

災害時即応型水中狭あい部調査ロボットシステムの開発

Development of disaster quick-responsive type underwater narrow portion survey robot system

鈴木 茂和・飯塚 将太*

福島工業高等専門学校機械工学科

*福島工業高等専門学校専攻科

Shigekazu SUZUKI and Syota Iizuka*

National Institute of Technology, Fukushima College, Department of Mechanical Engineering

*National Institute of Technology, Fukushima College, Advanced Courses

(2015年9月17日受理)

After the Great East Japan Earthquake, many organizations have been developing disaster response robots since they can play important roles in decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Therefore, we develop a small underwater robot system that can be mobilized within a short period of time by preparing an integrated set of the necessary peripheral equipment. Requirements for this small underwater robot system are as follows: (1) it has a mobility in disaster event, (2) it has a functional flexibility to install optional tools when necessary, and (3) it can also carry out investigation in the narrow portion. Based on the experience of the Great East Japan Earthquake, we have been developing a practical system by repeating the mock-up test. The main purpose of this study is to perform conceptual design and determine the overall design of the robot.

Key words: Disaster response robot, Underwater robot, ROV

1. はじめに

船舶事故や東日本大震災における海中や海底の遭難者の捜索救助はダイバーや潜水艇などにより行われるのが一般的である。ダイバーによる捜索救助では、18m以深では活動時間等の制約がある他、二次遭難の危険性がある。潜水艇による捜索救助は、活動時間の制約や二次遭難の危険性は低減できるが、船内や瓦礫等の狭あい部での活動が難しくなるほか、捜索開始までに様々な機材の準備が必要で初動捜索という点で難がある。

そこで、本研究では従来の潜水艇に対し小型化を図り、捜索に必要な周辺機器を一体化して短時間で出動可能な図1のような水中ロボットシステムの開発を行う。災害発生時に、現地までの運搬や現場投入が容易な機動性を有し、必要に応じてオプションツールも装着できる柔軟（即応）性も有し、狭あい部での調査も可能な小型の水中ロボットシステムを開発する。

2. スラスタの先行研究

一般的な水中ロボットでは、メインのモジュール及びスラスタはそれぞれ別の耐压容器で構成されている。そ

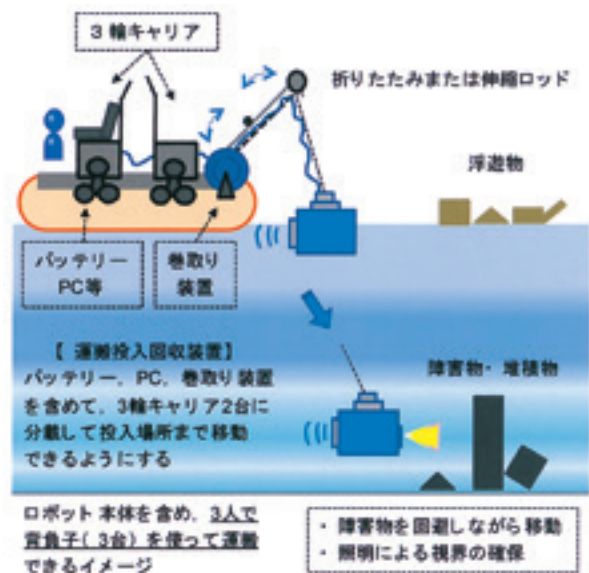


図1 システム全体の概念図

のため、それぞれの容器に貫通穴を明け、防水コネクタ等を使用しケーブルを配線している。しかしその方法では、耐水圧の観点から潜水深さが防水コネクタに依存してしまうことや、貫通穴があるため信頼性が低下し、浸

水のリスクが増えてしまうという問題がある。

福島大学における開発^{1),2)}では、メインモジュール及びスラスタをそれぞれ別の耐圧容器に入れているが、それぞれの容器に回路や通信機能、電源を搭載することで、完全にワイヤレス化できている。従って、配線用の貫通穴を設ける必要がなく、浸水のリスクを低減できる。また、予備のモジュールと交換することで、容易にアクシデントに対応することができる。そのため、設備の整っていない現場において、従来のように強固に固定された耐圧容器の蓋を開閉しての修理を行う必要がない。

さらに、エネルギー源および制御機能が集中していないので、様々なリスクを分散させることもできる。しかしエネルギー源が分散しているため、効率的な運用が難しく、またバッテリーが複数あるため、交換作業に手間と時間がかかる。さらに電源や通信機能を持たせるために、余分な回路や容積が必要で、スラスタが大きくなってしまふ課題がある。

また、福島大学で製作されているスラスタには、動力伝達にマグネットカップリングを使用している。マグネットカップリングとは、軸の回転運動を磁力によって保持伝達するための部品である。磁力を利用するため、カップリング間に障壁があっても動力を伝達することができる。通常、水中でモータを使用する際にはモータ本体を水密構造体の内部に格納し、軸のみを水中に出して動力伝達を行う。しかし、回転する軸部分を水中に出すためには、複雑なメカニカルシール構造が必要となるが、マグネットカップリングを使用することにより、耐圧容器に貫通穴を設けることなく、動力をスクリュプロペラに伝達している。

3. 本体の設計

3.1 要求事項

水中ロボットの使用環境を想定し、以下の要求事項を決定した。

- ・ダイバーが容易に潜水できない18m以深（ケーブル長100m）まで調査できること。
- ・湖沼・河川（淡水）、海（海水）、プール等で使用可能な防水および塩害対策を施すこと。
- ・ロボット本体のサイズは狭あい部での使用を考慮し、概ね450×450×450mmとする。
- ・ロボット本体は、フレーム、コントロールボード・水平スラスタ・垂直スラスタ、カメラ・照明等からなる。
- ・オプションモジュールは、①高性能カメラ・赤外線カメラ・ソナー等のモジュール、②狭あい部調査用小口

径アームモジュール等を想定する。

- ・オプションモジュールは必要に応じて付加可能な構造とする。
- ・緊急時はケーブルでロボットを牽引回収できる。
- ・ロボット本体、ケーブル、各オプションモジュールはそれぞれ中性浮力又は微浮力を有すること。
- ・バッテリーは他機材との互換性を持たせるため、パコ電子製DH-100とする。
- ・現場での活動に必要な付帯装置（発電機、充電機、工具、保守用部品等）も用意する。
- ・投入装置はポート上（またはプールサイドや棧橋等）から障害物(1000mmH×700mmD)越しに投入できるアームウィンチ型とすること。
- ・システム全体(水中調査ロボット本体、オプションツール、運搬投入回収器具、付帯装置込み)をワゴン車後部に搭載できること。
- ・運搬車両から現場まで3人程度で容易に持ち運べるよう、水中調査ロボットや運搬投入回収装置は、3輪キャリアなどに分割搭載する。

3.2 スラスタ配置

前章の先行事例で挙げた、スラスタに関する課題を解決するため、スラスタのモータ部および回路をスラスタモジュールに集約し、またさらに、マグネットカップリングで動力伝達をするという方法を考案した。そして、ロボット本体のモデリング及び機械設計を行った。スラスタモジュールの内部構成およびスラスタの配置を図2に示す。水平方向へ移動するための水平スラスタを前後左右に1つずつ、水中で浮上・降下するための垂直スラスタを斜め1方向に1つずつの、計8つのスラスタを正八角形状に配置している。こうすることによって、スラスタの動力部分(モータ)を1つの耐圧容器に集約する

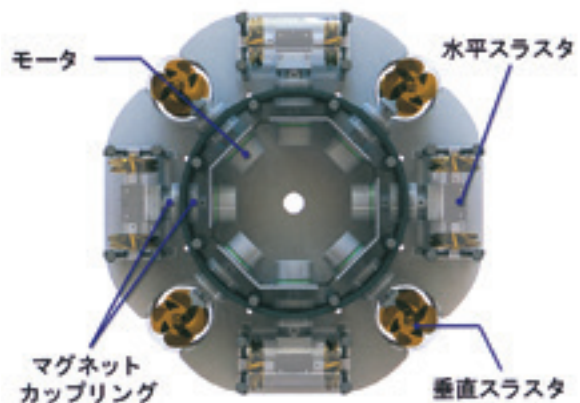


図2 スラスタ配置図

ことができた。これによってロボット全体がコンパクトになった。また、スラスタ1つ1つに耐圧容器を設ける必要がなく、浸水リスク低減と部品点数の削減が図れる。さらに、メインモジュールから各スラスタ間の通信や電力伝送を無くした。これによって、モータはすべてメインモジュール内に格納されているため、配線作業が全て1つのモジュール内部で済む。したがって配線を一度容器外に出す必要がなく、モジュール間のケーブルや通信を排除することで、貫通穴を設けての配線作業が必要なくなった。

スラスタ部の詳細を図3に示す。スラスタは主にモータ、マグネットカップリング、ギアボックス、スクリーブローパ、整流用パイプのみという、少ない部品点数で構成されている。さらに、水平・垂直スラスタは同様の部品から構成されており、共通化されている。動力の伝達には本体への加工をしなくて済むようにマグネットカップリングを使用した。

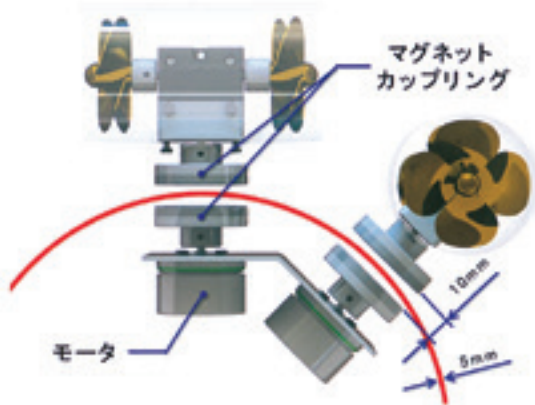


図3 スラスタ部詳細

3.3 本体構成

設計したロボット本体の外観及び概形寸法、モジュール構成を図4に示す。本ロボットの大きな特徴

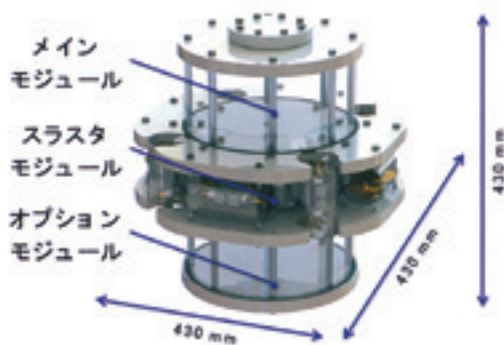


図4 全体図

は、大きな3つのモジュールから構成されていることである。それぞれのモジュールが耐圧容器で水密構造となっており、オプションモジュールについては状況や必要に応じて分割可能な仕様となっている。スラスタモジュールはロボット本体の動力部分(スラスタ)を集中、格納したモジュールである。ロボットが水中で移動するために必要な推進力を生み出す部分である。

3.3 円筒容器の設計

メインモジュール、オプションモジュールおよびスラスタモジュールの円筒容器はアクリルパイプである。樹脂の中でも透明度が高いことや、円筒形のもの様々な寸法のもが市販されており容易に入手できることから、アクリル樹脂を使用した。

約100mのケーブルを使用することにより、潜水深さも100mと仮定する。ここで安全率を1.5とおき、水深150mに相当する1.5 MPaの水圧に耐えられるように設計した。円筒内径及び円筒長さは搭載する機器の寸法とアクリルパイプの市販品から決定した。これらの値を用いて、次式^{1),2)}により円筒部の必要最小肉厚 t を求めた。式で使用した変数の定義と値を表1に示す。

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

表1 変数の定義と設定値

記号	単位	値	説明
P	MPa	1.5	弾性座屈圧力
E	MPa	3000	縦弾性係数
N		2,3,4...	座屈モード
ν		0.35	ポアソン比
r	mm	メイン m : 142 スラスタ m : 125	円筒内半径 + $t/2$
l	mm	メイン m : 125 スラスタ m : 82	円筒長さ

※m:モジュール

t についての3次方程式として解(必要最小肉厚)を求めた。円筒容器は、8本のアルミ支柱で内側から支えられている。したがってアクリルパイプのみの場合と比べて、外圧に対して高い強度を保っている。そこで市販品の規格も考慮し、アクリルパイプの肉厚はメインモジュールとオプションモジュールで6mm、スラスタモジュールで5mmとした。

3.4 電源供給及び通信方式の検討

小型水中ロボットでは、ロボット本体に供給される電源を内蔵式(バッテリー方式)もしくは、操作(オペレータ)側から有線で供給するという有線供給方式がある。また通信方式については、有線もしくは無線といった選択肢が存在する。表2は、動力(電力)の供給方式および通信方式について、各方式のメリット・デメリットを比較したものである。

その結果、動力供給はケーブルが長いと、地上に電源を設置すると電圧降下が著しく、無駄が多いためロボット側にバッテリーを設置することとした。また、水中での無線到達範囲は10cm程度と、大変短いと船上海上及び陸上からロボット本体への無線での信号伝送は事実上不可能となる。したがって通信方式は、光ケーブルを使用する有線方式とした。

表2 電源と通信方法の比較

方式	有線供給方式 (操作用から電源供給)	バッテリー方式 (ロボット側に設置)
動力(電力)供給	<ul style="list-style-type: none"> ○ ロボット使用時の時間制限がない ○ バッテリー容量に左右されない △ 長尺ケーブルの取扱いにはケーブルリール等が必要 △ ケーブルによる電圧降下(伝送損失)が課題 ○ ロボットの軽量化が図れる 	<ul style="list-style-type: none"> △ ロボット使用に時間制限があり △ 重量と大きさが課題(稼働時間に比例) ○ 長尺ケーブルが不要 △ 充電方法の検討が必要
ロボットの電力を操作側から有線で供給 or バッテリーで供給		
方式	有線方式	無線方式
信号伝送	△ RS422：同軸ケーブル	×
操作信号を有線LAN or 無線LAN	<ul style="list-style-type: none"> △ LAN：ツイストペアケーブル ○ 光ファイバーケーブル 	<ul style="list-style-type: none"> × △ スラスターと本体間の通信であれば可

4. 水中ロボットの評価

4.1 耐水性能評価

設計に基づき、水中ロボット本体を試作した。その後、本体(筐体のみ)のシール機能及び耐圧機能を確認するため、耐水性能試験を行った。今回は開発期間が短かったことから、簡便に試験を行うため、本体を数回水中に沈めた後、高圧洗浄機(10気圧)のジェット噴流にさらすことで、水中での耐圧条件を模擬した。試験の様子を図5に示す。試験後に本体を分解し、目視により筐体内部の水の侵入の様子を確認した。

4.2 水中動作試験

組み立てを完了したロボット一式を試験施設へ持ち込み、大型水槽の中でロボットを遠隔操作し、運動性能を確認した。試験用水槽は縦5m×横2m×高さ2m、水位



図5 ジェット噴流による耐水性能試験

1.5mであり、ロボットを完全に沈めた状態で運転した。予め本体下部のウェイトを調整し、バランスする状態(中性浮力)に設定した。

その後、遠隔操作によりスラスターを回転させ、前進、旋回、停止、浮上、沈降などの操作を繰り返しながら、水槽内を自由に移動できるか確認した。また、オプションモジュール内に搭載したカメラにより、外部のモニターから水槽内の映像をリアルタイムに取得できるかを確認した。

5. 水中ロボットの試作と評価

完成した水中ロボットのプロトタイプモデルの写真を図6に示す。耐水性能試験後に耐水性能確認のため内部を確認した所、水の侵入がなく十分な防水性能があることがわかった。

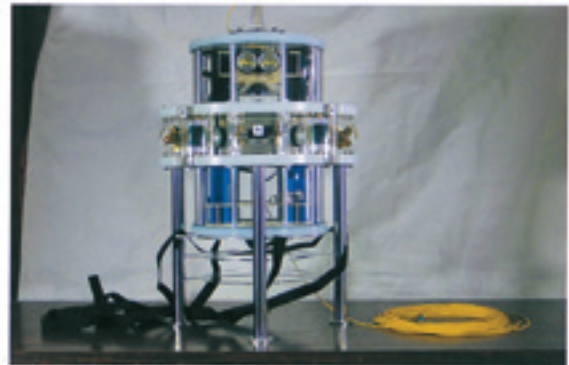


図6 水中ロボットのプロトタイプ

水中動作試験では、水槽内で所定の動作ができることを確認した。また、オプションモジュール内に搭載したカメラにより、地上の外部モニターから水槽内の状況をリアルタイムに確認しながら運転することができた。試験終了後、目視による外観点検で、水の侵入や機器異常

が無いことも確認した。

平面運動については、無重力空間と同様な状態(中性浮力)となり、前進や旋回などの運動を開始することに問題はないが、その停止操作においては動作が緩慢となることが確認された。しかしながらスラストをタイミングよく操作することで精度の高い制御ができた。平面運動には4基のスラストが利用でき、この組み合わせにより複数の推進方法が考えられるが、今回の試験ではそれらの差異を明確にするには至らなかった。今後、本ロボットのスラスト配置の特徴を活かし、どのような組み合わせが最も安定で効率的か検討する必要がある。

上下運動については、スラスト4基を同時に使用できるため、モータ出力に問題はなかった。しかし、初期の浮力調整が十分でないと上下運動に余分な電力を消費することになる。水中投入後に浮力を微調整できる機能が備わると、消費電力を低減し、かつ現場の準備作業も容易となることが分かった。

今回は室内に設置した水槽で試験を実施したため水面は安定していたが、災害現場では水流や波の影響でロボットの方向や姿勢が変動すると考えられる。そのため精度の高い操縦のためには姿勢制御が必要と考えられる。

取扱い性については、本体重量が約25kg(脚含め約30kg)であり、ロボットの運搬、投入は2人で行うことができたが、災害現場での迅速な活動を考えると、更なる軽量化が望まれる。

一連の水中試験を通して、光通信ケーブルに関する強度や取扱い性、バッテリーに関する残量確認や交換方法等の課題が抽出されたことから、今後改善を進める必要がある。

6. まとめ

(1)災害現場での捜索救助を目指し、コンパクトで操作の容易な水中調査ロボットを設計、試作し、現場を模擬

した水中試験にて、ほぼ要求機能を満足する性能を確認できた。

(2)開発した水中ロボットは、プロトタイプであり、直ちに災害現場の調査に活用するには課題があるが、実地試験を繰り返しながら本構造を改良することにより、実用性の高い調査ロボットを開発できる見通しを得ることができた。

(3)実用化に向け今後解決すべき以下の課題を得ることができた。

- ・狭あい部で細かな操縦を可能とするモータ制御技術
- ・低エネルギーで柔軟な制御を可能とするスラスト構造、運転条件の最適化
- ・迅速なバッテリー交換、メンテナンスを可能とする構造の最適化
- ・利用可能なオプション機器の開発

謝 辞

本研究は、平成26年度福島県「災害対応ロボット産業集積支援事業」の支援を受けて実施した。連携企業である日本遮蔽技研、タカワ精密、三輪鉄工所、小浜製作所の皆様に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 大室拓哉, 猿田裕平, 高橋隆行; 湖沼調査用小型水中ロボットのためのワイヤレススラストモジュールの推力向上, 計測自動制御学会東北支部 第268回研究集会, (2011) .
- 2) 大室拓哉, 猿田裕平, 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- 汎用動力モジュールの開発 -, ROBOMECH 2013.
- 3) 大室拓哉, 高橋隆行; 水中ロボットのための電源内蔵型ワイヤレススラストモジュールの開発計測自動制御学会東北支部 第261回研究集会, (2010) .