

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289336

研究課題名(和文)自律型OBEM計測システム用海中ピークルの着底位置制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on the position control of an underwater glider for ocean floor resources exploration

研究代表者

山口 悟 (Yamaguchi, Satoru)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00253542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：有効な海底資源探査を早期に実施するために海底資源探査用小型電磁センサを自律型海中グライダーに搭載し、海底下構造の観測を実現する自律型OBEM計測システムを提案した。

開発された機体には従来の海洋観測を目的とした巡航型の海中グライダーとは異なり、長大なOBEM計測用アームを持つ全翼型の形状が採用され、主翼の軽量化のためにメンブレン式の翼が用いられた。自律海底資源探査のために着底と移動を正確に繰り返すための運動制御系が設計され、その有効性が水槽試験、数値シミュレーション、実海域試験により確認された。提案する方式の海底資源探査システムは他に例がなく、本研究の成果は意義深いものであると考える。

研究成果の概要(英文)： A novel exploration method of ocean floor resources is expected for effective utilization of the ocean and the object area for the development expands to deeper sea area recently. An autonomous underwater glider which equips an OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer) for ocean floor resources explorations was proposed in this study. The autonomous vehicle has an ability to achieve a long term continuous resources exploration autonomously. The buoyancy and attitude control mechanism enable the vehicle to move to the next measurement point by gliding. The landing point for the measurement is precisely controlled by the motion control system.

Developed gliding performance of the vehicle was investigated by tank and field experiments. The mathematical model of the vehicle motion was proposed based on the study and numerical calculations were carried out to design the motion control system for the autonomous underwater glider for OBEM measurement.

研究分野：海洋工学

キーワード：海底資源探査 自律探査システム OBEM 海中グライダー 運動制御

### 1. 研究開始当初の背景

温暖化を始めとする地球規模での環境問題や東日本大震災後のエネルギー事情を背景として、海洋エネルギー・鉱物資源の利用が大きな期待を集めている。このような社会的背景のもと、我が国の排他的経済水域内にも有用な海底資源の存在が確認され、メタンハイドレート、海底熱水鉱床といった新しい海底資源の開発方法が具体的に検討され始めた。

資源開発における第一段階としては、対象とする資源の賦存量を出来る限り正確に把握することが重要である。従来の海底資源探査では船舶に搭載された地震探査システム、マルチビーム測深機、計量魚群探知機、サブボトムプロファイラー、重力計、磁力計、コサンプラーといった機器が使用されて来たが、近年では対象海域の大深度化や海中ピークルの発達に伴い、海中機器に搭載されたマルチビーム測深機、サイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラー、磁力計、採水器、化学センサ、各種カメラ、サンプリングのためのコンピューターなどが用いられるようになって来ている。

大水深海域における高精度探査を実施するための機材として OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer) による海洋電磁探査が注目を集めている。これは海中に投入・着底させたセンサで海底の電磁場の変化を計測し、多数の測点での計測を繰り返すことにより対象とする海域の海底下構造を観測する方法である。OBEM による海洋電磁探査は実用段階にあるが、対象海域を探査するためには調査船による機材の投入、計測、回収、移動を繰り返すか、同時に多数の OBEM を海底に設置する必要がある、多大な時間とコストが必要となる。このため現在では、これらの欠点を克服するために、海底に設置された複数の OBEM に人工信号源となる海中ピークルから信号を送ることで効率的な計測を実施する人工信号源電磁探査法 (MCSEM 法) も提案され検討が行われている。

これら様々な海底探査手法のうち、海底下の構造を把握するための観測について考えると、専用船による地震探査は運用コストが高く、現在求められている広大な排他的経済水域内を探査するための十分な機材を早急に運用することは困難である。また、探査対象海域は大深度化しており、従来の船舶による探査では計測精度の低下が懸念される。一方で、近年、無人海中ピークルに各種計測器を搭載する探査方法に関する研究が活発化しているが、現在のところ実用段階には無く、また、開発・運用コストが高いことが予想され、近い将来における実用化は難しいと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、低コストで効率的な海底資源探査を早期に実現するために、海底資源探査

用の OBEM を搭載する自律型海中ピークルの海底における精密位置制御方法を提案し、その有効性を調査する。すなわち、海底資源探査用小型電磁センサを自律型海中ピークルに搭載し、従来は固定点での計測のみに用いられて来た OBEM に移動能力を付加することにより、低コストで効率的な海底下構造の観測を実現する自律型 OBEM 計測システムを提案する。

海底下構造の探査手法としては、海中ピークル単体での自律計測を可能とするため、海洋電磁探査法の一つで自然界の電磁場変動を観測する MT 法を採用する。また、長期間連続の自律計測を行うため、ピークルの運動制御には省エネルギー性に優れたグライダー型推進が有効であると考えられる。探査海域に設定された多数の測点間を、潜降浮上を繰り返しながら移動して自動計測を実施することにより、観測に必要な労力を従来の手法に比べ大幅に削減することが出来、より広域な開発対象海域の探査が可能になると期待される。図 1 に提案する計測システム概念図を示す。

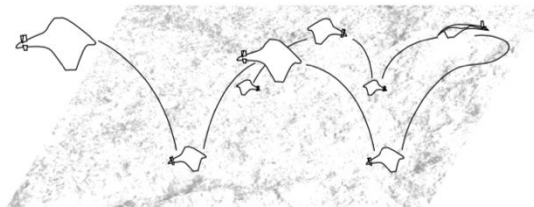


図 1 自律 OBEM 計測システム概念図

OBEM を用いた海底資源探査においては、着底状態で計測を実施する際の電磁センサの位置と方位を正確に測位することがデータ解析のために不可欠である。本研究では自律型潜降浮上式ピークルの運動を制御し、その姿勢を精密に推算・計測する方法について調査する。

### 3. 研究の方法

まず始めに、自律 OBEM 計測を実現するための機体を計画し、機体の運動制御系の設計のために機体運動方程式の導出と、これに基づく運動シミュレーションを実施する。また、設計された運動制御システムの性能を水槽実験と実海域試験によって評価する。

ピークルの機体形状には OBEM の 4 本の電極を一定距離以上離して配置することが求められる。また、耐圧殻内部には海中電磁探査用センサおよび計測データ処理システム、水中重量調節装置、機体運動制御系、洋上データ通信装置を搭載することが求められる。特に、水中重量調節装置の個数と取り付け位置は重要であり、従来のグライダー型ピークルに関する研究結果を基に本システムに要求される運動性能に沿って詳細に検討する。

計画された自律型 OBEM 計測システム用海中ピークルについて、機体の運動方程式を

模型実験等により導出する。ピークルの推進方式としては滑空方式を採用することとする。すなわち、潜降時には主に尾翼の各動翼を用いて機体運動を制御し指定された測点への着底を行い、同時に水中重量と機体重心位置を変化させることで、より精密な着底位置制御が可能になると考えられる。そこで、ピークル機体の計画と運動方程式の定式化においては動翼、水中重量調節装置、機体の重心の各要素を個別に検討し、正確な運動モデルの構築を目指す。

決定された機体形状とその6自由度運動方程式に基づき、潜降浮上時の機体運動シミュレーションプログラムを作成し、運動制御システムの設計を行う。続いて、水槽実験でプロトタイプ機の滑空試験を実施し、運動シミュレーションに用いた流体力係数の精度を確認する。また、水槽における機体の着底試験を実施し、開発された運動制御系の着底位置制御性能を調査し、提案する機体の運動制御方法の有効性を確認する。

海洋での資源探査における機体の運動性能を確認するために実海域試験を実施する。実海域試験の水深は、プロトタイプの耐圧の制限から100m程度の海域を予定する。

#### 4. 研究成果

低コストで効率的な海底資源探査を早期に実現するために、海底資源探査用のOBEMを搭載する自律型海中ピークルの海底における精密位置制御方法を提案し、その有効性を調査することを目的として研究を実施した。海底下構造の探査手法としては、海中ピークル単体での自律計測を可能とするため、海底電磁探査法の一つで自然界の電磁場変動を観測するMT法を採用した。また、長期間連続の自律計測を行うため、ピークルの運動制御には省エネルギー性に優れたグライダー型推進を採用し、その有効性について調査した。

提案した資源探査法においては、対象調査海域の海底下構造を探査するために、海域内を適当な格子に分割し、各格子の中心点となる測点をグライダー型海中ピークルが順次移動して自律的にOBEM計測を実施するため、グライダー型ピークルにとって基本的な特性となる定常状態における滑空比を中心に、機体に求められる運動性能を数値流体力学に基づき調査した。すなわち、翼面積を同一とし、その平面形状のみを変化させた複数の機体について計算を実施した。図2に主翼形状の検討に用いられたモデルの一例を示す。流速0.2m/secの一樣流中に固定された機体について機体の迎角を変化させてシリーズ計算を実施した結果では、機体は迎角10度付近で最大揚抗比が5.4となることが確認された。また、機体の上下非対称性により迎角が負の領域では揚抗比の低下が確認された。調査した機体形状の計算結果に大きな違いは見られず、翼平面形状の変化が滑空性能に

与える影響は小さいことが確認された。

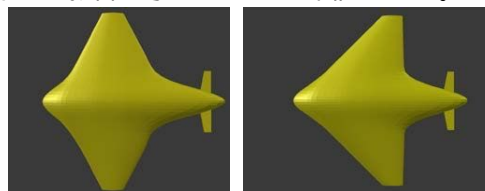


図2 主翼形状の検討

機体運動の数学モデルに用いられる流体力係数を推算するために、一樣流中で機体に強制変位を与えて機体の各方向に作用する流体力を算出した。その結果、機体に作用する流体力に大きな差異は見られず、潜降から浮上、浮上から潜降へと運動を変更する際に翼平面形状の違いが機体運動に与える影響は小さいことが確認された。

続いて、水槽試験用プロトタイプ機体の開発のために、機体に作用する流体力の詳細を小型模型試験とCFD計算により確認した。試験は九州大学海洋システム工学部門の高速回流水槽で実施し、定常流中における迎角試験と斜行試験を行った。試験結果を解析したところCFD計算結果は水槽試験結果と概ね一致しており、計算による機体形状設計手法の有効性が確認された。さらに、機体下部に搭載する耐圧容器による滑空性能への影響を調査するため、耐圧容器搭載状態の模型を用いた試験とCFD計算を実施した。その結果、翼下面に搭載した耐圧容器は翼のキャンバーによる遮蔽効果により滑空性能に大きな影響を与えないことが確認された。



図3 機体に働く流体力の調査

以上の調査結果に基づき全長1.6mのプロトタイプを製作し、自由滑空試験によりその運動特性を調査した。機体の軽量化と重心位置の最適化のために、主翼にはセイルクロス素材のメンブレン翼を採用した。プロトタイプの内部構造および外観を図4に示す。また、自由滑空試験結果の一例を図5に示す。

機体の性能試験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽で行った。垂直尾翼を取付ける前の試作機体は直進安定性に問題があることが確認されたため、固定式の垂直尾翼と可動式の水平尾翼を装着した場合の旋回運動性能を数値シミュレーション計算により検討した結果、尾翼装着の有効性が確認された。このため、垂直尾翼を装着し、耐圧殻内部の機材の配置を最適化することにより重心高さを低下させるとともに個別に制御可能な一組の水平尾翼を機体最後部

に追加し、定常滑空時のロール角制御系を搭載した。また、実海域において波浪による大きな外乱が作用する投入作業時の安全性を高めるため、短時間で機体速度と深度を増加させるための重心移動装置による運動制御系を開発した。

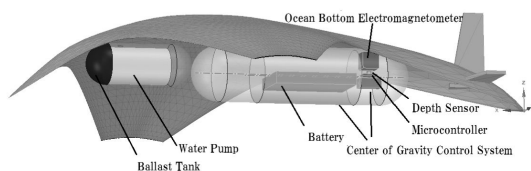


図4 プロトタイプの内外部構造および外観

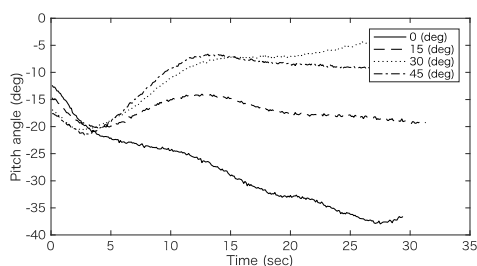


図5 自由滑空試験結果

開発された機体運動の制御系の有効性は、鹿児島湾で実施した実海域試験により確認した。試験の様子を図6に示す。定常滑空試験では、実海域において機体が安定して滑空することが確認され、横運動の安定性の改善効果が検証された。

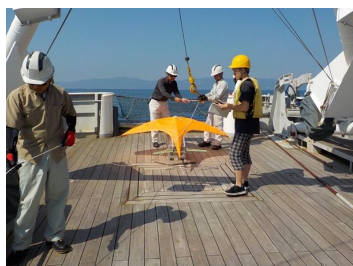


図6 実海域試験

本研究で開発された機体は、従来の海洋観測を目的とした巡航型の海中グライダーとは異なり、長大な OBEM 用アームを持つ全翼型の形状を有し、機材の軽量化のためにメンブレン式の翼が用いられている。また、OBEM

による資源探査のための機体には、長期間の自律計測中、着底を多数回繰り返すことが要求される。これらの特徴を有する機体の開発は他に例がなく、以上の研究成果は、今後の海底資源探査システムの開発にとって意義深いものであると考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Yamaguchi, S, Mizunaga, H, Katsu, T, Nakamuta, S and Kono, Y (2016). "Preliminary Design of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration", Proceedings of the Twenty-sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, 590-594.

Yamaguchi, S, Sumoto, H, Katsu, T and Kono, Y (2017). "Development of an Autonomous OBEM Measurement Vehicle for Offshore Resources Exploration", Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference, 326-330.

Yamaguchi, S, Sumoto, H, Sakamoto, R and Nogami, R (2018). "Gliding Performance of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration", Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference (in press).

〔学会発表〕(計2件)

Yamaguchi, S, Mizunaga, H, Katsu, T, Nakamuta, S and Kono, Y (2016). "Preliminary Design of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration", The Twenty-sixth International Offshore and Polar Engineering Conference.

Yamaguchi, S, Sumoto, H, Katsu, T and Kono, Y (2017). "Development of an Autonomous OBEM Measurement Vehicle for Offshore Resources Exploration", The Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

山口 悟 (YAMAGUCHI, Satoru)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：00253542

(2)研究分担者

水永 秀樹 (MIZUNAGA, Hideki)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：40226246