

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289335

研究課題名(和文) 無方向性を有する海洋観測用水中グライダーの運動制御と実海域試験

研究課題名(英文) Research on Motion Control of Disk Type Underwater Glider

研究代表者

中村 昌彦 (Nakamura, Masahiko)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：40155859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：従来の係留ラインによる海洋観測に代わる手法として、水中グライダーの使用が考えられ、定海域に留まらなければならない事を考えると、あらゆる方向に旋回することなく滑空可能な無方向性を有する機体形状が望ましい。ところが無方向性ゆえに機体の回転に対する抗力が非常に小さく、正確な針路を維持するためには運動制御に特別な工夫が必要となる。そこで、本研究では、回転を抑制する付加装置を考案し、運動シミュレーション・模型実験により効果を検証した。さらにビークルの重心を移動することにより針路保持を行うコントローラを設計し、運動シミュレーション・模型試験・実海域試験により性能の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years it has become evident that ocean data in time and space is required to make predictions of environmental changes on earth. As one method of acquiring data, we propose a virtual mooring system using an underwater glider, and have developed a disk type glider. However, since it is a disk type, rotational drag is small, and a special device to keep its course is required. In this research, the device which controls rotation of the vehicle was devised and the effect was verified by the motion simulation and model experiments. Furthermore, the controller which keeps the course by moving the center of gravity of the vehicle was designed, and the performance was verified by the motion simulation, model experiments and field experiments.

研究分野：海洋工学

キーワード：円盤型水中グライダー 運動制御 模型実験 実海域試験

1. 研究開始当初の背景

近年全地球規模における環境変化の予測、環境保全に関する研究がますます盛んになってきており、これらの研究を行うためには地球環境に大きな影響を及ぼす海洋の時間的・空間的な観測データが必要である。九州大学応用力学研究所では水中ビークルを使用したバーチャルモアリングによる定点観測を提案し、円盤型水中グライダー“BOOMERANG”を建造の上、実海域試験を実施してきた。円盤型水中グライダーは一般の航空機型グライダーと異なり、旋回することなくすべての方向に滑空が可能のため、浅海域でのバーチャルモアリングに有利であるが、無方向性を有する円盤型の機体ゆえに回転に対する抗力が非常に小さく、バーチャルモアリング性能を向上させるには工夫が必要である、そこで、本研究では、機体に装着できる回転抑制装置を考案するとともに多入力多出力系の針路保持コントローラを設計し、バーチャルモアリング性能の向上を図る。

2. 研究の目的

無方向性を有する円盤型水中グライダーの回転を抑制するための付加装置を考案し、針路保持性能の向上を図る。さらに多入力多出力系の針路保持コントローラを設計し、外乱を抑制することによりバーチャルモアリング性能を向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

所有する円盤型水中グライダー模型に新規制作した制御回路を搭載し、制御の信頼性と、水槽における使用可能範囲・水深を増大させる。グライダーの回転抑制装置を考案し、3Dキャドで設計の上 CFD 手法を用いて流体力を計算し、シミュレータで性能を確認するとともに水槽で模型実験を行い、性能を検証する。重心移動装置をアクチュエーターとする多入力多出力系の針路制御コントローラを設計の上模型グライダーに実装し、水槽で試験を行い、性能を検証する。性能が良好であることが確認されたコントローラを離散化し、実機“BOOMERANG”に実装して、実海域実験を実施する。実機用のコントローラ設計には実機の特性を把握して実機用の運動方程式を導く必要があるが、海洋観測で実機が使用される際に特性を入手する。

4. 研究成果

(1) 水中グライダー模型の改良

所有する円盤型水中グライダー模型(図1)の制御可能水深が 2m 程度と浅かったため、本研究で使用するために改良を行った。制御システムの概要を図2、図3に示す。図2が改良前のシステム、図3が改良後のシステムである。ラジコンによる通信は遠隔操縦モードのみで使用し、自律動作モードではビークル内に搭載したシングルボードコンピューター

ター(Target PC)がビークルの運動制御をつかさどる。Target PCにはOSは必要でなく、電源を入れると xPC カーネルが立ち上がり、Host PC から無線ランでダウンロードされた制御プログラムが実行される。実験終了後ビークルを引き上げ再びラン接続を行うと、Target PC から Host PC へ収録データを吸い出すことができる。

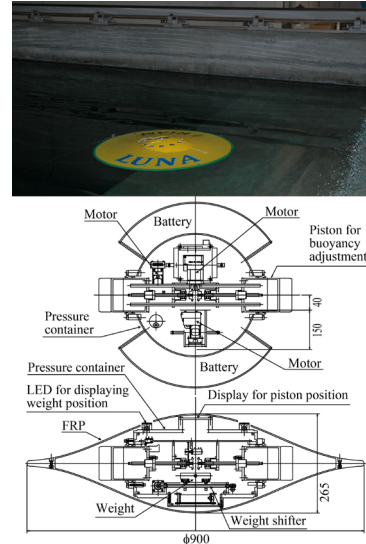


図1 円盤型水中グライダー模型

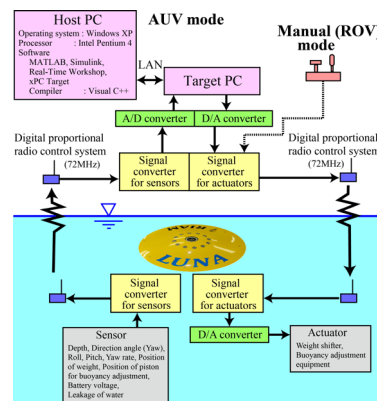


図2 従来の模型制御システム

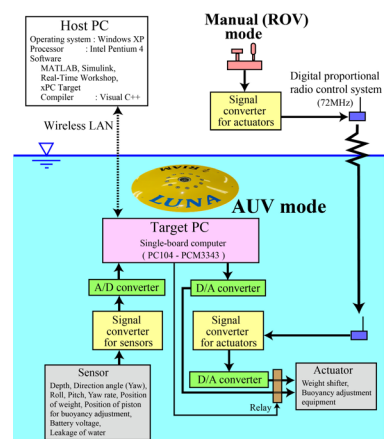


図3 信頼性を向上させた模型制御システム

(2) リブ状回転抑制装置による針路保持性能の向上

まず、ビークルのケージによる投入・回収の妨げとならず、ロープなどが絡みにくい形状であることを重視し、図4に示すリブ状の回転抑制装置を考案した。回転に対する定常的な外乱としては計測機器のセンサーを模した円柱を機体上部に取り付けた(図6)。図7に実験結果を示す。図は上から順にビークル潜航深度 Z 、縦揺れ角 θ 、船首方位(針路) ψ 、重心移動装置の重錘の横方向への移動距離 δ_{my} を示している。また、青色の実線は回転抑制装置を付けなかった場合、赤色の実線は回転抑制装置(a)を取り付けた場合、緑色の実線は回転抑制装置(b)を取り付けた場合の実験結果である。回転抑制装置がない場合はリリース直後にビークルが15度以上回転してしまい、その後も船首方位が振動的であることがわかる。回転抑制装置(a)を取り付けた場合はリリース後の回転が減少し、振動的な挙動も落ち着いている。回転抑制装置(b)を取り付けた場合はリリース後のビークル回転が劇的に減少し、船首方位もほとんど振動することなく安定している。リブ状回転抑制装置の効果が大きいことが実験により明らかとなった。

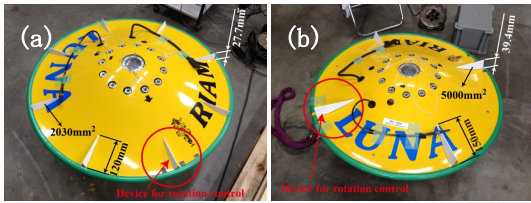


図5 リブ状回転抑制装置

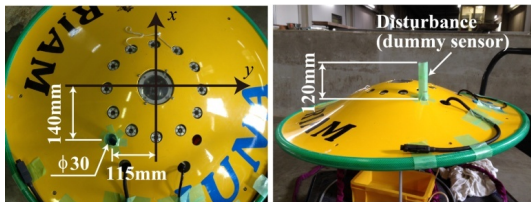


図6 外乱(円筒状の計測装置を取り付け)

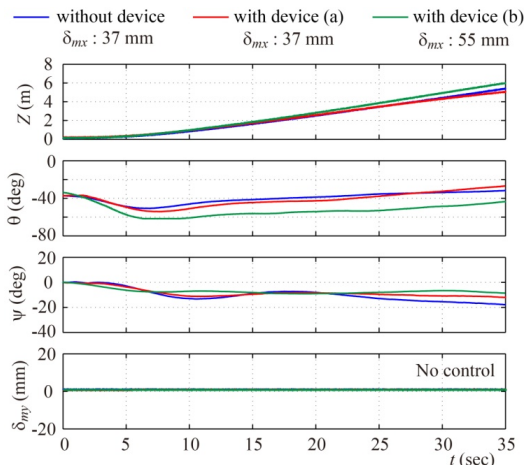


図7 リブ状回転抑制装置の効果

(3) 円柱状回転抑制装置による針路保持性能の向上

実機の場合は台座に乗せなければならないため(図8)、ハンドリングを考えると、下面にリブがない方が望ましい。そこで下面のリブをはずして模型実験を行ったが、安定した滑空を得ることができなかった。上下非対称によりトリムモーメントが大きくなってしまふのが原因と考えられる。そこで、現状の実機ビークル用台座がそのまま使用できる装置として、図9に示す、細い円柱状の回転抑制装置(c)をビークルの外周に取り付けることを考えた。外乱としては、重錘を横方向に動かすパルス状(パルス幅:1秒)の重錘移動指令を加えることとした。図10に重錘の横方向への移動指令を $\delta_{my,c} = 20\text{mm}$ とした場合の実験結果を示す。青色の実線は回転抑制装置を付けなかった場合、赤色の実線は回転抑制装置(c)を取り付けた場合の結果である。装置を取り付けなかった場合は外乱が無くなった後も船首方位が徐々に大きくなってしまっているが、装置を取り付けた場合は船首方位0度を保持している。

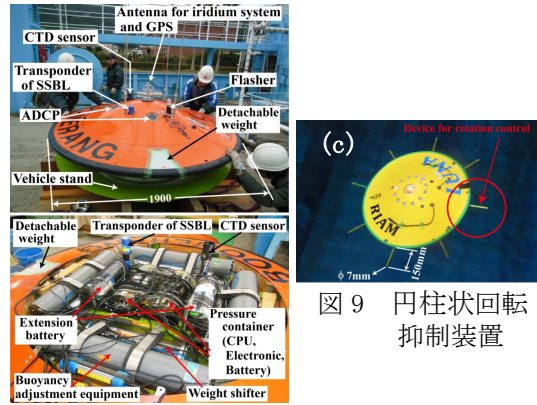


図9 円柱状回転抑制装置

図8 円盤型水中グライダー実機 "BOOMERANG"

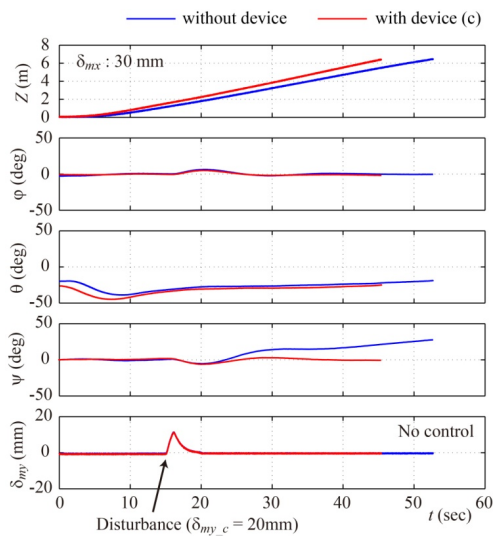


図10 円柱状回転抑制装置の効果

(4) 針路保持PID制御

さらに外乱が大きくなった場合はやはり針路保持フィードバック制御が必要と思われるので、まずは、PID 制御による針路保持を試みた。ビークルは、重錘を右舷方向に移動した直後に反時計まわりに回転し（時定数の非常に短い運動）、重錘を右舷側に維持したままにすると右旋回を始める（時定数の長い運動）特性がある。そこでまず、重錘を右舷方向に移動した直後にビークルは反時計まわりに回転する性質を利用した針路保持 PID 制御実験を行った。この方式のコントローラを PID control (a) と呼ぶことにする。外乱を $\delta_{my,c} = 10\text{mm}$ とした場合の実験結果を図 11 に示す。回転抑制装置がない場合は着底直前（水槽の水深は 7m）に針路がわずかにずれてしまっているが、回転抑制装置付きの場合は針路を精度よく保持していることがわかる。図 12 は外乱を $\delta_{my,c} = 30\text{mm}$ と大きくした場合の実験結果である。外乱が大きくなると回転抑制装置付きのビークルでも針路保持が困難になることがわかる。しかし、外乱が小さい場合は整定時間が短く非常に有効な針路保持制御方法であり、回転抑制装置も効果をおおいに発揮する。

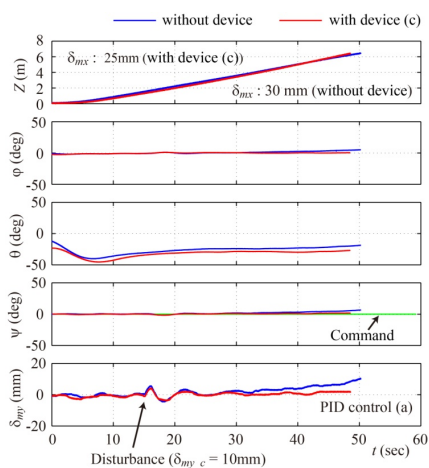


図 11 PID control (a) による針路保持性能 (外乱：小)

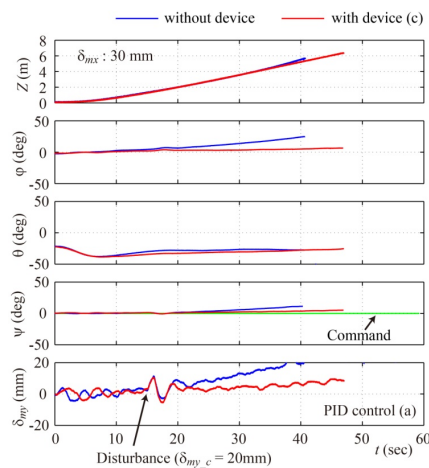


図 12 PID control (a) による針路保持性能 (外乱：大)

外乱が大きい場合は、重錘を右舷側に維持したままにするとビークルは右旋回を始める（時定数の長い運動）性質を利用して針路保持を行う必要がある。この方式のコントローラを PID control (b) と呼ぶことにする。外乱を $\delta_{my,c} = 10\text{mm}$ とした場合の実験結果を図 13 に示す。回転抑制装置が付いている場合は針路を保持できているが、装置がない場合は針路の振動的な変動が大きい。外乱を $\delta_{my,c} = 30\text{mm}$ とした場合（図 14）も針路が振動的に変動しているが平均値は 0 度で、一応針路保持が行えている。回転抑制装置が付いている場合は劇的に針路変動振幅が小さくなる。

以上の PID コントロール模型実験により、針路保持制御を行った場合は回転抑制装置が非常に有効に機能することが確認できた。制御理論からは外れるが、船首揺れ角速度、又は、横揺れを押える PID コントロールを追加すると性能が上がると思われるので、今後模型実験を実施し、検証したい。

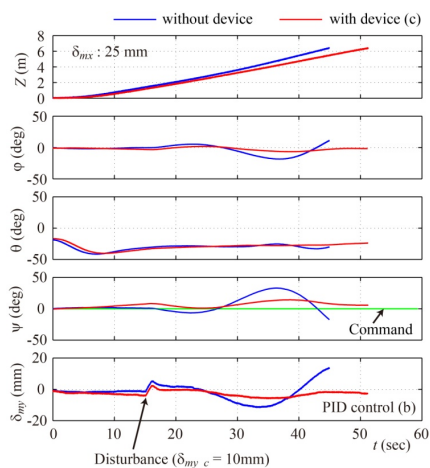


図 13 PID control (b) による針路保持性能 (外乱：小)

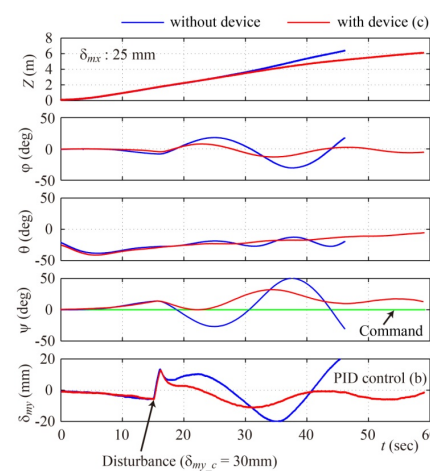


図 14 PID control (b) による針路保持性能 (外乱：大)

(5) 針路保持 LQI 制御
モデルベースの多入力多出力系である LQI

コントローラ設計には回転抑制装置を取り付けた状態の流体力係数を使用した運動方程式（数学モデル）が必要なる。そこで、流体力係数を CFD (Computational Fluid Dynamics) により計算した。CFD コードとしては CD-adapco 社の汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+ を使用した。図 15 に計算メッシュ (198 万メッシュ) を示す。図中黄色で示しているのがビークル模型表面、青色で示しているのが x-z 平面の流体メッシュである。ビークルのエッジ付近や回転抑制装置周辺はメッシュ数を増やし、複雑な流れに対応している。乱流モデルは RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) をベースにした手法が工学的に最も広く採用されているので、本計算においても RANS をベースとし STAR-CCM+ で用意されている Realizable k-ε 2 層モデルを採用した。

図 16 に実験結果を示す。濃い青色の実線は回転抑制装置がない場合の結果であるが、外乱が $\delta_{my,c} = 30\text{mm}$ と大きい場合でも、針路保持性能は PID 制御に比べて非常に優秀である。赤色の実線で示すように回転抑制装置が付くと PID 制御時ほどではないが若干針路保持性能が良くなる。黒色や薄い青色の実線で示すように外乱が小さくなると設定針路からの逸脱も小さくなっていることがわかる。針路誤差だけでなく横揺れ・船首揺れ角速度なども使用する多入力多出力系のコントローラの優秀性が明らかとなった。

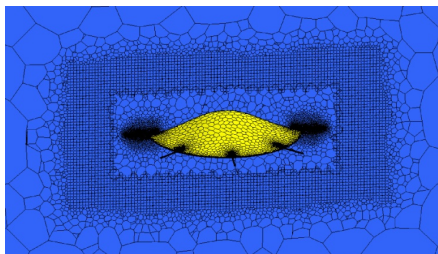


図 15 CFD による流体力の計算

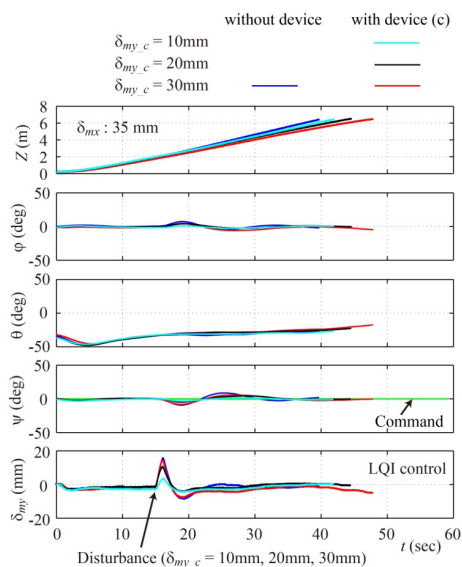


図 16 LQI 制御による針路保持性能

(6) 実海域試験 (LQI 制御)

2016年7月に実施された海洋観測時のビークル運動データから実機用のシミュレータをチューニングし、LQI コントローラの設計を行った。針路保持実海域試験は 2017 年 3 月に長崎新漁港沖水深 65mの海域 (図 17) において実施された。



図 17 実海域試験海域

試験結果を図 18 に示す。センサー等の搭載物が 2016 年 7 月以降に大幅に変更されたため、定常滑空角度 (平衡点) が 2016 年 7 月の海洋観測時 (約 15 度) と大きく異なってしまったことがわかる。このため平衡点まわりに非線形運動方程式を線形化して設計する LQI コントローラがうまく機能しなかった。さらに研究を続け、再度実海域試験を実施したい。

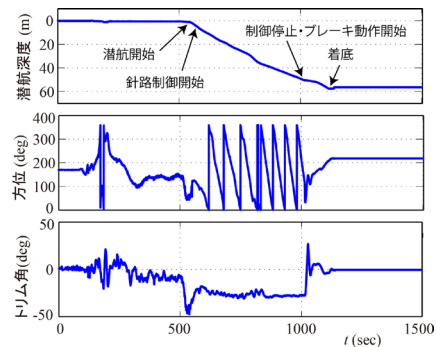


図 19 試験結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 中村 昌彦、石丸 隆宏、小寺山 亘、松村 直也：円盤型水中グライダーの針路保持性能向上に関する研究、日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会 第 26 回海洋工学シンポジウム講演論文集、pp. 1-7、2017、査読なし
- ② 中村 昌彦、伊藤 譲、小寺山 亘、野田 穰士朗、森井 康宏、山脇 信博、清水 健一、松野 健：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発—その 4 水中グライダーによる海洋観測—、日本船舶海洋工学会論文集、第 24 号、pp. 241-249、2016、査読あり、10. 2534/jjasnaoe. 24. 241
- ③ 中村 昌彦、浅川 賢一、前田 洋作、百留 忠洋、石原 靖久：シャトル型水中グライダーの着底・浮遊スリープ運動シミュレーション、日本船舶海洋工学会講演論文集、第 23 号、pp. 207-211、2016、査読なし
- ④ K. Asakawa, M. Nakamura, T. Hyakudome and Y. Ishihara : Sea Trials of an Underwater Glider for Long-term Virtual Mooring、

- Proc. of the 26th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.585-589, 2016, 査読あり
- ⑤ 中村 昌彦、浅川 賢一、百留 忠洋、石原 靖久：バーチャルモアリング用シャトル型水中グライダーの開発－実海域試験データを使用した運動シミュレーション－、日本船舶海洋工学会論文集、第 22 号、pp.217-228、2015、査読あり、10.2534/jjasnaoe.22.217
- ⑥ 中村 昌彦、伊藤 譲、小寺山 亘、野田 穰士朗、兼原 壽生、山脇 信博、松野 健：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発－水中グライダーによる海洋観測－、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 21 号、pp.347-352、2015、査読なし
- ⑦ K. Matsuoka, M. Nakamura, H. Nishi, S. Mochizuki, T. Ueda and K. Sawada : Research of Gliding Performance of the Plesiosaurus, Proc. of the 25th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.502-509, 2015, 査読あり
- ⑧ 中村 昌彦、松元 遼太、松村 直也：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発－針路制御模型実験－、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 20 号、pp.533-536、2015、査読なし
- ⑨ 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－一定加速度試験と滑空角制御－、日本船舶海洋工学会論文集、第 19 号、pp.213-226、2014、査読あり、10.2534/jjasnaoe.19.213
- ⑩ K. Asakawa, K. Watari, M. Nakamura and T. Hyakudome : Pitch Control Performance of an Underwater Glider for Long-term virtual Mooring, Proc. of the 24th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.449-455, 2014, 査読あり
- [学会発表] (計 10 件)
- ① 中村 昌彦、石丸 隆宏、小寺山 亘、松村 直也：円盤型水中グライダーの針路保持性能向上に関する研究、日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会 第 26 回海洋工学シンポジウム、2017 年 3 月 9 日、日本大学(東京)
- ② 中村 昌彦、浅川 賢一、前田 洋作、百留 忠洋、石原 靖久：シャトル型水中グライダーの着底・浮遊スリーブ運動シミュレーション、日本船舶海洋工学会、2016 年 11 月 21 日、岡山コンベンションセンター(岡山)
- ③ K. Asakawa, M. Nakamura, Y. Maeda, T. Hyakudome and Y. Ishihara : Landing-sleep and Drifting-sleep Experiments of the Underwater Glider for Long-term Observation, AUV 2016, 2016 年 11 月 8 日、東京大学(東京)
- ④ K. Asakawa, M. Nakamura, Y. Maeda, T. Hyakudome and Y. Ishihara : Development of Underwater Glider for Long-term Virtual Mooring - Aiming 6000m depth with Ceramic Housing -, Techno-Ocean 2016, 2016 年 10 月 7 日、神戸コンベンションセンター(神戸)
- ⑤ K. Asakawa, M. Nakamura, T. Hyakudome and Y. Ishihara : Sea Trials of an Underwater Glider for Long-term Virtual Mooring, The 26th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, , 2016 年 6 月 30 日、ロドス(ギリシャ)
- ⑥ 中村 昌彦、伊藤 譲、小寺山 亘、野田 穰士朗、兼原 壽生、山脇 信博、松野 健：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発－水中グライダーによる海洋観測－、日本船舶海洋工学会、2015 年 11 月 16 日、東京大学(東京)
- ⑦ K. Matsuoka, M. Nakamura, H. Nishi, S. Mochizuki, T. Ueda and K. Sawada : Research of Gliding Performance of the Plesiosaurus, The 25th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 2015 年 6 月 22 日、ハワイ(アメリカ合衆国)
- ⑧ 中村 昌彦、松元 遼太、松村 直也：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発－針路制御模型実験－、日本船舶海洋工学会、2015 年 5 月 26 日、神戸国際会議場(神戸)
- ⑨ M. Nakamura, T. Kawatani, K. Asakawa, T. Hyakudome and A. Yoshida : Constant Acceleration Test and Motion Simulation of Underwater Glider "Tsukuyomi", The 24th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 2014 年 6 月 18 日、釜山(大韓民国)
- ⑩ K. Asakawa, K. Watari, M. Nakamura and T. Hyakudome : Pitch Control Performance of an Underwater Glider for Long-term virtual Mooring, The 24th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 2014 年 6 月 17 日、釜山(大韓民国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 昌彦 (NAKAMURA MASAHIKO)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号：40155859

(2) 研究分担者

清水 健一 (SHIMIZU KENITHI)
長崎大学・水産学部・准教授
研究者番号：20533946

小寺山 亘 (KOTERAYAMA WATARU)
九州大学・応用力学研究所・名誉教授
研究者番号：80038562

梶原 宏之 (KAJIWARA HIROYUKI)
九州大学・工学研究院・教授
研究者番号：30114862