

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580378

研究課題名(和文) 湿原湖沼水環境モニタリングのためのスカウト機能を備えたロボットボートの開発

研究課題名(英文) Development of an unmanned surface vehicle for lake environmental monitoring

研究代表者

海津 裕 (Kaizu, Yutaka)

東京大学・農学生命科学研究科・准教授

研究者番号：70313070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：湖沼のソナーによる深度計測や、水質の計測を効率的に行うため、自律航行可能な電動ロボットエアボートの開発を行った。動力としてブラシレスモータを用いることで、エンジンと比較して、軽量化や排気のクリーン化、騒音及び振動の低減、プロペラ回転数制御の容易化などが実現された。プロペラの回転数に対するボートの速度と消費電力を計測し、最大航行時間及び最大航行距離の推定を行った。基礎性能試験として、定点停留制御や直線追従制御の精度評価を行った。その結果、湖沼全体のマップを作成するための十分な精度が得られた。フィールド試験を、日本の北海道の阿寒湖チュウレイ湾とオンネトーで行い、深度や水質のマップの作成に成功した。

研究成果の概要(英文)：An autonomous, electric-powered, unmanned airboat was developed for the efficient measurement of depth and water quality of inland water bodies. Compared with a gasoline engine, an electrical brushless motor was lighter, cleaner, quieter, less vibrating, and more controllable. The maximum distance and maximum operation period were estimated by measuring the vessel speed and power consumption with respect to the rotational speeds of the propellers. The accuracies of staying controlled on fixed points and in line following control were evaluated as the basic performance test of the boat. The results showed that the accuracies were sufficient enough for creating a map of the entire lake. Field trials were done in Churui Bay, Lake Akan, and Lake Onneto in Hokkaido, Japan. Depth maps and various water quality maps were successfully drawn for these lakes using the prototype.

研究分野：農業環境工学

キーワード：ロボットボート 自律航行 水質マッピング 省力化 GPS リチウムイオンバッテリー

### 1. 研究開始当初の背景

これまで、湖沼の水質環境を調査する方法としては、有人ボートによるものが中心であった。また、時間や計測機器の制限から、数点のサンプリングをその湖沼の代表値として用いているケースが多かった。しかし、湖沼の水質は、流入や流出、蒸発、浸出、対流などにより、空間的、時間的変動が存在することが知られている。そのため、きめ細かい環境保全対策を行っていくためには、その多次元分布および変動を計測、解析することが必要である。国内外においてはロボットボートによる水質や水底の調査に関する研究は多数報告されている。そのほとんどが、水中のプロペラを回転させることにより動力を得ている。十分に深さのある湖や河川、海であれば水中プロペラは効果的であるが、我々が研究対象としている泥炭地湖沼は水深が浅く(<1 m)、水中に水草が繁茂している。このような環境で、水中プロペラを用いると、水底の泥の巻き上げによる水質変化が起きてしまう。また、プロペラに水草が絡みつくことによって航行自体が不可能となる。この問題を解決するため、ボートの上にファンを設置し空気の流れによって航行するエアボートの開発を行ってきた。このエアボートはファンを2台備えており、左右のファンの回転を変えることによって操舵を行う。小形のエアボートを用いて水質測定を行っている研究例もあるが、いずれも操縦者が遠隔操作する方式となっており、完全自動化はされていない。

### 2. 研究の目的

これまで我々が開発したロボットボートは、ボート内のコントローラの消費電力が大きく、鉛バッテリーを大量に搭載していたため重量が多くなってしまっていた(>100 kg)。また市販の刈り払い機のエンジンを転用していたため出力が低く、最高速度が 1.3 m/s にとどまっていた。静水域では航行可能だが、流水域では使用することができない。そこで本申請では、電力消費の少ないコントローラへの変更および、高出力エンジンの使用によって本ロボットボートの使用可能な範囲を流水域まで広げることが目標とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 電動ロボットエアボート

図1に開発したロボットボートの写真を示す。このボートは船体の後部に設置した左右の推進プロペラの回転を制御することで、速度や方向を変えることができる。浮体部分は1人乗りの釣り用ポンツーンボートから流用し、アルミパイプで船体の骨格を構築した。全体の長さは2.4 m、幅は1.4 m、ペイロードは最大159 kgである。推進プロペラは、ホビー用のブラシレスモータ(最大出力1.9 kW)と、18インチのプロペラ、ESC(Electric Speed Controller)より構成されている。光学式の反射センサを使用して、回転数を計測した。バッテリーは基礎試験では12 V、20 Ahの鉛蓄電池を4個使用したが、フィールド試験では24 V、20 Ahのリン酸鉄リチウムイオン(LiFePO4)電池を2個使用した。バッテリーの総重量は鉛蓄

電池では24 kg、LiFePO4電池では10 kgであった。コントローラボックスには、ラップトップPC、無線LANルータ、RC受信機、サーボコントローラボード、多機能DAQユニット、各機器を駆動するバッテリーが入れられている。PC内のソフトによりボートの制御やデータの保存を行った。遠隔操作ソフトウェアを用いて岸からボート内のPCの監視を行った。サーボコントローラボードはPCからのコマンドによって、ESCへの出力を制御することができる。岸のベースステーションでは、RC送信機を使ってマニュアル運転と自動運転の切り替えを行った。DAQユニットは、プロペラの回転数やバッテリー電圧、モータ電流、風向、風速の計測を行った。ボートの位置およびヘディング、ヨーレートは内部に二つのアンテナを備えるGPSコンパスによって計測される。基礎実験ではHemisphere V-100(位置精度0.6 m、方位精度0.25°)を用い、フィールド実験ではHemisphere ssV-102(位置精度1.0 m、方位精度0.75°)を用いた。このGPSの位置精度は、水上でのボートのナビゲーション、そして深度や水質のマッピングには十分だと考えられる。水質センサとして、多項目水質計を用いた。任意の深さの水質を計測するため、ステップモータを用いたウインチを作成した。アクリル製のパイプにセンサユニットとタブレットPCを格納した。ボートがサンプリングポイントに達すると、ウインチがセンサユニットを水中に一定時間沈め、水質の計測を行った。無線LANルータには、無指向性のアンテナを2台取り付けられた。水深計測のために、魚群探知機(以下ソナー)を使用した。このソナーは、測深情報を記録することができるため、水深図の作成に用いた。また、ボートは、風の影響を受けて流されたり方向が変わったりする。そこで、その影響を調べ制御性の向上を図るため風向風速計を取り付けた。

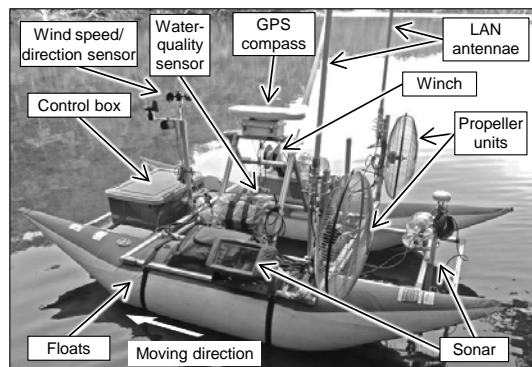


図1 開発したロボットボートの写真

#### (2) 航行制御モード

このボートは、ステイ(停留)、ウェイポイント(通過点)、ライン(直線)の三種類の制御モードがある。水質センサによる測定を目的としたステイモードでは、一定時間(サンプリング時間)ある地点に留まり続ける制御を行う。ウェイポイントのモードでは、ウェイポイント間の移動を目的としており、途中の経路に関係なく、次のウェイポイントまで航行する制御を行う。ラインモードは、ソナーによる水深計測を目的としており、決められた

ラインに沿って航行する制御を行う。ラインモードでは、ライン上のボート前方に、移動ウェイポイントを設定し、常にそこに向かうようにウェイポイントモードと同様にプロペラ回転数の制御を行った。ボートをラインに投影した点から移動ウェイポイントまでの距離を Look-ahead distance (前方注視距離) とした。移動ウェイポイントは、ボートの位置と連動して、ボートに対して常に一定の距離を保ちながらライン上を移動していく。

### (3)消費電力計測

同出力のガソリンエンジンと比較して、電動モータは、軽量で騒音や振動が少なく、排気ガスがない等の多くの特徴を持っている。その一方で、バッテリーはガソリンと比較してエネルギー密度が非常に低い (<1/100)。また、バッテリーは高い電流で用いると見かけの容量が減ってしまう。燃料を継ぎ足すだけのガソリンに対して、バッテリーは長時間の充電もしくは完全な交換が必要である。そこで、ロボットボートをバッテリーで駆動するためには、消費電流と、ボートの速さ、調査距離、運用時間を勘案してバッテリーの容量を慎重に決定する必要がある。ロボットボートはその運用上、できるだけバッテリーの交換を減らしたいので、ガソリンエンジンを用いた以前のボートと同様の速度で 8 時間以上連続して航行可能なバッテリー容量を決定することを目的とした。プロペラの回転数と消費電流の関係を調べ、その後、水上でプロペラの回転数とボートの速さの関係を調べることで、航行可能時間や航行可能距離を推定した。

### (4)基礎航行性能試験

プロペラ回転数に対するボートの速さの計測や、ステイ制御モードおよびライン制御モードの精度等の基礎的な航行性能の試験は 2013 年 1 月に埼玉県戸田市の彩湖にて行った。前方注視距離を変えて、精度の違いを調べた。

### (5)フィールド試験

実フィールドでの試験は、2013 年 9 月に北海道釧路市の阿寒湖と 2014 年 8 月に北海道足寄郡のオンネトーで行った。阿寒湖は、マリモの生息地としてよく知られている。ここでは、マリモが生息しているチュウレイ湾において、15 m 間隔でラインモードでの航行を行い、ソナーによる水深測定や平均速度、横方向距離誤差、ヘディング角度誤差等の計測を行った。

オンネトー火山性の温泉水が流入しており、酸栄養湖に分類されている。面積は 0.23 km<sup>2</sup>、湖岸線総延長は 2.5 km となっている。この湖に 50 m 間隔でサンプリングポイントを設定し、各地点での水質調査を行った。また、航行中はソナーを動作させて水深の計測を行った。航行モードは、ウェイポイントモードと、ステイモードを使用した。

## 4. 研究成果

### (1)消費電力計測

プロペラの回転数とボートの速さの間には、高い線形関係 (決定係数 0.99) が見られた。以前開発したエンジンボートの場合、同じ直径のプロペラを使って、回転速度が 4000 rpm の時、速さが

0.7 m s<sup>-1</sup> だったのに対して、このボートでは 1.3 m s<sup>-1</sup> となった。これは、ボート全体が軽量化されたことやフロート部分が長くなったことにより、水中の前面投影面積が小さくなり水の抵抗が減ったためだと考えられる。消費電流は回転速度に対して、二次関数的に増加した。前述の通り、消費電流が増えるとバッテリーの総容量は減ってしまう。そこでテストケースとして、基礎試験と同様に、12 V, 20Ah の鉛蓄電池を 4 個搭載したときの航行可能時間と航行可能距離を計算した。その結果、設定速度を 0.7 m s<sup>-1</sup> としたときでは、7.6 h, 19.3 km の航行が可能だが、1.3 m s<sup>-1</sup> では、わずか 1.2 h, 5.7 km の航行しか行う事ができないことがわかった。この結果より、対象湖沼の面積や、想定される作業時間に応じて、設定速度もしくはバッテリーの容量を適正に決定することの重要性が示された。もし 1 日 8 h 作業するとしてバッテリーを交換しないのであれば、設定速度は、0.69 m s<sup>-1</sup> 以下とする必要がある。湖の形状にもよるが、仮にライン間隔を 50 m とし、途中停止しないとすれば、一日あたり約 100 ha の調査を行うことが可能である。

### (2)ステイ制御モードの精度測定

岸に近い場所で、3 回実験を行った結果、目標地点からの距離の RMS (Root mean square: 二乗平均平方) 誤差は、3 回の平均で 1.95 m であることがわかった。湖全体を対象として水質のマップを作成する場合、2 m の位置の違いで大きく水質が変化するとは考えにくいので、この誤差は許容できる。

### (3)ライン制御モードの精度測定

代表的な前方注視距離  $L$  に対するボートの軌跡を図 2 に示す。 $L$  が 1 m の時、横方向距離の誤差が 0.27 m と最小になった。これは、ソナーで計測をする上では十分実用的な精度であると考えられる。さらに  $L$  を小さくすると、軌跡に振動が見られ、横方向距離誤差、ヘディング誤差ともに大きくなった。一方でヘディング角度の誤差は、 $L$  が 20 m の時に最も小さくなり 4.1 ° となった。しかしながら、その場合、横方向距離誤差が 3.2 m となった。

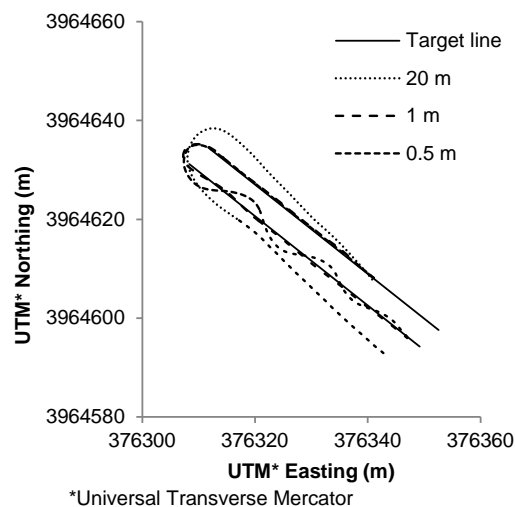


図 2 各前方注視距離に対するボート軌跡

(4)フィールド試験結果(阿寒湖チュウレイ湾)

表 1 に、阿寒湖チュウレイ湾での 18 ラインの航行試験結果を示す。また、航行の軌跡とソナーによって得られた水深図を図 3 に示す。水深図の上部境界線は岸で、下部の直線部分より下は調査対象領域の外側である。航行距離は、ラインとラインの間の移動も含めている。平均航行速度は、基礎航行性能試験で予想された目標速度(0.70 m s<sup>-1</sup>)よりも速くなった。これは、リチウムイオンバッテリーを使用したことによりボートが軽量化したためだと考えられる。横方向偏差と、 Heading エラーは、各ラインに対して RMS 誤差を求め、それを平均した値である。定常状態での軌跡を評価するため、各ラインに入った後、最初の 30 秒間のデータを抜いて誤差の計算を行った。横方向の偏差は、基礎試験(2.0 m)よりも小さくなった。これは、風が弱かったためだと考えられる。バッテリーの電圧は、開始時と終了時でほとんど違いが見られなかった。これは、リチウムイオンバッテリーが完全放電直前まで電圧が下がらないという特性によるものだと考えられる。この場所では、2012 年に同じ場所を同じライン間隔でエンジン船外機付の小型ボートで同様のソナー調査を行っているが、そのときの平均速度は 0.61 m s<sup>-1</sup> だった。この時、ソナーのナビゲーションマップを見ながら直線航行を行ったのだが、画面を見ながらの操縦を数時間にわたって行う事は非常に神経を使う重労働であった。

Table 1. Results of the experiment at Lake Akan

Total cruising hours	2.09 h
Total cruising distance	6.9 km
Average speed	0.91 m s <sup>-1</sup>
Lateral error (RMS*)	0.73 m
Heading error (RMS*)	10.4 °
Battery voltage (start)	26.23 V
Battery voltage (end)	26.15 V

\*Root Mean Square

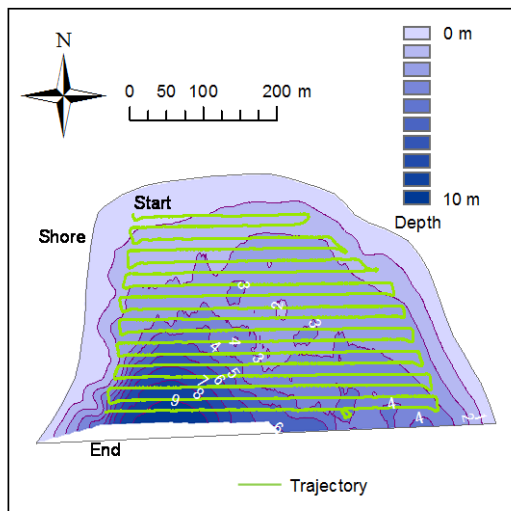


図 3 阿寒湖チュウレイ湾におけるボート軌跡と水深図

(5)フィールド試験結果(オンネトー)

オンネトーにおいては、湖の全域に対して航行試験を行った。水質センサによって、測定した項目は、pH、溶存酸素量、EC(Electrical conductivity: 電気伝導率)、濁度、温度、塩分、全溶存固形物量、クロロフィルである。この湖は、1993 年の調査では pH6.8 の酸性湖とされていたが(環境庁, 1993b)、我々の調査では、平均で 7.2 となり、いずれの場所においても 7 を下回ることはなかった。図 4 に EC の分布マップと実際にサンプリングを行った地点の座標を示す。ArcMap 10.2.2(Esri)を用いてクリギングにより湖全体のマップを作成した。EC はイオン濃度の目安となるが、空間的に値が異なることがわかった。湖の南北の中心付近で低く、南北の両端で高くなっていることがわかる。これは、北端では温泉水の流入があり、また、南端では食堂とキャンプ場の排水があるためだと考えられる。

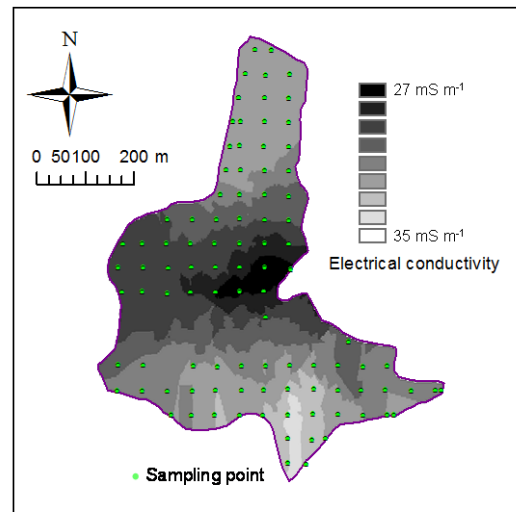


図 4 オンネトーにおけるサンプリング地点と、EC マップ

(6)まとめ

湖沼のソナー計測や、水質計測を高密度、高精度、高頻度で省力的に行うため、水草が繁茂した浅い湖でも自律航行可能な電動ロボットエアボートの開発を行った。プロペラの動力として、ブラシレスモータを用いることで、ガソリンエンジンと比較して、軽量化や排気ガスのクリーン化、騒音及び振動の低減、プロペラ回転数制御の容易化などが実現された。その一方で、バッテリーのエネルギー密度の低さからバッテリー容量を慎重に選択する必要性が示唆された。そこで、プロペラの回転数と速度、消費電力の関係を調べ、バッテリー交換無しに調査可能な速度や航行時間、航行距離を推定した。これにより、調査に適したバッテリーの選定を行うことが可能となった。実際に用いた、24 V、40 Ah のバッテリーであれば、日中の調査をバッテリー交換無しに行えることが明らかとなった。また、基礎性能試験として、ステイ制御やライン制御の精度評価を行った。いずれも湖全体のマップを作成するには十分であると判断された。フィールド試験は、マリモの減少が問

題となっている阿寒湖チュウレイ湾と、水質の変化や外来生物の侵入が問題となっているオンネトーにて行われた。いずれの湖においても、その調査結果は、湖の管理機関やマリモの研究者、水文学や生態学等の研究者に報告され、今後の管理の指針となることが期待される。

#### 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)

[雑誌論文](計 2件)

- ① 海津裕、徳田治展、山田浩之、芋生憲司、湖沼環境モニタリングのための電動ロボットエアボートの開発、農業食料工学会誌、査読有、印刷中、2015
- ② 山田浩之、湖沼生態系の空間情報の取得と評価 - 面として阿寒湖の湖底を診る - 、北海道の自然、査読無、53 巻、2015、43-51

[学会発表](計 3件)

- ① Y. Kaizu, Development of an Unmanned Airboat for Monitoring of Lake Environment, 2014 International Forum on Smart Agriculture and Forestry (invited speech), December 13, 2014, Lin'an, Hangzhou, China
- ② 山田浩之、横山諒、海津裕、若菜勇、水生植物フェノロジーを用いた阿寒湖のサイドスキャンソナー画像の分類、応用生態工学会第 18 回東京大会、2014 年 9 月 18 日、首都大学東京、東京
- ③ Y. Kaizu, H. Tokuda, H. Yamada, K. Imou, Development of an Electric-Powered Unmanned Airboat for Lake Environment Monitoring, 7th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering, May 21, 2014, Yilan, Taiwan

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

海津 裕 (KAIZU, Yutaka)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号:70313070

##### (2)研究分担者

山田浩之 (YAMADA, Hiroyuki)

北海道大学・大学院農学研究院・講師

研究者番号: 10374620