

湖沼調査用水中ロボットのためのベローズを用いた 小型・軽量の浮力調整器の開発 －ワイヤ式伸縮機構の改良－

Development of a compact and lightweight buoyancy controller using bellows for environmental surveying underwater robot － Improvement of a wire expansion mechanism －

○藤原 瑞穂*, 高橋 隆行*

○ Mizuho Fujiwara*, Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： 水中ロボット (underwater robot), 浮力調整器 (buoyancy controller), PTFE ベローズ (PTFE bellows), 伸縮機構 (telescopic mechanism)

連絡先： 〒 960-1248 福島県金谷川 1 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
藤原瑞穂, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: fujiwara@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

福島県には、桧原湖や猪苗代湖など多くの湖沼が存在しており、水質調査や生態系調査が行われている。また、2011 年の東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、放射線量の調査も行われるようになった。水中の放射性セシウムは、一般に底質の土粒子表面に付着しているといわれていることから、湖底泥の採取による調査が必要である。

従来の採泥方法として、水上の船から採泥器を投下する方法や潜水士が採泥地点まで潜水し、直接採泥を行う方法等が存在する¹⁾。前者の方法では採泥器が波や流水によって流されてしまうなど、精確な位置情報の把握が困難である。また、後者では、潜水士への負担が大きいため、深い水深での採泥が困難であり、コストの面から

も長期にわたる定期的なサンプリングが困難である。そこで、筆者らは、これらの問題を解決するため、猪苗代湖を調査対象に水中ロボット G-TURTLE (Glider-Type Underwater Robot for Lake Environmental survey) の開発を行ってきた³⁾。G-TURTLE の構想図を Fig. 1 に示す。

本ロボットは水平方向の移動にはグライダー

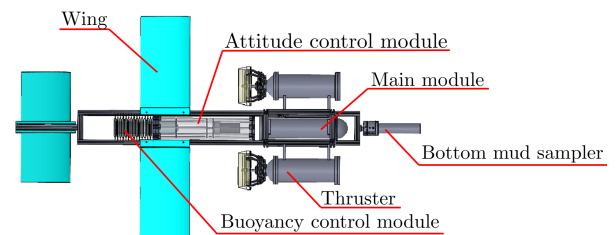


Fig. 1: The concept of G-TURTLE²⁾

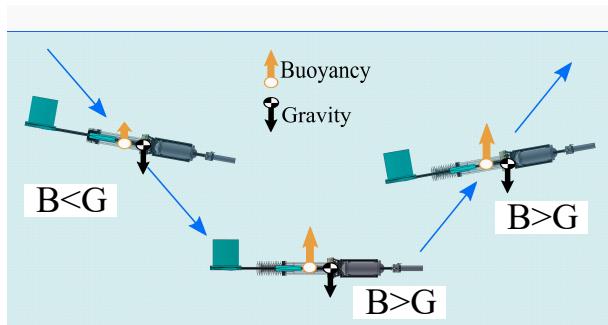


Fig. 2: The motion of G-TURTLE

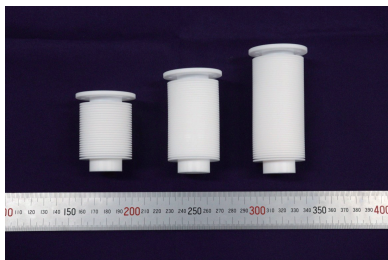


Fig. 3: Prototyped bellows with different number of pleats

方式⁴⁾を採用する予定である。グライダー方式は Fig. 2 のように、浮力調整器によって浮力を調整しながら潜水・浮上を繰り返し、翼まわりに揚力を発生させることで、水中を滑空するように移動する方法である。この方式では潜水・浮上のための浮力調整時にのみエネルギーを消費するため、スクリュー方式の移動と比べて同じバッテリー容量でより長距離の移動が可能になると考えられる。一方、採泥管の貫入・抜去には大きな推進力が必要であるためスクリュー方式を採用する⁵⁾。

水中ロボットのグライダー動作実現のためには、浮力調整器が重要なデバイスとなる。その要求仕様として、G-TURTLE の小型・軽量化のために、浮力調整器も小型・軽量にすること、猪苗代湖の最大水深 100 [m] でも運用可能であること、故障した場合の環境への影響が小さいことなどが求められる。特に、調査対象である猪苗代湖は国立公園に指定されているため、オイル漏れのリスクがある油圧式の浮力調整器を用いることはできない。そこで筆者らは、PTFE

ベローズを用いた浮力調整器の開発を行ってきた。また、先行研究では、水深 100[m] で浮力調整が可能なベローズの設計、ならびにその伸縮機構の試作が行われた³⁾。

しかし、試験途中でワイヤが破断するなど、ワイヤの強度が不十分であり、水深 100[m] での運用は困難な性能に留まっていた。そこで本研究では、ワイヤの使用法について再検討を行い、それをもとにベローズの伸縮機構の改良を行う。また、制作された伸縮機構の性能を、実験により評価する。

2. 先行研究

先行研究で製作された PTFE ベローズや構想された浮力調整器についての特徴と、製作された伸縮機構の課題について述べる。

2.1 PTFE ベローズ

PTFE（フッ素樹脂：PolyTetraFluoroEthylene）は、比較的柔らかい樹脂であり、耐候性をもつため屋外で使用する水中ロボットに用いる材料として優れているといった特徴を持つ。この特徴に着目し、Fig. 3 のような PTFE 製のベローズを製作した。

一般的に、ベローズはヒダによって径方向の強度が高い構造をしており、さらに、小さな力で伸縮可能である。

2.2 浮力調整器の構想³⁾

G-TURTLE は、湖岸まで成人男性 2 人での運搬が可能となるよう、目標質量を 30 [kg] としている。また、想定される抗力より、G-TURTLE に用いられる浮力調整器は、浮力調整量 4 [N] と見積もっている。

構想されている G-TURTLE の概要を Fig. 4 に示す。この構想では浮力調整器を、G-TURTLE の四方にそれぞれ 1 個ずつ設置する。浮力調整

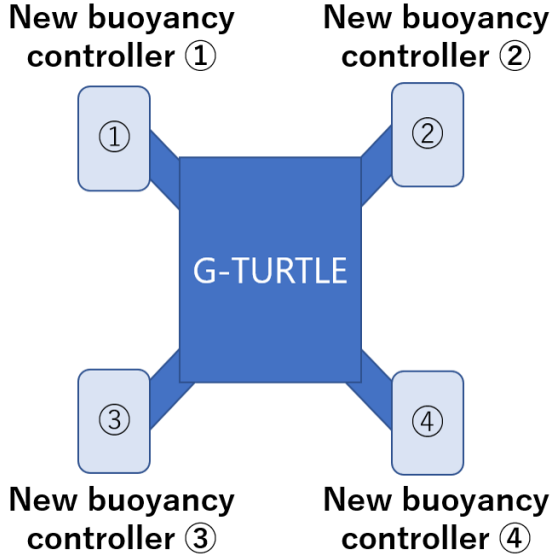


Fig. 4: Arrangement plan for the new buoyancy control device³⁾

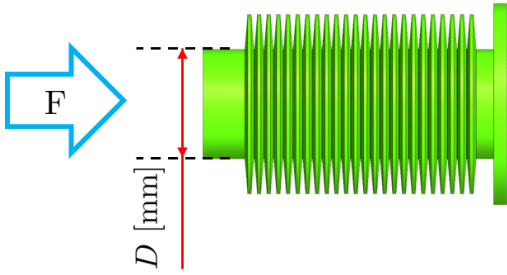


Fig. 5: Parameters used in force calculations of bellows³⁾

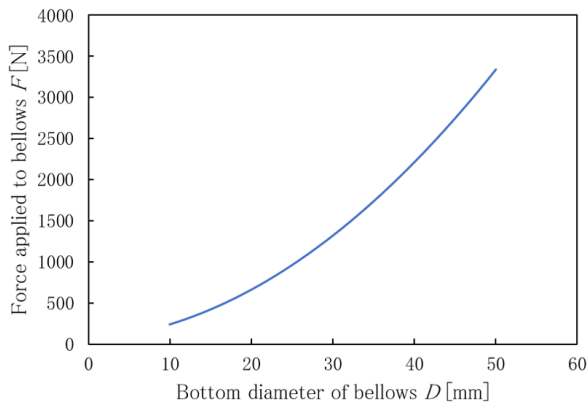


Fig. 6: Force applied to bellows at 100 [m] of water depth (1 [MPa] water pressure)³⁾

器 1 個あたりの最大浮力調整量を 1 [N] とすると、目標浮力調整量の 4 [N] を達成することができる。また、各浮力調整器の浮力を調整する

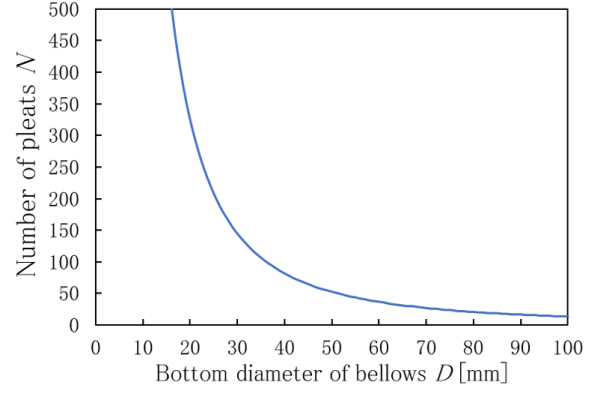


Fig. 7: Bottom diameter and number of pleats in bellows for buoyancy adjustment of 1 [N]³⁾

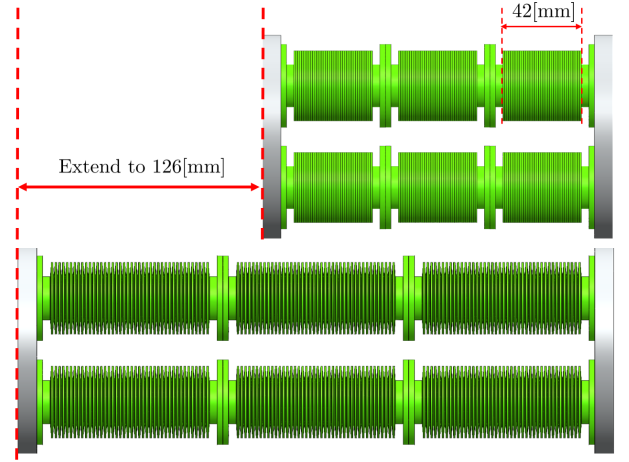


Fig. 8: Design of 1[N] buoyancy bellows³⁾

ことで、機体の浮心位置を二次元的に操作することができる。

2.2.1 浮力調整量 1 [N] のベローズ

浮力調整量 1 [N] のベローズの設計について説明する。水深 100 [m] (水圧 1 [MPa]) でベローズの伸縮に必要な力の概算を行った。Fig. 5 に力の概算に使用するパラメータを示し、計算結果を Fig. 6 に示す。

縦軸に 1 [MPa] の水圧下でベローズの伸縮を行うために必要な力 F 、横軸にベローズの底面直径 D をとる。この概算値はベローズのヒダ部分にかかる力や安全率 1.5⁷⁾ も考慮した値である。Fig. 6 より、底面直径 D が大きくなるほどベローズの伸縮に大きな力を要することが確認

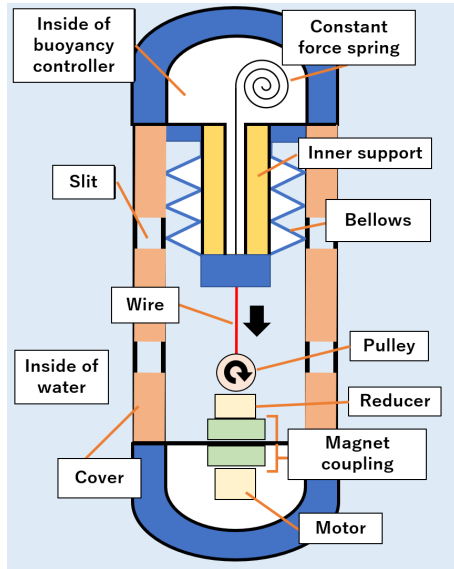


Fig. 9: Concept of buoyancy controller³⁾

できる。よって、底面直径 D はできる限り小さくする必要があるが、加工の都合上、製造可能なベローズの底面直径は最小で 23 [mm] 程度である。また、一度の加工で製作可能なベローズの最大山数は 48 山程度である。

ここで、ベローズの底面直径を 23 [mm] とすると、Fig. 7 より浮力調整量 1 [N] のベローズは 247 山の山数を要し、製作が困難となる。そこで、Fig. 8 に示すように、42 山のベローズを 3 個直列につなぎ、それを 2 個並列に並べることで、総山数が 247 山以上となり、浮力調整量 1 [N] が達成可能である。なお、底面直径 23 [mm] のベローズの伸縮に必要な力は 834.37 [N] であり、これを 2 個並べるため、ベローズの伸縮には 1668.73 [N] の力を要する。この値は安全率 1.5 を考慮した値であり、安全率を 1 とすれば、1112.48 [N] でベローズの伸縮が可能である。

最終的な底面直径の値は、今後、いくつかの実験結果や検討をもとに決定していく。

2.2.2 ワイヤ方式のアクチュエータ³⁾

次に水深 100 [m] でベローズの伸縮を行うためのアクチュエータの検討を行う。高水圧下でベローズを伸縮できるアクチュエータとして、ワ

Table 1: Safe strength of wire⁸⁾

Diameter [mm]	Strength [N]
1.0	313.6
1.3	470.4
1.6	686.0
2.0	940.8

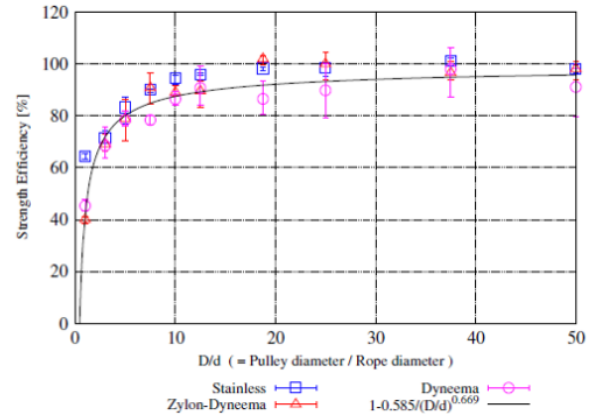


Fig. 10: Effect of D/d on wire tensile strength⁹⁾

イヤ方式が提案された³⁾。ワイヤ式の伸縮機構を搭載した浮力調整器の概略を Fig. 9 に示す。本機構は、モータ、減速機、プーリより構成されており、減速機、プーリは水中に設置し、モータの動力を磁気カップリングによって伝達する。また、ベローズに取り付けたワイヤをプーリで巻き取ることでベローズを伸ばし、水圧によって縮めることで浮力調整を行う。

3. ワイヤ強度

3.1 先行研究におけるワイヤ強度確認実験

原理確認用として、Fig. 9 を元に、Fig. 11 に示すワイヤ方式の伸縮機構を製作し、性能評価を行った³⁾。製作した伸縮機構では、1 本のワイヤを用いて、2 個を直列につないだベローズを伸縮させる。ベローズを 2 個用いるのは、第 2.2.2 節で述べた、複数のベローズを直列に接続した場合の設計の実現性を確認するためである。

ベローズを最も縮めた状態で機構に取り付け、

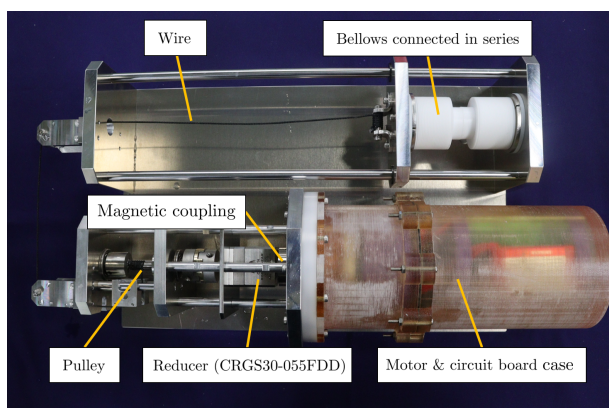


Fig. 11: Experimental setup of bellows telescopic mechanism for principle verification³⁾

Table 2: Safe strength of wire⁸⁾

Diameter [mm]	Strength [N]
1.0	313.6
1.3	470.4
1.6	686.0
2.0	940.8

1 [MPa] の水圧下で、直径 1.0 [mm], 1.3 [mm] のワイヤを用いてベローズの伸縮が可能かを確認した。実験の結果、1 [MPa] の水圧下でベローズの伸縮は可能であったため、複数のベローズを直列に接続する設計は実現可能であることが確認された。しかし、直径 1.0 [mm] のワイヤを使用した場合では、ベローズを伸ばしている途中でワイヤが破断した。また、直径 1.3 [mm] のワイヤを使用した場合では 3 回目の伸縮動作でワイヤが破断した。なお、この実験で使用したベローズの底面直径 D は 25 [mm] であり、このベローズの伸縮に必要な力は、1 [MPa] の水圧下で、640.87 [N] である。

以下では、この実験でワイヤが破断した理由について考察する。

3.2 ワイヤ強度の考え方

伸縮機構で用いるワイヤには、emma kites 社の超高強度ポリエチレン繊維コードを採用している。このワイヤの安全な使用強度を、Table 2

Table 3: Wire strength ($D = 5$)

wire d [mm]	D/d	Strength efficiency [%]	Strength [N]
1.0	5.0	80	250.88
1.3	3.8	75	352.80
1.6	3.1	70	480.20
2.0	2.5	65	611.52

に示す。ここで安全な使用強度とは、メーカーが推奨する実用的な引張強度のことであり、最大引張強度の 20[%] の値である。また、ワイヤの強度は、プリー径と、Fig. 10 に示すような関係がある⁹⁾。Fig. 10 は、縦軸に強度効率、横軸にプリー直径 D とワイヤ直径 d の比 D/d をとった際のステンレスワイヤおよび化学繊維ロープの強度効率の変化を示している。ここで、強度効率とは、強度低下の割合のことである。 D/d が大きいほど強度効率は 100 % (ワイヤ本来の強度) に近づき、小さくなると急激に減少する。

3.2.1 先行研究におけるワイヤ破断に関する考察

先行研究で使用されていたプリーの直径は 5 [mm] である。この時の各ワイヤ径に対する D/d を Table 3 に示す。また、強度効率はワイヤ径 d が 1.0 [mm] の時は 80 [%], 1.3 [mm] の時は 75 [%] である。ここから算出されるワイヤ強度は、直径 1.0 [mm] のワイヤで 250.88 [N], 1.3 [mm] で 352.80 [N] となる。これは、ベローズの伸縮に必要な力 640.87 [N] を満たしていない。よって、破断したと考えられる。

3.2.2 ワイヤ破断を避ける方法

第 2.2.1 項で述べたように、浮力調製量 1 [N] のベローズを、1 [MPa] の水圧下で伸縮するには、1112.48 [N] (以下、最低要求荷重) の力が必要である。つまり、ワイヤが 1 本では、発生力が不足する。この解決法としては太いワイヤを

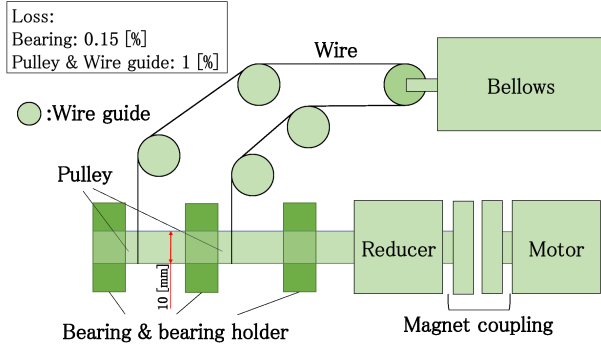


Fig. 12: Design outline of buoyancy controller

Table 4: Wire strength ($D = 10$)

wire d [mm]	D/d	Strength efficiency [%]	Strength [N]
1.0	10.0	90	282.24
1.3	7.69	85	399.84
1.6	6.25	83	569.38
2.0	5	80	752.64

Table 5: Parameters in the equation (1)

Symbol	Parameters	Unit
T_i	0.2	Nm
N	100	-
η_g	40	%
η_m	1.15	%
r	0.005	m

使うという方法も考えられるが、強度効率的な観点からは得策ではない。したがって、本研究では、ワイヤを2本並列に使う方法を検討する。

ワイヤ2本で安全にベローズを伸縮できる力は、ワイヤ強度の2倍であるので、プーリ径が5 [mm] のとき、最低要求荷重を満たすのは、Table 3 より直径 2.0 [mm] のワイヤのみである。一方で、プーリ径 を 10 [mm] とした場合を考えると、Table 4 に示したようになる。この場合、ワイヤを2本使用することを考えると、直径 1.6 [mm], 2.0 [mm] のワイヤで最低要求荷重を満たすことができる。

4. 伸縮機構の改良

第3.2.2項の考察に基づき、本章では、Fig. 11 に示した伸縮機構を、2本のワイヤでベローズを伸縮できるように改良する。プーリ径としては、より細いワイヤを使用できることから、10 [mm] のものを使用できると好ましい。そこで、実際に直径 10 [mm] のプーリが使用できるか確認する。Fig. 9 ならびに Fig. 11 に示した伸縮機構の改良方針として、Fig. 12 に示すような構造を考案した。モータ (maxon, EC 60 flat) ならびに磁気カップリング (MIKI PULLEY, CP3030-08-SF) は、Fig. 11 のものをそのまま使用しており、伝達トルクとしては磁気カップリングがボトルネックとなり、メーカーの仕様によれば、0.287[Nm] である。ここでは、若干の余裕をみて 0.2[Nm] とする。また、減速機にはミューラボ社製 CRGS30-100FDD (減速比 1:100) を使用する。このとき、プーリの発生トルク T_o は以下の式で与えられる。

$$T_o = \frac{rF}{1 - \eta_m} = T_i N (1 - \eta_g) \quad (1)$$

ここで、磁気カップリングの出力軸側の発生トルクを T_i 、減速機の減速比を N 、減速機の損失を η_g 、ワイヤ系の機構の損失を η_m 、プーリの半径を r 、プーリが出力可能な力を F とした。各パラメータを Table 5 に示す。これらの値を (1) 式に代入すると、

$$T_o = 0.2 \times 100 \times 0.6 = 12 \text{ [Nm]} \quad (2)$$

となる。ここで、得られた T_o を (1) 式に代入すると、 F は 2372.4 [N] であり、これは、最低要求荷重を十分に満たす。

以上の考察に基づき、プーリ径は 10 [mm] で、2本のワイヤを用いてベローズの伸縮を行うことが可能な、改良した伸縮機構 (以下、新伸縮機構) を試作した。

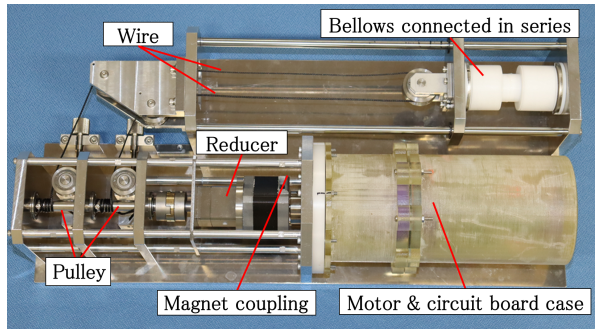


Fig. 13: Appearance of newly developed bellows telescopic mechanism

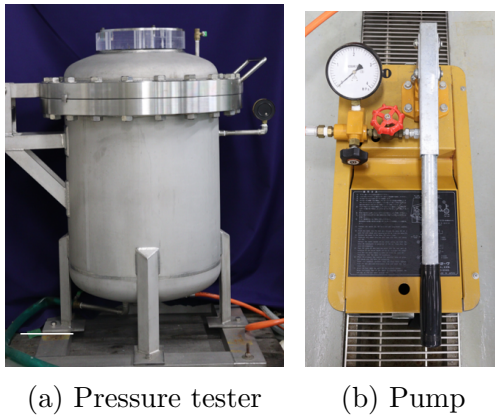


Fig. 14: Appearance of the pressure tester

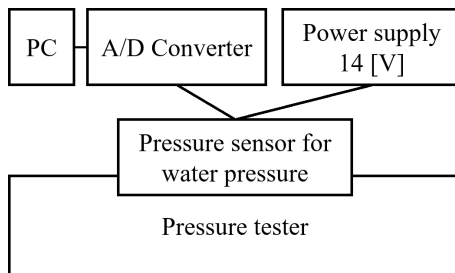


Fig. 15: Block diagram of measurement system for the pressure resistance performance test

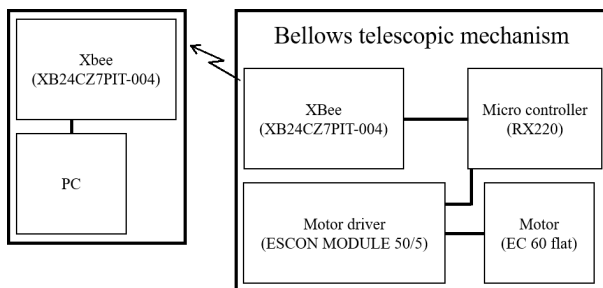


Fig. 16: Control system for bellows telescopic mechanism

5. 製作した伸縮機構の性能評価

製作した新伸縮機構の外観を Fig. 13 に示す。この新伸縮機構を用いて、ワイヤを2本使用したベローズ伸縮が有効かどうか、最低要求荷重以上の出力が可能かどうか、実験により確認する。

5.1 1 [MPa] の水圧下での伸縮実験

第4章で新たに設計したワイヤ2本による新伸縮機構を用いて、第3.1節で述べた先行研究と同じ水中での引張り試験を行い、ワイヤを2本使用することで、ワイヤが破断せずに伸縮可能であることを実験によって確認する。またこの実験により、新伸縮機構が支障なく動作することを確認する。

5.1.1 実験方法

実験方法について説明する。実験装置とそのブロック線図を Fig. 14 と Fig. 15 に示す。新伸縮機構を水圧試験機に入れ、1 [MPa] まで加圧し、水圧を保持したまま、プーリによってワイヤを巻き取り、ベローズの伸縮を行う。使用する水圧試験機（アテナ工央、水圧試験機 XL 特注）を Fig. 14(a)、加圧するためのポンプ（キョーワ、T-50N）を Fig. 14(b) に示す。また、水圧試験機内部の水圧の計測には、圧力センサ（Keller, PAA-20SX）を使用している。ベローズの伸縮は、Fig. 16 のように無線モジュール（Digi International, XBee, XB24CZ7PIT-004）を用いて PC よりモータを動作させて行う。使用したベローズは、第3.1節で述べた、先行研究の実験で使用されたベローズと同じものである。そのため、ベローズの伸縮に必要な力は、1 [MPa] の水圧下で、640.87[N] である。また、予備実験により、ベローズの破壊されない伸び量は 10 [mm] であることが確認された。よって、伸び量は 10 [mm] でベローズの伸縮を行う。なお伸び量とは、ベローズを最も縮めた状態を基準とした、ベローズの長さのことである。

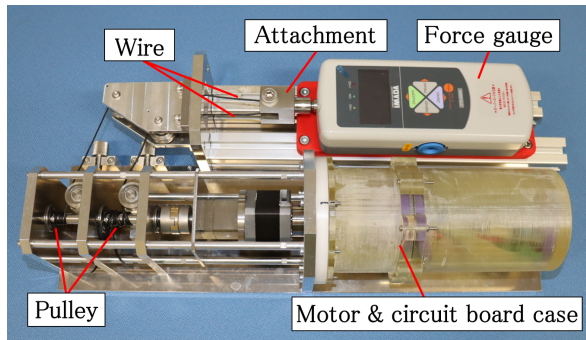


Fig. 17: Experimental equipment for pulley output

5.1.2 実験結果

直径 1.3 [mm] のワイヤを用いて実験を行った。実験の結果、少なくとも 28 回の伸縮が可能であることが確認された。実験では、29 回目の伸縮の際に PC と伸縮機構の間に通信不良が発生してベローズが壊れてしまい、また代替のベローズを用意できなかったことから、実験はここで終了した。実験終了後、機構やワイヤ等に問題はなかったため、さらに伸縮を繰り返すことが可能であると予想される。実験の結果、ワイヤに問題がなかったことから、第 3.2.2 項で述べたように、ワイヤを 2 本用いることでワイヤの破断を避けることが可能であると示された。また、新伸縮機構が支障なく動作することも確認できた。

5.2 プーリが出力する力

本節では、プーリが出力する力が最低要求荷重を満たすのかどうかを、実験によって確認する。

実験装置を Fig. 17 に示す。新伸縮機構を少し改造して、ベローズを取り付ける部分にフォースゲージ (IMADA, ZTS-5000N) を取り付け、プーリに発生する引張力を計測する。

実験の結果、およそ 1200 [N] の出力が確認され、設計上の最低要求荷重を満たすことが確認された。一方で、第 4 章より、直径 10 [mm] のプーリが出力可能な力はおおよそ 2200 [N] と見積

もられていたが、これに満たなかった。原因として、マグネットカップリングが脱調したことが挙げられる。設計上は、マグネットカップリングの伝達トルクにはまだ余裕があるはずだが、脱調した原因については現在調査中である。本研究で構想している浮力調整器には、マグネットカップリングを用いず、水中モータ (Blue Robotics, M200-MOTOR-VP) に直接減速機を取り付ける構成も検討している。

6. 結言

本論文では G-TURTLE に用いるベローズ伸縮機構の改良を行った。先行研究で開発された伸縮機構では、ワイヤが破断するという問題があった。そこでワイヤの強度について考察したところ、先行研究で開発されたワイヤを 1 本用いる伸縮機構は、強度不足であることが確認された。本論文ではこの強度不足を解決するため、2 本のワイヤを用いた伸縮機構を提案した。提案する新伸縮機構では、ワイヤの強度効率から、プーリ径を 10 [mm] とした。新伸縮機構について、出力可能な力について計算を行ったところ、最低要求荷重を満たすことを確認した。以上を踏まえ、プーリ径を 10 [mm] とし、ワイヤを 2 本用いた新伸縮機構を製作し、性能評価を行った。その結果、1 [MPa] の水圧下で、新伸縮機構は有効に機能することを確認した。

今後は水中モータを用いた小型・軽量の浮力調整器の実現を目指す。

参考文献

- 1) いであ株式会社, 平成 24 年水環境中の放射性物質調査方法等検討業務報告書
- 2) 稲見ひかりほか: 湖沼調査用水中ロボットのためのベローズを用いた浮力調整器の開発-水中における PTFE ベローズのエネルギー効率と水中滑空実験-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-C01(2024)
- 3) 中田航輔ほか: 湖沼調査用水中ロボットのためのベローズを用いた浮力調整器の開発-高水圧

- 下で運用可能な PTFE ベローズ伸縮機構の製作一，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2P1-I02(2025)
- 4) 有馬正和ほか：主翼独立制御型水中グライダー実験機の設計と開発，第 2K 号，57/60，2006K-0S3-4(2006)
 - 5) 安西香保里ほか：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—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-E05(2015)
 - 6) 中田航輔ほか：湖沼調査用水中ロボットのための PTFE ベローズを用いた浮力調整器の開発-ベローズの耐圧性能の向上と大浮力化に向けた基礎的検討-，計測自動制御学会東北支部 60 周年記念学術講演会，S60-10(2024)
 - 7) 浦環，高川真一 編著「海中ロボット総覧」，(株)成山堂書店（1994），pp156
 - 8) emma kites, 220Lb, 350Lb UHMWPE Braided Line Spool, <https://www.emmakites.com/collections/line-accessories/products/black-uhmwpe-cord-spool?srsltid=AfmBOooPC1OHLWP9LwAmI CpioGD3F9g7qDT0ayyczbXCoYpMJUB4Ijxx>, 最終アクセス 2025/10/28
 - 9) 遠藤充ほか：高強度化学繊維を用いたワイヤ駆動系の基礎的研究と六脚一腕作業移動ロボットへの適用，科学研究助成事業 研究成果報告書，2013～2015