

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246146

研究課題名(和文) 定域長期観測用自律昇降式水中ロボットの研究開発

研究課題名(英文) Development of underwater glider for longterm virtual mooring

研究代表者

浅川 賢一 (Asakawa, Kenichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・シニアスタッフ

研究者番号：40344288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型浮力エンジンと定域長期観測に必要な基本制御ソフトウェアを開発して自律昇降式水中ロボット実験機「ツクヨミ」に搭載し、水槽実験や海洋実験等によりその性能を検証した。その結果、開発した自律昇降式水中ロボットは長期間の定域観測に必要な基本的機能を持つことを確認した。浮力エンジンは市販の小型斜板式アキシヤルピストンポンプを用いることで、従来搭載していた浮力エンジンより体積、重量共に約1/2になり、速度も1桁以上高速にすることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new small sized and light weighted buoyancy engine for underwater gliders was developed and was mounted on the prototype underwater glider for long-term virtual mooring called 'Tsukuyomi.' The basic control software which is necessary for long-term virtual mooring was also developed. The performance of the developed underwater glider was evaluated by long tank tests and sea experiments. As a result, it was confirmed that the developed underwater glider has the basic ability necessary for long-term virtual mooring. As for the buoyancy engine, by using a commercially available small swash plate type axial piston pump, its size and weight became about half of the previously equipped one, and the pumping speed became more than one-digit faster.

研究分野：海洋工学

キーワード：水中グライダー 長期定域観測 地球環境変動 浮力エンジン

1. 研究開始当初の背景

海水は大気の約 1,000 倍の熱容量を持っている。また、海水は人工的に排出される二酸化炭素のほぼ 30%を吸収しており、大気中の二酸化炭素の増加を抑制している。そのため地球規模の気候変動を正確に把握し、その将来を予測し、適切な施策を立案・実行するためには、深海を含む海洋全体の水温・塩分変動などの環境変動を、長期間連続的にかつ高精度に観測することが急務である。

現在、長期連続的な海洋観測は、主にプロファイリングフロート（以下フロートと呼ぶ）と係留ブイにより行われている。フロートは浮力エンジンにより、自分自身の容積（つまり浮力）を制御することにより、沈降と浮上を繰り返しながら水深 2,000 m までの水温、塩分、深度などを計測する。海面に浮上したときに GPS で位置を計測するとともに、衛星経由で観測データを陸上に伝送する。通常水深 1,000 m で 10 日程度スリープして海中を漂流し、3 年から 4 年に亘って観測を行う。世界各国が連携して進めているアルゴ計画により、すでに約 3,000 台のフロートが世界中の海洋に展開されている。これらのフロートにより地球規模の定常的海洋観測が可能になり、海洋学にブレークスルーをもたらしたと評価されている。

しかし、フロートは海流によって流されるため、データを必要とする海域に長期間留まることはできない。例えば、黒潮属流域や海洋深層水の起源である南極域周辺海域は海洋の熱循環を把握するためにも重要な海域であるが、フロートはこのような海域に長期間留まることはできない。このようなキーとなる海域の水面から海底において長期的な観測を行うことにより、将来の海洋変動を効率よく予測できるようになる。

一方、係留ブイは設置と保守の費用の制限から、観測点を大幅に増やすことが難しい。

最近、海洋観測の新しいプラットフォームとして、水中グライダーが利用されるようになってきた。水中グライダーはフロートと同様に浮力エンジンにより沈降と浮上を行う。さらに翼を持ち滑走するとともに重心移動によりその運動方向を制御し、規定のルートに沿って観測を行う。スラストを持たず、少ない電力で長距離の航走と観測ができる。実用化されている水中グライダーの最大潜水深度と最大連続観測期間は、それぞれ 1,000 m と数ヶ月程度である。このように、フロートや水中グライダーの実現により世界の海洋研究は飛躍的に進展しつつあるが、まだ観測手段は十分でなく、海洋にはいまだに未知の点が多い。

このような観点から、次世代の海洋観測システムでは、限られた予算で効率的な観測を実施するため、観測機器を大量に配置するという従来の方法から脱却し、気候変動の影響が早期に現れるキーとなる海域を見出し、2,000m を超す水深も含めて、集中的に観測

する必要がある。前述したように極域周辺海域はキーとなる海域であるが、波浪や海水等の影響で長期観測が難しい海域でもある。このような極域周辺海域でも長期に亘って連続的な観測を行う必要がある。

このような背景のもとで、研究代表者等は長期間に亘り一定海域での観測を行う仮想係留を目的とした定域長期観測用自律昇降式水中ロボット（水中グライダー）実験機「ツクヨミ」の開発を進めていた。ツクヨミは目標の海域からずれた場合には、その運動方向を制御することにより、位置を修正する。さらに、海底に着底してスリープすることにより消費電力を低減し、数年間に亘る長期観測を行うことを目指している。本研究開始時点で、基礎的設計と小型模型を用いた曳航水槽実験、計算機による運動シミュレーション、ハードウェアの製作と運動性能測定用ソフトウェアの製作を行っている。

しかしこの自律昇降式ロボット実験機では、開発のリスクを低減し開発の効率を高めるために、浮力エンジンとして既存の大水深フロート用に開発された往復ピストン型のものを使用していた。このエンジンは全長 575mm と大型であり、流量も毎分 10cc 程度と比較的小さい。そのため、ロボット全体が大型化するだけでなく、浮力制御に長時間を要するため、特に沈降開始直後に必要な沈降速度に達するのに時間を要し、流れが速く急速な潜水を必要とする水面近傍での運動制御性能が制限されていた。

2. 研究の目的

本研究では、新しい小型浮力エンジンと定域長期観測に必要な基本的機能を持つソフトウェアを開発し、前述の自律昇降式水中ロボット実験機「ツクヨミ」に搭載し、水槽実験や海洋実験等によりその性能を検証することにより、自律昇降式水中ロボットにより長期間の定域観測が可能であることを実証することを目的とした。さらに、氷海での観測を想定し、海底に設置した音響基準局を利用する音響測位システムを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 小型高能率浮力エンジンの開発

浮力エンジンは自律昇降式水中ロボットの性能を左右する最も重要なパーツであると言っても過言でない。小型軽量でエネルギー効率が高く、電池で駆動可能で、かつ、浮力調整速度が大きい浮力エンジンが必要とされる。また、実用化し普及するためには、低コストであることも重要である。そこで本研究では、ハンドツール用に開発され市販されている小型斜版式アキシアルピストンポンプを組み込んだ小型軽量な高能率浮力エンジンを開発し、ツクヨミに搭載する。

(2) 制御ソフトウェアの開発

模型実験等で得られたツクヨミの流体力学的運動特性に関するデータを用いた運動シミュレータを開発し、一定の海域に留まるための運動制御方式の検討を行う。さらに、この検討結果を基に長期定域観測機能を持つ運動制御プログラムを開発する。また、高度計の制御機能とこれを利用した着底制御機能、小型浮力エンジンの制御機能を開発し、組み込む。

(3) 水槽実験と海洋実験による検証

まず、大型水槽においてピッチ角制御の基礎的実験を行い、制御特性を評価すると共に、制御方法と制御パラメータを選定する。次に小型船舶を用いて沿岸の浅海域で行い、基本的な運動制御特性を測定すると共に、ピッチ角制御と方位制御の安定した制御方法を見いだす。また、水面浮上時の浮力と姿勢制御方法を調整し、GPS測位とイリジウム通信が安定してできるようにする。さらに、方位制御、ピッチ角制御、最大潜水深度制御、GPS測位とイリジウム通信機能等を総合して、目標位置に向けて水中を滑走する機能を検証する。

(4) 音響測位システムの開発

同期して音響信号を発振する複数の音響基地局を用いる音響測位システムを開発する。ロボット側では受信するだけなので、大きな送波器は必要とせず、消費電力も小さい。

4. 研究成果

(1) 小型高能率浮力エンジンの開発

開発した浮力エンジンの構成を図1に示す。オイルリザーバとモータ・油圧ポンプ等は耐圧容器内に設置され、オイルブラダは体圧容器外に設置される。オイルブラダには高水圧が直接加わる。モータ・ポンプを用いて油をオイルリザーバとオイルブラダ間で移

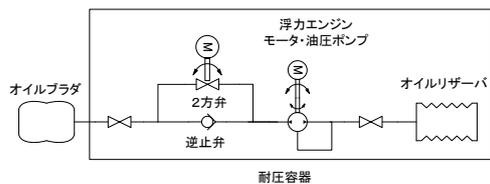


図1 浮力エンジンの構成

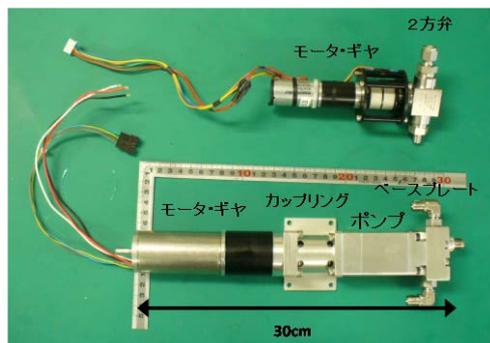


図2 浮力エンジンの主要機械部品

動することにより、ロボットの容積と浮力を制御する。オイルリザーバはローリングダイヤフラムを用いたもので、その容積はポテンシオメータで計測することができる。油圧ポンプの最大定格圧力が21MPaなので、最大潜水深度は2,100mに制限されるが、図2に示すように、小型で軽量かつ十分な浮力調整速度を持つ浮力エンジンを実現することができた。従来の往復ピストン型浮力エンジンと比較して、寸法・重量共に約1/2となり、速度も1桁以上高速にすることができた。また、この小型斜版式アキシアルピストンポンプは可逆ポンプであるため、高圧下への油の押し出しだけでなく、高圧下からの油の引き込みも行える。この場合、油圧ポンプとモータは、それぞれ油圧モータと発電機として働き、発生する電力はモータ駆動回路内の抵抗で消費される。

図3は高圧下での油の押し出し時の電力特性を示した図である。最大で45%程度の電力効率が得られている。他の浮力エンジンと比較しても遜色がない値である。流量も200~270 mL/minと圧力によらずほぼ一定である。

図4は高圧下での油引き込み特性を示した図である。実環境下での使用状況を再現するために、浮力エンジンをロボット本体内に組み込み、ロボット全体を大型高圧水槽内に

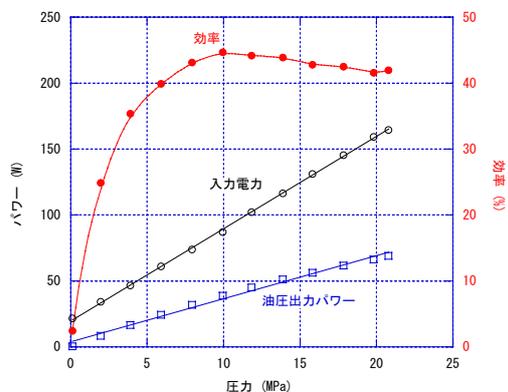


図3 油押し出し時の電力特性

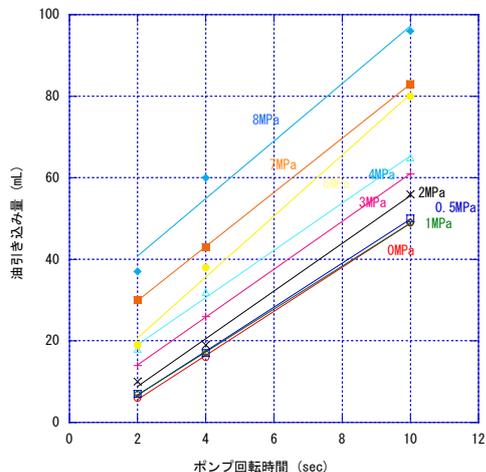


図4 高圧下での油引き込み特性

設置して測定した。8 MPa の圧力まで、一定の速度で油の引き込みが行えることが確認できるが、2MPa 以上の圧力でオフセットが増加することが確認された。このオフセットは、2 方弁の開閉とモータ・ポンプの起動・停止の間にポンプから漏れる油が原因となっていることが確認された。ラッチ式の高圧電磁弁を用いて 2 方弁の開閉とモータ・ポンプの起動・停止間の時間を短縮することにより、このオフセット量を小さくすることができると考えられる。また、発生する電力の吸収特性から、21 MPa までの高圧下での油引き込みが可能であると推定された。

この研究により、21 MPa までの圧力下での油の押し出しと、8 MPa までの圧力下での油の引き込みが可能で小型・軽量で高速の浮力エンジンが開発された。また、油圧回路を改良することで、21 MPa までの高圧下での油の引き込みが可能と推定された。

(2) 制御ソフトウェアの開発

本研究では、目標位置に向けて滑走する機

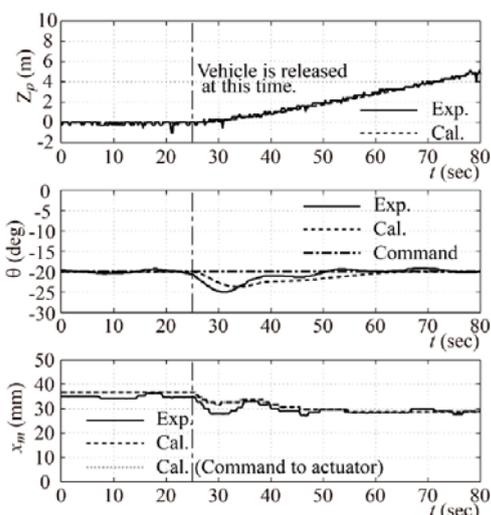


図5 水槽におけるピッチ角制御実験結果とシミュレーション結果の比較

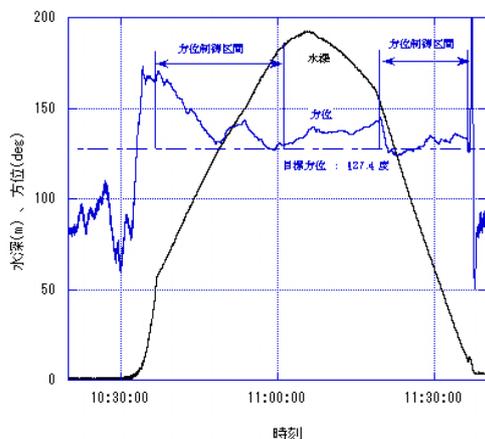


図6 目標位置に向けた滑走実験結果

能と海底に着底しスリープする機能、海中に浮遊しスリープする機能等を持つソフトウェアを開発した。具体的には、ピッチ角と方位の自動制御機能、新浮力エンジンの制御機能、海底を検知するための高度計制御機能と着底制御機能、浮遊制御機能、スリープ機能、浮上時の GPS 測位とイリジウム通信機能を持つソフトウェア、および、母船上または陸上のイリジウム端末制御用のソフトウェアを開発した。さらに、運動シミュレーション機能とデバイスシミュレーション機能を持つシミュレータを開発し、運動制御ソフトウェアに組み込み、実際に潜水しなくてもその動作がシミュレーションできる機能を組み込んだ。このシミュレータを用いることにより、実際に海洋で実験を行わなくても、運動制御の検討を行うことができるようになった。このシミュレータは、制御プログラムのデバッグにも使うことができる。

(3) 水槽実験と海洋実験による検証

図5は大型水槽を用いて行ったピッチ角制御実験結果の一例である。実験は、細いテグスでロボット本体を吊り下げて静止させた状態からテグスを解放し、ロボットを自由に滑走させて行った。そのためテグスを解放したときに過渡的な挙動が発生するが、図5から分かるように 40 秒程度でピッチ角が安定することが確認できた。制御はPID制御を用いている。図5からその挙動はシミュレーション結果と良く一致していることも確認できた。

さらにピッチ角制御や方位制御、GPS 測位、イリジウム通信などの総合的な機能を確認するために、小型船を用いて浅海域での実験を行った。図6はその結果の一例で、ピッチ角と方位制御を行うことで、目標位置に向けて走行可能ことが確認された。水面浮上後に GPS で測位した位置からも、目標に向かって走行したことが確認できた。その他の機能もすべて有効に働くことを確認した。この実験は浅海で行ったため、最大潜水深度は 200m に制限されているが、その後の試験で、最大潜水深度 1,000m まで目標方位に向けて滑走可能ことを確認した。

(4) 音響測位システムの開発

当初計画していた音響測位システムの開発は、今後の課題として残された。これは、体圧容器の海水による腐食に対する対策とソフトウェアの開発に想定以上の支出が必要となったためである。

(5) まとめ

以上の研究開発の結果、開発した定域長期観測用自律式水中ロボットは、目標位置に向けて安定して滑走できることが実証された。浮上時の GPS 測位機能やイリジウム通信機能なども安定して働くことが確認された。これで、自律式水中ロボットにより、長期定域観

測を行うための基本的な機能を開発し、検証することができた。

このほか、本研究では着底制御に必要なとなる超音波高度計を開発した。この超音波高度計を用いた着底機能と水中でのスリーブ機能については、制御ソフトウェアを作成済みである。その機能の確認は引き続き進める予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 中村昌彦、浅川賢一、渡健介、百留忠洋、川谷哲也、「バーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発ー一定加速度試験と滑空角制御ー」、日本船舶海洋工学会、Vol. 19, pp. 213-226, 2014. (査読有り)
- ② Kenichi Asakawa, Kensuke Watari, Masahiko Nakamura, Tadahiro Hyakudome, and Hisao Kanehara, “Pitch Control Performance of an Underwater Glider for Long-term Virtual Mooring,” Proc. of ISOPE-2014, pp. 449-445, 2014. (査読有り)
- ③ Masahiko Nakamura, Tetsuya Kawatani, Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome and Aki Yoshida, “Constant Acceleration Test and Motion Simulation of Underwater Glider “Tsukuyomi”,” Proc. of ISOPE-2014, pp. 456-462, 2014. (査読有り)
- ④ Masahiko Nakamura, Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Tetsuya Kawatani, Tsuyoshi Ueda, “Gliding Tests of Underwater Glider in Towing Tank,” Proc. of ISOPE-2013, 2013. (査読有り)
- ⑤ 中村昌彦、浅川賢一、百留忠洋、川谷哲也、「バーチャルモアリング用シャトルグライダー「ツクヨミ」の開発ー水槽滑空試験ー」、日本船舶海洋工学会論文集、第 18 号、pp. 143-156、2013. (査読有り)
- ⑥ Masahiko Nakamura, Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Satoru Kishima, Hiroki Matsuoka and Takuya Minami, “Hydrostatic Coefficients and Motion Simulations of Shuttle Vehicle for Virtual Mooring,” IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 38, No. 3, pp. 581-597, 2013. (査読有り)

[学会発表] (計 14 件)

- ① Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Yasuhisa Ishihara and Masahiko Nakamura, “Heading-control Tests of an Underwater Glider for Virtual

Mooring,” Proc. of OCEANS’ 15 MTS/IEEE Genova, Italy, May 18-21, 2015.

- ② Kenichi Asakawa, Tadahiro Hyakudome, Yasuhisa Ishihara and Masahiko Nakamura, “Development of an Underwater Glider for Virtual Mooring and its Buoyancy Engine,” Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2015, Chennai, India, February 23-25, 2015.
- ③ Kenichi Asakawa, Keisuke Watari, Masahiko Nakamura, Tadahiro Hyakudome and Junichi Kojima, “Motion Simulator for an Underwater Glider for Long-term Virtual Mooring Including Real Devices in Loop,” Proc. of OCEANS’ 13 MTS/IEEE San Diego, USA, September 23-27, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅川 賢一 (Asakawa, Kenichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・シニアスタッフ

研究者番号：40344288