

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360389

研究課題名(和文)高精度姿勢・高度制御可能型高速深海曳航体システムの開発研究

研究課題名(英文)Development of Smart Deep Tow System

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) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：近年、各種センサーを使用しての海底資源探査や精密な海底地形の調査が重要性を増してきている。また、CO₂の海底下貯留を実現するためには、環境への影響を評価するためのモニタリングシステムの開発が必須である。これらの探査・調査・観測は広範囲に及ぶため、観測母船により各種センサーを搭載したブークルを曳航する深海曳航体システムの利用が有利と考えられる。そこで本研究では、探査・調査・観測に悪影響を及ぼす運動を低減することができ、高精度な姿勢・高度制御が可能な高速深海曳航体システムの開発研究を行った。曳航水槽において深海曳航体システム模型にを使用した運動制御実験を行い、良好な性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：The importance of deep ocean survey and monitoring is increasing for the change of situation of energy and CCS (Carbon Capture and Storage) under the sea bed. In recent years, AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) have been operated for deep ocean scientific research. They, however, have the limitation of long cruising because of battery performance. Although deep tow systems will solve this problem, the towing speed of current systems is not fast and the motions induced by the mother ship are not small. Then, we propose a deep tow system which consists of a launcher and a towed vehicle to realize high speed towing and high performance of motion control of the vehicle. Successful model experimental results were obtained.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋工学 制御工学 水中ブークル 曳航体システム

1. 研究開始当初の背景

近年、各種センサーを使用しての地震研究、メタンハイドレード・熱水鉱床等の海底資源探査や精密な海底地形の調査が重要性を増してきている。また、CO₂の海底下貯留を実現するためには、環境への影響を評価するためのモニタリングシステムの開発が必須である。これらの探査・調査・観測には、深海曳航体の利用又は自律巡航型海中ビークルの利用が考えられる。深海曳航体は観測母船で曳航されるため、長期間の広範囲な探査が可能となるが、現状のシステムでは曳航スピードが非常に遅く、調査・探査に時間を要する上、曳航体の運動を抑えることが困難なので精度のよい結果を得ることが難しい。逆に自律巡航型海中ビークルはより高速ではあるが、現状では航続距離が限られており、広範囲の探査が難しい。そこで、曳航速度が従来の物より速く、調査・探査・観測に悪影響を及ぼす運動も小さく、高精度な姿勢・高度制御が可能な新しい深海曳航体システムの開発が必要と考えられる。

2. 研究の目的

メタンハイドレード・熱水鉱床等の海底資源探査や精密な海底地形の調査、CO₂を海底下に貯留した場合のモニタリングを高速・広範囲で行うことが可能な高精度姿勢・高度制御可能型高速深海曳航体システムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

深海曳航体の曳航速度向上、探査・調査・モニタリングに悪影響を及ぼす機体運動の軽減、高精度な姿勢・高度制御を目指し、図1に示すようなシステムを提案する。

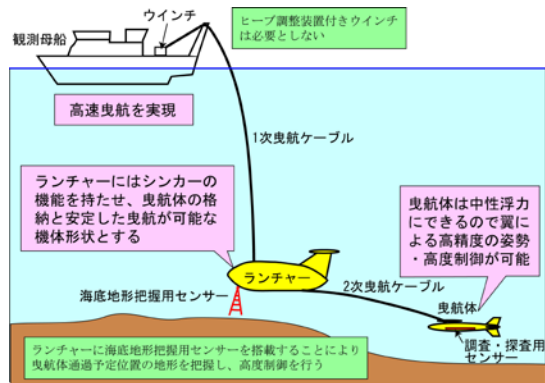


図1 開発する深海曳航体システムの概要

ランチャー・曳航体の形状はCFD・以前に開発した曳航体“FLYING FISH”の原型を用いて評価し最適化する。ランチャー・曳航体の流体力係数が得られるので、1次曳航ケーブル・2次曳航ケーブルを含めた数学モデルを構築し、曳航時の平衡状態を計算することで、曳航速度・潜航深度・ケーブル長の関係を検討する。次に1/4スケールの縮尺模型を製作し、制御系の設計を行い、模型を使用し

た運動制御試験を曳航水槽で行う。平衡状態の計算・模型試験よりランチャー・曳航体の最適曳航点・重心位置を検討する。さらに、模型試験を繰り返すことにより曳航体の深度・姿勢制御性能の向上を図る。

ランチャーは胴体内に曳航体格納のための十分なスペースを確保するとともに抵抗ができるだけ小さく、流体力学的な安定な形状を目指す。曳航体はランチャーに設けられた格納庫内に格納可能な大きさとする。模型には運動制御仕様を満たすためのアクチュエーターを搭載する。

4. 研究成果

(1) シミュレータの構築

曳航ケーブルに加わる流体力が極めて大きいためにランチャー・曳航体の運動は曳航ケーブルの挙動に大きく影響される。従って、ランチャー・曳航体と曳航ケーブルの運動を同時に考慮して深海曳航体システムの挙動を計算する必要がある。運動方程式のための座標系を図2に示す。

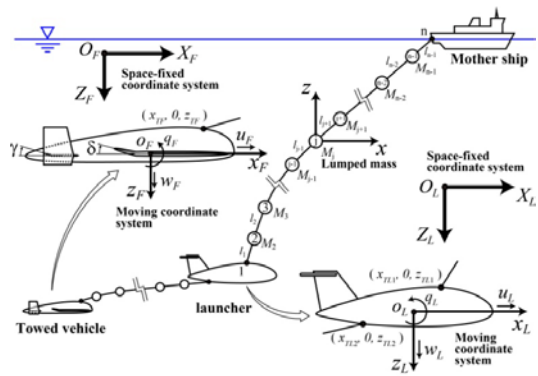


図2 座標系

曳航ケーブルの運動はランプドマス法を用いて記述する。ランプドマス法においては、曳航ケーブルは複数個の質点からなり、質点間は自重がない線形バネで結ばれていると近似する。さらに、曳航ケーブルの運動による付加質量力、曳航ケーブルの運動と潮流による抗力などの流体力と重力は各質点に集中して加わると仮定する。

ランチャー・曳航体の運動は物体に固定された動座標系で表す。運動方程式において加速度項・角速度項をゼロとして連立方程式を解けば平衡状態を計算することができ、平衡状態を初期値としてルンゲ・クッタ・ギル法などの数値計算法を用いて積分することにより各質点の位置(ケーブル形状)、曳航張力、ランチャーの運動、曳航体の運動などの時系列を得ることができる。

(2) ランチャーの形状決定と模型の製作

製作したランチャー模型を図2に示す。全長が1.5m、胴体部の最大幅が0.45mのFRP製で、胴体内に曳航体格納のための十分なスペースを確保するとともに抵抗ができるだけ小さくなる形状を目指している。また、2次ケーブルとランチャーの接触を避けるため、

胴体後部下端は斜めに切り上げた形状とし、尾翼も T 字翼としている。

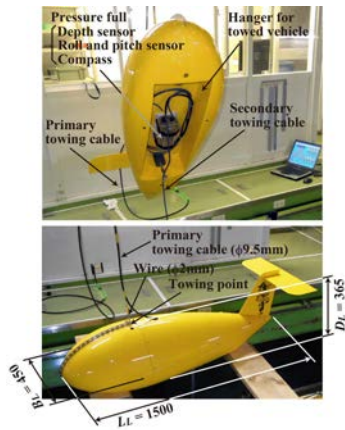


図 2 ランチャー模型

(3) ランチャーの流体力係数

CFD コードとして CD-adapco 社の汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+を使用して定常流中におけるランチャーに働く流体力を計算した。計算領域を図 3 に示す。また、図 4 (80 万メッシュ) に計算メッシュを示す。図中黄色で示しているのがランチャー模型表面、水色で示しているのが x_L-z_L 平面 (図 2 参照) の流体メッシュである。

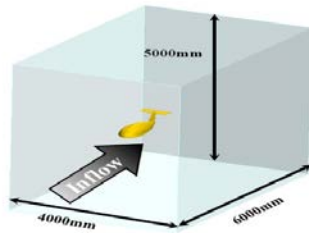


図 3 計算領域

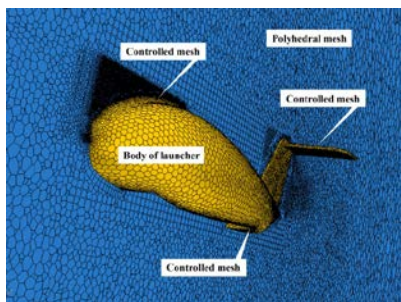


図 4 メッシュ分割

図 5、図 6 に曳航速度 0.9m/sec、迎角 5 度の場合のランチャー周りの流体速度を示す。図 6 が格納庫にカバーがある場合の計算結果である。また、計算された流体力の一例として図 7 に迎え角を変更したときにランチャーに働く揚力 (z_L 軸方向の力) 係数を示す。

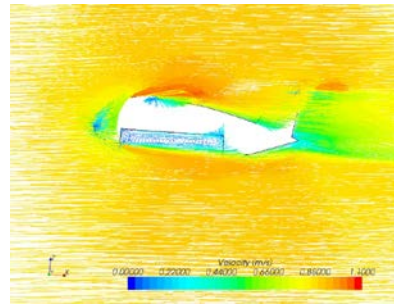


図 5 ランチャーまわりの流れ

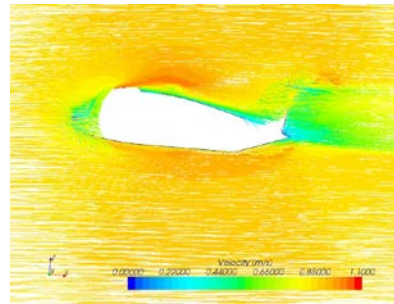


図 6 ランチャーまわりの流れ (格納庫カバー付き)

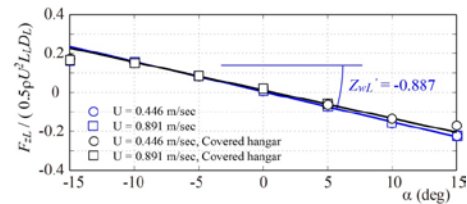


図 7 ランチャーの揚力係数

格納庫まわりの流場の差が少ないこと、流体力にほとんど差がなく、格納庫開放の影響が少ないことがわかったので、ランチャー製作・オペレーションの容易性を考慮し、以後の計算は格納庫のカバーが無い状態で行うこととする。

(4) 曳航体の流体力係数

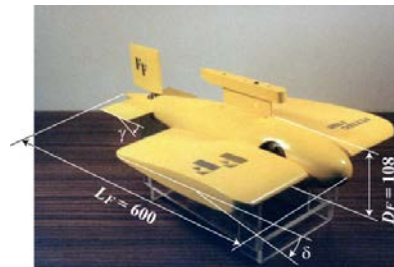


図 8 平衡状態の計算で使用した曳航体模型

深海曳航体システムの平衡状態を計算する段階ではまだ曳航体の形状が決定しておらず、模型も製作されていなかったため、曳航体の流体力係数は模型試験により値がわかっている (計画中の曳航体と形状が似ている) 九州大学応用力学研究所で開発された曳

航体“FLYING FISH”の原型（図8）のものを使用した。

(5) 定常曳航体の計算と考察

1次曳航ケーブルにJAMSTEC「かいこう」システムの1次ケーブル、2次ケーブルに海洋環境総合観測ロボット“FLYING FISH”の曳航ケーブルの主要目を使用して、（ランチャーの格納庫カバーが無い状態で）定常曳航状態を計算し、曳航速度・ランチャー重量・1次曳航ケーブル長さとしてランチャー潜航深度の関係、曳航速度・2次曳航ケーブル長さとして曳航体の潜航深度変更可能範囲について検討した。

図9に曳航速度が従来の曳航体より2倍程度高速である2ノットの場合の曳航状態を示す。1次ケーブル長は4000mと6000m、ランチャー重量（内部流体を含む）は10000kgfと15000kgfについて計算を行っている。ただし、2次ケーブル長さは100m、曳航体主翼角は最大潜航深度時の15度としている。潜航深度を増大させるためには、ケーブル長さを4000mから6000mと1.5倍にするよりも、ランチャー重量を10000kgfから15000kgfと1.5倍にする方が有利であることがわかる。

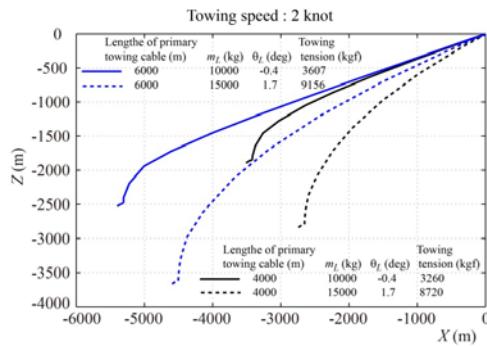


図9 曳航ケーブル形状

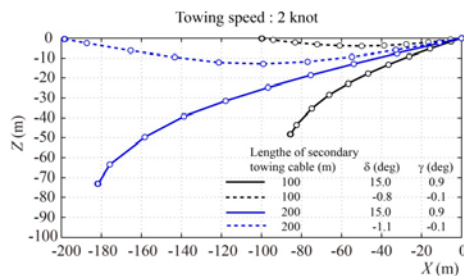


図10 2次曳航ケーブル形状

図10に曳航速度が2ノットの場合の2次曳航ケーブル形状を示す。図を見やすくするために2次ケーブル上端を座標原点としている。曳航体は2次曳航ケーブルとランチャー尾部の接触を避けるためと、観測母船が減速した際に曳航体がランチャーにぶつかるのを避けるために、ランチャーより深い深度で曳航する。両図より、曳航体が中性浮力の場合、主翼角にかかわらず潜航深度はほぼ同じであることがわかる。また、2次曳航ケーブ

ル長さが100mの場合約50mの深度変更可能幅を持ち、200mの場合約70mの深度変更可能幅を持つことがわかる。ケーブル長を2倍にしても曳航体の潜航深度は1.4倍にしかならない。

(6) 曳航体模型の製作

曳航体模型を図11に示す。全長が0.75mのFRP製であり、ランチャー格納庫内に格納可能な大きさとしている。このため、水平尾翼をできるだけ胴体下部に設置し、その翼端に垂直尾翼を設けることで、垂直尾翼上端を胴体最大高さ内に収めるとともに垂直尾翼面積を確保している。

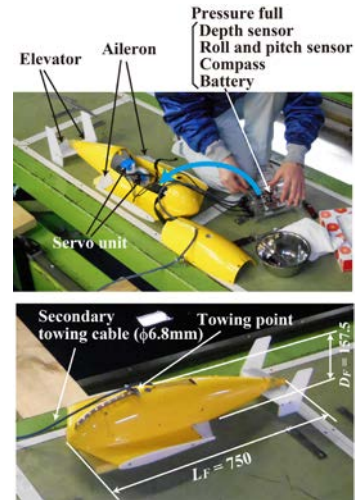


図11 曳航体模型

(7) 模型による運動制御試験状態

実験は九州大学応用力学研究所・深海機器力学実験水槽（長さ：65m、幅：5m、深さ：7m）において実施された。実験状態を図12に示す。1次ケーブル長は1.23m、2次ケーブル長は2mで、1次ケーブル上端が曳航台車に固定されている。

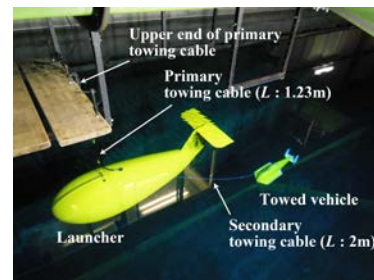


図12 水槽試験状態

(8) 曳航体の運動制御方法

曳航体の運動制御はPID制御を使用することとした。図13にエルロンとエレベータで曳航体の潜航深度を、エレベータで横揺れを制御するコントローラを示す。エルロンとエレベータで潜航深度を制御するため、本来1入力1出力の制御系であるPID制御理論から外れるが、ゲインの調節により役割に適切な重みを付けることで良好な制御性能が得られる。また、エレベータは深度の制御に-15

度 \sim +15度、横揺れの制御に -5 度 \sim +5度を使用するように制約を付け、最大エレベータ角度が機械的な制限値(と失速予測角) ± 20 度を超えないようにしている。図14はエルロンとエレベータで曳航体の潜航深度を、エレベータで横揺れと縦揺れを制御するコントローラである。エレベータの役割は潜航深度制御・横揺れ制御・縦揺れ制御の3つになり、制御理論からは外れるが、図13の場合と同様、役割に適切な重みを付けることで工学的には制御可能となる。

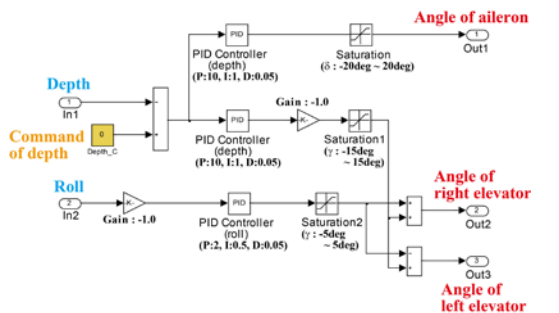


図13 PIDコントローラ(深度・横揺を制御)

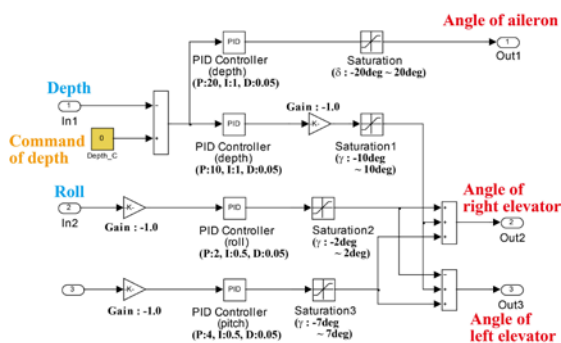


図14 PIDコントローラ
(深度・横揺・縦揺を制御)

(9) 模型による運動制御試験結果

エルロンとエレベータで曳航体の潜航深度を、エレベータで横揺れをゼロに制御した場合の実験結果を図15に示す。曳航速度は0.4m/secで、実機では約1.5ノットと、従来の曳航体比べると高速である。図は上から順にランチャーの潜航深度、ランチャーの横揺れ、ランチャーの縦揺れ、曳航体の潜航深度、曳航体の横揺れ、曳航体の縦揺れ、エルロン角度、右エレベータ角度、左エレベータ角度であり、赤の実線が指令値である。ステップ状の1m潜航深度変更指令に対してオーバーシュートが大きいものの、指令に従って深度が良好に変更されていることがわかる。横揺れも指令に従いゼロ度を保っている。また、曳航体の潜航深度を変更してもランチャーの潜航深度・縦揺れ角に変化はなく、曳航点位置・2次曳航ケーブルのランチャーへの取り付け点が適切であったことがわかる。ただし、曳航体の縦揺れ角は深度変更に伴い大きく変動している。縦揺れ角をゼロにする制御を行わず、深度変更を優先したためであるが、搭載センサーによっては、深度変更中

も縦揺れをゼロに保つ必要がある。

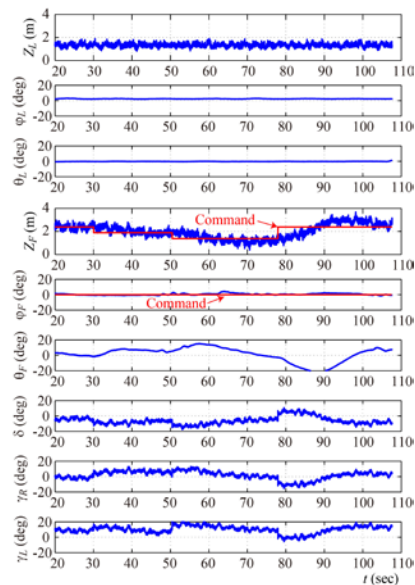


図15 ランチャーと曳航体の運動
(深度・横揺を制御)

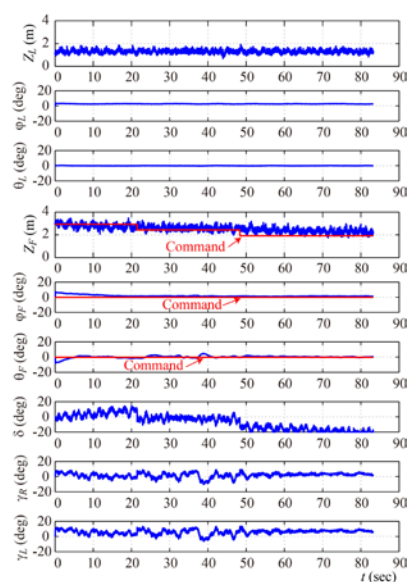


図16 ランチャーと曳航体の運動
(深度・横揺・縦揺を制御)

図16はエルロンとエレベータで曳航体の潜航深度を、エレベータで横揺れと縦揺れをゼロに制御した場合の実験結果である。曳航速度は図15の場合と同じ0.4m/secであるが、図15と異なり、深度を変更してもトリム角はゼロのままである。良好な運動制御が行えていることがわかる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10件)

- ① 中村昌彦、伊藤譲、野田穰士朗：模型による深海曳航体システムの運動制御水槽試験、日本船舶海洋工学会論文集、第18号、2014、査読なし
- ② 中村昌彦、松岡晃史：深海曳航体システムに関するフィジビリティスタディ、日

本海洋工学会・日本船舶海洋工学会第 24 回海洋工学シンポジウム、CD-R、2014、査読なし

- ③ 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、査読あり
- ④ 中村 昌彦、川谷 哲也、浅川 賢一、百留 忠洋：水中ビークルの付加質量係数と抵抗係数に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 17 号、pp. 393-396、2013、査読なし
- ⑤ M. Nakamura, K. Asakawa, T. Hyakudome, S. Kishima, H. Matsuoka and T. Minami : Gliding Tests of Underwater Glider in Towing Tank, Proc. of the 23th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.350-355, 2013, 査読あり
- ⑥ W. Koterayama, M. Nakamura, Y. Ito and H. Yoshimura : Autonomous Underwater Vehicle for Practical Use in Ocean Observations , Proc. of the Tenth Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium, pp.169-175, 2012, 査読あり
- ⑦ 望月 直、中村 昌彦、西 弘嗣、川谷 哲也、植田 剛史：絶滅した遊泳性爬虫類の遊泳性能評価、日本船舶海洋工学会第 23 回海洋工学シンポジウム論文集、CD-R、2012、査読なし
- ⑧ 中村 昌彦、浅川 賢一、百留 忠洋、松岡 宏樹、川谷 哲也、植田 剛史：シャトルビークル「ツクヨミ」の水槽滑空試験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 14 号、pp. 483-486、2012、査読なし
- ⑨ T. Hyakudome, M. Nakamura, H. Utsugi, H. Matsuoka and T. Minami : What Kind of Form is Suitable for Autonomous Underwater Vechicles ?, Proc. of the OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA Conference & Exhibition, CD-R, 2011, 査読なし
- ⑩ 澤隆雄、中村昌彦、稲田勝、吉田弘、百留 忠洋、石橋正二郎：中性浮力曳航体の水槽および実海域における曳航実験、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 12 号、pp. 141-144、2011、査読なし

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 中村昌彦、伊藤譲、野田穰士朗：モデルによる深海曳航体システムの運動制御水槽試験、日本船舶海洋工学会、2014 年 5 月 27 日、仙台
- ② 中村 昌彦、松岡 晃史：深海曳航体システムに関するフィジビリティスタディ、第 24 回海洋工学シンポジウム、2014 年 3 月 14 日、東京
- ③ 中村 昌彦、川谷 哲也、浅川 賢一、百留 忠洋：水中ビークルの付加質量係数と抵抗係数に関する研究、日本船舶海洋工学会、

2013 年 11 月 22 日、大阪

- ④ M. Nakamura, K. Asakawa, T. Hyakudome, S. Kishima, H. Matsuoka and T. Minami : Gliding Tests of Underwater Glider in Towing Tank, Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 2013 年 7 月 2 日、アンカレッジ (USA)
- ⑤ W. Koterayama, M. Nakamura, Y. Ito and H. Yoshimura : Autonomous Underwater Vehicle for Practical Use in Ocean Observations, Tenth Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium, 2012 年 10 月 4 日、ウラジオストック (ロシア)
- ⑥ 望月 直、中村 昌彦、西 弘嗣、川谷 哲也、植田 剛史：絶滅した遊泳性爬虫類の遊泳性能評価、第 23 回海洋工学シンポジウム、2012 年 8 月 3 日、東京
- ⑦ 中村 昌彦、浅川 賢一、百留 忠洋、松岡 宏樹、川谷 哲也、植田 剛史：シャトルビークル「ツクヨミ」の水槽滑空試験、日本船舶海洋工学会、2012 年 5 月 17 日、神戸
- ⑧ M. Nakamura et al : Study on Hydrodynamic Coefficients of Underwater Vehicle for Virtual Mooring, The OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA Conference & Exhibition, 2011 年 9 月 22 日、ハワイ (USA)
- ⑨ T. Hyakudome, M. Nakamura, H. Utsugi, H. Matsuoka and T. Minami : What Kind of Form is Suitable for Autonomous Underwater Vechicles ?, OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA Conference & Exhibition, 2011 年 9 月 22 日、ハワイ (USA)
- ⑩ 澤隆雄、中村昌彦、稲田勝、吉田弘、百留 忠洋、石橋正二郎：中性浮力曳航体の水槽および実海域における曳航実験、日本船舶海洋工学会、2011 年 5 月 19 日、福岡

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

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・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30114862

胡 長洪 (HU CHANGHONG)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号：20274532

澤 隆雄 (SAWA TAKAO)
海洋研究開発機構・海洋工学センター・
研究員
研究者番号：50359139