

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01552

研究課題名（和文）エネルギー効率と機動性に優れたハイブリッド型AUVの実用化研究

研究課題名（英文）Practical study of hybrid AUV excellent in energy efficiency and mobility

研究代表者

有馬 正和（ARIMA, Masakazu）

大阪公立大学・大学院工学研究科 ・教授

研究者番号：70264801

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：将来の海洋資源の探査や海洋環境生態系の観測において、自律型海中ロボットの活躍が期待されている。申請者らが提案する「ハイブリッド型海中ロボット（HAUV）」は浮力調整装置と重心移動装置を備え、鉛直姿勢での潜降・浮上を行うことで流体抵抗を減らし、海中では水中スラスタを用いて自由自在に行動することができるため、エネルギー効率を大幅に改善して機動性を高めた行動を実現できる。本研究では、HAUVの試験機を改装して海中での運動性能をさらに向上させるとともに、実海域での試験を行い、実用可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底数千メートルで活躍する自律型海中ロボットは、搭載する動力源（バッテリー容量）の制約から長期間・広範囲での行動が極めて困難であった。本研究では、エネルギー効率を大幅に向上させ、機動性を高めた「ハイブリッド型海中ロボット」を提案することで、課題の解決を図ることができた。工学的手法を用いてわが国の将来のエネルギー政策や経済安全保障の推進に大きく貢献できることが本研究の学術的意義であり、社会的意義でもある。

研究成果の概要（英文）：Autonomous underwater vehicles are expected to play an active role in future exploration of ocean resources and observation of marine environment and ecosystems. The Hybrid Underwater Vehicle (HAUV) proposed by the applicants is equipped with a buoyancy control device and a centre-of-gravity shifting device and can dive and surface in a vertical posture to reduce fluid resistance, and it can act freely in the sea using underwater thrusters, thus significantly improving energy efficiency and increasing mobility actions can be achieved. In this research, the HAUV testbed vehicle was refurbished to further improve its underwater mobility and tested in actual sea conditions to clarify its practical feasibility.

研究分野：海洋システム計画学

キーワード：ハイブリッド型海中ロボット 水中グライダー 海洋環境生態系モニタリング 自律型海中ロボット AUV

1. 研究開始当初の背景

我が国は化石燃料などのエネルギー資源に乏しいと言われているが、世界第6位の面積を誇る日本の排他的経済水域 (EEZ) には、レアメタルを含む海底熱水鉱床 (水深 700~2,000m) やマンガン団塊 (水深 4,000~6,000m)、コバルトリッチクラスト (水深 800~2,400m)、レアアース堆積物 (水深 4,000~6,000m) などの海底鉱物資源やメタンハイドレート (水深 500~1,000m) などが豊富に埋蔵されていることが確認されている。現在、これらの海底資源を採掘し、商業利用するための技術開発が精力的に進められている。深海での海底資源探査やその採掘には航行型および作業型の海中ロボットの活躍が期待されているが、深海への潜降や海面への浮上には動力 (エネルギー) と時間を要する。特に、母船からの電源供給をせずに全自動で稼働する自律型海中ロボット (AUV : Autonomous Underwater Vehicle) では搭載する電源容量で運用時間が制約されることから、作業深度までの潜降および浮上に要するエネルギー消費を最小限に抑えることが大きな課題である。

本研究課題の申請者らは、エネルギー効率に優れた水中グライダーの長所と水中での機動性に優れた AUV の利点を融合させた「ハイブリッド型 AUV (以下、HAUV という)」の試験機 KAUBE-1500 を開発している。この機体の特徴は、水中グライダー技術である浮力調整装置と重心移動装置を備え、海底までの潜降および海面への浮上時に完全な鉛直姿勢をとって流体抵抗を減らして最小限の動力で潜降と浮上を実現したことと、海中での自由な運動を実現するための水中スラスタ (推進機) を駆動することで海底での水平移動を可能とし、水中グライダーの弱点を克服していることである。

本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、この革新的な HAUV の優位性を従来の AUV と比べて定量的に評価する際に、海面に投入してから潜航ミッションを達成して母船に揚収されるまでの総エネルギーを正しく評価する手法が確立されていないことである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者らが提案する HAUV を実用化することである。従来の AUV と比較してエネルギー効率が圧倒的に優れることを、数値流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) などの数値シミュレーションおよび水槽試験などの工学的手法によって実証し、実海域での海洋資源エネルギーの探査および海洋環境生態系の観測を行い、その妥当性と有用性を実証するとともに潜航性能の更なる向上を図る。

HAUV の特長を次ページの図で説明する。図1は、試験機 KAUBE-1500 (全長 : 2.65 m、全幅 : 1.56 m、全高 : 1.06 m、空中重量 : 232 kg、最大潜航深度 : 1,500 m) の斜視図、底面図、側面図である。機体前方に 10 L のバラストタンクを備え、小型高圧海水ポンプによって海水を注排水する。また、機体後部に重心移動装置を配置し、ウェイトを上下に動かすことによって機体の重心位置を制御することができる。さらに、機体最前部と機体最後部に上下スラスタ (前・後) を備えて潜降・浮上を円滑にするとともに左右の主翼下部に前後スラスタ (左・右) を備えて海中での自由な行動を実現することができる。

胴体上部に海洋環境観測プロファイラー (2,000m 仕様 RINKO-Profiler : JFE アドバンテック社製) を搭載しており、深度・水温・電気伝導度・塩分・DO (溶存酸素)・濁度を連続的に観測することができる。また、トランスポンダ (1,500m 仕様 : 海洋電子社製) からの応答を母船に設置した SSBL 位置検出装置で受信し、海中での位置を推定することができる。

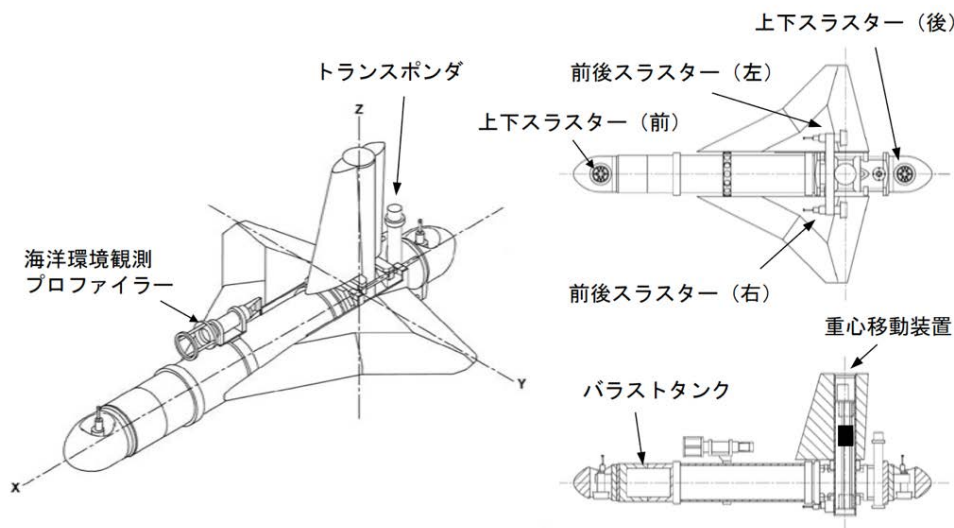


図1 KAUBE-1500の斜視図 (左)、底面図 (右上)、側面図 [中央断面] (右下)

図2は、試験機 KAUBE-1500 の潜航手順を示している。母船から洋上に展開した時点で (a) に示すような姿勢となるように重心・浮心位置および水中重量を調整している。(b) 小型高圧海水ポンプを駆動しバラストタンクに注水すると、機首を下げながら潜入を始める。(c) 機首が下を向いた時点で重心移動装置によってウェイトを上方に動かすと重心が浮心の鉛直下方になり機体が鉛直下向きの姿勢で潜降する。(d) 海底（調査深度）に到着すると、ウェイトを下げるとともにバラストタンク内の海水を少しだけ排水して水平姿勢になり、前後スラスター（左・右）を駆動して水平移動を行う。(e) バラストタンク内の海水を排水して機首上げ姿勢で浮上を開始する。(f) 重心移動装置によってウェイトを上方に動かすと鉛直上向きに浮上する。(g) 海面に到達する前に（水深 20m 付近で）ウェイトを下方に動かして水平姿勢にする。浮上すると再び (a) の姿勢になるが、バラストタンクに微量の注水を行うと、(h) のような水平姿勢をとることも可能である。従来の AUV では、上下スラスターを駆動し続けて潜降・浮上をしていたことから、HAUV の機体構成および潜航手順は自律型海中ロボットのエネルギー消費を大きく削減することのできる革新的な発明で、特許を出願した。

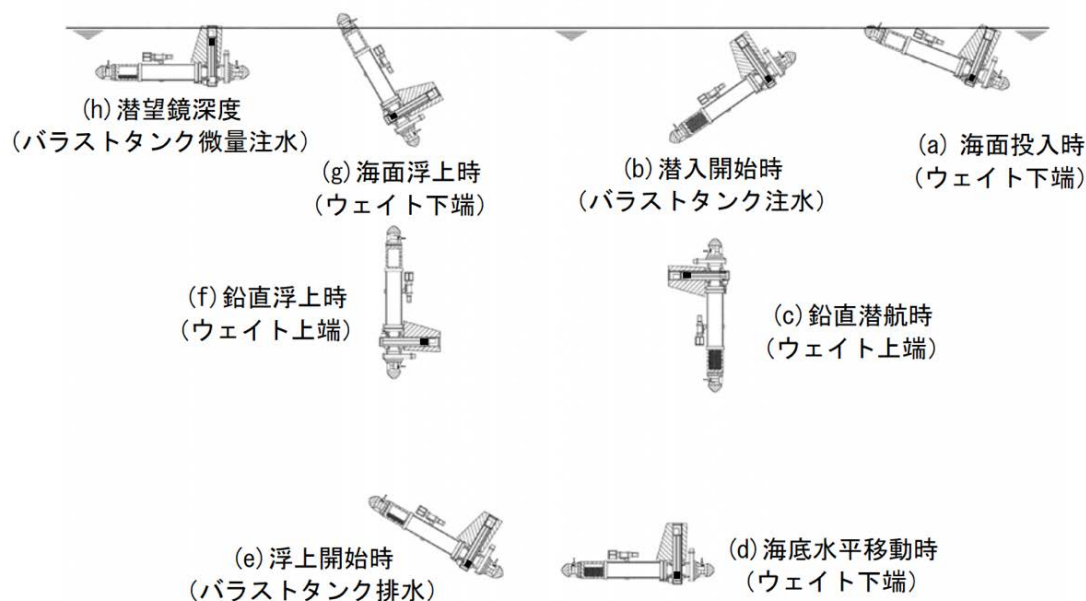


図2 KAUBE-1500の潜航手順

申請者らは、水槽試験および実海域試験を実施して、試験機 KAUBE-1500 が鉛直姿勢で潜降・浮上できることを実証しており、実海域で海洋資源エネルギーの探査および海洋環境生態系の観測を行って、近い将来の実用化を目指したいと考えている。HAUV の性能設計に資することができるよう、数値シミュレーション技術を駆使しエネルギー消費を推定する工学的方法を確立し、大深度での運用を想定した実機の設計にフィードバックすることに本研究の学術的独自性と創造性があると考えている。

また、実海域において海底熱水活動地点の探査や海棲哺乳類の観測手法を構築する。マッコウクジラが深海のイカを捕食したり、ザトウクジラがエシンやイワシ等を捕食したりする際、螺旋状に遊泳し獲物を追い詰めていくという作戦をとるが、海洋資源エネルギーの探査や海洋環境生態系の観測において、この大型鯨類の捕食行動にヒントを得た行動戦略を試みる。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するために本研究で実施した研究項目は、下記の通りである。

① HAUV のエネルギー消費の推定手法の構築

数値流体力学 (CFD) によって機体にはたらく流体力を推定し、浮力調整装置および重心移動装置、スラスターの駆動に要するエネルギー消費を予測する。運動制御シミュレーションに用いるアルゴリズムを実機に実装して、妥当性・有効性を検証する。さらに、HAUV の推進性能評価および設計に活かせる手法を確立する。

② HAUV の改装と水槽試験・洋上実験施設によるモデルの検証

KAUBE-1500 は、鉛直姿勢での潜降・浮上を実現できるが、海底での運動性能を向上させるために、バンク角制御機構の付加、バッテリーの増設とそれに伴う浮力確保のための耐圧容器の換装、亡失を避けるための安全策設置などの改装を要する。洋上実験（鹿児島湾）によりハードウェアの動作確認と①の推定手法の検証、評価を行う。

③ 実海域での海洋資源エネルギーの探査および海洋環境生態系の観測

改装した KAUBE-1500MkII を用いて実海域（鹿児島湾を予定）において海底熱水活動の探査および海洋生態系の観察を行い、HAUV の実用化に向けた評価、検証を行う。

4. 研究成果

2021年度は、当初の研究計画に沿って、下記の3項目について実施した。

- ① ハイブリッド型 AUV (HAUV) のエネルギー消費の推定手法の構築：数値流体力学 (CFD) によって機体にはたらく流体力 (抵抗) を推定し、浮力調整装置および重心移動装置、スラスターの駆動に要するエネルギー消費を予測するための推定モデルを検討した。また、使用する CFD ソフトウェアの選定と機体の形状データ (CAD) の整備を行った。
- ② HAUV の改装と水槽試験・洋上実験によるモデルの検証：KAUBE-1500 は、鉛直姿勢での潜降・浮上を実現することができ、潜航時のエネルギー消費を大幅に削減することができる。海底での運動性能をさらに向上させるために水中スラスター (推進機) の推力を大幅に増強させた。また、亡失を避けるための安全策として、船上に方向探知機を導入してラジオビーコン信号を精度良く捉えることができるようにした。HAUV の高度知能化を実現するために制御系を見直し、従来の PCL (Programmable Logic Controller) から ROS2 (Robot Operating System 2) への換装を実施し、小型水槽および鹿児島湾での実海域試験を実施して、動作確認を行った。
- ③ 実海域での海洋資源エネルギーの探査および海洋環境生態系の観測：最終年度 (2023 年度) に実施する、鹿児島湾での実海域試験において海底熱水活動の探査および海洋生態系の観察を行うための計画を検討した。HAUV の高度知能化を図るため、群知能海中ロボットシステムを構築して日本の EEZ における運用シミュレーションによって、その妥当性を明らかにした。

2022年度は、当初の研究計画に沿って、下記の3項目を実施した。

- ① HAUV のエネルギー消費の推定手法の確立：自律型海中ロボット KAUBE-1500 が、水平姿勢および鉛直姿勢で潜降・浮上する場合に機体にはたらく流体力 (抗力) を数値流体力学 (CFD) によって推定し、浮力調整装置および重心移動装置、スラスターの駆動に要するエネルギー消費を推定・評価する手法を検討した。運用シミュレーションの結果、KAUBE-1500 を鉛直姿勢で潜航させた場合、水平姿勢で潜航させた場合に比べて 1/8 程度の消費エネルギーになることが明らかとなった。図3は、潜降速度 0.3m/s で鉛直姿勢および水平姿勢における圧力分布と流速分布の解析例である。
- ② HAUV の自律制御系の構築：自律型海中ロボット KAUBE-1500 の高度知能化を実現するために、制御システムを従来の PLC (Programmable Logic Controller) から ROS2 (Robot Operating System 2) への換装を行った (令和3年度)。令和4年度は、最終年度 (令和5年度) に実施する実海域での海洋環境・生態系のモニタリング調査に向けて、前述のエネルギー消費の推定結果に基づき、さらに高度な自律制御プログラムの開発を進めた。鹿児島湾にて実海域試験を実施し、ハードウェアの動作確認を行った。
- ③ HAUV の改造：KAUBE-1500 の運動性能を向上させるために、耐圧容器を延長してバッテリーパックを回転させる機構を組み込んで機体重心を左右に移動させることによって、バンクを伴う旋回ができるようにした。改造後の KAUBE-1500mkII の制御系を令和5年度に開発をする計画である。

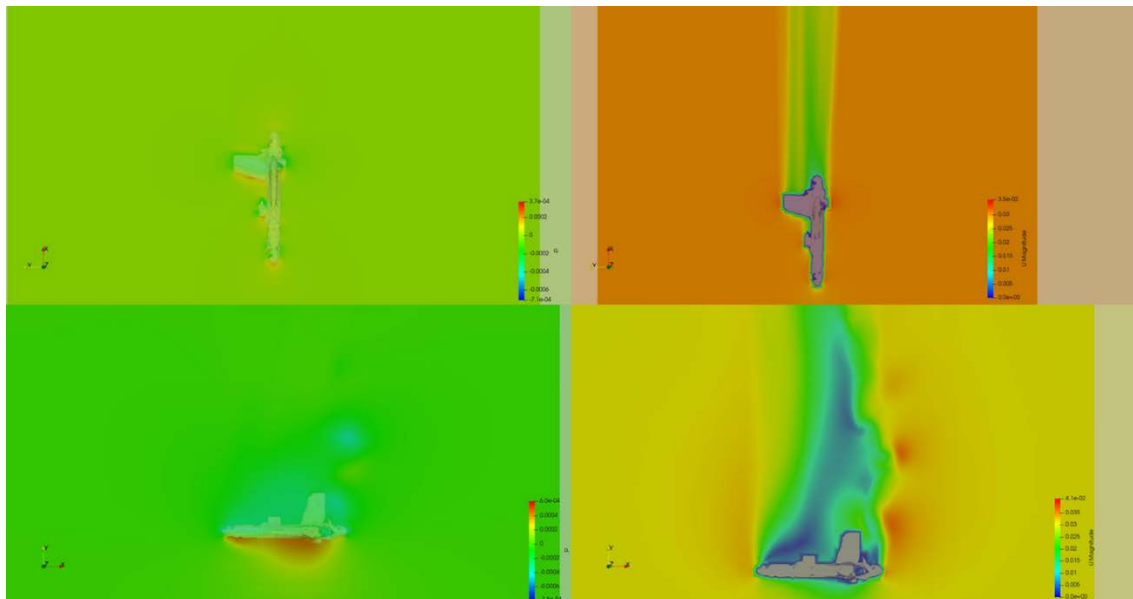


図3 鉛直姿勢および水平姿勢での潜降時に機体にはたらく圧力分布 (左) と流速分布 (右)

2023年度は、当初の研究計画に沿って、下記の3項目を実施した。

- ① HUG の潜航シミュレーション手法の構築：令和4年度（2022年度）に構築したハイブリッド型水中グライダーKAUBE-1500のエネルギー消費推定手法に基づいて、KAUBE-1500mkIIの実海域潜航シミュレーション手法を検討した。まず、機体の機動性（旋回性能）を向上させたKAUBE-1500mkIIの1/3縮尺機体模型を用いて、水産技術研究所・漁船推進性能実験棟の長水槽において水槽試験を実施した。抵抗試験および強制動揺試験を実施して、水平姿勢および垂直姿勢で潜降・浮上する場合に機体にはたらく流体力係数を求めた。また、数値流体力学（CFD）ソフトウェアによって機体にはたらく流体力を推定し、水槽試験との比較を行った。KAUBE-1500mkIIの高精度の潜航シミュレーションモデルを構築した。図4は、改造したKAUBE-1500mkIIのCAD図面および実機である。図5は、水槽試験の様子で、上下を反転させて曳引台車に取り付けて航走時の抵抗を計測している。また、右図は、CFDによるKAUBE-1500mkIIの流体力特性の推定例で、1/3模型による水槽試験の結果との比較を行った。
- ② HUGの自律制御系の構築と実証試験：自律型海中ロボットKAUBE-1500の運動性能を大幅に向上させるために令和4年度に改造された自律型海中ロボットKAUBE-1500mkIIの高度知能化を実現するために、自律制御システムを開発した。その自律制御システムの妥当性と有効性を検証するために、鹿児島湾（鹿児島県）において実海域試験を実施した。自律制御系の動作確認を行うとともに、得られた潜航データを用いて①で構築した潜航シミュレーションの検証、評価を行った。
- ③ HUGの実用化に向けた検討：将来のハイブリッド型水中グライダーの実用化を目指して、海洋環境生態系モニタリングにおける課題の抽出と解決策の検討を行った。鉛直姿勢での潜降と浮上を実現することのできるKAUBE-1500および同MkIIは、優れたエネルギー効率を実現していることを明らかにするとともに、将来の深海底生微生物の遺伝子解析機能を搭載したハイブリッド型水中グライダーの構想へと結びついた。

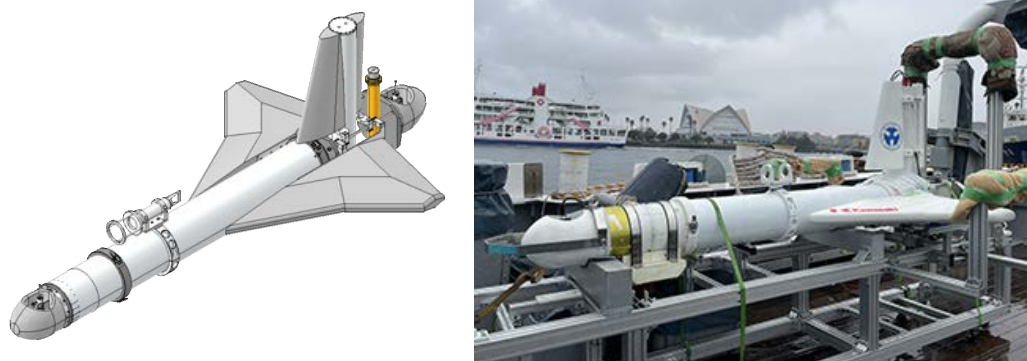


図4 ハイブリッド型水中グライダーKAUBE-1500mkIIのCAD図面（左）および実機（右）

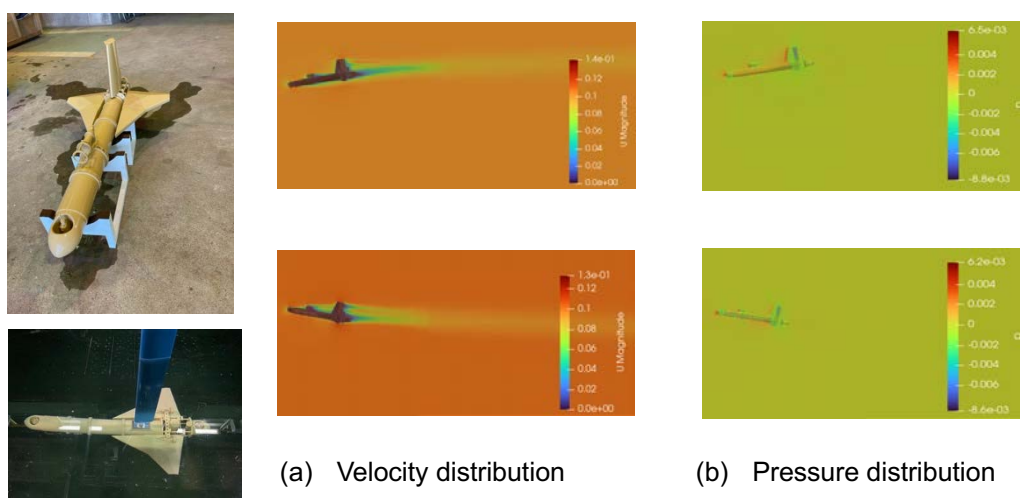


図5 KAUBE-1500mkIIの1/3模型と水槽試験の様子（左）とCFDによる流体力の推定（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 溝口健斗, 小島かな子, 有馬正和	4. 巻 35
2. 論文標題 群知能水中グライダーによる長期海洋観測シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 465-468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K.Kobatake, M.Arima	4. 巻 10
2. 論文標題 Verification of Swarm Intelligent Underwater Robot System for Marine Environment Observation with vehicle Loss Compensation and Functionality Maintenance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Procs. Of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 小島かな子, 有馬正和	4. 巻 34
2. 論文標題 群知能水中グライダーによる3次元広域海洋観測手法の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 115-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.34.115	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 K.Kobatake, M.Arima	4. 巻 -
2. 論文標題 Proposal of a Swarm Intelligent Underwater Glider System for a Long-term Three-dimensional Wide-area Ocean Observation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Procs. of the International Conference on Artificial Life and Robotics 2022 (ICAROB2022)	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 溝口健斗, 小島かな子, 有馬正和
2. 発表標題 群知能水中グライダーによる長期海洋観測シミュレーション
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K.Kobatake, M.Arima
2. 発表標題 Verification of Swarm Intelligent Underwater Robot System for Marine Environment Observation with vehicle Loss Compensation and Functionality Maintenance
3. 学会等名 OMAE2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K.Kobatake, M.Arima
2. 発表標題 Proposal of a Swarm Intelligent Underwater Glider System for a Long-term Three-dimensional Wide-area Ocean Observation
3. 学会等名 The International Conference on Artificial Life and Robotics 2022 (ICAROB2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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	石井 和男 (ISHI Kazuo) (10291527)	九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授 (17104)	

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
---------	---------