図 S5 抗力係数の結果

(a) レイノルズ数 1.0×10^5 , (b)レイノルズ数 1.0×10^6

付録3 overPimpleDyMFoam の妥当性の検証

本解析手法の妥当性を評価する為に、Zhou らの先行研究と比較する(Zhou et al. 2016). OpenFOAM を用いて流体解析を行い、抗力、横力、揚力、推進効率を計算し、先行研究と比較した(Zhou et al. 2016). 支配方程式は連続の式と 3次元非圧縮レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式である. レイノルズ数は下記のように定義した.

$$Re = \frac{U_1 L_1}{\nu}, \quad (S3)$$

ここで、 U_1 は流入速度、 L_1 は NACA0013 の翼弦長、 ν は 20 °C における水の動粘度である($1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). 解析領域は長さ 1.1m, 高さ 0.5m, 幅 0.8m である(図 S6). ヘキサメッシュを OpenFOAM の snappyHexMesh を用いて作成した. 解析領域は解析対象の周囲を細かいメッシュで、周辺部を粗いメッシュで作成し、解析対象の周囲には 5 層の境界層メッシュを作成した. 最小メッシュ体積は $1.6 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, 最大メッシュ体積は $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, でありメッシュ総数は 5.0×10^6 である. 入口境界は一定流入速度, 出口境界では平均相対圧を 0 Pa とし, モデル表面と周囲の壁は滑りなし壁面とした.

解析に使用したモーションはヒープ $y(t)$ とピッチ $\theta(t)$ を組み合わせたものである. ヒープのモーション式は:

$$y(t) = h_1 \cos(2\pi f_1 t) \quad (S4)$$

ここで、 f_1 は周波数、 t は時間、 h_1 はヒープ運動の振幅である. またピッチング角 θ は次式で与えた:

$$\theta(t) = \alpha(t) + \theta_m(t) \quad (S5)$$

$$\theta_m(t) = \arctan\left(\frac{\dot{y}(t)}{U_1}\right) \quad (S6)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{max} \sin(2\pi f_1 t) \quad (S7)$$

ここで α_{max} は迎角の振幅である.

先行研究と同様に、抗力係数、横力係数、モーメント係数を次式で定義した:

$$C_x(t) = \frac{F_x(t)}{0.5\rho U_1^2 S_n} \quad (S8)$$

$$C_y(t) = \frac{F_y(t)}{0.5\rho U_1^2 S_n} \quad (S9)$$

$$C_m(t) = \frac{M_\theta(t)}{0.5\rho U_1^2 S_n L} \quad (S)$$

ここで ρ は 20°Cの水の密度, $F_x(t)$ は推力, $F_y(t)$ は揚力, $M_\theta(t)$ はトルク, S_n は横方向からの尾鰭モデルの投影面積である.

図 S7 にしめすように, 抗力, 横力, トルクの周期と最大値は先行研究とほぼ一致した. また本解析手法により算出した推進効率 η は 44%であり, 先行研究の解析とは 5%, 実験値とは 9%の誤差があった. 誤差の理由はソルバーの違いや計測誤差によるものと考えられる. しかし, 抗力, 横力, トルクの大きさと周期はほぼ同じであり, 推進効率の誤差は 1 桁であるため, 本手法の妥当性は十分であると考えられる.

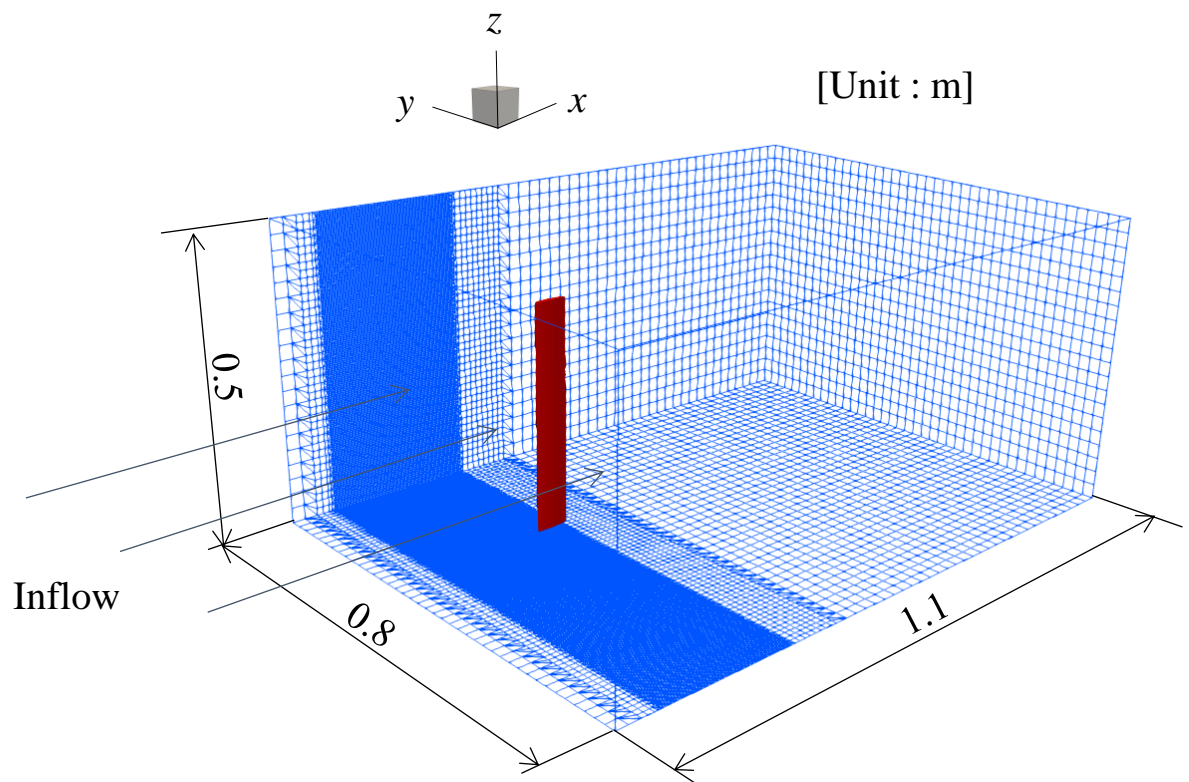


図 S6 解析領域と解析モデル

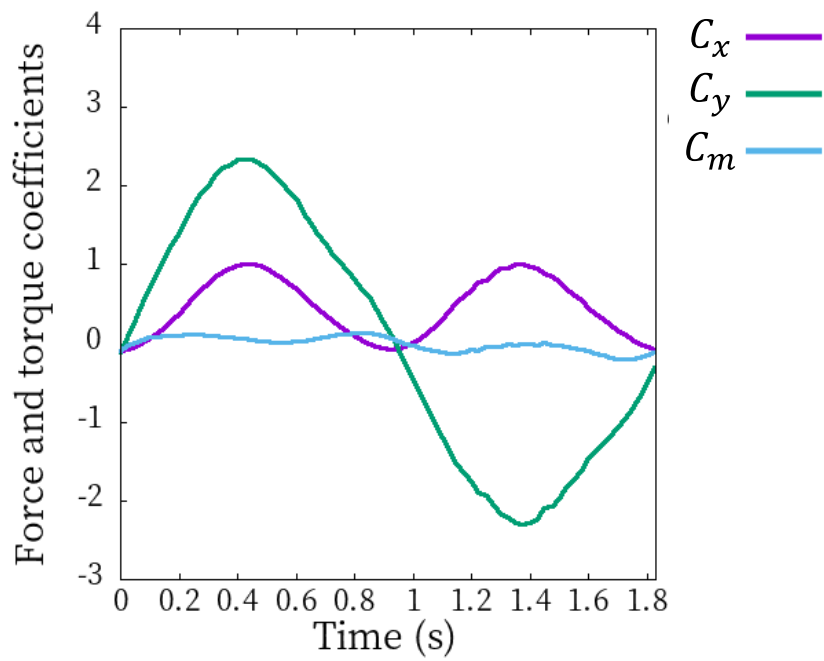


図 S7 抗力係数, 横力係数, モーメント係数の時間変化.

業績リスト

(理工学研究科入学以降, 筆頭のみ)

成果-学術論文

1. Sumikawa, H., Naraoka, Y., Obayashi, Y., Fukue, T., Miyoshi, T. Fluid dynamic properties of shark caudal fin morphology and its relationship to habitats. *Ichthyological research* (2023) DOI: 10.1007/s10228-023-00933-1 Springer Nature より許可を得て掲載
2. Sumikawa, H., Naraoka, Y., Fukue, T., Miyoshi, T. Changes in rays' swimming stability due to the phase difference between left and right pectoral fin movements. *Scientific Reports* 12, 2362 (2022) DOI: 10.1038/s41598-022-05317-5 Springer Nature より許可を得て掲載
3. Sumikawa, H., Miyoshi, T. The pressure drag reduction effect of tandem swimming by *Caranx sexfasciatus* and *Rhincodon typus*. *Ichthyological Research* 69, 132-139 (2022). DOI: 10.1007/s10228-021-00822-5 Springer Nature より許可を得て掲載
4. 澄川太皓, 三好扶, 福江高志, OpenFOAM 内の重合格子ソルバの妥当性についての検証と魚類遊泳解析への適用, オープン CAE 学会論文集, 2, 1 (2020).

成果-国内学会・シンポジウムにおける発表

5. ○澄川太皓, 奈良岡桂和, 三好扶, サメ類の尾ひれ形状と流体力特性の関係, 2022 年度日本魚類学会年会. (査読無)
6. ○澄川太皓, 奈良岡桂和, 三好扶, エイ類の胸ビレ形状のアスペクト比が推力と推進効率へ及ぼす影響, 第 69 回日本生態学会. (査読無)
7. ○澄川太皓, 奈良岡桂和, 福江高志, 三好扶, 魚類の運動機序解明に資する 2 次元での自己推進解析の妥当性の検討, オープン CAE シンポジウム 2021. (査読有)
8. ○澄川太皓, 奈良岡桂和, 三好扶, エイの胸鰭動作の位相差が遊泳能へ及ぼす影響の解

- 明, 2021 年度日本魚類学会年会(ウェブ大会). (査読無)
9. ○澄川太皓, 三好扶, 底生エイの旋回能と流体力特性の関係, 第 43 回エアロ・アクアバイオメカニズム学会. (査読無)
10. ○澄川太皓, 三好扶, 魚類の運動機序解明に資する自己推進解析を目標とした解析の妥当性の検討, オープン CAE・FrontISTR 合同シンポジウム 2020. (査読有, 受賞)
11. ○澄川太皓, 三好扶, 水棲動物の運動機序解明に資する数値解析手法の構築と妥当性検討, 日本機械学会東北支部第 56 期秋季講演会. (査読無)
12. ○澄川太皓, 三好扶, アカエイとの併泳によるロウニンアジの抗力低減効果, 2020 年度日本魚類学会年会(ウェブ大会). (査読無)

成果-受賞

13. 日本学生支援機構 特に優れた業績による返還免除(修士課程：全額免除)(2022)
14. 岩手大学総合科学研究科理工学専攻賞(2022)
15. 岩手大学学生表彰(2022)
16. オープン CAE・FrontISTR 合同シンポジウム 2020 学生優秀発表賞(2020)

成果-助成金

17. 日本学術振興会特別研究員 DC2(2023.4-2025.3)
18. 2022 年度公益財団法人徳洲会国際奨学財団奨学生(2022.4-2023.3)

成果-資格

19. 一般社団法人日本機械学会認定 計算力学技術者熱流体力学分野 2 級

成果-アウトリーチ

20. Ezo ゼミ [特別編] “魚愛”が駆動する科学と相乗効果 発表者(2023.9.26)
21. 金沢工業大学工学部機械工学科専門科目「流体力学 I」特別講義 講師(2023.6.12)
22. 株式会社海遊館生き物サロン 講師 (2022.1.30)

謝辞

本研究は岩手大学三好扶教授(副査)ならびに岩手大学上野和之教授(主査)の指導の下で行われました。著者にこのような機会を与え、ご指導・ご鞭撻を賜った両氏に深く感謝いたします。審査委員である岩手大学柴田貴範教授ならびに副指導教員である岩手大学花原和之教授にはご多忙の中終始親切なご指導・ご鞭撻を賜りました。ここに厚く感謝いたします。

後輩である奈良岡桂和さんと大林祐之介さんには、3年もの間、研究やプログラムのディスカッション、毎朝の論文読みなどに付き合ってくださいました。両氏のおかげで充実した研究生を送ることができました。ここに深く感謝いたします。

株式会社海遊館の西田清徳元館長、村上寛之館長、猪田孝広さん、北谷桂万さん、喜屋武樹さんをはじめとする皆様には魚類の知識に関する助言、動画の撮影、訪問の受け入れなどたくさんのご協力をいただきました。ここに厚く感謝いたします。

金沢工業大学福江高志准教授には学部1年次に研究室を訪問させていただいてから主に流体解析に関する知識を数多くご教示いただき、また、研究相談等もさせていただきました。ここに深く感謝いたします。

北海道大学小泉逸郎准教授と小泉研究室の皆様には学術振興会特別研究員の申請書の添削をはじめ、毎週のゼミへの参加など大変お世話になりました。皆様のおかげで生態学的な知識を学ばせていただいたり、同世代の活動・研究を知ったりすることができ、大変刺激を受けました。ここに厚く感謝いたします。

引用文献

- Airfoil Tools.com (2023) NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il).
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- Bamba T, Fukui T, Morinishi K (2021) Numerical study on the effects of aspect ratio of two types of fin folds on the propulsion performance by fish larvae's swimming simulation. *J Fluid Sci Technol* 16:JFST0017–JFST0017
- Blender Foundation (2023) blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software. <https://www.blender.org/>
- Blender Institute (2023) Training - Blender Cloud. <https://cloud.blender.org/training/>
- Borazjani I, Daghooghi M (2013) The fish tail motion forms an attached leading edge vortex. *Proc Biol Sci* 280:20122071
- Borazjani I, Sotiropoulos F, Tytell ED, Lauder GV (2012) Hydrodynamics of the bluegill sunfish C-start escape response: three-dimensional simulations and comparison with experimental data. *J Exp Biol* 215:671–684
- Bottom RG II, Borazjani I, Blevins EL, Lauder GV (2016) Hydrodynamics of swimming in stingrays: numerical simulations and the role of the leading-edge vortex. *J Fluid Mech* 788:407–443
- Breder CM (1926) The locomotion of fishes. *Zoologica* 4:159–291
- Caiger PE, Croq C, Clements KD (2021) Environmentally induced morphological variation in the temperate reef fish, *Forsterygion lapillum* (F. Tripterygiidae). *Mar Biol* 168:
- Chang X, Zhang L, He X (2012) Numerical study of the thunniform mode of fish swimming with different Reynolds number and caudal fin shape. *Comput Fluids* 68:54–70
- Chao L-M, Pan G, Zhang D, Yan G-X (2019) On the thrust generation and wake structures of two travelling-wavy foils. *Ocean Eng* 183:167–174
- Compagno LJV (1990) Alternative life-history styles of cartilaginous fishes in time and space. *Environ Biol Fishes* 28:33–75
- Crofts SB, Shehata R, Flammang BE (2019) Flexibility of heterocercal tails: What can the functional morphology of shark tails tell us about ichthyosaur swimming? *Integr Org Biol* 1:obz002

- Cui Z, Yang Z, Shen L, Jiang HZ (2018) Complex modal analysis of the movements of swimming fish propelled by body and/or caudal fin. *Wave Motion* 78:83–97
- Di Santo V, Blevins EL, Lauder GV (2017) Batoid locomotion: effects of speed on pectoral fin deformation in the little skate, *Leucoraja erinacea*. *J Exp Biol* 220:705–712
- Di Santo V, Goerig E, Wainwright DK, Akanyeti O, Liao JC, Castro-Santos T, Lauder GV (2021) Convergence of undulatory swimming kinematics across a diversity of fishes. *Proc Natl Acad Sci U S A* 118:e2113206118
- Downie AT, Leis JM, Cowman PF, McCormick MI, Rummer JL (2021) The influence of habitat association on swimming performance in marine teleost fish larvae. *Fish Fish (Oxf)* 22:1187–1212
- Elsevier B.V. (2023) Rajiformes. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/rajiformes>
- Farina SC, Summers AP (2015) Biomechanics: Boxed up and ready to go. *Nature* 517:274–275
- Fernando AA (2010) *Dasyatis acutirostra* (Nashida & Nakaya, 1988) NUEVO REGISTRO DE RAYA DEL GÉNERO DASYATIS EN AGUAS ECUATORIANAS.
- Fish Base (2023) Thumbnails Summary. <https://www.fishbase.se/photos/thumbnaillsummary.php?ID=6381>
- Fish FE, Hui CA (1991) Dolphin swimming—a review. *Mamm Rev* 21:181–195
- Fish FE, Schreiber CM, Moored KW, Liu G, Dong H, Bart-Smith H (2016) Hydrodynamic Performance of Aquatic Flapping: Efficiency of Underwater Flight in the Manta. *Aerospace* 3:20
- FishBaseTeam (2023a) Search FishBase. <https://fishbase.mnhn.fr/search.php?lang=Japanese>
- FishBaseTeam (2023b) *Ginglymostoma cirratum* summary page. <https://www.fishbase.se/summary/Ginglymostoma-cirratum.html>
- Flammang BE, Lauder GV, Troolin DR, Strand T (2011) Volumetric imaging of shark tail hydrodynamics reveals a three-dimensional dual-ring vortex wake structure. *Proc Biol Sci* 278:3670–3678

- Fontes J, Castellano-González G, Macena BCL, Afonso P (2023) Hitchhiking to the abyss. *Ecol Evol* 13:e10126
- Freudiger A, Josi D, Thünken T, Herder F, Flury JM, Marques DA, Taborsky M, Frommen JG (2021) Ecological variation drives morphological differentiation in a highly social vertebrate. *Funct Ecol* 35:2266–2281
- Gabler-Smith MK, Wainwright DK, Wong GA, Lauder GV (2021) Dermal Denticle Diversity in Sharks: Novel Patterns on the Interbranchial Skin. *Integr Org Biol* 3:obab034
- Gao T, Lu X-Y (2008) Insect normal hovering flight in ground effect. *Phys Fluids* (1994) 20:087101
- Green PA, McHenry MJ, Rico-Guevara A (2021) Mechanoethology: The Physical Mechanisms of Behavior. *Integr Comp Biol* 61:613–623
- Huang Q, Zhang D, Pan G (2020) Computational Model Construction and Analysis of the Hydrodynamics of a *Rhinoptera Javanica*. *IEEE Access* 8:30410–30420
- Ingleby SJ, Camarillo H, Willis H, Johnson JB (2016) Repeated evolution of local adaptation in swimming performance: population-level trade-offs between burst and endurance swimming in *Brachyrhaphis* freshwater fish. *Biol J Linn Soc Lond* 119:1011–1026
- Iosilevskii G, Papastamatiou YP (2016) Relations between morphology, buoyancy and energetics of requiem sharks. *R Soc Open Sci* 3:160406
- Kajiura SM, Sebastian AP, Tricas TC (2000) Dermal Bite Wounds as Indicators of Reproductive Seasonality and Behaviour in the Atlantic Stingray, *Dasyatis sabina*. *Environ Biol Fishes* 58:23–31
- Khalid MSU, Akhtar I, Dong H (2016) Hydrodynamics of a tandem fish school with asynchronous undulation of individuals. *J Fluids Struct* 66:19–35
- Kikuchi DM (2021) Integration of biomechanics into ecology. *Japanese Journal of Ecology* 72:55–62
- Kim SH, Shimada K, Rigsby CK (2013) Anatomy and evolution of heterocercal tail in lamniform sharks. *Anat Rec (Hoboken)* 296:433–442
- Krishnadas A, Ravichandran S, Rajagopal P (2018) Analysis of biomimetic caudal fin shapes for optimal propulsive efficiency. *Ocean Eng* 153:132–142

- Langerhans RB (2009) Morphology, performance, fitness: functional insight into a post-Pleistocene radiation of mosquitofish. *Biol Lett* 5:488–491
- Langerhans RB, Layman CA, Shokrollahi AM, DeWitt TJ (2004) Predator-driven phenotypic diversification in *Gambusia affinis*. *Evolution* 58:2305–2318
- Lauder GV (2000) Function of the Caudal Fin During Locomotion in Fishes: Kinematics, Flow Visualization, and Evolutionary Patterns. *azoo* 40:101–122
- Lauder GV, Di Santo V (2015) 6 - Swimming Mechanics and Energetics of Elasmobranch Fishes. In: Shadwick R.E., Farrell A.P., Brauner C.J. (eds) *Fish Physiology*. Academic Press, pp 219–253
- Li G, Chen X, Zhou F, Liang Y, Xiao Y, Cao X, Zhang Z, Zhang M, Wu B, Yin S, Xu Y, Fan H, Chen Z, Song W, Yang W, Pan B, Hou J, Zou W, He S, Yang X, Mao G, Jia Z, Zhou H, Li T, Qu S, Xu Z, Huang Z, Luo Y, Xie T, Gu J, Zhu S, Yang W (2021a) Self-powered soft robot in the Mariana Trench. *Nature* 591:66–71
- Li G, Liu H, Müller UK, Voeselek CJ, van Leeuwen JL (2021b) Fishes regulate tail-beat kinematics to minimize speed-specific cost of transport. *Proc Biol Sci* 288:20211601
- Li G, Wong T-W, Shih B, Guo C, Wang L, Liu J, Wang T, Liu X, Yan J, Wu B, Yu F, Chen Y, Liang Y, Xue Y, Wang C, He S, Wen L, Tolley MT, Zhang A-M, Laschi C, Li T (2023) Bioinspired soft robots for deep-sea exploration. *Nat Commun* 14:7097
- Li N, Liu H, Su Y (2017) Numerical study on the hydrodynamics of thunniform bio-inspired swimming under self-propulsion. *PLoS One* 12:e0174740
- Li Q, Zhang J, Hong J, Hu D, Yang Y, Guo S (2021c) A novel undulatory propulsion strategy for underwater robots. *J Bionic Eng* 18:812–823
- Low KH (2009) Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots. *Mechanism and Machine Theory* 44:615–632
- Lowe C (1996) Kinematics and critical swimming speed of juvenile scalloped hammerhead sharks. *J Exp Biol* 199:2605–2610
- Macias MM, Souza IF, Brasil Junior ACP, Oliveira TF (2020) Three-dimensional viscous wake flow in fish swimming - A CFD study. *Mech Res Commun* 107:103547
- Marras S, Killen SS, Lindström J, McKenzie DJ, Steffensen JF, Domenici P (2015) Fish

- swimming in schools save energy regardless of their spatial position. *Behav Ecol Sociobiol* 69:219–226
- Menter F, Kuntz M, Langtry R (2003) Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Heat and Mass Transfer* 4:625–632
- Moored KW, Fish FE, Kemp TH, Bart-Smith H (2011) Batoid fishes: Inspiration for the next generation of underwater robots. *Mar Technol Soc J* 45:99–109
- Moran CJ, Gerry SP, O’Neill MW, Rzucidlo CL, Gibb AC (2018) Behavioral and physiological adaptations to high-flow velocities in Southwestern native chubs (*Gilaspp.*). *J Exp Biol* 221:jeb158972
- Motta PJ, Maslanka M, Hueter RE, Davis RL, de la Parra R, Mulvany SL, Habegger ML, Strother JA, Mara KR, Gardiner JM, Tyminski JP, Zeigler LD (2010) Feeding anatomy, filter-feeding rate, and diet of whale sharks *Rhincodon typus* during surface ram filter feeding off the Yucatan Peninsula, Mexico. *Zoology* 113:199–212
- Mysa RC, Valdivia y Alvarado P (2021) The effect of batoid inspired undulating motions on the propulsive forces of a circular planform. *Phys Fluids* (1994) 33:061901
- Ocean S (2014) Sharks. <https://ocean.si.edu/ocean-life/sharks-rays/sharks>
- OpenCFD (2023) OpenFOAM® - Official home of The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. <https://www.openfoam.com/>
- OpenCFD Ltd (2022a) OpenFOAM: User Guide: k-omega Shear Stress Transport (SST). <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>
- OpenCFD Ltd (2022b) OpenFOAM: User Guide: omegaWallFunction. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-wall-turbulence-omegaWallFunction.html>
- OpenCFD Ltd (2022c) OpenFOAM: User Guide: snappyHexMesh. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-meshing-snappyhexmesh.html>
- Park SG, Kim B, Sung HJ (2017) Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin near the ground. *Phys Fluids* (1994) 29:051902

- Payne NL, Iosilevskii G, Barnett A, Fischer C, Graham RT, Gleiss AC, Watanabe YY (2016) Great hammerhead sharks swim on their side to reduce transport costs. *Nat Commun* 7:12289
- Quinn DB, Lauder GV, Smits AJ (2014) Flexible propulsors in ground effect. *Bioinspir Biomim* 9:036008
- Riedeberger D, Rist U (2012) Numerical Simulation of Laminar-Turbulent Transition on a Dolphin Using the γ -Re θ Model. *High Performance Computing in Science and Engineering '11* 379–391
- Rosenberger LJ (2001) Pectoral fin locomotion in batoid fishes: undulation versus oscillation. *J Exp Biol* 204:379–394
- Russo RS, Blemker SS, Fish FE, Bart-Smith H (2015) Biomechanical model of batoid (skates and rays) pectoral fins predicts the influence of skeletal structure on fin kinematics: implications for bio-inspired design. *Bioinspir Biomim* 10:046002
- Scaradozzi D, Palmieri G, Costa D, Pinelli A (2017) BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency. *Ocean Eng* 130:437–453
- Schwartz FJ (2007) TAIL SPINE CHARACTERISTICS OF STINGRAYS (ORDER MYLIOBATIFORMES) FREQUENTING THE FAO FISHING AREA 61 (20°N 120° E - 50°N 150° E) OF THE NORTHWEST PACIFIC OCEAN. *THE RAFFLES BULLETIN OF ZOOLOGY Suppl.* 14:121–130
- scikit-learn developers (2023a) `sklearn.linear_model.LinearRegression`. https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html
- scikit-learn developers (2023b) `sklearn.preprocessing.PolynomialFeatures`. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.PolynomialFeatures.htm>
- 1
- Shahzad A, Tian F-B, Young J, Lai JCS (2016) Effects of wing shape, aspect ratio and deviation angle on aerodynamic performance of flapping wings in hover. *Phys Fluids* 28:111901
- Shi G, Xiao Q (2021) Numerical investigation of a bio-inspired underwater robot with skeleton-reinforced undulating fins. *Eur J Mech B Fluids* 87:75–91

- Simons JR (1970) The direction of the thrust produced by the heterocercal tails of two dissimilar elasmobranchs: The Port Jackson shark, *Heterodontus portusjacksoni* (Meyer), and the piked dogfish, *Squalus Megalops* (Macleay). *J Exp Biol* 52:95–107
- Stein RW, Mull CG, Kuhn TS, Aschliman NC, Davidson LNK, Joy JB, Smith GJ, Dulvy NK, Mooers AO (2018) Global priorities for conserving the evolutionary history of sharks, rays and chimaeras. *Nature Ecology & Evolution* 2:288–298
- Sternes PC, Shimada K (2020) Body forms in sharks (Chondrichthyes: Elasmobranchii) and their functional, ecological, and evolutionary implications. *Zoology* 140:125799
- Su G, Shen H, Li N, Zhu Y, Su Y (2021) Numerical investigation of the hydrodynamics of stingray swimming under self-propulsion. *J Fluids Struct* 106:103383
- Su J-Y, Tang J-H, Wang C-H, Yang J-T (2013) A numerical investigation on the ground effect of a flapping-flying bird. *Phys Fluids* (1994) 25:093101
- Tanaka H, Li G, Uchida Y, Nakamura M, Ikeda T, Liu H (2019) Measurement of time-varying kinematics of a dolphin in burst accelerating swimming. *PLoS One* 14:e0210860
- Thekkethil N, Sharma A, Agrawal A (2020) Three-dimensional biological hydrodynamics study on various types of batoid fishlike locomotion. *Phys Rev Fluids* 5:
- Thomson KS, Simanek DE (1977) Body Form and Locomotion in Sharks. *Integr Comp Biol* 17:343–354
- Tokić G, Yue DKP (2012) Optimal shape and motion of undulatory swimming organisms. *Proc Biol Sci* 279:3065–3074
- Tomohisa O, Yusuke N, Tatsuo M (2007) Nonlinearity of the Aerodynamic Characteristics of NACA0012 Aerofoil at Low Reynolds Numbers. *J Jpn Soc Aeronaut Space Sci* 55:439–445
- Tytell ED, Standen EM, Lauder GV (2008) Escaping Flatland: three-dimensional kinematics and hydrodynamics of median fins in fishes. *J Exp Biol* 211:187–195
- Van Wassenbergh S, van Manen K, Marcroft TA, Alfaro ME, Stamhuis EJ (2015) Boxfish swimming paradox resolved: forces by the flow of water around the body promote manoeuvrability. *J R Soc Interface* 12:20141146
- Verma S, Novati G, Koumoutsakos P (2018) Efficient collective swimming by harnessing

- vortices through deep reinforcement learning. *Proc Natl Acad Sci U S A* 115:5849–5854
- Wang J, Wainwright DK, Lindengren RE, Lauder GV, Dong H (2020) Tuna locomotion: a computational hydrodynamic analysis of finlet function. *J R Soc Interface* 17:20190590
- Webb PW (1984) Form and Function in Fish Swimming. *Scientific American* 251:72–83
- Webb PW (1994) The biology of fish swimming. *The Mechanics and Physiology of Animal Swimming*. Cambridge University Press, pp 45–62
- Webb PW (2002) Control of posture, depth, and swimming trajectories of fishes. *Integr Comp Biol* 42:94–101
- Weih D (2004) The hydrodynamics of dolphin drafting. *J Biol* 3:8
- WikiBooks (2023) Blender 3D: Noob to Pro/Modeling a Wolf from Guide Images. https://en.wikibooks.org/wiki/Blender_3D:_Noob_to_Pro/Modeling_a_Wolf_from_Guide_Images
- Wilga CD, Lauder GV (2002) Function of the heterocercal tail in sharks: quantitative wake dynamics during steady horizontal swimming and vertical maneuvering. *J Exp Biol* 205:2365–2374
- Wilga CD, Lauder GV (2004) Biomechanics: hydrodynamic function of the shark's tail. *Nature* 430:850
- Witt WC, Wen L, Lauder GV (2015) Hydrodynamics of C-Start Escape Responses of Fish as Studied with Simple Physical Models. *Integr Comp Biol* 55:728–739
- Woodcock AH (1948) The Swimming of Dolphins. *Nature* 161:602–602
- Wu J-Z, Ma H-Y, Zhou M-D (2010) *Vorticity and Vortex Dynamics*. Springer, Berlin, Germany
- Yang S-B, Qiu J, Han X-Y (2009) Kinematics modeling and experiments of pectoral oscillation propulsion robotic fish. *J Bionic Eng* 6:174–179
- Yeh PD, Alexeev A (2016) Effect of aspect ratio in free-swimming plunging flexible plates. *Comput Fluids* 124:220–225

- Yoshida MA, Abe TK, Kikuchi DM, Kinoshita C, Nakamura I (2021) Energy constraints and strategies in flying and swimming animals. *Jap J Ecol* 72:95–107
- Zhang J-D, Sung HJ, Huang W-X (2020) Specialization of tuna: A numerical study on the function of caudal keels. *Phys Fluids* (1994) 32:111902
- Zhang N, Zheng ZC (2009) Flow/pressure characteristics for flow over two tandem swimming fish. *Comput Fluids* 38:1059–1064
- Zhao Z, Dou L (2019) Effects of the structural relationships between the fish body and caudal fin on the propulsive performance of fish. *Ocean Eng* 186:106117
- Zhou K, Liu J, Chen W (2016) Numerical study on hydrodynamic performance of bionic caudal fin. *Appl Sci (Basel)* 6:15

要旨

魚類にとって遊泳は捕食を回避し、採餌や繁殖を行うために不可欠な行動である。従来、遊泳の進化機構や生態の研究では形態のみから行動や遊泳能が推察されることが多かった。しかし、近年、力学的な視点を取り入れて、行動や遊泳能と生態との関係を明らかにしようとする研究が展開されている。また、魚類は高速旋回や高速遊泳といった既存の水中ロボットよりも優れた遊泳能を持っているため魚類の遊泳メカニズムの解明は水中ロボットなどの工学応用の観点からも注目されている。

魚類の中でもサメやエイなどの軟骨魚類は淡水、沿岸から遠洋、深海まで、ほとんどの生息域において高次捕食者である。このように軟骨魚類が繁栄してきた理由の一つは、その運動器官の多様性にあると考えられている。軟骨魚類は泳法や形態、生息域が多様であることから生態と行動・形態との関係を調べるうえでは理想的なグループであると考えられる。また、軟骨魚類のほとんどは硬骨魚類と異なり浮袋を有していないため、負の浮力を持っている。さらに、軟骨は硬骨よりも軽いため、軟骨魚類は少ないエネルギーで長距離を泳ぐ事ができるといわれている。このため軟骨魚類に求められる遊泳能は硬骨魚類のものとは異なると予想される。しかし、絶滅危惧種や体長が大きいものが多く、動物実験を行うことが困難であることなどから軟骨魚類の遊泳能に関する研究は硬骨魚類などに比べて進んでいないのが現状である。

そこで本博士論文では軟骨魚類の行動・形態が遊泳能に及ぼす影響を流体解析によって調べた。第2章では、ギンガメアジとジンベエザメのタンデム遊泳について調べた。その結果、ギンガメアジはジンベエザメとタンデム遊泳を行ったほうが、単独遊泳を行うよりも抗力を低減できることが明らかになった。これまでもタンデム遊泳によって移動コストが削減されることは多くの研究で明らかにされてきているが、今回の事例のように前後の魚類に体長差があるような事例は調べた限りない。本研究によって体長差があったとしても前方の魚類の移動コストが削減されることが示唆された。これより、ギンガメアジは移動コス

トを削減するためにジンベエザメの前方を遊泳していると予想される。

3章ではサメの尾鰭形態の違いが流体力特性に与える影響について調べた。サメの尾鰭形態の指標として二つのアスペクト比を用い、 AR_L (尾鰭の水平方向長さに対する垂直方向長さの比) が大きい尾鰭形態は推進力と移動コストが高く、 AR_S (尾鰭の長さとお高さの積の表面積に対する比) が小さい尾鰭形態は推進効率が高いことがわかった。アスペクト比が異なることによって流体力特性が異なるメカニズムは硬骨魚類同様に前縁角の大きさの違いによる剥離域の大きさの違いであることが示唆された。流体力特性に関しても硬骨魚類の尾鰭形態と同様に、上下非対称であっても移動コストと推力の間にトレードオフの関係があることが示唆された。

第4章では直進遊泳におけるエイの左右の胸鰭動作の位相差が遊泳能に与える影響を調べた。その結果左右の胸鰭動作の位相差は、遊泳の安定性や操縦性に影響を与えるが推進効率(移動コスト)には影響を与えないことが示唆された。BCF法を用いる魚類では姿勢、深度、遊泳軌道の安定化には追加のコストがかかる事が知られている。エイ特有の泳動作である Rajiform を用いた場合は、左右の胸鰭動作の位相差を調整することによって移動コストを抑えつつ安定性や操縦性を変化させる事が可能であることが示唆された。

本博士論文では軟骨魚類特有の特徴が流体力特性に及ぼす影響を調べ、軟骨魚類の先行研究や硬骨魚類値の違いをエネルギー収支の観点から示した。生物の形態と行動は、捕食や逃避の成功率、エネルギー収支を介して適応度にまで影響を与えることが指摘されている。適応度をあげるためには、繁殖や成長にエネルギーをまわし、その他のエネルギーをなるべく抑える必要がある。特に水中では水の粘性があるため、陸上の生物と比較して移動コストがかかる。そのため、魚類にとって移動コストを抑えることは重要であり、移動コストを含めた流体力特性を調べる事は魚類の生態を理解するうえで有用である。また、既存の水中ロボットよりも遊泳能が優れている魚類の遊泳メカニズム解明は水中ロボットの高性能化の観点からも注目されている。そのため魚類の行動・形態のバイオメカニクスの解明は生態学

と工学の両方で重要である。本博士論文では軟骨魚類特有の特徴が流体力特性に及ぼす影響を調べ、軟骨魚類の先行研究や硬骨魚類との違いを示した。本研究結果は流体力学的な視点からの魚類の行動生態や進化過程の理解を深めるとともに、水中ロボットの高性能化への貢献が期待される。