

令和元年6月18日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14515

研究課題名（和文）密度差エンジンによる水中グライダーのフィージビリティスタディ

研究課題名（英文）Feasibility study of an underwater glider with density-difference-engine

研究代表者

有馬 正和（Arima, Masakazu）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70264801

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、海中の密度躍層がもつ物理的性質を利用した「密度差エンジン」を提案し、新しい水中グライダーの実現可能性を明らかにすることである。本研究では、バッテリーなどの動力源を用いずに推進することのできる試験機体を設計・製作し、水槽試験によってグライディング性能を解析して、その有効性・妥当性を評価した。浮力調整装置にはゴム製ブラダを導入し、機体最後部に配置することによって、潜降に従って浮力を失うとともに浮心位置を前方に移動させるため水槽上部では機首下げで潜入、水槽下部では機首上げで浮上することができる。やがて水槽中央で停止するものの、動力源を必要とせず、潜入と浮上を行わせることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な自律型海中ロボットの運用可能は9時間程度で、長時間の運用が強く望まれている。エネルギー効率の高い水中グライダーでは、最大330日程度の運用が可能なものも開発されているが、本研究で海洋の自然エネルギーを最大限に活用する、密度差エンジンによる自律型水中グライダーの実現可能性が示されたので、運用深度は限定されるものの、海洋における豊かな生態系を育む躍層付近の調査を効率的に行うことが可能となり、さらに長期間の運用が期待される。本研究は、水中グライダー技術に新しい可能性を与え、密度躍層付近の生態系や環境の長期に亘るモニタリング調査に大きな役割を果たすことができると考えている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to study the feasibility of an underwater glider with density-difference-engine which makes the fullest possible use of the physical characteristics of pycnocline in the ocean. The underwater glider presented here is unique, in that it incorporates no propulsion machinery which makes it silent and can be maintained with relative ease. Developing an underwater glider with density-difference-engine, making maximum use of the natural energy of the ocean will enable us to efficiently conduct an environment-friendly survey of the rich ecosystem around the pycnocline. An idea of controlling the attitude of underwater glider in accordance with depth enables to realise underwater cruising without any propulsive machinery. Test-bed vehicles of such an underwater glider with density-difference engine were developed, and tank test was conducted at a small-scale acrylic tank. This demonstrated possibilities of an underwater glider with density-difference-engine.

研究分野：海洋システム計画学

キーワード：密度差エンジン水中グライダー 浮力調整装置 姿勢制御機構 自律型海中ロボット 密度躍層 Nereus

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、自律型海中ロボットは、実用化が進み、海洋工学分野における調査研究でも大きな役割を果たすようになってきた。なかでもエネルギー効率に優れる水中グライダーは注目を集めていて、さまざまな応用が提案されている。自律型水中グライダーは、既に市販されているものもあるが、多くはリチウムイオン電池（二次電池）やアルカリ電池（一次電池）を採用していて、自然エネルギーを用いるものは、海面と海中との温度差を利用した米国 Teledyne Webb Research 社の Slocum Thermal 機と太陽光エネルギーを用いる本学のソーラー水中グライダー Tonai60 (Twilight Ocean-zonal Natural-resources and Animals Investigator) だけである^{注)}。研究代表者らは、長年に亘って自律型水中グライダーの研究開発を進めており、エネルギー効率のさらなる向上や新しい推進技術について絶えず検討を行ってきた。太陽光エネルギーを利用する実海域用ソーラー水中グライダー Tonai60 は、太陽光の届くトワイライトゾーンを調査することのできる潜航深度 60m の機体であるが、温度や塩分濃度の急激に変化する躍層付近にはプランクトンやそれを捕食する生物が数多く集まるところで、これまでもセンサーや海中音響観測、映像観測などを精力的に進めてきた。今回、その密度躍層のもつ物理的性質に着目して、密度の変化を推進力とする水中ビークルを実現することができるとも知れないと考え、「密度差エンジン」の着想に至った。そして、簡易模型を試作して水槽試験を行った。深度に応じて体積が変化するような機構を採用することで、浅水域では機首下げで潜入し、深水域では機首上げで浮上することができるよう機体の水中重量および重心・浮心位置を調整した。小型水槽に塩分躍層を作成して実験を行った結果、期待通りの挙動を示し、「密度差エンジン」を実現できる可能性があることを明らかにした。

注) 波力エネルギーと太陽光発電を併用する Liquid Robotics 社の Wave Glider は、構造上、潜航深度が数mに限定されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、一切の動力を用いず、海中の密度躍層がもつ物理的性質を利用した「密度差エンジン」を提案し、これまでにない新しい水中グライダーの実現可能性を明らかにすることである。海洋の自然エネルギーを最大限に活用する、密度差エンジンによる自律型水中グライダーを実現することができれば、海洋における豊かな生態系を育む躍層付近の調査を効率的に行うことが可能となる。本研究では、バッテリーなどの動力源を用いずに推進することのできる試験機体を設計・製作し、水槽試験によってそのグライディング性能を解析して、「密度差エンジン」の有効性・妥当性を評価する。また、実海域で長期間・広範囲に亘って海洋の環境や生態系を調査することのできる自律型海中ロボットの基本設計および運用方法を提案する。

3. 研究の方法

本研究で研究期間内に実施する項目は、以下の3点である。

(1) 「密度差エンジン」の有効性・妥当性を検証、評価するための機体の設計・製作を行う。

密度躍層間を往復しながら潜入と浮上を繰り返して前進するために、水中グライダーが実現する必要のある機能は以下の通りである。

・浮力調整機構

水槽試験では、純水（比重 1.0）と塩水（比重 1.05）で密度躍層を作成するので、機体の比重が 1.025 程度になるように調整を行う。実際の海では、塩分濃度が 3%程度なので、より厳密に調整する必要があるが、十分な水深を確保して潜航速度が出るようにしないと失速する可能性が生じる。

・姿勢制御機構

水中グライダーは、翼にはたらく流体力を利用して前進するが、グライディング性能を向上させるために揚抗比の大きな翼形状を採用すると抗力が大きくなって、密度躍層貫通時の抵抗が大きくなってしまふ。適切な翼を取り付け、潜入時には機首下げ姿勢を、浮上時には機首上げ姿勢をとるようになる必要がある。予備実験の結果、重心を移動させることは困難であることが明らかとなったので、浮心の前後位置を移動させて機体の姿勢を制御することを検討する。機体後部に薄膜メンブレン構造を取り付けて、潜航時には水圧で機体体積を小さくして浮心を前方に移動させて機首上げを実現し、逆に浮上時には浮心を後方に移動させて機首下げを実現するようにしたい。

適切にシステム・インテグレーションをすることによって、密度差エンジンによる水中グライダーを実現させる。

- (2) 小型アクリル水槽内に塩分濃度の異なる密度躍層を作成して、水中グライダーの潜航試験を行い、「密度差エンジン」によるグライディング性能を計測・解析する。

再現性のある実験を行うためには、適切な実験水槽を選定する必要がある。本学には船舶試験水槽（長さ 70m×幅 3m×深さ 1.6m）と回流水槽（観測部の長さ 6.55m×幅 1.5m×深さ 1.0m）、二次元水槽（長さ 3m×幅 2m×深さ 2m）の3つの大型水槽と、海中システム実験水槽（直径 3m×深さ 0.9m）の中型実験水槽があるが、密度躍層を作成するためには、水槽の下半分を塩水にする必要があり、大きな水槽では多量の食塩が必要となる。また、密度躍層を作成するためには極めて慎重に作業をする必要があり、実験の準備に時間と費用がかかるため、適切な水槽を選定することは重要である。予備実験では、長さ 1.8m×幅 0.6m×深さ 0.6m のアクリル水槽を用いたが、水槽のサイズが小さかったので、十分な潜航深度を取ることができなかった。そこで、本研究ではシミュレーションなどの工学解析を行い、適切な水槽サイズを決定した。具体的には、長さ 2.2m×幅 0.5m×深さ 1.0m の小型アクリル水槽を採用する。この水槽に密度成層を作成し、「密度差エンジン」による水中グライダーの潜航試験を行う。小型軽量の実験機で、姿勢などの計測機材を搭載することができないので、グライディング性能は画像解析によって求める。潜航時の姿勢および潜航速度を求め、シミュレーションとの比較を行うことで、機体の力学的特性を明らかにする。また、機体および密度躍層の物理的なパラメータを系統的に変化させることで、実海域用の機体設計に適用する。

- (3) 実海域で運用するための自律型海中ビークルの基本設計を行う。

最後に、設計・開発した実験機を用いた水槽試験から得られたデータに基づいて、実海域で運用することのできる自律型海中ビークルの基本設計を行う。

4. 研究成果

初年度は、水中グライダーが密度躍層間を往復しながら潜入と浮上を繰り返して前進するために必要となる以下の機能について検討を行った。

・**浮力調整機構** 純水（比重 1.0）と塩水（比重 1.05）で密度躍層を作成するので、機体の比重が 1.025 程度になるように調整を行う。実際の海では、塩分濃度が 3%程度なので、より厳密に調整する必要があるが、十分な水深を確保して潜航速度が出るようにしないと失速をする可能性が生じる。

・**姿勢制御機構** 水中グライダーは、翼にはたらく流体力を利用して前進するが、グライディング性能を向上させるために揚抗比の大きな翼形状を採用すると抗力が大きくなって、密度躍層貫通時の抵抗が大きくなってしまふ。適切な翼を取り付け、潜入時には機首下げ姿勢を、浮上時には機首上げ姿勢をとるようにする必要がある。機体後部に薄膜メンブレン構造を取り付けて、潜航時には水圧で機体体積を小さくして浮心を前方に移動させて機首上げを実現し、逆に浮上時には浮心を後方に移動させて機首下げを実現することが有効であることを明らかにした。本研究で提案する密度差エンジン水中グライダーでは、機体周辺の雰囲気水の密度 ρ が深度 d に応じて増減することで浮力 F を変化させる。

$$F = \int \rho g dV$$

密度差エンジン水中グライダーが潜入と浮上を繰り返しながら前進をするためには、潜入時に機首を下げ、浮上時に機首を上げられるような機構が必要となる。翼の取付角を変化させるものや機体の重心位置を移動させるものなどを試作して予備実験を行い、最終的に機体の浮心位置を変化させることで機体の姿勢角の変化を実現することにした。機体の最後尾にゴム製のダイヤフラムを装着することで、深度に応じた水圧でダイヤフラムが伸縮して機体体積が変化して浮心位置を前後に移動させることができる。機体の長さを変えた試作機の外観を図1に、その仕様を表1に示す。

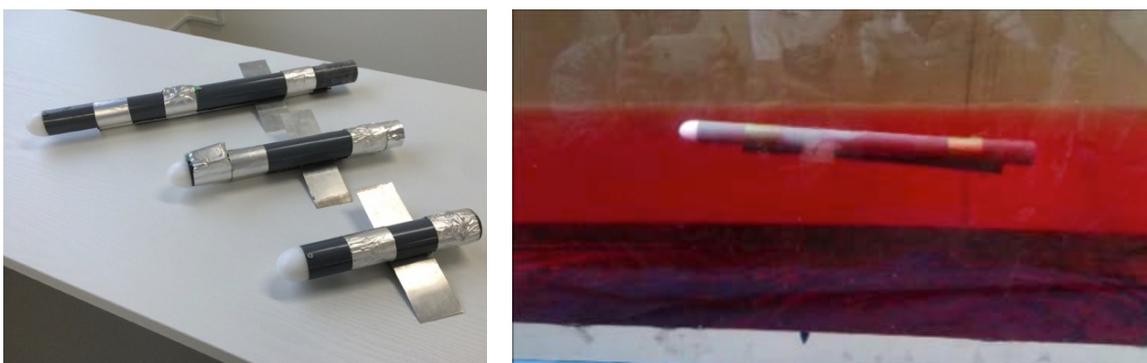


図1 密度差エンジン水中グライダー実験機

胴体には外径 38mm、内径 31mm の塩化ビニルパイプを用い、機首にはジュラコン (POM) 製の NACA0040 翼型ノーズキャップを装着している。また、アルミ製の矩形翼を機体後方に配置し、ステンレス製のウェイトを機体下部に装着して機体重量および重心を調整している。

表 1 密度差エンジン水中グライダー実験機の仕様

Model Type	I	II	III
Length of fuselage [mm]	500	300	200
Width [mm]	172	172	171
Height [mm]	51	52	52
Mass [g]	649	424	277

L 1800×B 600×D 600mm のアクリル水槽の下半分の水深 300mm までを食紅で着色した 5%食塩水で満たし、上半分を真水にした。まず、2.5%食塩水中で中性浮量となるように機体の比重を 1.025 に調整し、機体姿勢が水平になるようにダイヤフラムを調整してから、密度差エンジン水中グライダー実験機を潜航させた。そのときの様子を図 1 (右) に示す。機体は、深度が浅く水中重量が正となる真水領域では機首下げ姿勢で潜入り、密度躍層を貫通して食塩水領域に到達すると、水圧でダイヤフラムが機体内に押し込まれて機体体積が縮小するので浮心が前方に移動し、機首上げ姿勢になって、水中重量が負となるために浮上を開始することが確認できた。3 種の機体では、胴体長さ 500mm の Type I が、潜航時の体積変化率が大きく、機体の姿勢制御に有利であることが確かめられた。

2 年目は、密度差エンジン水中グライダーの試作機を新たに設計、製作して大型アクリル水槽 (長さ 2.2m×幅 0.5m×深さ 1.0m) において潜航試験を行った。Nereus (ネレウス) と名付けられた機体は、全長 550mm、全幅 341mm、全高 170mm、胴体直径 85mm、重量 1.995kg で、機首形状は NACA0040 翼型である。浮力調整装置には、ゴム製ベローズを導入し、機体後部に配置することによって、潜入に従って浮力を失うとともに浮心位置を前方に移動する役割を果たす。大型アクリル水槽には上部 1/3 に真水 (0.0%食塩水)、中部 1/3 に 1.0%食塩水、下部 1/3 に 2.0%食塩水を入れ、機体の比重を 1.01 としている。ベローズを用いた浮力調整と浮心移動機構を実現したことによって、水槽上部では機首下げで潜入を始め、水槽下部に到達すると機首上げで浮上を始める。やがて水槽中央で停止してしまうものの、動力源を必要とせずに、潜入と浮上を行わせることができた。図 2 に Nereus の外観と潜航試験の様子を示す。

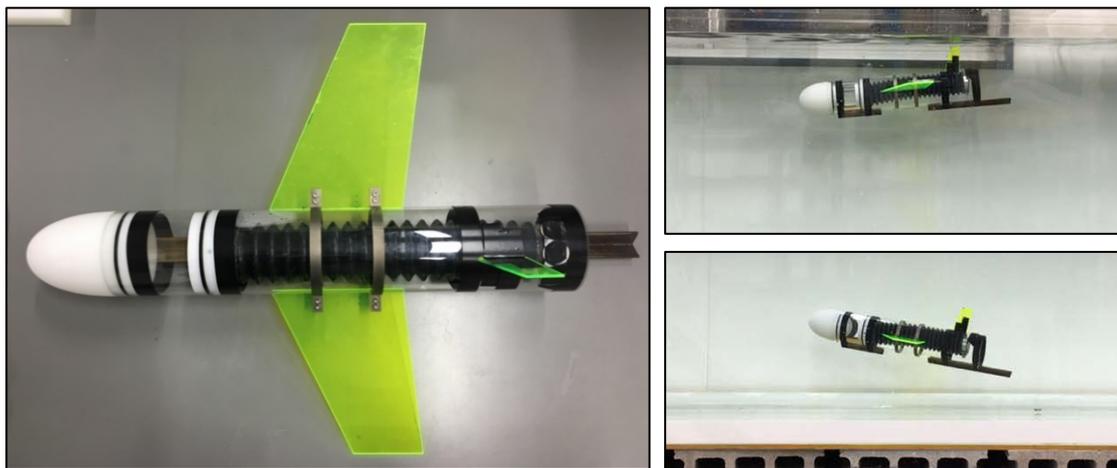


図 2 密度差エンジン水中グライダー Nereus

最終年度は、昨年度に設計開発をした機体 (Nereus : ネレウス) の浮力エンジン機構を改善して、大型アクリル水槽 (長さ 2.2m×幅 0.5m×深さ 1.0m) および円筒アクリル水槽 (直径 1m×深さ 3m) において潜航試験を行った。Nereus II (ネレウス 2) の浮力調整装置には、ゴム製ブラダを導入し、機体最後部に配置することによって、潜入に従って浮力を失うとともに浮心位置を前方に移動する役割を果たす。大型アクリル水槽には上部 1/3 に真水 (0.0%食塩水)、中部 1/3 に 1.0%食塩水、下部 1/3 に 2.0%食塩水を入れ、機体の比重を 1.01 としている。ブラダを用いた浮力調整と浮心移動機構を実現したことによって、Nereus のゴム製ベローズ式浮力調整装置で発生した摩擦を軽減することができた。水槽上部では機首下げで潜入を始め、水槽下部に到達すると機首上げで浮上を始める。やがて水槽中央で停止してしまうものの、動力源を

必要とせずに、潜入と浮上を行わせることができた。また、最終年度の研究計画に従って、実海域で長期間・広範囲に亘って海洋の環境や生態系を調査することのできる自律型海中ロボットの概念設計および運用方法の検討を試みた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1. Sanjay Ayyemperumal Thillai Jeyaseelan, M.Arima, T.Minamino: Development of an Underwater Glider with Density-Difference-Engine, Procs. of World Automation Congress (WAC2018), 査読あり, CD-ROM, pp.1-6, (2018).
2. 有馬正和: 密度差エンジン水中グライダーのフィージビリティスタディ, 日本機械学会 第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム MoViC2017 配付 USB, 査読なし, B26, pp.1-5, (2017).
3. 有馬正和, 浦圭祐, 澤野陽介: 密度差エンジンによる水中グライダーのフィージビリティスタディ (第 1 報), 日本船舶海洋工学会平成 28 年度秋季講演会講演論文集, 査読なし, pp. 205-206, (2016).

〔学会発表〕（計 3 件）

1. Sanjay Ayyemperumal Thillai Jeyaseelan, M.Arima, T.Minamino: Development of an Underwater Glider with Density-Difference-Engine, World Automation Congress 2018, 2018.06.06, (Washington, USA).
2. 有馬正和: 密度差エンジン水中グライダーのフィージビリティスタディ, 日本機械学会 第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム MoViC2017, 2017.08.31, 愛知大学, 豊橋キャンパス (愛知県豊橋市).
3. 有馬正和, 浦圭祐, 澤野陽介: 密度差エンジンによる水中グライダーのフィージビリティスタディ (第 1 報), 日本船舶海洋工学会平成 28 年度秋季講演会, 2016.11.21, 岡山コンベンションセンター (岡山県岡山市).

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://arima-labo.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中村 昌彦

ローマ字氏名：NAKAMURA, Masahiko

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。