

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

Development of a buoyancy controller using PTFE bellows for environmental surveying underwater robot

○稲見 ひかり*, 高橋 隆行*

○Hikari Inami*, 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), 水中グライダー (underwater glider)

連絡先 : 〒 960-1296 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
稲見ひかり, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: inami@rb.sss.fukushima-u.ac

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。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、正確な位置情報の把握が困難である。また、後者では、潜水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、水中



Fig. 1: The second version of underwater robot

ロボットの開発を行ってきた。現行機である水中ロボット 2 号機改良型を Fig. 1¹⁾ に示す。

現行機は、猪苗代湖での採泥実験に成功しているが、重量が約 70[kg] と重く、岸や小型船上からの投下、回収が困難である。また、調査対象の猪苗代湖は岸から中心地点まで約 5[km] あるが、現行機は水平移動距離が 800[m] と短く、船で採泥地点上まで運搬する必要がある。

現在開発中のグライダー型水中ロボット G-

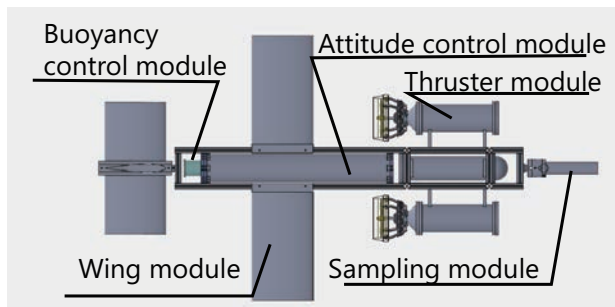


Fig. 2: The concept of G-TURTLE

TURTLE (Glider-type underwater robot for lake environmental survey) は、湖岸まで成人男性 2 人での運搬が可能となるよう、目標重量 30[kg] としている。G-TURTLE の構想図を Fig. 2 に示す。G-TURTLE は水平方向移動に水中グライダー方式²⁾を採用することを予定している。水中グライダー方式とは、潜水・浮上をくり返し、翼で発生する揚力で推進力を得て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のみエネルギー消費が発生するため、プロペラ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。

この水中グライダーを実現するために、浮力調整器と翼が重要な要素となっている。本研究では特に浅深度の浮力調整に適したベローズを用いた浮力調整器に着目し、その耐圧性能について検討する。

2. G-TURTLE の構想

G-TURTLE の移動時の模式図を Fig. 3 に示す。

Fig. 3(a) にあるように、浮力調整器によりロボットの浮力を調整することで、潜水・浮上を行い、翼を用いて水平方向の推進力を得ることができる。垂直方向移動、採泥時は Fig. 3(b) のように、浮力を小さくした状態で、スラストにより推進力を得て移動を行う。G-TURTLE を湖の岸から投入し、グライダー方式の移動により採泥地点上まで移動を行う。そして、スラスト

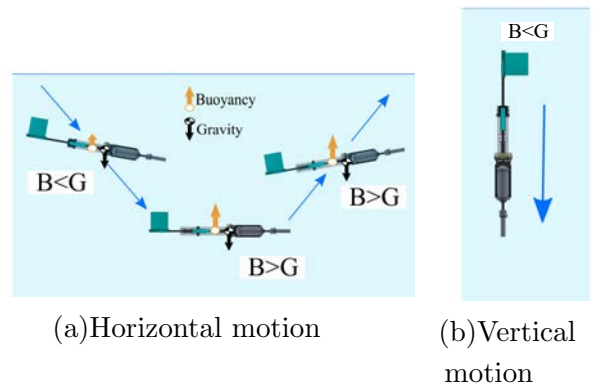


Fig. 3: The motion of G-TURTLE

タを用いて垂直方向移動・採泥を行い、再度、グライダー方式の移動により湖岸まで戻ってくるという運用を考えている。

3. 提案する浮力調整器

本研究で調査対象としている猪苗代湖は、国立公園に指定されており、環境保護の対象となっている。そのため、水中ロボットに搭載する浮力調整器は、できるだけ環境への影響を小さくすることが望まれる。また、水中ロボット全体の軽量化のため、小型・軽量であることが望ましい。さらに、水圧によって浮力が変化しない特性も必要である。そこで、本研究では PTFE (フッ素樹脂: Poly Tetra Fluoro Ethylene) ベローズを用いた浮力調整器を提案する。

Fig. 4 に提案する浮力調整器の構想図を示す。ブラダ部分に PTFE ベローズを用いており、摺動軸を動かすことでベローズが伸縮する。例えば、ブラダ部に風船を用いるとすると、ロボットの水深が深くなるにつれて、水圧により風船の体積が小さくなり、浮力も小さくなっていく。浮力を一定に保つためには風船の体積を一定に保たなければならず、常に制御が必要となる。それに対して提案する浮力調整器では、ベローズの軸方向の変形は摺動軸によって防止することができ、直径方向の変形はベローズの形状により防止できる。そのため、浮力を調整するとき

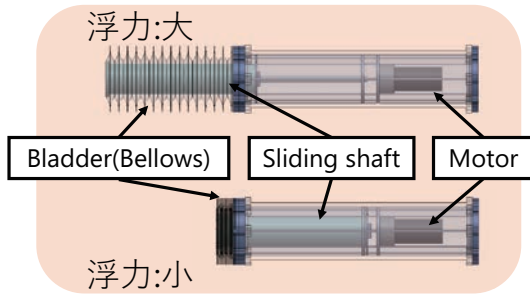


Fig. 4: The concept of buoyancy controller using PTFE bellows

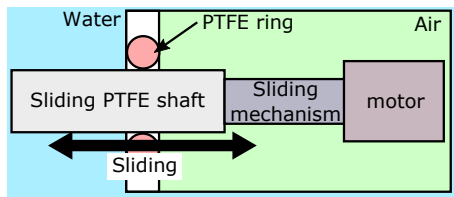


Fig. 5: The concept of the buoyancy controller using sliding PTFE shaft³⁾

のみ浮力調整器の体積を変化させる制御を行えばよいから、制御が容易であると言える。PTFEは、耐熱性、耐薬品性、撥水性を持つ非粘着の特性がある樹脂で、他の樹脂にはないすべり特性を併せ持ち、高い耐候性があるという機能的な材料である。このような特性から、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考えられる。ただし、精密な加工が難しいという短所もあり、機械加工には高度な技術が必要である。

4. 従来の浮力調整器

従来の浮力調整器として、PTFE 摺動軸を用いた固体浮力調整器³⁾と油圧式浮力調整器⁴⁾について述べる。

4.1 PTFE 摺動軸を用いた固体浮力調整器

PTFE 摺動軸を用いた固体浮力調整器の構想図を Fig. 5 に示す。

これは摺動軸とシールリングに PTFE を用いる構造となっている。ロボットを浮上させる場

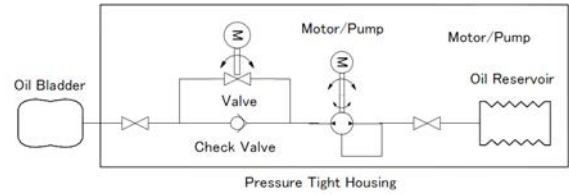


Fig. 6: The concept of buoyancy controller using oil⁴⁾

合には摺動軸を伸長し、体積を増大させる。潜水させる場合には、摺動軸を収納し、体積を小さくさせる。PTFE の超撥水・低摩擦性を利用することで、摺動部の摩擦抵抗を大きく低減できる。また、シールリングは水圧 1.0[MPa] においてシール可能であることが確認され、エネルギー効率が水深 100[m] 時に 93.6%⁵⁾ と非常に高効率であることが確認された。

この浮力調整器の摺動抵抗は水圧、およびシールリングと摺動軸の間に発生する摩擦力によって決定されるが、深い水深では水圧が大きいため、摺動抵抗に対する摩擦力の割合は小さくなる。しかし、浅い水深の場合、水圧が小さいため、摺動抵抗における摩擦力の割合が大きくなり、エネルギー効率が低くなってしまふ。摩擦力を小さくするために、シールリングのはめあいを緩くすることが考えられるが、はめあいを緩くするとシール性能が失われてしまふという課題がある。

4.2 油圧式浮力調整器

油圧式浮力調整器⁴⁾について述べる。Fig. 6 に油圧式浮力調整器の概要図を示す。

ハウジング内にあるオイルタンクからポンプなどでオイルをブラダまで送り、ブラダが膨らむことで浮力を得るという構造になっている。また、水圧を利用することで、ブラダのオイルをオイルタンクに戻し、ブラダがしぼむことにより浮力を失う。

本研究の水中ロボットは調査対象を国立公園の猪苗代湖としているため、油漏れなどの環境

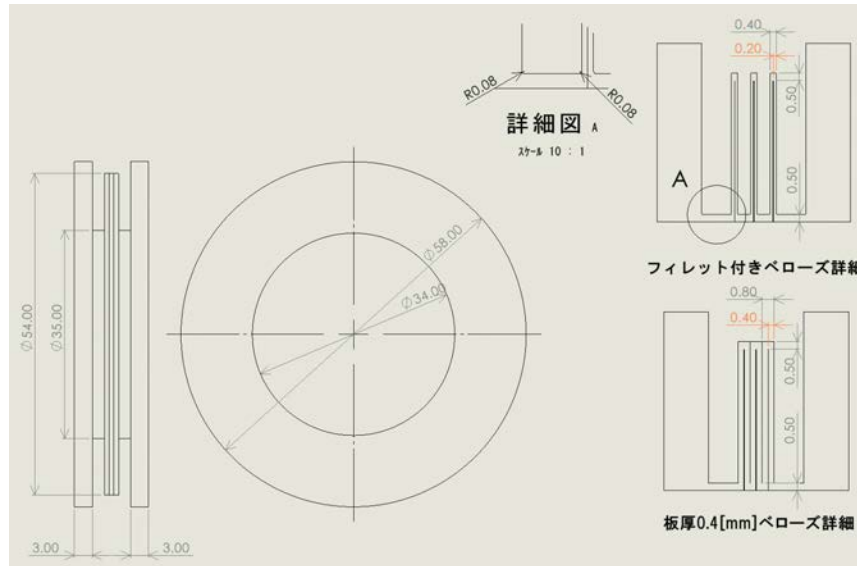


Fig. 7: Mechanical drawing of PTFE bellows



Fig. 8: 1[MPa] pressure tester

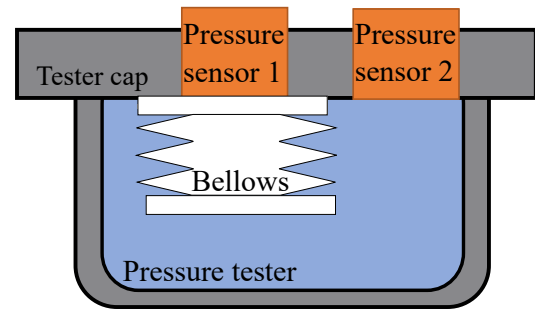


Fig. 9: Schematic diagram of experimental apparatus

汚染のリスクを考えると油圧式浮力調整器を使うことはできない。

5. ベローズの耐圧試験

PTFEベローズを用いた浮力調整器をG-TURTLEに搭載するにあたり、ベローズがグライダー方式の移動においてどの程度の水深まで浮力調整器として機能するか確認する必要がある。また、猪苗代湖は水深が約100[m]あり、本研究の水中ロボットは、垂直移動・採泥時はスラストで推進することを想定している。ここではベローズは浮力調整器としては使用していないが、水深100[m]の耐圧性能を有している必要がある。これらの性能を確認するため、2種類の耐圧試験を行う。

5.1 グライダー方式移動時の耐圧性能

まず、グライダー方式の移動時にどの程度の水圧までベローズが浮力調整器として機能するか確認する。使用するベローズの設計図をFig. 7に示す。ベローズは有限会社飯田製作所に加工していただいた。使用するベローズは板厚 $t = 0.2, 0.3, 0.4$ [mm]のものとして $t = 0.2$ [mm]でベローズの根元にフィレット $R = 0.08$ [mm]がついているものの全4種類である。これらをFig. 8に示した1[MPa]水圧試験機（有限会社アテナ工業、水圧試験機SS）に取り付け、ベローズが破壊されるまで加圧していく。

水圧試験機の水圧とベローズ内の圧力を比較するため、Fig. 9の実験装置模式図のように圧力センサ（keller社、PAA-20SX）を2つ取り付

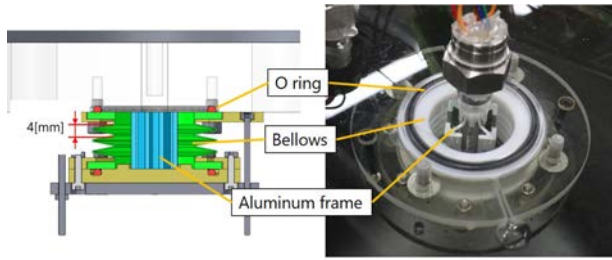


Fig. 10: Attachment of bellows

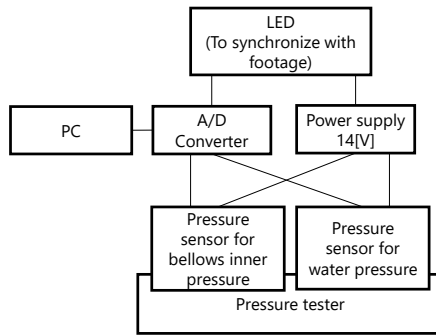


Fig. 11: Block diagram of the experimental setup

けた。また、ベローズは試験機蓋に直接取り付けられた。CADの断面図と実際に取り付けられた様子を Fig. 10 に示す。アルミフレームをベローズ内に入れることで実際の使用時の摺動軸を模擬する。また、アルミフレームの長さはベローズの1山が4[mm]開いた状態になるようにした。

実験装置のブロック図を Fig. 11 に示す。2つの圧力センサの出力と実験動画同期用のLEDの電圧をADコンバータ (CONTEC, AIO-160802GY-USB) で計測した。

耐圧試験の結果を横軸に水圧、縦軸にベローズ内圧として Fig. 12 に示す。ベローズの板厚 $t = 0.2, 0.3, 0.4$ [mm], フィレットがついているものはそれぞれ緑色, 青色, 赤色, 紫色で示している。灰色の破線で表しているのはベローズの内圧が急激に大きくなる直前の水圧である。この、破線で表した水圧においてベローズが破壊されたとみなし、各ベローズを利用できる最大水圧値とする。各ベローズの最大水圧値を Table 1 に示す。本水中ロボットでは耐圧設計の安全率を1.5としているため、実際にベローズを利用できる水圧、水深は Table 1 の通りである。Table 1 から今回使用したベローズでは最大で水深約

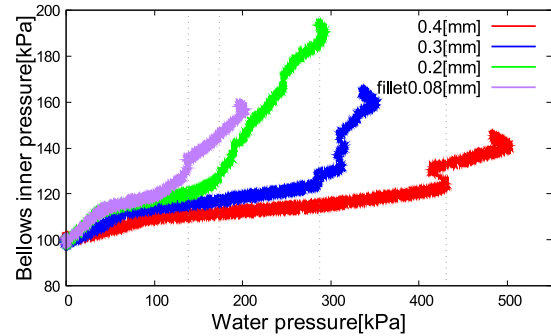


Fig. 12: Experimental results of pressure test 1

Table 1: Withstand pressure of the bellows

Types of bellows [mm]	Maximum water pressure [kPa]	safety factor 1.5	
		Water pressure [kPa]	Water depth [m]
t=0.2	174	116	11.6
t=0.3	287	191.3	19.1
t=0.4	431	287.3	28.7
R=0.08	138	92	9.2

30[m] で利用できることがわかった。また、板厚を大きくすることで耐圧性能が向上することが確認できた。

5.2 垂直方向移動・採泥時の耐圧性能

垂直方向移動・採泥時のベローズを縮めた状態で、水圧1.5[MPa]の耐圧性能を有しているか確認を行う。水圧1.5[MPa]とは水中ロボットの耐圧設計の安全率を1.5とし、調査対象を最大

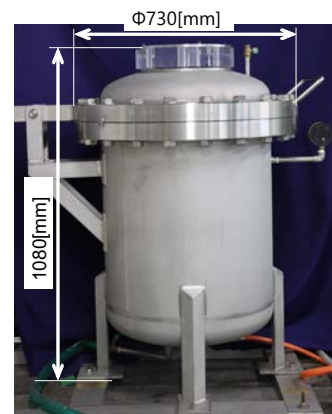


Fig. 13: 2[MPa] pressure tester

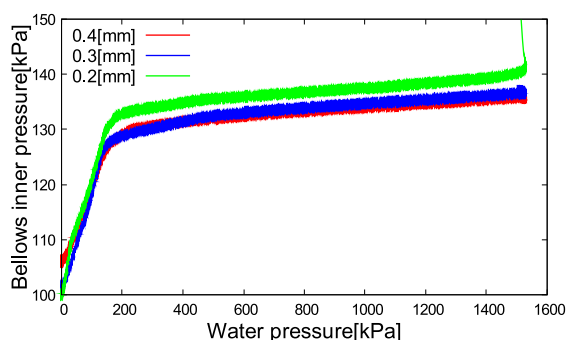


Fig. 14: Experimental results of pressure test 2

水深 100[m] の猪苗代湖と仮定したときの最大水圧値である。使用するベローズは耐圧試験時と同様であるが、フィレットが付いたベローズは前節の実験で耐圧性能が低いことがわかったので本実験では除いた。ベローズの取り付け方法は耐圧試験時と同様だが、ベローズを設計値まで縮めた状態になるようにアルミフレームを設計した。また、実験装置のブロック図は前節の実験と同様である。ただし、水圧 1.5[MPa] まで加圧するため Fig. 13 に示す 2[MPa] 水圧試験機（有限会社アテナ工央、水圧試験機 XL 特注）を用いた。

耐圧試験の結果を横軸を水圧、縦軸をベローズ内圧として Fig. 14 に示す。ベローズの板厚 $t = 0.2, 0.3, 0.4$ [mm] の結果をそれぞれ緑色、青色、赤色で示している。水圧 1.5[MPa] 付近を見ると板厚 $t = 0.2$ [mm] のベローズ内圧が急激に上昇しており、ベローズが破壊されたことがわかる。また、板厚 $t = 0.3, 0.4$ [mm] のベローズは水圧 1.5[MPa] の耐圧性能があることを確認できた。

6. 結言

本論文では、グライダー型水中ロボット G-TURTLE のための PTFE ベローズを用いた浮力調整器を提案した。そして、PTFE ベローズをグライダー方式で利用する場合の耐圧性能を確認するために耐圧試験を行った。試験結果から、最も強いものでは、水深約 30[m] まで浮力

調整器として利用できることを確認した。また、PTFE ベローズを垂直移動・採泥時に利用する場合の耐圧性能を確認するため、ベローズを閉じた状態で耐圧試験を行い、板厚を適切に選ぶことで 1.5[MPa] の圧力に耐えられることを確認した。今後は、伸ばした状態で更に耐圧性能が高いベローズを開発するとともに、ロボットが水中を滑空するために、ベローズの伸縮を制御するシステムを構築する。

参考文献

- 1) 菅野怜ほか: 湖沼調査用グライダー型水中ロボットの開発-グライダー翼抑制の計測及び動作シミュレーション-, 計測自動制御学会東北支部 第 306 回研究集会, 306-3 (2016)
- 2) 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-OS3-4 (2006)
- 3) 船越一希, 情野瑛, 高橋隆行: 水中ロボットのための PTFE を用いた超小型浮力調整器の検討-ベローズを用いた浮力調整器の提案-, 計測自動制御学会 SICE-SI, 2B1-08 (2020)
- 4) 浅川賢一, 渡健介, 大内英俊: 小型アキシアルピストンポンプを用いた水中グライダー用浮力エンジンの開発, 日本船舶海洋工学会後援会論文集, 第 17 号, 397/400 (2013)
- 5) 船越一希ほか: 水中ロボットのための PTFE を用いた超小型浮力調整器の検討, 計測自動制御学会 SICE-SI, 1D5-06 (2019)