

<b>氏名</b>	すみかわ ひろあき 澄川 太皓
本籍（国籍）	広島県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第22号
学位授与年月日	令和6年 3月22日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科システム創成工学専攻
<b>学位論文 題目</b>	<b>魚類の行動・形態が遊泳能に及ぼす影響</b>
学位審査委員	主査 教授 上野 和之 副査 教授 柴田 貴範 副査 教授 三好 扶

## 論文内容の要旨

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、ARL（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、ARS（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。

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变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。

## 論文審査結果の要旨

魚類の遊泳能は、進化機構や生態の研究において影響因子の1つとして考慮さ

れてきた。しかし観察から得られる遊泳能に関する知識には限界があり，従来の研究では形態や生態から遊泳能が推察されることが多かった。魚類は硬骨魚類とサメやエイなどの軟骨魚類とに大別され，特に後者は高次捕食者であり広範に生息域が分布するなど多様性に富む。またその泳動作や形態も多様であり，生態と行動・形態との関係性を知る上で理想的と言える。しかしながら，軟骨魚類の多くは絶滅危惧種や体長が大きいため動物実験を行うことが困難である。また，遊泳能は(1)遊泳時の移動コスト，(2)遊泳時の推進効率，(3)遊泳時の安定性，(4)遊泳時の操縦性と定義するが，硬骨魚類の遊泳能に関する研究に比べ，軟骨魚類の遊泳能に関する報告例は極めて少ないのが現状である。本学位論文は，近年の数値流体力学の発展によって可能になった解析技術を使って，軟骨魚類の遊泳能を力学的に明らかにしている。さらにその結果を使って，軟骨魚類の遊泳能と生態の関係の理解を深める考察を展開している。

本論文は全体で5章から構成され，第1章は序論であり，過去の研究例と本研究の位置付けが述べられている。

第2章ではギンガメアジとジンベエザメのタンデムについて遊泳行動・形態が遊泳能に及ぼす影響を流体解析によって調べた。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を明らかにした。このことから，ギンガメアジは遊泳能のうち移動コストを低減するためにジンベエザメの前方を遊泳すると示唆され，流体力学的効果がギンガメアジの生態に大きな影響を与えていることを示す証拠を提示した。

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（アスペクト比）によって流体力特性が異なることを示した。特に，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，尾鰭の長さとお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を明らかにした。この結果から尾鰭形状は遊泳能の移動コストや推進効率に影響を与えることが示され，また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を示唆する議論を展開した。

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を示した。特に，エイ特有の泳動作である Rajiform の場合は，左右の胸鰭動作の位相差を調整することによって遊泳能のうち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を示した。

第5章は総合考察であり，得られた成果をまとめ，今後の展望について述べている。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と魚類の遊泳能の関係性を調べる事は，魚類の行動や生態を理解するうえで有用と期待できる。そして，軟骨魚類特有の特徴が流体力特性に及ぼす

影響を調べ、軟骨魚類と硬骨魚類との違いをエネルギー収支の観点から示したことは、この分野の発展に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

#### **原著論文名（2編を記載）**

Changes in rays' swimming stability due to the phase difference between left and right pectoral fin movements,

Sumikawa, H., Naraoka, Y., Fukue, T., Miyoshi, T.,

Scientific Reports, (12. 1, 2362, 1-12), February 2022

Fluid dynamic properties of shark caudal fin morphology and its relationship to habitats,

Sumikawa, H., Naraoka, T., Obayashi, T., Fukue, T., Miyoshi, T.,

Ichthyological Research, (1-11), November 2023