

Title	海洋動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサの開発
Sub Title	Development of a Pitot tube type flow sensor for biologging of marine animals
Author	高橋, 英俊(Takahashi, Hidetoshi) 竹井, 裕介(Takei, Yusuke) 成岡, 優(Naruoka, Masaru) 小林, 健(Kobayashi, Takeshi) 佐藤, 克文(Sato, Katsufumi) 田中, 博人(Tanaka, Hiroto)
Publisher	
Publication year	2024
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2023.)
JaLC DOI	
Abstract	ウミガメやペンギンなどの海洋動物は海流を巧みに利用し、遊泳運動の消費エネルギーを抑え効率よく目的地まで到達していると考えられており注目されている。この海流利用を評価する上で重要となるのが対水速度であるが、海洋動物の実測例は非常に限定されている。本研究では、海洋動物に取り付け可能なピトー管型の流速センサを研究開発した。このセンサは、動孔および静孔に取り付けたメンブレン構造、内部に充填された非圧縮性のオイル、及び差圧センサ素子から構成されている。さらに製作した流速センサをバイオリギングのセンサシステムに統合し、ウミガメおよびペンギンの対水速度の計測を行った。 Sea animals such as sea turtles and penguins are adept at utilizing ocean currents to reduce the energy consumption of their swimming movements. A crucial factor in evaluating this utilization is the relative waterflow velocity, but actual measurements in sea animals are extremely limited. In this study, we have developed a Pitot tube-type waterflow velocity sensor that can be attached to sea animals. This sensor comprises a membrane structure attached to a dynamic inlet and a static inlet, filled with incompressible oil, and a differential pressure sensor element. Furthermore, the fabricated waterflow velocity sensor was integrated into a biologging sensor system to measure the relative water velocity of sea turtles and penguins.
Notes	研究種目：基盤研究 (B) (一般) 研究期間：2020～2023 課題番号：20H02102 研究分野：機械工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20H02102seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02102

研究課題名（和文）海洋動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサの開発

研究課題名（英文）Development of a Pitot tube type flow sensor for biologging of marine animals

研究代表者

高橋 英俊 (Takahashi, Hidetoshi)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90625485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000 円

研究成果の概要（和文）：ウミガメやペンギンなどの海洋動物は海流を巧みに利用し、遊泳運動の消費エネルギーを抑え効率よく目的地まで到達していると考えられており注目されている。この海流利用を評価する上で重要となるのが対水速度であるが、海洋動物の実測例は非常に限定されている。本研究では、海洋動物に取り付け可能なピトー管型の流速センサを開発した。このセンサは、動孔および静孔に取り付けたメンブレン構造、内部に充填された非圧縮性のオイル、及び差圧センサ素子から構成されている。さらに製作した流速センサをバイオリギングのセンサシステムに統合し、ウミガメおよびペンギンの対水速度の計測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋動物は、例えば三陸沖のウミガメは黒潮に沿って移動するなど、現場の海流を巧みに利用していると予想されている。海流をどの程度利用して移動しているか、すなわち回遊中の対地速度とその際の対水速度の大きさは、流体力学・バイオメカニクスの観点や生態学・行動学の観点から、さらに海流を扱う気象学の観点からも重要であり、多くの研究者が注目していた。しかし、この回遊中の対水速度を動物に取り付けて計測できるようなセンサがこれまでになかったため、本研究ではこの対水速度計測に特化したセンサを開発した。

研究成果の概要（英文）：Sea animals such as sea turtles and penguins are adept at utilizing ocean currents to reduce the energy consumption of their swimming movements. A crucial factor in evaluating this utilization is the relative waterflow velocity, but actual measurements in sea animals are extremely limited. In this study, we have developed a Pitot tube-type waterflow velocity sensor that can be attached to sea animals. This sensor comprises a membrane structure attached to a dynamic inlet and a static inlet, filled with incompressible oil, and a differential pressure sensor element. Furthermore, the fabricated waterflow velocity sensor was integrated into a biologging sensor system to measure the relative water velocity of sea turtles and penguins.

研究分野：機械工学

キーワード：流速センサ バイオリギング 海洋生物 ピトー管

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ウミガメは太平洋を横断する遊泳能力を有し、400 m 以上、またペンギンは 500 m 以上潜水することが知られている。こうした海洋動物の優れた行動や遊泳能力は、動物にセンサとデータロガーを取り付け自然環境下での行動を調査するバイオリギングの研究によって、近年ようやく明らかになってきた。

これら海洋動物の回遊は、例えば三陸沖のウミガメは黒潮に沿って移動するなど、現場の海流を巧みに利用していると予想されている。海流をどの程度利用して移動しているか、すなわち回遊中の対地速度とその際の対水速度の大きさは、流体力学・バイオメカニクスの観点や生態学・行動学の観点から、さらに海流を扱う気象学の観点からも重要であり、多くの研究者が注目している。

今日のバイオリギングにおいては、位置や対地速度は GPS データから算出しているが、これら手法では対水速度が得られない。そのため、対水速度を知るには、海洋動物が海中で受ける流速を直接的に計測する必要がある。例えば、ウミガメの場合、センサは 4 m/s 程度まで高精度に計測できる必要があり、さらに数百 m 近く潜るため数 MPa の耐圧が必要となる。また数週間から数ヶ月の長期的な計測に耐えられる必要がある。当然ではあるがセンサを取り付けても、運動や流れ場を阻害しない寸法が求められる。その上、水面上に出て呼吸をする海洋動物に対しては、センサが空気中と海中を行き来しても正常に動作する必要がある。

これまで水中バイオリギング用の流速センサとして、小型で精密なスクリュースを利用したセンサがある。しかし、センサ精度が回転部品の摩擦などの機械精度の影響を受けやすく取り扱いが難しい。またオキアミなどがスクリュースに詰まりやすく、フジツボなど付着生物のために長期的な計測ができないという欠点があった。駆動部のない方法として、熱線式のセンサも存在するが、消費電力が高いため電力消費が制限されるバイオリギングでは適さない。

遊泳中の対水速度を計測するためには、飛行機などに用いられる、ベルヌーイの式より流れを圧力に変換し検出するピトー管が最も信頼性があり適していると考えられる。従来の中用用のピトー管は、水中で使用する前に管内の空気を水に置換し、気泡が入らないよう準備し計測を開始する。一方で、例えば、ペンギンは地上と海中を往来し、ウミガメは息継ぎのために海面上に浮上する。そのため、ピトー管を取り付けた場合、管は気中と水中を行き来することになる。しかし、行き来毎に置換作業を行うことはできないため管内に海水と気泡が混在してしまう可能性がある。さらにスクリュース型と同様に管内に微小生物などが詰まってしまう可能性がある。加えて、ピトー管筐体と圧力センサ素子を別々に用意し配管をつなぐ必要があり、センサ構造が煩雑になってしまう問題もあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は海洋動物に取り付け可能なピトー管型の中用流速センサを新たに創成し、バイオリギング装置で対水速度の計測を実現することである。

3. 研究の方法

センサは中空の円柱と球によって構成され、従来のピトー管と同様に、円柱の先端が動孔となり、また円柱の側面に開いた穴が静孔となる。動孔と静孔から伸びる管は球内でつながっており、従来のピトー管と異なる点として、管内には非圧縮性のオイルが充填され、動孔と静孔にシリコンゴムなどの伸縮性のある薄膜を形成し密閉している。また動孔と静孔の圧力差を検出するセンサ素子が内蔵されている。密閉膜によって空気中においても海中においても、気泡などオイル以外が管内に入ることはない。またセンサを海中深く沈めても、管内が非圧縮性のオイルで充填されているため、管内は圧縮されず密閉膜は変形しない。一方で、水の流速による 2 つの孔の圧力差によって密閉膜は変形するため、センサ素子の抵抗値変化から流速を計測できる。

製作したセンサをロガーシステムと統合し、システムを実際の海洋生物に取り付けることで、遊泳中の対水速度を計測する。

4. 研究成果

流速センサのサイズとして、体長 1 m 程度のアカウミガメの場合、取り付けても運動や流れ場を阻害しない大きさとしてその 5% の長さ 75 mm 程度を想定し、また計測域として 2 m/s 程度まで計測可能となるように設計した。提案するセンサは中空の円柱と球によって構成し、従来のピトー管と同様に、円柱の先端に動孔、また円柱の側面に開いた穴を静孔として製作した。動孔と静孔から伸びる管は球内でつなげ、管内には非圧縮性のシリコンオイルを充填し、動孔と静孔に伸縮性のある薄膜を形成し密閉した。シリコンオイルを密閉する方法としてパリレン膜を利用した。また動孔と静孔の圧力差を検出するためにピエゾ抵抗型メンブレンの圧力センサ素子を配置した。センサの筐体は 3D プリンタで製作した。製作した流速センサは、回流水槽を用いて流速に対する応答を評価し、校正を行った。

製作した流速センサをバイオリギング装置と統合した。装置の寸法として長さ 15cm であり、対象とする海洋生物に対して十分に小さい。流速センサの後ろにロガーと電池が防水処理され

配置されている構成とした。ロガーには GPS、加速度センサ、圧力センサなどが搭載されている。それぞれの機器を 3D プリンタで製作した治具でまとめた。

構築したセンサシステムを水族館で飼育下のウミガメに取り付け、まっすぐに遊泳させた際のデータを複数回記録した。計測したデータを解析した結果、カメラ画像から取得した速度の概算と計測した流速の平均値に相関関係が確認できた。さらに岩手県大槌町において野生のウミガメにセンサを取り付け、バイオリギング実験を行い、データを取得できることを確認した。さらに野生のペンギンにも取り付け、データの取得を行った。

さらに、これまでは 1 軸のピトー管型センサであったが、流速だけでなく 2 次元的な流向を計測できるようセンサ形状を球形状とし、動孔・静孔となるペアを複数用いるセンサを設計・製作した。センサに対して、流速と流向を変化させた際の応答を計測し、計測したデータに対して機械学習を用いることで、流速・流向に変換するアルゴリズムを開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kishimoto Takuto, Saito Ryosuke, Tanaka Hiroto, Takahashi Hideotoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Pitot-Static-Tube-Based Waterflow Sensor for Marine Biologging via Inside Sealing of an Incompressible Liquid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 19806～19814
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2021.3094565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Takahashi Hidetoshi, Naruoka Masaru, Inada Yoshinobu, Sato Katsufumi	4. 巻 33
2. 論文標題 Seabird Biologging System with Compact Waterproof Airflow Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 466～474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

1. 著者名 Naruoka Masaru, Goto Yusuke, Weimerskirch Henri, Mukai Takashi, Sakamoto Taichi, Sakamoto Kentaro Q., Sato Katsufumi	4. 巻 33
2. 論文標題 Application of Inertial and GNSS Integrated Navigation to Seabird Biologging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 526～536
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0526	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

1. 著者名 Hirayama Takuto, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 63
2. 論文標題 Sensitivity characteristics of a wave height sensor based on a MEMS piezoresistive cantilever and waterproof film	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 026505～026505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ad2271	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Kishimoto Takuto、Agetsuma Masakazu、Hoshino Ayuko、Takahashi Hidetoshi	4. 巻 106
2. 論文標題 Needle - type pressure sensor with silicone oil and parylene membrane inside for minimally invasive measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Electronics and Communications in Japan	6. 最初と最後の頁 148~155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecj.12420	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Hirayama Takuto、Kazoe Yutaka、Takahashi Hidetoshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Sensitivity characteristics of a waterproof airflow sensor based on a MEMS piezoresistive cantilever and nanohole array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 026503~026503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb679	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 T. Hirayama and H. Takahashi
2. 発表標題 Highly sensitive wave height sensor with MEMS piezoresistive cantilever and waterproof membrane
3. 学会等名 MEMS2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒田健太、岸本卓大、高橋英俊、佐藤克文
2. 発表標題 ピトー管型ロガーを用いたウミガメの遊泳速度測定
3. 学会等名 第18回日本バイオロギング研究会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本卓大, 齋藤遼輔, 田中博人, 成岡優, 黒田健太, 佐藤克文, 高橋英俊
2. 発表標題 海中動物の対水速度計測のための高時間分解能流速センサシステム
3. 学会等名 第18回日本バイオリギング研究会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本卓大, 高橋英俊
2. 発表標題 MEMSピエゾ抵抗カンチレバーを用いた針型圧力センサ
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本卓大, 齋藤遼輔, 田中博人, 高橋英俊
2. 発表標題 海中動物の対水速度計測のためのピトー管式小型流速センサの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平山拓人, 嘉副裕, 高橋英俊
2. 発表標題 多孔質膜を用いた海鳥のバイオリギングのための防水風速センサ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kishimoto, R. Saito, H. Tanaka and H. Takahashi
2. 発表標題 Compact Pitot-static-tube-based waterflow sensor for biologging of marine animals
3. 学会等名 IEEE Sensors2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本卓大, 齋藤遼輔, 田中博人, 高橋英俊
2. 発表標題 海中動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋英俊, 成岡優
2. 発表標題 海鳥のバイオリギングのための防水ピトー管の研究開発
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kishimoto, H. Tanaka, M. Naruoka, K. Kuroda, K. Sato, and H. Takahashi
2. 発表標題 High time-resolution measurement of a sea turtle's relative waterflow velocity using a pitot-type waterflow sensor
3. 学会等名 SEB2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Kishimoto, K. Matsudaira, H. Tanaka, and H. Takahashi
2. 発表標題 Development of Horizontal Waterflow Vector Sensor System for Marine Biologging
3. 学会等名 The 8th International Bio-Logging Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Kishimoto, K. Matsudaira, H. Tanaka and H. Takahashi
2. 発表標題 A Sphrical Waterflow Vector Sensor in Deep Sea
3. 学会等名 IEEE Sensors 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Hirayama, T. Kishimoto and H. Takahashi
2. 発表標題 Pitot Tube Type Compact Waterproof Airflow Sensor for Seabird Biologging
3. 学会等名 IEEE Sensors 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kishimoto, R. Saito, H. Tanaka, M. Naruoka, K. Kuroda, K. Sato, and H. Takahashi
2. 発表標題 Pitot-type waterflow sensor logger for relative waterflow velocity measurement of a sea turtle
3. 学会等名 Transducers2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平山拓人, 岸本卓人, 高橋英俊
2. 発表標題 マイクロメッシュ膜を用いた海鳥のバイオロギングの為の防水風速センサ
3. 学会等名 第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本卓大, 齋藤遼輔, 田中博人, 成岡優, 黒田健, 佐藤克文, 高橋英俊
2. 発表標題 ウミガメの対水速度計測のためのピトー管型流速センサロガー
3. 学会等名 第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平山拓人, 高橋英俊
2. 発表標題 MEMS差圧センサとマイクロメッシュ膜を用いた高感度波高センサ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	竹井 裕介 (Takei Yusuke) (00513011)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	成岡 優 (Naruoka Masaru) (10649073)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	
研究分担者	小林 健 (Kobayashi Takeshi) (20415681)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究チーム長 (82626)	
研究分担者	佐藤 克文 (Sato Katsufumi) (50300695)	東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601)	
研究分担者	田中 博人 (Tanaka Hiroto) (80624725)	東京工業大学・工学院・准教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------