

湖沼調査用小型水中ロボットのための ワイヤレススラスタモジュールの推力向上

Improvement of thrust capacity of a wireless thruster module for a lake surveying compact underwater robot

大室拓哉* , 猿田裕平** , 高橋隆行**

Takuya OMURO* , Yuhei SARUTA** , Takayuki TAKAHASHI**

*福島大大学院 , **福島大

*Graduate School of Fukushima University, **Fukushima University

キーワード : 水中ロボット (Underwater Robot) , スラスタ (Thruster) ,
モジュール構造 (Modular Structure) , 無線通信 (Wireless Communication)

連絡先 : 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 理工学群共生システム理工学類 高橋研究室
大室拓哉 Tel.: (024)548-5259 , Fax.: (024)548-5259 , E-mail: omu@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒 言

水中に存在する人工構造物の保守, 点検作業や環境調査など, 水中を対象として人間が作業をおこなわなければならない場面は多い. 近年では, 浦らが開発した自律型水中ロボット「淡探」や¹⁾, 武村らが開発した珊瑚礁の保全を目的とした水中ロボットなど²⁾, 前述した作業を補佐, 代替するロボットが積極的に開発されている. 特に福島県は猪苗代湖をはじめとした様々な湖沼が存在し, 多くの場所で生物や水質などの環境調査が人の手によっておこなわれている. また, 最近では福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の拡散, 汚染状況の観測もおこなわれているため, 水中ロボットを導入することでより効率的で正確な観測が期待される.

しかし, 広大な海洋とは異なり運用できる船やロボットの大きさに限界のある湖沼では, よ

り多くの機能を搭載した大型の水中ロボットを用いて調査をおこなうことは困難である. また, 海洋であっても, 浅水域での調査や日常的な観測活動のための運搬には不向きである. さらに, 水中ロボットが大型化することで, 維持, 運用にかかるコストが増大するなどのデメリットも生じてしまう. 一方で, 機能を絞った小型の水中ロボットは少人数での機動力のある運用を可能にするが, 搭載可能な機器が限定されてしまうため, 使用者が求める情報を十分に集めることができないという問題が存在する.

これらを踏まえ, 本研究では Fig.1 に示すような環境調査を目的としたモジュール構造型小型水中ロボットの開発を目指している. 本論文ではその中でも特に, 2010 年に本研究室で試作した電源内蔵型ワイヤレススラスタモジュールの改良について詳しく述べる.

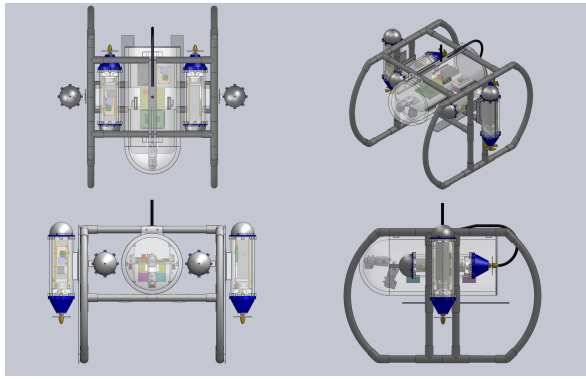


Fig. 1 Schematic diagram of conceptual model of the proposed underwater robot

2. モジュール構造型 小型水中ロボットの概要

本研究で開発する水中ロボットの概要を示す。重量は30[kg]以内、大きさは500[mm]×500[mm]×500 [mm]以内を目標としている。耐圧性能は水深100[m]に相当する1.0[MPa]である。これは、福島県の猪苗代湖の最深部をやや上回る水深での水圧に相当する³⁾。また、実際に環境調査をおこなっている研究者の要望により、リアルタイムで水中の状況を観測することができることを条件としている。

2.1 水中ロボットの形式

無人型的水中ロボットはその運用方式からAUV (Autonomous Underwater Vehicle) とROV (Remotely Operated Vehicle) に分類される。AUVは自律型の水中ロボットであり、地上または船上とロボットの間には通信やエネルギー供給のためのケーブルが存在しない。ロボットはケーブルに拘束されず自由に動くことができるが、水中で一般的に用いられる超音波通信は情報伝送量が少ないため、リアルタイムでの観測や操作は困難である。ROVは遠隔操作型の水中ロボットであり、前述した超音波通信の特性から、実質的にケーブルが接続された水中ロボットである。そのため外部からエネルギーを供給することもでき、さらにはリアルタイムでの観測、操

作が可能となる。しかし、ケーブルが存在するために行動範囲が限定され、運動特性もAUVに比べ低下してしまう。

これらの特徴を考慮し、本研究ではROVの派生型であるUROV (Untethered Remotely Operated Vehicle) に着目した。UROVは、ロボット内にエネルギー源を内蔵し、船上または地上とロボットが通信線1本のみで接続されているという特徴を持っている。通常のROVに比べケーブルを細径化することができるため運動特性も向上し、さらにはリアルタイムでの操作、観測も可能となる。本研究で開発するモジュール構造型小型水中ロボットの通信線には、光ファイバを採用する。

2.2 ロボットの構成

本研究で開発する水中ロボットの構成は大きく3つに分類することができる。1つめは地上のメインコンピュータとケーブルで接続されているメインモジュールである。このモジュールには映像を撮影するためのビデオカメラの他に、ロボットの制御に関する姿勢センサや方位計などのセンサ類を搭載する。また、地上からの指令はメインモジュール内のコンピュータで受け取り、それを無線通信で各モジュールに伝達する。2つめはサンプリング・センサモジュールである。このモジュールは水を回収する採水器や、湖沼の底質を回収する採泥器などを開発する予定である。そして3つめはロボットを動かすスラストモジュールである。各モジュールは制御のためのマイコンと、通信をおこなうための無線通信モジュール、電源としてバッテリーを搭載している。

ロボットをワイヤレスのモジュール構造型にすることの利点として、

- (1) 予備のモジュールと交換することで容易にアクシデントに対応することができる

- (2) 現場で判断し，複数の調査に対応することができる
- (3) エネルギー源および制御機能が集中していないので，様々なリスクを分散させることができる

といったことが挙げられる．(1) が可能になることで，設備の整っていない現場において従来のように強固に固定された耐圧容器の蓋を開閉しての修理をおこなう必要がなくなる．(2) については，従来はあらかじめモジュールを交換してから現場に移動していた．しかし，ワイヤレス化することでモジュールの載せ替えにおけるケーブルの接続作業が必要なくなるため，モジュールさえあれば現場で使用者の判断によって容易にモジュールを付け替えることが可能となる．さらに(3)については，従来の水中ロボットはひとつの筐体にエネルギー源や制御機能が集中して配置されていたため，浸水によって一度にすべての機器が被害を受ける可能性があった．しかし，各モジュールにエネルギー源やコンピュータを分散することでこのリスクを大幅に減らすことができる．

これら以外にも，ワイヤレス化することで耐圧容器にケーブル用の穴を開ける必要が無く，高圧環境下においても浸水のリスクを低減することができるという利点も存在する．

3. 旧型スラストモジュールの概要と課題

水中ロボット開発の第一段階として，本研究室で2010年に開発したスラストモジュール(以下，旧型スラストモジュールという)の概要と課題について述べる⁵⁾．旧型スラストモジュールはバッテリーおよび電波通信装置を内蔵している．そのため，完全にワイヤレス化された状態でメインモジュールからの信号によって制御される．試作機ではモジュールの完全なワイヤ

Table 1 Old prtotype specifications

Item	Unit	Value
Span	[mm]	267
Outer diameter	[mm]	99
Weight(in air)	[kg]	1.8
Weight(in fresh water)	[kg]	0.5
Max.Thrust	[N]	4.4
Pressure performance	[MPa]	1.0

レス化について技術的な可能性を示すことができたものの，水密性や推力に課題が残った．

3.1 旧型スラストモジュール概要

旧型スラストモジュールを Fig. 3 に，主な仕様を Table 1 に示す．耐圧容器はアクリル樹脂を用いており，前部平板蓋はアルミニウム合金 A5052P，後部平板蓋は MC ナイロン樹脂を用いている．全長は 267[mm] で，重量については空中重量 1.8[kg]，水中重量 0.5[kg] である．

モータは maxon 製 EC45 flat 30[W] を搭載しており，スクリュープローペラは RABOESCH 社製 183-19 ,5-blades ,pitch 71.7[mm] ,diameter 70[mm] を選定した．最大推力は 4.4[N] であり，連続稼働時間は 1.0 時間であった．

3.2 推力の検証

試作したスラストモジュールは最大で 4.4[N] の推力を発生させることができたが，これは本研究で開発する水中ロボットに対して十分な推力であるかどうかの検証をおこなった．検証をおこなうにあたり，水中ロボット全体を Fig. 2 のような形状に置き換えて計算をおこなった．また，条件として，前進方向にはスラストを 2 機搭載，最大連続航行速度を 1[kt](0.5[m/s]) としている．計算に用いたパラメータの定義と数値を Table 2 に示す．これらの仮定の下，式(1)によりレイノルズ数 Re を求めると，

$$Re = vl/\nu \quad (1)$$

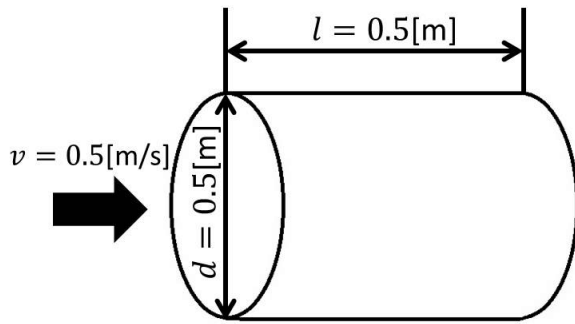


Fig. 2 Assumed shape of the robot

Table 2 Parameters used for estimation of drag force

Symbol	Unit	Value	Recital
d	[m]	0.5	Diametaer
l	[m]	0.5	Length
v	[m/s]	0.5	Flow rate
ν	[m/s ²]	1.3×10^{-6}	Kinetic viscosity
C_D		0.84	Drag coefficient
A	m ²	0.20	Cross sectional area
ρ	kg/m ³	1.0×10^3	Fluid density
D	[N]	21	Drag force
Re		10^5	Reynolds number

そのオーダーが 10^5 となり、これにより仮定した形状の物体の効力係数 C_D は 0.84 となる⁷⁾。この値を用いて式 (2) により抗力 D を求めると、

$$D = C_D A \rho v^2 / 2 \quad (2)$$

21[N] という結果が得られる。条件より、スラスタ 1 機あたり 11[N] の推力が必要となるため、試作機では 6.6[N] の推力が不足していることになる。よって、改良型スラスタモジュールは推力の目標を 11[N] とした。

3.3 旧型スラスタモジュールの課題

推力の不足を含め、旧型スラスタモジュールには以下のような課題が存在した。

- 1) 高水圧下での少量の漏水
- 2) 金属部品の多用による重量増加
- 3) 推力の不足

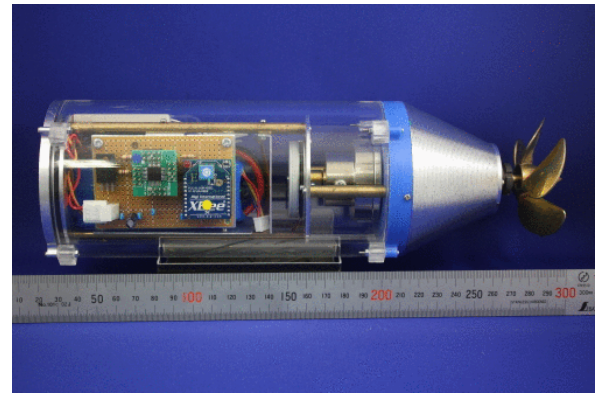


Fig. 3 Image of old prtotype thruster module

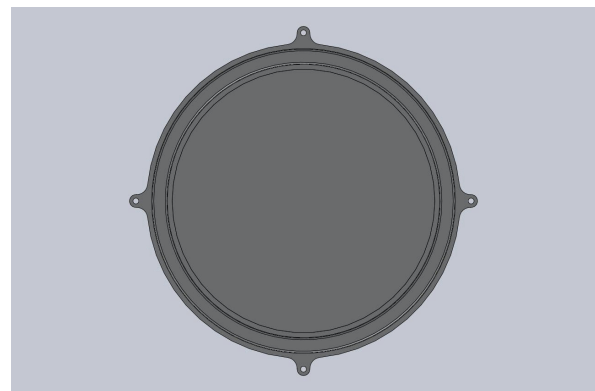


Fig. 4 Image of old prtotype cylinder cap

水漏れについては、Fig. 4 に示すように耐圧容器の蓋を固定する場所が 4ヶ所と少なかったことが原因だと考えられる。不必要な重量の増加については、スラスタ後方の円錐形の覆い(フェアリング)など、耐圧強度に関係のない部分においても材料に金属を用いていたことが原因である。また、推力の不足については、モータの出力に対してスクリュプロペラの抵抗が大きいという両者の不適合が原因だと考えられる。

4. 改良型スラスタモジュールの概要

試作機の開発と基本性能試験により得られた課題を解決するため、本論文では Fig. 6 および Fig. 5 に示す改良型スラスタモジュールの開発をおこなった。主な仕様を Table 3 に示す。基本

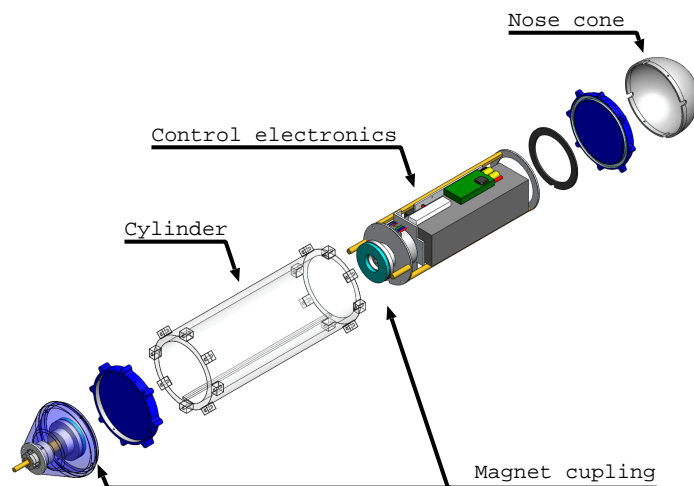


Fig. 5 Parts of the improved thruster module

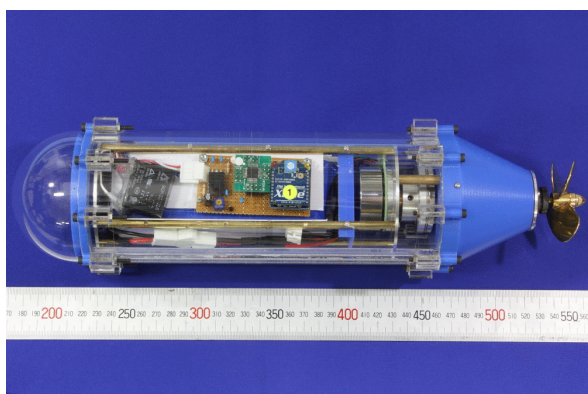


Fig. 6 Improved thruster module

Table 3 Prototype specifications

Item	Unit	Value
Length	[mm]	364
Outer diameter	[mm]	99
Weight(in air)	[kg]	1.9
Weight(in fresh water)	[kg]	0.4
Max.Thrust	[N]	14
Pressure performance	[MPa]	1.0

的な構造については試作機から大きな変更はないものの、細部についてはより高い性能が得られるよう改良をおこなっている。

4.1 マグネットカップリング

モータの出力をスクリューに伝達するにあたり、軸シールについては均圧方式や耐圧方式などの方法が考えられる。本論文ではスラストモ

Table 4 Specifications of new magnet coupling

Item	Unit	Value
Thickness	[mm]	20
Diameter	[mm]	45
Weight	[g]	82
Max. holding torque (10[mm]Air gap)	[mNm]	348

ジュール内部の容積やメンテナンス性を考慮し、尚且つ浸水のリスク低減を目的としてマグネットカップリング((株)松栄工機 CP0045-08-C20)を採用した。試作機で用いたマグネットカップリングは厚く、重量も大きかったため、改良型スラストモジュールでは新たに設計したマグネットカップリングを採用した。材料を鉄からアルミ合金に変更することによって、163[g]の軽量化を図ることができた。また、厚さについては従来と比べて9[mm]薄く製作した。従来のマグネットカップリングとの比較を Fig. 7 に、主な仕様を Table 4 に示す。

マグネットカップリング間の隔壁に金属材料を用いた場合、予備実験において渦電流によって発生した磁界の影響を受け、回転運動に大きな負荷がかかることが確認された。そのため、マグネットカップリング間の隔壁には樹脂材料を用いることとした。

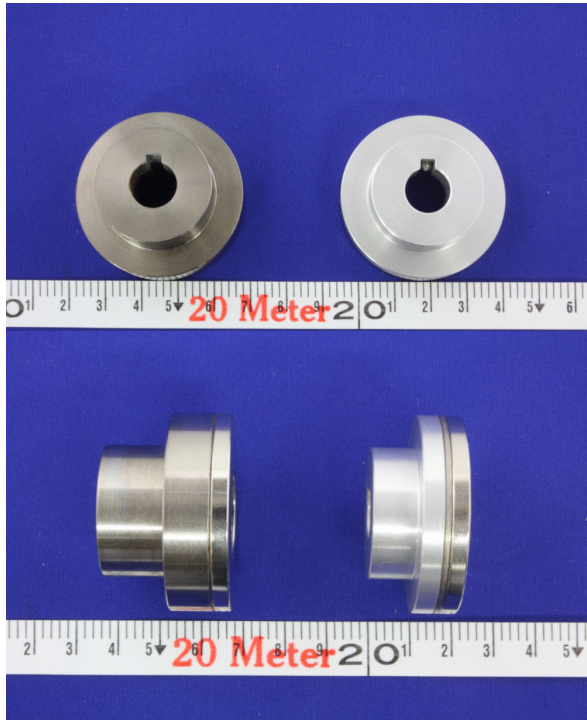


Fig. 7 Old(left) and new magnet coupling

4.2 耐圧容器

耐圧容器は両端に平板蓋付きの円筒型であり、円筒部の材料には透明性と入手性を考慮してアクリル樹脂を用いた。耐圧容器を透明にすることにより、外部から内部の様子を容易に把握することができる。そのため、従来のように耐圧容器を開けることなく浸水の有無や不具合が発生した部分を知ることができる。水密性については平面部に O リングを用いることで確保している。

円筒の内径、長さについては搭載する機器の寸法から決定し、板厚については式 (3) によって求めることができる耐圧に必要な最小限の板厚⁴⁾、および O リングの規格を考慮して決定した。

$$P_k = E \left[\frac{\pi^4}{n^4(n^2 - 1)} \times \left(\frac{r}{l} \right)^4 + \frac{n^2 - 1}{12(1 - \nu^2)} \times \left(\frac{t}{r} \right)^2 \right] \left(\frac{t}{r} \right) \quad (3)$$

計算に用いたパラメータの定義を Table 5 に示す。また、設計にあたり安全率は円筒部、平板蓋ともに 1.5 を採用した。これは欧米の無人型水中ロボットの基準を参考としたものである⁴⁾。

Table 5 Variables and parameters

Symbol	Unit	Recital
P_k	[MPa]	Elastic buckling pressure
E	[MPa]	Youngs modulus
n	[2,3,4...]	Buckling mode number
ν		Poisson's ratio
t	[m]	Cylinder thickness
r	[m]	Cylinder inner radius + $t/2$
l	[m]	Cylinder length
σ	[MPa]	Maximum stress
σ_B	[MPa]	Tensile strength
P	[MPa]	Crushing pressure
a	[mm]	Cylinder inner radius
t_p	[mm]	Required thickness
S_f	[1,2,3...]	Safety factor

ここで弾性座屈圧力を圧壊圧力と考え、圧壊圧力を 1.0[MPa]、アクリル樹脂のヤング率を 2800 [MPa]、ポアソン比を 0.3 として計算をおこなうと必要最小板厚は 4.1[mm] となる。この結果と O リングを取り付けるための幅を考慮し、円筒部の板厚を 7[mm] とした。

円筒部両端に取り付ける蓋の形状については、貫通部の無い平板とした。材料は、改良型では軽量化のために両端に MC ナイロンを用いた。必要板厚については、平板、貫通部無し、および円板の周辺が拘束されていないという条件を適用し、式 (4) および (5) により計算をおこなった⁷⁾。パラメータの定義を Table 5 に示す。

$$\sigma = 1.24Pa^2/t_p^2 \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_B/S_f \quad (5)$$

MC ナイロンの引張強度を 96[MPa] として計算をおこなった結果、必要最小板厚は 5.0[mm] となり、この結果と O リング用の溝を考慮して平板蓋の板厚を 6.0[mm] とした。

4.3 制御装置

本研究ではモジュール間の無線通信の方法として電波通信に着目した。電波通信装置としては開発環境や拡張性を考慮し、Fig. 8 に示す Digi

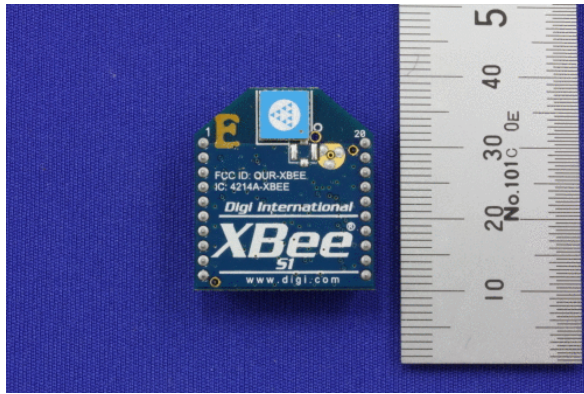


Fig. 8 XBee RF module

Table 6 Specifications of XBee RF module

Indoor/Urban Range	[m]	Up to 30
Outdoor line-of-sight Range	[m]	Up to 90
RF Data Rate	[kbps]	250
Supply Voltage	[V]	2.8-3.4
Operating Frequency	[GHz]	ISM 2.4
Number of Channels		16

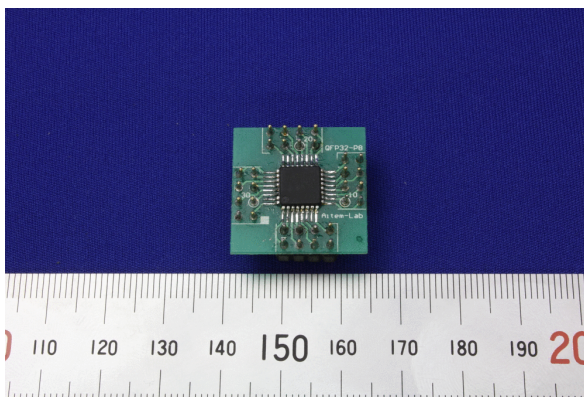


Fig. 9 R8C/2L

Table 7 Specifications of R8C/2L

Item	Specifications
CPU	Multiplier: 16bits × 16bits 32bits
	Multiply-accumulate instruction: 16bits × 16bits+32bits 32bits
Operating frequency	20MHz(VCC = 3.0 to 5.5[V])
	10MHz(VCC = 2.7 to 5.5[V])
	5MHz(VCC = 2.2 to 5.5[V])
Current consumption	Typ.10[mA](VCC=5.0[V])
	Typ.6[mA](VCC=3.0[V])
Timer	Watchdog,2 × 8bit,2 × 16bits
Serial Interface	Clock synchronous
	serial I/O/UART×2
Size	9.0×9.0×1.7 [mm]

International 製 XBee 802.15.4 OEM RF モジュールを選定した。XBee の主な仕様を Table 6 に示す。水中では電波の減衰が著しく、長距離での通信は困難である。しかし、ごく短い距離では通信をおこなうことができるため、ロボットを設計する際はモジュール間の距離を近づけるか、ゴムシートなどを挟み込むなどの対策が必要である。⁵⁾

モータを制御するためのコンピュータについては、ルネサスエレクトロニクス製 R8C/2L を採用した。このコンピュータは非常に小型で低消費電力であり、最大で 20[MHz] で動作する。また、R8C/2L の AD 変換ポートを用いて、バッテリーの残量の監視も行っている。R8C/2L を Fig. 9 に、主な仕様を Table 7 に示す。

モータドライバについては、RC モデル用 Electronic Speed Controller(ESC) である双葉電子工業製 MC951 H/A を採用した。ESC にはモータドライバに加えて CPU が搭載されており、モータの挙動について細かな設定をおこなうことができる。ESC の主な仕様を Table 8 に示す。

また、スラストモジュールの電源回路には、リードスイッチとリレーを組み合わせた電源スイッチを採用している。これにより、耐圧容器の蓋を開閉することなく、外部から電源スイッチを操作することができる。Fig. 10 にシステム

Table 8 Specifications of Electronic Speed Controller(ESC)

Max.continuous current	[A]	50
Switching rate	[kHz]	32
Size	[mm]	50×25×10
Weight	[g]	52

Table 9 Specifications of Brushless DC motor(BLDC)

Power rating	[W]	50
Nominal voltage	[V]	18.0
Stall torque	[mNm]	1100
Max. continuous current	[A]	3.54

ブロック図を示す。

4.4 モータおよびバッテリー

スラストモジュールは少ない容積の内部にバッテリーや制御用コンピュータ、電波通信装置を搭載している。そのため、これらの機器を有効に配置することができるよう、モータは扁平型であることを選定の条件とした。そのため、本研究で開発したスラストモジュールは扁平型ブラシレス DC モータを採用している。試作機ではmaxon 製 EC45 flat 30[W] を選定したが、推力を増加させることを目的として改良型スラストモジュールではmaxon 製 EC45 flat 50[W] を選定した。モータの主な仕様を Table 9 に示す。また、新たに採用したモータは基板が突出して

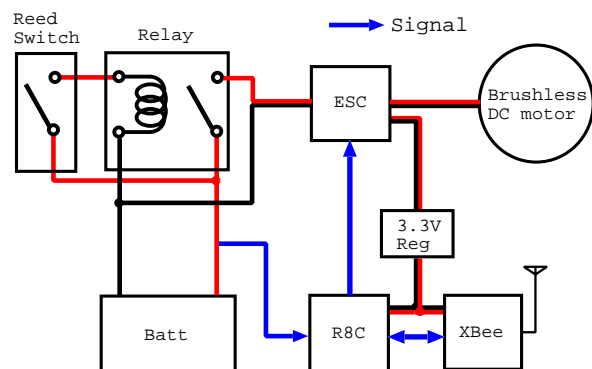


Fig. 10 System block diagram

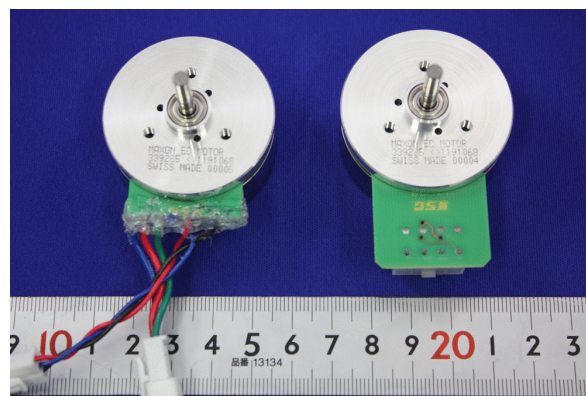


Fig. 11 BLDC motor

Table 10 Specifications of Li-Po battery

Rated voltage	[V]	22.2
Capacity	[mAh]	3300
Size	[mm]	143×40×43
Weight	[g]	514

おり、そのままの状態では試作機と同じ大きさの円筒耐圧容器に搭載することはできない。流体抵抗を可能な限り増加させることがないように、Fig. 11 に示すように、モータの基板に加工を施し、従来と同じ内径の円筒耐圧容器に搭載することができるようにした。

バッテリーについては、Hyperion 製 22.2[V] 3300[mAh] Li-Po バッテリーを採用した。Li-Po バッテリーは従来の Li-ion バッテリーなどと比べてエネルギー密度が高いことが特徴であり、スラストモジュールのような容積の少ない場所に搭載しても十分な容量を確保することができる。バッテリーの主な仕様を Table 10 に示す。

5. 基本性能試験

改良型スラストモジュールに対して、耐圧および水密性能、最大推力、連続稼働時間測定試験の3種類の基本性能試験をおこなった。

5.1 耐圧および水密性能試験

圧力試験機を用いて耐圧容器の耐圧性能および水密性を確認する試験をおこなった、試験の

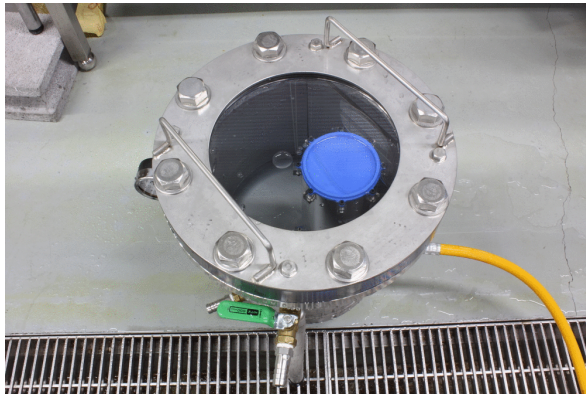


Fig. 12 Pressure and leak tests of the designed pressure vessel



Fig. 13 4 and 3 blades propeller

様子を Fig. 12 に示す．試験は JIS B8265 を参考にしておこなった⁶⁾．試験圧力は猪苗代湖の最深部を上回る 1.0[MPa] で，徐々に加圧した後，試験圧力を 1.0 時間維持した．この試験において塑性変形や漏水は生じなかったため，1.0[MPa] の水圧に耐えることが確認された．

5.2 最大推力測定試験

試作機での課題より，最大推力の目標を 11[N] として最大推力を測定する試験をおこなった．試験ではスラストモジュールを吊り秤に懸垂させ推力を測定した．また，予備実験の結果より，RABOESCH 製スクリーブプロペラの 4 枚羽，3 枚羽についてそれぞれ直径が 65[mm]，55[mm]，45[mm]，の計 6 種類をそれぞれ取り付けた．試験に用いたスクリーブプロペラを Fig. 13 に，試験の結果を Fig. 14 に示す．全てのスクリーブ

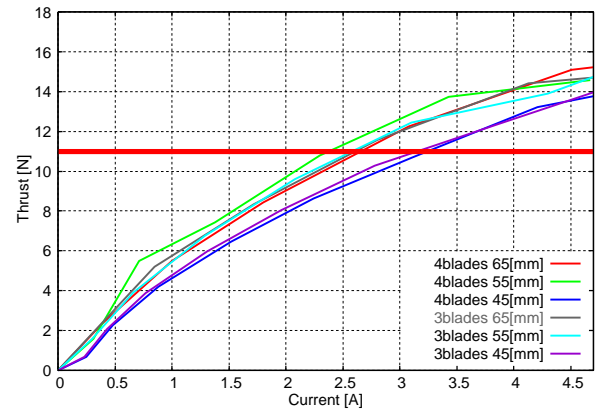


Fig. 14 Current-thrust graph of different propellers with 50[W] motor

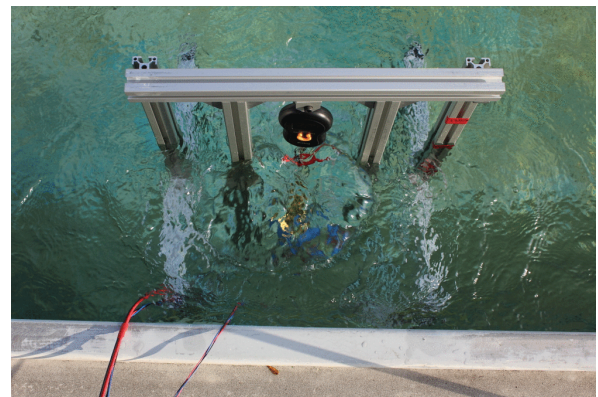


Fig. 15 Measurement of continuous operation time and thrust

ロペラで目標とする 11[N] の推力を発生させることができたものの，試験の結果より最も消費電流の少ない 4 枚羽，直径 55[mm] のスクリーブプロペラを採用することとした．また，このスクリーブプロペラを用いた場合，最大で 14[N] の推力を発生させることができた．

5.3 連続稼働時間測定試験

開発した改良型スラストモジュールに，RABOESCH 製 147-19 4-blades pitch 56.4[mm] diameter 55[mm] を取り付けて連続稼働時間を測定した．試験の様子を Fig. 15 に示す．試験では開始時の推力が 11[N] となるようにして測定をおこなった．試験の結果，連続で 2.0 時間稼働することが確認された．

6. 結 言

本論文では、改良型スラストモジュールの概要と基本性能試験について述べた。基本性能試験の結果、水密性および推力について試作機での課題を解決することができた。また、重量についてもバッテリーの重量の増加がおよそ 400[g]であったのに対して、全体重量では 100[g] の増加であったことから、試作機での不要な重量の増加を改善することができた。

現在、スラストモジュールの開発と並行してメインモジュールの開発がおこなわれている。メインモジュールの試作が終わり次第、スラストモジュールと組み合わせてプールでの実験をおこなう予定である。また、採水、採泥器についても開発をおこなう予定である。

謝 辞

部品の加工をしていただいた福島大学機械加工室教務補佐員の横野征正氏、丹治則行氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 浦 環:自律型海中ロボットの発展する方向,Journal of Geography, 109(6),pp900-906,2000.
- 2) 武村 史朗, 普天間 翔太, 白久レイエス 樹, 相良 慎一, 川端邦明, 木村哲也:スラスト鉛直指向機構を用いた水中物体の引き上げ, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会,RSJ2011AC1K3-5,2011.
- 3) 国土地理院, <http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOH/KOSYO-inawashiro.html>,1.March,2011.
- 4) 浦 環, 高川 真一 (編著): 海中ロボット総覧, 成山堂書店 (1994)
- 5) 大室 拓哉, 高橋 隆行: モジュール構造型小型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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11,1A2-M13,2011
- 6) 日本工業標準調査会 JIS 検索ページ, <http://www.jisc.go.jp/app/JPS/JPSO0020.html>,1.March,2011.
- 7) 日本機械学会," 機械工学便覧/日本機械学会編 α: 基礎編", 丸善,2007.