

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開発-

Development of a small and modular UROV for environmental surveying -Development of an undisturbed soil core sampling module-

○鷹箸修平*, 高橋隆行*

Shuhei TAKANOHASHI*, Takayuki TAKAHASHI*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： 水中ロボット (Underwater Robot), モジュール構造 (Modular Structure),
柱状採泥 (Soil Core Sampling)

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

1. 緒 言

福島県には磐梯朝日国立公園に指定されている磐梯吾妻・猪苗代地域に、猪苗代湖、楡原湖をはじめとした多くの湖沼が存在している。これらの湖沼の環境調査では海洋での調査と異なり大型の船舶及び機器の運用が困難であるため、人が小型の船舶及び機器を用いて多大な労力をかけて調査を行っているのが現状である。

また、2011 年の東日本大震災に伴い発生した福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性物質が川底や湖底に堆積していることがわかっている。2012 年 12 月から 2013 年 3 月にかけて「いであ株式会社」によって行われた調査では猪苗代湖への河川流入部でセシウム 137 が 4.3~5400[Bq/kg]、湖底部では 42~110[Bq/kg] が検出されている¹⁾。これら湖底放射線量の調

査結果を元に放射能濃度のマッピングを行うことは、湖沼への河川流入が放射性物質の堆積へ与える影響や水環境中での線量の推移を把握するのに重要であると考えられる。しかし、現在の湖底の採泥調査は船上から採泥器の投下または潜水土による潜水での採泥によって行われており、調査地点の位置情報の精度が低いことや調査可能な深度に制限があることが問題となっている。また、これらの調査は継続的かつ長期間に亘って行う必要があり、前述のような人力に依存する調査は人間への負担が増加してしまう。これらの問題を考慮し、詳細な放射能濃度マップを作製するには、水中ロボットを用いることが有効であると考えられる。近年、環境調査を行う水中ロボットとして、浦らが開発した自立型水中ロボット「淡探」²⁾や、坂上らが開発した「湖虎」³⁾などが開発、運用されている。

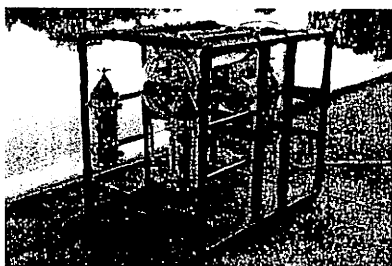


Fig. 1 Prototype of proposed underwater robot

筆者らは水中ロボットの大きさと機能の関係に注目し、Fig.1に示すモジュール構造型小型水中ロボットの開発を行っている。

本研究では、底質における放射性物質動態を詳細に検討するために、不攪乱柱状採泥の開発を行う。柱状採泥は湖底土壌の層構造を破壊せずにサンプリングが可能という利点がある一方で、地中に貫入させた採泥管が土からの圧力などの影響によって抜去不可能になり、水中ロボット自体が回収不能に陥る危険性がある。そこで、本研究では上記の危険性を考慮し、アンカードリルを地中に貫入することで水中ロボット本体を固定する手法を提案する。

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。本水中ロボットは各機能ごとにモジュール化されているため、モジュールを交換することによって調査目的に応じた機能の追加、削除が可能である。そのため、ロボット本体が大型化することを抑えつつ多くの調査項目に対応することができる。なお、本水中ロボットはフレームにモジュールを固定することができるフレーム構造型を採用した。また、本水中ロボットは動力源を内蔵した遠隔操作型水中ロボットである UROV (Untethered Remotely Operated Vehicle) 形式となっている。電源を内蔵することにより電源供給のためのケーブルが不要となり、ケーブルを細径な情

報伝送用の光ファイバのみにすることができるため水中ロボットの運動性能を向上させることが可能となる。ロボット全体の大きさは H640[mm] × W550[mm] × D740[mm] であり、オプションのモジュールを取り付けていない基本的な状態での空中重量は 31[kg] である。また、本水中ロボットは猪苗代湖最深部の水深 93.5[m]⁴⁾ での使用を想定しており、これを上回る水深 100[m] に相当する水圧の 1.0[MPa] に耐えることが可能な耐圧性能を有する。

2.1 モジュールの種類

本水中ロボットは Fig.2 に示す構造になっており、搭載するモジュールは大きく以下の 3 種類に分類される。

- メインモジュール
- スラストモジュール
- サンプリングモジュール

各モジュールは個別に電源、無線通信装置、制御用 CPU を内蔵しており、モジュール間は完全にワイヤレス化されている。無線通信を使用することより耐圧容器にケーブル貫通用の孔を空ける必要がなくなるため、浸水のリスクを低減することができる。さらに、モジュール交換の際の複雑な配線作業が不要になるため調査内容に応じたモジュール交換が容易であり、柔軟性の高い運用が可能となる。

2.1.1 メインモジュール

Fig.3 及び Table 1 に当研究室にて開発されたメインモジュール及びその仕様を示す⁵⁾。本モジュールは全長 517[mm]、空中重量 9.9[kg] であり、母船のメインコンピュータと相互に情報を伝送するための光ファイバが接続されている。

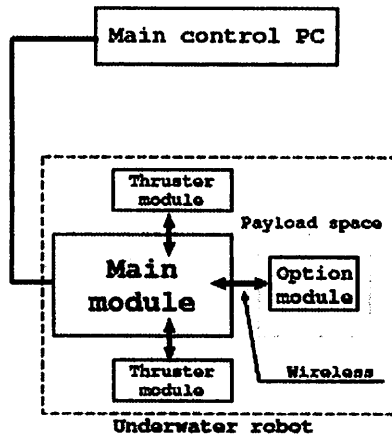


Fig. 2 Block diagram of proposed underwater robot

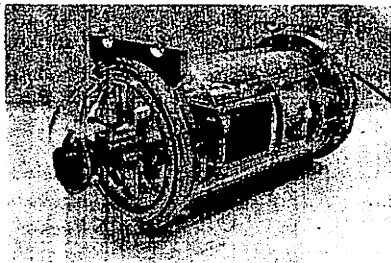


Fig. 3 Prototype of the main module

2.1.2 スラストモジュール

Fig.4 及び Table 2 に当研究室で開発されたスラストモジュール及びその仕様を示す⁶⁾。本モジュールは全長 364[mm]、空中重量 1.9[kg]、水中重量 0.4[kg] であり、最大静止時推力 14[N]、連続稼働時間は 2 時間である。本水中ロボットには垂直方向に推力を発生するものが 4 機と水平方向に推力を発生するものが 2 機の計 6 機を搭載する。



Fig. 4 Prototype of the thruster module

Table 1 Specifications of main module

Item	Unit	Value
Length	[mm]	517
Outer diameter	[mm]	210
Weight(in air)	[kg]	9.9

Table 2 Specifications of thruster module

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

2.1.3 サンプリングモジュール

本水中ロボットは水や泥を回収するためのサンプリングモジュールを搭載する。本論文では泥を回収するための機構 (以下、採泥モジュールと呼ぶ) の開発に関わる基礎的項目の検討を行った。詳細については第 3 章で述べる。

3. 不攪乱柱状採泥モジュールの開発

採泥モジュールの開発を行うにあたり、第一段階として採泥方法及びそれらに関連する項目の検討を行った。

3.1 採泥方法

海洋および湖沼の底質調査で一般的に用いられる採泥法には以下の 3 通りの方法がある。

- 1) ドレッジ式 (引っかかり取り)
- 2) グラブ式 (つかみ取り)
- 3) 柱状式

これらはそれぞれ、ドレッジ式が表層付近の試料を線状に、グラブ式が点状に、柱状式が垂直下方の試料を採取するものである⁷⁾。放射性物質の調査においては湖底表層の浮泥を攪乱せずに採取することが重要であるため¹⁾、柱状式の採泥方法を採用した。

3.2 採泥の流れ

本論文で提案する採泥法は、地中に貫入させた採泥管が土からの圧力などの影響によって抜去不可能になり、水中ロボット自体が回収不能に陥る危険を回避して不攪乱柱状採泥を行うことを目的としている。その具体的な手法は以下の通りである。

- 1) 潜航・着底
- 2) 着底後、アンカードリルを湖底に貫入させロボットを固定
- 3) 採泥管を湖底に貫入、採泥を実行
- 4) 採泥管を抜去
- 5) アンカードリルを抜去
- 6) 浮上

水中ロボットが中性浮量であるとき、採泥管の貫入・抜去に際してスラストの推力を使用する手法が考えられる。しかし、本水中ロボットのスラスト推力では採泥管を貫入・抜去するには不十分であることが当研究室の実験から分かっている。しかしながら水中ロボットが湖底に固定されている状態であるならば、採泥モジュールに十分な力を発生させられるアクチュエータを使用することによって、採泥管の貫入・抜去を行うことが可能であると考えられる。

3.3 アンカードリルの設計

本論文で提案する水中ロボットは、採泥の際、湖底でロボットを固定するためにアンカードリル

を用いる。このアンカードリルは、採泥に必要な貫入力に耐えてロボットを湖底に保持する必要がある。簡単には、採泥管の貫入に必要な力よりも、アンカードリル上部に存在する泥の質量が大きければ採泥時にアンカードリルが抜けることはないと考えられる。

この条件を満足するアンカードリルの外径を、以下の式 (1) を用いて求めた。

$$M \times k = \frac{\pi h \rho}{4} (D_1^2 - D_2^2) \quad (1)$$

式 (1) におけるパラメータの定義を Table 3 に示す。

Table 3 Variables and parameters of equation(1)

Symbol	Unit	Value	Recital
M	[kg]		Mass of mud
k	[1,2,3...]		Number of anchors
D_1	[m]		Anchor diameter
D_2	[m]	0.01	Anchor post diameter
h	[m]	0.3	Intrusion of anchor
ρ	[kg/m ³]	2.4×10^3	Mud density

なお、用いた計算式 (1) では泥の粘性や摩擦力については考慮していない。 D_2 , h については実験器具の関係から決定し、 ρ は猪苗代湖の湖底 (水深 50[m] 付近) で $2.4 \sim 2.6 \times 10^3$ [kg/m³]、河川流入部で $2.4 \sim 3.0 \times 10^3$ [kg/m³] という値¹⁾ から決定した。本研究室で行った予備実験の結果から、採泥管の貫入力を 5.0[kgf] と仮定すると、 D_1 を 80[mm]、 k を 2[本] とした際に M は 7.13[kg] となり理論上は採泥によってアンカードリルが抜けることはないと考えられる。そのため、アンカードリルの外径を 80[mm] として試作し、性能試験を行った。

3.4 アンカードリル性能評価

試作したアンカードリルを Fig.5 とそれらの仕様を Table 4 に示す。

それぞれピッチと外径が異なり、パラメータの違いによる特性の比較を行った。計測を行った項目は以下の通りである。

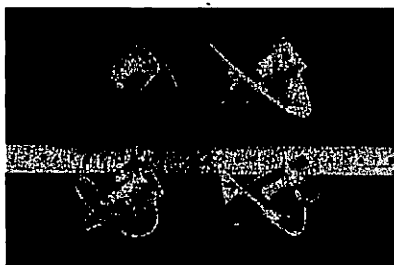


Fig. 5 Prototype of the anchor drills

Table 4 Specifications of anchor drills

Num.	O.D.[mm]	Pitch[mm]
1	80	30
2	80	50
3	50	30
4	50	50

- 1) 鉛直保持力
- 2) 回転貫入トルク
- 3) 回転抜去トルク

なお、今回の計測には水田の土を使用した。これは環境調査の専門家から頂いた意見を元にしており、土の密度は猪苗代湖の湖底土の密度である $2.4 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ に近づけるように水分調整を行った。

3.4.1 鉛直保持力の計測

アンカードリルを泥に貫入させた状態から鉛直に抜去する際に必要な力の計測を行った。計測は項目ごとに各3回行い平均を算出した。結果を Table 5 に示す。結果から、アンカードリルの泥への貫入量は 100[mm] であっても十分に貫入力 5.0[kgf] を保持することが可能であることが分かった。また、アンカードリルのピッチの変化による保持力の違いは見られなかったが、外径の変化によって保持力が向上することが確認された。

Table 5 Experimental results of vertical holding force

Intrusion of anchor [mm]	(Diameter[mm],Pitch[mm])			
	(80,30)	(80,50)	(50,30)	(50,50)
100	15.4	14.0	8.3	7.5
200	18.4	14.5	8.8	9.2
300	18.3	18.1	12.1	11.9

unit:kgf

Table 6 Experimental results of rotary intrusion torque

	(Diameter[mm],Pitch[mm])			
	(80,30)	(80,50)	(50,30)	(50,50)
Torque[Nm]	0.88	0.98	0.39	0.39

3.4.2 回転貫入トルクの計測

アンカードリルの貫入に必要なトルクの計測を行った。貫入量は鉛直保持力の計測結果から 100[mm] とした。計測結果を Table 6 に示す。結果から、外径が大きくなると貫入に必要なトルクが増加することが確認された。また、ピッチについては外径ほどではないが、増大に伴い必要なトルクは増す傾向にあることが確認された。

3.4.3 回転抜去トルクの計測

貫入させたアンカードリルの抜去に必要なトルクの計測を行った。計測結果を Table 7 に示す。貫入トルクと同様に、ピッチ及び外径が大きくなると抜去に必要なトルクが増加する傾向にあった。また、貫入トルクと比較して抜去に必要なトルクの値が大きいことが確認された。

Table 7 Experimental results of rotary remove torque measuring

	(Diameter[mm],Pitch[mm])			
	(80,30)	(80,50)	(50,30)	(50,50)
Torque[Nm]	0.88	1.27	0.59	0.69

Table 8 Specifications of pipes

Num.	O.D. [mm]	Thickness[mm]	Taper
1	60	2	
2	60	4.5	
3	60	4.5	○
4	48	2	
5	48	4	
6	48	4	○
7	32	3.5	
8	32	3.5	○

Table 9 Experimental results of vartical intrusion force

thickness[mm]	Outside diameter[mm]		
	32	48	60
2	-	9	10
4	6	10	10
sharp edge	6	9	10

3.5 採泥管の検討

柱状採泥を行う採泥管について、以下の項目についての検討を行った。

- 1) 鉛直貫入力
- 2) 鉛直拔去力
- 3) 採泥管の径と試料の乱れの関係

3.5.1 鉛直貫入力の計測

Table 8 に示す形状の異なる 8 種のパイプを用いて、鉛直貫入させる際に必要な荷重と、一定荷重を付加した際の応答を計測した。なお、貫入量については、実際の採泥を想定し 300[mm] とした。結果を Table 9 に示す。鉛直貫入させるために必要な荷重はパイプの外径によってほぼ一定であることが確認され、実験に用いた中で外径が最大の 60[mm] のパイプでは 10[kg] の荷重が必要であることが確認された。

3.5.2 鉛直拔去力の計測

鉛直貫入力を計測した際と同様のパイプを用いて 300[mm] 貫入時の鉛直拔去力の計測を行った。結果を Table 12 に示す。拔去力についても

Table 10 Experimental results of vartical intrusion force

Num. of pipes	Intrusion force[kgf]
1	10
2	10
3	10
4	9
5	10
6	9
7	6
8	6

Table 11 Experimental results of vartical extraction force

Num. of pipes	Extraction force[kgf]
1	16.4
2	14.8
3	17.2
4	12.2
5	12.6
6	12.6
7	7.1
8	7.3

貫入力と同様にパイプの外径によってほぼ一定であることが確認された。また、貫入力と比較すると、すべての場合において拔去力の方が大きな値となった。

Table 12 Test result of vartical intusion force measuring

thickness[mm]	Outside diameter[mm]		
	32	48	60
2	-	12. 2	16. 4
4	7. 1	7. 3	14. 8
sharp edge	7. 3	12. 6	17. 2

3.5.3 採泥管の径と試料の乱れの関係の検討

貫入力および拔去力の計測実験と同様のパイプを用いて、パイプ内にサンプリングされた試料の層構造が破壊されていないか確認する実験を行った。泥と色砂を用いて実験用の層構造を持った土を作製した後、そこにパイプを約 300[mm] 貫入、サンプリングを行った。サンプリング後はパイプごと試料を冷凍し、試料を取り出した後に軸方向に切断して断面を確認した。確認し

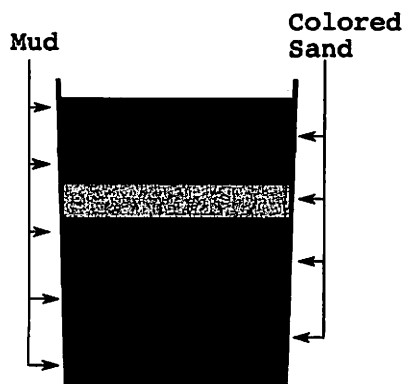


Fig. 6 Schematic diagram of colored

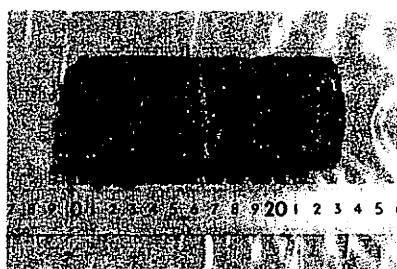


Fig. 7 Sample of undisturbed soil core sampling

た断面の一例を Fig. ??に示す。内径 56[mm], 44[mm] のパイプでは 3 層の色砂層を確認することができたが、内径 22[mm] のパイプでは 1 層のみの確認となった。また、いずれの径においてもパイプ内壁との境界面で試料の乱れがあり、内径 22[mm] のパイプではその影響が大きかった。

3.6 アンカードリル及び採泥管の設計方針

今回行った各実験のそれぞれの結果を元に、アンカードリル及び採泥管の仕様について検討した。アンカーを 2 本使用した際のアンカードリルの鉛直保持力と採泥管の鉛直貫入力から検討すると、今回使用したいずれのアンカードリル、採泥管の組み合わせも可能であることが分かった。そのため、貫入および抜去の際のトルクがもっとも小さい外径 50[mm], ピッチ 30[mm] のアンカードリルを使用することが、安全面から考えて最適であると考えられる。また、採泥管

は試料が乱れない最小の径のものを使用することがリスク回避につながると考えられるので、外径 22~48[mm] の間で最適なものをさらに検討する。

4. 結 言

本論文では筆者らが開発を行っている水中ロボットの不攪乱柱状採泥モジュールに関する基礎的検討について述べた。採泥の手法として、アンカードリルを用いてロボットを固定した状態で柱状採泥を行う手法を提案した。アンカードリルの試作および性能試験を行い、採泥管の鉛直貫入の際に、ロボットを固定することのできる保持力を発生できることを確認した。また、採泥管の径についても検討を行い、内径 44[mm] 以上のパイプを使用することで不攪乱での採泥が可能であることを確認した。また、それらを動作させるために必要な動力源も、筆者らが開発中の水中ロボットに搭載可能なレベルであることを確認している。

今後は本水中ロボットを用いて実際に湖底での不攪乱柱状採泥を行うことができるよう、採泥モジュールの試作・改良、採泥に関わるシステムの開発を行う予定である。

参考文献

- 1) いであ株式会社, 平成 24 年度 水環境中の放射性物質調査方法等検討業務報告書
- 2) 浦環:自立型海中ロボットの発展する方向, Journal of Geography, 109(6), pp900/906, (2000)
- 3) 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, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 1P1-D26
- 4) 国土地理院猪苗代湖, <http://www1.gsi.go.jp/geowww/themap/lake/tohoku-inawashiroko.html>, 2013.12.4
- 5) 猿田祐平, 大室拓哉, 高橋隆行:湖沼調査用モジュール構造型小型水中ロボットの開発-試作機の開発と水中での基本動作の確認-, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2012, 3K2-3

- 6) 大室拓哉, 猿田祐平, 高橋隆行:低雑音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 2012, 2P1-H10
- 7) 青木市太郎, 木下泰正:汚染底質調査のために開発した採泥器, 独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
https://www.gsj.jp/data/chishitsunews/79_04_02.pdf, 2013.12.5
- 8) 地質環境部主任技術者講習会 第3回 土質定数その1,
<http://www.pejp.net/academy/academy03.pdf>, 2013.12.6