

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：11601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550044

研究課題名(和文)湖沼の放射能動態解明のための小型水中ロボットを用いた層構造保存型底質柱状採泥手法

研究課題名(英文)Undisturbed soil core sampling method using a small underwater robot for the survey of environmental radioactivity in lakes

研究代表者

高橋 隆行(Takahashi, Takayuki)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：70197151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：開発した層構造保存型底質柱状採泥手法は、ステンレスパイプを湖底泥に貫入させ、パイプの上端部を閉じてパイプを抜去することによって採泥する方式である。パイプとして薄肉のものを用いることで貫入・抜去に必要な力を小さくすることができ、推力が小さい小型の水中ロボットでもサンプリングが可能である。上端部を閉じる部分は弁を用いる機構とし、猪苗代湖での実験により、目的の採泥が行えることを確認した。さらに、プロペラとモータの最適マッチングを図って推力を最大化させたスラストやモジュール間無線通信の信頼性を向上させるパッチアンテナなどの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：The developed undisturbed soil core sampling method is performed by driving the bottom end of a stainless steel pipe into the soil and drawing it after closing the top end of the pipe. The force required to penetrate and draw the pipe can be reduced by using pipes with thin walls which enables small underwater robots that can only generate a small amount of propeller thrust force to perform the sampling. The actual sampling device uses a valve to automatically open and close the top end of the pipe. Experiments conducted at Inwashiro Lake confirm the proposed sampling method works well. We also developed a thruster that maximizes the propeller thrust force by optimizing motor and propeller matching. Furthermore, a patch antenna that increases the reliability of radio communication between modules was also developed.

研究分野：ロボット工学・制御工学

キーワード：環境放射能調査 底質 水中ロボット 柱状採泥 層構造保存 不攪乱

1. 研究開始当初の背景

福島県の調査によれば、檜原湖や秋元湖の魚から数百 Bq/kg 程度の放射性セシウムが検出されている。猪苗代湖はこれらに比べると相対的には若干低いレベルではあるが、やはり数百 Bq/kg オーダで検出されている。これらの湖近辺の地上における Cs134 ならびに Cs137 の土壌濃度は数十 kBq/m² であり、若干の汚染が見られるもののそれほど高くない濃度である。このような中、放射能の放出から 1 年以上が経過した 2012 年 4 月に檜原湖・秋元湖・小野川湖のイワナ・ウグイ・コイ・フナ・ヤマメが、また猪苗代湖のウグイ・ヤマメも同時期に出荷停止となった。このような遅延は、山林の放射性物質が、降雨などにより湖に徐々に集まってきていることが原因のひとつとして考えられている。

温帯多雨の福島においては、雨による放射性物質の動態の解明は極めて重要であるが、これらの湖での詳細な放射能濃度マップ作製調査はこれまで行われていない。また、福島県にはこれらの湖の他にも、大小さまざまな湖沼、ため池などが存在するが、それらの調査もほとんど行われていない。

本研究の対象であるセシウムは、湖沼に流れ込んだ土砂とともに湖底の表層に多くが沈着していることが想定されるため、底質の採取が必須である。そして、採泥の際に時系列の観察のために底質の層構造をできる限り破壊しないこと、また面的調査（マップ作製）のためにその位置精度が高いことが要求される。しかし、その実現は、現状では技術的に極めて困難である。

このような調査を行う方法としては、ダイバーによる方法、船上からの調査、ロボットによる調査などが考えられるが、未だ目的を達成できていない。しかし、実現できた際の環境放射能動態の研究進展に与える貢献度は極めて大きい。福島県とウクライナでは降雨量に約 3 倍の差があり、また地形も福島は急峻な山岳地形であるがウクライナは比較的平坦であるなど、雨による放射性物質の動態研究は福島から始まるといっても過言ではない。そのなかで、山林より流出した放射性物質が集まる湖底での濃度マップの時系列的調査は、最も重要な基礎データのひとつとなるものと期待できる。これは、東日本大震災に伴って発生した放射能汚染の実態の一端を明らかにするとともに、今後の推移予測をする上で極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが猪苗代湖等で環境調査を行うために開発を続けてきた水中ロボットを用い、それにいくつかの他の手法を組み合わせ、ロボットを中心とする“システム”として、層構造を保存する柱状採泥手法の基本原理の確立を目指す。また、試作や実験によりその性能を確認する。

福島県会津地域にある 4 湖（猪苗代湖・檜

原湖・秋元湖・小野川湖）で産する淡水魚のいくつかは 2012 年 4 月より出荷が停止されている。これは山林からの放射性物質が雪解け水などの影響によりこれらの湖に集まってきていることが原因の一つとして想定されている。しかし、湖沼の放射能汚染調査はほとんど行われておらず、放射性物質の動態は不明である。この調査には、位置精度が高くかつ層構造を破壊しない多数点での底質サンプリングが継続的に必要であるが、この実施は、費用的ならびに技術的に現状極めて困難である。

本研究の目的は、小型水中ロボットを用いた湖の底質の層構造を保存する柱状採泥手法の基本原理を確立することである。これにより湖沼での放射性物質動態の解明を大きく前進させることができる。

3. 研究の方法

これまで報告されてきた採泥手法の技術的難易度を上昇させている要因として、①水中で効果的に下向き圧力を発生することが難しい、②一度貫入した採泥部を抜去する上昇力を発生できる保証を得ることが難しい、③採取した底泥を落下させることなく保持することが難しい（特に放射能調査では泥の細粒が重要である）などがあった。

そこで研究開始当初は、採泥器にワイヤを接続して船上から引き上げることで採泥器が抜去できなくなることを回避し、ロボットによる採泥器の誘導による高い位置決め精度と一度の潜水で多点サンプリングを行う高効率を保持したまま、層構造を破壊しない柱状採泥手法の基本原理を得ることを目標に、研究計画を立案した。

しかしながら、まず①について課題点を整理して実験を繰り返した結果、カッターのような薄い肉厚のパイプで底泥を「くり抜く」というアイデアに到達し、最終的に、鏡面仕上げをした直径 30mm のステンレスパイプを用いた実験において約 3kgf（約 30N）の力で 150mm の貫入・抜去を行えることを確認した。これまでの研究実績によれば、この値は小型の水中ロボットに搭載されたスラスト（スクリュプロペラ、以下プロペラ）で十分に発生可能な力である。

そこで、このような薄肉パイプを使う方法を基礎とした手法の開発を行うこととした。

4. 研究成果

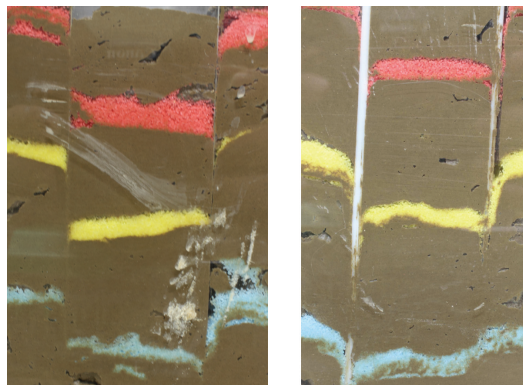
(1) 採泥管及び採泥モジュール

まず、採泥管の材質の違いによる貫入力及び抜去力の関係を確認するため、通常のスステンレスパイプ（表面は鏡面仕上げ）、ステンレスパイプにテフロン加工を施したもの、ステンレスパイプに離型材（シリコンスプレー）を塗布したものをを用いて貫入及び抜去を行い、その時に必要な力の大きさを調べた。

テフロンは一般に摩擦係数が非常に小さい材料として知られているが、通常のスステン

レスパイプとテフロン加工の実験結果を比較するとほとんど違いが見られなかった。比較した3者の中では、シリコンスプレーを塗布したものの貫入力及び抜去力が一番小さいことがわかったがその差は小さく、運用の簡単化のためには、通常のステンレスパイプ（表面は鏡面仕上げ）が最適との結論を得た。

続いて、採泥管の直径や材質、肉厚の違いが、採泥時の層構造の保存に及ぼす影響について調べた。透明なケースの中に泥と色砂を交互に敷き詰めることで層構造を作成し、半分にカットした採泥管の断面をケースに接触させながら貫入して、採泥管が層を乱す様子を観察した。実験の結果、層構造の乱れは、主として採泥管表面付近に発生することが分かった。これは、管の貫入に伴って、泥が管壁に引きずられる形で変形することが原因である（図1(b)）。一連の実験結果より、直径20mm以上、肉厚0.5mm以下の採泥管であれば、不攪乱での柱状採泥が可能であると考えられた。このような乱れが最も小さかったパイプの貫入後の様子を図1(a)に示す。



(a)不攪乱 (b)攪乱

図1 パイプ貫入と層構造の乱れ

次に、不攪乱柱状採泥における試料の保持方法について検討を行った。柱状採泥では、採泥管を単純に抜去すると試料が抜け落ちてしまうため、それを防ぐ必要がある。

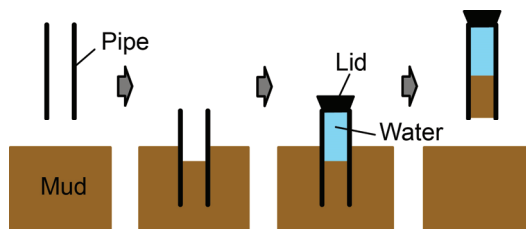


図2 試料の保持方法

試料を保持する方法として、採泥管の下部に蓋を取り付ける方法が考えられるが、採泥管の下部に蓋を取り付けると貫入時の障害となる他、蓋を閉じるために機構が複雑化してしまう。そこで、採泥器の中には上蓋により試料を保持するものがあることに着目し、

上蓋を使用した採泥保持の方法に有効性があるか調べた。実験の結果、図2のように、パイプに蓋をする方法で試料の保持が可能であることが明らかとなった。

なお、水中でこのような蓋をする操作を、モータ等を用いて行うことは容易ではない。そこで、図3のような、弁による方法を用いることとした。実験の結果、良好な試料保持機能を実現できることがわかった。

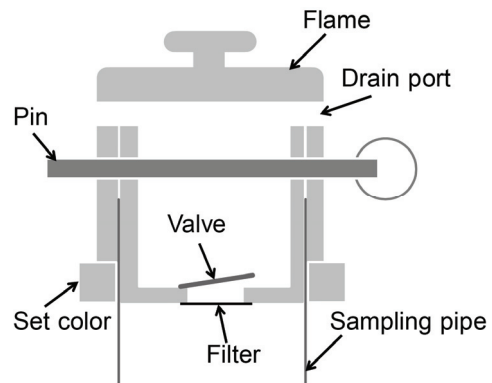


図3 パイプに蓋をする機構（弁）

これまでの検討を基礎として、採泥モジュールの開発を行った。これは、一度の潜航で複数回のサンプリングを行い、本モジュールを搭載した水中ロボットのバッテリー寿命を延ばし採泥の効率を高めることが目的である。本研究では、図4のように、8本の採泥管を有するモジュールを開発した。

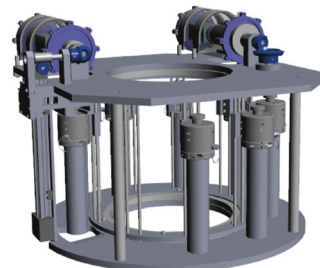


図4 採泥モジュール（8本）

(2) 水中ロボットによる採泥実験

開発した採泥モジュールを取り付けた、水中ロボットの写真を図5に示す。



図5 採泥モジュールを取り付けた水中ロボット（作業台に搭載している状態）

このロボットは、研究代表者らがこれまで開発を続けてきた環境調査用水中ロボットの改良版であり、重量が約 69.5kg、サイズが 806H×757W×630D mm である。このロボットの特徴としては、さまざまな環境調査に容易に対応できるように、機能部分毎に容易に交換可能なモジュール構造を採用するとともに、浸水による故障リスクを低減するために、各モジュールに穴を開けないというコンセプトで開発を行っているものである^[9]。このコンセプトを実現するために、例えば、プロペラへの動力伝達には磁気カップリングを用いることや、モジュール間通信には電波を用いるなどの方法を採用している。

このロボットを用いて、猪苗代湖にて採泥実験を行った。実験を行った水深は約 30m である。その結果、図 6 に示すように、目的の不攪乱柱状採泥を行うことに成功した。



図 6 水深 30m の湖底からの不攪乱柱状採泥

(3) モジュール間通信の信頼性向上

図 5 のロボットを用いた採泥実験を行った際に、ロボットを構成するモジュール間で、無線通信が不安定になる現象が観察された。

研究代表者らのこれまでの水中通信実験では、淡水中で約 150mm の距離での無線通信は全く問題なく行えていたが、同様の距離であるにも関わらず通信が不安定となった。原因を調査したところ、各モジュールの間にロボットの構造材である金属フレームが通っており、それが電磁波環境に影響を与えている可能性があることが推察された。

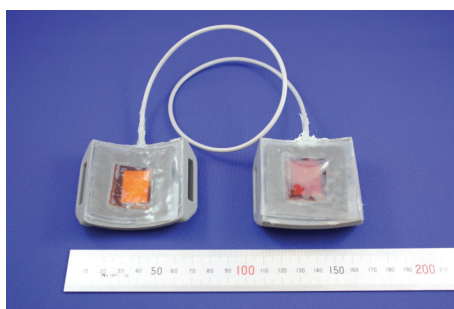


図 7 開発したパッチアンテナ

そこで、各モジュールの独立性と気密性を保持するという基本コンセプト（各モジュールに穴を開けない）を守りつつ、無線通信の

信頼性を向上させる手法として、各モジュールの表面に新たに設計したパッチアンテナを装着することとした。企業の協力を受けて、実際に図 7 に示すようなアンテナを設計・試作して実験したところ、水中でも空気中と同程度の電波強度で電波が伝搬することが確認できた。

(4) スラストの発生推力の改善

前述の採泥管で確実にサンプリングを行うためには、十分な推力を発生可能なスラストが必要となる。また、発生推力を改善することができれば、使用するスラストの数を減らすことができ、その結果、ロボットの軽量・小型化が実現できる。

これまで用いてきたスラストの特性を詳細に検討したところ、モータとプロペラの特性を最適に適合させることで、モータの特性をさらに引き出せることがわかった。そのため、まず、図 8 のようなプロペラの推力計測装置を製作して、購入したプロペラの特性を精密に計測することで、カタログには掲載されていない推力係数とトルク係数を精密に求めた。

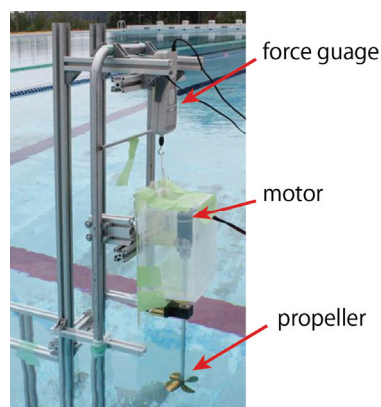


図 8 プロペラ特性計測装置

これを用いて推力が最大となるような最適設計を実施したところ、実験で使用したモータ（定格出力 100W のブラシレスモータ）とプロペラの組み合わせの場合、減速比約 1:5.33 となる減速機を通して直径 130mm のプロペラを駆動することで、大幅に発生推力を増加させられることが明らかとなった。また本減速機は、いくつかの機構設計の比較検討の結果、水中に置く形が最適であることもわかった。

これにさらにコルトノズルを装着（図 9）すると、最終的に減速比を 1:4.73 とすることによりプロペラひとつで約 55N（これまでの 2 倍以上）の推力を得ることに成功した。

このスラストを用いることで、ロボットのさらなる小型・軽量化ならびにサンプリング時の採泥管の確実な貫入・抜去が期待できる。

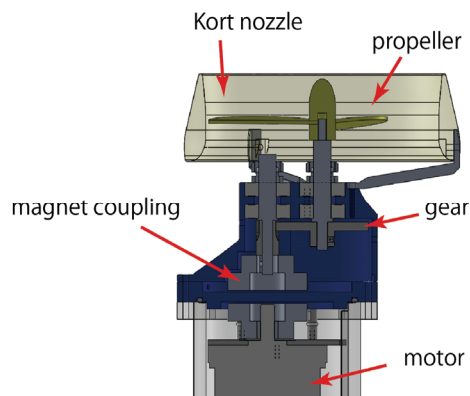


図9 推力の最大化を図ったスラスト

<引用文献>

- ① 大室拓哉, 高橋隆行, 水中ロボットのための電源内蔵型ワイヤレススラストモジュールの開発, 計測自動制御学会 東北支部 第 261 回研究集会, no. 261-6, 2010. 11.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 菅野 怜・棚木 瑞輝・Luis Canete・高橋 隆行, 湖沼調査用グライダー型小型水中ロボットの開発ーグライダー翼特性の計測及び動作シミュレーションー, 計測自動制御学会 東北支部 第 306 回研究集会, no. 306-3, 2016. 12. 10, 東北大学 (宮城県・仙台市) .
- ② 棚木 瑞輝・ダムクワン マン・カニエテルイス・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 3B3-04, 2016. 9. 9, 山形大学工学部 (山形県・米沢市) .
- ③ DAM QUANG MANH・LUIS CANETE・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～翼の基本特性とグライダー方式の基礎的検討～, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A1-16b6 (CDROM), 2016. 6. 9, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市) .
- ④ 棚木 瑞輝・LUIS CANETE・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～スラスト用減速機の設計及び三号機の構想～, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P1-16b3 (CDROM), 2016. 6. 9, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市) .

- ⑤ Dam Quang Manh・Luis Canete・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボット開発～グライダー方式の基礎的検討～, 計測自動制御学会 東北支部 第 299 回研究集会, no. 299-6, 2015. 12. 5, 東北学院大学工学部 (宮城県・多賀城市) .

- ⑥ 棚木 瑞輝・Dam Quang Manh・Luis Canete・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～スラストモジュール及び水中通信方法の改善～, 計測自動制御学会 東北支部 第 299 回研究集会, no. 299-5, 2015. 12. 5, 東北学院大学工学部 (宮城県・多賀城市) .

- ⑦ 安西香保里・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～不攪乱柱状採泥モジュールの改良～, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A1-E07, 2015. 5. 19, 京都市勧業館 (京都府・京都市) .

- ⑧ 神尾 柊太・高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～拡張状態オブザーバを用いた位置及び姿勢制御の検討～, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A2-D08 (CDROM), 2015. 5. 19, 京都市勧業館 (京都府・京都市) .

- ⑨ 安西 香保里, 神尾 柊太, 高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～採泥法の検討及び採泥モジュールの開発～, 計測自動制御学会東北支部 50 周年記念学術講演会, B303, 2014. 12. 12, 東北大学工学部 (宮城県・仙台市) .

- ⑩ 神尾 柊太, Luis Canete, 高橋 隆行, 湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発～モデリングと制御方式の基礎的検討～, 計測自動制御学会 東北支部 第 292 回研究集会, no. 292-2, 2014. 11. 29, 日本大学工学部 (福島県・郡山市) .

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 水中移動式柱状採泥装置, 柱状採泥機及び水中探査装置

発明者: 高橋隆行・安西香保里・神尾柊太・五十嵐伸一・但野洋一・但野政光・鈴木鉄雄・山崎潤一

種類: 特許

番号: 特許願 2015-167578

出願年月日：2015年8月27日

国内外の別：国内

〔その他〕

【招待講演】

- ① 高橋隆行, 湖底泥不攪乱柱状採泥のための水中ロボットの開発, 第5回放射線計測フォーラム, 2015.12.7.

【報道】

- ① 福島テレビ, みんなのニュース, 2016.9.24.
- ② 河北新報, 2017.1.10.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 隆行 (TAKAHASHI, Takayuki)
福島大学・共生システム理工学類・教授
研究者番号：70197151

(2) 研究協力者

カニエテ ルイス (CANETE, Luis)
神尾 柊太 (KAMIO, Shuta)
安西 香保里 (ANZAI, Kahori)
ダム クアン マン (MANH, Dam Quang)
棚木 瑞輝 (TANAKI, Mizuki)
菅野 怜 (KANNO, Ryo)