

## 解説

浅水域探査を目的とした小型水中ロボット  
及びマニピュレータの研究開発\*Research and Development of Small Underwater Robots  
and a Manipulator for Shallow Water Operations

石塚 誠\*\*      石井 和男\*\*      大畑 智海\*\*\*  
(Makoto ISHITSUKA)      (Kazuo ISHII)      (Satomi OHATA)

## 1. はじめに.

人類は漁業をはじめとする海産資源の利用や、埋め立てなどの空間利用、船舶による大規模輸送など様々な目的で海洋開発を進めてきた。鉱産資源においては、将来的な資源不足が危ぶまれる中、海中における資源開発が期待されている。しかし海中環境は、無酸素・低温・高圧・暗闇等の特徴を有する極限環境であり人間が直接作業するのは難しい。また、電波による通信も難しいため超音波による通信が用いられるが、情報通信密度は低い。このような理由から、海中ロボットを利用した研究開発が望まれており、実際に運用されている例も増えてきている<sup>1)~3)</sup>。

最近では、新潟沖や東海沖の南海トラフにおけるメタンハイドレートをはじめとする地質調査において海洋研究開発機構の開発した「ドルフィン3K」や「しんかい6500」などの水中ロボットが活躍している<sup>4)</sup>。図1に主な水中ロボットを規模・深度から分類した。図中のROVは遠隔操縦型ロボット(Remotely Operated Vehicle), AUVは自律型水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle)を意味する。

今後、海洋諸現象の調査・研究が進めば、海洋保全や資源利用などの海洋開発がより大規模になっていくことが予想される。海中における作業の増加、複雑化により、種々の作業を行える水中ロボットの開発が望まれている。

水中ロボットは極限環境ロボットの一つであり、

特殊な機構や設計が必要となる。一般的なセンサやアクチュエータは、防水加工を施さなければ水中ロボットに使用できない。本論文では防水加工を含め、著者らが開発中の水中ロボット及びマニピュレータに関して述べる。

## 2. 沿岸域調査ロボットの開発

## 2.1 水中ロボットAquaBoxの設計方針と概要

著者らは沿岸域調査及び行動制御の研究を目的として、水中ロボットAquaBoxの開発を行ってきた<sup>5)</sup>。多くの水中ロボットは、オペレーションにおいて支援母船を必要とし、運用にかなりのコストがかかる。著者らはより簡単に運用が可能な小規模の水中ロボットシステムの開発を目指している。開発に際して以下の三つの点に留意した。

- ・ 2, 3人で実験を行える規模に収める。
- ・ 拡張性を持たせ、目的に応じた機器を搭載させる
- ・ 定点で留まることができる。

以上より、AquaBoxは、組み替え可能なフレームと制御回路を搭載した耐圧容器、種々のセンサ・アクチュエータからなり、必要に応じてROV, AUVの形態を選択できるシステムとした。

## 2.1.1 AquaBox I

AquaBox Iは防波堤等の水中構造物の撮影や検査を目的として開発したロボットである。その外観とシステム構成を図2に示す。使用形態は水上から操作を行うROV型とし、カメラの映像を直接水上の支援設備へと送り、対象物を観測する。耐圧容器(シリンダ1)には各センサの情報処理と推進装置(スラスタ)の制御を行うマイクロコンピュータの回路が搭載されている。支援設備からロボットには目標深度や目標方位角が送られ、姿勢制御を行うシス

\* 原稿受付 2007年10月17日  
\*\* 九州工業大学大学院生命体工学研究科  
(〒808-0196 北九州市若松区ひびきの2-4)  
\*\*\* 大分キャノン株式会社  
(〒873-0292 国東市安岐町下原710)

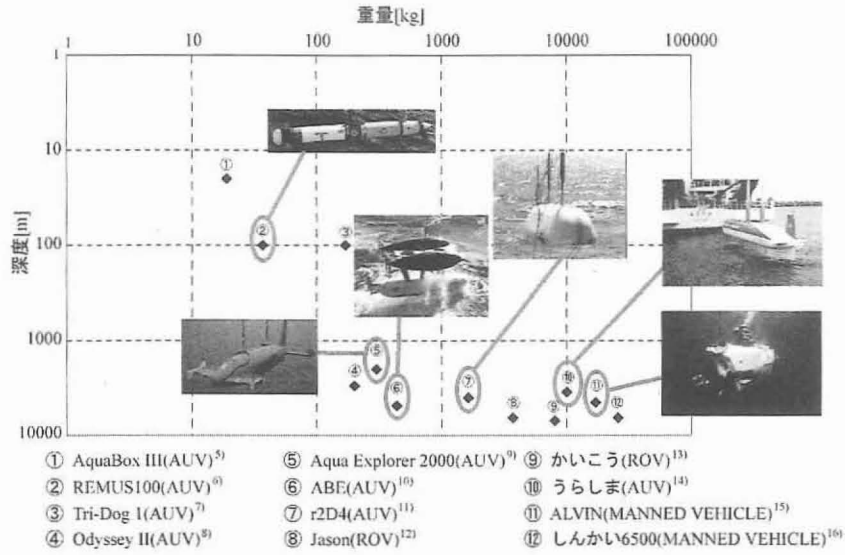
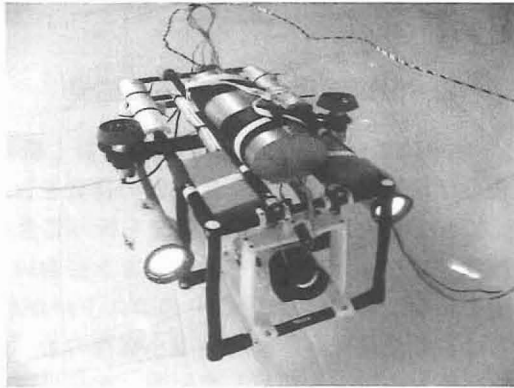
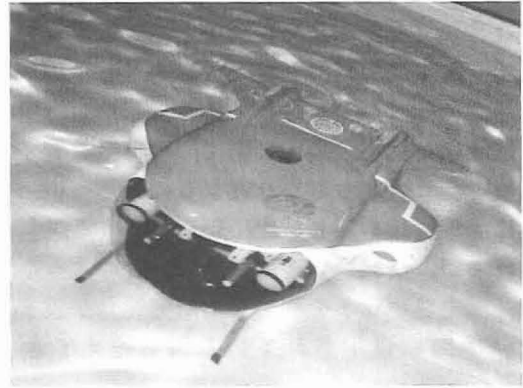


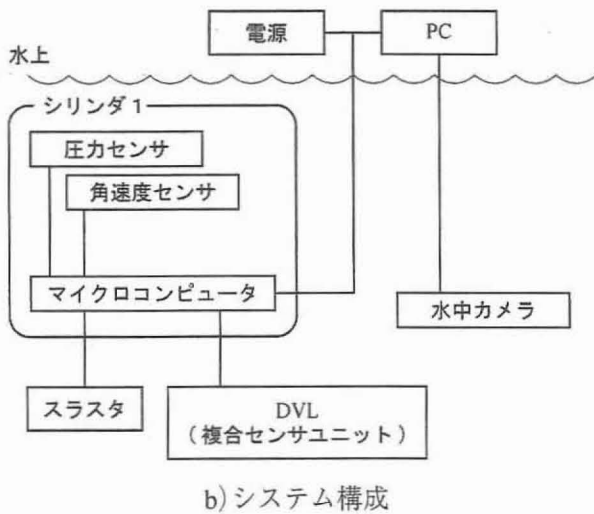
図1 主な水中ロボット



a) ロボットの外観

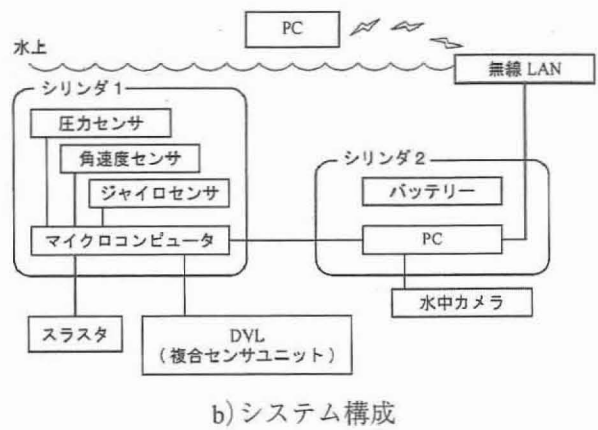


a) ロボットの外観



b) システム構成

図2 AquaBox Iの外観とシステム構成



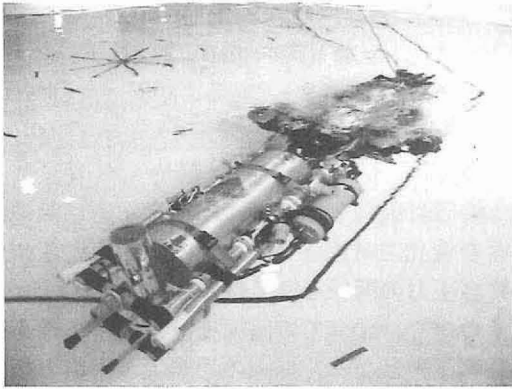
b) システム構成

図3 AquaBox IIの外観とシステム構成

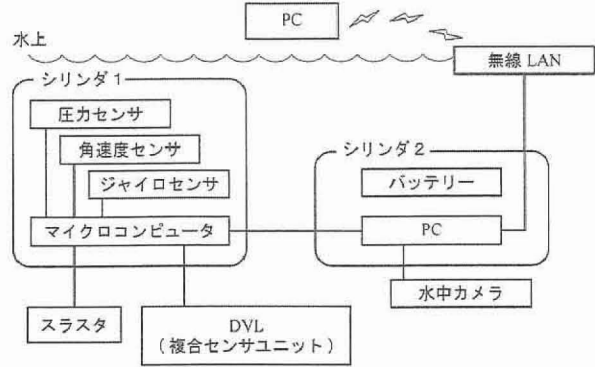
### 2.1.2 AquaBox II

AquaBox IIは沿岸域の調査や観測を目的とし、航行型のAUVとして開発した(図3)。行動制御を行うコンピュータと電源を搭載する耐圧容器(シリン

テムとなっている。

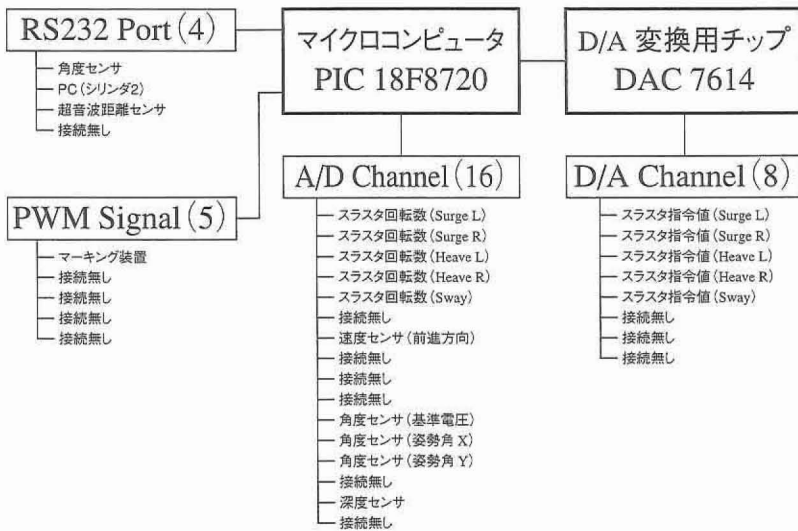


a) ロボットの外観

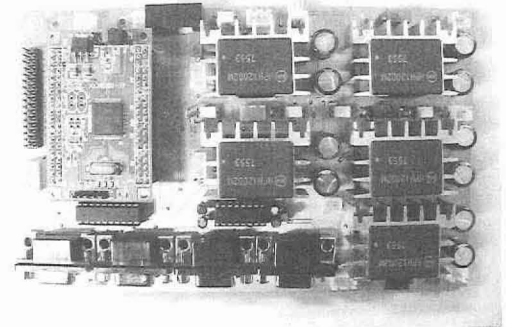


b) システム構成

図4 AquaBox IIIの外観とシステム構成



a) 機能と各機器への接続



b) 回路の外観

図5 マイクロコンピュータを用いた制御基盤

ダ2)を追加している。また、安定した航行とペイロードの確保のため、ロボット全体を外郭(フェアリング)で覆っている。海面に浮上した際には無線LANによる通信も可能である。前方には水中映像撮影用の水中カメラと水中ライトを搭載している。

2.1.3 AquaBox III

AquaBox IIIは軽量化を目指して開発したAUV型のロボットである(図4)。カメラは画像を直接パソコンに取得可能な前方および下方の2基の小型カメラへ変更し、音響を用いたナビゲーションを目的としてハイドロフォンを追加した。また、前進方向への運動性能を重視し、投影面積を小さくした縦長の構造としている。アクチュエータには5基のスラスタを用いている。

2.2 水中ロボットAquaBoxの設計・開発

2.2.1 制御システムの設計

AquaBoxではマイクロコンピュータを用いインターフェース及び下位制御(運動制御)を目的とした制御基板を作成し、センサやアクチュエータの制御を行っている。マイクロコンピュータPIC 18F8720を用いて、シリアル通信4ポート、A/D変換16チャンネル、PWM信号5チャンネルを使用できる。I<sup>2</sup>C通信によりD/A変換用チップDAC7614と通信し、最大8チャンネルのアナログ電圧出力が可能である(図5参照)。プログラムはC言語により開発し、サンプリングレートは10Hzとしている。

ロボット全体の行動制御は、ビジュアルプログラミング開発環境i-CONNECTを用いて、計算機上で行っている。このi-CONNECTには視覚的なプログ

ラミングが可能なビジュアルプログラミングインターフェースが用意されており、通信や画像処理などのライブラリとして多数のモジュールが使用可能であり、短時間でプログラムを開発することができる。開発したAquaBox IIIのグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)を図6に示す。

2.2.2 円筒型耐圧容器の設計

AquaBoxを構成する主な耐圧容器の設計に関して述べる。AquaBoxは各センサ機器の制御を行う電子回路を搭載した小型の耐圧容器と、コンピュータと電源を搭載した耐圧容器に分かれている。これらの耐圧容器は水深50mにおける使用を想定して設計を行った。設計条件と材料を表1に示す。表中の寸法は、搭載する機器から算出している。

a) 円筒部の設計

円筒部は弾性座屈を強度上の限界と考え、次式<sup>3)</sup>を用いて設計を行った。ただし、 $P_k$ は許容圧力、 $E$

はヤング率、 $\nu$ はポアソン比、 $n$ は座屈モード数をそれぞれ表し、 $t$ は円筒の板厚、 $l$ は長さ、 $r$ は平均半径(=内径+板厚/2)である。

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

表1の設計条件を用いて、内径を一定にして円筒部板厚を変化させたとき、式(1)より算出される板厚と許容圧力の関係を図7に示す。

図7の中で、すべての座屈モードのうち最小の圧力が許容圧力となる。以上の手順より円筒の板厚を算出すると、必要となる最小の板厚は約1.4mmとなる。しかし実際には、加工方法の制限により、板

表1 耐圧容器の設計条件

設計条件		使用材料	
耐水圧	0.5 [MPa] (水深 50[m])	材質	アルミニウム (A6063)
寸法	内径 166 [mm]×410 [mm]	ヤング率	68900 [MPa]
蓋部直径	φ142 [mm]	ポアソン比	0.33
コネクタ径	φ6 [mm]	引張強度	155 [MPa]

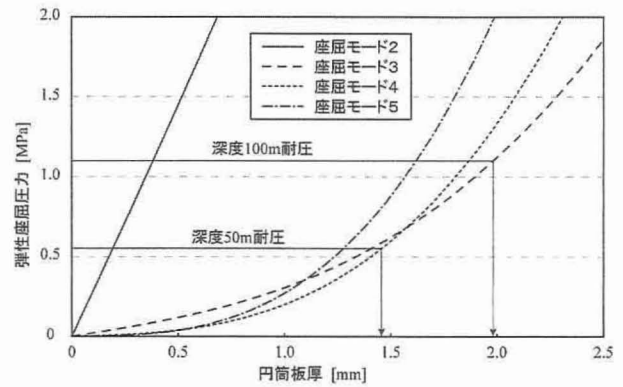


図7 円筒における各座屈モードの弾性座屈圧力と板厚の関係

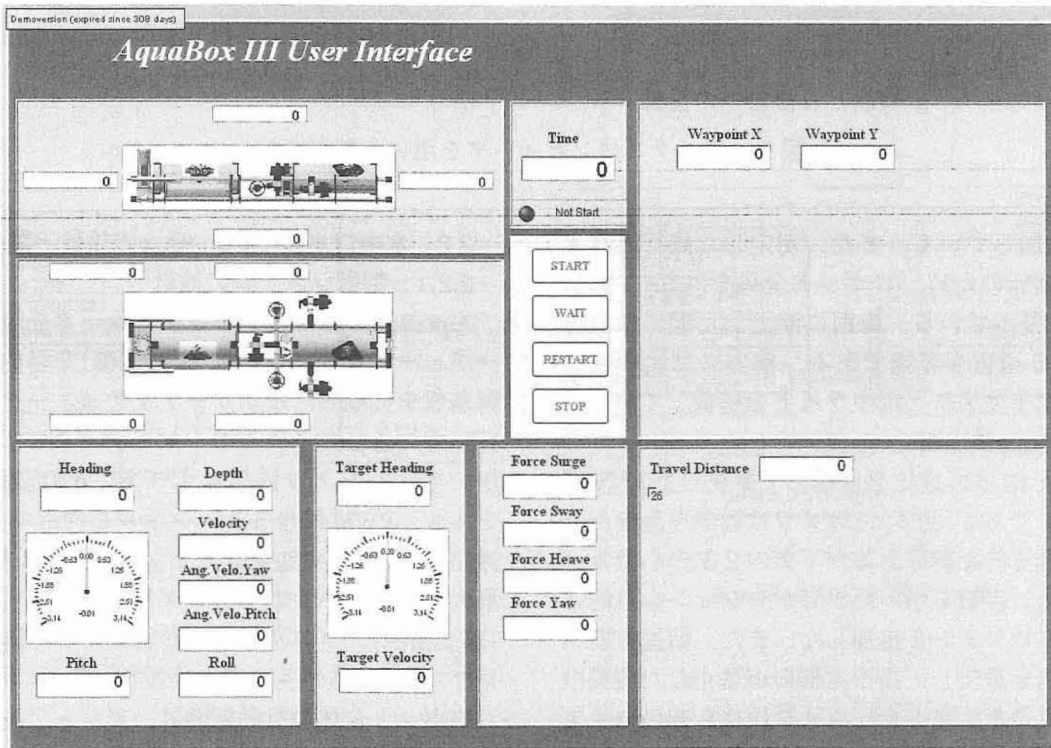


図6 開発したAquaBox III用GUI

厚 3 mm とした。

b) 蓋部の設計

蓋部の設計について述べる。円板の場合は引張強度を中心に考える<sup>3)</sup>。円筒部の計算と同様に以下の簡略化された式を用いて板厚の算出を行った。ここで $\sigma$ は引張応力、 $P$ は許容圧力、 $a$ は円板の半径、 $t_p$ は板厚を示している。

$$\sigma = 1.24 \cdot P \cdot a^2 / t_p^2 \quad (2)$$

また、蓋部には信号や電源を接続するために貫通穴を設けることが多く、強度計算が難しい。この場合は以下の近似式を使用することが多い<sup>3)</sup>。円孔の半径を $b$ とすると、

$$\sigma = (2.1P \cdot a^2 + 2.2\pi \cdot P \cdot b^2) / t_p^2 \quad (3)$$

このとき式(2)・式(3)より算出された、蓋部の板厚と許容圧力の関係を図8に示す。

図に示すように円孔がある場合には、許容圧力が下がる。今回は重量増問題とのかねあいから、孔周辺の厚みを増すこととし、全体的な厚みは5 mmとして設計した。なお、蓋の開閉には、空気を抜くための構造として蓋部に空気孔を設けた方が容易である。

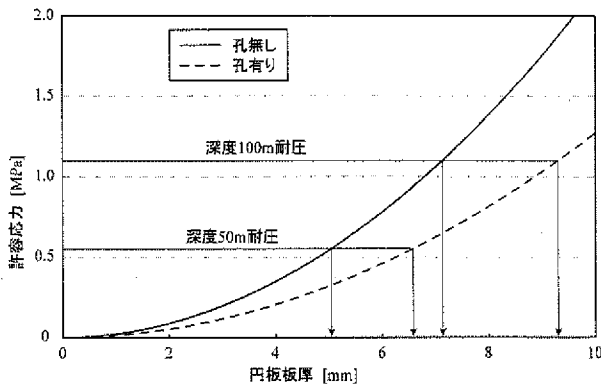


図8 蓋部における許容応力と板厚の関係

c) 防水加工部の設計

防水加工には一般的にOリングが用いられる<sup>17)</sup>。ここではOリングの選定と接合部について述べる。蓋の開閉の可能性を考え、JIS規格品の中でも運動用に使用するものから選定した。JIS規格において、固定面に使用するG番や運動面に使用するP番などが定められている<sup>18)</sup>。今回はこのうちP番を用いるものとした。このとき、Oリングの外径寸法(=円筒部内径)は166mmであるためP-150あたりのOリングが適合する。しかし、円筒面固定では挿入時に“かじる”ことで破損の可能性があるため、本ロボットではP-145を採用した。採用したOリングの詳細を表2に示す。

次に、溝部の寸法を算出する。表に示したつぶし代の最大値・最小値より各部の寸法を決定した。(図9参照)

以上のように耐圧容器の設計を行った。耐圧容器の設計に当たっては適切な安全率を用い、実際に圧力試験を実施する必要がある。

2.3 電気配線の防水加工

2.3.1 ケーブルとコネクタ

耐圧容器間の接続には電気配線用水中ケーブルが必要となる。その接合部には水中コネクタを用いるため、コネクタ接合面の表面粗度に留意しなければならない。耐圧深度に応じた水中コネクタやケーブルクランプ等が種類は多くないが販売されている。大深度において使用する場合には、高圧環境下で使

表2 選定したOリングの仕様

呼び番号	P-145	P-150
軸径(d1)	5.7 ± 0.13 [mm]	
線径(d2)	144.6 ± 1.16 [mm]	149.6 ± 1.16 [mm]
つぶし代	最大	0.83 [mm] (14.2%)
	最小	0.47 [mm] (8.4%)

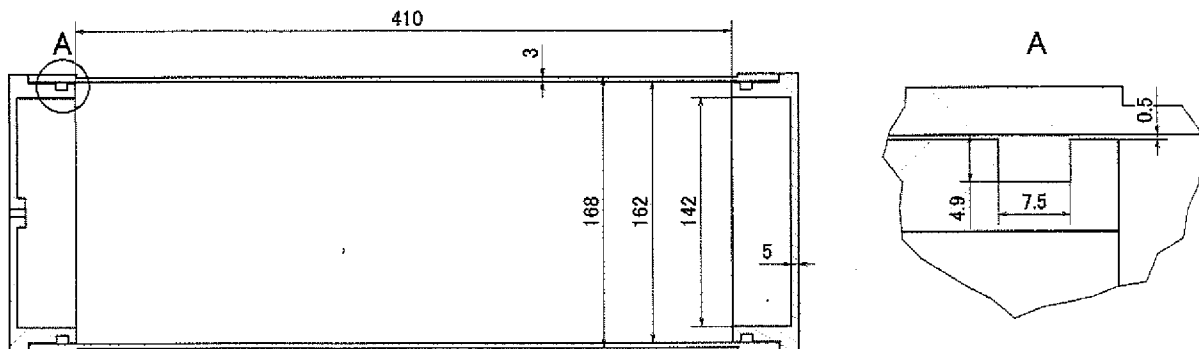


図9 設計したシリンダとOリング溝部

用可能な特殊ケーブル・コネクタを使用する必要がある。使用環境にもよるが比較的浅海における使用であれば、IP規格(International Protection : IEC60529, JIS C0920)におけるIP68なども十分使用できる。

2.3.2 スイッチ

水中ロボットにおいてはスイッチに関しても防水加工を施す必要がある。特に緊急停止スイッチなどは、外部から容易に操作できる必要があり、少数ではあるが水中用のものも市販されている。磁力でON/OFFが操作できるリードスイッチを使用すれば、水中用スイッチも簡単に作成できる。

図10に本ロボットで使用しているリードスイッチを用いた緊急停止用スイッチの機構を示す。稼動時は磁石がリードスイッチの近くにあるため導通しているが、押すことで磁石がスライドし停止する。

2.4 フェアリング

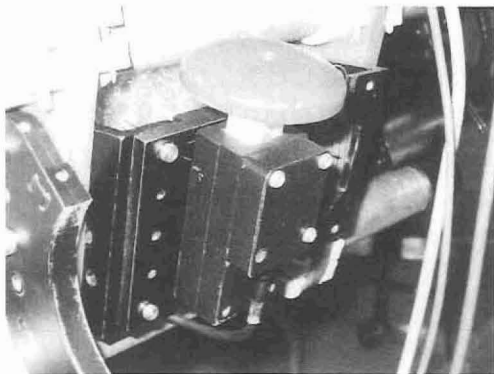
水中ロボットは水の抵抗の影響が大きいいため、非常に複雑な運動を行う。例えば前進方向の推力のみ

与えても、ロボットの形状に影響され抗力や揚力などが複雑に発生してしまう。そのため、ロボットの運動を制御する際には、流体力係数や付加質量など動特性を調べて運動方程式を導出する必要がある。これらの動特性の導出には実際にロボットを動かして近似的に求める手法が取られることが多い<sup>3)</sup>。

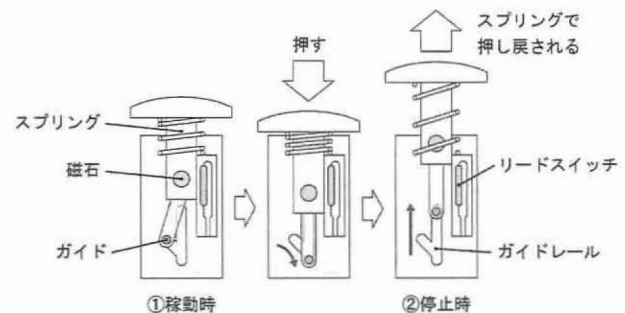
AquaBox IIでは、船体をフェアリングと呼ばれるカバーで覆い、航行時の効率を上げている。このフェアリング形状における動特性を導出するために、1/4サイズの模型を使用し、回流水槽において動特性試験を行った<sup>19)</sup>。試験の様子を図11に、実験より得られたデータの例として、図11中の $\alpha$ 、 $\beta$ を変化させたときの、流体抗力の変化を図12に示す。

3. マニピュレータの設計

海洋開発が進み、水中ロボットには試料サンプリングや海洋構造物の建築など、マニピュレータによる複雑な作業も期待されている。そこで、本研究室では様々な水中ロボットに対応できるマニピュレータの開発を行った<sup>20)</sup>。このマニピュレータは各り



a) 緊急停止スイッチの外観



b) 緊急停止スイッチの機構と動作

図10 リードスイッチを用いた緊急停止スイッチ

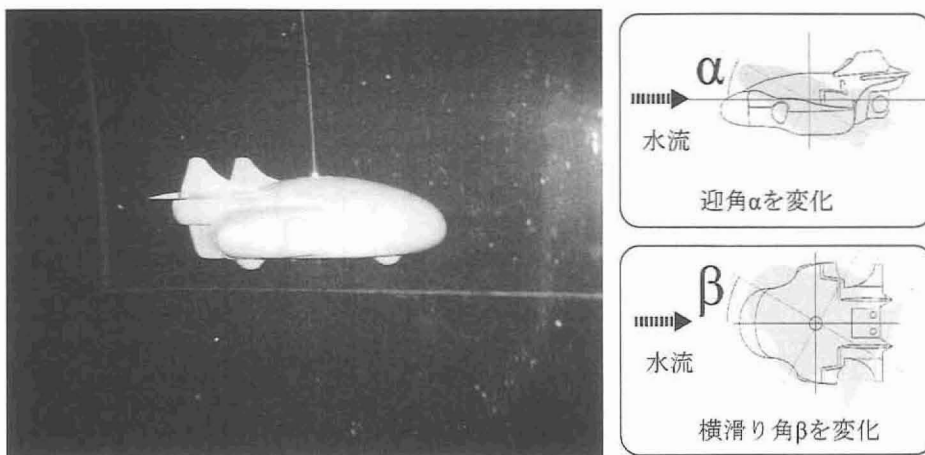


図11 回流水槽における動特性試験



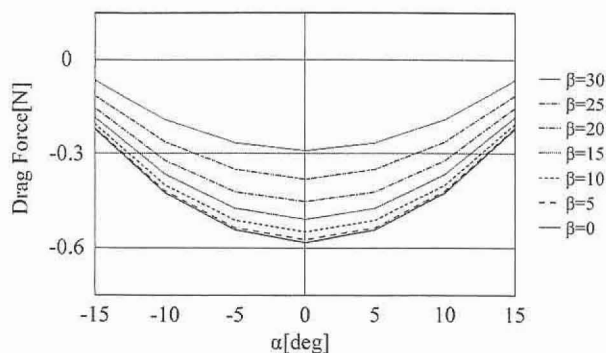


図12 仰角・横滑り角を変化させたときの流体抗力の変化

リンクにモータと制御用のモータドライバを内蔵しており、高い拡張性を持つ。また、モータドライバを内蔵しているため、水中ロボット側には電源供給と指令を送信するポートだけ準備すれば良いという利点がある。

### 3.1 マニピュレータの構造

開発したマニピュレータとその構造を図13に示す。図のようにモータ・モータドライバ及び関節機構を一つずつ組み合わせたモジュール構造を採用し、外部からのシリアル通信による指令値に基づいて関節角度を制御することが可能である。このモジュールを多数連結することで、多リンクのマニピュレータや複数腕を実現することが可能である。また連結部分はハンドなどのエンドエフェクタやセンサ、リンクなどのモジュールが簡単に取り付けられる構造としている。

### 3.2 マグネットカップリングによる防水加工

マグネットカップリングは磁力を利用し隔壁を通して力を伝達する機構であり、通常は大きなトルクを必要としないウォーターポンプやスラストの駆動軸に用いられている。マグネットカップリング(図13 b-④)を使用することにより、モータとモータドライバ(図13 b-②③)を含む耐圧容器(図13 b-①)が完全に水を遮断できる構造となる。

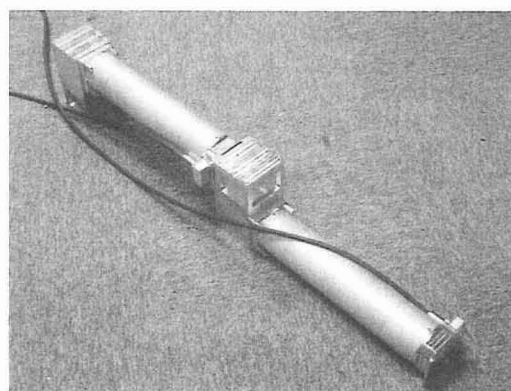
今回使用したマグネットカップリングは伝達トルクを重視して円筒型を選定したため、設計がかなり制限された。設計したマグネットカップリング機構を図14に示す。図に示されているとおり、出力軸の軸受が水密容器外部に露出しているのがわかる。このため、この軸受にはさびにくいステンレス製の密封型ボールベアリングを使用している。

### 3.3 メカニカルシールによる防水加工

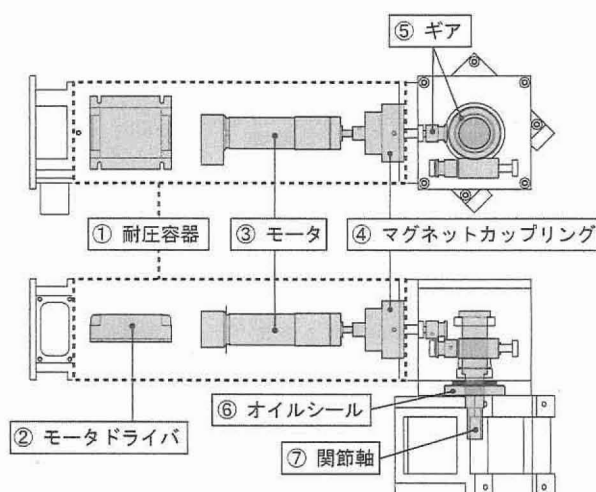
マグネットカップリングは十分なトルクを伝達で

きないため、伝達後にギア(図13 b-⑤)を用いて減速し、関節の駆動に十分なトルクを得る必要がある。そのためのギア機構の防水加工をオイルシール(図13 b-⑥)を用いて行った<sup>17)</sup>。

関節軸(図13 b-⑦)の機構部は耐圧方式のケース



a) マニピュレータの外観



b) マニピュレータの構造

図13 開発したモジュール型マニピュレータ

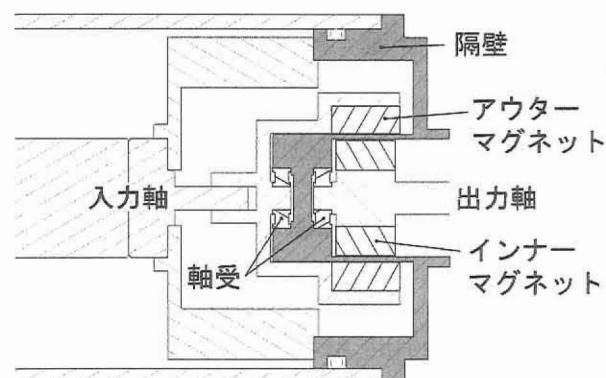


図14 マグネットカップリングを用いた防水加工部の設計

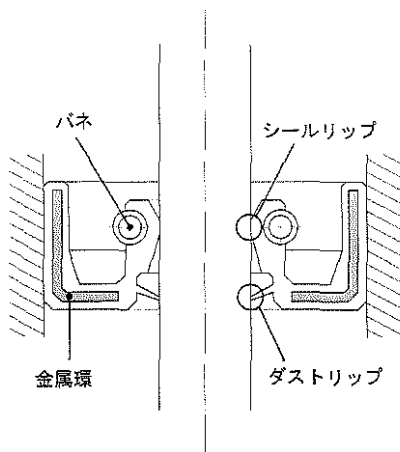


図15 オイルシールの構造

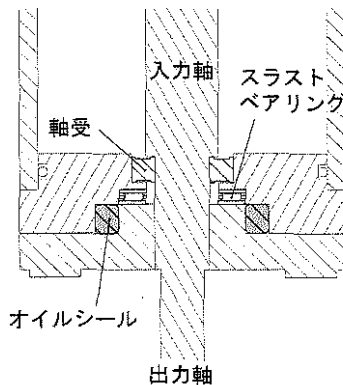


図16 オイルシールを用いた防水加工部の設計

であるため、耐圧用のオイルシールを選定する必要がある。今回はバネのあるシールリップとダストリップからなる構造(図15)で、使用限度圧力が0.5MPaのものを選定した。オイルシールを用いた防水設計を図16に示す。面粗度や公差などのオイルシールの組み込み方法については、製品の指定する条件に従った。

#### 4. おわりに

以上のように、拡張性や自由度を考慮して、それぞれモジュール化した構造を持つ水中ロボットとマニピュレータを開発した。特にAquaBox IIIは形態を自由に変更できる拡張性を生かし、競技規則に適合したシステムを構成し、アメリカで開催された自律型水中ロボットの競技会(Autonomous Underwater Vehicle Competition: AUV<sup>21</sup>)へ日本から初めて参加することができた。今後、開発した水中機器を用いて、実海域においてさんご礁調査や海中構造物調査に導入する予定である。

昨今では水中以外でも防水加工を施したロボットの必要性が増えている。下水道管の検査ロボットや災害救助ロボットなどの特殊環境下での作業を想定するロボットに限らず、近い将来、ロボットの高性能化による屋外への進出が期待されている。

#### 参考文献

- 1) (社)日本造船学会 海中技術専門委員会編：海中技術一般，成山堂，(1992)，pp.221-261.
- 2) 山本欣市，柿倉正義 編著：極限作業ロボット そのメカニズムと設計技術，工業調査会，(1992)，pp.263-295.
- 3) 浦環，高川真一 編著：海中ロボット総覧，成山堂，(1994)，pp.151-168.
- 4) 芦寿一郎，青池寛，中村恭之，斎藤実篤，倉本真，木下正高，森田澄人，角皆潤，小島茂明，ピエール・アンリ：遠州灘沖第2渥美海丘の地質構造と冷湧水，日本海洋研究開発機構，JAM-STECS 深海研究 第24号，(2004)，pp.1-11.
- 5) 大畑智海，江里口優，石井和男：沿岸域の観測を目的とした水中ロボットの開発，日本船舶海洋工学会講演会，2006W-G-6，(2006)，pp.19-20.
- 6) R. Stokey, A. Roup, C. Alt, B. Allen, N. Forrester, T. Austin, R. Goldsborough, M. Purcell, F. Jaffre, G. Packard and A. Kukulya: Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle, Proc. of Oceans'05, (2005).
- 7) 巻俊宏，近藤逸人，浦環，坂巻隆：自律型水中ロボット「トライドッグ1号」による防波堤の観測，Proc. of ROBOMECH2005, 2P1-S-013, (2005).
- 8) A. Bennett, J. Leonard and J. Bellingham: Bottom Following for Survey-Class Autonomous Underwater Vehicles, Proc. of UUST, (1995), pp.327-336.
- 9) 白崎 勇一：海底ケーブル観測用AUVの研究から商用化まで，日本造船学会誌，no.883，(2005)，pp.48-51.
- 10) Yoerger, Cooke and Slotine: The Autonomous Benthic Explorer ABE: An AUV Optimized for Deep Seafloor Studies, Proc. of Unmanned Untethered Submersible Technology, (1991), pp.60-70.
- 11) 浦環：自律型海中ロボットr2D4の製作と佐渡沖および黒島海丘海底観測，日本ロボット学会誌，Vol.22 no6，(2004)，pp.19-23.
- 12) B. Bingham, D. Mindell, T. Wilcox and A. Bowen: Integrating Precision Relative Positioning Into



- JASON/MEDEA ROV Operations, Marine Technology Society Journal, Spring 2006 Vol.40 No.1, (2006), pp.80-89.
- 13) 渡邊正之, 橋本菊雄: 10,000m級無人探査機「かいこう」の活躍と亡失”, 日本造船学会誌, no.883, (2005), pp22-25.
- 14) 青木太郎: 深海巡航探査機の研究開発, 電気通信大学紀要19巻1・2合併号, (2006), pp.7-17.
- 15) S.Lerner, D.Fornari and B.Walden: The Alvin Frame-Grabber System, DRAFT TECHNICAL REPORT, Wood Hole Oceanographic Institution, (2003).
- 16) 藤岡換太郎: 潜水調査船「しんかい6500」とその成果, 日本造船学会誌, no.883, (2005), pp3-7.
- 17) NOK株式会社編: これでわかるシール技術, 工業調査会, (1999).
- 18) 日本規格協会編: JISハンドブック ⑦機械要素 2007, 日本規格協会, (2007), pp.2201-2351.
- 19) 大畑智海, 北野まどか, 江里口優, 石井和男: 沿岸域観測水中ロボット“AquaBox II”の開発～運動特性の解析と制御系設計～, Proc. of ROBOMECH2006, 1P1-E30, (2006).
- 20) 石塚誠, 石井和男: 水中用マニピュレータの開発及びAUVへの搭載と制御, SI2006講演論文集, 3C1-4, (2006), pp.1002-1003.
- 21) Association for Unmanned Vehicle Systems International: AUVSI & ONR's 10<sup>th</sup> Autonomous Underwater Vehicle Competition, <http://www.auvsi.org/competitions/water.cfm>.
- 22) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 技術戦略マップ2007 ものづくり分野/ロボット分野, <http://www.nedo.go.jp/roadmap/index.html>.

石塚 誠



平成17年3月九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻修士課程卒業。現在、同博士課程に在籍中。平成18年11月ロボット開発を主業務とするRobo Plus ひびきの株式会社を設立、同代表取締役役に就任。水中ロボットの研究・開発に従事。計測自動制御学会、日本船舶海洋工学会学生会員。

石井 和男



平成3年東京大学工学部船舶海洋工学科卒業。平成8年東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学科専攻博士課程終了。博士(工学)。東京大学生産技術研究所研究員を経て、同年九州工業大学情報工学部講師、同助教授、平成14年九州工業大学大学院生命体工学研究科助教授。水中ロボット、歩行ロボットへのニューラルネットワークの適用に関する研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、船舶海洋工学会、IEEE等の会員。

大畑 智海



平成19年3月九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻修士課程卒業。博士(工学)。卒業後、平成19年4月大分キャンノン株式会社入社。在学時に水中ロボットの研究・開発に従事。平成18年7月、日本の大学として初めてAUVSIが主催するAUVCへ参加。