

湖沼調査用グライダー型水中ロボット のためのロール姿勢制御機構の開発 —開発のための予備実験と小型模型機の基本設計—

Development of Roll Attitude Control Mechanism for Glider-type Underwater Robot for Lake Survey -Preliminary Experiments for the Development and Basic Design of the Model Underwater Glider-

○伊東 智哉*, 稲見 ひかり*, 高橋 隆行*

○ Tomoya Ito*, Hikari Inami*, Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： 水中ロボット (underwater robot), 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
伊東智哉, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: ito@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

福島県には、猪苗代湖や桧原湖をはじめ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、湖沼の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などが存在する¹⁾。前者の方法では水上の船や採泥器が風や水流によって流されてしまう場合があり、正確な採泥位置の把握が困難である。また後者では、人体への負担が大

きいため、深い水深での採泥が困難である。そこで本研究室では湖沼調査用グライダー型水中ロボット, G-TURTLE (Glider-Type Underwater RoboT for Lake Environmental survey) の開発を進めている。G-TURTLE の構想図を Fig. 1 に示す。

G-TURTLE は水平移動に水中グライダー方式²⁾、垂直移動・採泥にスラスト方式を採用す

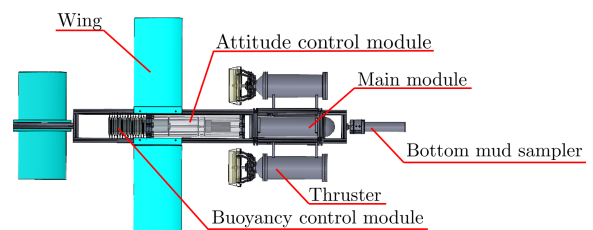


Fig. 1: The concept of G-TURTLE

る．G-TURTLE の運用方法の詳細については次章で述べる．先行研究において，G-TURTLE の水平移動時の水中グライダー方式による推進方法³⁾については検討されている．しかし，水平移動時の旋回方法については未検討であった．

そこで本論文では，G-TURTLE を旋回移動させるためのロール姿勢制御機構を提案し，開発のための予備実験と基本設計について述べる．

2. G-TURTLE

2.1 G-TURTLE の構想

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．採泥対象である猪苗代湖は湖岸から中心地点まで約 5[km]，最大水深は約 100[m] であり，湖岸から採泥地点上までの水平移動距離は，垂直移動距離に比べ長距離である．また，ロボットの小型・軽量化のためにロボットに搭載するバッテリーはできるだけ小さくすることが望ましい．このことから，長距離の移動である水平移動には水中グライダー方式を採用する．水中グライダー方式については次節で詳しく述べる．水平移動に対して，採泥管の抜去・貫入には大きな力が必要であるため，垂直移動・採泥にはスラスト方式を採用する．

G-TURTLE の運用方法は，湖岸から機体を投下し，水中グライダー方式を用いた移動により採泥地点上まで移動を行い，スラスト方式によって垂直移動・採泥を行うことを考えている．湖岸まで戻る際には再度水中グライダー方式により移動する．

2.2 G-TURTLE の移動方式

G-TURTLE の水平移動に利用する水中グライダー方式とは，浮力調整器により浮力を調整することで潜水・浮上を繰り返し，翼回りに揚力を発生させることで推進力を得る移動方式で

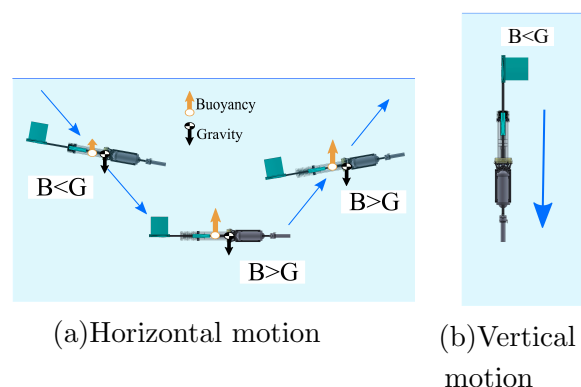


Fig. 2: The motion of G-TURTLE

ある．G-TURTLE では浅深度で浮力調整を行い，水中グライダー方式を利用することを想定している．一方，垂直移動・採泥に利用するスラスト方式は，スクリューによって推進力を得る移動方式である．

G-TURTLE の移動時の模式図を Fig. 2 に示す．Fig.2(a) に示す水中グライダー方式の移動では，浮力調整時のみエネルギーを必要とする．一方，Fig.2(b) に示すスラスト方式の移動では常にスラストを稼働し続けるため，常にエネルギー消費が発生する．よって，同じバッテリー容量では水中グライダー方式を用いることで，より長距離の移動が可能になると考えられる．

3. ロール姿勢制御機構の構想

グライダーが旋回をするためには機体をロール軸まわりに回転させる必要がある．そうすることで，Fig. 3 に示すように翼が発生させる揚力の水平成分が向心力となり，機体は旋回することができる．

グライダーにおけるロール姿勢制御の手法として，左右の主翼を独立に稼働させる方式⁴⁾がある．左右の主翼をピッチ軸まわりに独立に回転させ，左右の主翼の取り付け角に差をつける．その結果，左右の主翼で揚力差が発生し，機体をロールさせるという方法である．しかし，水中ロボットにこの方法を搭載する場合，可動部

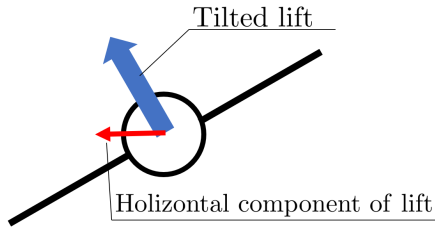


Fig. 3: Horizontal component of lift

の水密に高い加工技術が必要となる．また，設計が複雑化すると考えられる．

そこで筆者らは，機体の重心位置の変動により機体をロールさせる方法⁵⁾をとることとした．この方式の利点は二つある．一つ目は，機構が機体内部で完結するため，ロール姿勢制御機構のための水密加工を必要としない点である．二つ目は，錘を移動させる機構のみを搭載すればよいから，複雑な設計を必要としないという点である．

機体正面から見たロール姿勢制御機構の構想図を Fig. 4 に示す．機体内部に設置した錘を移動させて機体全体の重心位置を移動させることで，重心と浮心が鉛直方向に重なるような傾きに機体がロールする．錘の移動にはサーボモータを用い，機体中心が回転中心となるように錘を移動させる．

4. ロール姿勢制御機構の開発のための予備実験

ロール姿勢制御機構の開発のために，小型模型機の胴体側面にロール角制御用の錘を取り付けて，ロール角の変化を測定する．実験方法の詳細は 4.4.1 項で詳しく述べる．また，浮力を大きくした場合の水中でのロール角の変化の確認，および横方向の重心位置の移動による機体のロールに伴う旋回運動の実現可否を確認する予備実験を行う．予備実験では先行研究³⁾において製作された小型模型機を使用する．

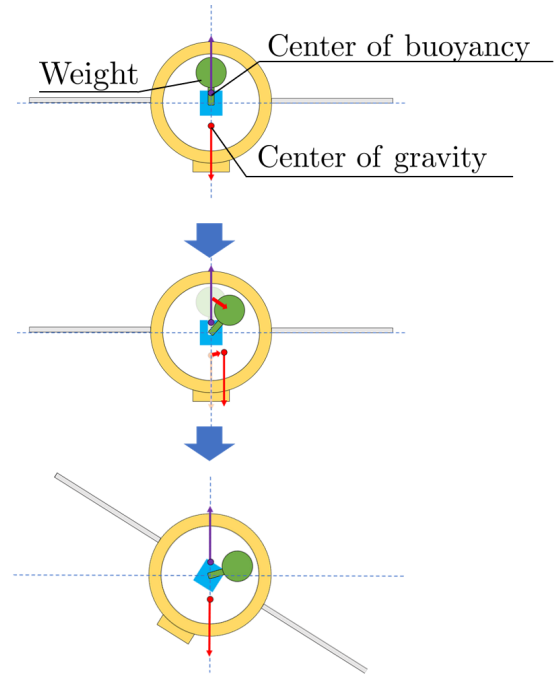


Fig. 4: Concept of roll attitude control mechanism

また，重心移動によるロール角の理論値計算のために小型模型機の重心位置を知る必要があるため，はかりを用いた小型模型機の重心位置測定も併せて行う．

4.1 実験に使用する小型模型機について

小型模型機の外観図を Fig. 5 に，構成部品の画像を Fig. 6 に示す．小型模型機の全長や質量などの仕様の詳細は Table 1 に示す．

小型模型機は胴体，キャップ，矩形平板翼，垂直尾翼，電子基板，ピッチ方向重心移動装置，バラスト，およびバラストの搭載と切り離しに用いる電磁石で構成されている．

電子基板にはマイクロコンピュータ (Renesas, RX220)，傾斜センサ (村田製作所, SCL3300-D01)，および無線装置 (Digi International, XBee) が搭載されている．

小型模型機には浮力調整器が搭載されていないため，バラストにより潜水と浮上の切り替えを行う．以下，重量から浮力を引いたものを水

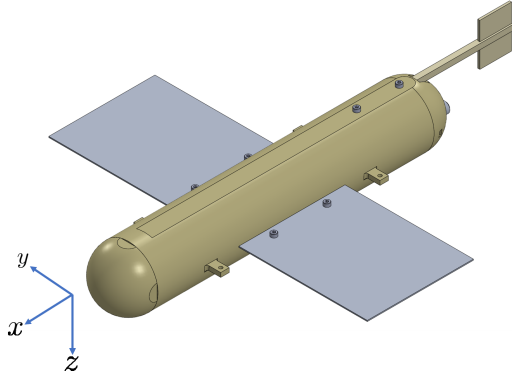


Fig. 5: Schematic of the model underwater glider

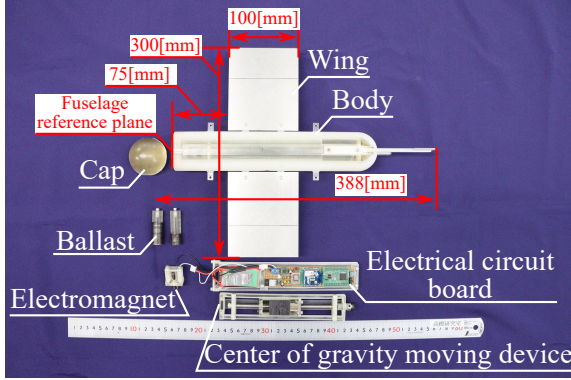


Fig. 6: Structure of the model underwater glider

中重量とよぶ．小型模型機はバラスト非搭載時に浮上するように，水中重量は $-0.1[\text{N}]$ に調整している．バラストを取り付けることで，小型模型機の水中重量は $0.3[\text{N}]$ になり，潜水する．

さらに，重心移動装置により小型模型機の前後方向の重心位置の移動が可能である．Fig. 7 に示す小型模型機後部の軸の回転に伴い，内部の錘が小型模型機の前後方向に移動することでピッチ角を変化させることができる．軸を時計回りに回転させると，錘は小型模型機の後方へ向かって移動する．

4.2 小型模型機の z 軸方向重心位置測定

ロール角の理論値計算のために小型模型機の重心位置を求める．

ロール角制御用の錘非搭載時の小型模型機の重心位置は，はかりに加わる分力を用いて導出する．実験装置を Fig. 8 に示す． z 軸方向の重心位置測定時は小型模型機のキャップを外した

Table 1: Specifications of the model underwater glider

Item	Value	Unit
Length	388	mm
Wing span	300	mm
Chord length	100	mm
Fuselage width	56	mm
Mass	736	g
Buoyancy	7.32	N
Ballast mass	49.38	g

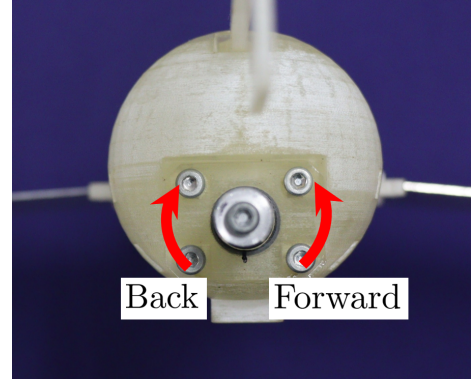


Fig. 7: Movement of the center of gravity in x direction

状態で機体を垂直に倒立させて行う．

アルミ製治具は，はかり (sartorius, TE3102S) と真鍮製の台にまたがるように設置する．治具の上面が水平になるように，はかりの高さを調整する．また，アルミ製治具のがたつきを抑えるため，Fig. 9 に示すように治具の下部は曲面になっており，はかりと台に線接触するようになっている．加えて，アルミ製の治具にはアクリル板が取り付けられており，アクリル板に小型模型機の胴体を接触させることで設置位置の再現性を得ている．

ここで，アルミ製治具の支持点間距離を $l[\text{mm}]$ ，小型模型機の質量を $M[\text{g}]$ ，小型模型機を載せたことによるはかりの測定値を $m[\text{g}]$ としたとき，アルミ製治具と台の接触点である O 点から小型模型機の重心位置までの距離 $c[\text{mm}]$ は

$$c = \frac{lm}{M} \quad (1)$$

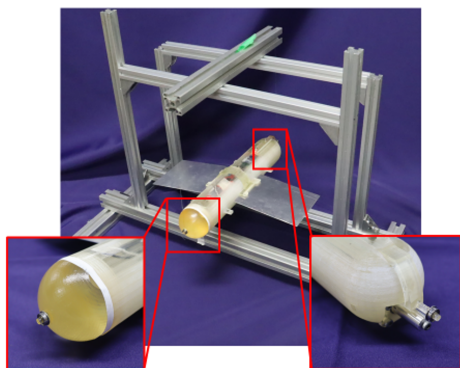


Fig. 11: Experimental device for measuring roll angle in the air

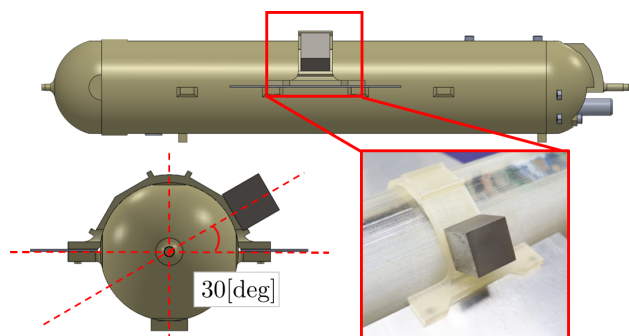


Fig. 12: Jig for mounting weight

小型模型機に搭載する錘はSS400製の立方体型のものを5種類用いる。5種類の錘の質量は7.86, 17.31, 24.06, 32.14, 39.14[g]である。錘は小型模型機胴体側面に配置する。胴体は曲面形状となっているため、Fig. 12に示すような、平面を有する治具を用いて錘を配置する。

ロール角の測定は錘を搭載した小型模型機を実験装置に設置後、小型模型機を空中で完全に静止させた状態で行う。ロール角は模型機内部の電子基板に搭載された傾斜センサを用いて、サンプリング周期 25[ms] で 30[sec] 間測定し、その平均値を実測値とする。

4.4.2 実験結果

バラスト搭載時と非搭載時について、空中でのロール角測定結果を、Fig. 13 と Fig. 14 に示す。グラフの縦軸はロール角 [deg]、横軸は錘の質量 [g] を示している。グラフより、搭載する錘の重量を増やすにつれ、理論値と実測値がかい

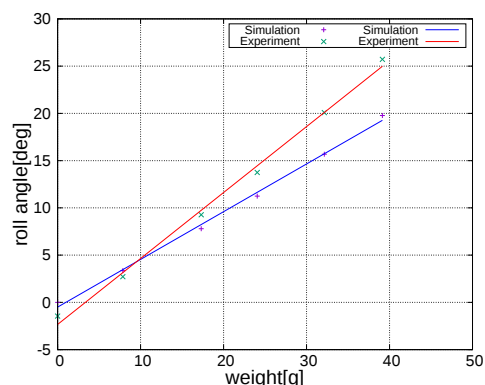


Fig. 13: Experimental results of measuring roll angle in the air (ballast-mounted)

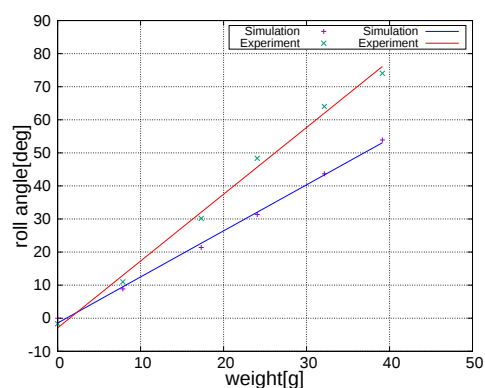


Fig. 14: Experimental results of measuring roll angle in the air (ballast-unmounted)

離する結果が読み取れる。

このような結果が生じた原因として、小型模型機の重心位置測定の際の測定誤差が考えられるため、錘非搭載時の小型模型機の z 軸方向の重心位置を変化させ、理論値の再計算を行う。

4.4.3 小型模型機の重心位置補正

錘非搭載時の小型模型機の重心位置を補正した場合の理論値と実測値の比較を Fig. 15 に示す。バラスト非搭載時の理論値に関して、小型模型機の重心位置を鉛直上向きに 0.8[mm] の補正をかけることで理論値と実測値がおおよそ一致する結果となった。この結果から、0.8[mm] 程度の重心位置の差がロール角に大きく影響を

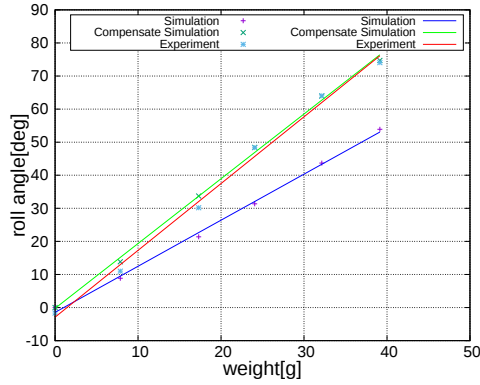


Fig. 15: Experimental results of measuring roll angle in the air (after compensate)

及ぼすということがいえる．

バラスト搭載時に関しては，バラストの取り付け誤差の影響が生じている可能性が考えられるため，今回は議論の対象外とする．

4.5 浮力を付加した場合のロール角測定

G-TURTLE では機体前方と後方に浮力調整器を搭載することを想定している．そのため，小型模型機に浮力調整器を用いて増加できる最大の浮力に相当する浮力を付加した場合の水中のロール角の測定を行う．

4.5.1 実験方法

実験装置を Fig. 16 に示す．小型模型機上部の前方と後方に発砲ポリスチレンを取り付け，疑似的に浮力を増加させる．発砲ポリスチレンは，1 辺が約 27[mm] の立方体とする．これによって全体で 0.4[N] 浮力が増加する．胴体側面には前章の実験でも用いた 39.14[g] の錘を搭載する．

ロール角の測定は，小型模型機を水中に完全に静止させた状態で行う．前節と同様に，模型機内部の傾斜センサを用いて 30[sec] 間ロール角の測定を行い，その平均値を実測値とする．

Fig. 17 に示すように，小型模型機上方に浮力体を搭載すると，小型模型機の浮心位置 B_m は，

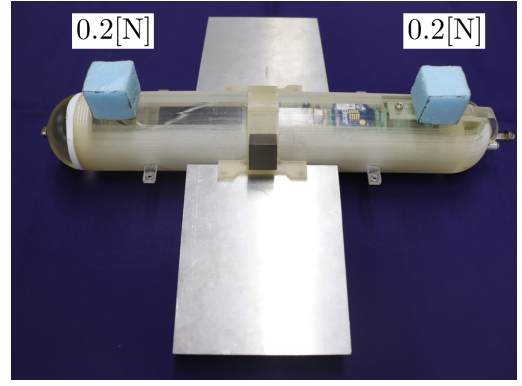


Fig. 16: Model underwater glider with buoyancy

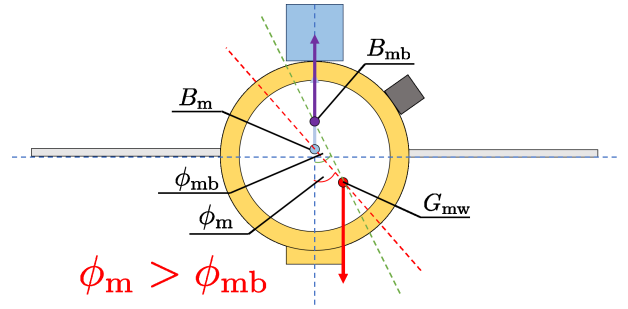


Fig. 17: Model underwater glider with buoyancy

Table 2: Difference in roll angle with and without buoyancy

Ballast	Buoyancy	
	mounted	unmounted
mounted	15.16 [deg]	23.44 [deg]
unmounted	23.60 [deg]	50.89 [deg]

小型模型機上方へ移動し， B_{mb} となる．前章における機体のロールの考え方に基づくと，浮力を搭載することで浮力非搭載時よりもロール角は小さくなる．

4.5.2 実験結果

浮力搭載・非搭載時における水中でのロール角の実測値を Table 2 に示す．

浮力を搭載したことにより，ロール角が小さくなる結果が得られた．

Table 3 に浮力付加時の小型模型機のロール角の理論値と実測値の結果を示す．両者の差はバラスト搭載時で 3.64[deg]，非搭載時で 1.91[deg] となっている．バラスト搭載時の差が非搭載時

Table 3: Simulation and experimental results of roll angle when buoyancy is applied

Ballast	Simulation	Experiment
mounted	11.52 [deg]	15.16 [deg]
unmounted	21.69 [deg]	23.60 [deg]

に比べ大きい値となっている．これについてはバラストの取り付け誤差の影響が考えられる．バラストは人の手で設置しているため，バラストの中心軸が電磁石の中心軸と一致せず，誤差が発生したと考えられる．

理論値と実測値の差は十分に小さいと考えられるため，今後新たに模型機的设计を行う際には，以上の実験から得られたロール角の理論値の考え方を適用できる．

4.6 簡易滑空実験

先行研究⁵⁾においては機体前後方向と横方向の重心位置を変化させることにより，機体の前後および左右方向の姿勢を制御していた．しかし，G-TURTLE では前後方向の姿勢制御は重心位置の制御ではなく浮力調整器を用いた浮心位置の制御により行うことを想定している．そのため，機体前後方向の浮心移動と左右方向の重心移動のみで機体の旋回運動が実現可能であるかを確認するための簡易的な滑空実験を行う．

機体をロールさせるために，前節の実験と同様に小型模型機の胴体側面にロール制御用の錘を搭載する．また，小型模型機が潜水するような重量となるように小型模型機内部にも錘を搭載している．実験は本学のプールで行い，水中で小型模型機を滑空させ，その様子を動画で記録する．

小型模型機の浮心位置の移動は前節の実験で使用した浮力体を搭載することで行う．浮力体の搭載により前後方向の姿勢を変化させるため，小型模型機前後方向の重心位置は浮力体を搭載していない時の浮心位置とおおよそ一致するようにしている．これにより，浮力体を搭載して

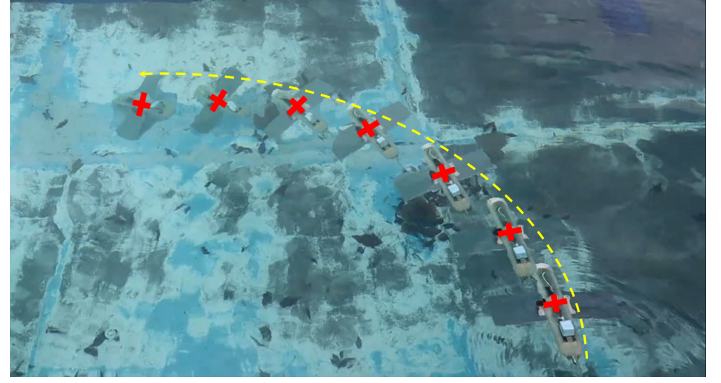


Fig. 18: Glide experiment

いないときに小型模型機はほぼ水平を保ったまま鉛直方向に沈下する．ただし，今回は旋回動作の実現可否のみを確認するため，詳細な浮心位置および重心位置の測定は行っていない．浮力体は小型模型機の中心より後方に搭載することで，後方の浮力が大きくなり，機首が下がった状態になる．滑空は，できるだけ水平になるように人の手で小型模型機を水面に配置した状態から，静かに手を放すことで開始する．

実験の結果，Fig. 18 に示すような旋回に近い動作を確認することができた．同条件で小型模型機を3回滑空させ，挙動に再現性が見られたため，前後方向の浮心移動と左右方向の重心移動による旋回運動は実現可能であると考えられる．

5. 新型小型模型機的设计

予備実験の結果から，左右方向の重心移動による旋回運動が実現可能であると考えられるため，ロール姿勢制御機構を搭載した新型小型模型機的设计を行う．設計は，稲見ら⁶⁾が製作した浮力調整器を搭載した小型模型機を基本とし，ロール姿勢制御機構を追加する形で行う．

また，3DCAD 上で浮心および重心位置を求め，新型小型模型機のロール角の理論値計算を行う．今回は目標ロール角を $45[\text{deg}]$ 以上と設定した．

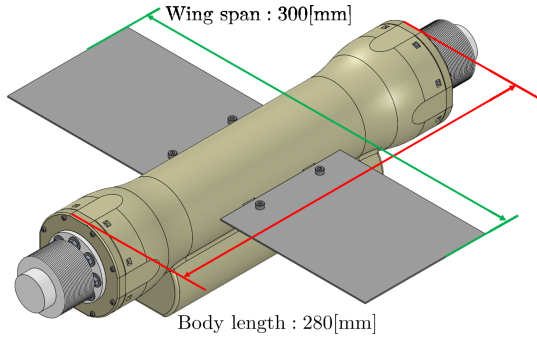


Fig. 19: Schematic of the new model underwater glider

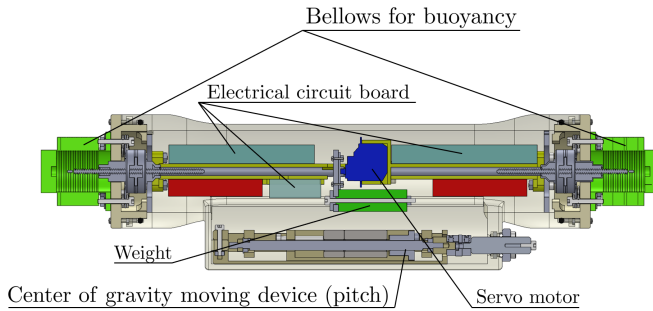


Fig. 20: Cross section of the new model underwater glider

5.1 新型小型模型機の構成

設計した新型小型模型機の外観図を Fig. 19 に示す．予備実験で用いた小型模型機と同様に矩形平板翼を搭載し，加えて機体の前後に浮力体を持つような浮力調整器を配置した構成となっている．

新型小型模型機の断面図を Fig. 20 に示す．内部の電子基板，およびロール姿勢制御機構はユニットにすることで整備性を向上させている．

錘の移動は 3 章でも述べたようにサーボモータを用いる．使用するサーボモータは Futaba 社製 S3114 である．サーボモータの仕様の詳細は Table 4 に示す．サーボモータの回転軸は胴体の円筒中心軸となるように設計した．

また，機体の安定性を高めるため，重心位置は浮心位置より下側にあることが望ましい．よって，錘は胴体下側で移動させる．

Table 4: Specifications of servo motor

Item	Value	Unit
Operating speed	0.10	sec/60[deg]
Output torque	1.5	kg · cm
Dimensions	21.8 × 11.0 × 19.8	mm
Weight	7.8	g

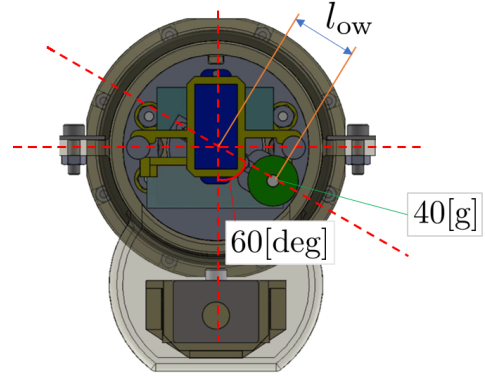


Fig. 21: Maximum roll angle of new model underwater glider

加えて，錘はできるだけ省スペースで可動させるため鉄鋼材料より比重が大きい真鍮製の錘を搭載する．また，できるだけシンプルに重心位置を求めるために錘の形は円柱形とする．

5.2 新型小型模型機のロール角理論値

前章のロール角の理論値の導出と同様に，新型小型模型機のロール角の理論値を導出する．導出に使用する浮心および重心位置は 3DCAD 上で求めたものを用いる．

新型模型機の胴体内径は 48[mm] となっていることや，錘のサーボモータへの干渉を考慮し，回転中心から錘の重心位置までの距離 l_{ow} は 15 ~ 20[mm] の範囲で考える．また，構成部品への干渉を考慮し，錘の可動範囲は Fig. 21 に示すように胴体中心を通る鉛直線に対して $\pm 60[\text{deg}]$ を最大移動角とする．移動する錘の質量は，予備実験で用いた錘の質量に合わせ，40[g] として設計を行う．

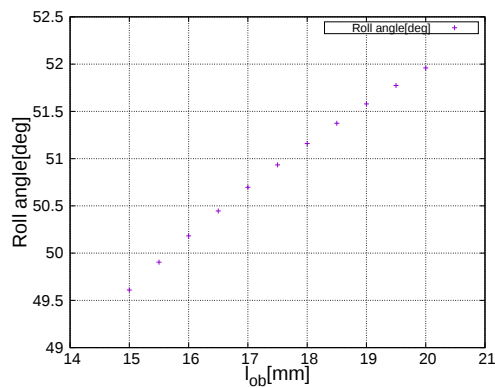


Fig. 22: Roll angle of new model underwater glider (simulation)

l_{ow} を $0.5[\text{mm}]$ ずつ変更した場合の新型小型模型機のロール角の理論値の計算結果を Fig. 22 に示す．結果より， $40[\text{g}]$ の錘を $60[\text{deg}]$ 移動させた場合，新型小型模型機のロール角は $50[\text{deg}]$ 程度となる．今回は錘の直径や構成部品への干渉を考慮し， $l_{ow}=17[\text{mm}]$ として設計を行っている．このときのロール角の理論値は $50.70[\text{deg}]$ となる．よって，今回のロール角の目標は十分に満たしているといえる．

6. 結言

本稿では，重心移動によるロール姿勢制御機構の提案を行い，開発のための予備実験と基本設計について述べた．

予備実験においては重心移動によるロール角を空中と水中それぞれについて確認した．また，簡易滑空実験においては重心移動による旋回運動が可能であることを確認した．さらに，予備実験の結果をもとに新型小型模型機の基本設計を行った．

今後は設計した新型小型模型機の製作を行い，水中での滑空実験を行う予定である．

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) 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)
- 3) 西出航陽ほか：湖沼調査用グライダー型水中ロボットの開発—小型模型機特性計測に基づく運動の推定と水中滑空実験の結果の比較検討—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-B02 (2022)
- 4) 小畠かな子ほか：主翼独立制御型水中グライダーの制御システム開発，日本船舶海洋工学会論文集，33 巻，191/197 (2021)
- 5) 中村昌彦ほか：シャトル型水中グライダーの旋回性能に関する考察，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 26 号，331/336 (2018)
- 6) 稲見ひかりほか：湖沼調査用水中ロボットのためのペローズを用いた浮力調整器の開発—基本特性の検討と滑空実験—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，1A1-B20 (2023)