

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420216

研究課題名(和文)粘弾性フィンを用いた災害時移動用生物規範型水中推進ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of Aquatic Bio-inspired Propulsive Robot Using Viscoelastic Fin for Disaster Sites

研究代表者

小林 俊一 (KOBAYASHI, Shunichi)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：50225512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は魚類の尾びれを規範とした弾性フィンの水中推進性能向上のため、常に最適な剛性となる機能をフィンに付加し、災害時移動用生物規範型水中推進ロボットとして開発するものである。この実現のために、フィンにダイラント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィンを開発した。そのフィンの推進特性とフィンの挙動を検討した結果、最適剛性を保持する特長を有しており、また、災害時の水中における瓦礫などとの干渉があっても問題無い柔軟さであることから、災害時移動用水中推進ロボットの推進器として用いることに問題が無いことを確認した。

研究成果の概要(英文)：To improve the thrust performance of aquatic bio-inspired propulsion mechanism modeled on the caudal fin of fish, the function to maintain the optimum rigidity of the fin with respect to its changing operation task of the mechanism was added and developed as the aquatic bio-inspired propulsive robot for disaster sites. To realize the function to maintain the optimum rigidity, we developed the fiber composite viscoelastic fin-filled with dilatant fluid. We confirmed that the function was effective by the examinations of the propulsion characteristics and the behavior of the fin. The fiber composite viscoelastic fin is suitable thruster for the robot in the aquatic environment of disaster sites regarding that the flexibility of the fin prevents the interference with debris.

研究分野：バイオメカニクス, バイオミメティクス

キーワード：バイオミメティクス ロボティクス バイオメカニクス 流体内推進

1. 研究開始当初の背景

現在、水中推進に多く用いられているスクリュプロペラの問題点として、水中の生物に対する危険性、海藻や魚網の巻き込み、攪拌による汚泥の巻き上げによる水質汚染などが挙げられる。生物遊泳を規範とした屈曲型推進機構は、これらの問題点を解決する、環境に配慮した推進機構のひとつである。そこで研究代表者らは生物規範型流体内推進ロボットとして、(1)生物の鞭毛・繊毛運動を規範とした推進ロボット、(2)ウナギなどの屈曲運動を規範とした推進ロボット、(3)魚類の尾びれを規範とした、フィンの剛性を变化する可変剛性フィンを備えた推進ロボットを開発してきた。

特に、(3)の推進ロボットに用いる魚類の尾びれを規範とした可変剛性フィンについては、弾性的なフィンの最適な剛性が、フィンの運動速度や流速などで変化するために、運動条件によってフィンを交換する必要がない点に特長がある。

一方、可変剛性に関わらず、フィンを用いた水中推進機構を小型船舶や水中ロボットに適用しようと、多くの研究開発が行われてきた。しかし、その市販レベルまでの実用化はなされていない。これは、コストやメンテナンス等で難しいためであると考えられる。広く報道で取り上げられていたが、東日本大震災で、漁港などでの海中の瓦礫や魚網の撤去の際、魚網がスクリュプロペラに絡まって航行が困難であることから、急遽、人力のカヌーなどを使って撤去した事例が多数あった。もし、その際に可変剛性フィンを用いた小型船舶や水中ロボットがあったら、人災への回避を始め、大きな成果を上げることが想定でき、可変剛性フィンの社会的価値は高くなると考えられる。そこで、このフィンの実用化のために、よりシンプルで効率を高くすることが必要であった。

2. 研究の目的

水中推進ロボットに用いる、常に最適な剛性を得るフィンとして、ダイラタント流体と繊維をフィン内部に封入した新規のフィンを開発した。ダイラタント流体とは、流体にかかるせん断速度が大きくなると流体の粘度が増加する、非ニュートン流体の一つである。

図1にそのダイラタント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィンの概念図を示す。ダイラタント流体を封入したフィンに流体力による曲げがあると、ダイラタント流体と繊維間でせん断力が生じる。フィンの運動速度の増加によってフィンの曲げ速度が大きくなると、せん断速度の増加によって粘度が高まり、せん断力はさらに大きくなって曲げ抵抗(剛性)が増加することになる。なお、繊維を封入しなくてもフィンの中のダイラタント流体の流動によって粘度とそれに伴う剛性が変化するが、繊維を加えることによ

って、狭い繊維間のせん断速度が増加して剛性変化範囲が広くなり、ダイラタント流体中の粒子の沈降も抑えることができる。

これまでの可変剛性フィンによる研究結果により、フィンの運動速度やフィンにかかる流速が大きいほど、変形速度も増加し、最適な剛性も大きくなることが分かっている。従って、フィンの運動速度やフィンにかかる流速に対して、常に最適な剛性を維持できるように、ダイラタント流体・繊維・フィンを調整して構成させれば、アクチュエータ(内部モータ)を含む可変剛性機構が不要となり、簡素化、耐故障性、高効率化が望める。

以上より、可変剛性機構の簡素化・耐故障性の向上・高効率化のために、ダイラタント流体を封入した繊維複合粘弾性フィンを開発し、さらに、同フィンの有効な用途として、スクリュプロペラでは困難な環境である、災害時の水中推進ロボットに適應するための検討を行うことを目的とした。

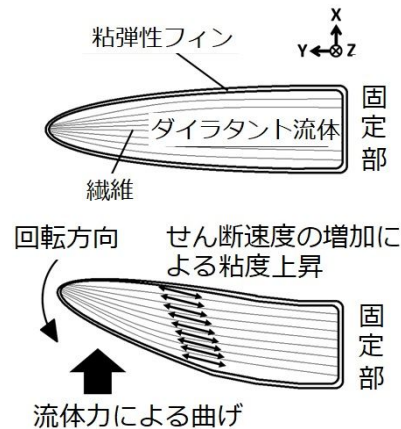


図1 柔軟なフィンにダイラタント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィン

3. 研究の方法

(1) ダイラタント流体を封入した繊維複合粘弾性フィンの開発のための基礎実験

ダイラタント流体(ウーブレック:水と片栗粉の懸濁液)のずり速度に対する粘度の変化を回転粘度計で計測し、設計上のデータを得た。

(2) 繊維複合粘弾性フィンの設計・製作と剛性計測

柔軟なフィンにダイラタント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィンを設計・製作した。図2にその構成図を示す。その剛性の評価として、糸で拘束した繊維複合粘弾性フィンを強制的に揺動させて曲げ剛性に相当する同フィンの変形抵抗力を計測した(図3)。曲げ速度が内部のダイラタント流体のずり速度に相当するので、揺動周期に対して検討した。これらの結果を元に、ダイラタント流体の調製、フィンの硬度、繊維材料と充填率について検討した。

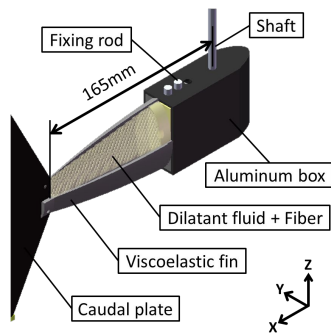


図2 繊維複合粘弾性フィンの構成図

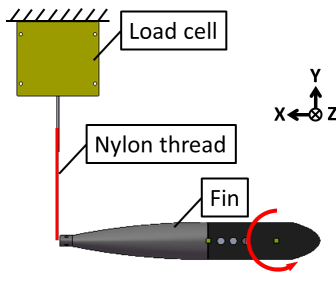


図3 フィン曲げ抵抗計測方法

(3) 水中における推進特性

繊維複合粘弾性フィンに揺動用モータを接続して水槽にて揺動させ、図4に示すように同フィンの挙動と発生する推進力と推進速度の特性を求めた。なお、推進力は起動時に相当する静止流体中で、推進速度は一様流中で推進力と抵抗力がバランスした状態の流れの速度として計測し、フィン周りの流れと合わせて検討した。比較のため、剛性一定のフィンも用意して計測し、その結果と合わせ、繊維複合粘弾性フィンが常に最適な剛性が得られているかを評価した。最適な剛性が得られない場合は、再度、再設計・製作を行った。

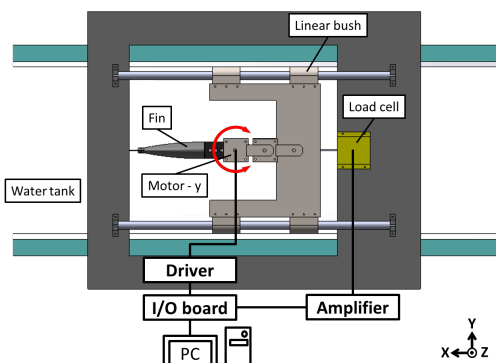


図4 推進特性計測系

(4) 災害時を想定した環境における検討

水中における瓦礫などに相当する障害物との干渉について検討した。

4. 研究成果

(1) ダイラタント流体を封入した繊維複合粘弾性フィン

図5にダイラタント流体（ウープレック）の粘度特性を示す。参考までにニュートン流体の水の特性も合わせて示してある。これよりダイラタント流体の片栗粉濃度によって粘度の大きさやせん断速度による粘度変化に差が見られ、この結果をフィン設計の指針とした。図6にダイラタント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィンの外観を示す。粘弾性フィンはウレタンゲルを用い、繊維は水と親和性のある動物性繊維を用いた。

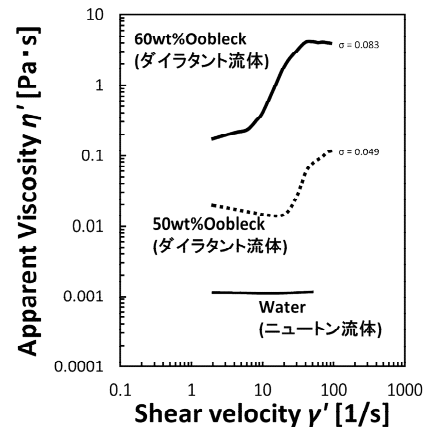


図5 水とウープレック (wt% : 片栗粉の重量%) の粘度とせん断速度の関係

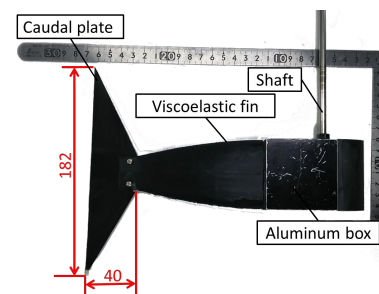


図6 繊維複合粘弾性フィンの外観

(2) 繊維複合粘弾性フィンの曲げ剛性

研究方法の(2)で述べた剛性評価方法の結果として、繊維複合粘弾性フィンの揺動周期と曲げ抵抗最大値（曲げ剛性相当）の関係を図7に示す。ここでは、比較のためにダイラタント流体の代わりに水を封入したフィンと、ウレタンゲルで密閉したフィン（相対的に剛性が大きな弾性体）の結果も合わせて示してある。これより、ダイラタント流体と繊維を封入した繊維複合粘弾性フィンは、揺動周期が短くなると最大曲げ対抗力が増加するが、これは速い曲げによるせん断速度増加に伴うウープレックの粘度増加により、フィンの曲げ剛性が増加することを示している。

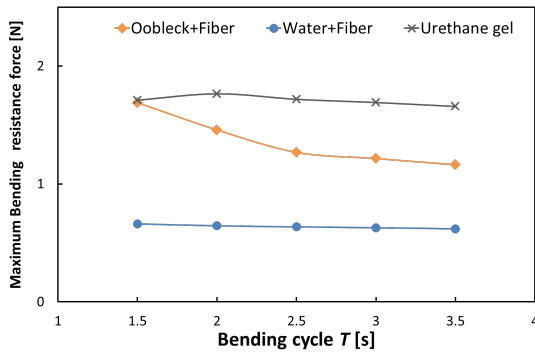


図7 曲げ抵抗力最大値と揺動周期の関係

(3) 水中における推進特性

図8に静止流体における繊維複合粘弾性フィンの挙動(最大推進力を得る揺動位相が 90° , 270° のとき)を示す。もしフィンが完全な剛体である場合、揺動位相が 90° , 270° のときはフィンがX軸と平行の直線状となるため、この挙動は実質的に変形を示している。剛性に相当する曲げ抵抗力の測定と同様、比較のためにダイラタント流体(ウーブレック)の代わりに水を封入フィンとウレタンゲルで密閉したフィン(相対的に剛性が大きな弾性体)の結果も合わせて示してある。これより、長い揺動周期 $T = 3.0$ sではフィンの変形は少なく、すべてのフィンでほぼ同様の挙動であったが、短い揺動周期 $T = 1.5$ sでは、水封入フィンの曲がりが大きくなり、ウーブレック封入フィンとウレタンゲル密閉フィンの挙動はほとんど変わらないことから、ウーブレック封入フィンの剛性は上がっているといえる。

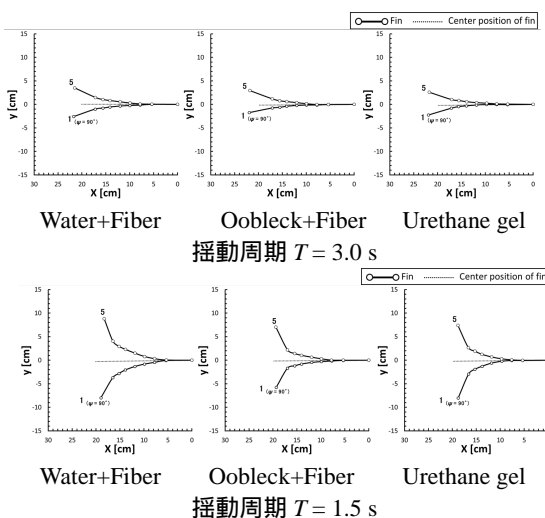


図8 静止流体におけるフィンの挙動(揺動位相 90° , 270° のとき)

図9に静止流体における揺動1周期の平均推進力を示す。周期 $T = 3.5$ sにおいてはウレタンゲル密閉フィンの平均推進力は僅かに低く、 $T = 3.5 \sim 2.0$ sではウーブレック封入フィンの平均推進力が最も高いが、 $T = 1.5$ sにおいてはウレタンゲル密閉フィンの平均推

進力はウーブレック封入フィンよりもやや高くなった。これより、ウーブレック封入フィンは広い周期の範囲で高い推進力をもつ良好な剛性を保つが、 $T = 1.5$ s付近以上ではさらなる高剛性を発生させることがやや難しくなったと考えられる。ウーブレックと繊維をさらに調整して、より速い揺動運動でも最適剛性を保つ必要がある。

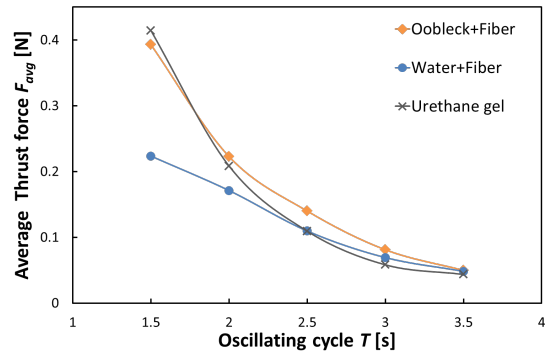


図9 静止流体におけるフィンの揺動周期と平均推進力の関係

以上は静止流体中での結果であるが、一樣流れにおける推進力と抵抗力がバランスした流れの速度(自航推進速度)の特性については、静止流体の平均推進速度と同じ傾向であり、ダイラタント流体を封入したフィンは揺動周期を変更しても広い範囲で高い自航推進速度を維持することが分かった。ただし、フィンの変形量は流れによって抑制された。

(4) 災害時を想定した環境における検討

水中に硬い材料を設置してフィンを干渉させた際にも、フィンの柔軟さから問題ないことを確認した。ただし、過度に瓦礫等が密集した狭隘な環境では揺動が実現困難であることが示唆された。

本研究ではダイラタント流体としてウーブレックを用いたが、シリカナノ粒子等を用いた他のダイラタント流体による長期使用を考慮した検討、また、災害時を想定した環境における検討をもっと踏み込んで行うことが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

中林 正隆, 山崎 渉, 小林 俊一, 可変剛性機構を備えたフィンによる流体内推進機構に関する数値解析的研究, 日本機械学会論文集, 80巻812号, FE0088, 2014. 査読有

DOI:10.1299/transjsme.2014fe0088

Shunichi Kobayashi and Hirohisa Morikawa, Hirotake Soyano, Masataka

Nakabayashi, Propulsion Mechanism in Fluid Using Variable-Stiffness Fin with Torsional Rectangular Elastic Plates, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 23, No.3, pp.172-177, 2013, 査読有

〔学会発表〕(計12件)

杉山皓亮, 金田望, 小林俊一, ダイラタント流体入り繊維複合粘弾性フィンによる生物規範型水中推進機構, 日本機械学会第27回バイオフロンティア講演会, 2016.10.23, 北海道大学札幌キャンパス(札幌市)

金田望, 杉山皓亮, 小林俊一, ダイラタント流体を封入した粘弾性フィンによる生物規範型水中推進機構, 第35回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会, 2016.9.20, 北海道大学函館キャンパス(函館市)

杉山皓亮, 金田望, 小林俊一, ダイラタント流体を封入した繊維複合粘弾性フィンによる生物規範型水中推進機構, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム2016, 2016.9.16, 信州大学上田キャンパス(上田市)

小林俊一, 藤原奨平, 可変剛性フィンを用いた生物規範型水中推進機構を備えた模型潜水艇の推進特性, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学伊都キャンパス(福岡市)

Shunichi Kobayashi, Keiya Takahashi, Shohei Fujiwara, Bio-inspired Aquatic Propulsion Mechanism Using Variable Stiffness Fin with Torsional Elastic Rectangular Plates and Crescent Wing, 6th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms, 2014.11.14, Honolulu, USA

藤原奨平, 小林俊一, 三日月翼付き可変剛性フィンを用いた生物規範型水中推進機構を備えた模型船の推進特性, 日本機械学会2014年度年次大会, 2014.9.8, 東京電機大学東京千住キャンパス(足立区)

小林俊一, 水棲生物の遊泳形態から応用した水中推進機構, 可視化情報シンポジウム2014, 2014.7.22, 工学院大学新宿キャンパス(新宿区)

藤原奨平, 高橋佳也, 小林俊一, 可変剛性フィンを用いた生物規範型水中推進機構を備えた模型船の推進特性 - フィン形状による影響 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014, 2014.5.28, 富山市総合体育館(富山市)

藤原奨平, 高橋佳也, 小林俊一, 可変剛性フィンを用いた生物規範型流体内推進機構を備えた模型船の推進特性, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013.9.10, 岡山大学津島キャンパス(岡山市)

Shunichi Kobayashi, Keiya Takahashi,

Shouhei Fujiwara, Propulsion Characteristics of Bioinspired Propulsion Mechanism in Fluid Using Variable Stiffness Fin with Torsional Rectangular Elastic Plates, Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2013.7.2, Anchorage, USA

高橋佳也, 藤原奨平, 小林俊一, 弾性平板のねじりによる可変剛性フィンを用いた生物規範型流体内推進機構(一様流中における推進特性), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013, 2013.5.24, つくば国際会議場(つくば市)
藤原奨平, 高橋佳也, 小林俊一, 可変剛性フィンを用いた生物規範型流体内推進機構を備えた模型船の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013, 2013.5.23, つくば国際会議場(つくば市)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: ダイラタント流体を用いた複合材料
発明者: 小林俊一, 金田望, 杉山皓亮
権利者: 信州大学
種類: 特許
番号: 特願2016-117741
出願年月日: 2016年6月14日
国内外の別: 国内

〔その他〕

学会誌解説記事

小林俊一, 生物規範型水中推進機構 全方向推進が可能なウナギ型遊泳による機構と可変剛性フィンを用いたアジ型遊泳による機構, 日本機械学会誌, 117巻1143号, pp.82-85, 2014.

アウトリーチ活動

小林俊一, 水生生物の泳ぎを規範とした水中推進ロボット, 北海道大学博物館 第36回バイオメティクス市民セミナー, 2014年12月6日, 札幌市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林俊一 (KOBAYASHI, Shunichi)
信州大学・学術研究院繊維学系・教授
研究者番号: 50225512