

環境調査用モジュール構造型小型 UROV の開発 -ワイヤレス通信型メインモジュールの開発-

Development of a small and modular UROV for environmental surveying -Development of main module with wireless communications-

猿田祐平* , 大室拓哉** , 高橋隆行*

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

*福島大学 , **福島大大学院

*Fukushima University, **Graduate School of Fukushima University

キーワード : 水中ロボット (Underwater Robot) , 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
猿田祐平 Tel.: (024)548-5259 , Fax.: (024)548-5259 , E-mail: saru@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒 言

現在, 湖沼の環境調査において最も一般的な方法は, バンドーン採水器や水温計を人間が投下, 回収し調査をおこなう方法である. この方法は大掛かりな装備を必要としない反面, 位置や深度などの正確性に欠けることに加え, 多大な労力を要する. 近年ではこれらの問題を解決するため, 前述した作業を補佐, 代替する水中ロボットが開発されている. 浦らが開発した自律型水中ロボット「淡探」¹⁾ は琵琶湖の酸素濃度計測や生息するプランクトンの観察など, 多くの成果を挙げている. また, 坂上らが開発した「湖虎」²⁾ は, 2本のロボットアームを用いて水中で作業をおこなうことを目的とし, 現在も開発が進められている.

福島県に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おこなわれている. また, 福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の拡散, 汚染状況の観測においても, 水中ロボットを導入することで, より正確なデータを継続的, かつ効率的に得ることができると考えられる.

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制限のある湖沼では, 多くの機能を持った大型の水中ロボットを使用し, 同時に複数の情報を収集することは困難である. さらにロボットの大型化による維持, 運用費の増加も問題となる. 一方で, 小型の水中ロボットは少人数での運用を可能にするが, 内部容積が少ないため, 搭載することのできる機能が制限されてしまい, 情報を満足に得ることができないといった問題が挙げられる.

これらを踏まえ, 本研究では Fig. 1 に示すよ

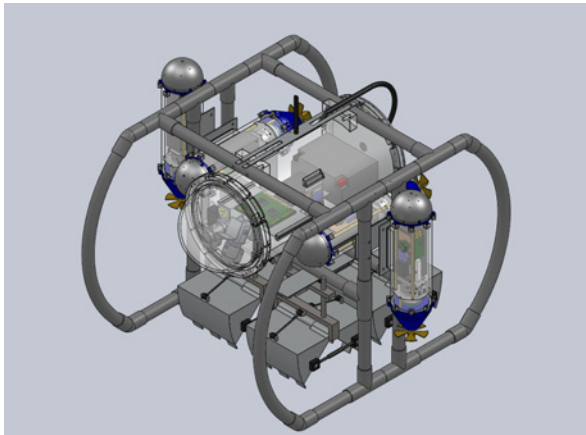


Fig. 1 Schematic diagram of conceptual model of the proposed underwater robot

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、メインモジュールの開発について詳しく述べる。

2. 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。この水中ロボットは猪苗代湖の最深部である水深93.5[m]³⁾での使用を想定しており、これをやや上回る水深100[m]に相当する水圧の1.0[MPa]に耐えうる耐圧性能を持たせる。また環境調査を専門とする研究者の要望により、リアルタイムでの水中の調査、観測をおこなえることを条件とする。

2.1 水中ロボットの形式

無人型的水中ロボットは大きく分けてAUV (Autonomous Underwater Vehicle) とROV (Remotely Operated Vehicle) の2種類に分類される。AUVは自律型の水中ロボットであり、船上または地上とロボットを繋ぐケーブルが存在しない。エネルギー源を内蔵し、ケーブルに拘束されずに自由に航行することができるが、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、リアルタイムでの操作や観測が困難である。ROVは前述した超音波通信の欠点から、実質的にケーブルで接続された水中ロボットである。そのため船上または地上からのエネルギー供給やリアルタイムでの操作、観測が可能となる。しかしケーブルによって行動範囲が制限されてしまうことに加え、ケーブル自体の流体抵抗によりAUVに比べ運動特性が低下してしまう。

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は通信線1本のみで接続されている。エネルギーを供給するための電源線がない分、通常のROVと比べてケーブルを細径化することができる。よって、ケーブルの流体抵抗を少なくでき、ロボットの運動特性が向上する。また、リアルタイムでの操作や観測も可能になる。

2.2 水中ロボットの構成

本研究で開発する水中ロボットは、各機能ごとにモジュール化されている。また各モジュールごとに電源と制御のためのコンピュータ、通信を行うための無線通信装置を搭載している。そして本研究で開発する水中ロボットを構成する各モジュールは大きく3つに分類することができる。1つめはメインモジュールである。メインモジュールは船上または地上のメインコンピュータとケーブルで接続されており、船上または地上からの指令をメインモジュールに搭載したコンピュータで受け取った後、そこから各モジュールへ無線通信を用いて伝送する。2つめはサンプリング・センサモジュールである。このモジュールは湖底の泥を回収する採泥器や、水を回収する採水器などを開発する予定である。3つめはロボットを動かすためのスラストモジュールである。このスラストモジュールは、大室らによって開発されたものを用いる⁵⁾。

ロボットをワイヤレスのモジュール構造型にする利点として、

- (1) 故障やバッテリー切れなどのアクシデントに対し、予備のモジュールと交換することで容易に対応することができる
- (2) 現場でモジュールを付け替えることで、複数の調査項目に対応することができる
- (3) 電源および制御機能を各モジュールに分けることで、様々なリスクを分散できる

といったことが挙げられる。(1)については、設備の整っていない現場や揺れる船上で、一般的に強固に固定された耐圧容器の蓋を開閉して作業をする必要がなくなることを意味している。(2)については、従来のモジュール構造型水中ロボットはあらかじめ調査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再接続作業がなくなり、使用者の現場で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。(3)については、一般的な水中ロボットはひとつの筐体に電源や制御機能を搭載している。そのため浸水が発生すると、全ての機能を一度に喪失してしまう危険性があった。しかし、各モジュールに電源や制御機能を分散させることで、そのようなリスクを大幅に低減することができる。

また、この他の利点として耐圧容器に多くの孔を開ける必要がないということが挙げられる。従来の水中ロボットは耐圧容器に孔を開けてケーブルを通していたが、高い水圧がかかるとその孔の隙間から浸水のリスクがあった。しかしモジュール間をワイヤレス化することで、耐圧容器に孔を開ける必要がなく、浸水のリスクを減らすことができる。

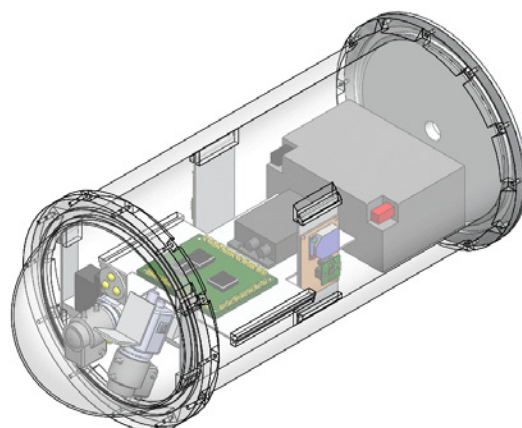


Fig. 2 Proposed design of main module

3. メインモジュールの概要

開発するメインモジュールを Fig. 2 に示す。メインモジュールには水中の映像を撮影するためのビデオカメラや地上の光が届かない深度でも視界を確保するための照明、水中ロボット全体の制御を行うコンピュータなどを搭載する。ビデオカメラについては、前方の様子を観察するものが1台、常に下方を向き湖沼の底質を観察するものが1台の合計2台を搭載する。

3.1 ビデオカメラ

水中ロボットは、深度や水中浮遊物の影響により、太陽光が十分に届かない状況での活動が考えられる。しかし、本研究で開発する水中ロボットは小型であり、内部容積が少ないことからバッテリーの容量も制限されてしまう。そのため、照明も小型で低消費電力であることが求められる。このことから、本研究で用いるビデオカメラは、より低照度で撮影することができることを条件とした。選定したビデオカメラ (WATEC 社製 WAT-250D2) を Fig. 3 に、主な仕様を Table 1 に示す。撮影可能な最低照度は $0.02[\text{lx}]$ となっており、これは晴天の夜間における半月の明るさに相当する。また本体サイズは $34[\text{mm}] \times 34[\text{mm}] \times 50[\text{mm}]$ であり、メインモジュールに搭載するにあたって十分小型であると言える。



Fig. 3 WAT-250D2 CCD camera

Table 1 Specifications of WAT-250D2

Pick-up Element	[in]	1/3
Number of Effective Pixels		768×494
Minimum Illumination	[lx]	0.02 F1.2
Power Supply	[V]	12
Power Consumption	[W]	1.74 (145mA)
Size	[mm]	34×34×50

3.2 レンズ

カメラに取り付けるレンズを選定するにあたり，焦点距離とF値を重視した．本研究で想定している使用者の要望により，焦点距離28[mm] (35[mm]判換算)，F値はより多くの光を取り込むことができるよう，なるべく小さいことを条件とした．この条件から，Fig. 4に示すFUJINON社製 YV2.8×2.8LA-SA2を選定した．主な仕様を Table 2 に示す．またこのレンズは焦点距離とフォーカスを手動で変えることのできるバリフォーカルレンズである．そのため，これらの値については実際の運用で得られた結果をもとに，適切な値を決定していく．

Table 2 Specifications of YV2.8×2.8LA-SA2

Focal Length	[mm]	2.8 - 8
Iris Range		F0.95 - T360
Field Angle(Horizontal)	[deg]	99.52 - 35.14
Field Angle(Vertical)	[deg]	73.17 - 26.24
Size	[mm]	38.3×33.5×51.3



Fig. 4 YV2.8×2.8LA-SA2 Wide angle vari-focal lens

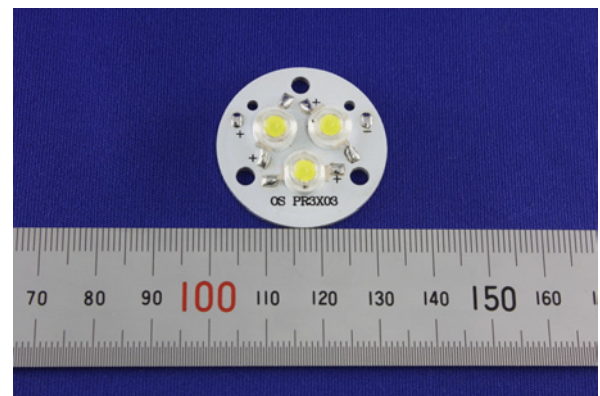


Fig. 5 OS PR3XW3-W4XME1C1E LED lamp

3.3 照明

環境調査をおこなうにあたり，水や調査対象物の色を観察することは重要である．そのため，より実際の色に近い状態で観察することができるよう，色彩工学において標準的な色温度である6500[K]の光を照射できることを条件とした．この条件から Fig. 5に示すOPTOSUPPLY社製 OS PR3XW3-W4XME1C1Eを選定した．主な仕様を Table 3 に示す．なお，このLEDの輝

Table 3 Specifications of LED lamp

Input Voltage(DC)	[V]	12
Input Current(DC)	[mA]	400
Color Temperature	[K]	6500
Whole Luminous Flux	[lm]	300
Beam Pattern	[deg]	120
Diameter	[mm]	φ31.5

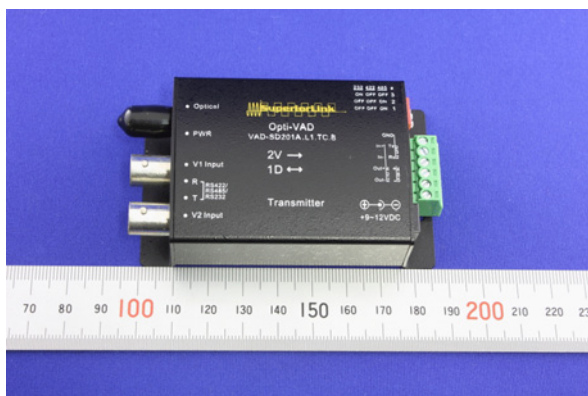


Fig. 6 VAD-SD201A.L1.TC/RC.8 Fiber optic repeater

Table 4 Specifications of fiber optic repeater

Voltage Supply	[V]	DC9 - 12
Operating Current	[mA]	280
Data Rate	[Mbps]	1
Size	[mm]	89×52.6×22.8

度は 300[lm] である。

3.4 光リピータ

本研究では、船上または地上のコンピュータとロボット間の通信線には光ファイバを用いる。そのため、電気信号と光信号を双方向に変換することのできる光リピータとして、Fig. 6 に示す JOBLE 社製 VAD-SD201A.L1.TC/RC.8 を用いる。主な仕様を Table 4 に示す。この光リピータはビデオカメラの映像 2 系統とシリアル通信 1 系統を、1 本の光ファイバで伝送することができる。電気信号を伝送する同軸ケーブルと比べて、ケーブルを細径化することができ、映像の劣化も抑えることができる。

3.5 電波通信装置

モジュール間の通信を行う電波通信装置には Fig. 7 に示す Digi International 社製 XBee 802.15.4 OEM RF モジュールを用いる。主な仕様を Table 5 に示す。XBee はマルチポイント通信が可能で、これにより、メインモジュールに搭

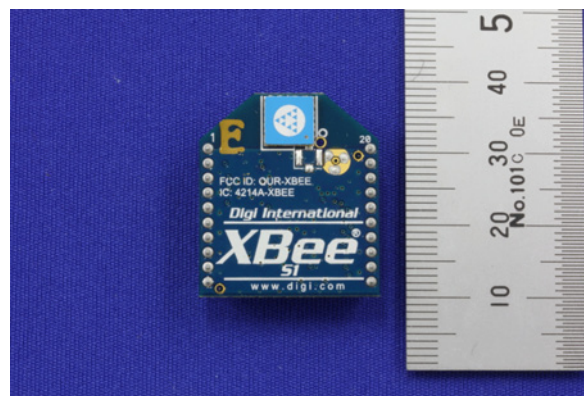


Fig. 7 XBee 802.15.4 OEM RF

Table 5 Specifications of XBee RF module

Indoor	[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
Operating Current	[mA]	45
Number of Channels		16

載した XBee から複数のモジュールと通信をおこなうことができる。またシリアルポートを備えており、複雑な設定を行わずとも既存のシリアルケーブルを無線に置き換えることができる。水中では電波の減衰が著しく、長距離での通信は困難なため、水中における一般的な通信方法として電波が用いられることはない。しかし、本研究で想定するような、モジュール間の非常に短い距離に限れば通信が可能であることがわかっている⁵⁾。また、モジュール間に物体を挟み込み、水を排除することによって通信距離を伸ばすことができ、設計の自由度が増すと考えられる。

3.6 制御用コンピュータ

ロボット全体の制御を行うコンピュータには Fig. 8 に示す ALPHA PROJECT 社製 AP-SH4-1A を用いる。主な仕様を Table 6 に示す。CPU にはルネサステクノロジ社製 SH4 を搭載している。このコンピュータはシリアルインターフェースを 4ch 備えており、無線通信装置を複数系統

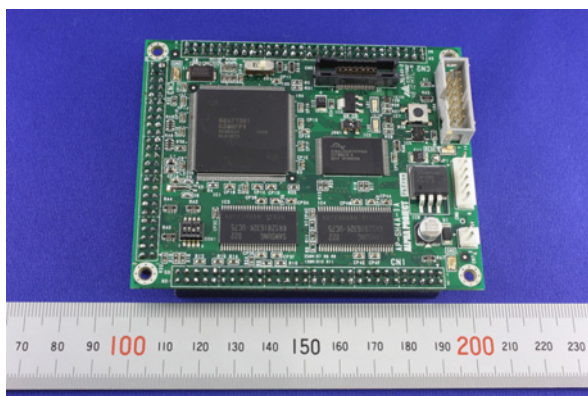


Fig. 8 AP-SH4-1A Development board

Table 6 Specifications of AP-SH4A-1A

Operating Frequency	[MHz]	266
Serial Interface	[byte]	16 - 4ch
Supply Voltage	[V]	5
Operating Current	[mA]	280
Interface		I2C SPI

接続することで、より多くの情報伝送量を確保することができる。また、各種センサを接続するために使用することのできる I2C や SPI 方式の通信ポートも備えている。

3.7 バッテリー

バッテリーの選定にあたり、必要な容量の計算をおこなった。作業時間を 6 時間とし、搭載する機器の消費電流を合計したものに、冗長性や今後の拡張性を考慮し、経験的に 1.5 倍の容量を確保すると、16.5[Ah] 以上の容量が必要となる。これを踏まえ、SHORAI JAPAN 社製 LFX18A1-BS12 を選定した。主な仕様を Table 7 に示す。電圧は 12[V] で容量は 18[Ah] であり必要容量を満たしている。

Table 7 Specifications of LFX18A1-BS12

Voltage	[V]	12
Capacity	[Ah]	18
Size	[mm]	148×105×66
Weight	[kg]	0.997

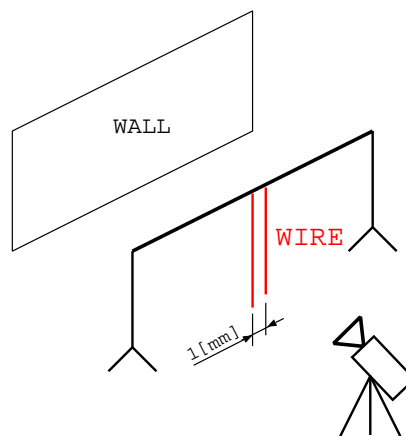


Fig. 9 Setup for testing visibility of small object

4. ビデオカメラの性能の確認

本研究で開発する水中ロボットのビデオカメラには様々な用途が考えられるが、本論文では以下の 2 点に着目した。

- (1) 小さな物体の撮影
- (2) 操縦に必要な視界の確保

この 2 つの用途に選定したビデオカメラを用いることを想定し、ビデオカメラと照明の性能が十分であるかの確認および、調整をおこなった。

4.1 画角およびフォーカスの設定

環境調査をおこなっている研究者によると、水棲植物を観察するにあたっては 1.0[mm] の大きさを判別することができれば十分であるという。このことから、選定したビデオカメラと LED 照明を用いた場合、1.0[mm] の大きさを判別することができるか検証した。

4.1.1 実験方法

Fig. 9 に示すように、2 本のワイヤーを 1.0[mm] の隙間を開けて配置し、実環境を模擬し、部屋の照明を消した上で LED 照明のみを点灯し撮影をおこなった。

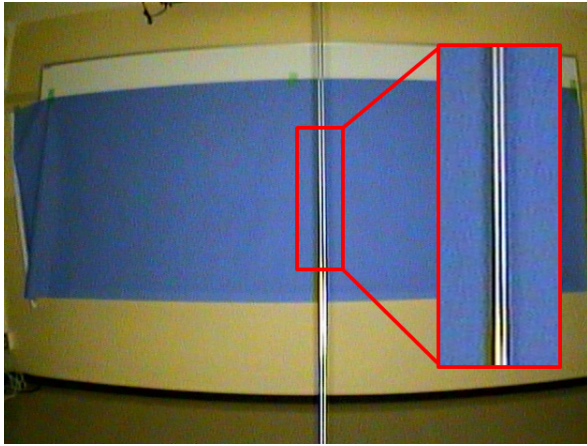


Fig. 10 Actual photograph of small object using camera

4.1.2 実験結果

実験結果を Fig. 10 に示す．LED 照明のみを用いた場合，300[mm] まで接近することで，目的とする 1.0[mm] の大きさの判別が可能であることが確認された．

4.2 視界の確認

4.1 で設定した画角およびフォーカスで，どの程度の視界を確保することができるか確認をおこなった．ここでは特に操縦に必要な視界について考慮する．操縦に必要な視界については，水中ロボットが航行中に前方に障害物を発見した際，スラスタの逆推力のみで停止することができる距離が見えること，と定義する．

4.2.1 水中ロボットの運動特性

航行する水中ロボットには流体による抵抗が作用する．抗力はロボットを減速させる力として働くが，ここでは抗力を考慮せず，スラスタの逆推力のみで減速，停止することを条件とした．この条件より運動方程式は，式 (1) のように表すことができる．

$$M\ddot{x} = F \quad (1)$$

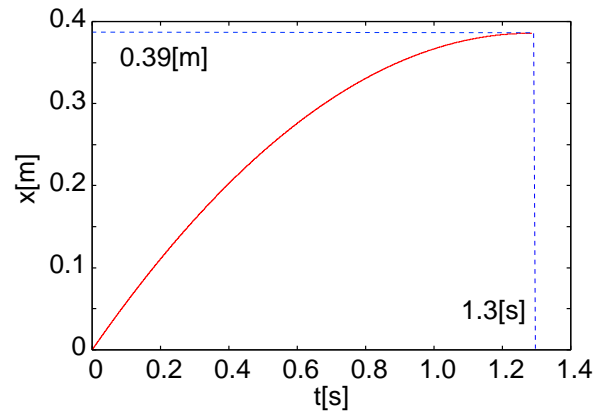


Fig. 11 Graph of displacement

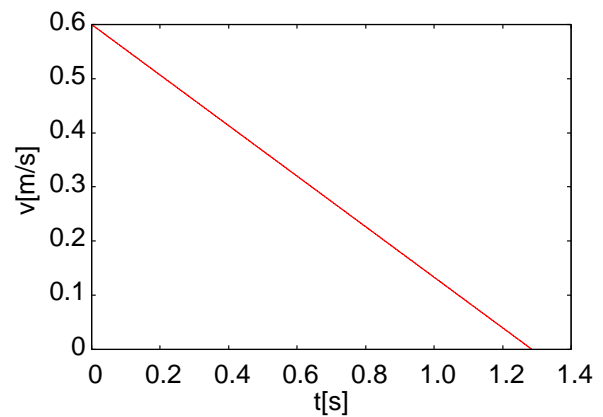


Fig. 12 Graph of velocity

計算をおこなうにあたり，ロボットの質量 M を 30[kg]，初速度 $\dot{x}(0)$ は，スラスタの最大推力を考慮し，0.6[m/s]，またスラスタの逆推力 F は合計で -14[N] としシミュレーションを行った．Fig. 11 は縦軸が距離，横軸が時間を表すグラフである．また，Fig. 12 は縦軸が速度，横軸が時間を表すグラフである．このグラフを見ると，1.3[s] 後の 0.39[m] の時に速度が 0.0[m/s] となり，停止することがわかる．

このことから，操縦者が障害物を認識してから逆転方向に操作するまでの時間とスラスタが正回転から逆回転になるまでの時間を合計 2.0[s] としても，2.0[m] 先の物体を見ることができれば問題ないと考えられる．

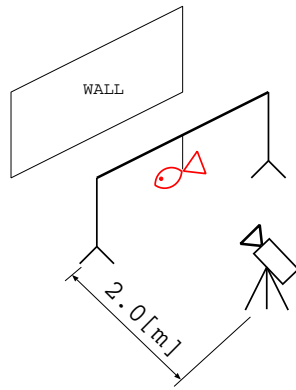


Fig. 13 Setup for testing visibility of model fish

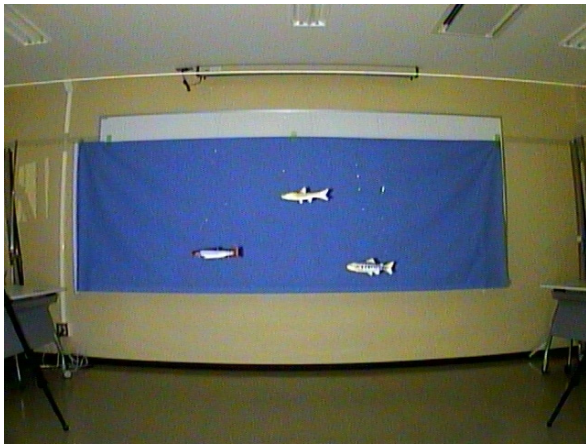


Fig. 14 Actual photograph of model fish

4.2.2 実験方法

計算により導出した結果から、実際に 2.0[m] 前方の物体を確認することができるか検証した。実験は Fig. 13 に示すように、ビデオカメラから 2.0[m] の位置に障害物に見立てた物体を配置し、4.1 の実験と同様に LED 照明のみを点灯した状態で撮影を行った。

4.2.3 実験結果

実験結果を Fig. 14 に示す。このように、2.0[m] 先の物体でも、LED 照明のみの点灯で十分確認することができた。

しかし、本論文での実験はあくまで空気中での結果であるので、今後は水中での見え方を検証する実験をおこなう予定である。

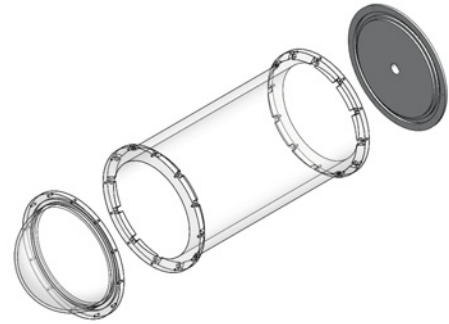


Fig. 15 container for main module

5. 耐圧容器の設計

設計した耐圧容器を Fig. 15 に示す。耐圧容器は円筒容器と平板蓋、そして球面窓の 3 点で構成されている。円筒容器の材料には透明性や加工性を考慮してアクリル樹脂を用いる。円筒容器を透明な材料にする理由として、耐圧容器の蓋を開けなくとも、浸水や故障の有無など内部の様子を確認できることがあげられる。また前述した円筒容器や球面窓と異なり、水圧により大きな引張応力が発生する平板蓋には、加工性なども考慮した上でアルミニウム合金 A5052-H112 を用いる。なお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する。

5.1 円筒容器

円筒容器の内径および長さは搭載する機器の寸法から決定し、板厚については以下の式 (2) を用いて求める。

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

計算に用いたパラメータの定義を Table 8 に示す。また安全率については欧米の無人型水中ロボットの基準を参考にし、円筒部、球面窓、平板蓋のすべてにおいて、1.5 を採用する。

Table 8 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
β		Stress factor
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 として計算すると，必要最小板厚は 12.9[mm] となるので，設計値は 15.0[mm] とした．

5.2 平板蓋

円筒部に取り付ける平板蓋には，中心にケープルを通すための貫通孔を設ける．必要板厚は式 (3) および (4) を用いて計算をおこなった．

$$\sigma = \beta P a^2 / t_p^2 \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_B / S_f \quad (4)$$

計算に用いたパラメータの定義を Table 8 に示す．材料にはアルミニウム合金 A5052-H112 を用い，引張強度は 260[MPa] とする．圧壊圧力は 1[MPa] とし， β は 1.8 とする⁷⁾．計算の結果，必要最小板厚は 9.2[mm] となり，Oリングを取り付ける溝を考慮し，設計値を 10.0[mm] とした．

5.3 球面窓

円筒部に取り付ける球面窓の板厚については以下の式 (5) を用いて計算をおこなった．

$$P = \left[\frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \right] \left(\frac{t}{r} \right)^2 \quad (5)$$

計算に用いたパラメータの定義を Table 8 に示す．材料にはアクリル樹脂を用い，円筒容器と同様の圧壊圧力と材料条件で計算をおこなうと，必要最小板厚は 1.8[mm] となるので，設計値を 2.0[mm] とした．

6. 結言

本論文では，湖沼調査を目的とした小型水中ロボットのメインモジュールの開発をおこなった．ビデオカメラと照明については，空気中の実験結果から必要な性能を備えていることが示唆された．今後は水中でも検証を行う必要がある．

搭載する機器については，現時点では運用に最低限必要な機器のみの選定である．そのため，今後はロボットの状態を把握する内界センサについても選定をおこなう．これらを踏まえ，機器の配置についても詳細な検討をおこなう必要がある．

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) 坂上憲光:水中ロボットマニピュレータの動作時における浮心移動機構を利用した本体姿勢保証, 日本機学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 1P1-D26.
- 3) 国土地理院 猪苗代湖, <http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/KOSYO-inawashiro.html>
- 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タモジュールの開発, 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.