

2006 年度 博士論文

沿岸域における観測を目的とした
小型水中ロボットシステムの開発

九州工業大学大学院生命体工学研究科脳情報専攻

大畑 智海

指導教官 石井和男 助教授

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 代表的な水中ロボット	5
1.3 本研究の目的	15
1.4 本論文の内容	17
第2章 小型水中ロボットの開発	18
2.1 はじめに	19
2.2 Remotely Operated Vehicle “AquaBox I”	19
2.2.1 ロボットの設計方針	19
2.2.2 ロボットの設計・製作	19
2.2.3 ロボットのコンピュータシステム	32
2.2.4 ロボットのソフトウェアシステム	34
2.2.5 ロボットの全体システムの構成	34
2.3 Autonomous Underwater Vehicle “AquaBox II”	36
2.3.1 ロボットの設計方針	36
2.3.2 ロボットの設計・製作	36
2.3.3 運動特性解析	58
2.3.4 ロボットのコンピュータシステム	80
2.3.5 ロボットのソフトウェアシステム	86
2.3.6 ロボットの全体システムの構成	87
2.4 Autonomous Underwater Vehicle “AquaBox III”	88
2.4.1 ロボットの設計方針	88
2.4.2 ロボットの設計・製作	88
2.4.3 ロボットのコンピュータシステム	101
2.4.4 ロボットのソフトウェアシステム	104
2.4.5 ロボットの全体システムの構成	108
第3章 小型水中ロボットを用いた水槽実験	109
3.1 はじめに	110
3.2 AquaBox I	110
3.2.1 PID 制御の適用	110
3.2.2 実験	111
3.2.3 考察	114
3.3 AquaBox II	115

3.3.1	実験	115
3.3.2	考察	115
3.4	AquaBox III	116
3.4.1	PID 制御の適用	116
3.4.2	実験	116
第 4 章	小型水中ロボットを用いた水中調査	127
4.1	はじめに	128
4.2	位置情報の取得システム	129
4.2.1	位置情報の取得	129
4.2.2	画角測定	130
4.2.3	レーザーの抽出	131
4.2.4	クロスレーザーを用いた位置情報取得	132
4.3	モザイク画像生成システム	133
4.3.1	はじめに	133
4.3.2	モザイク生成の過程	133
4.3.3	システム概要	135
4.3.4	静止画像の取得	136
4.3.5	画像の補正	137
4.3.6	特徴点抽出と特徴点对応付け	137
4.3.7	画像の張り合わせ	137
4.4	小型 ROV“RTV100” への搭載	139
4.4.1	RTV100 の概要	139
4.4.2	画像取得システムの設計方針	140
4.4.3	画像取得システムの設計・製作	141
4.4.4	実験場所	143
4.4.5	画像取得システムを搭載した“RTV100”による実験	144
4.4.6	実験結果	145
4.4.7	実験の考察	148
4.5	“AquaBox I”による観測	149
4.5.1	観測システム“AquaBox I”	149
4.5.2	ケーソン撮像調査	150
4.5.3	調査結果	151
4.5.4	考察	152
4.6	“AquaBox II”による観測システム	153
4.7	“AquaBox III”による観測	154
第 5 章	考察および結論	158

参考文献一覽	163
Appendix	166

図表一覧

Fig.1-1	Concept of Project AquaBox	...	4
Fig.1-2	Classification of underwater robots	...	5
Fig.1-3	ALVIN (WHOI)	...	9
Fig.1-4	ABE(WHOI)	...	9
Fig.1-5	Odyssey II (MIT)	...	10
Fig.1-6	REMUS600 (WHOI)	...	10
Fig.1-7	Jason (WHOI)	...	10
Fig.1-8	HYSUB5000 (ISE)	...	11
Fig.1-9	HEMIRE (KORDI)	...	11
Fig.1-10	SHINKAI 6500 (JAMSTEC)	...	12
Fig.1-11	KAIKO (JAMSTEC)	...	12
Fig.1-12	R-ONE (IIS)	...	13
Fig.1-13	r2D4 (IIS)	...	13
Fig.1-14	Aqua Explorer 2000 (KCS)	...	14
Fig.1-15	Tri-Dog 1 (IIS)	...	14
Fig.1-16	Target of development system	...	16
Fig.2-1	Image of AquaBox I	...	20
Fig.2-2	Appearance of AquaBox I	...	21
Fig.2-3	Arrangement of devices	...	22
Fig.2-4	Cylinder	...	25
Fig.2-5	Lid of pressure hull	...	25
Fig.2-6	Lid of pressure hull (connector side)	...	25
Fig.2-7	Design of lid, Left : Connector side Right : Vents	...	25
Fig.2-8	Frame (Right-waterproof)	...	26
Fig.2-9	Doppler Velocity Log	...	28
Fig.2-10	Angular Velocity Sensor	...	28
Fig.2-11	Depth Sensor	...	28
Fig.2-12	Thruster ~Relationship between Voltage and Force~	...	29
Fig.2-13	Power supply installation system diagram	...	31
Fig.2-14	System configuration diagram	...	35
Fig.2-15	Image of AquaBox I I (Inside)	...	37
Fig.2-16	Appearance of AquaBox I	...	38
Fig.2-17	Arrangement of devices	...	39

Fig.2-18	Cylinder	...	41
Fig.2-19	Lid of pressure hull (connector side)	...	41
Fig.2-20	Comparative size of lid (Left-Hull1,Right-Hull2)	...	41
Fig.2-21	Communication System	...	44
Fig.2-22	Ethernet Converter(WLA2-G54C)	...	45
Fig.2-23	Appearance of SEATEL(Left-Land station Right-Underwater station)	...	45
Fig.2-24	System architecture of SEATEL	...	46
Fig.2-25	Power supply installation system diagram	...	49
Fig.2-26	Li-po Battery	...	50
Fig.2-27	Battery pack	...	50
Fig.2-28	Arrangement of power connector pin	...	51
Fig.2-29	Flow chart of protection circuit	...	53
Fig.2-30	Power circuit schematic	...	54
Fig.2-31	Protection circuit	...	55
Fig.2-32	Floating buoyant material	...	58
Fig.2-33	Robot coordinate system	...	63
Fig.2-34	Model of AquaBox II (Left-Appearance, Right-Inside of pool)	...	64
Fig.2-35	Water tunnel	...	64
Fig.2-36	Experimental Instrument	...	65
Fig.2-37	NACA0012	...	65
Fig.2-38	Attitude of robot	...	67
Fig.2-39	Angle of elevator	...	67
Fig.2-40	Side Force with β	...	71
Fig.2-41	Side Force with β (First-order approximation)	...	72
Fig.2-42	Drag Force with α	...	73
Fig.2-43	Lift Force with α	...	74
Fig.2-44	Drag Force with α (Quadratic approximation)	...	75
Fig.2-45	Lift Force with α (First-order approximation)	...	76
Fig.2-46	Side Force with β (Quadratic approximation)	...	77
Fig.2-47	Drag Force with α (Quadratic approximation)	...	78
Fig.2-48	Lift Force with α (First-order approximation)	...	79
Fig.2-49 (a)	Architecture of the control board (Layout)	...	82
Fig.2-49 (b)	Architecture of the control board (Connection diagram)	...	83
Fig.2-50	Control board appearance	...	84
Fig.2-51	System architecture (AquaBox II)	...	87
Fig.2-52	AquaBox III appearance (CAD image)	...	89

Fig.2-53	AquaBox III appearance	...	90
Fig.2-54	Configuration of AquaBox III	...	90
Fig.2-55	Bulkhead	...	93
Fig.2-56	Frame structure (AquaBox III)	...	93
Fig.2-57	Velocity - Output voltage	...	95
Fig.2-58	Attitude sensor	...	95
Fig.2-59	Configuration of ultrasonic range sensors	...	96
Fig.2-60	Omni-lens camera	...	96
Fig.2-61	Acquisition image (Omni-lens camera)	...	97
Fig.2-62	Downward camera	...	97
Fig.2-63	Input command (voltage) - Thrust force	...	99
Fig.2-64	Power supply installation system diagram (AquaBox III)	...	100
Fig.2-65(a)	Architecture of the control board (Layout)	...	102
Fig.2-65(b)	Architecture of the control board (Connection diagram)	...	103
Fig.2-66	Workspace of ICONNECT	...	105
Fig.2-67	Developed decision making system using ICONNECT	...	106
Fig.2-68	AquaBox III Graphic User Interface	...	107
Fig.2-69	System Architecture (AquaBox III)	...	108
Table 2-1	Dimension of AquaBox I	...	21
Table 2-2	Instruments on AquaBox I	...	22
Table 2-3	Initial setting	...	23
Table 2-4	Specifications of O-Ring	...	24
Table 2-5	Dimensions of AquaBox II	...	38
Table 2-6	Instruments on AquaBox II	...	39
Table 2-7	Specifications of O-Ring	...	40
Table 2-8	Specifications of SEATEL	...	46
Table 2-9	Specifications of Battery Pack	...	51
Table 2-10	Specifications of Water tunnel	...	65
Table 2-11	Specifications of PIC18F8720	...	81
Table 2-12	Specifications of Control board	...	81
Table 2-13	Specifications of Computer	...	85
Table 2-14	Specifications of AquaBox III	...	91
Table 2-15	Specifications of O-Ring (Hull3, Hull4)	...	92
Table 2-16	Specifications of Velocity sensor	...	94
Table 2-17	Specifications of Thruster	...	98

Fig.3-1	Angular Velocity(Yaw)	...	112
Fig.3-2	Moment(Yaw)	...	112
Fig.3-3	Depth Data	...	113
Fig.3-4	Force(Heave)	...	113
Fig.3-5	Heading data(Heading, Moment)	...	119
Fig.3-6	Depth data(Depht, Force)	...	119
Fig.3-7	Distance between robot and wall using range sensor	...	120
Fig.3-8	Heading (Heading, Moment)	...	121
Fig.3-9	Surge (Velocity, Force)	...	121
Fig.3-10	Heave (Depth, Force)	...	122
Fig.3-11	Experimental results of path following (Rectangular)	...	123
Fig.3-12	Heading (Heading, Angular Velocity, Force)	...	124
Fig.3-13	Surge (Velocity, Acceleration Force)	...	125
Fig.3-14	Heave (Depth, Rate, Force)	...	126
Table 3-1	Ziegler Nichols ultimate sensitivity method	...	111
Table 3-2	PID-Gain	...	116
Table 3-3	Sequence of Behavior in the Mission	...	123
Fig.4-1(a)	Position relation between a wall and a camera	...	129
Fig.4-1(b)	The position of laser in obtained image	...	129
Fig.4-2	Estimation of the distance	...	130
Fig.4-3	Estimation of the angle	...	130
Fig.4-4	Measurement of field angle	...	131
Fig.4-5	Source image	...	131
Fig.4-6	R element – G element	...	131
Fig.4-7	Hough-Transform	...	132
Fig.4-8	Line detection using Hough - Transformation	...	132
Fig.4-9	Flowchart of Mosaic image processing	...	134
Fig.4-10	Acquisition images	...	136
Fig.4-11	Correction images	...	137
Fig.4-12	Image combine	...	137
Fig.4-13	Mosaic image	...	138
Fig.4-14	Mosaic image (Affine transfomation)	...	138
Fig.4-15	MitsuiRTV100	...	140

Fig.4-16	Measurement system	...	141
Fig.4-17	Measurement system mounted on RTV100	...	142
Fig.4-18	Kamaishi port	...	143
Fig.4-19	Caisson top view	...	144
Fig.4-20	Caisson side view	...	144
Fig.4-21	Motion image of RTV100	...	144
Fig.4-22	Put in sea	...	145
Fig.4-23	Mission start	...	145
Fig.4-24	Mission	...	145
Fig.4-25	Experimental devices	...	145
Fig.4-26	Acquisition image 1	...	146
Fig.4-27	Acquisition image 2	...	146
Fig.4-28	Acquisition image 3	...	146
Fig.4-29	Acquisition image 4	...	146
Fig.4-30	Mosaic image	...	147
Fig.4-31	Measurement system mounted on AquaBox I	...	149
Fig.4-32	Motion of AquaBox I	...	150
Fig.4-33	Survey the caisson(AquaBox I)	...	150
Fig.4-34	Acquisition data	...	151
Fig.4-35	Mosaic image	...	151
Fig.4-36	General layout of Arena	...	156
Fig.4-37	Layout of the Docking station and Indicator light	...	156
Fig.4-38	General layout for the pipeline inspection and target bin	...	157
Fig.4-39	Surface zone	...	157
Table 4-1	Number of acquisition data	...	146
Fig.5-1	Position of developed system	...	162

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 研究背景

ロボットが産業界で実用化されはじめて 20 年以上経過している。この間にロボットは、産業界から我々に身近な家庭へと浸透しつつある。これはロボットがより高知能化していることを意味する。産業界のみで活用されていた頃は、ロボットの頭脳は知能というものには程遠く、我々人間にとっては危険な存在であり、人間との共存を想像できる状況ではなかった。しかしながら現在では、部屋の掃除を行うロボット[1]、ホームセキュリティロボット[2]、エンターテインメントロボット[3]、さらには人間の心を癒すロボット[4]まで登場しているなど、人々の生活の一部として利用されるまでに普及しており、HRP プロジェクト[5][6]に見られるように“人との共存”がテーマとなっている。コンピュータ技術の発展にともない、我々人間にとって極限環境といわれる宇宙、水中、原子炉内部[7]などでは、ロボットを使用した作業が期待されている。宇宙開発では、1997 年火星の地上にロボット（ローバー）を送り込み、地上探査に成功している。このロボット（Mars Path-Finder）[8]は、地球からミッションの指令を受け取り、ミッション達成までロボット自身が判断し行動する。海洋開発においては、完全自律型的水中ロボット(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)が運用され、海底観測、生態調査等、幅広い分野で活躍している[9]。

本稿では水中で動作するロボットを対象としているが、水中とは我々人間にとってどのような環境であろうか。人間は、専用の潜水機材がなければ水中で息をすることはできない。また、水深が 10[m]増す毎に 1 気圧増加し、水圧による減圧症や窒素酔いと呼ばれる窒素中毒に陥る。減圧症は、最悪の場合死に至る場合もある。窒素中毒においては、死に至ることはないが計算力といった水中で重要な判断力を鈍らせる。それにより正常な判断ができず事故が起きることがある。このように人間にとって水中で活動することは、常に危険と隣り合わせの状態にある。一方、ロボットにとって水中とはどのような環境であろうか。陸上であれば無線でロボットをリモートコントロールすることができる。しかしながら水中では電波が到達しても 4[m]程度と実海域で作業することを考えると有効とはいえない。通常は、超音波等の音響によりロボットとの通信を行うが、リアルタイムでロボットを制御できるほど高速な通信ではない。同様にカーナビなどのように GPS を利用した自己位置同定法は、水中では使用できない。

次にロボットに搭載する電子機器について考える。ロボットには電子機器が

搭載されているが、それらを水中で使用するためには水、圧力から保護する耐圧殻が必要となる。同様に耐圧殻から通信・電源用などのケーブルを引き出すためには、専用の水中コネクタが必要である。このように水中環境でロボットを使用するには、ロボット単体の開発だけでなくそれらを保護する耐圧殻なども考慮する必要がある。

海洋において水中ロボットはどのような分野での活躍が望まれているのであろうか。1950年代に米国海軍が観察専用の無人潜水機の開発を開始し、機雷の回収を目的として1958年に建造された米国海軍の無人潜水機 CURV-I[10]は、1966年に米国爆撃機が誤ってスペイン沖水深868[m]に投下した水爆を回収した。その後、石油生産設備などでは設備の検査や水中ダイバーの監視など必要不可欠なものとなっている。近年では、AUVが海底火山の調査を行うなど本格的に実用化されつつある[11-15]。

以上のように水中で作業を行うには、水中ロボットが必要不可欠な存在となっており、それらの技術も確立されつつある。今後は、水中ロボットを含めたシステム全体が小規模かつ簡易に運用できるシステム開発が望まれると考えられる。水中ロボットのミッションにおいて、潜航深度が大きければ、システム規模が大きくなってしまふ。このような水中調査システムは、専用のクレーンが搭載された支援母船、多くの技術者が必要であるなど調査の内容に関わらず大規模なシステムが必要となる。ここで支援母船の役割についてまとめてみると以下のようなになる[16]。

- ・ 輸送手段
- ・ 着水・揚収
- ・ 海上整備工場
- ・ 司令塔、海上研究所

輸送手段としての役割は、ロボットを運用する際の堤防からの着水/揚収以外の目的海域までのロボット輸送である。ロボットが小型もしくは複数のパーツに分割されモジュール化されていれば、専用の輸送船を用いなくとも、現地近くの港まで空輸し、小型の船舶を使用して運用することも可能である。着水/揚収は、波浪の影響を受けやすく運用する際に最も困難で危険な作業である。従って着水/揚収用のクレーン設備には、さまざまな種類が存在する。

着水/揚収設備は、特定の船舶にしか搭載されておらず、コストや日程の制限があり、手軽に海洋調査を実施できない。ここでロボットが人の手で簡単に着水/揚収できる水中観測機器が存在すれば専用のクレーンのついた支援母船は不必要となる。支援母船は、海上整備工場の機能も有している。一度海洋へ調査をはじめると1日で調査が終わるわけではなく、数日から数週間かかる。その期間中は運用面から考慮してもロボットの整備は海上で行う必要がある。以上の

ようなシステムは、大洋で調査、観測する場合には必要であるが、沿岸域での観測ではロボット自身が小型であれば、陸上から近いという意味でこのような専用の支援母船は必要としない。従って浅海域を対象とした作業を行うロボットシステムは規模を小さくすることができる。

日本は、島国であり昔から漁業の盛んな国であった。リアス式海岸などの地形を利用した防波堤や消波ブロックなど多くの構造物が建設されている。防波堤は、漁港としてだけでなく、自然災害から国土を守る重要な役割を担っている。これらは、昔から漁港周辺に漁村を形成し、生活してきた漁師により管理、維持がなされてきた。一方で、近年漁港などでは、過疎化が進み、漁業人口が減少している[16]。それに伴って今後は、防波堤などの管理が不十分な地域が発生するのは必定である。沿岸域をしてみると、さんご礁の白色化現象、オニヒトデの大量発生などそれほど大水深ではないが広範囲におよぶ調査、観測が必要となってきた。これらの調査に大規模なシステムを適応することは、効率性を考えると望ましいものではない。そこで本研究では、沿岸域での作業を行うシステムの開発を考えている(Fig.1-1)。またこのシステムは、沿岸域のさまざまな作業に対応でき、輸送が簡易である必要がある。沿岸域での作業としては、防波堤などの水中構造物の観測、さんご礁の観測などの広範囲におよぶ作業が考えられる。従って本研究で考えるシステムは、水中構造物の詳細な調査等は、ROV(Remotely Operated Vehicle)で行い、広範囲の調査等は AUV で行う、というようなロボットシステムで実現することである。さらには、調査以外にも潜水士の監視、および補助等まで可能なシステムの実現を目指す。

以上のように本研究には、社会的ニーズのある研究である。また、学術面でみても水中ロボットの分野では、モジュール化によるロボットの形体変更という新たな技術開発を行うものである。

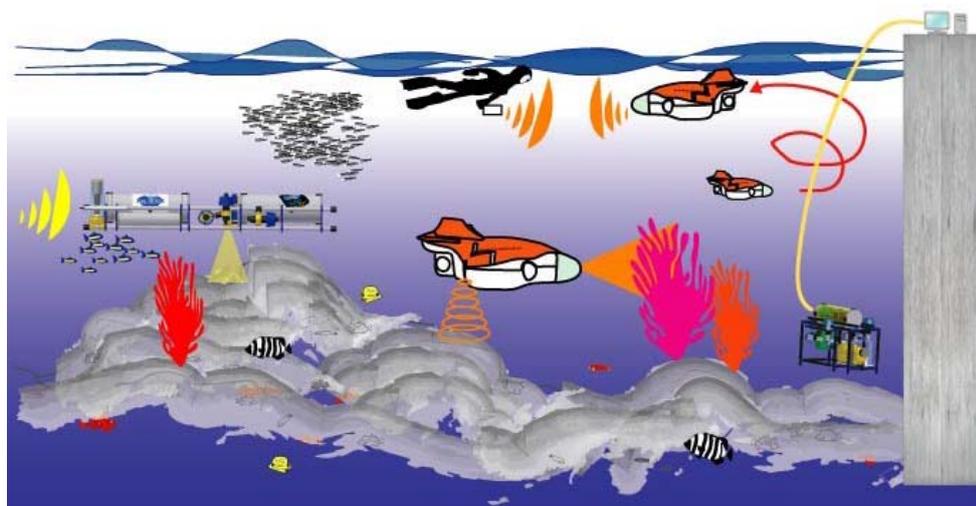


Fig.1-1 Concept of Project AquaBox

1.2 代表的な水中ロボット

本節では、過去から現在に至るまでの水中ロボットについていくつか紹介する。水中ロボットには、有人潜水艇を含めるといくつかに分類することができる。分類は、以下のように分類することができる(Fig.1-2)。

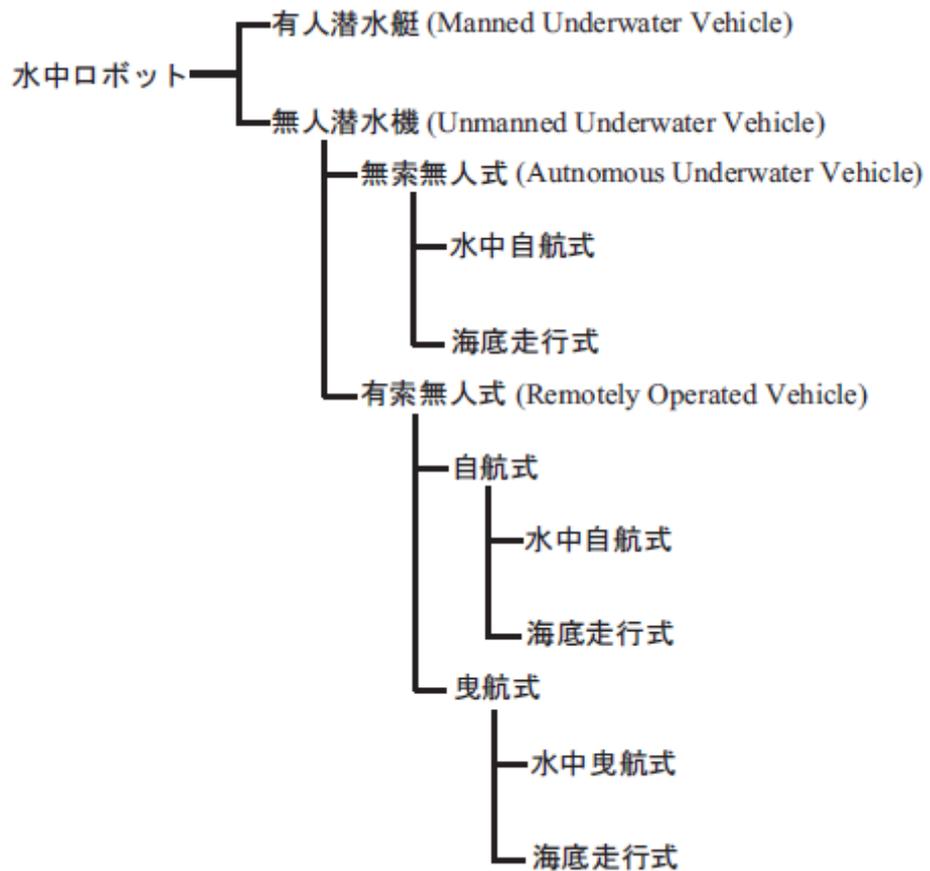


Fig.1-2 Classification of underwater robots

<海外の水中ロボット>

ALVIN[20]は、1964年に米国海軍が開発した有人潜水艇である。所属は、米国海軍であるが、運用は米国のウッズホール研究所(Woods Hole Oceanographic Institution : WHOI)が行っている。潜航回数 3700 回を超え現在も世界で活躍している有人潜水艇のひとつである。全長 7[m]、高さ 3.7[m]、耐圧容器には、チタニウム合金を使用し、最大水深 4500[m]である。搭乗可能人数は、パイロットも含め 3 人である。潜航時間は 6 時間から 10 時間である。沈没した TITANIC 号を 1986 年に発見したのは有名な話である。現在もさまざまな研究に運用されている(Fig.1-3)。

ABE(Autonomous Benthic Explorer)は、WHOI で 1993 年に開発された AUV である。ロボット上部に浮力材が搭載され、下部に Li-ion 電池を搭載している。全長 3.0[m]、全幅 2.0[m]、高さ 2.5[m]、重量 550[kg]である。最大深度 5000[m]まで潜航可能である。スラスタは前進方向に 3 基、上下方向に 2 基、水平方向に 2 基搭載している。ABE は、開発されてから 200 回程度のミッションを遂行している。特に 1996 年から 2006 年にかけて 155 回のミッションを行い、観測距離 2500[km]、平均深度 2000[m]で数々の実績を上げている。WHOI では、現在 ABE の後継の水中ロボットを開発中である。このロボットは、本研究で開発しているロボット同様に AUV、ROV としても使用できるような設定としている。(Fig.1-4)

マサチューセッツ工科大学(MIT : Massachusetts Institute of Technology) Sea Grant では、1995 年に Odyssey II シリーズ[21]を 5 機製造しておりそのうちの 2 基を先述の WHOI やサンディエゴ海軍研究所等に分配されている。2 基のうちの 1 機 Odyssey IIc は、2000 年に改良され、全長 2.2[m]、空中重量約 200[kg]である。電源には、Li-polymer バッテリーが採用され 8 時間、44[km]の潜航が可能である。センサには、高画質カメラ、サイドスキャンソナー等が搭載している。運動の制御はエレベータおよびラダーを用いて行う(Fig.1-5)。

REMUS(Remotely Environmental Monitoring UnitS)[22]は、WHOI で開発され REMUS100、REMUS600、REMUS6000 などがある。REMUS はローコスト型の AUV である。REMUS100 は、全長 1.60[m]、重量 37[kg]、潜航深度 100[m]で ADCP、CTD、サイドスキャンソナーを搭載している(Fig.1-6)。

Jason/Medea[23]は、Institution's Deep Submergence Laboratory が開発した ROV である。運用は先述した WHOI である。全長 3.4[m]、全幅 2.4[m]、高さ 2.2[m]、

重量約 3.7[t]で最大潜航深度 6500[m]である。ロボットは 6 基のスラストにより制御され、6 自由度のマニピュレータも搭載している。またカメラを 8 基搭載している(Fig.1-7)。

カナダの ISE(International Submarine Engineering Ltd.)は、1983 年から自律型水中ロボット ARCS を開発している[24]。現在は、AUV、ROV(HYSUB)シリーズとして海底掘削作業サポート ROV、作業用 ROV などを製品化している。HYSUB5000 は、全長 2.54[m]、全幅 1.52[m]、高さ 1.65[m]、重量約 2.2[t]で最大水深 5000[m]まで潜航可能である。ロボットには、5 自由度と 7 自由度のマニピュレータが搭載されている。また、ISE では、水上無人機などの開発も行っている(Fig.1-8)。

韓国の MOERI(Maritime & Ocean Engineering Research Institute)、Korea Ocean Research & Development では、2001 年から 6000[m]級の ROV “HEMIRE” の開発を行っており、2006 年に水深 5600[m]に到達している[22] (Fig.1-9)。

<国内の水中ロボット>

しんかい 6500[26]は、海洋研究開発機構で 1990 年に開発された有人潜水艇である。潜航深度は、6500[m]で有人の潜水艇としては世界で最も深く潜航することが可能である。全長 9.5[m]、重量 25.8[t]である。しんかい 6500 は、耐圧球の直径 2[m]で材料はチタニウム合金である。マニピュレータは、7 自由度のものが 2 基搭載されている。2003 年度にオーバーホールで銀亜鉛電池からリチウムイオン電池に換装された。現在は、年間 60 回程度の調査、観測潜航を行っている(Fig.1-10)。

かいこう[27]は、海洋研究開発機構で 1995 年に開発され 1 万メートルまで潜航可能な ROV である。当初の開発目的は、前述のしんかい 6500 の事前調査と救難を行うためであった。しかしながらしんかい 6500 の救助方式が変更となり現在は、支援母船をかいれいとして海溝域の観測を行う潜水きとして活躍している。2003 年に室戸岬沖で二次ケーブル破断によりビークルを亡失。現在は、7000[m]級無人潜水機を改造し、ランチャーに搭載してかいこう 7000 として運用中である。ランチャー部の全長 5.2[m]、重量 5.3[t]であり最大 11000[m]まで潜航可能である。ランチャーには、サイドスキャンソナーなどが搭載されている。ビークル部は、全長 2.8[m]、重量 2.7[t]である。6 自由度のマニピュレータが 1 基搭載されており、カメラが 5 台搭載されている(Fig.1-11)。

r2D4[28-30]は、東京大学生産技術研究所で2003年に開発されたAUVであるR-ONE(Fig.1-11)ロボットの後継機である。全長4.6[m]、重量1.6[t]で最大深度4000[m]である。電源はリチウムイオン電池で航続距離60[km]である。実績としては、明神礁のカルデラ観測などを行っている(Fig.1-13)。

Aqua Explorer 2000[31]は、KDDI研究所で開発された海底ケーブルの保守点検を目的としたAUVである。全長3[m]、重量300[kg]で最大2000[m]まで潜航可能である。電源は、リチウムイオン電池で連続航続時間は、16時間である。現在は、ケーブルの点検以外にもハイドロフォンをロボットに搭載し、鯨の追跡等も行っている(Fig.1-14)。

Tri-Dog I[31-34]は、1999年に東京大学生産技術研究所で開発され、実用化を目指したAUVである。全長1.85[m]、重量180[kg]、最大水深100[m]である。Tri-Dog Iは、岩手県釜石港において世界初のケーソンの自動観測に成功している[28]。また現在では、鹿児島県錦江湾の水深100[m]付近で熱水鉱床の観測に成功している(Fig.1-15)。

以上のように現在、世界中で水中ロボットの開発が行われ、自律型水中ロボットも次々と成果をあげている。またロボットの規模も高機能で小型になりつつある。これは、コンピュータなどの技術の発展に伴うものである。一方、支援母船について考えてみると上にあげたロボットは、特定の支援母船を必要とするロボットが多い。特定の支援母船を必要しないが、人力だけでは、運用が不可能なロボットがほとんどである。今後の研究動向のひとつとして、高機能で小規模なロボットシステム、簡易に運用できるシステムの開発が考えられる。



Fig.1-3 ALVIN

(http://www.whoi.edu/marops/vehicles/alvin/index_en8.html)



Fig.1-4 ABE

(<http://www.whoi.edu/sbl/liteSite.do?litesiteid=4050&articleId=6343>)



Fig.1-5 OdysseyII

(<http://auvlab.mit.edu/vehicles/vehiclespec2x.html>)



Fig.1-6 REMUS600

(<http://www.whoi.edu/sbl/image.do?id=22227&litesiteid=7212&articleId=11313>)



Fig.1-7 Jason

(<http://www.whoi.edu/marops/vehicles/jason/index.html>)



Fig.1-8 HYSUB5000
(<http://www.ise.bc.ca/hysub5000j.html>)



Fig.1-9 HEMIRE
(KORDI,2005 Annual Report より)



Fig.1-10 しんかい 6500

(<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/gallery/yujin/6500.html>)



Fig.1-11 かいこう (亡失以前)

(<http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/gallery/mujin/kaiko.html>)



Fig.1-12 R-One Robot
(<http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/>)



Fig.1-13 r2D4
(<http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/>)



Fig.1-14 AquaExplorer2000
(<http://www.k-kcs.jp/japanese/aqua2000-j.html>)

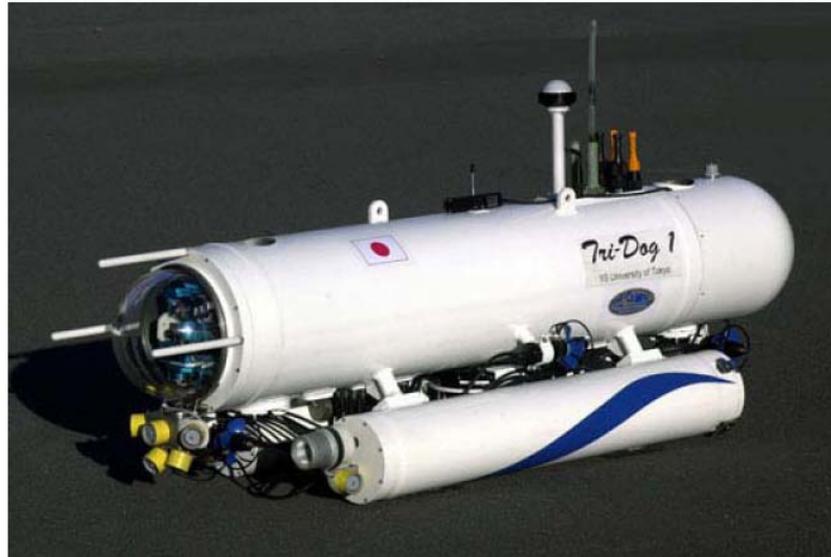


Fig.1-15 Tri-Dog 1
(<http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/>)

1.3 本研究の目的

1.2 節において紹介した水中ロボットは近年、世界中で研究開発されている代表的な水中ロボットである。これらのロボットを重量と潜航可能深度に分類すると Fig.1-16 のようになる。横軸にロボットの重量、縦軸に潜航可能深度とすると大深度まで潜航可能なロボットの重量は、数百キロから数トンあることが分かる。これらのロボットを運用するには、1.1 節で挙げたような支援母船が必要となる。本研究では、支援母船等を必要としない沿岸域での観測を目的とした小型水中ロボットシステムの開発を目指している[17][18]。開発するシステムは、潜航可能深度を百メートル程度、重量は数人で運用可能となるように数十キロとする(Fig.1-16)。本研究では、これを AquaBox プロジェクト[19]として位置づけている。AquaBox プロジェクトのコンセプトは以下のとおりである。

- ・特定の支援母船を必要とせず、2、3 人で運用できるシステムとする。
- ・ミッションに応じてロボットの形体を組み替え可能とする。

支援母船を必要としないシステムとし、システムに携わる人員を抑えることで運用面の向上を図ることができ、同時にコスト削減につながる。さらに同じシステムでミッションに応じてロボットの形体を組み替え可能となれば、ミッション全体を効率よく実施でき、さまざまな作業に対応可能となる。

以上のようなシステムを構築することが本研究の目的である。

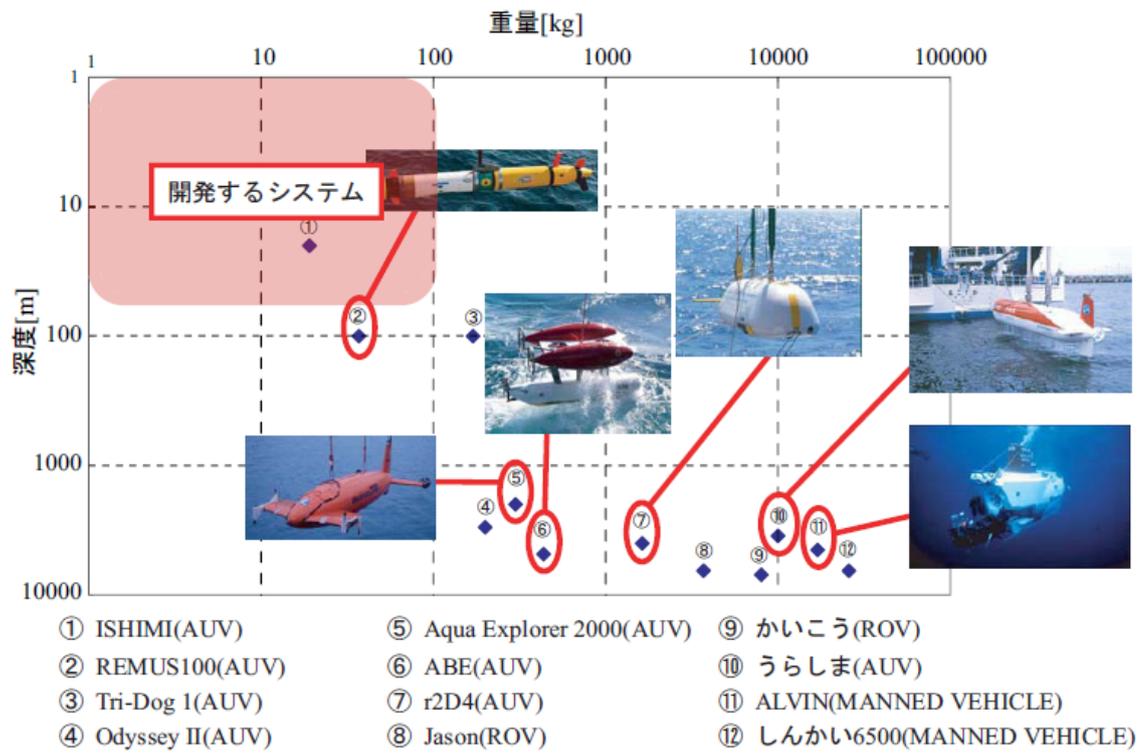


Fig.1-16 Target of development system

1.4 本論文の内容

本研究では、はじめに ROV、AUV など目的の異なったロボットシステムの開発をおこなった。2 章では、開発した “AquaBox I”、“AquaBox II”、“AquaBox III” の仕様等について述べる。3 章ではそれらのロボットの性能試験について述べる。4 章では、これらのロボットを利用した観測システムの構築、可能性、実海域において実験した結果、考察について述べる。5 章では、本研究の考察と結論について述べる。

第2章

小型水中ロボットの開発

第2章 小型水中ロボットの開発

2.1 はじめに

本研究の目的のひとつは、小規模な水中ロボットシステムを構築することである。開発する水中ロボットのプラットフォームのコンセプトは、「支援母船を必要としないシステム」とし、システムに携わる人員を抑えることにより運用面の向上を図り、同時にコスト削減を目的としている。さらに同じシステムでミッションに応じてロボットの形体を組み替え可能であれば、ミッション全体を効率よく実施でき、さまざまな作業に対応可能となる。従って本論文の水中ロボットシステムは ROV 及び AUV 両方の形態で使用できる設計とした。

本章では、開発したロボットシステム、それぞれに対しての設計方針、仕様について述べる。

2.2 Remotely Operated Vehicle “AquaBox I”

2.2.1 ロボットの設計方針

開発するロボットは、以下に示すような仕様とする。

- ・高速で航行する必要がないかわりに定点で留まっていられること
- ・2, 3人で実験を行えるような規模にすること
- ・テストベッドとしても運用できるように、拡張性を持たせること

2.2.2 ロボットの設計・製作

AquaBox I は、全長 0.85[m]、乾重量約 40[kg]でモータドライバ等の機器を格納するアルミニウム製シリンダ、DVL(Doppler Velocity Log)、マリパックおよびその他の機器をフレームに取り付けたオープンフレーム構造のロボットである。また、本研究では AquaBox I の設計を CAD ソフト Autodesk Inventor(AIP8)を使用して行った。AIP8 は 3次元形状を有する物体の設計が容易であり、アセンブリや 3面図を作成することもできる。AIP8 によって設計した AquaBox I を Fig.2-1 に示す。

実際に製作した AquaBox I の外観を Fig.2-2 に、主要寸法を Table 2-1 に示す。圧力容器等の形状設計や配置は、高速での航行を考慮しないために流体動力学的な特性は重視せず、機器の配置および製作の容易さを考慮して行った。従って耐圧容器をシリンダ形状とした。また、上部に浮力の大きいシリンダを配置することにより、重心位置と浮心位置間をできるだけ距離をとることでピッチとロールに関する静的な安定性を確保した。

推進器として5基のスラストを持ち、そのうち2基は前進後退および差動による回頭用に、1基は左右への平行移動用に、残りの2基は上下方向用で4自由度に関する運動制御が可能である。外部認識用のセンサとしては、レーザーとカメラを用いた位置情報取得システム、ロボットの方角、速度および軌道を取得できる DVL(Doppler Velocity Log)、また深度センサも搭載している。AquaBox I の機器配置の様子を Fig.2-3 に、主要装備品一覧を Table 2-2 に示す。以下に AquaBox I の構成機器の詳細について述べる。

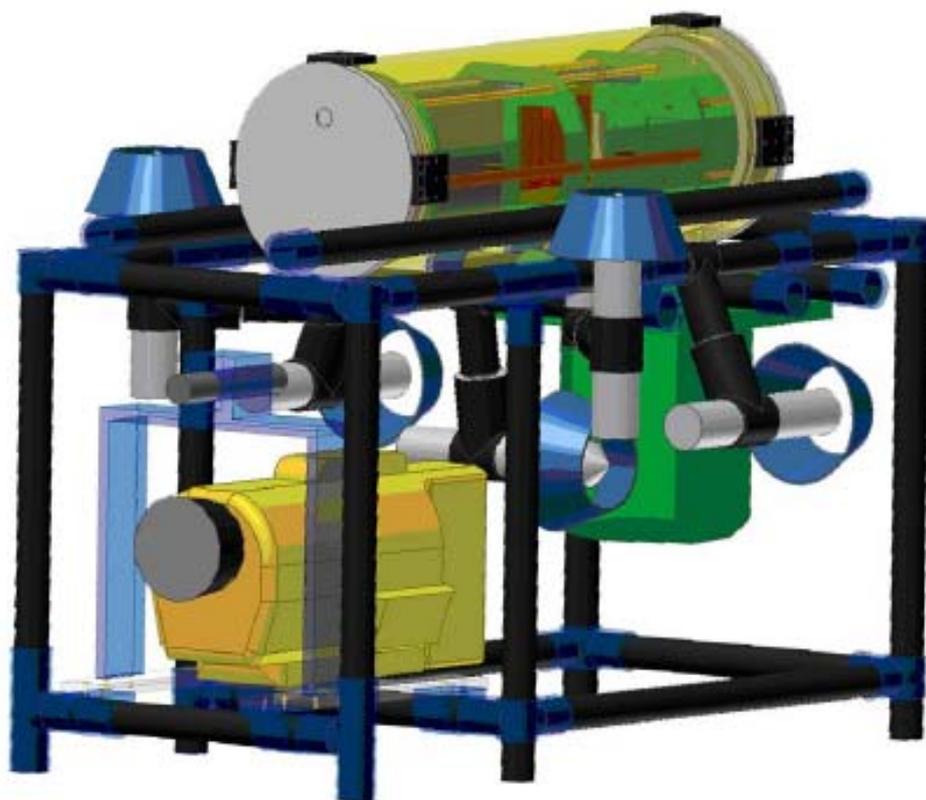


Fig.2-1 Image of AquaBox I



Fig.2-2 Appearance of AquaBox I

Table 2-1 Dimension of AquaBox I

Length over all	0.85[m]
Breadth over all	0.60[m]
Depth over all	0.57[m]
Dry weight	45[kg]
Operating depth	50[m]max.

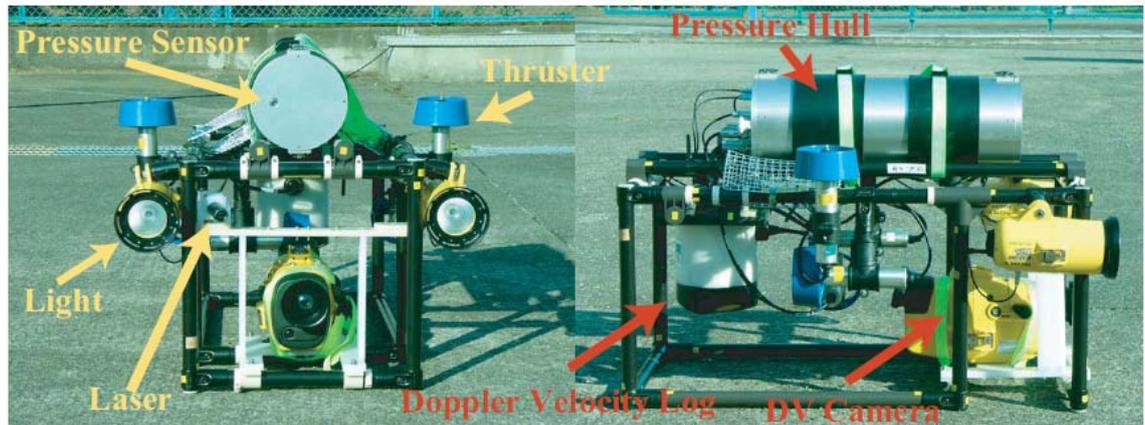


Fig.2-3 Arrangement of devices

Table 2-2 Instruments on AquaBox I

Actuators	5 thrusters with 40[W] DC motors
Sensors	Depth Sensor Doppler Velocity Log 2 axes Gyro Sensor
Communication	10BASE Ethernet
Computer System	ADuC814

(1) シリンダおよびフレーム

開発するロボットは、壁面の撮像を行うためのロボットであり、テストベッドとしても運用する。従って搭載機器を収納するシリンダ及びフレーム等の設計は、主要な搭載機器の選定を終了した後に、これらの外形および重量を考慮して行った。シリンダに関しては、水中構造物の撮像を行うため、また実験用のテストベッドとして近海で使用できるように耐圧 50[m]を確保することを考え、使用圧力を以下のとおりとした。

使用圧力: 6[kgf/cm²]

また、フレームに関しては、容器類の保護及び組み立て分解、可搬性、拡張性を持たせる構造とした。

○シリンダ (圧力容器)

シリンダには、地上 PC との通信のための機器、およびモータドライバ等が搭載されている。これらの防水加工については、水中ロボットで多く使われる O-リングを採用した。O-リングを使用して防水加工を行う方法には円筒面固定と平面固定の2種類ある。平面固定の構造では、相対する面にある程度の大きさを確保することが必要であり、そのため円筒部の隔壁の厚さが増してしまう。一方、円筒面固定の構造では先述した円筒部の隔壁の厚さは薄くなるものの、蓋部の構造が複雑化してしまう。本研究では、円筒面固定の構造を採用して設計を行った。円筒部の長さ及び径は、搭載する機器などを考慮してそれぞれ 473[mm]、172[mm]とした(Fig.2-4)。円筒部の耐圧設計は、[10]に記述してあるように、次式で表される。

$$P_k = E \left[\frac{\pi^4}{n^4(n^2-1)} \times \left(\frac{r}{l}\right)^4 + \frac{n^2-1}{12(1-\nu^2)} \times \left(\frac{t}{r}\right)^2 \right] \left(\frac{t}{r}\right) \quad (2.2.1)$$

Table 2-3 Initial setting

安全率	2
使用深度	50 [m]
ヤング率	6.89×10 ¹⁰ [Pa]
ポアソン比	0.33
円筒長さ	0.48 [m]

ただし、

- P_k : 弾性座屈圧力
- E : ヤング率[縦弾性係数]
- n : 座屈モード数(2, 3, 4...)
- ν : ポアソン比
- t : 円筒板厚
- r : 円筒平均半径(=内径+1/2 板厚)

ここで弾性座屈圧力を圧壊圧力と考え、式(2.2.1)に実際の数値を代入すれば、板厚と弾性座屈圧力の関係が求められる。このとき各数値は Table 2-23 に示すとおりである。なお、円筒部の製作にはアルミニウム(JIS 規格 A6063 相当品)を使用した。

使用深度は 50[m]で安全率を考慮して必要な耐圧力を約 10 気圧(=1.01[MPa])とした場合、板厚が 3.1[mm]必要となる。しかし、本研究ではアルミニウム素材と加工方法の問題により、板厚を 5[mm]とした。

蓋部(Fig.2-5)については、円盤部の耐圧力の以下の計算式において求めることができる。

$$\begin{aligned}\sigma &= 1.24 \frac{Pa^2}{t_p^2} \\ t_p^2 &= 1.24 \frac{Pa^2}{\sigma} \quad (2.2.2) \\ t_p &= \sqrt{1.24 \frac{Pa^2}{\sigma}}\end{aligned}$$

防水構造に使用する O-リングは、シリンダの径などを考慮し、JIS 規格 B2401P 番を使用した。また蓋部(Fig.2-6 コネクタ側)にはシリンダ内部の負圧調整のために空気穴(Fig.2-7)を設けた。空気穴用のパーツにも O-リングを使用した。Table 2-4 にそれぞれの呼び番号、O-リングの寸法を示す。水中コネクタについては、付録に示す。

Table 2-4 Specifications of O-Ring

	JIS 呼び番号	太さ [mm]	内径 [mm]
シリンダ蓋部	P145	5.7 ± 0.13	144.6 ± 1.16
空気穴部	P6	1.9 ± 0.08	5.8 ± 0.15

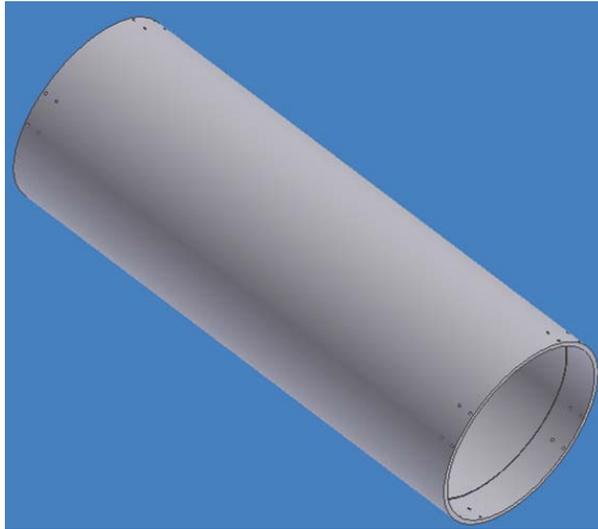


Fig.2-4 Cylinder

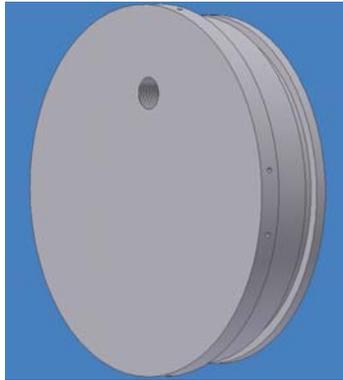


Fig.2-5 Lid of pressure hull

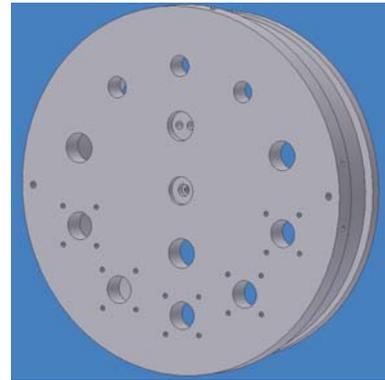


Fig.2-6 Lid of pressure hull (connector side)

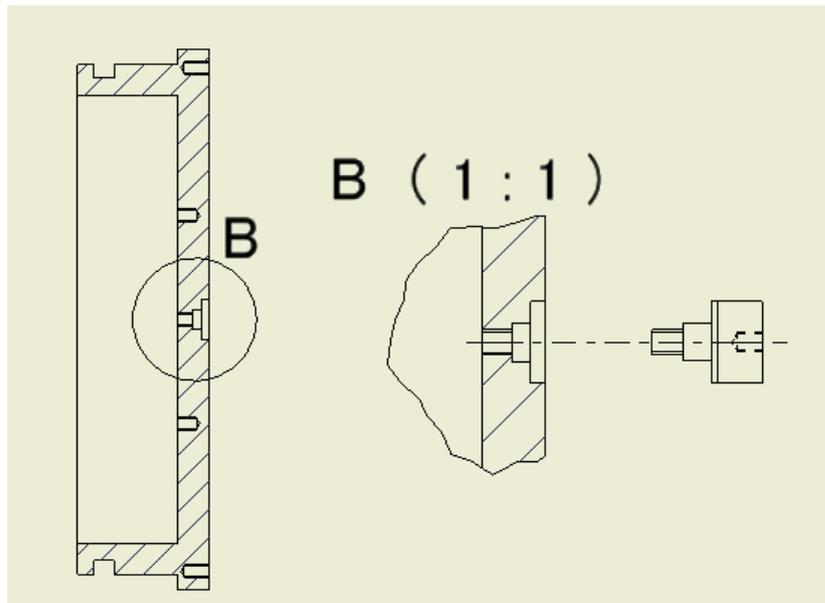


Fig.2-7 Design of lid, Left - Connector side, Right - Vents

○フレーム

AquaBox Iのフレームには、前述のように組み立て、分解、可搬性および拡張性から鉄製のヤザキ製のイレクターパイプを使用した。イレクターパイプは、組み立て式家具用のパイプに耐水加工を施して使用した(Fig.2-8)。フレーム同士の接続には、同じくヤザキ製の鉄製ジョイントを使用した。構造については、できるだけすべてのパーツがシリンダ下部のフレームに連結するように設計している。



Fig.2-8 Frame (Right-waterproof)

(2) センサ

AquaBox I は、周囲の環境を認識するため内部状態取得用の内界センサを搭載している。以下にこれらの詳細について述べる。

○内界センサ

計測用のセンサとしては、前後進および左右方向の対地速度の計測、水温、Yaw、Pitch、Roll の角度の検出を行う DVL (Doppler Velocity Log) (Fig.2-9)、2 軸まわりの角速度を検知する角速度センサ(Fig.2-10)、深度の測定を行う深度センサ(Fig.2-11)を搭載している。また、撮像対象となる水中構造物との相対距離、角度を計測するために位置情報取得システム(第 4 章)を搭載している。

DVL は、内部に姿勢センサ TCM2 および対地速度等の計測を行う超音波センサ、温度を測定するセンサ等を搭載している。センサ情報は RS232 および RS422 規格のシリアル通信を用いて PC に送信される。DVL のデータレートは 1[Hz] であるが、AquaBox I のコントロールは 10[Hz]で行っているため、コントロール用のセンサとしては使用していない。

角速度センサは、Micro Stone 社製の 2 軸ジャイロセンサを使用している。このセンサは、一つのデバイスチップにて直交する 2 軸廻りの角速度をアナログ信号で出力する。

深度は、横河電機株式会社製の FP101A 絶対圧力測定用の圧力センサを使用している。内部に DC1~5[V]DC 出力アンプを搭載しており、0~2 気圧（水深 20[m] 迄）測定することが可能である。本研究では水深 20[m]のものを使用している。



Fig.2-9 Doppler Velocity Log

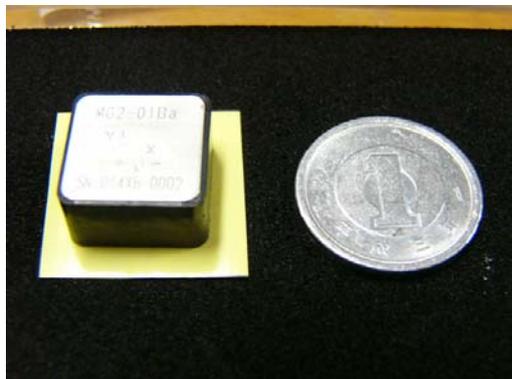


Fig.2-10 Angular Velocity Senoser



Fig.2-11 Depth Sensor

(3) 推進器

AquaBox I は、推進器として 5 基のスラストを有する。スラストは定格出力 48.6[W]の DC モータの回転をギアによって 1/4.33 に減速し、さらに水密のためにマグネットカップリングを介してプロペラに伝える構造のものである。これらのスラストに TiTech 社製モータドライバ JW-143-2 を使用して速度制御モードで制御を行っている。また、AquaBox I の運動制御を行う際には、オープンループでスラストを使用しているので必要な推力に対応した制御電圧を計算する必要がある。本研究では、西田ら[35]によって導出された実験値を使用して制御電圧を算出している。キャリブレーションカーブを Fig.2-12 に示す。横軸は、指令電圧、縦軸は推力を表している。y は、正転、逆転の近似曲線であり、この曲線の方程式を利用してスラストの制御を行っている。

<正転>

$$y = -5.7316x + 11.442 \quad (2.2.3)$$

<逆転>

$$y = -3.2932x + 10.212 \quad (2.2.4)$$

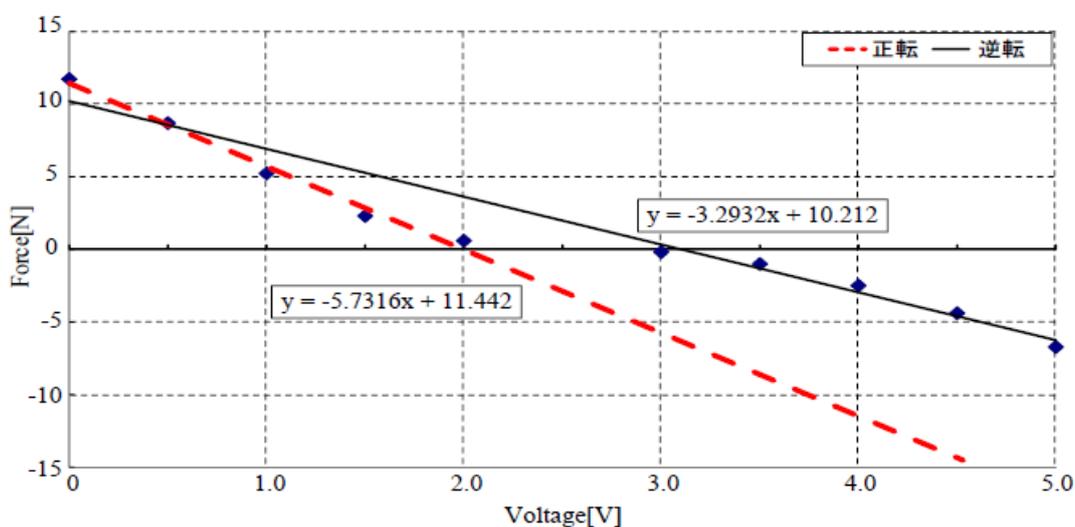


Fig.2-12 Thruster (Relationship between Voltage and Force)

(4) 通信システム

AquaBox I は、ROV(Remotely Operated Vehicle)であり、操縦装置が必要である。本研究では操縦装置にあたる部分を PC としており、開発したコントローラによる制御と Joy Stick による制御がある。AquaBox I はそれらの信号の送受信方法として、LAN による通信法を行っている。PC からロボットまでは、LAN で通信し、シリアルコンバータを介し RS-232C 規格のシリアル通信に変換して内部のマイクロコンバータと通信を確立している。

○LAN (Local Area Network)

PC とロボットのケーブル長は 50[m]を想定している。そこで本研究では PC とロボットの通信方法に LAN を採用した。現在 LAN には、通信速度により 5BASE、10BASE、100BASE、1000BASE のものが多く使われている。ロボット内部のマイクロコンバータは RS232C の通信方法を有しているため、通信速度に余裕を持たせ AquaBox I には 10BASE を採用している。

○Ethernet Serial Converter

ロボット内部には、制御を行うマイクロコントローラ ADUC814 を搭載している。ADUC814 は前述したとおり RS232C の通信が可能である。地上の PC とロボットの通信は、LAN で行っているが、それらのデータをロボット内部の Ethernet Serial Converter を介して RS232C に変換して ADUC814 との通信を確立している。Ethernet Serial Converter は通信速度として 10BASE と 100BASE をサポートしている。また、PC から LAN 経由で RS-232 機器を最大 4 台まで制御することが可能である。さらに IP アドレスなどの各種設定が LCM ディスプレイで表示しながら可能であり、TCP/IP、UDP/IP プロトコルをサポートしている。

(5) 電源供給系統

AquaBox I の電源は、ROV であるため地上から電源供給用のケーブルを介して 24[V]、28[V] の 2 系統とした。24[V] 系は主にマイクロコントローラや通信機器に使用し、28[V] 系はスラスタ用への電源供給を受け持っている。搭載機器の必要な電源系統は、5[V] 系、12[V] 系、 $\pm 12[V]$ 系、18[V] 系の 4 系統で、これらの電圧は主電源から DC/DC Converter を介して作られる。スラスタの電源については、主電源をそのまま駆動用として使用している。これらの主電源からの電源供給系統の全体図を Fig.2-13 に示す。

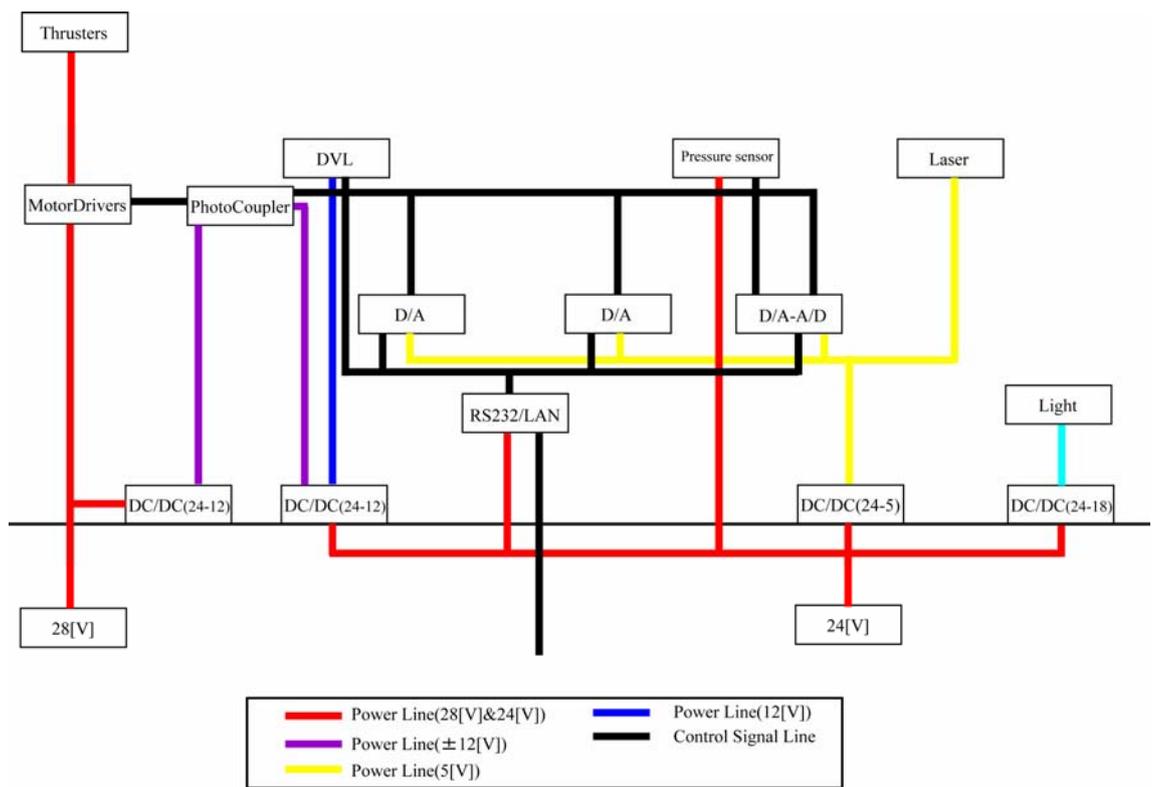


Fig.2-13 Power supply installation system diagram

(6) 放熱

AquaBox I のシリンダには、DC/DC Converter やスラスタ駆動用のモータドライバなどの発熱する機器を搭載しているため、それらを放熱する必要がある。最も発熱するモータドライバには、モータドライバの放熱板と厚さ 3[mm]のアルミニウム板を接合することで放熱を確立している。AquaBox I のシリンダはアルミ製であるのでそれ自体がヒートシンクとして利用することが可能である。従って、より放熱効率を上げるためにシリンダ内部に 1 基 FAN を設けている。

2.2.3 ロボットのコンピュータシステム

AquaBox I のコンピュータシステムは、ロボット内部と外部に構築されている。ロボット内部には、マイクロコントローラが搭載されており角速度センサ、深度センサからデータの取得及び姿勢制御を行っている。ロボットの外部には、ホストコンピュータを設置しており、画像処理による位置情報取得システム、DVL からのデータの取得および Joystick による指令値をロボットに与えている。

(1) マイクロコントローラ

ロボット内部のマイクロコントローラには、MC814 を使用している。MC814 は、Analog Device 社の ADuC814 を搭載した小型高性能マイコン基盤である。ADuC814 は、6ch-12bit の A-D コンバータ、2ch-12bit の D-A コンバータ、3ch-16bit のタイマー・カウンタの機能を持っている。また、KEIL 社の C コンパイラを使用することによりリアルタイムのシステムの構築が可能である。外部の PC とは、RS232C を介して通信を行うことが可能である。

AquaBox I では、MC814 をセンサデータの取得およびデバイス内部で PID のコントローラを構築している。また、ロボット外部の PC と RS232C を介してリアルタイムで通信を行っている。

(2) 支援コンピュータ

AquaBox I は、外部の支援コンピュータにより行動を行う。支援コンピュータは、CPU に Pentium3 850[MHz]、メモリ容量 512[MB]である。また OS は、WindowsXP を採用している。支援コンピュータには、画像処理ボード IP5005 を搭載しており画像処理によりロボットと撮像対象物の相対位置の取得を行って

いる。これにより AquaBox I に対して前後方向の目標位置となるデータを送信している。また、DVL からのデータを取得しロボットの方角、速度、軌道を検出することが可能である。本来、これらのデータは AquaBox I に送信され制御に適応されるべきであるが、DVL から PC へのデータレートが 1[Hz]と遅く、ロボットの姿勢制御には適応することができない。そのため本研究では、DVL のデータを支援コンピュータで取得しロボットの状態観測用に使用している。また、支援コンピュータには Joystick を接続し、ロボットの Sway の指令値を送信している。

2.2.4 ロボットのソフトウェアシステム

AquaBox I のソフトウェアシステムは、大きく 3 つに分割することができる。姿勢制御を行うソフトウェア、画像処理から対象物との相対位置情報を取得するソフトウェア、AquaBox I と地上のホスト PC との通信を行うソフトウェアに分けることができる。それぞれは C 言語により構築されている。画像処理に関しては、画像処理ボード用ライブラリ、画像処理用ライブラリ OpenCV、Intel IPP を使用している。ジョイスティックは、SDL ライブラリを使用して構築し、ソフトウェアシステム全体はマルチスレッドにより実行されている。また、ロボット内部のマイクロコンピュータには、KEIL 社 C51Development Tools を使用している。

2.2.5 ロボットの全体システムの構成

以上に述べたコンピュータシステムは、AquaBox I のシリンダ内部に姿勢制御を行うマイクロコントローラを配置し、陸上に画像処理および行動指令を行うホストコンピュータを配置している。それらの通信は LAN ケーブルにより行われ AquaBox I 内部では Ethernet serial converter により RS232C 通信に変換しマイクロコントローラと通信を行っている。また、AquaBox I のシリンダと陸上のホスト PC は水密ケーブル及び水密コネクタを介して接続されている。ロボット全体のシステム構成図を Fig.2-14 に示す。

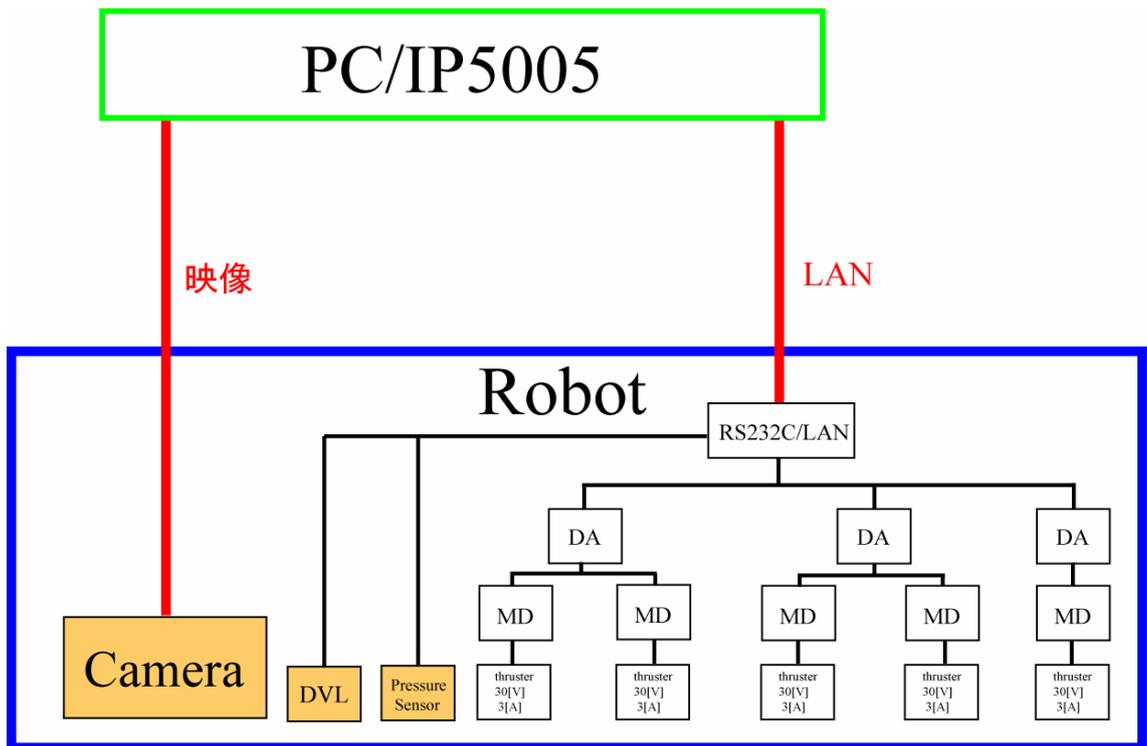


Fig.2-14 System configuration diagram

2.3 Autonomous Underwater Vehicle “AquaBox II”

2.3.1 ロボットの設計方針

AquaBox II は、ROV である AquaBox I に自律機構を持たせ AUV として、以下のような設計とした。

- ・ AUV とする。
- ・ 2, 3 人で実験を行えるような規模にすること。
- ・ テストベッドとしても運用できるように、高機能なコンピュータを搭載する。
- ・ 制御は、行動決定を司る制御部（以降：上位制御）と姿勢制御等を行う運動制御部（以降：下位制御）とに分割したシステムを構築する。
- ・ センサ等の拡張を確保するためロボットは、フレーム構造とする。
- ・ ペイロードを有した設計とする。

2.3.2 ロボットの設計・製作

AquaBox I は、ROV であったため電源および上位制御は外部から指令することができる。しかしながら新たに開発する AquaBox II は、自律機能を付加した AUV でありロボット自身が電源を搭載し、行動決定を行う必要がある。従って新たに開発するロボットには、AquaBox I に搭載されていた耐圧容器に加え、新たに電源系統および上位制御の機能を有する耐圧容器を開発し搭載している。AquaBox II は、全長 1.3[m]、乾燥重量約 60[kg]で AquaBox I で使用したアルミニウム製耐圧容器（以下：Hull2）に加えて新たにアルミニウム製耐圧容器（以下：Hull1）を搭載している。さらに AquaBox II は、フェアリングを有しており、容積を大きくとっている。内部の設計は、AquaBox I の設計同様、CAD ソフト Autodesk Inventor(AIP8)を使用して行った。AIP8 によって設計した AquaBox II の内部を Fig.2-15 に示す。

実際に製作した AquaBox II の外観を Fig.2-16 に、主要寸法を Table 2-5 に示す。フェアリング内部は、二つの耐圧容器、水中カメラ、水中ライト、DVL 等がアルミニウム製のフレームに搭載された構造になっており AquaBox I 同様拡張性を持たせた構造となっている。フェアリングの形状については、製作後運動特性解析を実施した。詳細については、次節において述べる。

推進器として 4 基のスラストを持ち、そのうち 2 基は前進後退および差動によ

る回頭用に、1基は左右への平行移動用に、残りの1基は上下方向用である。さらに AquaBox II には、エレベータを搭載している。従って潜水・浮上時に単に鉛直にのみ移動するのではなく、艇体に作用する流体力を利用して、推進装置によらず水平方向にも移動できる設計とした。エレベータを利用した流体力特性についても次節において述べる。

外部認識用のセンサとしては、レーザーとカメラを用いた位置情報取得システム、ロボットの方角、速度および軌道を取得できる Doppler Velocity Log、また深度センサも搭載している。AquaBox II の機器配置の様子を Fig.2-17 に、主要装備品一覧を Table 2-6 に示す。以下に AquaBox II の構成機器の詳細について述べる。

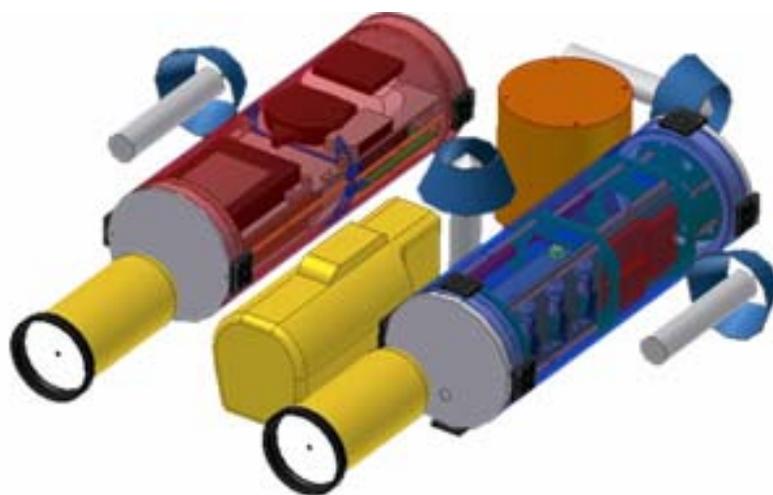


Fig.2-15 Image of AquaBox II (Inside)



Fig.2-16 Appearance of AquaBox II

Table 2-5 Dimensions of AquaBox II

Length over all	1.3[m]
Breadth over all	1.2[m]
Depth over all	0.55[m]
Dry weight	60[kg]
Operating depth	50[m]max.

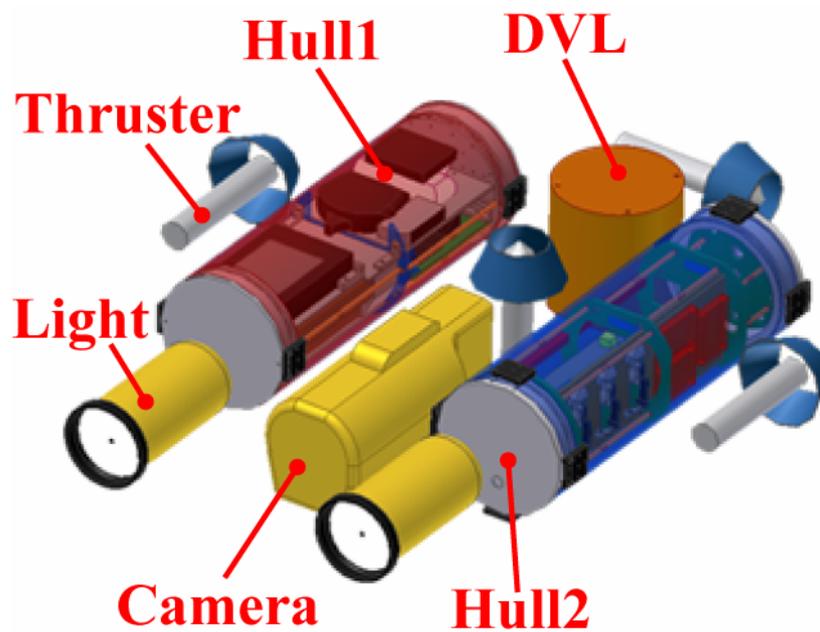


Fig.2-17 Arrangement of devices

Table 2-6 Instruments on AquaBox II

Actuators	4 thrusters with 40[W] DC motors
Sensors	Depth Sensor Doppler Velocity Log 2 axes Gyro Sensor Attitude Sensor
Communication	100 BASE Ethernet Transponder(SeaTel 1010C)
Computer System	Intel Pentium M 1.1GHz(VAIO U) PIC18F8720

(1) 耐圧容器およびフレーム

搭載機器を収納する耐圧容器及びフレーム等の設計は、基本的に AquaBox I と同様な設計指針であるが、AquaBox II は自律型的水中ロボットとすること、またテストベッドとしても運用できるようにする。耐圧容器に関しては、AquaBox I 同様の設計方針とし、自律型的水中ロボットとするため PC およびバッテリー搭載用の耐圧容器を開発した。また、フレームに関しては、容器類の保護及び組み立て分解、可搬性、拡張性を持たせる構造とした。フレームの材質に関しては、AquaBox I では鉄パイプを使用していたが、軽量化のためにアルミニウムフレームを採用した。

○耐圧容器

耐圧容器には、PC、バッテリーを搭載する Hull1、地上 PC との通信のための機器、およびモータドライバ等を搭載した Hull2 がある。Hull1 は、新たに開発する。Hull2 では、加工技術の問題からシリンダ部の厚さを 5.0[mm]としていたが、Hull1 は、軽量化のため 3.0[mm]とし、さらに Hull2 に関しても軽量化のため耐圧容器の厚さを 3[mm]とした。Hull1 の防水加工についても Hull2 と同様に O-リングを使用した防水加工方法を採用した。円筒部の長さ及び径は、搭載する機器などを考慮してそれぞれ 473[mm]、172[mm]とした(Fig.2-18)。円筒部の耐圧設計については、2.2.2 で記述したとおり使用深度 50[m]で安全率を考慮して必要な耐圧力を約 10 気圧(=1.01[Mpa])とした。また、蓋部については、Hull2 は AquaBox I と同様であり、Hull1 については Fig.2-19 に示す。さらに Fig.2-20 に Hull1 および Hull2 の蓋部のサイズを示す。O-リングは、Hull1 と Hull2 は多少異なる。Table 2-7 にそれぞれの呼び番号、O-リングの寸法を示す。水中コネクタについては、付録に示す。

Table 2-7 Specifications of O-Ring

	JIS 呼び番号	太さ [mm]	内径 [mm]
Hull1 (蓋部)	P150	5.7±0.13	149.6±1.19
Hull2 (蓋部)	P145	5.7±0.13	144.6±1.16
空気穴部	P6	1.9±0.08	5.8±0.15



Fig.2-18 シリンダ



Fig.2-19 Lid of pressure hull (connector side)

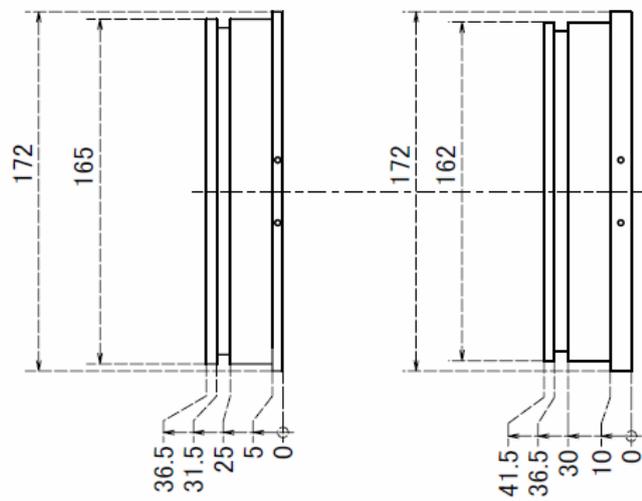


Fig.2-20 Comparative size of lid [Left : Hull1, Right : Hull2]

○フレーム

AquaBox II のフレームには、AquaBox I と同様、組み立て、分解、可搬性および拡張性からフレーム構造を採用した。AquaBox I で使用していたイレクターパイプは、材質が鉄製であるため AquaBox II には軽量化のためアルミニウム製のパイプを採用した。さらにアルミニウムパイプには、防水加工を施して使用した。継ぎ手部には、ヤザキ製の鉄製のジョイントを使用した。

(2) センサ

AquaBox II に搭載しているセンサは、周囲の環境を認識するためのセンサ、状態を知るためのセンサである。以下にこれらの詳細について述べる。

○内界センサ

内界センサは、基本的に AquaBox I と同様である。運動計測用のセンサとしては、前後進および左右方向の対地速度の計測、水温、コンパス、Pitch、Roll の角度の検出を行う DVL、2 軸まわりの角速度を検知する角速度センサ、深度の測定を行う深度センサを搭載している。また、撮像対象となる水中構造物との相対距離、角度を計測するために第 4 章で述べる位置情報取得システムを搭載している。

詳細は、2.2.2 を参照されたい。

(3) 推進器

AquaBox II は、推進器として 4 基のスラストを有する。これらのスラストは AquaBox I で使用していた同型のスラストとした(参照 : 2.2.2)。

(4) 通信システム

AquaBox II には、ロボットと通信する手段として 3 種類の方法がある。有線 LAN を接続して通信する方法、無線 LAN を使用する方法、超音波通信 (SEATEL) による方法である。有線 LAN ケーブルが届く範囲では、調整時などはケーブルを接続して通信を行う。また浮上時には、無線 LAN で通信を行うことができる。潜航時には、超音波通信によって通信を行う。これらの通信は、ロボット内の Ethernet HUB を介して PC およびマイクロコンピュータとの通信を確立している。ロボット内の通信システム図を Fig.2-21 に示す。

○有線 LAN

外部の支援 PC とロボットの通信方法のひとつとして有線 LAN を採用している。本通信手法は、ロボットの調整に使用する。通信速度は、100BASE であり、センサデータに加え、カメラの画像情報取得も行う。Hull1,Hull2 間も有線 LAN で通信しており、こちらはセンサ情報のみの通信となるので 10BASE である。外部から接続した場合、ロボット内で Ethernet HUB に接続され、ロボット内の PC へは Ethernet-USB 変換を用いて通信を行い、マイクロコンバータには、Ethernet-RS232 変換して通信を行っている。

○無線 LAN

ロボットの浮上時には、ロボットと支援 PC 間を無線 LAN によって通信することができる。PC から有線 LAN でイーサネットコンバータ(WLA2-G54C)に接続している(Fig.2-22)。本イーサネットコンバータはエアーステーションとしても利用することができる。従って複数の陸上 PC からロボットに接続することが可能である。またイーサネットコンバータから 2.4GHz 無線 LAN 無指向性アンテナ WLE-NDR に接続している。このアンテナは、シリコンおよび収縮チューブで防水加工を行い、ロボット筐体部に取り付けている。

○SEATEL 10BST

水中では、電波を利用した通信をすることはできない。従って超音波による通信が必要となってくる。そこで本研究では、将来的に超音波通信装置(SEATEL)を使用して潜航中のロボットと通信を行う予定である。SEATEL は、システム技研が開発した分散ロボットのための浅海域知的コマンド通信システムである。システムは船上局と水中局とで命令および情報の伝達を行う。システムには特徴が 4 つあり、浅海面での使用を考慮して試験用音響信号を送信し、その海面で環境にあう伝送方式をアダプティブに対応させることができる。2つめの特徴として最大 16 局（船上局を含む）相互の通信が可能である。3つ目はトーンバースト(FSK)方式で、近傍からの反射波の影響を少なくしている。最後は、通信を相互に 3 回繰り返し 2 回合致すればデータが正しいと判断し、実行することで誤動作を少なくしている。SEATEL の概観を Fig2-23 に、システム図を Fig.2-24 に示す。また基本性能は Table 2-8 に示す。

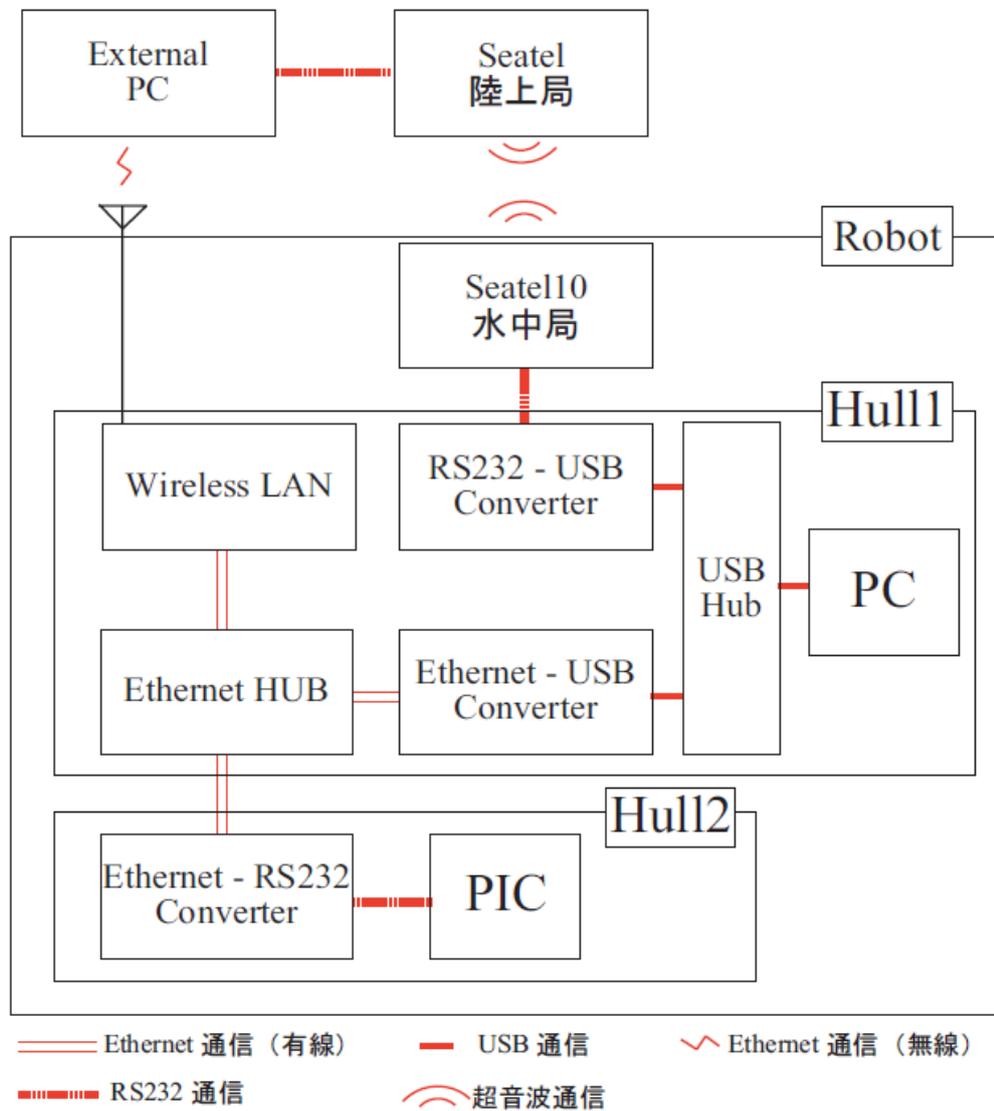


Fig.2-21 Communication System



Fig.2-22 Ethernet Converter(WLA2-G54C)



Fig.2-23 Appearance of SEATEL (Left-Land station ,Right-Underwater station)



Fig.2-24 System architecture of SEATEL

Table 2-8 Specifications of SEATEL

水中局数		最大15局
通信速度		10BPS-80BPS(マルチパス)
データ長		2バイト
通信方式		FSK バースト波
通信距離		標準 50[m]
使用水深		数[m]-数 10[m]の海面
測距機能		最大 99.9[m]
外部との通信		RS232C 準拠
電源		AC100[V]又は DC12[V]
送受波器	船上局	SH5050M(40KHz-60KHz)
	水中局	SH5050W(40KHz-60KHz)

(5) 電源供給系統

AquaBox II は、外部からの電源供給およびロボット内のバッテリーによる電源供給の 2 種類ある。電源供給系統図を Fig.2-25 に示す。外部電源は、調整用でありミッション中は、基本的に内部電源による駆動する。外部から電源供給を行う場合には、駆動用(29[V])とセンサ用(26[V])の 2 種類の安定化電源を使用して供給する。外部から電源供給を行う場合には、電源回路内の切り替えスイッチを外部電源にする必要がある。

AquaBox II は、AUV であるからロボット内部に動力源を搭載する必要がある。従ってエネルギー密度の高い一次あるいは二次電池の研究開発が必要である。本研究では、AquaBox II にエネルギー効率の高い Li-Polymer バッテリーを採用した。ここでは、様々な二次電池の特徴を挙げ、性能について述べることにする。

二次電池には、ニッケルカドミウム(NiCd)、ニッケル水素(NiMH)、リチウムイオン(Li-ion)、リチウムポリマー(Li-polymer)などがある。

○ニッケルカドミウム(NiCd)バッテリー

正極にニッケルの酸化物、負極にカドミウム化合物を用い、電解液に水酸化カリウム溶液を使用した公称電圧 1.2[V]の化学反応型の二次電池である。大電流放電が可能で、その放電電圧が安定しているのが特徴である。また充放電による熱に強いが、浅い充放電を繰り返すと充電池の容量が減少する、メモリ効果がある。従って長期保存時には完全に放電する必要がある。近年、NiCd は、負極にカドミウム化合物を使用していることから有害であるとのことから環境配慮の面から使用されなくなってきている。

○ニッケル水素(NiMH)バッテリー

正極にニッケルの酸化物、負極に水素吸蔵合金を用い、電解液に水酸化カリウム水溶液を使用した公称電圧 1.2[V]の化学反応型の二次電池である。NiCd と同様に大電流放電が可能であり、放電電圧が安定している。NiCd との相違点のひとつは、容量の大きさでエネルギー密度が NiCd の約 1.5 倍から 2 倍である。次に NiCd よりもメモリ効果が少ない。しかしながら NiCd よりも一般的に熱に弱く、40°Cを超えると危険といわれている。さらに同じ製造会社のバッテリーでも容量によって特性や充放電管理が必要である。

○リチウムイオン(Li-ion)バッテリー

正極に遷移金属酸化物リチウム（主にコバルト酸リチウム）、負極に炭素、電

解液に有機溶媒、リチウム塩を使いリチウムイオンの移動による電荷の授受により充放電を行う。特徴は電圧が高く、1セルあたり 3.7[V]が得られ、またそのエネルギー密度が高いため軽量小型であること、最大の特徴としてメモリ効果がないことから継ぎ足し充電が可能である。これらの特徴からノートパソコンや携帯電話などで使われている理由である。欠点としては、充電特性が非常に悪く、数百[mV]単位での充電電圧監視を行う必要がある。過度に充電するとコバルト酸リチウムの結晶構造が破壊され充放電ができなくなったり、電解液の分解により内圧が上昇し過熱したり、極端な場合には、熱暴走をおこして爆発的に反応が進むことがある。放電特性に関しては、NiCd、NiMH ほどではないがよい。

○リチウムポリマー(Li-polymer)バッテリー

電極に関しては基本的に Li-ion と同じである。異なる部分は、電解液に完全固形体電解質、またはゲル状の電解質が用いられており、それをフィルム層状にして形状にある程度自由度を持たせている。メモリ効果もなく、電圧は 1セルあたり 3.7[V]である。Li-ion では、液体であった電解質のために高精度の製缶またはパッケージ技術が必要であり、そのため形状が固定され、衝撃による漏液という安全性の問題もあった。

Li-polymerはその性能も Li-ion より総合的に上でエネルギー密度は同じサイズで 1.5 倍、放電特性もより電流をとることができる。しかしながら Li-ion 同様、正極材料にコバルトを使用しているため高価である。さらに最大の欠点は、有機物の電解質が可燃性であるため、一度発火すると爆発炎上してしまう。充放電に関して意識しておかなければならないことは、充電回復電圧の下限値が存在するという点である。放電する際、一般的に 1セルあたり 2.6[V]以下に電圧が下降すると電池機能が消滅してしまう。Li-ion の場合は、セルパックに保護回路が搭載されていたが Li-polymer には搭載されていることは少ない。また、新しいバッテリーを使用する際には、ウォーミングアップが必要となる。従って 2, 3 回充放電を繰り返し、内部活性化させてから使用を始める必要がある。これを怠ると、充電回復電圧の下限値を下回っていても充電機能が消滅することがある。さらに、複数のセルを使用する場合には、セル同士のバランスを定期的に調整する必要がある。バランスが崩れると破壊の原因となる。

以上のように 4 種類のバッテリーの特徴を挙げた。AquaBox II には、駆動用の電源として 29[V]程度、センサ用として 26[V]程度の電源が必要となる。そこで Li-polymer バッテリーを複数組み合わせバッテリーパックとし搭載した。バッテリーパックとすることで持ち運び、および取り付け取り外しが容易となる。

ケーブルレスという点からしても安全に扱うことができる。Li-polymer バッテリーの外観図を Fig.2-26 に開発したバッテリーパックを Fig.2-27 に示す。また、コネクタピン配置図を Fig.2-28 に、性能を Table 2-9 に示す。

さらに Li-polymer には先述したとおり保護回路が必要である。そこで本研究では、AquaBox 用のバッテリー保護回路を新たに開発した。

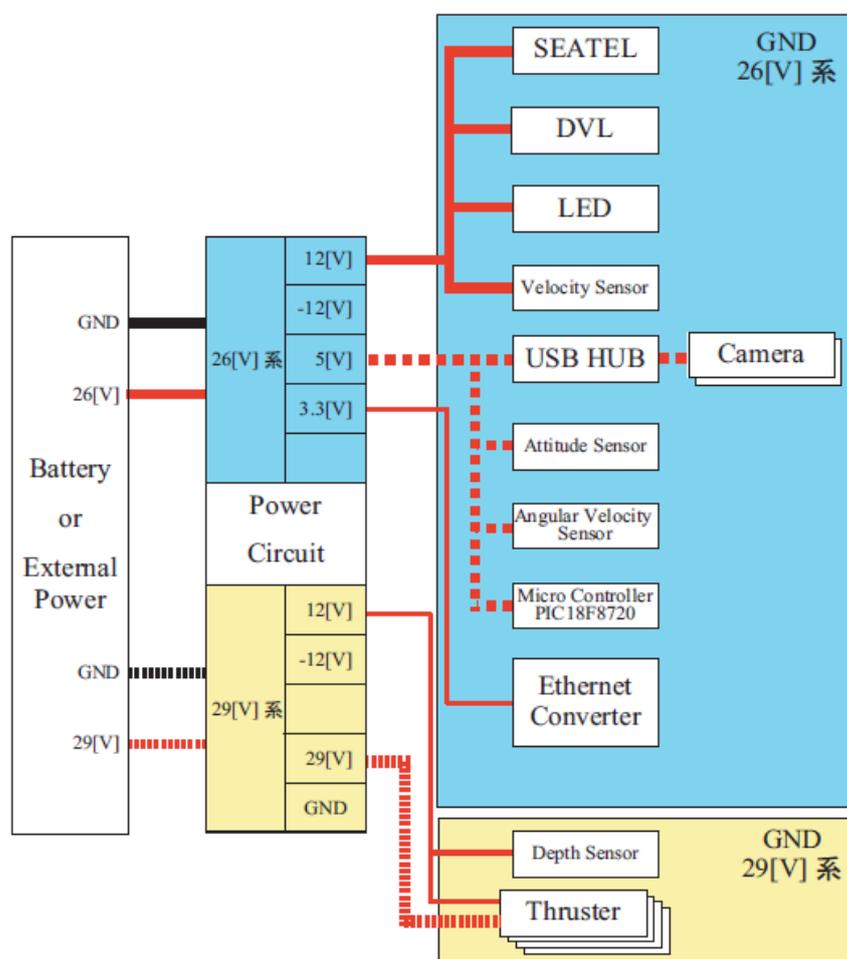


Fig.2-25 Power supply installation system diagram



Fig.2-26 Li-polymer Battery(Downside:14.8[V] Upside :11.1[V])

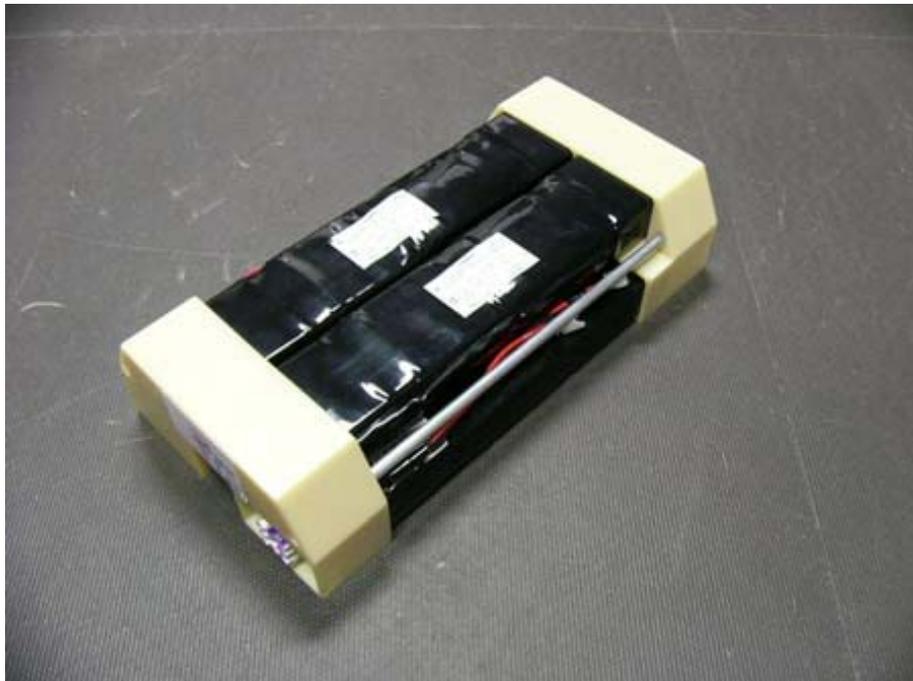


Fig.2-27 Battery Pack(over view)

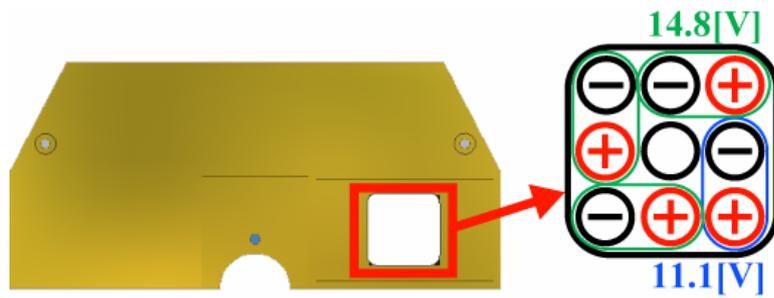


Fig.2-28 Arrangement of power connector pin

Table 2-9 Specifications of Battery Pack

Package size		L : 274.0 W : 138.0 H : 64.0[mm]
Weight		2.7[kg]
Capacity		8000[mAh]
Voltage	Sensor	25.9[V](11.1[V] + 14.8[V])
	Thruster	29.6[V](14.8[V] x 2)
Maker		Thunder Power

○バッテリー保護回路

製作した Aqua Box II 用の電源回路は、電圧値別に2つに分離しており、26V 回路からはそれぞれ 16V (PC 用)、12V (SEATEL 用)、5V (USB HUB 用)、3.3V (Ethernet Converter 用) の DC-DC コンバータと 26V 端子 (Hull2 用) へと出力する、29V 回路からは 29V 端子 (Hull2) のみへと出力する。回路の電源供給はバッテリーまたは外部電源のいずれでも駆動可能な仕様となっている。バッテリー電圧の限界値 (26V バッテリーでは 21V、29V バッテリーでは 24V) になると自動的に遮断を行う「バッテリー低電圧保護回路」を組込んでいる。

回路の動作(Fig.2-29, Fig.2-30)

①26V (または 29V) バッテリーの電圧と④DC/DC の出力電圧を⑥コンパレータで比較し、バッテリー電圧が 21V (または 24V) より大きければコンパレータ出力を1、それ以下であれば0とすることで⑨トランジスタを ON/OFF させ、それに繋がる⑩リレーコイルの ON/OFF によってリレー接点を駆動させる。バッテリー21V (または 24V) 以下となり、リレーが OFF となった場合、遮断されるのは負荷側のみであり、リレー以前の DC/DC、コンパレータ、トランジスタ等は基本的に微小電力を供給されている。

⑫リードスイッチはリレーコイル部に接続されており、メインスイッチの役割を果たしている。このスイッチが ON にならない限りは負荷に電力が供給されることはない。

Fig.2-31 に製作した電源回路を示す。左側が 26V 回路、右側が 29V 回路である。26V 回路の中央の空間はケーブルの通路となっている。また、配線面では電源ラインの最大電流 30[A]に耐えられるよう、該当する箇所に 10mm 程度の配線幅およびジャンパを確保している。

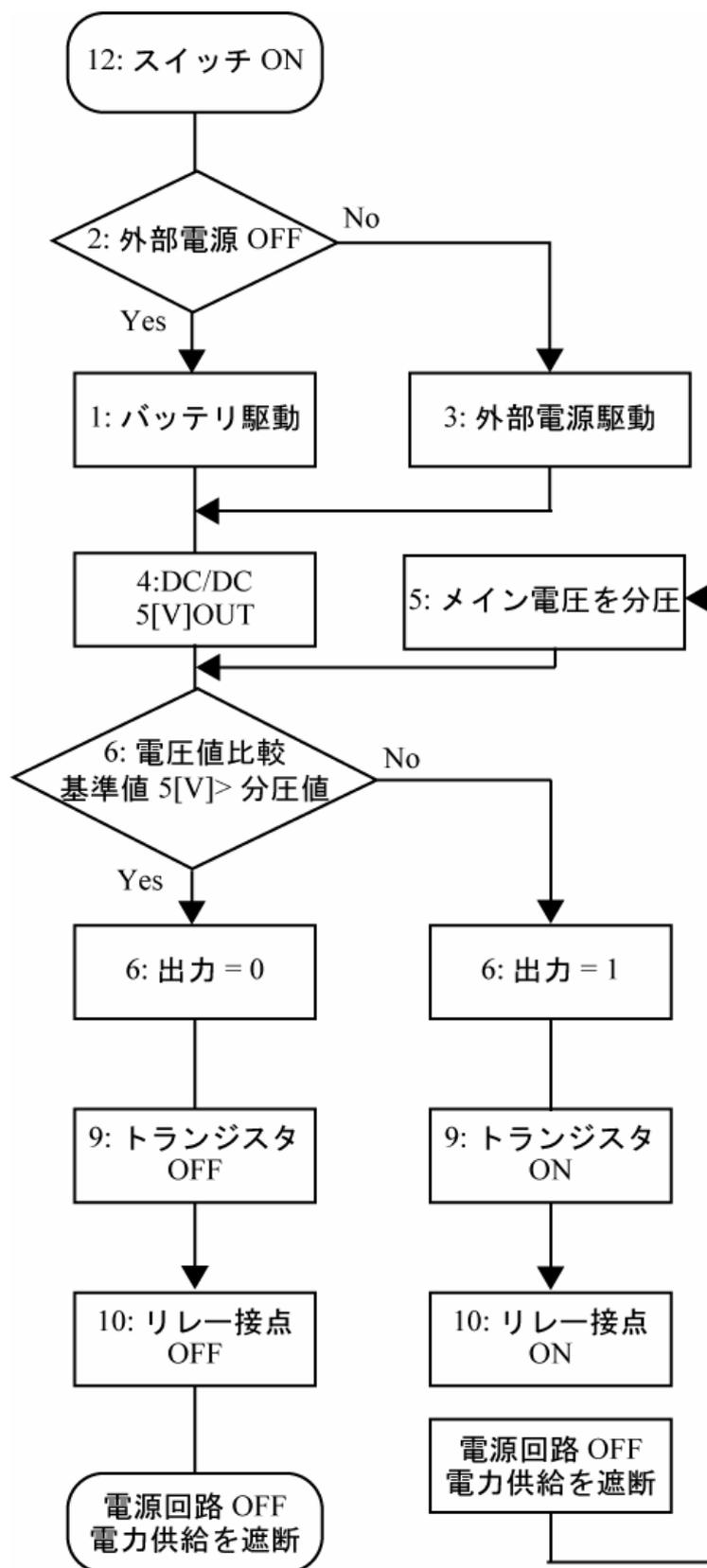


Fig.2-29 Flow chart of protection circuit

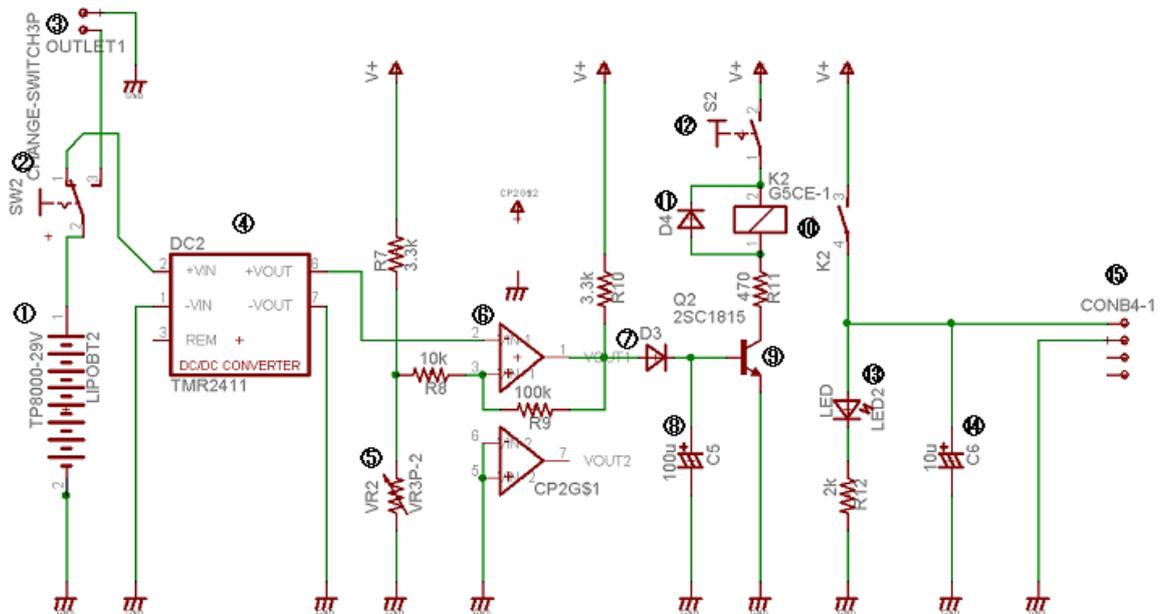
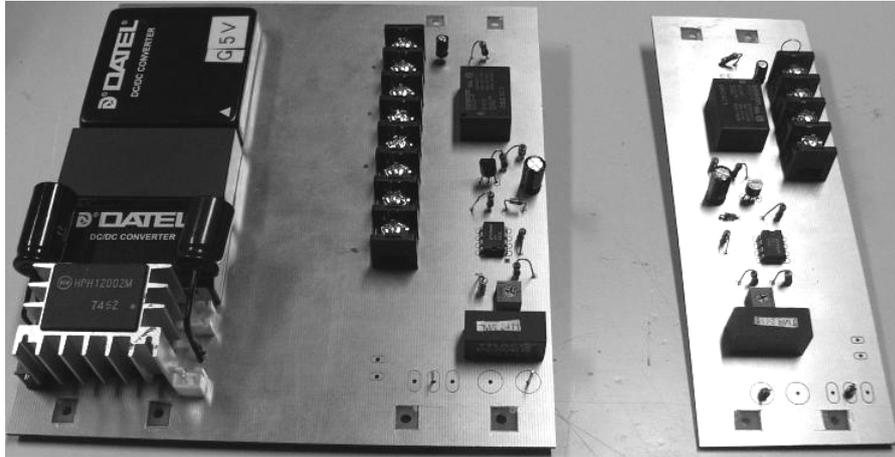
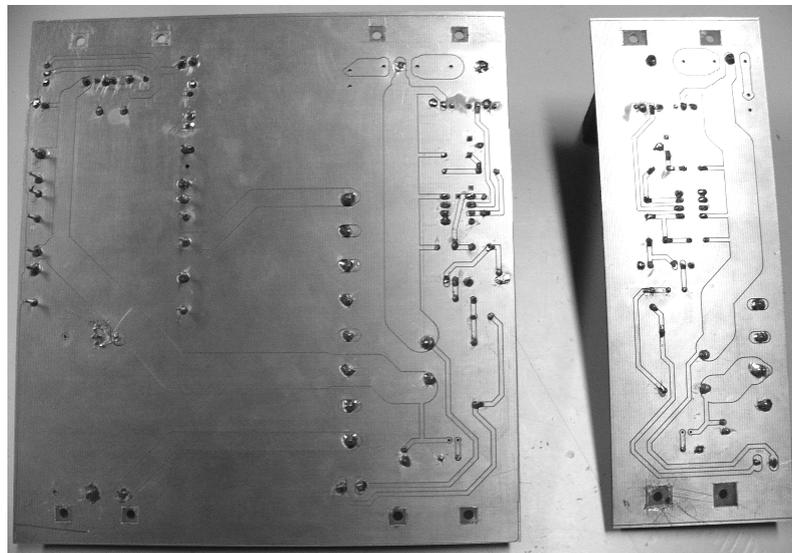


Fig.2-30 Power circuit schematic

- ① バッテリー (26V または 29V)
- ② 切換えスイッチ (バッテリー／外部電源)
- ③ 外部電源端子 (26V または 29V)
- ④ DC-DC コンバータ (24V→5V, コンパレータ基準値電圧用)
- ⑤ 可変抵抗 (低電圧保護値の設定用)
- ⑥ コンパレータ (ON/OFF で別々の基準値を持たせたヒステリシスコンパレータ)
- ⑦ ノイズ除去用ダイオード
- ⑧ ノイズ除去用コンデンサ
- ⑨ トランジスタ (リレーコイル駆動用)
- ⑩ リレー (低電圧保護時の遮断用)
- ⑪ サージ吸収用ダイオード
- ⑫ リードスイッチ (メインスイッチ)
- ⑬ 電源 ON 確認用 LED
- ⑭ ノイズ除去用コンデンサ
- ⑮ 電源電圧出力端子



Protection circuit for Battery (Top view)



Protection circuit for Battery (Bottom view)

Fig.2-31 Protection circuit (Upper : Top view, Lower : Bottom view)

(6) 放熱

Hull2 に関しては、2.2.2.6 で記述したとおりである。ここでは、新たに開発した Hull1 について述べる。Hull1 には、PC、バッテリー、電源回路と発熱するものが搭載されている。Hull1 の耐圧容器は Hull2 同様アルミニウム製であるから内部の熱循環さえ行っていれば十分と考えられる。Hull2 では、内部に FAN 設け循環を行っていたが、Hull1 では、搭載する PC に FAN が内蔵されていたため、循環に関しては十分と判断し特に FAN 等は設置していない。現在までのところ熱による暴走等は起こっていない。

(7) 浮力材

AquaBox II には、上下方向推進装置が搭載されている。従って常に推力を発生して深度を維持することは可能であるがエネルギーの消費も大きい。そこでロボットが何もしなくてもその場に漂っている状態にすることが望ましい。一般「中正浮力」と呼ばれ、これはロボット自身の重量と浮力が釣りあっていることを意味する。従って AquaBox II に関しても中正浮力にすることが望ましい。中正浮力にする方法として浮力材を用いる方法がある。浮力材には、数種類のものがある。以下に特徴を示す。

○ガソリン

1950年代から1960年代にかけて活躍したバチスカーフ型の潜水調査船には浮力材としてガソリンが持ちられていた。ガソリンは比重 0.75-0.80 であり海水より軽く、液体であるため水圧に関しても圧壊を考える必要がない。欠点としては、海水に比重が近く膨大な量のガソリンが必要になること、引火性であること、水圧による収縮が海水よりも大きいということである。従って潜航する際には、深度が大きくなるにつれて潜航速度が増してしまう。そこで一定の潜航速度となるように途中でバラストを投棄していた。また浮上速度に関しても深度が小さくなるにつれて浮上速度が大きくなる。そのため今度は、ガソリンを投棄することで浮上速度を一定に保っていた。当時は環境問題など叫ばれていなかったため実施できたことであり現在ではガソリンを投棄するなどもってのほかである。従って現在では、ガソリンを浮力材とすることはなくなっている。

○金属リチウム

金属リチウム（比重 0.54）を石油に浸し安定化させ、浮力材として利用する提案があった。しかしながら金属リチウムが少しでも海水に触れると急激に反応

がおこり大変危険である。そのため金属リチウムを浮力材として使用するアイデアだけで実際に用いられたことはない。

○木材

木材は、入手が容易な浮力材であるが、繊維質の間に空気があり圧力がかかるとそれらに水が浸透し浮力が変化する。従って木材を浮力材として使用する場合には、周囲をコーティングし水の浸入を防いで使用する必要がある。

○発泡材

発泡スチロールや発泡ウレタンのような発泡材には、内部に多数の気泡があり、比重が非常に小さい。一方で、水圧による収縮量が大きく、一定の浮力を得ることができない。実際 AquaBox I には、発泡スチロールを成型し浮力材としていた。しかしながら数メートル潜航しただけで発泡スチロールが収縮し浮力が変化してしまった。従って発泡材を浮力材として使用できるのは、水面付近に限られる。

○シントクチック・フォーム (Syntactic Foam)

多くの水中ロボット、深海石油掘削関連で用いられている浮力材がシントクチック・フォームである。シントクチック・フォームとは、微細な中空ガラスの風船玉を樹脂で固めたものである。1964年に竣工した米国の ALVIN もシントクチック・フォームを浮力材とし、現在では比重 0.35-0.64 程度のものがある。また、シントクチック・フォームは、音響透過性がよい。従って音響装置をこの中に埋めても性能にあまり影響はでない。一方で、無用な雑音も多く通すことになる。この浮力材を使用する上で注意すべきことは、シントクチック・フォームといえど多少水が浸透する。一般的に使用する場合には、圧壊圧力の 7 割から 8 割で使用する。これを超えると内部に急激に水が浸透し破壊する。

○バイナリ・ミクスチャ (Binary Mixture)

浮力材は、耐圧力が大きく、比重が小さいことが望ましい。そこでシントクチック・フォームの隙間にさらに小さいマイクロバルーンを注入した構造である。これによりマイクロバルーンの総体積を増加させることができる。この浮力材は、深海潜水調査船「しんかい 6500」でも用いられている。この浮力材は、最大使用深度 6500[m]であるが、圧壊圧力はその 2 倍の約 13.000[m]相当の深度圧となる。

以上のように数多くの浮力材があり、現在でも様々なものが開発されている。

AquaBox II では、シタクチック・フォームの浮力材を採用した。この浮力材は、のこぎりで切断できるなど加工が容易である。しかしながら引っ張り強度は弱いので注意が必要である。AquaBox II に搭載している浮力材を Fig.2-32 に示す。この浮力材の比重は計測の結果 0.78 程度であった。



Fig.2-32 Floating buoyant material (Left-Appearance, Right-Surface)

(8) フェアリング

AquaBox II は、FRP 製のフェアリングを有している。内部には水が入る仕組みとなっている。フェアリングの空中重量は、約 18[kg]、水中重量は、約 6[kg] である。また、このフェアリングは前後、上下と大きく 4 つに分割することができる。フェアリングには、水平尾翼、垂直尾翼が装備されており、水平尾翼可動式で、垂直尾翼は固定式である。前部は透明の亚克力を採用しており、水中カメラ、水中ライト、レーザー等を搭載することができる。スラスタを搭載する位置には、亚克力を使用し、スラスタにより発生した水流がフェアリング内部に侵入しないような構造になっている。AquaBox II の運動特性については次節で述べる。

2.3.3 運動特性解析

AquaBox II は、フェアリングを有しており、ロボットの制御を行う際、ロボットに作用する流体力の解析を行う必要がある。さらにロボットに作用する流体力を利用して推進装置によらずに水平方向に移動することができる。本節では、AquaBox II の運動特性について述べる。

(1) 水中ロボットの運動方程式

Figure 2-33 のようにロボットに固定した座標系をとる。水中ロボットの運動

エネルギー T_b 及び流体の運動エネルギー T_a は

$$\begin{aligned}
2T_b = & M(V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2) + I_X \omega_X^2 + I_Y \omega_Y^2 + I_Z \omega_Z^2 \\
& + 2(J_{YZ} \omega_Y \omega_Z + J_{ZX} \omega_Z \omega_X + J_{XY} \omega_X \omega_Y) \\
& + 2M(X_G(V_Y \omega_Z - V_Z \omega_Y) + Y_G(V_Z \omega_X - V_X \omega_Z) + Z_G(V_X \omega_Y - V_Y \omega_X))
\end{aligned} \tag{2.3.1}$$

$$2T_a = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 A_{ij} V_{Ri} V_{Rj} \tag{2.3.2}$$

となる。これを $T = T_a + T_b$ として(2.3.3)式の完全流体中の固体の運動方程式に代入すると、(2.3.4)式のロボット座標系での運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_X} &= \omega_Z \frac{\partial T}{\partial V_Y} - \omega_Y \frac{\partial T}{\partial V_Z} + F_X \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_Y} &= \omega_X \frac{\partial T}{\partial V_Z} - \omega_Z \frac{\partial T}{\partial V_X} + F_Y \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_Z} &= \omega_Y \frac{\partial T}{\partial V_X} - \omega_X \frac{\partial T}{\partial V_Y} + F_Z \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_X} &= V_Z \frac{\partial T}{\partial V_Y} - V_Y \frac{\partial T}{\partial V_Z} + \omega_Z \frac{\partial T}{\partial \omega_Y} - \omega_Y \frac{\partial T}{\partial \omega_Z} + M_X \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_Y} &= V_X \frac{\partial T}{\partial V_Z} - V_Z \frac{\partial T}{\partial V_X} + \omega_X \frac{\partial T}{\partial \omega_Z} - \omega_Z \frac{\partial T}{\partial \omega_X} + M_Y \\
\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_Z} &= V_Y \frac{\partial T}{\partial V_X} - V_X \frac{\partial T}{\partial V_Y} + \omega_Y \frac{\partial T}{\partial \omega_X} - \omega_X \frac{\partial T}{\partial \omega_Y} + M_Z
\end{aligned} \tag{2.3.4}$$

$$\begin{aligned}
F_X = & M \left[(V_X) + (V_Z \omega_Y - V_Y \omega_Z) + \left\{ -X_G (\omega_Y^2 + \omega_Z^2) - Y_G (\omega_Z - \omega_X \omega_Y) + Z_G (\omega_Y + \omega_X \omega_Z) \right\} \right] \\
& + A_{11} V_{RX} + A_{12} V_{RY} + A_{13} V_{RZ} + A_{14} \omega_X + A_{15} \omega_Y + A_{16} \omega_Z \\
& + (A_{13} V_{RX} + A_{23} V_{RY} + A_{33} V_{RZ} + A_{34} \omega_X + A_{35} \omega_Y + A_{36} \omega_Z) \omega_Y \\
& - (A_{21} V_{RX} + A_{22} V_{RY} + A_{23} V_{RZ} + A_{24} \omega_X + A_{25} \omega_Y + A_{26} \omega_Z) \omega_Z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_Y = M & \left[(V_Y) + (V_X \omega_Z - V_Z \omega_X) + \left\{ -Y_G (\omega_Z^2 + \omega_X^2) - Z_G (\omega_X - \omega_Y \omega_Z) + X_G (\omega_Z + \omega_Y \omega_X) \right\} \right] \\
& + A_{21} V_{RX} + A_{22} V_{RY} + A_{23} U_{RZ} + A_{24} \omega_X + A_{25} \omega_Y + A_{26} \omega_Z \\
& + (A_{11} V_{RX} + A_{21} V_{RY} + A_{31} V_{RZ} + A_{41} \omega_X + A_{51} \omega_Y + A_{61} \omega_Z) \omega_Z \\
& - (A_{31} V_{RX} + A_{32} V_{RY} + A_{33} V_{RZ} + A_{34} \omega_X + A_{35} \omega_Y + A_{36} \omega_Z) \omega_X
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_Z = M & \left[(V_Z) + (V_Y \omega_X - V_X \omega_Y) + \left\{ -Z_G (\omega_X^2 + \omega_Y^2) - X_G (\omega_Y - \omega_Z \omega_X) + Y_G (\omega_X + \omega_Z \omega_Y) \right\} \right] \\
& + A_{31} V_{RX} + A_{32} V_{RY} + A_{33} U_{RZ} + A_{34} \omega_X + A_{35} \omega_Y + A_{36} \omega_Z \\
& + (A_{12} V_{RX} + A_{22} V_{RY} + A_{32} V_{RZ} + A_{42} \omega_X + A_{52} \omega_Y + A_{62} \omega_Z) \omega_X \\
& - (A_{11} V_{RX} + A_{12} V_{RY} + A_{13} V_{RZ} + A_{14} \omega_X + A_{15} \omega_Y + A_{16} \omega_Z) \omega_Z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_X = I_X \omega_X - J_{XY} \omega_Y - J_{XZ} \omega_Z + (I_Z - I_Y) \omega_Y \omega_Z + (J_{XY} \omega_X + J_{YZ} \omega_Z) \omega_Z - (J_{XZ} \omega_X + J_{YZ} \omega_Y) \omega_Y \\
+ M \left\{ Y_G (V_Z + V_Y \omega_X - V_X \omega_Y) - Z_G (V_Y - V_Z \omega_X + V_X \omega_Z) \right\} \\
+ A_{14} V_{RX} + A_{24} V_{RY} + A_{34} V_{RZ} + A_{44} \omega_X + A_{54} \omega_Y + A_{64} \omega_Z \\
+ (A_{13} V_{RX} + A_{23} V_{RY} + A_{33} V_{RZ} + A_{43} \omega_X + A_{53} \omega_Y + A_{63} \omega_Z) V_{RY} \\
- (A_{12} V_{RX} + A_{22} V_{RY} + A_{32} V_{RZ} + A_{42} \omega_X + A_{52} \omega_Y + A_{62} \omega_Z) V_{RZ} \\
+ (A_{16} V_{RX} + A_{26} V_{RY} + A_{36} V_{RZ} + A_{46} \omega_X + A_{56} \omega_Y + A_{66} \omega_Z) \omega_Y \\
- (A_{15} V_{RX} + A_{25} V_{RY} + A_{35} V_{RZ} + A_{45} \omega_X + A_{55} \omega_Y + A_{65} \omega_Z) \omega_Z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_Y = I_Y \omega_Y - J_{YZ} \omega_Z - J_{XY} \omega_X + (I_X - I_Z) \omega_X \omega_Z + (J_{YZ} \omega_Y + J_{XZ} \omega_X) \omega_X - (J_{XY} \omega_Y + J_{XZ} \omega_Z) \omega_Z \\
+ M \left\{ Z_G (V_X + V_Z \omega_Y - V_Y \omega_Z) - X_G (V_Z - V_X \omega_Y + V_Y \omega_X) \right\} \\
+ A_{15} V_{RX} + A_{25} V_{RY} + A_{35} V_{RZ} + A_{45} \omega_X + A_{55} \omega_Y + A_{65} \omega_Z \\
+ (A_{11} V_{RX} + A_{21} V_{RY} + A_{31} V_{RZ} + A_{41} \omega_X + A_{51} \omega_Y + A_{61} \omega_Z) V_{RZ} \\
- (A_{13} V_{RX} + A_{23} V_{RY} + A_{33} V_{RZ} + A_{43} \omega_X + A_{53} \omega_Y + A_{63} \omega_Z) V_{RX} \\
+ (A_{14} V_{RX} + A_{24} V_{RY} + A_{34} V_{RZ} + A_{44} \omega_X + A_{54} \omega_Y + A_{64} \omega_Z) \omega_Z \\
- (A_{16} V_{RX} + A_{26} V_{RY} + A_{36} V_{RZ} + A_{46} \omega_X + A_{56} \omega_Y + A_{66} \omega_Z) \omega_X
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_Z = I_Z \omega_Z - J_{XZ} \omega_X - J_{YZ} \omega_Y + (I_Y - I_X) \omega_X \omega_Y + (J_{XZ} \omega_Z + J_{XY} \omega_Y) \omega_Y - (J_{YZ} \omega_Z + J_{XY} \omega_X) \omega_X \\
+ M \left\{ X_G (V_Y + V_X \omega_Z - V_Z \omega_X) - Y_G (V_X - V_Y \omega_Z + V_Z \omega_Y) \right\} \\
+ A_{16} V_{RX} + A_{26} V_{RY} + A_{36} V_{RZ} + A_{46} \omega_X + A_{56} \omega_Y + A_{66} \omega_Z \\
+ (A_{12} V_{RX} + A_{22} V_{RY} + A_{32} V_{RZ} + A_{42} \omega_X + A_{52} \omega_Y + A_{62} \omega_Z) V_{RZ} \\
- (A_{11} V_{RX} + A_{21} V_{RY} + A_{31} V_{RZ} + A_{41} \omega_X + A_{51} \omega_Y + A_{61} \omega_Z) V_{RX} \\
+ (A_{15} V_{RX} + A_{25} V_{RY} + A_{35} V_{RZ} + A_{45} \omega_X + A_{55} \omega_Y + A_{65} \omega_Z) \omega_X \\
- (A_{14} V_{RX} + A_{24} V_{RY} + A_{34} V_{RZ} + A_{44} \omega_X + A_{54} \omega_Y + A_{64} \omega_Z) \omega_Y
\end{aligned}$$

(2.3.4)

(2.3.4)式で示される運動方程式には式の展開によって導き出された（非線形項も含めて）全ての項が含まれており、実際のモデルに適用するには煩雑さを避けるために無視できる項を省略していかなければならない。

水中ロボットの一般的な運動方程式を 6 項列ベクトルの形式で表現すると以下のようなになる[10]。

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{F}_I = \mathbf{F}_F + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_T \quad (2.3.5)$$

$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}$ は慣性力を示しており、 \mathbf{M} は慣性行列、 $\dot{\mathbf{V}}$ は加速度ベクトル、 \mathbf{F}_I は慣性的流体力、 \mathbf{F}_F は非慣性的流体力、 \mathbf{F}_G は重力、 \mathbf{F}_B は浮力、 \mathbf{F}_T は推力を示している。

水中ロボットの形状及び運動により無視できる項を省略し、またロボットは静水中での運動と仮定する。

慣性行列は次式に示される。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m + A_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G + A_{26} \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_G + A_{35} & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_{xx} + A_{44} & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G + A_{53} & 0 & I_{yy} + A_{44} & 0 \\ 0 & mx_G + A_{62} & 0 & 0 & 0 & I_{zz} + A_{66} \end{bmatrix} \quad (2.3.6)$$

加速度ベクトルは

$$\dot{\mathbf{V}} = {}^t [\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z] \quad (2.3.7)$$

ただし $(\dot{\cdot}) = \frac{\partial}{\partial t}$ を表す。

\mathbf{F}_I は慣性的流体力で、

$$\mathbf{F}_I = \begin{bmatrix} \omega_y (mV_z + my_G \omega_x - mx_G \omega_y + A_{33} V_z) - \omega_z (mV_y + mx_G \omega_z - mz_G \omega_x + A_{22} V_y) + A_{35} \omega_y^2 \\ \omega_z (mV_y + mz_G \omega_y - my_G \omega_z + A_{11} V_x) - \omega_x (mV_z + my_G \omega_x - mx_G \omega_y + A_{33} V_x) \\ \omega_x (mV_y + mx_G \omega_z - mz_G \omega_x + A_{22} V_y) - \omega_y (mV_x + mz_G \omega_y - my_G \omega_x + A_{11} V_x) \\ \omega_y (-J_{xz} \omega_x - J_{yz} \omega_y + I_{zz} \omega_z + A_{66} \omega_z) - \omega_z (-J_{xy} \omega_x + I_{yy} \omega_y - J_{yz} \omega_z + A_{55} \omega_y) \\ + my_G (V_y \omega_x - V_x \omega_y) + mz_G (V_z \omega_x - V_x \omega_z) + (A_{33} - A_{22}) V_y V_z \\ \omega_z (I_{xx} \omega_x - J_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z + A_{44} \omega_x) - \omega_x (-J_{xz} \omega_x - J_{yz} \omega_y + I_{zz} \omega_z + A_{66} \omega_z) \\ + mz_G (V_z \omega_y - V_y \omega_z) + mx_G (V_x \omega_y - V_y \omega_x) + (A_{11} - A_{33}) V_y V_z - A_{35} \omega_y V_x \\ \omega_x (-J_{xy} \omega_x + I_{yy} \omega_y - J_{yz} \omega_z + A_{55} \omega_y) - \omega_y (I_{xx} \omega_x - J_{xy} \omega_y - J_{xz} \omega_z + A_{44} \omega_x) \\ + mx_G (V_x \omega_z - V_z \omega_x) + my_G (V_y \omega_z - V_z \omega_y) + (A_{22} - A_{11}) V_x V_y \end{bmatrix}$$

(2.3.8)

$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B$ は重力及び浮力で、

$$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B = \begin{bmatrix} -(m - \rho \nabla) g \sin \theta \\ (m - \rho \nabla) g \sin \phi \cos \theta \\ (m - \rho \nabla) g \cos \phi \cos \theta \\ (my_G - \rho \nabla y_B) g \cos \phi \cos \theta - (mz_G - \rho \nabla z_B) g \sin \phi \sin \theta \\ -(mz_G - \rho \nabla z_B) g \sin \theta - (mx_G - \rho \nabla x_B) g \cos \phi \cos \theta \\ (mx_G - \rho \nabla x_B) g \sin \phi \cos \theta + (my_G - \rho \nabla y_B) g \sin \theta \end{bmatrix}$$

(2.3.9)

推力は Aqua Box II の場合、 X, Y, Z 軸方向に働くので、

$$\mathbf{F}_T = {}^t [T_X, T_Y, T_Z, 0, 0, 0]$$

(2.3.10)

となる。

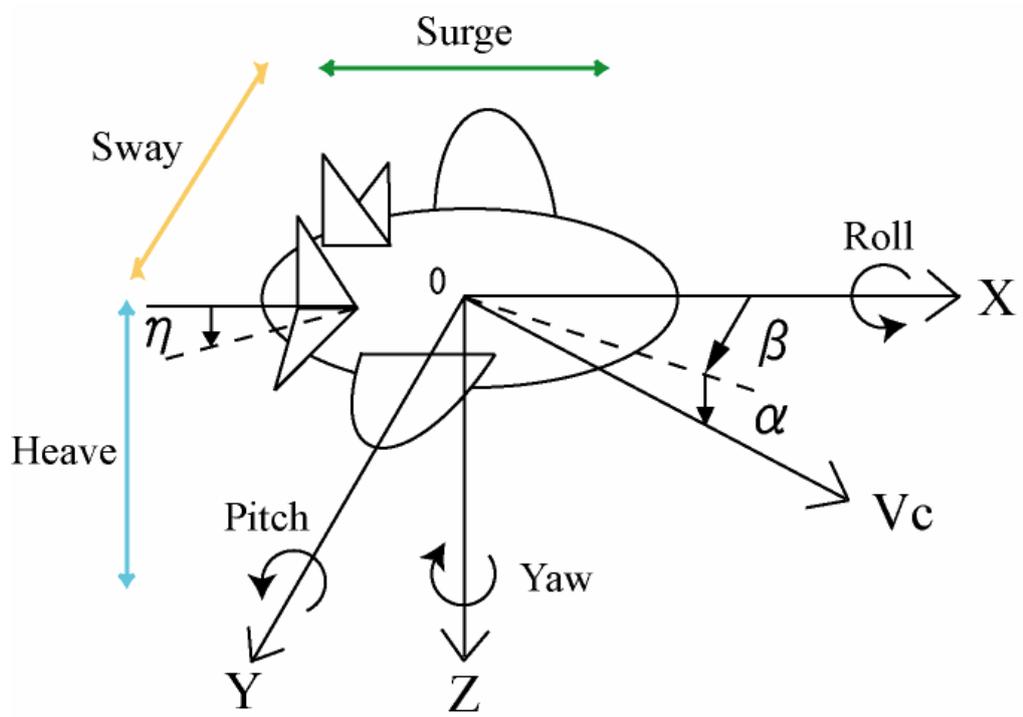


Fig.2-33 Robot coordinate system

(2) 運動特性推定実験

Aqua Box II はこれまでの AUV と異なった形状をしている。そのため、Aqua Box II に働く流体力を計算や経験によって求めるのは困難である。従ってここでは 6 分力計試験によって求めることとする[36-37]。

○実験装置

実験に際して、実機を利用して流体力の解析を行うことは、実験設備の大規模化を招くことから、ここでは実機の 1/4 の実験模型を製作し実験を行った。製作した模型を Fig.2-34 に示す。実験は、東海大学清水キャンパスの回流水槽にて行った(Fig.2-35)。回流水槽の仕様を Table 2-10 に示す。流速は、プロペラ式流速計で計測した。 α 、 β を $\pm 90[\text{deg}]$ の範囲で測定するため、治具を製作した(Fig.2-36)。また、水平尾翼がロボットの姿勢制御に大きな影響を与えるため、NACA0012 型の翼を作成した(Fig.2-37)。

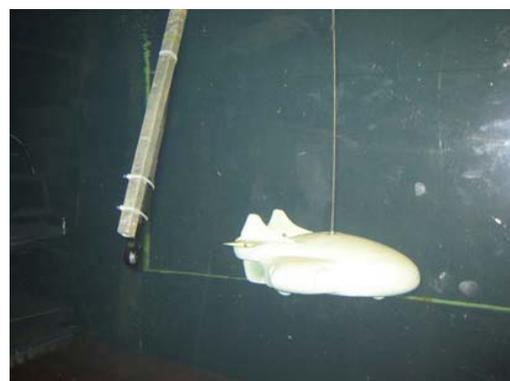


Fig.2-34 Model of AquaBox II (Left-Appearance, Right-Inside of pool)



Fig.2-35 Water tunnel (Left-Overall, Right-Observation window)

Table 2-10 Specifications of Water tunnel

水槽本体[m]	L : 8.52 x W : 1.4 x H : 3.6
観測部[m]	L : 2.8 x W : 1.4 x H : 1.15(水深 0.9)
水量[t]	15
流速[m/s]	Max 1.0



Fig.2-36 Experimental Instrument



Fig.2-37 NACA0012

○実験条件

流速の設定

模型実験で行った結果を実機に適応するためには模型と実機の相似則が成り立たなければならない。相似パラメータの Re 数を合わせるため、実験時に実際の流体と同じ流体を使えばよい。流体に水を使用すると、密度 ρ (kg/m^3) と動粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) は変化しないため

$$U^{(m)} = U^{(p)} (l^{(p)} / l^{(m)}) \quad (2.3.11)$$

とする必要がある。ここで、添え字の p は実機(prototype)、 m は模型を表す。寸法比が大きくなれば流速を大きくしなくてはならない。一般的に模型実験で実際の Re 数に合わせることは難しいので、実際には実機の Re 数より小さい Re 数で実験される。それは C_D に関して Re 数が十分大きければ、 Re 数によらずほぼ一定になる。これは経験則によっている。

今回はこのことを踏まえて流速を $0.4(\text{m/s})$ に設定した。

模型姿勢

α , β が流体力に及ぼす効果を調べるため、水平尾翼の舵角 η を $0[\text{deg}]$ とした。 β に関しては $\pm 30[\text{deg}]$ の範囲で $5[\text{deg}]$ 刻み、 α に関しては $\pm 15[\text{deg}]$ の範囲で $5[\text{deg}]$ 刻みで 6 分力計試験を行った(Fig.2-38)。

また、今度は水平尾翼の効果を測定するために、Euler 角 $E = (0 \ 0 \ 0)$ の状態で水平尾翼を $\pm 15[\text{deg}]$ の範囲で $5[\text{deg}]$ 刻みで左右同じに変化させ測定した(Fig.2-39)。

次に付加質量を求めるために、模型を $(\alpha, \beta) = (0, 0), (0, 90), (0, -90), (0, 180), (90, 0), (-90, 0)$ 計 6 姿勢で流速を $0 \sim 0.3[\text{m/s}]$ 変化させて測定を行った。

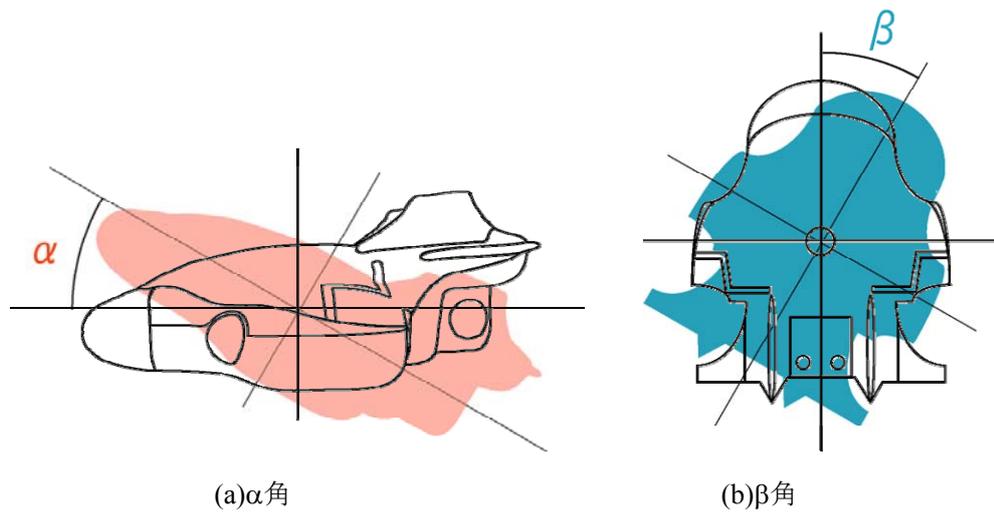


Fig.2-38 Attitude of robot

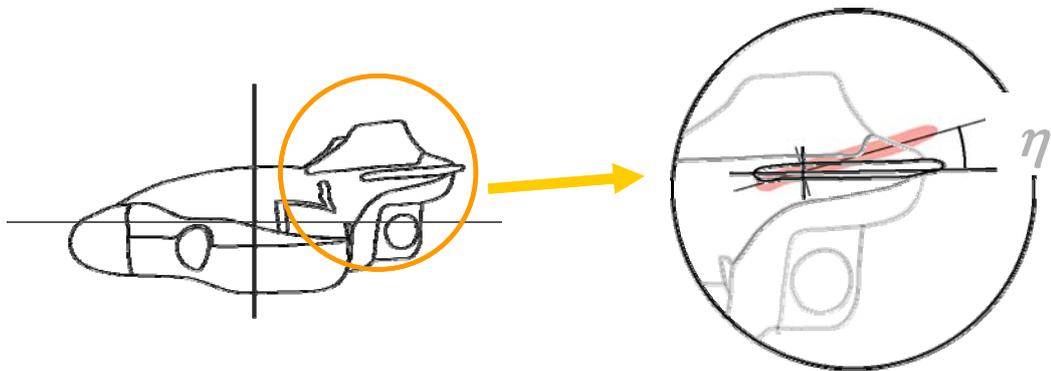


Fig.2-39 Angle of elevator

○流体力の推定

外力の評価法

2.3.3.1 で導入した運動方程式の右辺に現れる外力のうち、流体力の算定を行う。座標系は右手系とし、原点は艇体の浮力中心にとり、 X 軸は艇の中心線に一致している。 X, Y, Z 軸方向の速度成分をそれぞれ V_x, V_y, V_z とすると、迎角 α 、

横滑り角 β は前進速度 $V_c (= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2})$ を用いて次のように定義される。

$$\alpha = \sin^{-1}(V_z / V_c)$$

$$\beta = \sin^{-1}(V_y / V_c)$$

(2.3.12)

流体力 F_F は無次元流体力係数 C_i, C_i^E, C_i^N を用いて次のように表される。ただし、

C_i^E はそれぞれの流体力のうち、水平尾翼による成分に対応している。 C_i^N は回

転に対する抵抗を示す係数であり、 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は X, Y, Z 軸に関する回転速度である。

$$\begin{aligned}
[Fi] = & \frac{1}{2} \rho V_c^2 LB \begin{bmatrix} C_1(\alpha, \beta) + C_1^E(\eta) \\ C_2(\alpha, \beta) + C_2^R(\delta) \\ C_3(\alpha, \beta) + C_3^E(\eta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \rho V_c^2 LBD \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C_4(\alpha, \beta) + C_4^E(\eta) \\ C_5(\alpha, \beta) + C_5^E(\eta) \\ C_6(\alpha, \beta) + C_6^E(\eta) + C_6^R(\delta) \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \rho (LBD)^{\frac{5}{3}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C_4^N \omega_x |\omega_x| \\ C_5^N \omega_y |\omega_y| \\ C_6^N \omega_z |\omega_z| \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.3.13}$$

ここで、 η は水平尾翼の舵角である。

Aqua Box II は断面を左右対称の翼形とみなし、 X 軸を機体中心線ではなく、前進速度方向（安定軸系）に一致させた場合、その X 軸、 Z 軸方向の流体力係数はそれぞれ、迎角 α に関する2次式と1次式で表せることが知られている。

X, Y, Z 軸方向の力に関しては、安定軸における流体力係数 C_1', C_2', C_3' を導入した。

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1' \\ C_2' \\ C_3' \end{bmatrix}
\tag{2.3.14}$$

のように座標変換を行い、 C_1', C_2', C_3' を α, β の関数として表すことを試みた。

この C_1', C_3' は、航空機力学における C_D (Drag Coefficient) 、 C_L (Lift Coefficient)

に等しい。従って、安定軸系での surge , sway , heave 方向の力は、航空機力学における lift force , side force , drag force に等しい。

実験結果

水中ロボットの流体力係数推定については既に浦らによって考えられている [38-39]。本研究ではその研究を参考に流体力係数を求める。まず、side force の流体力係数について考える。6 分力のうち side force, は β を横軸にとり、プロットした Fig.2-40 グラフから β に関する 1 次式で近似してよいことが分かる。最小二乗法による近似を行い、無次元流体力係数をある α の値において $C_i' = a_i \beta$ の形で求めた。 a_i は α の関数である。 side force は α についての偶関

数であるので、2 次式で近似する。よって、 $a_i = b_i + c_i \alpha^2$ としてそれぞれの係数を求めた。グラフを Fig.2-41 に示す。 drag force と lift force は α を横軸にとってプロットした (Fig.2-42, Fig.2-43) 。 drag force に関しては 2 次式で近似を行い、 lift force は 1 次式で近似を行った (Fig.2-44, Fig.2-45)。

ただし、 α, β があまり大きくなりすぎると線形性を失うため、以下に上げる係数の適応範囲は

$$\begin{aligned} -15 \leq \alpha \leq 15 & \quad [\text{deg}] \\ -15 \leq \beta \leq 15 & \quad [\text{deg}] \end{aligned} \tag{2.3.15}$$

とする。

$$\begin{aligned} C_1' &= -(0.7067\alpha^2 + 0.00284\beta^2 + 0.0569) \\ C_2' &= (0.1565 + 0.076\alpha^2)\beta \\ C_3' &= -(1.1461 - 1.1287\alpha^2)\beta \end{aligned} \tag{2.3.16}$$

(2.3.14)の式を用いて座標変換を行うと C_1, C_2, C_3 は Fig.2-46, Fig.2-47, Fig.2-48 のようになる [40]。

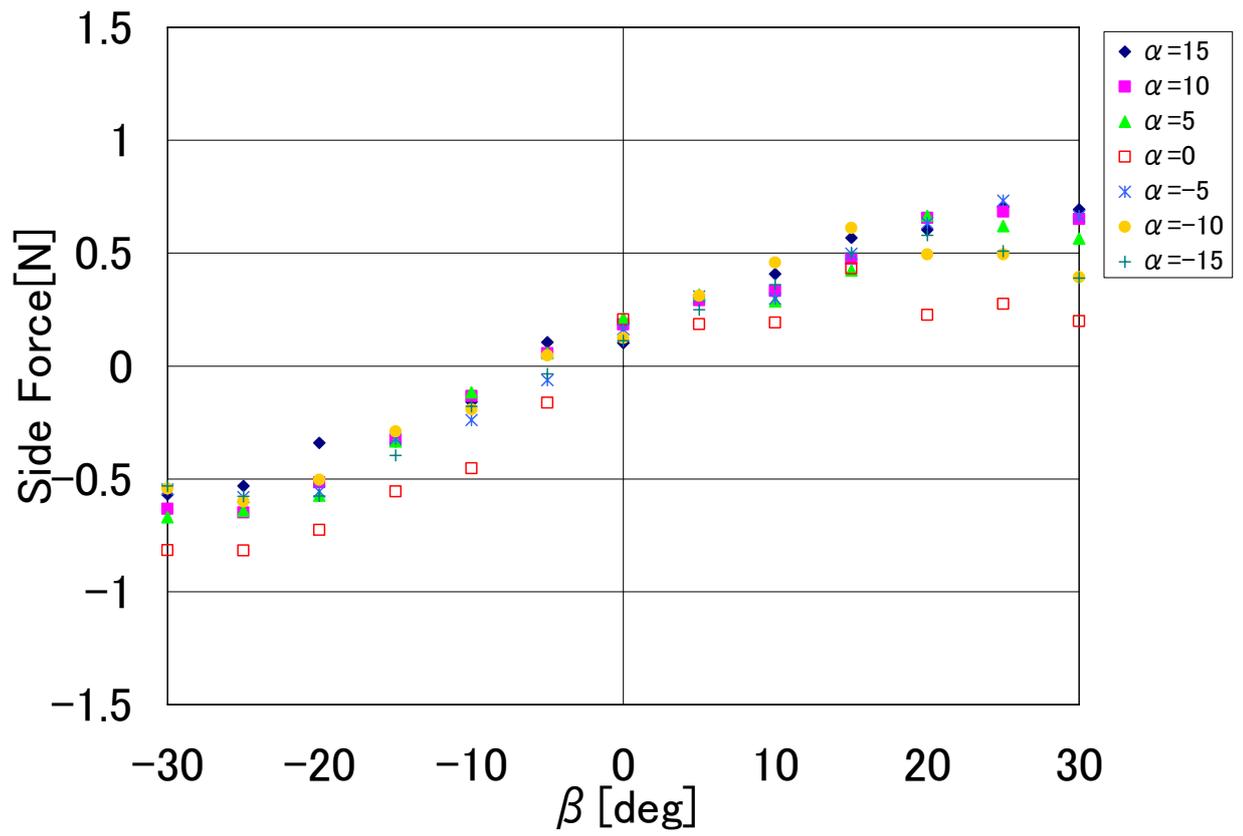


Fig.2-40 Side Force with β

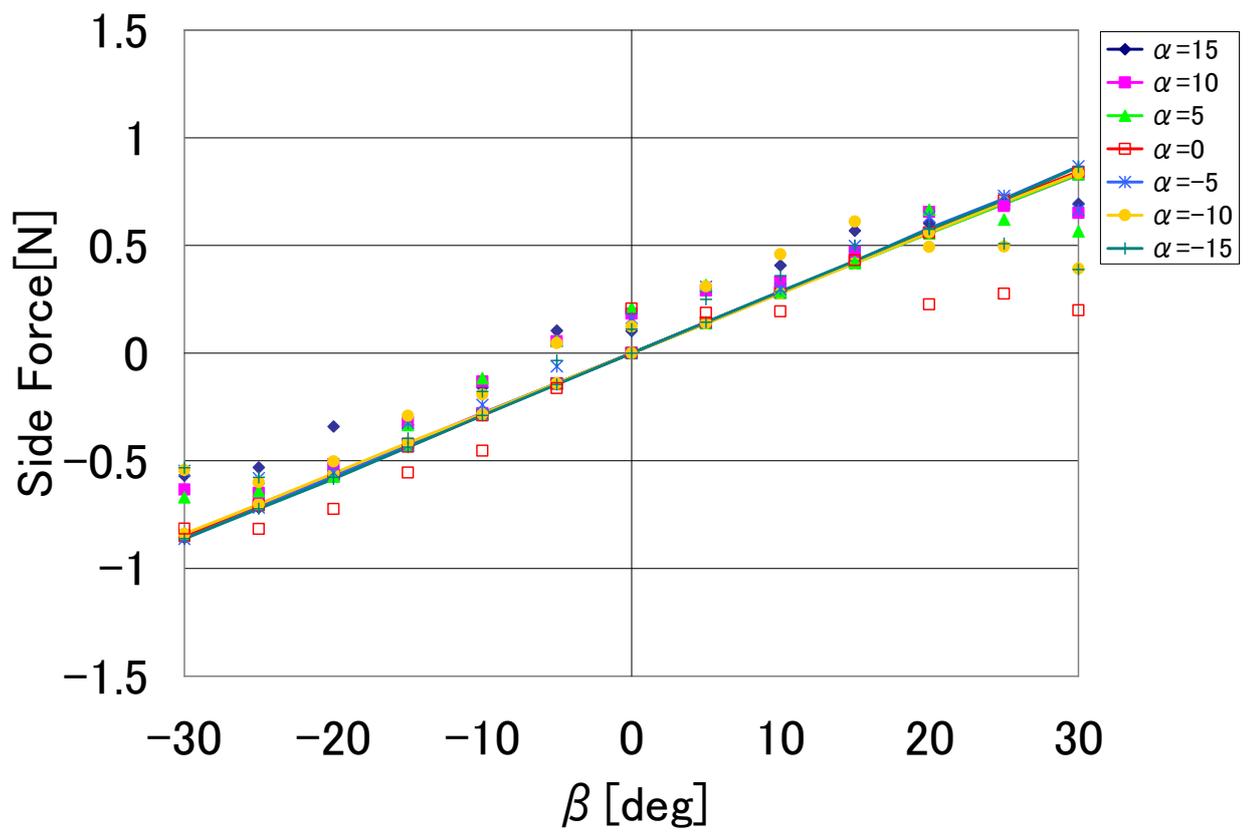


Fig.2-41 Side Force with β (First-order approximation)

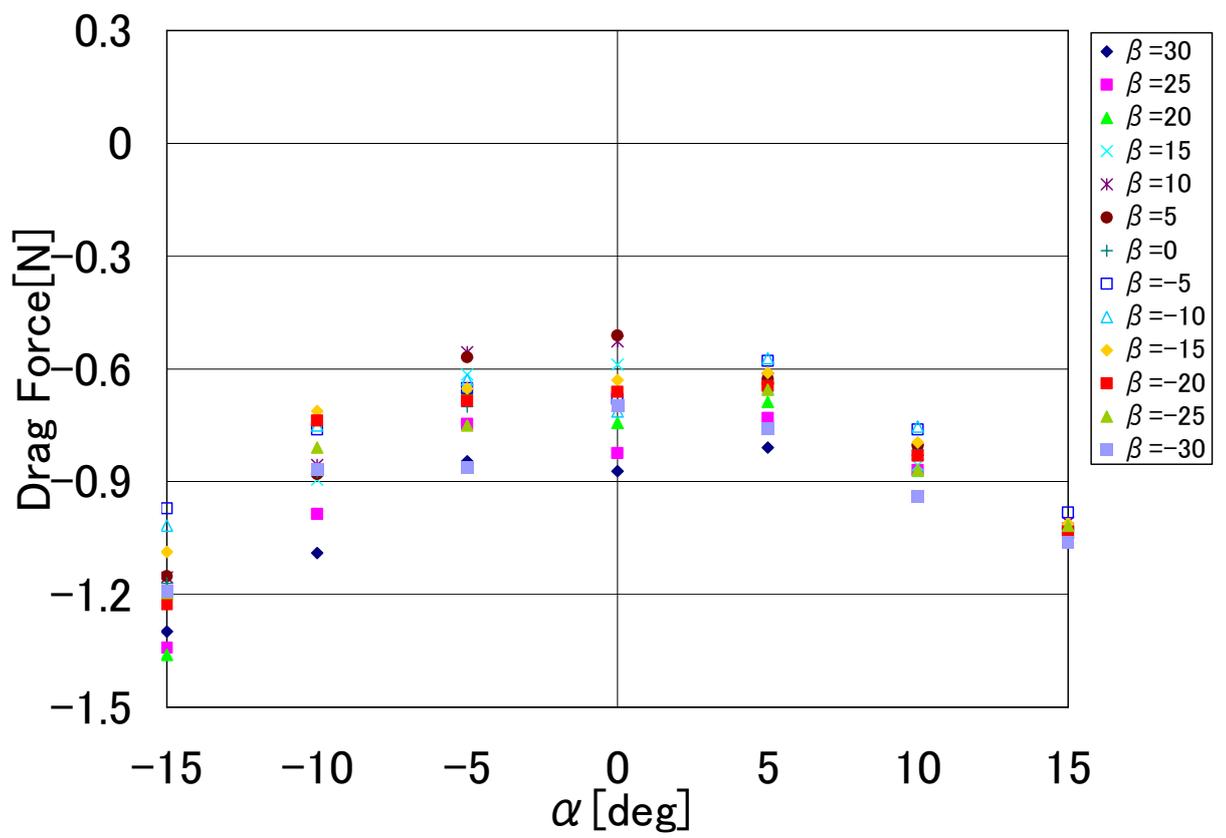


Fig.2-42 Drag Force with α

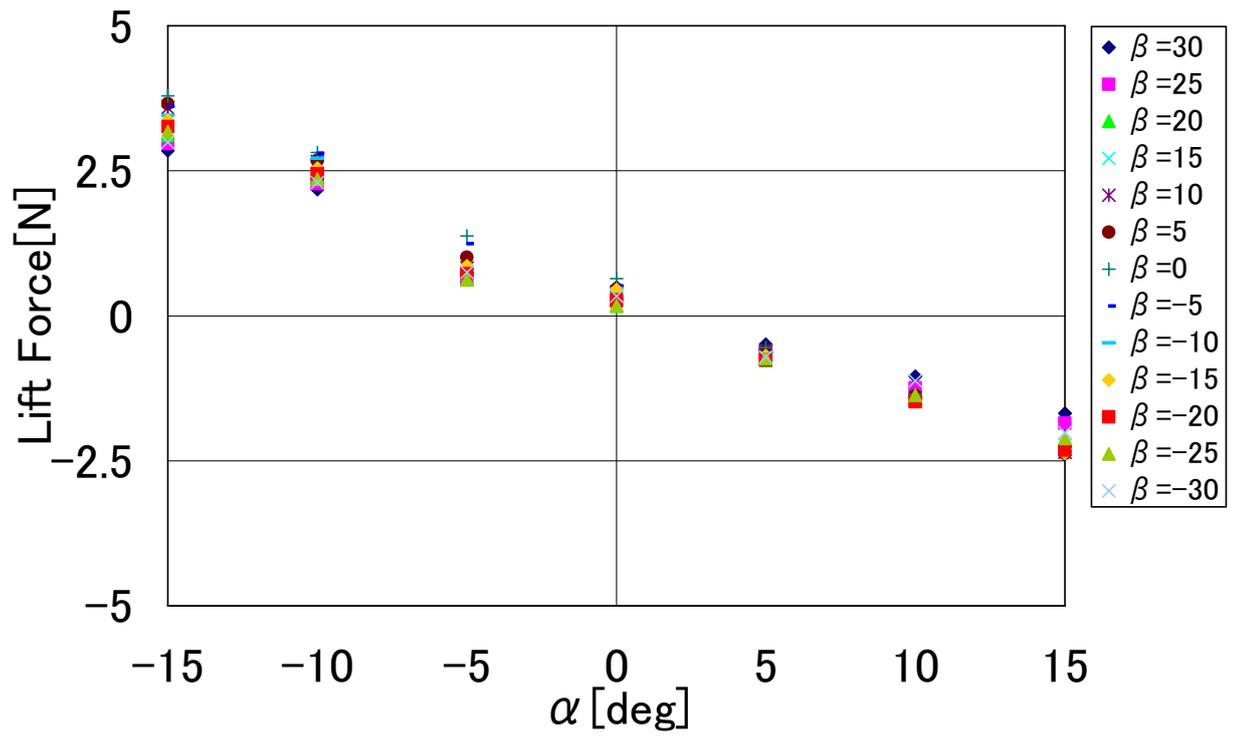


Fig.2-43 Lift Force with α

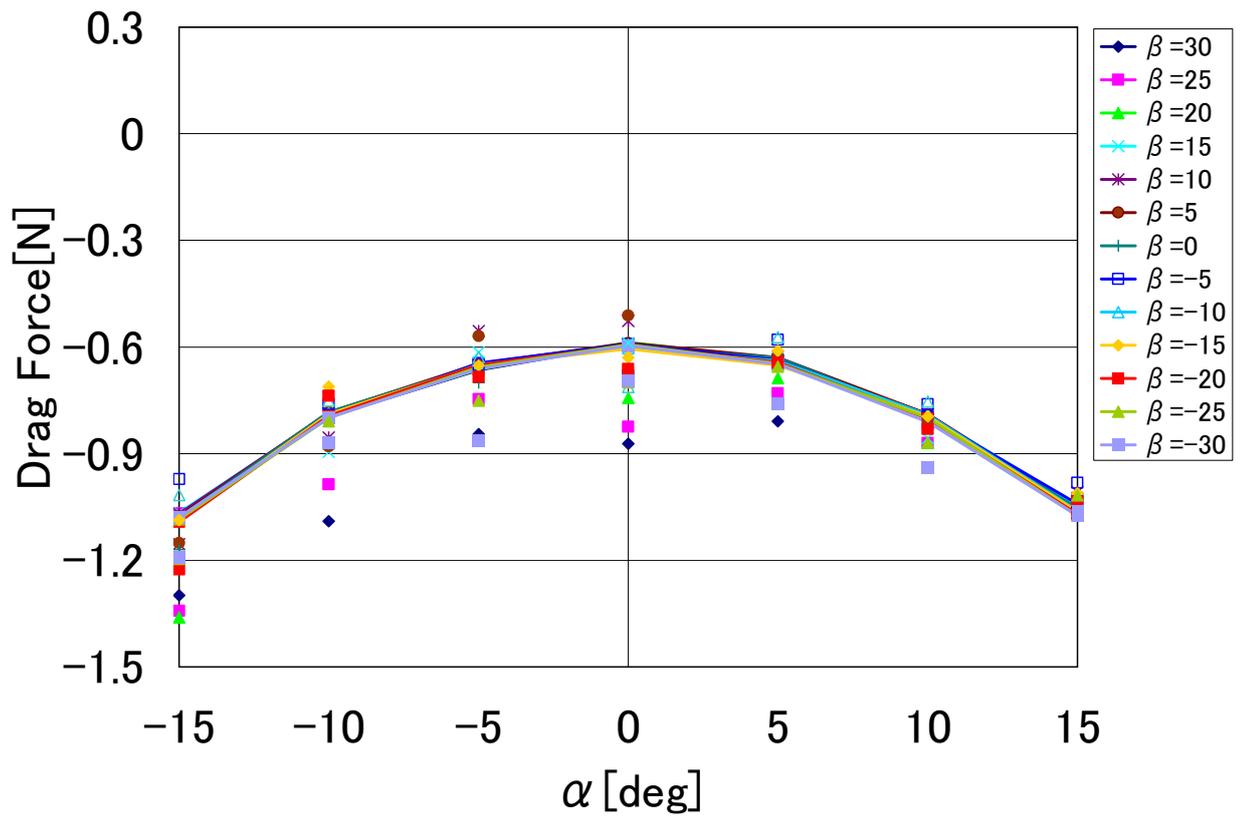


Fig.2-44 Drag Force with α (quadratic approximation)

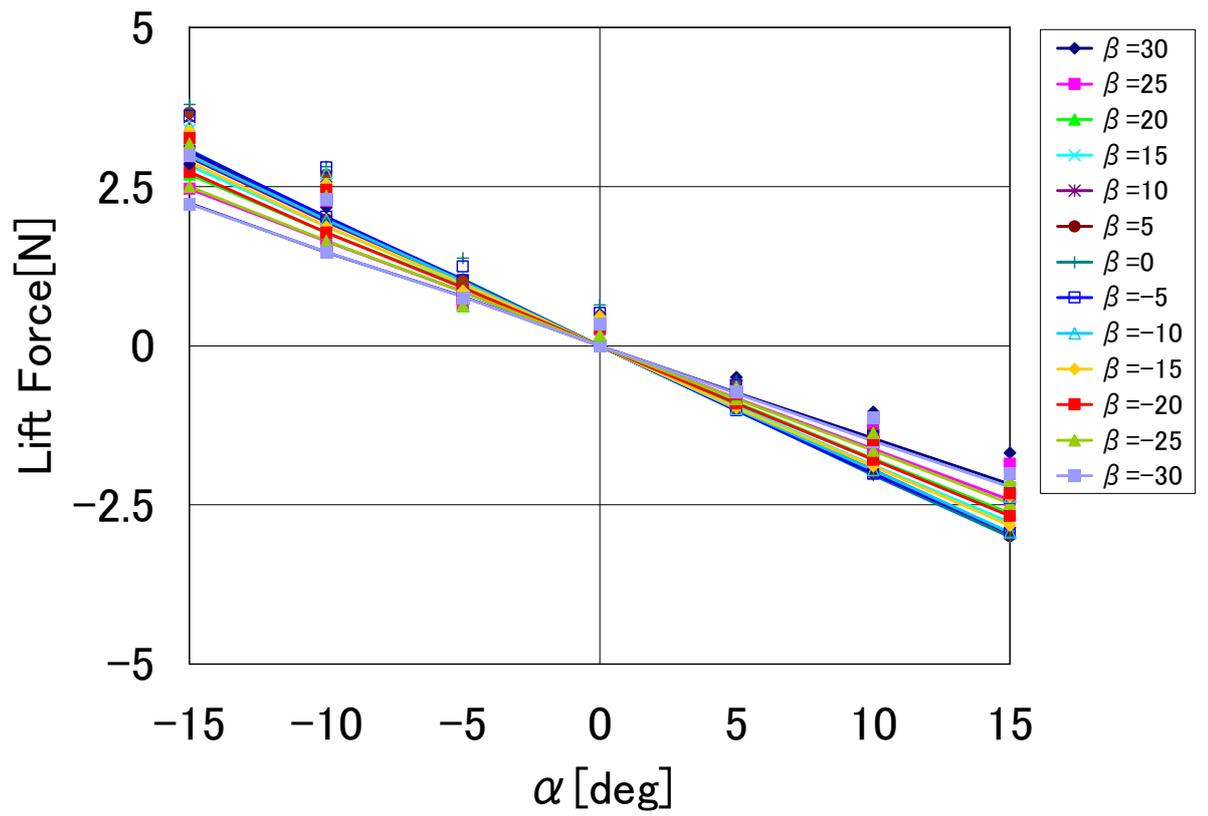


Fig.2-45 Lift Force with α (First-order approximation)

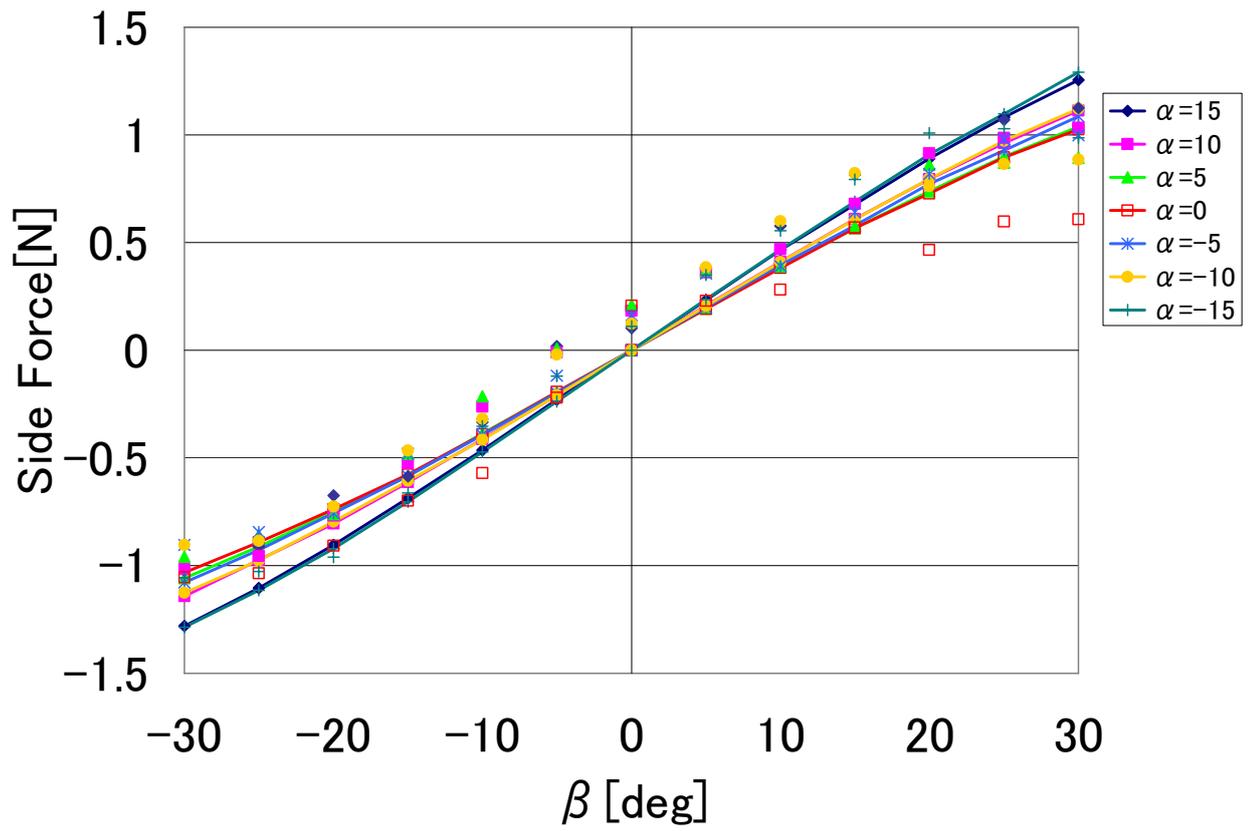


Fig.2-46 Side Force with β (Quadratic approximation)

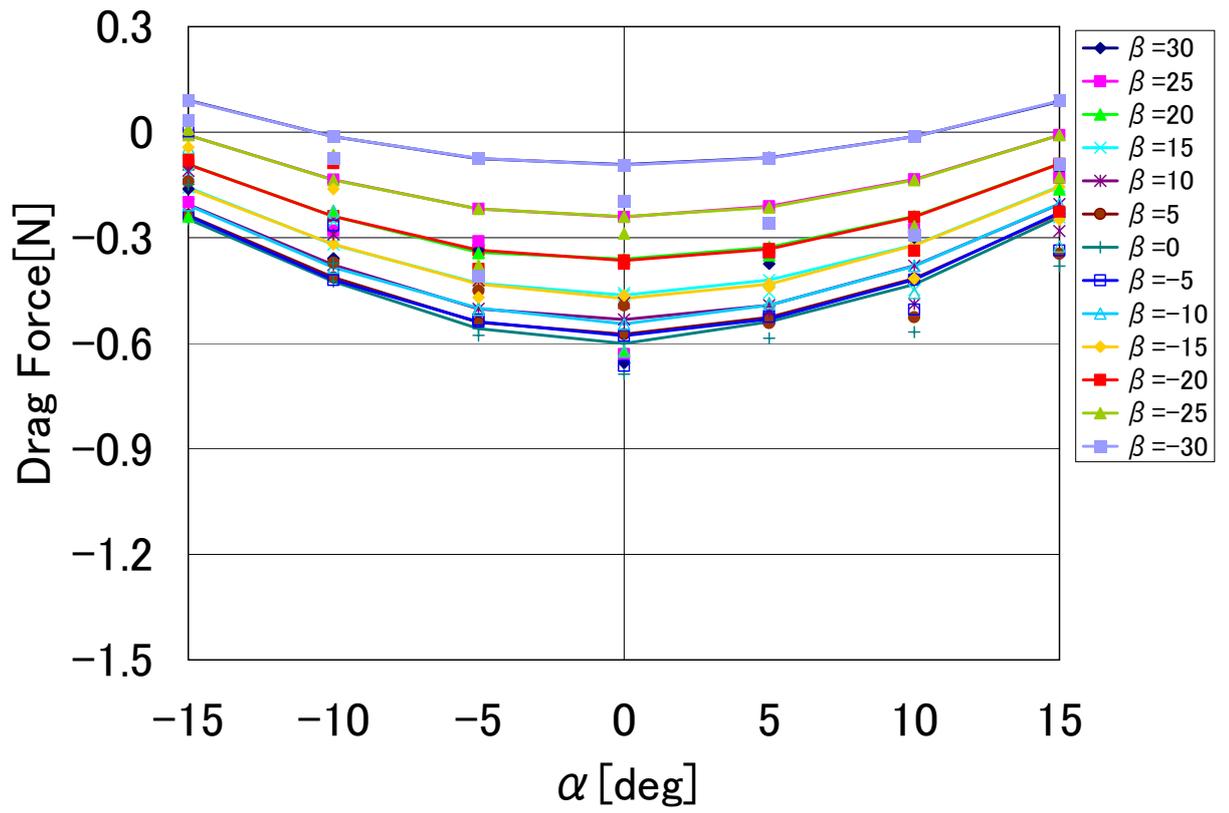


Fig.2-47 Drag Force with α (Quadratic approximation)

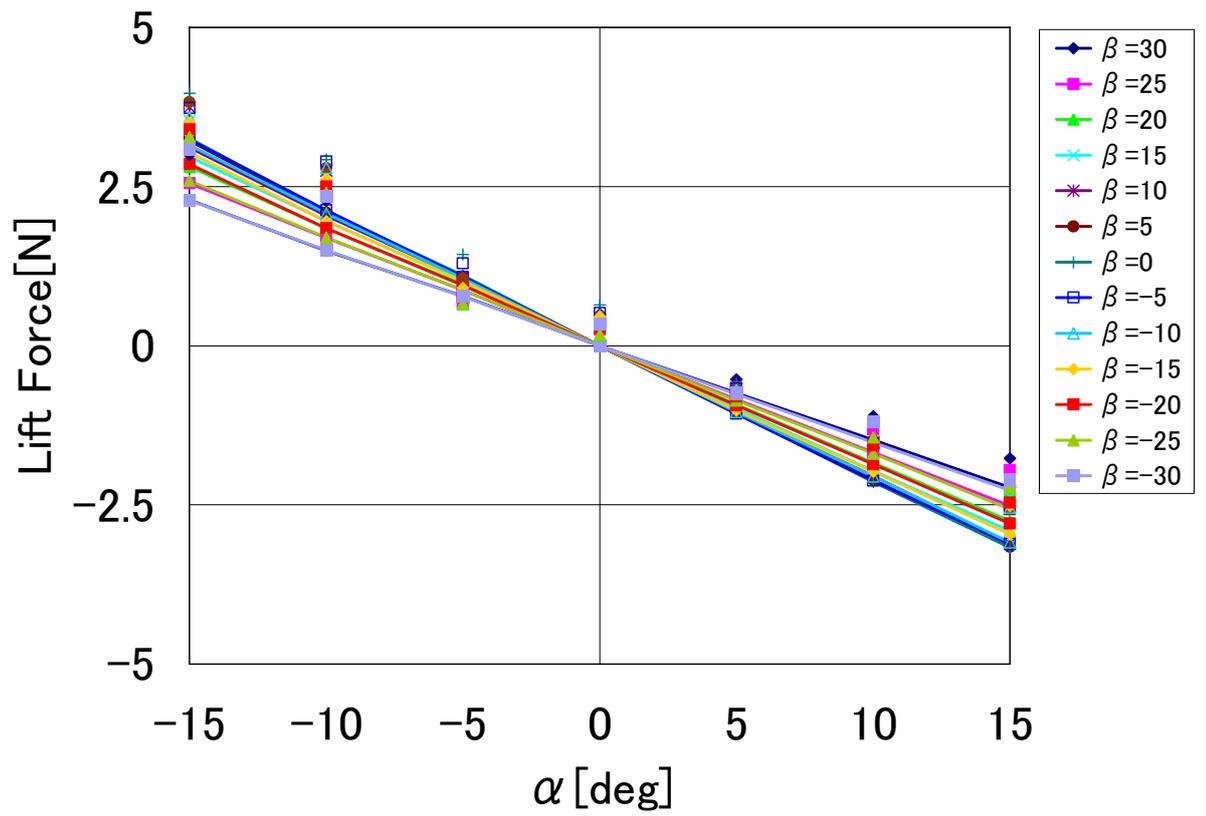


Fig.2-48 Lift Force with α (First-order approximation)

2.3.4 ロボットのコンピュータシステム

AquaBox II のコンピュータシステムは、行動決定をおこなうコンピュータ（以下：上位制御）と姿勢制御等の運動制御を行うマイクロコントローラ（以下：下位制御）が搭載されている。また、陸上の支援コンピュータは、リモートデスクトップによりロボットの状態を監視することができる。行動決定を行うコンピュータは、画像情報、ハイドロフォン、マイクロコントローラから送信されるロボットの状態から行動決定を行う。マイクロコントローラは、各センサの情報を取得し、行動指令に従ってロボットの姿勢の制御を行う。

(1) マイクロコントローラ

AquaBox II には、運動制御を行うマイクロコントローラとして PIC18F8720 をメインCPUとした制御用ボードを開発し搭載した。PIC18F8720 の仕様を Table 2-11 に開発した制御用ボードの仕様を Table 2-12 に示す。また、開発した制御用ボードの配線図を Fig.2-49、制御ボードの外観を Fig.2-50 に示す。制御用ボードには、PIC18F8720 チップをそのまま実装するのではなく、秋月電子製の PIC18F8720 モジュールを使用した。これにより PIC モジュールの着脱をすることができ、PIC の故障などの場合簡易に付け替え可能である。

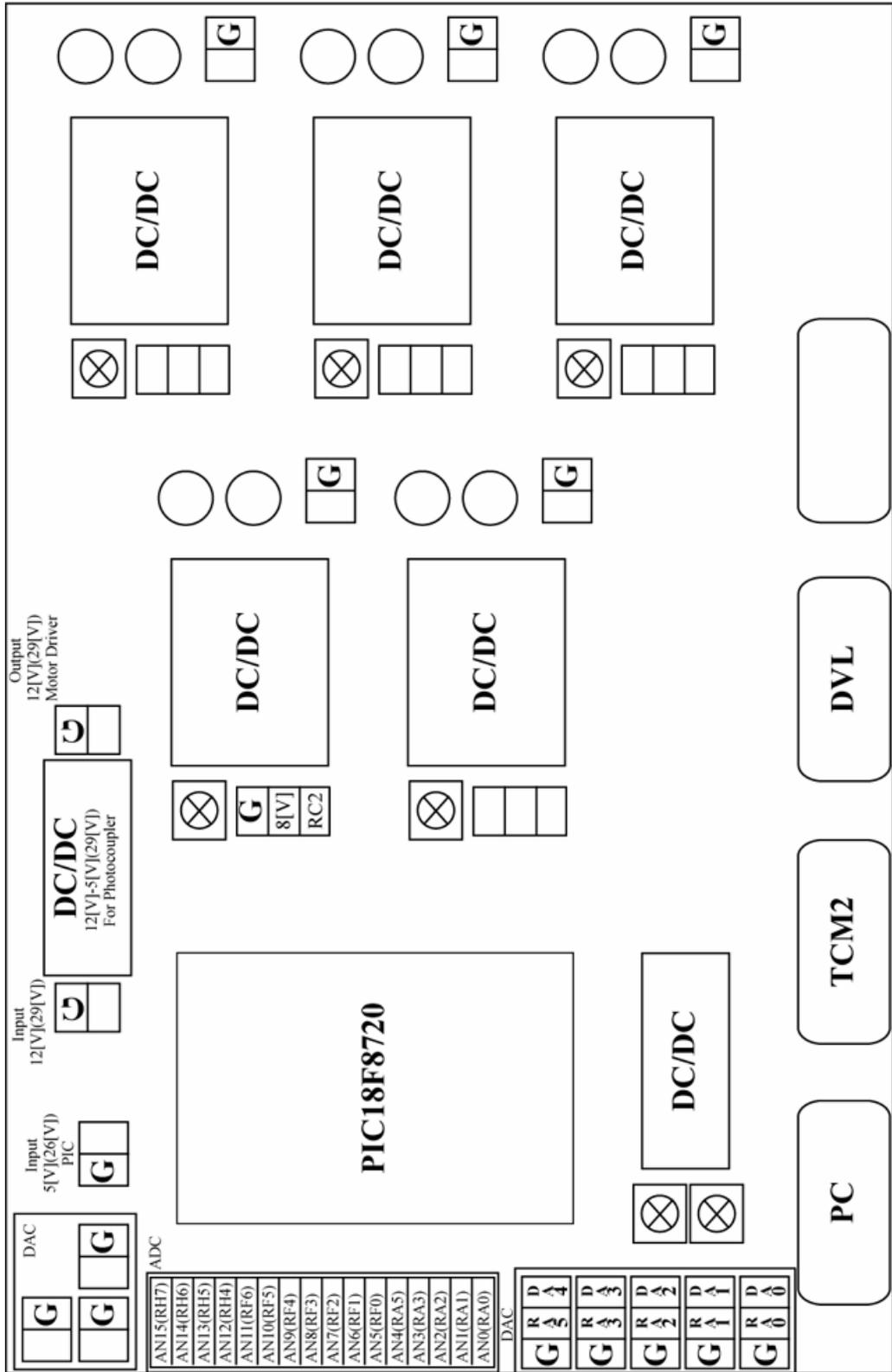
制御用ボードには、RS232 通信用ポートが 4 ポートあり、10bitAD 変換が 16ch、12bitDA 変換が 8ch あり各チャンネルにはフォトカプラが実装されている。さらにサーボモータ用の電源および制御信号線も 5ch 用意している。制御用ボードには、深度センサ、角速度センサ、DVL（姿勢センサ、方位センサ、速度センサ）、スラストが接続されている。制御用ボードでは、各センサ情報から状態を取得し、上位制御へ送信する一方、指令に応じた姿勢制御を行う。

Table 2-11 Specifications of PIC18F8720

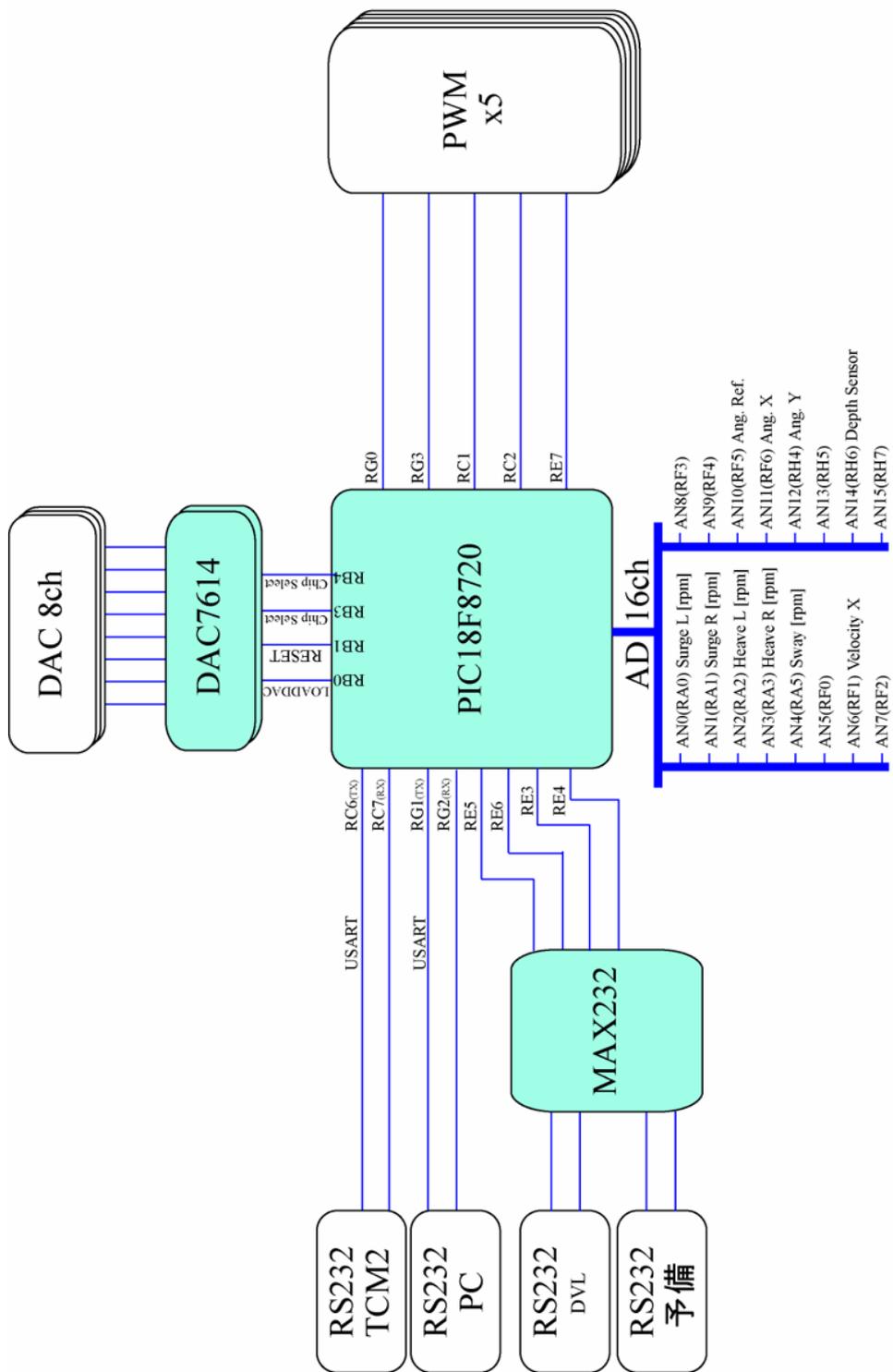
Program Memory		Data Memory		I/O	10bitAD ch	Max Fosc (MHz)
Bytes	Single Word Instructions	SRAM	EEPROM			
128K	65536	3840	1024	68	16	25
CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8bit/16bit	Ext Bus	
	SPI	I2C				
5	Y	Y	2	2/3	Y	

Table 2-12 Specifications of control board

CPU	COM (MAX232)	10bit AD	12bit DA(DAC7614U)	Power Supply	PWM
PIC18F8720	4(USART 2)	16	8	5[V]	5



(a)Layout



(b)Connection diagram

Fig.2-49 Architecture of the Control board

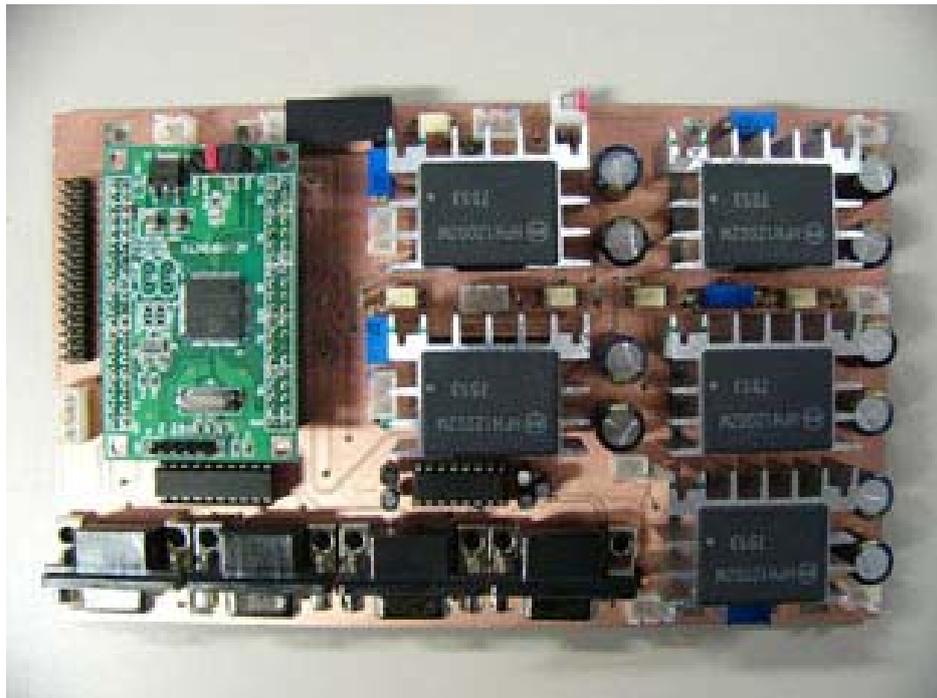


Fig.2-50 Control board appearance

(2) コンピュータ

AquaBox II には、運動制御をおこなうマイクロコントローラに加えて行動決定を行う PC を搭載している。PC の仕様を Table 2-13 に示す。この PC は、CPU に Pentium M 1.1[GHz]、メモリ容量 512[MB]である。OS は、Windows XP professional を採用し、リモートデスクトップを使用して外部の支援 PC より直接操作することを可能としている。カメラ等は USB を介して PC に接続している。AquaBox I では、画像処理ボードを搭載していたが、ここで搭載している PC は、処理に十分な仕様であると判断したため画像処理ボード等を搭載していない。AquaBox II には、AquaBox I 同様に DVL を搭載しているが、DVL から PC へのデータレートが 1[Hz]と遅く、ロボットの姿勢制御には適応することができない。そのため本研究では、DVL のデータを支援コンピュータで取得しロボットの状態観測用に使用している。

Table 2-13 Specifications of computer

Model	VGN-U71P
OS	Windows XP Professional
CPU	Pentium M 1.1[GHz]
Memory	512MB(DDR SDRAM)
HDD	30GB
I/O(本体)	USB 2.0 x 1
通信	2.4[GHz] Wireless LAN
消費電力	26[W]
Battery	Li-ion
Size	L : 167 W : 108 H : 26.4 [mm] (S battery)
Weight	550[g] (with battery S)

2.3.5 ロボットのソフトウェアシステム

AquaBox II のソフトウェアシステムは、ROV モード、AUV モードの 2 種類ある。ROV モードでは、外部の支援 PC から直接制御用ボードにコマンドを送り、Joystick などの User interface でコントロールすることができる。この場合は、AquaBox I 同様、姿勢制御等の基本制御はマイクロコントローラで行い、行動指令のみ支援 PC から行う。AUV モードでは、行動決定を行うロボット内部の PC から基本制御をおこなうマイクロコントローラへと指令する。これらのソフトウェアは、C 言語により構築されている。

2.3.6 ロボットの全体システムの構成

以上に述べたコンピュータシステムは、AquaBox II の Hull1 に行動決定を司る PC、Hull2 内に姿勢制御を行うマイクロコントローラを配置し、陸上に支援 PC を配置している。それらの通信は LAN ケーブルにより行われ AquaBox II 内部では Ethernet serial converter により RS232C 通信に変換しマイクロコントローラと内部 PC の通信を行っている。また、AquaBox II と陸上の支援 PC とは水密ケーブル及び水密コネクタを介して Ethernet で接続されている。ロボット全体のシステム構成図を Fig.2-51 に示す[41-43]。

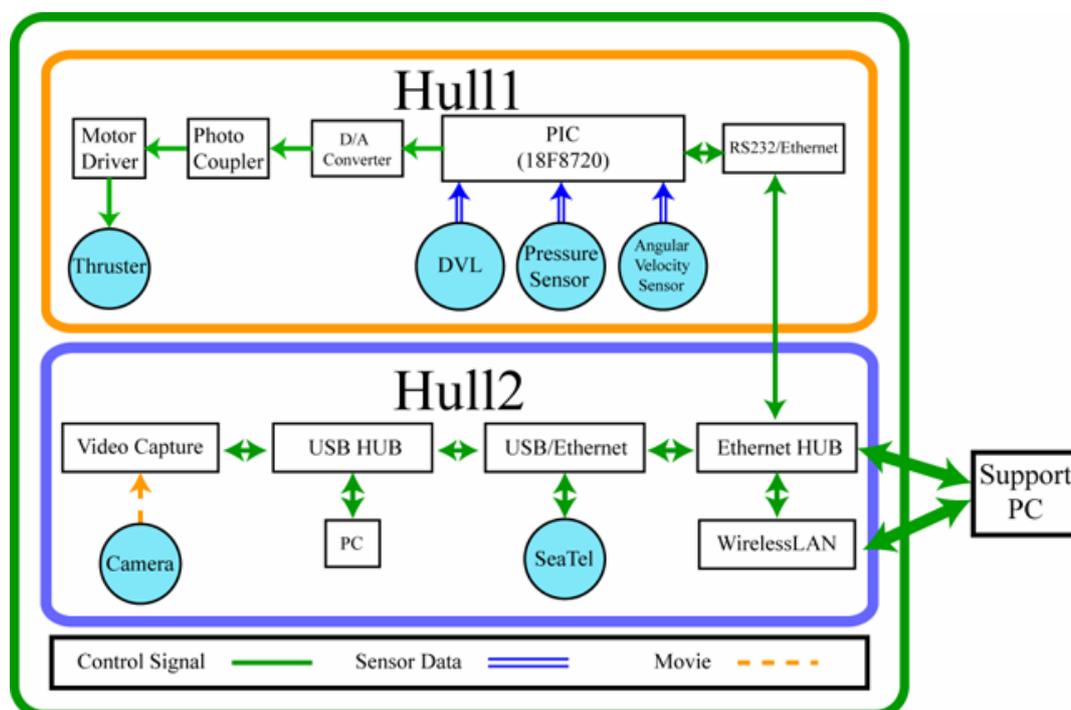


Fig.2-51 System Architecture (AquaBox II)

2.4 Autonomous Underwater Vehicle “AquaBox III”

2.4.1 ロボットの設計方針

開発するロボットは、ペイロードを重視した AquaBox II とは対照的に前進方向への運動性能を重視している。より軽量化、高機能化を目指した設計とする。ロボットの設計方針は、以下のとおりである。

- ・ 2, 3 人で実験を行えるような規模にすること。
- ・ テストベッドとしても運用できるように、高機能なコンピュータを搭載する。
- ・ 制御は、行動決定を司る制御システム（以降：上位制御）と姿勢等の基本的な制御部（以降：下位制御）とに分割したシステムを構築する。
- ・ センサ等の拡張を確保するためロボットは、フレーム構造とする。
- ・ 前進方向への運動性能を重視した形状とする。
- ・ 軽量化し、運用面の向上を図る。
- ・ 実海域でのさまざまな観測を実施するためにセンサ等の拡充を図る。

2.4.2 ロボットの設計・製作

新たに開発するロボットのシステム構成は、AquaBox II とほぼ同様である。相違点として新たに開発するロボットには、フェアリングを搭載せず AquaBox I と同様にフレーム構造とした。これによりロボット全体の重量を軽減することができ、メンテナンスの向上も図れる。新たなロボットの名称は、“AquaBox III”とする。AquaBox III は、全長 1.7[m]、乾燥重量 40[kg]で Hull1、Hull2 に関しては AquaBox II と同様であるが、新たに水中音響解析用の dsPIC、流速センサ用回路、超音波距離センサ用回路を搭載した耐圧容器をそれぞれ搭載している。

内部の設計は、これまでのロボット同様に CAD ソフト Autodesk Inventor(AIP8) を使用して行った。AIP8 によって設計した AquaBox III を Fig.2-52 に示す。

実際に製作した AquaBox III の外観を Fig.2-53 に示す。ロボットの構成は、五つの耐圧容器、二種類の水中カメラ、デバラスト等がアルミニウム製のフレームおよび MC ナイロン製の構造部材によって構成された骨組みに搭載された構造となっており、これまでのロボット同様に拡張性を持たせた構造となっている。

AquaBox III には、実海域での運用も考え、AquaBox I,II で使用していた 40[W] 推進器を 100[W] 推進器に変更した。AquaBox III は、この推進器を 5 基搭載しており、そのうち 2 基は前進後退および差動による回頭用に、別の 2 基は、上下方向用であり、残りの 1 基は左右への平行移動用である。AquaBox III は、1 号機同様ホバリング型である。

外部認識用のセンサとしては、超音波を用いた距離センサ、全方位カメラ、下方向カメラ、ハイドロフォンを搭載している。3 号機では、DVL を搭載していないためロボットに方位計、傾斜計、電磁流速計を搭載している。その他のセンサは 2 号機同様、深度センサ、角速度センサを搭載している。AquaBox III の機器配置の様子を Fig.2-54 に。主要装備品一覧を Table 2-14 に示す。以下に AquaBox III の構成機器の詳細について述べる。

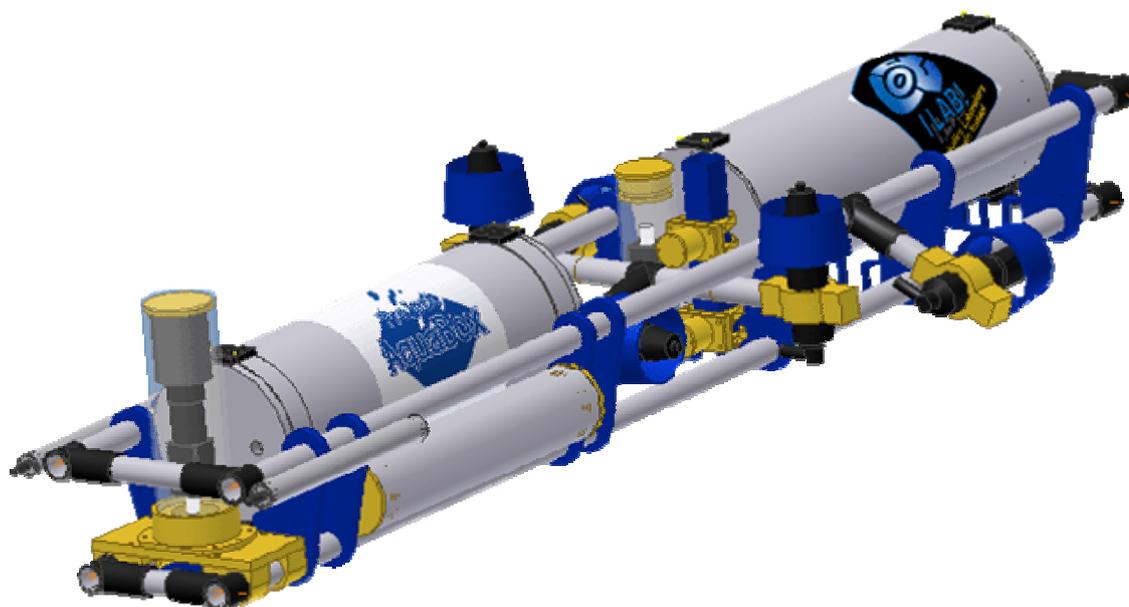


Fig.2-52 AquaBox III appearance (CAD image)



Fig.2-53 AquaBox III appearance

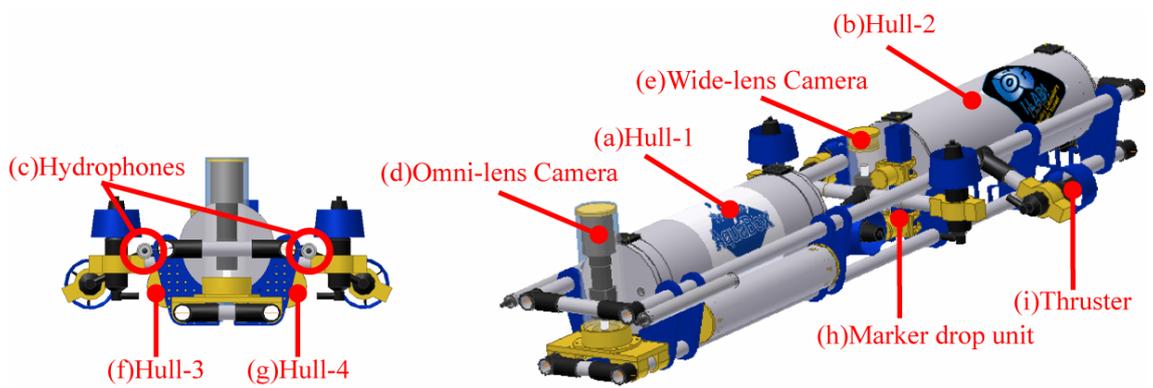


Fig.2-54 Configuration of AquaBox III

(1) 耐圧容器およびフレーム

搭載機器を収納する耐圧容器及びフレーム等の設計は、基本的に AquaBox I と同様な設計指針であるが、AquaBox III は自律型の水中ロボットとすること、またテストベッドとしても運用できるようにするために、主要な搭載機器の選定を終了した後に、これらの外形および重量を考慮して行った。耐圧容器に関しては、AquaBox II 同様の設計である。また、フレームに関しては、容器類の保護及び組み立て分解、可搬性、拡張性を持たせる構造とした。フレームの材質に関しては、AquaBox II 同様、軽量化のためにアルミニウムフレームを採用した。また、ロボットの構成部材および耐圧容器の支持用に MC ナイロンを使用した。これにより鉄製のジョイントで構成する 1 号機に比べて軽量化、コンパクト化を図ることができた。

○耐圧容器

耐圧容器には、PC、バッテリー、地上との通信を行うための機器を搭載する Hull1、センサ情報の取得および姿勢制御を行う制御ボードを搭載した Hull2 がある。これらは AquaBox II とほぼ同様であるが、モータドライバを搭載した推進器に変更したため Hull2 内部のモータドライバは取り除いている。水中音響解析用の耐圧容器(Hull3)、電磁流速計の信号処理用の基盤を搭載した耐圧容器(Hull4)は、新たに開発する。超音波距離センサ用信号処理基盤を搭載した耐圧容器(Hull5)は、東京大学生産技術研究所浦研究室より借用している。Hull3、Hull4 は、Hu11、Hull2 同様アルミニウム製である。Hull3、Hull4 の設計方針は、2.2.1 で述べたとおりである。Hull3、Hull4 の円筒部の長さおよび径は共に同じサイズであり、360[mm]、80[mm]としている。蓋の外形については、Hull3 はアルミニウム製、Hull4 は ABS 製である。O-リングの呼び番号については、Table 2-15 に示す。使用した水中コネクタについては付録に示す。

Table 2-15 Specifications of O-Ring (Hull3, Hull4)

	JIS 呼び番号	太さ [mm]	内径 [mm]
Hull3,4 (蓋部)	G40	3.1 ± 0.10	39.4 ± 0.37
空気穴部	P6	1.9 ± 0.08	5.8 ± 0.15

(ii) フレーム

AquaBox III のフレームには、AquaBox I と同様、組み立て、分解、可搬性および拡張性からフレーム構造を採用した。AquaBox III は AquaBox II 同様、アルミニウム製のパイプを採用した。さらにアルミニウムパイプには、防水加工を施して使用した。耐水加工は、ABS 樹脂にシリコンシーラントを塗ったものをパイプ開口部に挿入した。継ぎ手部には、ヤザキ製の鉄製のものを使用した。さらに 3 号機には、ロボット全体をコンパクトとするために MC ナイロン製の構造部材を新たに製作し(Fig.2-55)、数枚を Fig.2-56 のように配置した。この部材は、ケーブルを把持する部分、耐圧容器を支持する部分、フレームを結合する部分からなっている。さらにそれぞれの隔壁には、ねじ止め用の貫通穴を用意してある。これは、隔壁にも拡張性を持たせるためである。

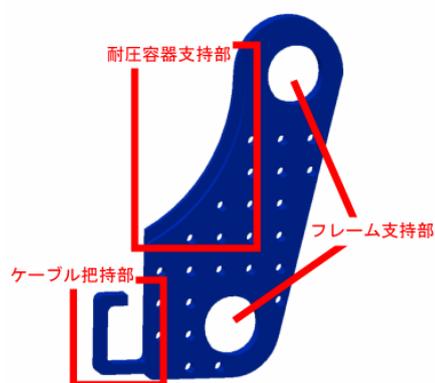


Fig.2-55 Bulkhead

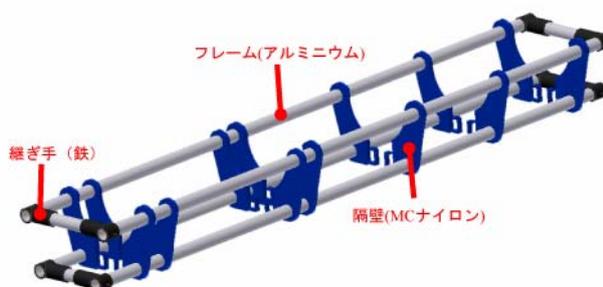


Fig.2-56 Frame structure (AquaBox III)

(2) センサ

AquaBox III に搭載しているセンサは、周囲の環境を認識するための外界センサ、ロボット自身の状態を知るためのセンサである。以下にこれらの詳細について述べる。

○内界センサ

内界センサとしては、前後進方向の速度の計測を行う電磁流速計、コンパス、Pitch、Roll の計測を行う姿勢センサ、2 軸まわりの角速度を検知する角速度センサ、深度の測定を行う深度センサを搭載している。

角速度センサ、深度センサについての詳細は、2.2.2 で述べたとおりである。

電磁流速計は、KENEK 製のもので最大±50[cm/s]まで測定可能である。この流速計は x・y 軸の 2 軸測定可能であり、ゼロ調整が可能となっている。AB3 は、x 軸のみ測定している。温度、気圧等によるゼロ調整は必要ないが、水道水と海水のように導電率の違う水質の場合は、ゼロ調整が必要となる。この調整は、本体アンプのゼロ調整用のトリマーで行う。流速と出力値の関係は、流速によって出力特性が変化するように調整されている。仕様を Table 2-16 に、流速と出力の関係を Fig.2-57 に示す。

姿勢センサは、DVL に搭載されているものと同様である。外観を Fig.2-58 に示す。Compass, Pitch、Roll、Temperature の測定が可能である。AquaBox III では、5[Hz]でデータの取得を行っている。

Table 2-16 Specifications of Velocity sensor

流速[cm/sec]	出力値[V]	関係式(x: 電圧 y: 流速)
0 ~ ±10	±2.5	$y = 8x - 20$
10 ~ 50	2.5 ~ 5.0	$y = 32x - 110$
-10 ~ -50	-2.5 ~ -5.0	$y = 32x - 50$

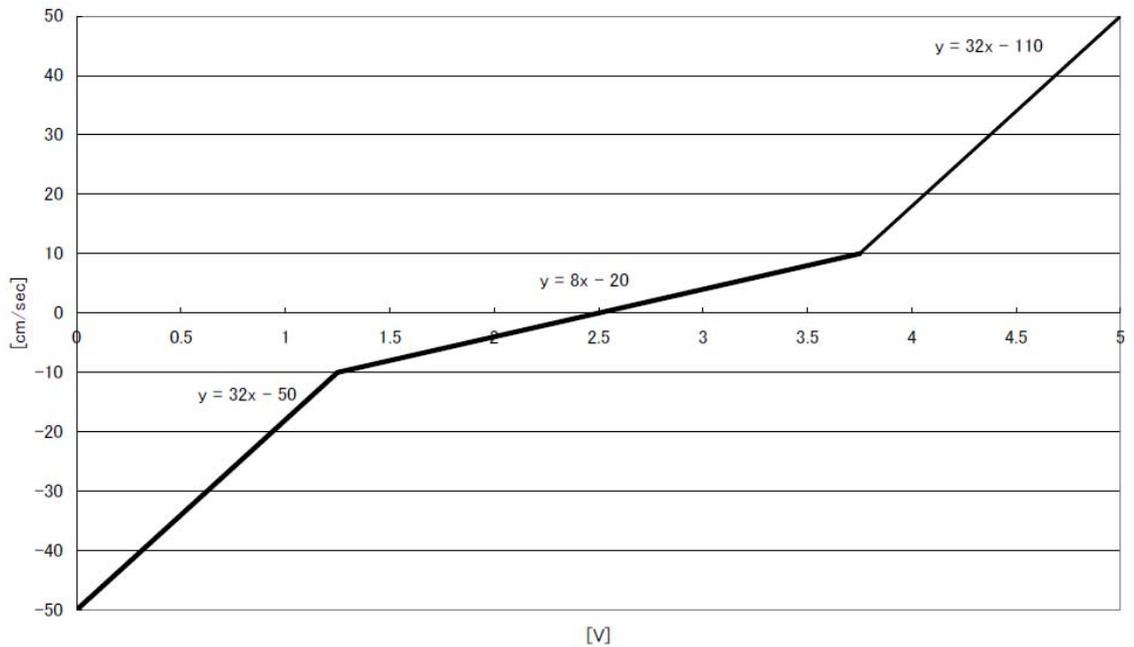


Fig.2-57 Velocity - Output voltage



Fig.2-58 Attitude sensor (TCM2)

○外界センサ

AquaBox III には、3 種類の外界センサが搭載されている。障害物との距離を測定する超音波距離センサ、全方位カメラ、下方向カメラである。超音波距離センサは、海洋電子株式会社製で、周波数 150[KHz]で有効角は 30[deg]である。AquaBox III には、8 基搭載している(Fig.2-59)。全方位カメラは、USB カメラに全方位ミラーを取り付けたものを透明アクリルで耐水仕様としている(Fig.2-60)。このカメラは 360[deg]の画像を一度に取得することが可能である(Fig.2-61)。下方向のカメラは、USB カメラを ABS と透明アクリルで耐水仕様とし、ロボット

中央に搭載している(Fig.2-62)。また、ロボットの前部には開発したハイドロフオンモジュールを2基搭載している。

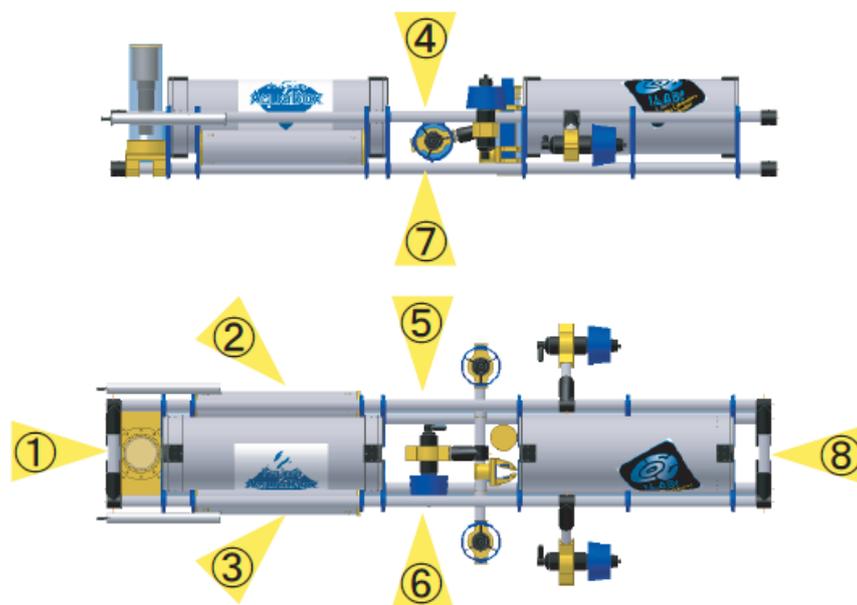


Fig.2-59 Configuration of ultrasonic range sensors



Fig.2-60 Omni-lens camera

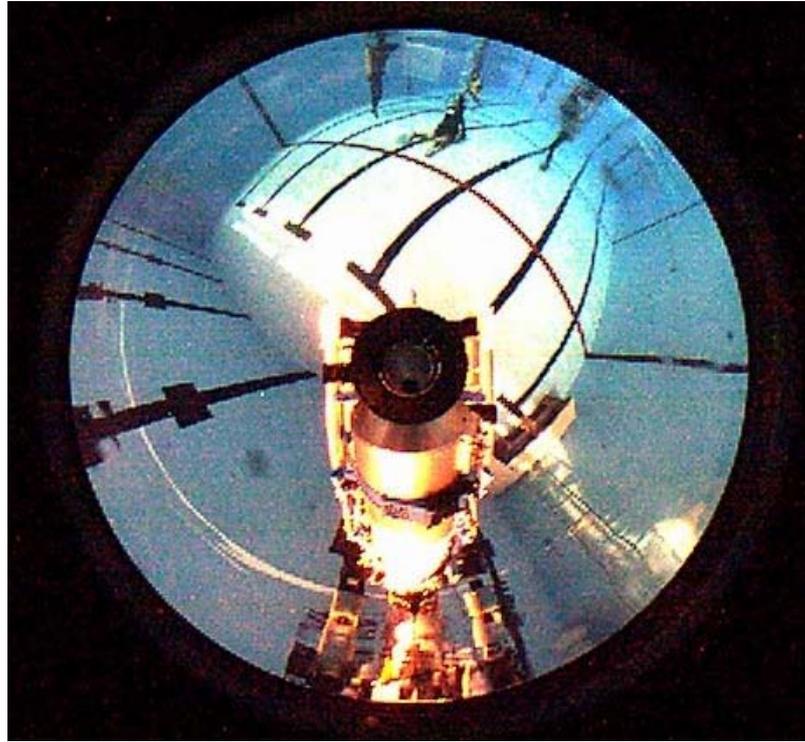


Fig.2-61 Acquisition image (Omni-lens camera)

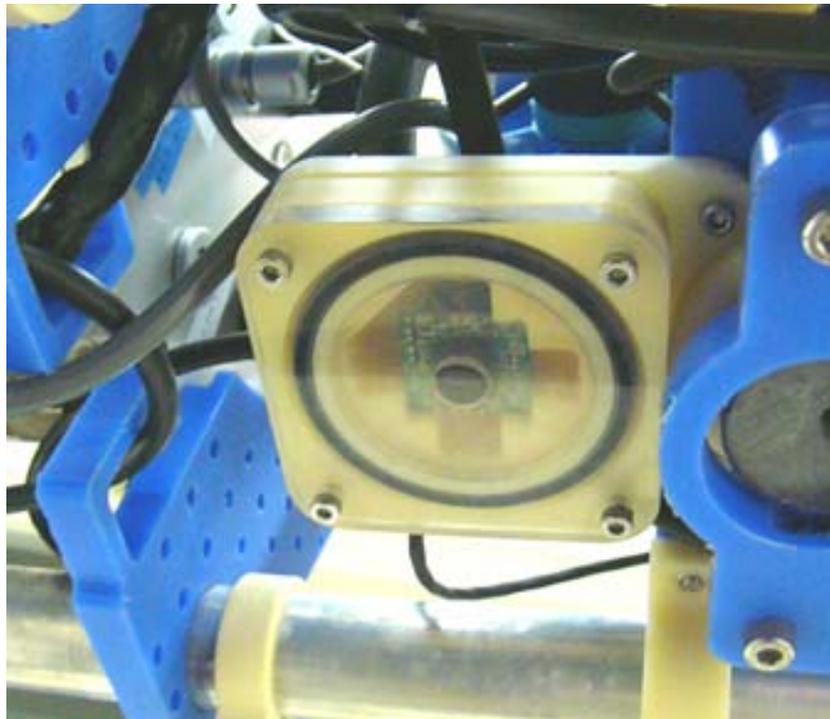


Fig.2-62 Downward camera

(3) 推進器

AquaBox III は、AquaBox II で使用していた推進器に変えて新たに三井造船製の 100[W]推進器を 5 基搭載している。推進器の仕様を Table 2-17 に示す。この推進器は、内部にモータドライバが内蔵されており、ロボットから制御信号を入力することで推力を得ることができる。また、推進器からは回転数信号が出力される。回転数は、2.2[V]/1000[rpm]となっている。現在は、オープンループで使用しているため運動制御を行う際には、推力に対応した制御電圧を計算する必要がある。指令電圧と推力の関係式は[2.4.1],[2.4.2]のとおりである。検力結果を Fig.2-63 に示す。

Table 2-17 Specifications of thruster

型式	三井 MPT 型スラスト
最大使用深度	750[m]
入力電圧	24[VDC]
制御用電源	12[VDC]
制御入力	±5[VDC]
出力	100[W]
回転数出力	2.2/1000[V/rpm]
空中重量	0.93[kg]
水中重量	0.56[kg]
モータ部寸法	L : 216[mm] W : 57[mm]
ケーブル長さ	1.2[m]
コネクタ型式	LMG-6-FS
レセプタクル	LSG-6-BCL
スラスト用ダミープラグ	LMG-6-MPD-LP
レセプタクル用ダミープラグ	LMG-6-FSD

<正転>

$$y = 0.0007x^3 - 0.023x^2 + 0.3264x + 1 \quad (2.4.1)$$

<逆転>

$$y = 0.0053x^3 + 0.1041x^2 + 0.8259x - 1 \quad (2.4.2)$$

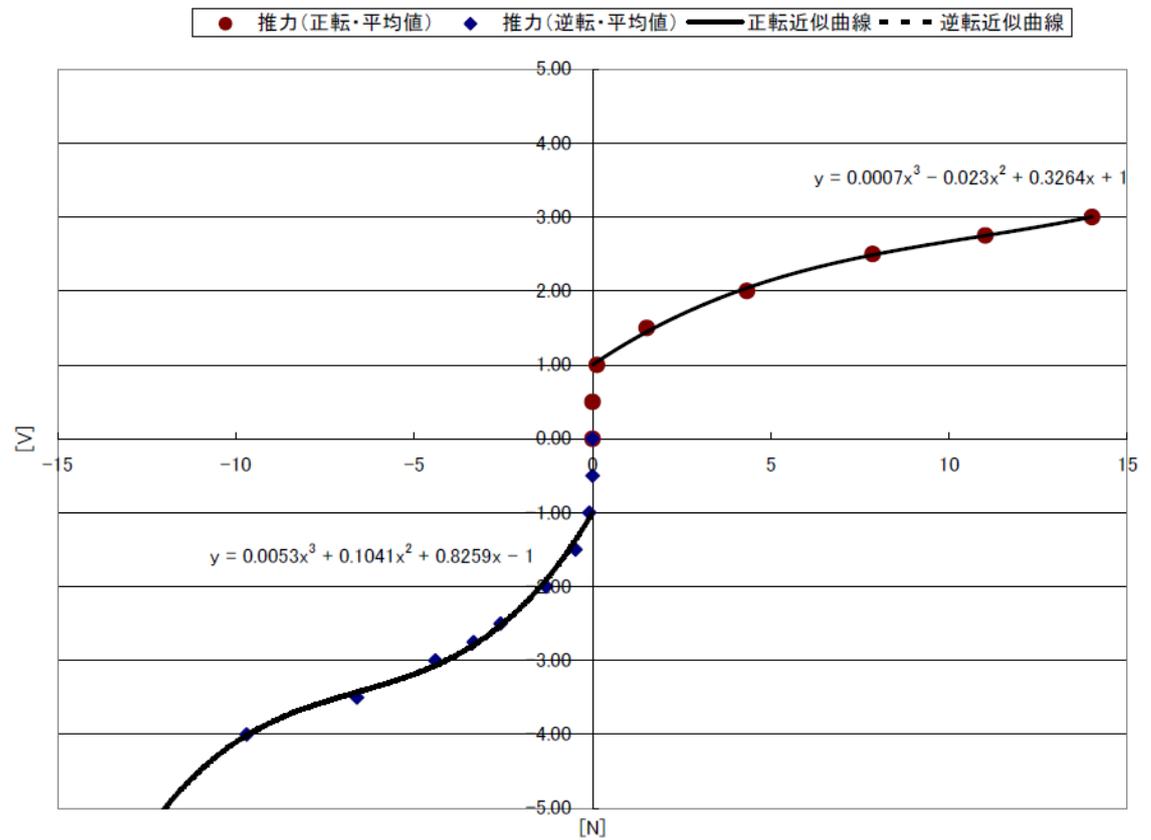


Fig.2-63 Input command (voltage) - Thrust force

(4) 通信システム

AquaBox III の通信は、AquaBox II と同様である。従って 2.3.2 で記述したとおりである。超音波通信 SEATEL に関しては、現在実装していない。

(5) 電源供給システム

AquaBox III の電源供給システムは、AquaBox II とほぼ同様であるが新たにセンサ等を追加した電源供給システム図を Fig.2-64 に示す。詳細は 2.3.2 で記述したとおりである。

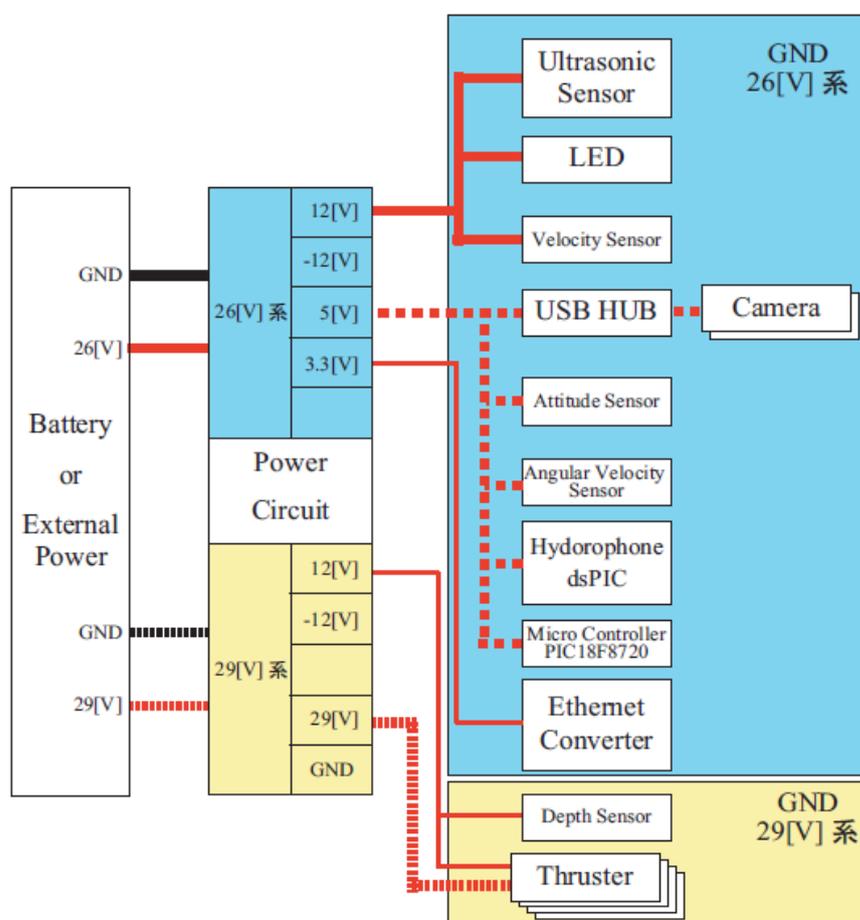


Fig.2-64 Power supply installation system diagram (AquaBox III)

(6) 放熱

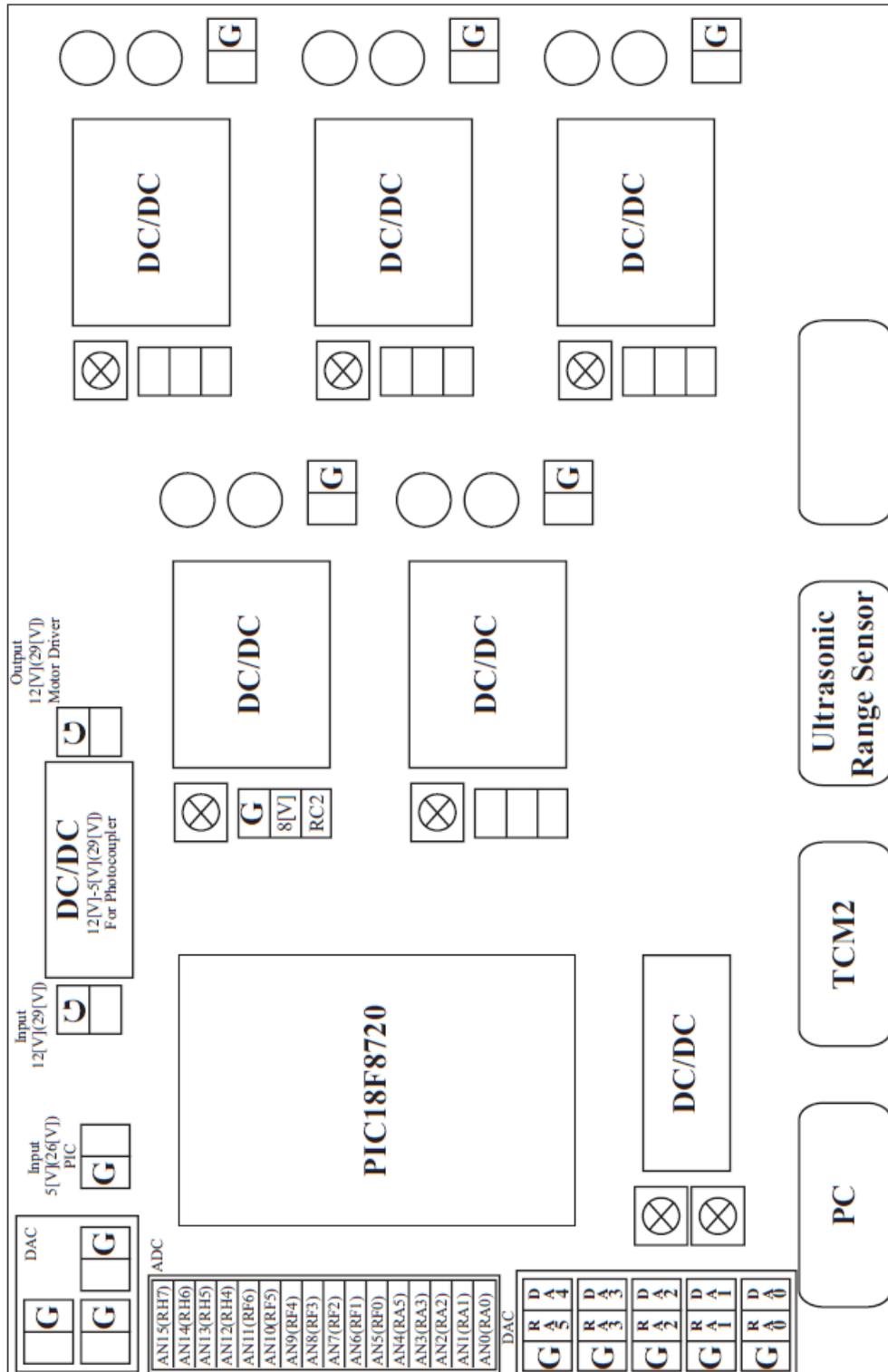
Hull1、Hull2 に関しては AquaBox II と同様である。従って 2.3.2 で記述したとおりである。Hull3、Hull4、Hull5 に関しては、内部に搭載する機器はそれほど発熱する機器ではないことから特に放熱のための FAN 等を取り付けていない。

2.4.3 ロボットのコンピュータシステム

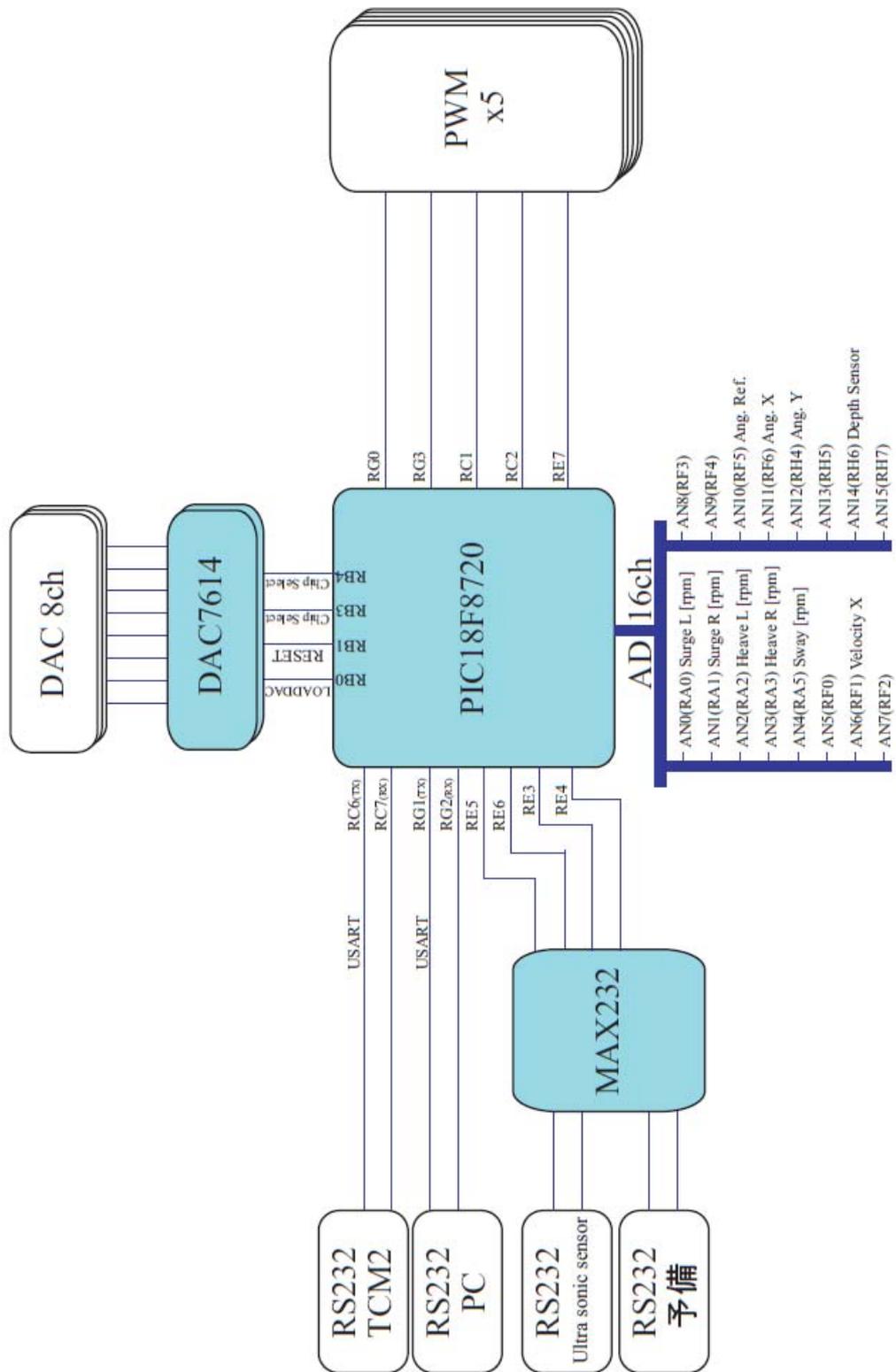
AquaBox III のコンピュータシステムは、AquaBox II と同様のシステムである。AquaBox III では、ソフトウェアの更新のみ行っている。行動決定を行う PC では、Visual programming “ICONNECT”を新たに導入している。2号機、3号機のシステムは、ほぼ同様であるから 3号機であらたに導入したシステムは、同時に2号機への導入を意味する。

(1) マイクロコントローラ

AquaBox III の運動制御用マイクロコントローラは、AquaBox II とほぼ同様である。しかしながらセンサ等の接続が多少ことなるので制御ボードの配線図を Fig.2-65 に示す。新たに導入した外界センサは、超音波距離センサ、速度センサである。超音波距離センサは、RS232 を介して通信している。速度センサに関しては、制御ボードの AD 変換に接続されている。



(a) Architecture of the control board (Layout)



(b) Architecture of the control board (Connection diagram)

Fig.2-65 Architecture of the Control board

(2) コンピュータ

AquaBox III のコンピュータシステムは、AquaBox II と同様に画像処理等を行うことができる十分な処理能力を持っている。詳細は、2.3.4 で記述したとおりである。

2.4.4 ロボットのソフトウェアシステム

AquaBox III のソフトウェアシステムは、ROV モード、AUV モードの 2 種類ある。ROV モードでは、外部の支援 PC から直接制御用ボードにコマンドを送り、Joystick などの User interface でコントロールすることができる。この場合は、AquaBox I、II 同様、姿勢制御等の基本制御はマイクロコントローラで行い、行動指令のみ支援 PC から行う。AUV モードでは、行動決定を行うロボット内部の PC から基本制御をおこなうマイクロコントローラへと指令する。これらのモードは AquaBox II と同様であるが、行動決定を行う PC および外部の支援 PC のソフトウェアが異なる。以下に新たに導入したソフトウェアシステム Visual programming “ICONNECT”について述べる。また、このソフトウェアを使用して AquaBox 用 Graphic User Interface を開発した。ICONNECT の特徴は、以下のとおりである。

- ・関数がモジュール化されており、画像処理、Interface 等の基本的なモジュールが用意されている。
- ・ユーザがモジュールの生成をすることができ、他のシステムへもモジュールを簡易に適用できる。
- ・モジュール間の入出力関係が明確である。従ってモジュール同士の接続を行う場合、異なった型を接続できないようになっており、モジュールの接続を間違えることがない。

ICONNECT のワークスペースを Fig.2-66 に示す。

(1) 行動決定システム

AquaBox III の行動決定システムは、制御ボードから取得したロボットの状態から次の行動を生成する部分である。これはカメラからの情報および超音波距離センサなどの外界センサとロボットの状態から判断される。それらの行動決

定システムの構築には、Visual programming “ICONNECT”を利用した。行動決定は、ひとつのモジュール内で行われる。取得したすべてのデータからロボットの行動を生成する。このモジュールは、ロボットの頭脳と考えられ、ニューラルネットワークコントローラなどのコントローラを簡単に適応することが可能である。

ICONNECTを利用した AquaBox III のシステムを Fig.2-67 に示す。システムは、下位の制御部からの状態の取得や指令値などを送受信する通信部分、行動決定を行う部分、そしてロボットの状況を表示する GUI である。

(2) GUI

GUI は、ICONNECT を利用して開発した。開発した GUI を Fig.2-68 に示す。GUI は、ロボットから障害物までの距離を表示する部分、ロボットの姿勢、現在の行動を表示する部分およびロボット始動・停止を行う部分から構成されている。また、この GUI のバックグラウンドでは、取得したセンサデータおよびロボットの出力等がファイルに書き出されている。AquaBox III の GUI は、現在も開発段階であり今後、画像情報の表示など高機能化を図る予定である。

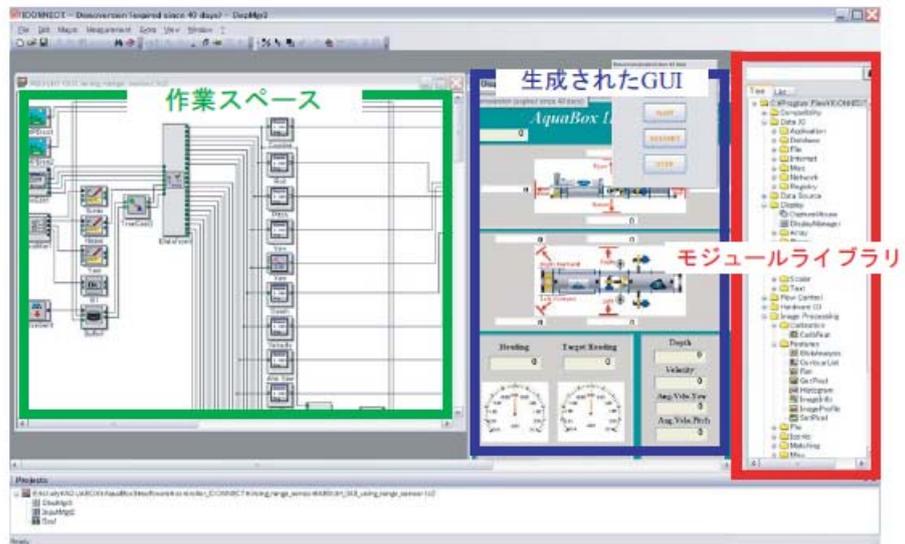


Fig.2-66 Workspace of ICONNECT

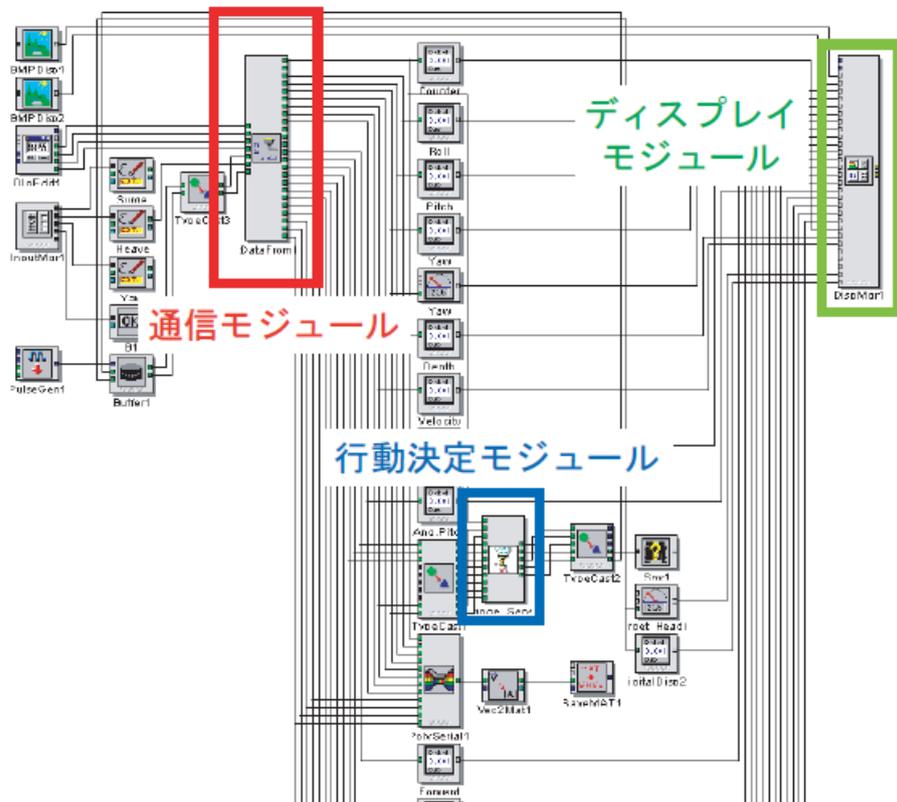


Fig.2-67 Developed decision making system using ICONNECT

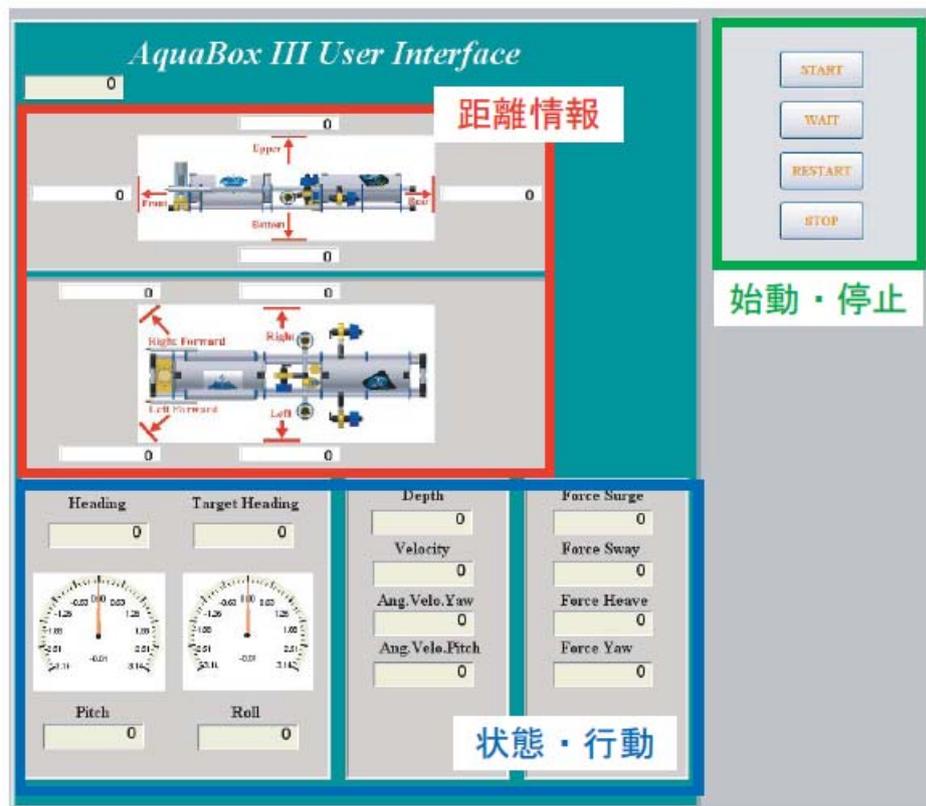


Fig.2-68 AquaBox III Graphic User Interface

2.4.5 ロボットの全体システムの構成

以上に述べたコンピュータシステムは、基本的に AquaBox II と同様であり、AquaBox III の Hull1 に行動決定を司る PC、Hull2 内に姿勢制御を行うマイクロコントローラを配置し、陸上に支援 PC を配置している。それらの通信は LAN ケーブルにより行われ AquaBox III 内部では Ethernet serial converter により RS232C 通信に変換しマイクロコントローラと内部 PC の通信を行っている。また、AquaBox III と陸上の支援 PC とは水密ケーブル及び水密コネクタを介して Ethernet で接続されている。ロボット全体のシステム構成図を Fig.2-69 に示す。

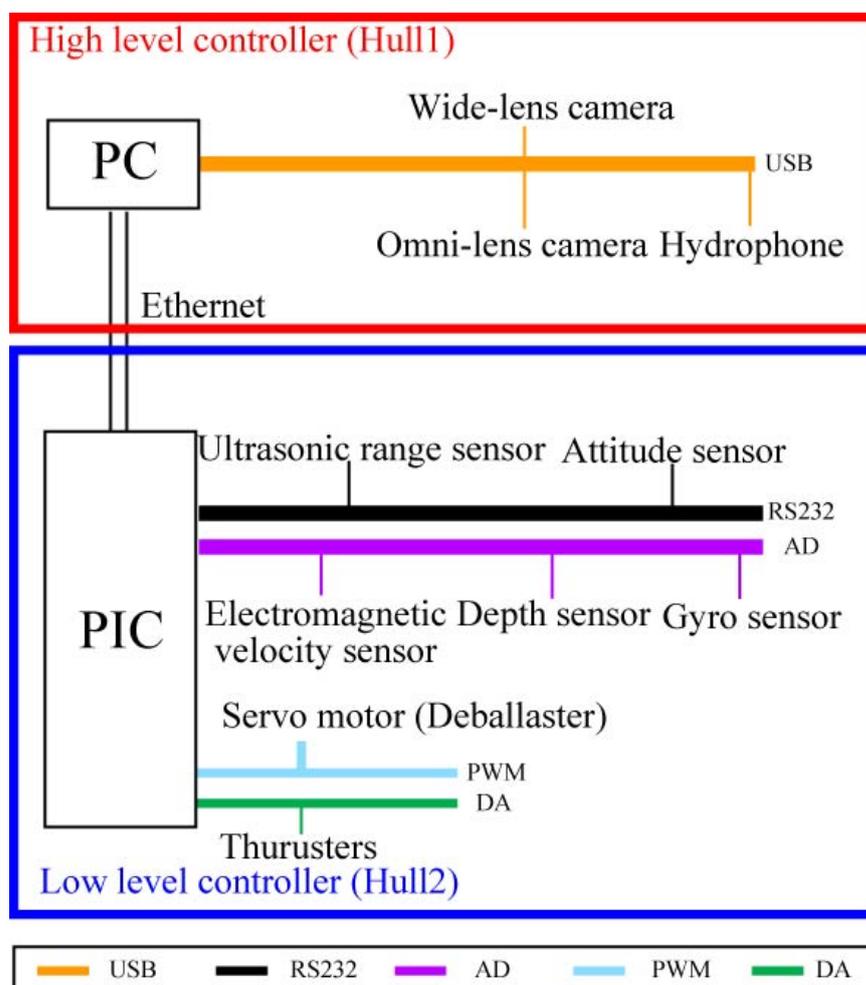


Fig.2-69 System Architecture (AquaBox III)

第3章

小型水中ロボットを用いた水槽実験

第3章 小型水中ロボットを用いた水槽実験

3.1 はじめに

AquaBox I、AquaBox II、AquaBox III (以下：AquaBox Robots)は、主に1章で述べたコンセプトに従い開発した。AquaBox Robotsは、行動決定を行う上位制御、運動制御を行う下位制御に分割している。本章では、AquaBox Robotsの水槽実験にてついでの結果および考察を行う。

3.2 AquaBox I

3.2.1 PID制御の適用

AquaBox Iの下位制御部には、YawおよびHeaveに対してPID制御を適用した。また、PID制御のゲイン決定法としてZiegler Nicholsの限界感度法(Ziegler Nichols ultimate sensitivity method)を適用した。この手法は、モデルの情報は使われていない。そのためこの手法ではコントローラのパラメータ決定の方針を与えるにとどまっており、安定性を保証したコントローラの設計法を体系的に与えるものではない。

いま、制御対象 $P(s)$ が

$$P(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

で近似できたとする。この制御対象に対して、目標値応答の行き過ぎ量が25%程度になるようにパラメータの設定を行う。以下に決定法の流れを示す。

<ステップ1>

制御対象に対して比例制御だけを行う。 $K_d = K_i = 0$ として、 K_p を徐々に大きく

していき閉ループ系が安定限界となる K_p の値を K_c とする。またこのとき安定限

界なのでシステムには持続する振動が残る。この振動の周期を T_c とする。

<ステップ 2 >

K_p, K_i, K_d を K_c, T_c に基づいて Table 3-1 から決定する。

Table 3-1 Ziegler Nichols ultimate sensitivity method

	Kp	Ki	Kd
P 制御	$0.5 K_c$	0	0
PI 制御	$0.45 K_c$	0	$0.83 T_c / K_p$
PID 制御	$0.6 K_c$	$0.125 T_c / K_p$	$0.5 T_c / K_p$

この手法により PID のゲインを決定した。

3.2.2 実験

前節のゲインから Yaw 運動および Heave 運動の制御を行った。Yaw に関しては角速度 0[rad/sec]とし、ロボットの水平方向の振動を抑制した。また Heave に関しては目標深度を 4[m]として動作試験を行った。実験結果を以下に示す。Fig.3-1 は、Yaw 運動の角速度データを示す。Fig.3-2 は、Yaw 運動のモーメントを表している。回転モーメントの制限として±1[Nm]の制限を設定している。動作は、多少のゆれが生じているがこれは、センサからのデータが揺らいでいるためでセンサを改善すれば解決できる問題である。Fig.3-3 は、深度のデータである。目標深度は 4.0[m]である。Fig.3-4 は、Heave 動作をおこなったときの力を表している。このとき力の制限として±5.0[N]を設けている。

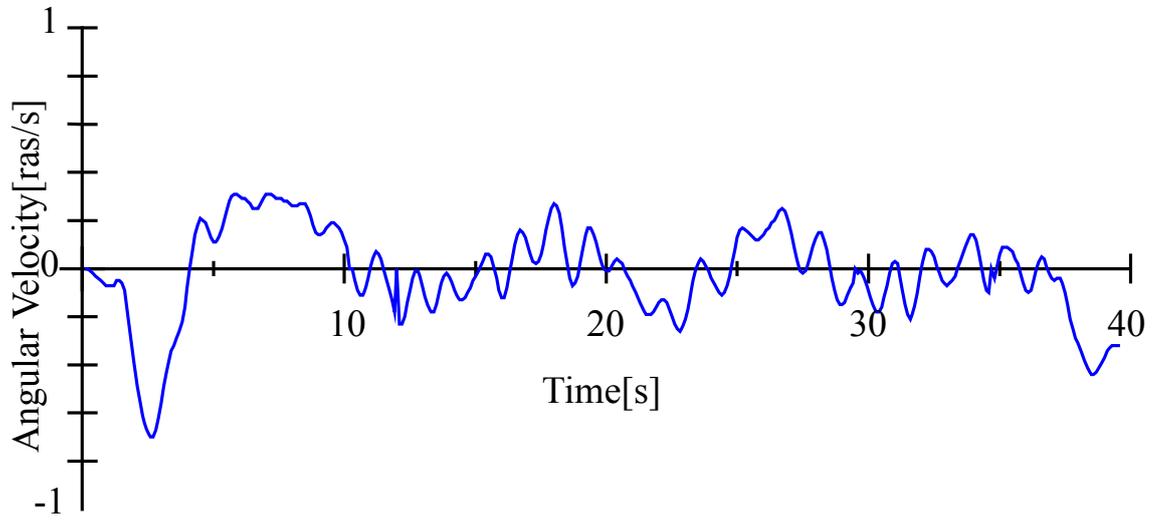


Fig.3-1 Angular Velocity(Yaw)

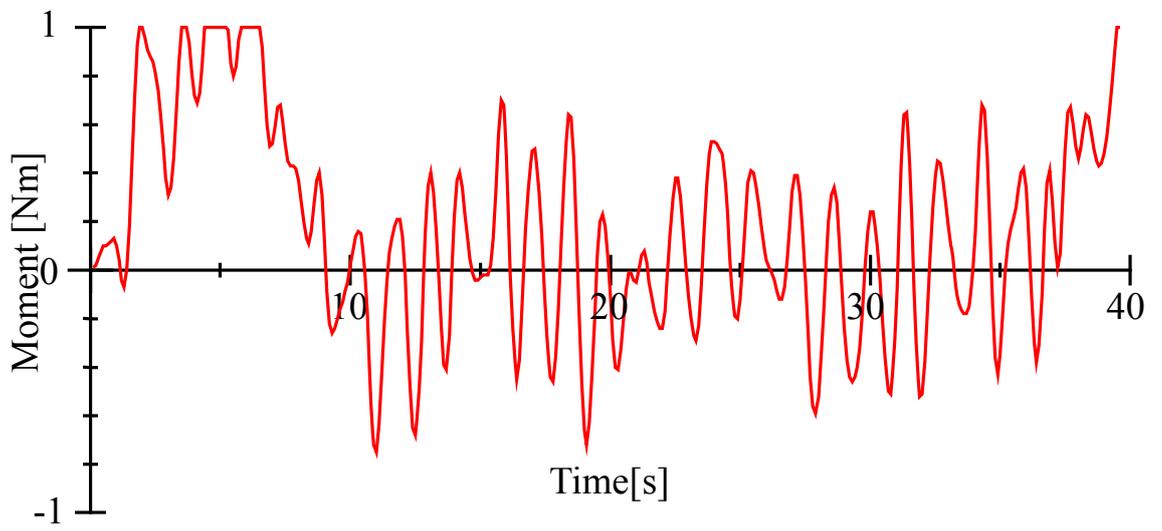


Fig.3-2 Moment(Yaw)

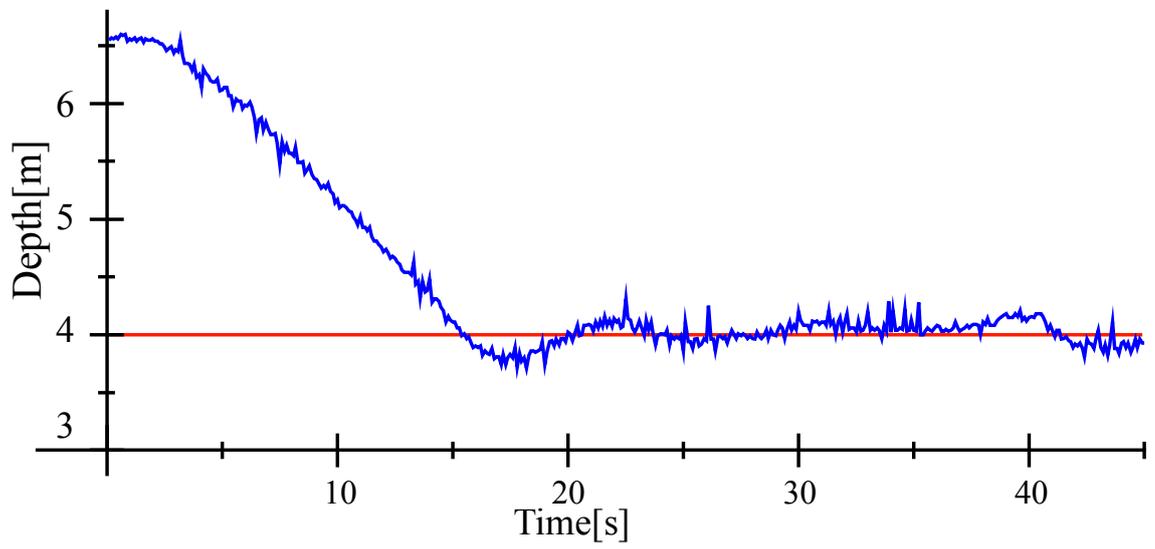


Fig.3-3 Depth data

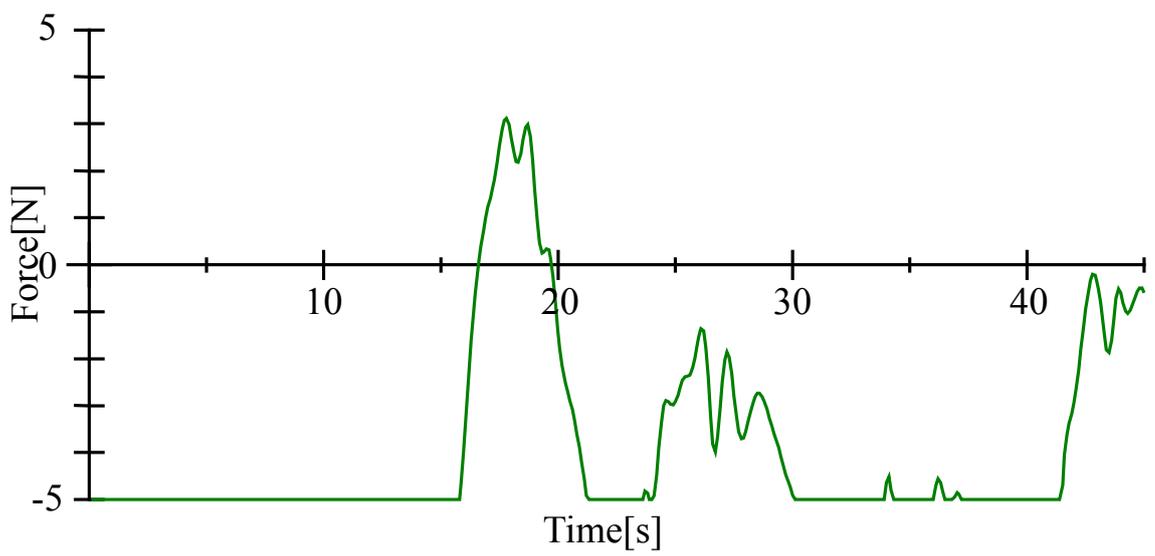


Fig.3-4 Force(Heave)

3.2.3 考察

Fig.3-1 から Yaw 運動のセンサデータが振動していることが分かる。これは、センサの基準電圧が安定していないためである。角速度センサには、基準電圧、センサに対して x 軸周りの角速度の出力信号、y 軸周りの角速度の出力信号がある。センサから各軸周りの信号は、入力した基準電圧との差分をとる。その値を増幅した値が出力電圧としている。従って基準電圧の振動、ノイズがのった場合には、それらの信号も増幅されロボットに入力される。角速度センサに関しては、基準電圧の生成方法、信号の増幅方法など根本的な改善が必要である。制御に関しては、Fig.3-2 から分かるようにロボットの水平方向の振動を抑制する方向に動作しようとしている。従って制御に関しては妥当であるのではないかと考察できる。改善点としては、センサの改良後、ゲイン調整をすることが考えられる。

Fig.3-3 は、ロボットの深度を表している。深度 7[m]から目標深度 4[m]に浮上してくる動作を行っているのだが、目標深度への到達後も出力の制限である -5[N]出力し続けている。これは、浮力材として利用している発泡スチロールが水圧により収縮してしまいロボットの浮力が変化していると考えられる。従って、あるゲインに設定してもロボットが潜航する際には、ロボットの状態が変化し、設定したゲインでは最適な制御が行われていないと考えられる。改善策としては、浮力材の変更である。先に述べたシタクチック・フォームなどの素材を使用することが望ましい。

システム全体の評価としては、ROV として運用することが可能であり、センサ等の改善をすれば実用としてもテストベッドとしても運用可能な範囲なのではないかと考えられる。

3.3 AquaBox II

AquaBox II には、現在コントローラの開発を行っている。それは、2.3.3 で行っている動特性の解析結果を踏まえたコントローラの開発を行っているからである。ここでは、ロボットを ROV モードで動作させる実験を行い、スラストの配置の妥当性等について議論を行う。

3.3.1 実験

実験は、直径 6[m]、水深 0.9[m]の簡易プールで行った。外部に支援 PC を用意し、ロボットと Ethernet で接続し指令値を Joystick で与えた。

3.3.2 考察

本実験では、ロボットに対して Surge、Yaw、Heave の動作モードを行わせた。ロボットは、2.3.2 で記述したとおり 40[W]スラストを搭載している。設定した出力は、Surge に対しては、最大 ± 5 [N]、Heave に対しては、 ± 10 [N]、Yaw に対しては ± 3 [Nm]とした。動作に関しては、それぞれの運動モードに対して動作することが確認できた。しかしながら設定した出力では、実海域において運用することは困難であると思われる。出力値の設定を向上させるためには、現在のスラストでは、出力が不足しているため、スラストの推力の大きいものに変更する必要があると思われる。

3.4 AquaBox III

3.4.1 PID 制御の適用

AquaBox III の下位制御部には、これまでの AquaBox と同様に Surge、Heave、Heading、Roll に対して PID 制御を適用した。Surge、Roll に関してのゲインは、経験的に与えたものである。Pitch、Sway に関しては、現在は制御の適応をおこなっていない。また、PID 制御のゲイン決定法は、Ziegler Nichols の限界感度法を用いた。決定したゲインを Table 3-2 に示す。

Table 3-2 PID-Gain

	P	I	D
Heave_Gain	28.000	0.283	0.071
Yaw_Gain	2.000	0.800	1.000
Surge_Gain	60.000	0.000	0.070
Roll_Gain	1.500	0.000	0.000

3.4.2 実験

(1)基本制御

実験は、直径 6[m]、水深 0.9[m]の簡易プールで行った。ゲインは、前節で決定したものを適用した。実験は、Heading の制御、Heave の制御をおこなった。Heading に関する実験結果を Fig.3-5 に示す。目標方位-1.0[rad]とし、ロボットの回転モーメント±3.0[Nm]の制限を設定している。目標方位に到達後、わずかに定常偏差が残っていることが分かる。これは、Heading 制御に積分項を設定していないことが要因であると考えられる。積分項を設定していない理由として、本実験で使用しているコンパスは、ロボットのアルミニウム製の Hull 内に搭載しており、ただしく磁場を検出できないことがあり、センサの出力値が正しく出力されないという問題がみられた。積分項を設定した場合、正しく出力していないデータから偏差の積分をしてしまい、ロボットを制御できなくなる可能性があるからである。しかしながらここで見られる定常偏差は 0.1[rad]程度であり、ロボットの動作に関してそれほど支障がないと考えられる。

Heave 制御に関する実験結果を Fig.3-6 に示す。Heave の制御実験は、目標深度 0.5[m]で行った。結果から分かるように深度データが揺らいでいることが分かる。深度センサのような計測センサは、通常ノイズの少ない電源に接続して使用するものである。当初は、センサ側の電源供給系統に深度センサを接続し、使用していた。しかしながら深度センサからの値を取得することができず、最終的にスラスト側の電源供給系統に接続することとなった。スラストの電源供給系統は、スラストの回転に伴ってノイズが多少なりともものってしまう。これにより深度センサからの値を取得することができた。原因の特定はできていないが、深度センサの GND はセンサ筐体部にあり、外界に面している。センサ側の電源供給系統に接続している場合、外部にとってある GND にスラスト側からのノイズ等の影響がありデータを取得することができなかつたのではないかと考えられる。これは推測であり、本質的な原因の究明は今後の課題のひとつである。以上のことから深度センサには多少のノイズがのっている。深度 0.5[m]付近で揺らいでいるものの誤差は 0.1[m]以内に収まっている。したがってセンサの改善を施せば、妥当な結果が得られると考えられる。

(2)障害物回避実験

前節で行った Surge、Heading、Heave の制御を組み合わせる超音波距離センサを用いて障害物回避実験を行った。水中ロボットにとってミッション中に障害物を回避（危険回避）できることは必須の技術である。実験は、(1)で使用した簡易プールで行った。ロボットの設定は、深度 0.7[m]、前進速度を 0.12[m/s]とした。回避条件としてプール壁面とロボットの相対距離が 0.5[m]まで接近した場合にロボットは停止し、 $\pi/2$ [rad]だけ回頭を行う。その場合、右前方、左前方の距離を比較して、より相対距離の大きいほうに回頭する。また、左右前方の距離が等しい場合は π [rad]だけ回頭する。実験結果を Fig.3-7～3-10 に示す。Fig3-7 は、ロボットと壁との相対距離を示す。Fig.3-10～3-12 は、ロボットの各状態と出力値を示している。ロボットが壁と 0.5[m]まで近づいたときに $-\pi/2$ [rad]だけ回頭していることが分かる。このとき左右前方の距離を判断し、左側に回頭している。また、回頭時には、ロボットは停止、ホバリングをしながら回頭している。この結果から分かるようにロボットは、前方にある障害物を回避することが可能であることが分かる。

(3)経路追従航行

前節でおこなった Surge、Heading、Heave の制御を組み合わせる、長方形の経路を想定し、これに追従して航行するミッションを考える。Surge に関しては、一定速度で前進する。Heading に関しては、経路点まで到達したら $\pi/2$ または-

$\pi/2$ だけ回頭するという一連のシーケンスを行わせる。Heave に関しては、ミッションスタート時に潜航し、ミッション中は一定の深度を維持する。そして起点に戻ってきたら浮上する。ミッション中 Sway に関しては、0[m/s]としている。また、Surge に関する軌道制御においては加減速時の加速度の絶対値 0.05[m/s]とした。一連の行動シーケンスを Table 3-3 に示す。

このような軌道追従制御の結果を Fig.3-11 に示す。またそのときの速度、方位、深度の位置、および力を Fig.3-12~3-14 に示す。図中、点線で表されているのが目標として設定した経路である。実験結果のうち Heading のデータは直接センサで計測されたものであるが、Surging に関しては電磁流速計の出力データを積分して求めたものである。経路に関しては、最大誤差が 0.2[m]程度で経路の追従が達成されている。多少の誤差は、デッドレコニングによって生じるものである。従って実際の調査など、精度をそれほど要求されないミッションに関しては許容できる範囲であると考えられる。しかしながらあらかじめ設定した行動シーケンスに従って動作していることが分かる。以上の結果から AquaBox III は、直進航行と回頭を繰り返し行うことで多少の誤差は含むものの経路に従って航行することが可能である。また、本プロジェクトで開発した AquaBox I,II,III 号機はシステムがほぼ同様であるのでここで得られた結果は他の AquaBox シリーズのロボットに適用可能である。

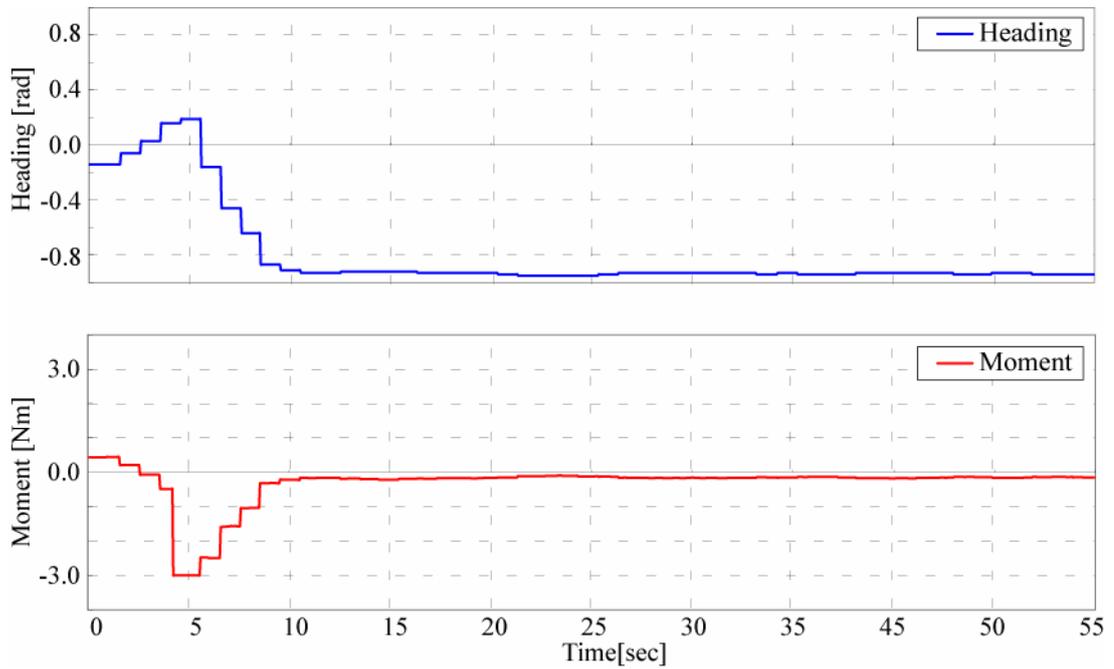


Fig.3-5 Heading data (Heading, Moment)

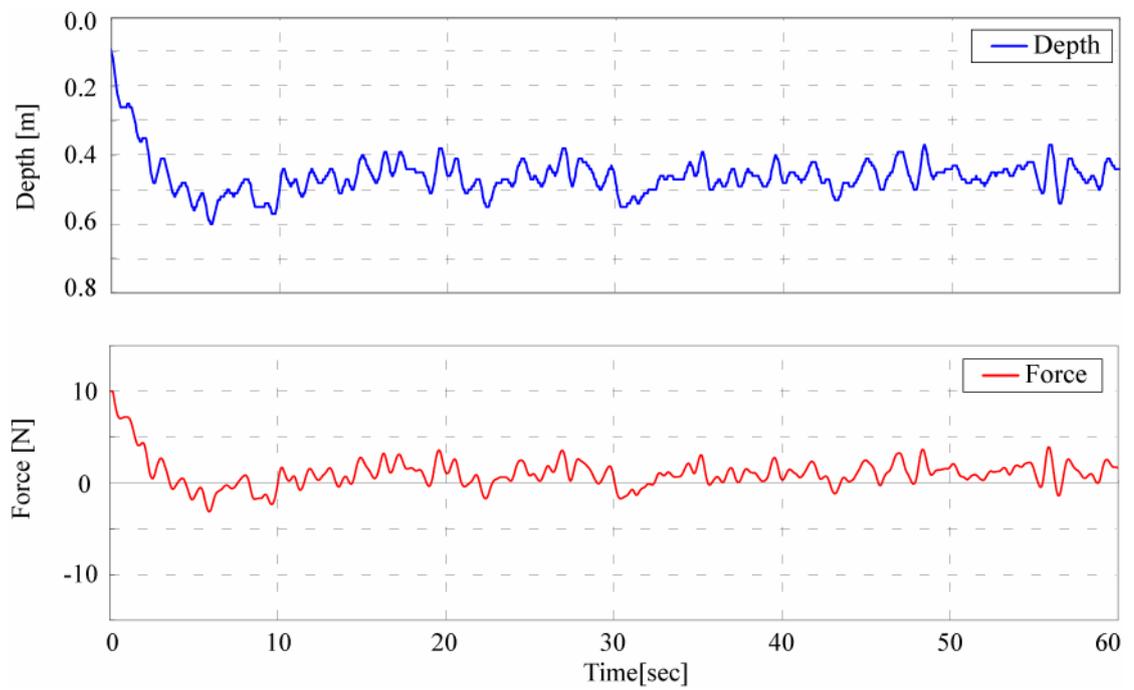


Fig.3-6 Depth data (Depth, Force)

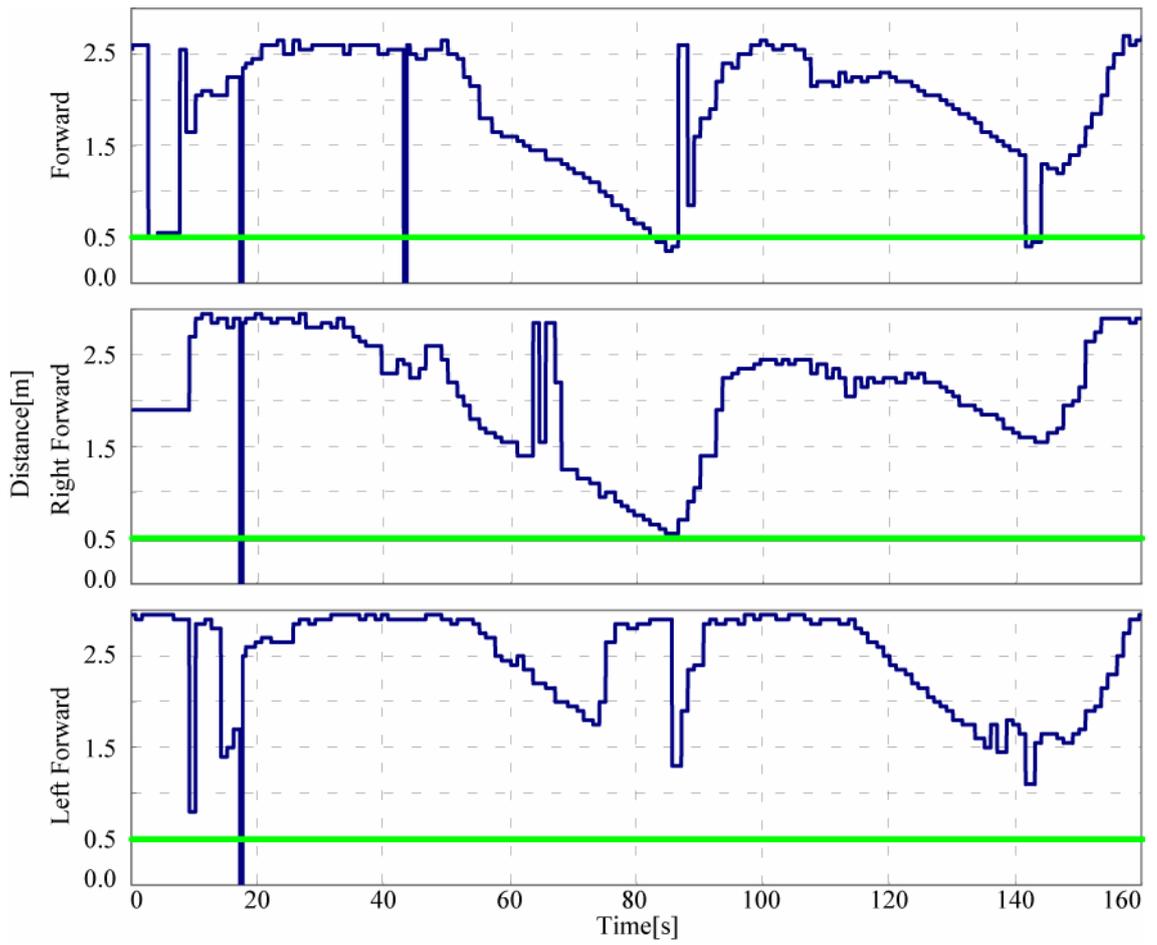


Fig.3-7 Distance between robot and wall

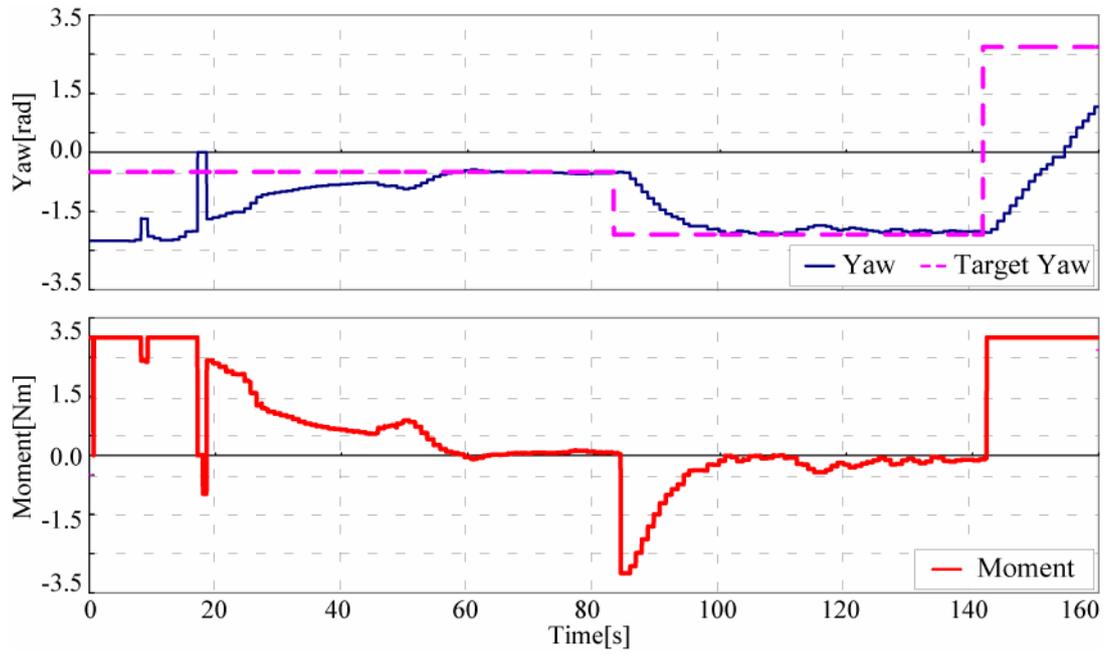


Fig.3-8 Heading (Heading, Moment)

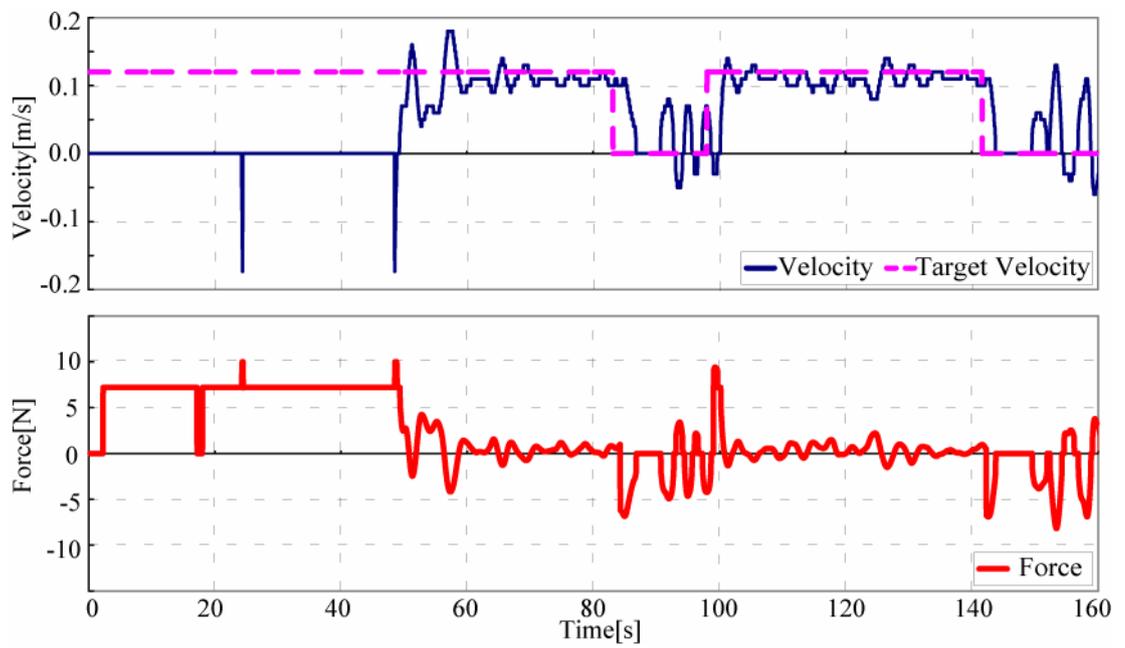


Fig.3-9 Surge(Velocity, Force)

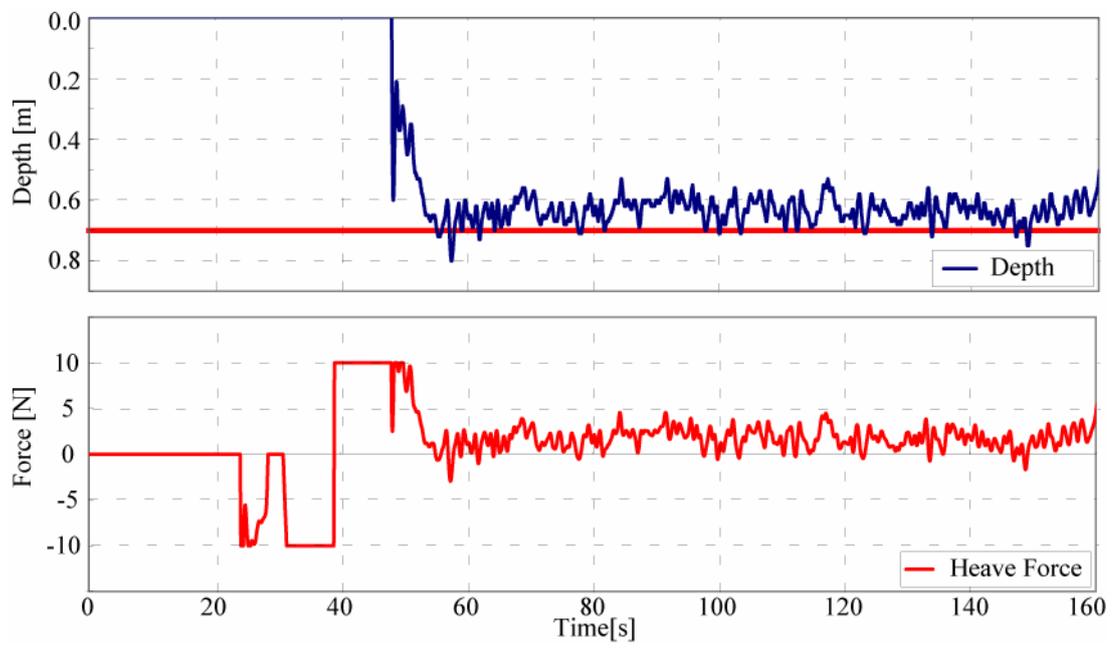


Fig.3-10 Heave(Depth, Force)

Table 3-3 Sequence of Behavior in the Mission

$D \rightarrow H \rightarrow T \rightarrow H \rightarrow R \rightarrow H \rightarrow \dots \rightarrow T \rightarrow H \rightarrow U$

D:Dive H:Hover T:Transit R:Rotate U:Surfacing

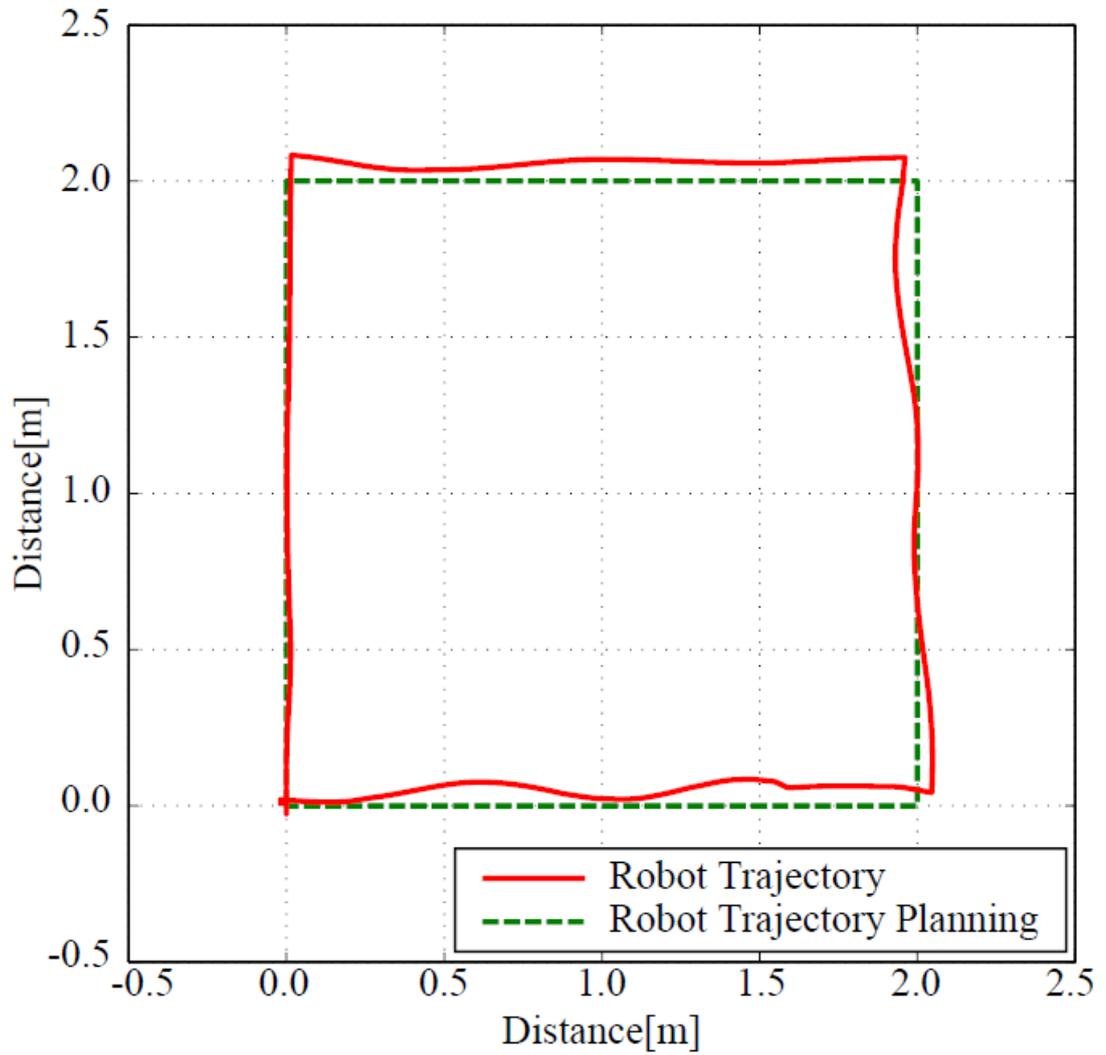


Fig. 3-11 Experimental Results of Path Following(Rectangular)

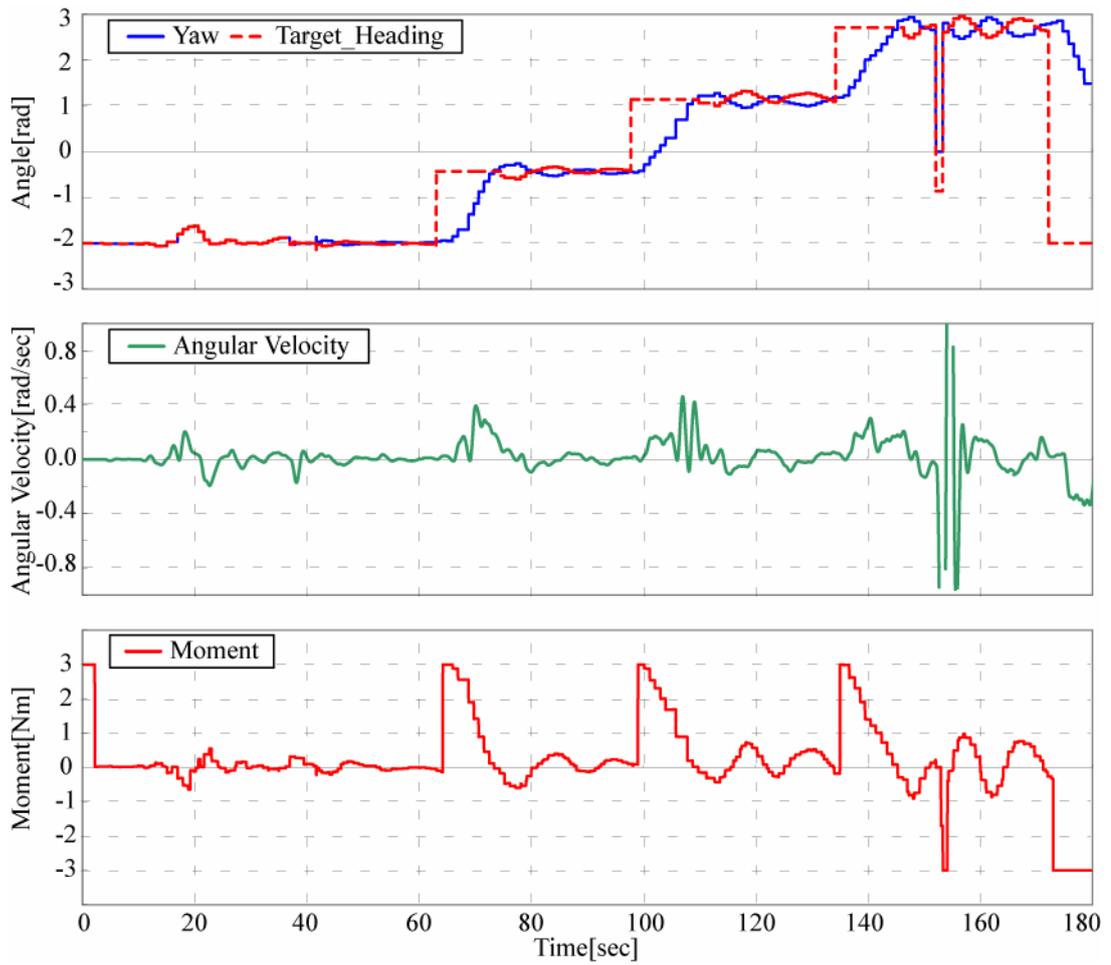


Fig. 3-12 Heading(Heading, Angular Velocity, Moment)

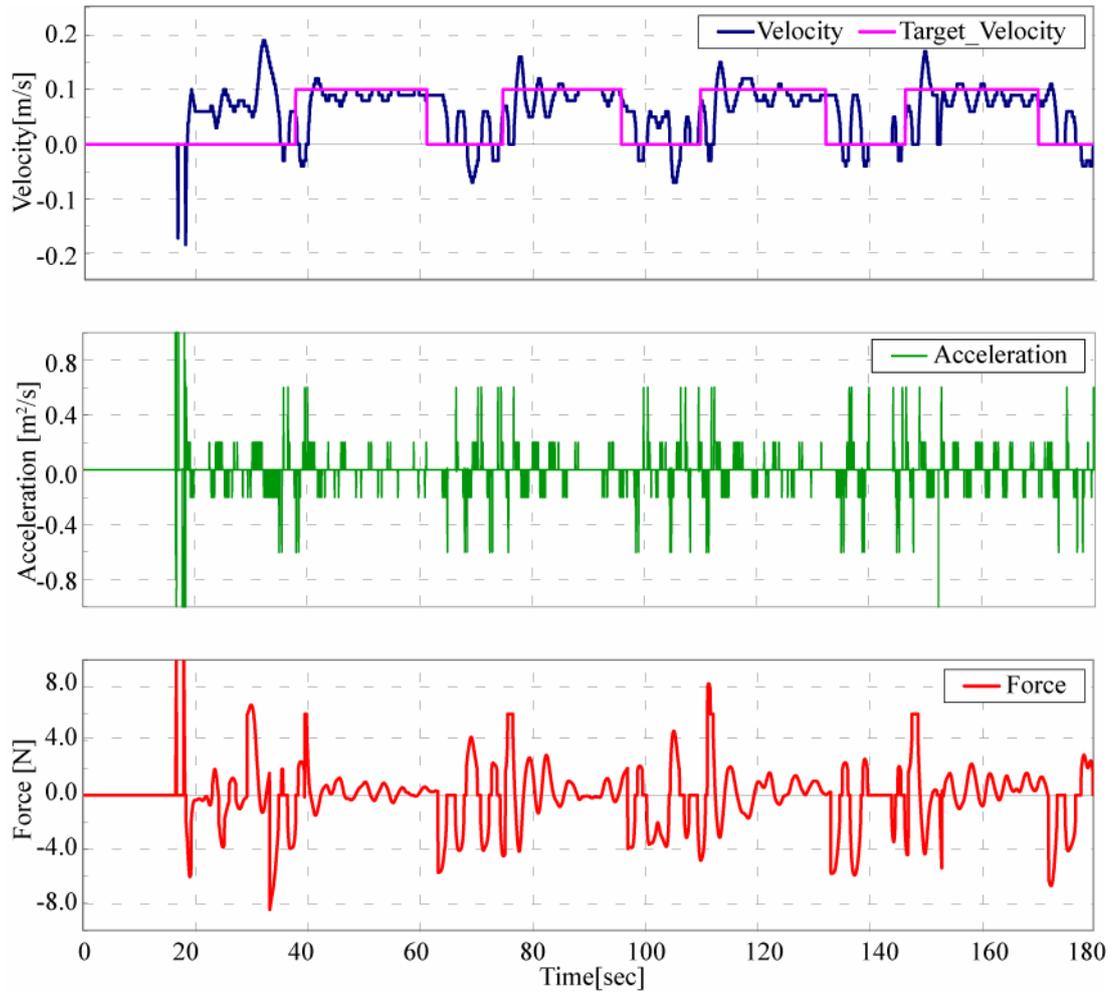


Fig. 3-13 Surge (Velocity, Acceleration, Force)

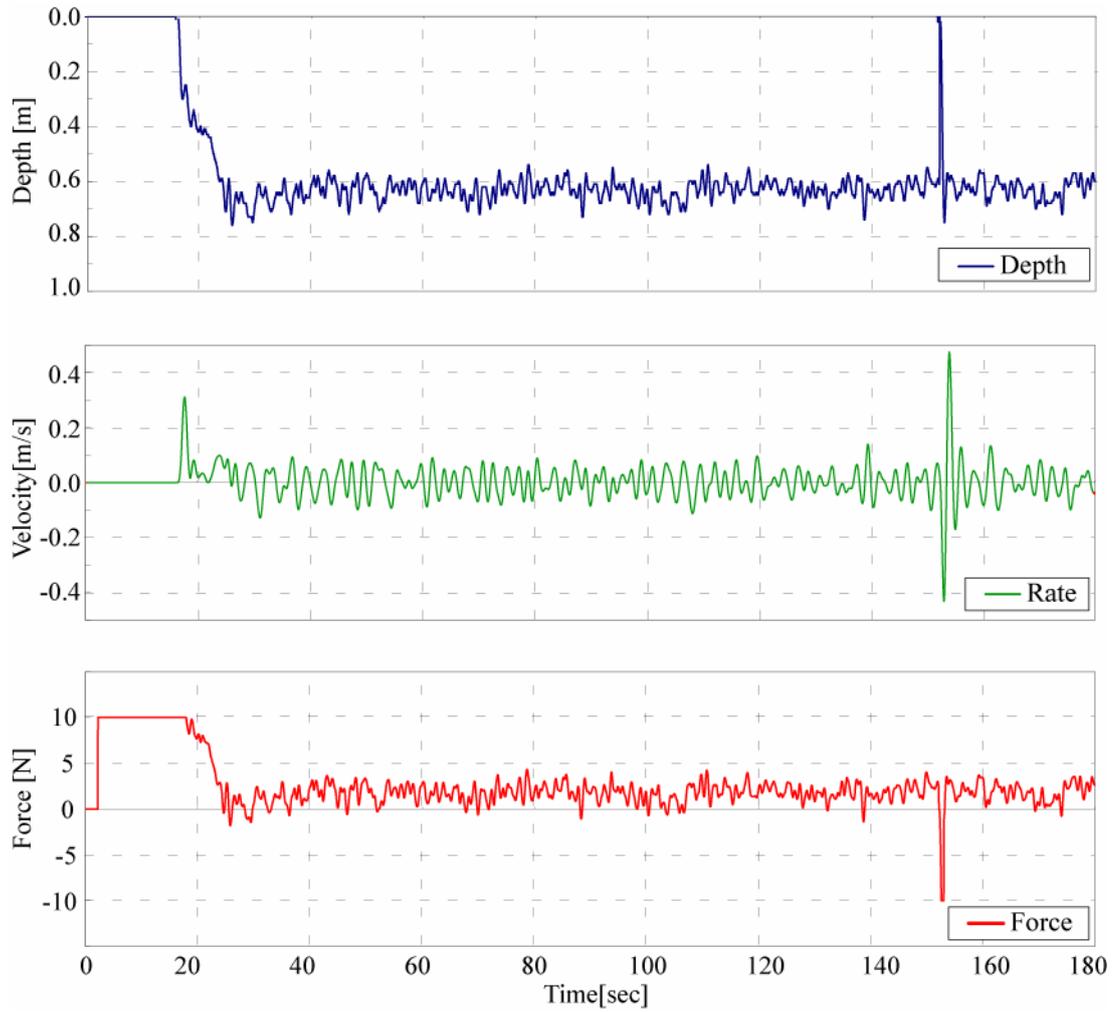


Fig. 3-14 Heave(Depth, Rate, Force)

第4章

小型水中ロボットを用いた水中調査

第4章 小型水中ロボットを用いた水中調査

4.1 はじめに

我々が行動する上で周囲の環境を認識することが必要である。それらを担う機能として視覚、聴覚、触覚などが挙げられる。視覚、聴覚に関しては、周囲と物理的な接触することなしに周囲の環境を認識することが可能である。同様に水中ロボットが行動する上でも周囲の環境を認識することは重要である。その方法として、超音波センサや光学センサを利用したものが多い。それらの選択は使用目的に応じて異なってくるが、光学センサを使用する場合には、水中における光の減衰を考慮する必要がある。光の強さは指数関数的に減少してしまうために、光源の強さを桁違いに大きくしても光の到達距離は光の強度の対数であるのでさほど伸びないのである。つまり、水中用光学センサは長距離に使用することができない。しかしながら先述の制限を越えることができれば、光学センサは周囲の環境を認識・観測する方法として利用することができる。

近年、港湾構造物の大規模化、大水深化、地方漁港の過疎化に伴う港湾施設の老朽化に伴い、水中ロボットによる調査作業の自動化が期待されている。例えば、ケーソンの監視には目視調査が用いられ、負担の大きい作業である。これらの作業は、小型水中ロボットを用いた自動モザイク処理技術を開発することにより、効率化や安全性の向上が可能となる。さらに、本研究で開発した小型水中ロボット AquaBox I は遠隔操作により行動を決定するが、姿勢制御を自動で行うことにより操作性の向上を図っている。今後は、水中構造物を含めた沿岸域の観測を簡易に行うことが望まれていることは、1.1 で述べたとおりである。本章では、開発した AquaBox Robots を使用しての水中調査法の検討を行う。はじめに、ロボットに搭載する調査システムの開発を行う。次に調査システムの実海域実験ののちに開発したロボットに搭載することを検討する。また、より広範囲の観測をおこなう手法についても検討する。

4.2 位置情報の取得システム

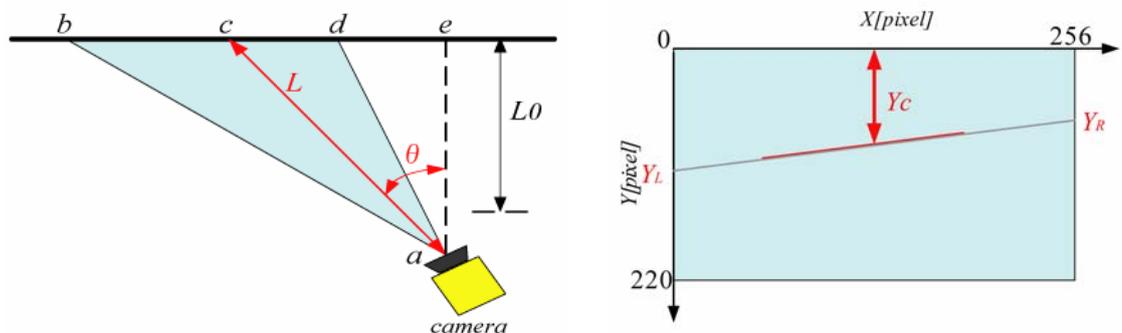
4.2.1 位置情報の取得

ロボットと撮影対象、取得画像の関係を Fig.4-1(a),(b)に示す。点 a はカメラのレンズの中心、点 c は画角中心方向の直線と壁との交点、点 b,d は画角両端方向の直線と壁との交点、点 e は点 a から壁への垂線との交点である。撮影対象（壁）に対する相対角度 θ 及び相対距離 L は式(4.2.1),(4.2.2)となる。ここでは、水中ロボットの姿勢は十分に安定しておりロボットのロール角及びピッチ角は 0 と仮定している。

$$L = \frac{H}{\tan(\phi_y / 2) + \tan \varphi - \tan(\phi_y / 2) y_{\text{pixel}} / 110} \quad (4.2.1)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{D^2 + L_l^2 - L_r^2}{2DL_l} \right) - \frac{\phi_x}{2} \quad (4.2.2)$$

ここで、 L は線分 ac の距離、 H はカメラからレーザーまでの距離、 ϕ_y は Y 軸方向の画角、 φ はレーザーと水平面のなす角度、 θ [rad] はカメラの画角中心と壁への法線、 D は線分 bd の距離である。 L_l, L_r はそれぞれ線分 ab, ad の距離である。 ϕ_x は X 軸方向の画角である。Fig.4-1(a)において、 $\theta \neq 0$ の場合、レーザーラインは Fig.4-1(b)のように得られる。レーザーラインは距離 L が大きくなると下方へ、小さくなると上方へ移動する。相対距離 L における、レーザーとカメラの関係を Fig.4-2、相対角 θ と距離の関係を Fig.4-3 に示す。



(a) Position relation between a wall and a camera.

(b) The position of laser in obtained image.

Fig.4-1

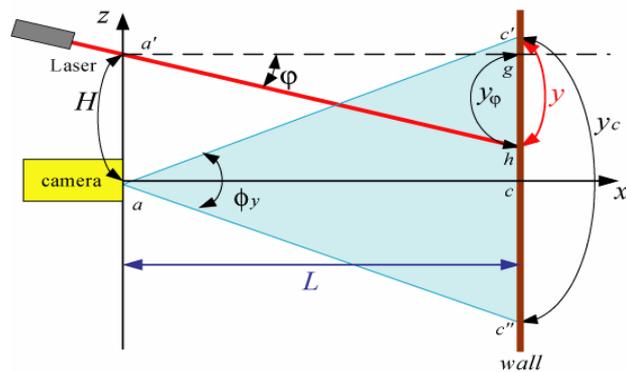


Fig.4-2 Estimation of the distance.

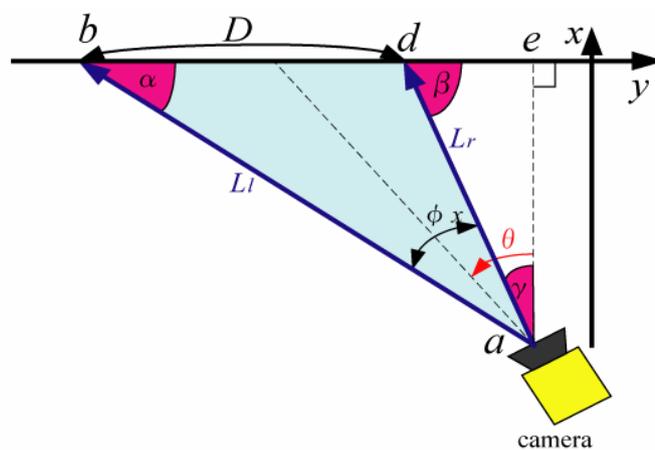


Fig.4-3 Estimation of the angle.

4.2.2 画角測定

対象物との距離・角度を得るためには、カメラの画角を得る必要がある。そこで画角測定を行った。測定法は、カメラからある距離にもものさしを設置し画面内に写るものさしの長さを測定する。この測定をカメラともものさしの距離を変更し、陸上と水中両方で行っていく。測定機器を Fig.4-4 に示す。測定結果を以下に示す。

垂直方向	45.12[deg]
水平方向	34.73[deg]

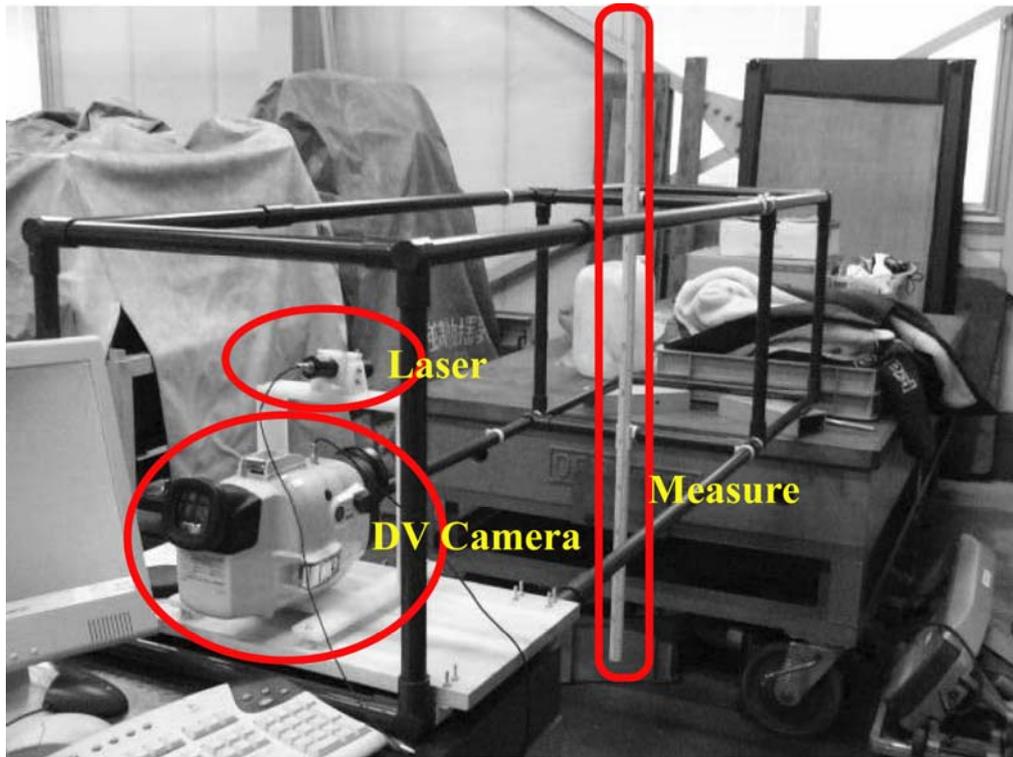


Fig.4-4 Measurement of field angle

4.2.3 レーザーの抽出

本研究では、レーザーを抽出する際に次の手順で行なった。はじめに元画像 (Fig.4-5) の R 成分から G 成分の差分を取ることで R 成分を抽出 (Fig.4-6) し、その画像から Hough 変換 (Fig.4-7) を行なった。ここから y_c 、 y_L 、 y_R のピクセル数を求め (Fig.4-8)、対象物とカメラとの距離、角度を得た。



Fig.4-5 Source image

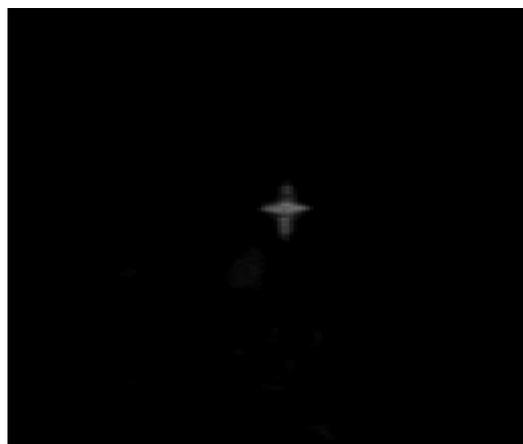


Fig.4-6 R element - G element

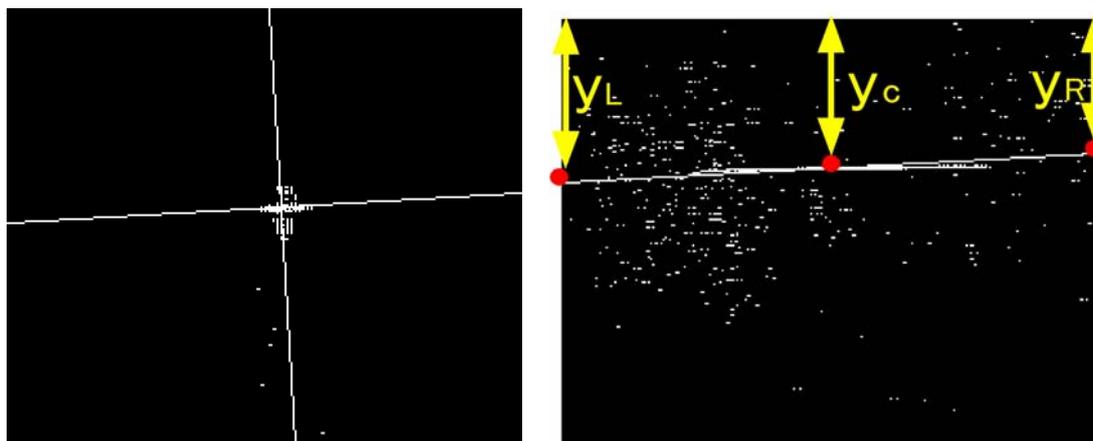


Fig.4-7 Hough-Transform Fig.4-8 Line detection using Hough - Transformation.

4.2.4 クロスレーザーを用いた位置情報取得

ラインレーザーを用いた位置情報の取得法は森ら[44][45]によって行われた。ラインレーザーは対象物に対して水平方向の角度および距離を得ることができる。後述する画像処理では、垂直方向の角度も必要となってくる。そこでラインレーザーと同様の方法でクロスレーザーを使って距離および角度を導出した。

4.3 モザイク画像生成システム

4.3.1 はじめに

一般的に水中ロボットに搭載されたカメラの映像は、濁りや画角の関係から視野がせまくなってしまふ。しかしながら調査、点検を行うためには、より視野が広く解像度の高いものが求められる。そこで本研究では、水中ロボットに搭載されたカメラによって撮影された映像を自動的につなぎ合わせることによって、視野の広い画像としての認識を可能とする処理手法を開発する[46-51]。

4.3.2 モザイク生成の過程

モザイク画像の処理過程を Fig.4-9 に示す。

- (i) 画像の取り込みは、連続した映像から何秒か毎に Bitmap および Jpeg 形式ファイルで保存する。連続した映像は、カメラから直接ライブ映像をキャプチャする方法や、保存した DV テープからキャプチャする方法、または AVI ファイルからキャプチャする方法がある。
- (ii) 2枚の画像は、移動するカメラから撮像したものであるから撮像対象までの距離・角度が異なる。そこでそれぞれの画像をカメラから同距離・角度となるように補正する。
- (iii) つなぎ合わせる2枚の画像の位置決めは、それぞれの画像から共通する特徴点を抽出する。それらの特徴点によって2枚の画像の位置決めを行う。
- (iv) 抽出した特徴点から画像を張り合わせてモザイク画像を生成する。

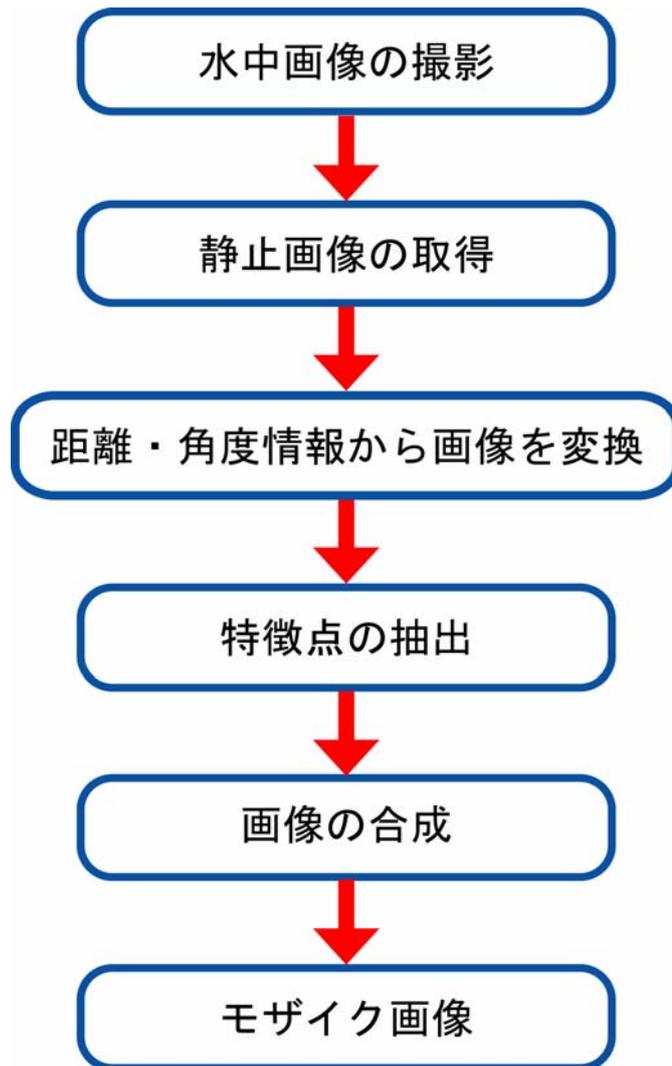


Fig.4-9 Flowchart of Mosaic image processing

4.3.3 システム概要

モザイク処理システムの開発環境は、以下のとおりである。

OS : WindowsXP

C 言語開発環境 : Microsoft Visual C/C++6.0

画像処理ライブラリ : OpenCV (Intel Open Source Computer Vision Library)

コンピュータで画像処理を行う際の数々の手段、または手段のサポートを提供している。Intel が CPU のパフォーマンスを重視してアーキテクチャを作成しているため高速である。対応 OS は,Windows および Linux である。

: IPP(Intel Integrated Performance Primitive)

高い処理能力を必要とする信号処理および画像処理関数のパフォーマンスを向上させることができる。

4.3.4 静止画像の取得

モザイク画像を生成するために取得した画像を Fig.4-10 に示す。これらの画像は1秒に映像から取得したものである。

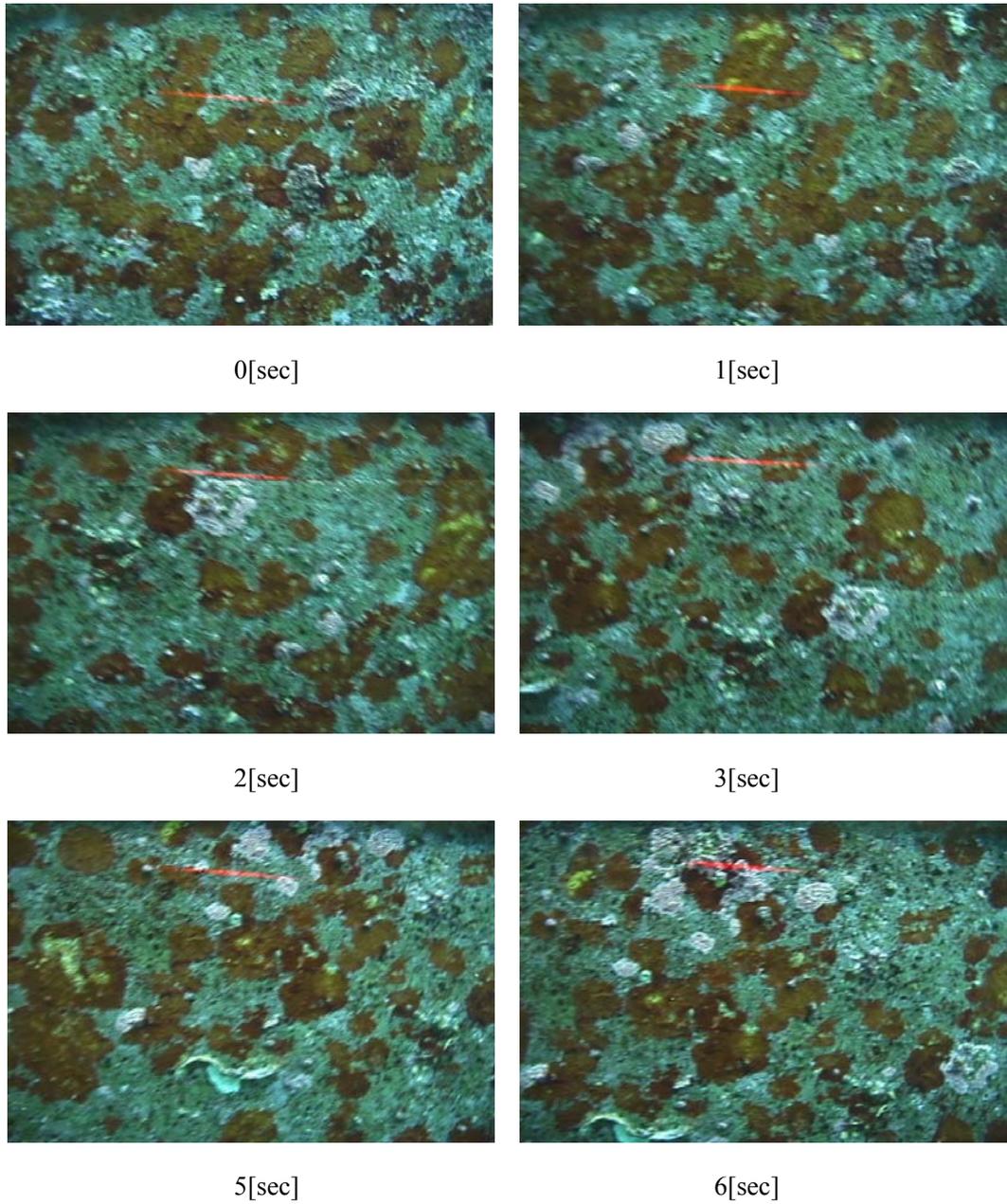


Fig.4-10 Acquisition images

4.3.5 画像の補正

取得した画像からそれぞれの画像において補正処理を行う。補正については、レーザーから得られた対象物との相対角度・距離からそれぞれの画像をカメラに対して正面で一定角度になるように補正を行う(Fig.4-11)。

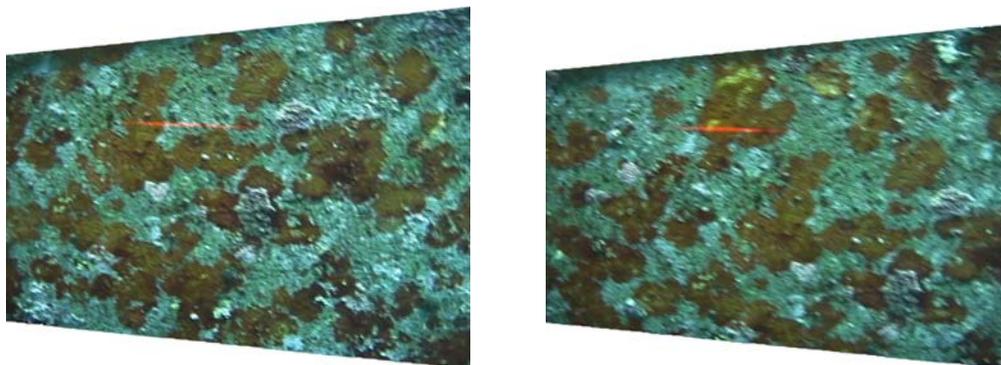


Fig.4-11 Correction images

4.3.6 特徴点抽出と特徴点对応付け

本研究では、特徴点の抽出は手動により行った(Fig.4-12)。これらの特徴点からモザイク画像の生成を行う。

4.3.7 画像の張り合わせ

特徴点を抽出した2枚の画像を張り合わせた画像を Fig.4-13 に示す。またこれらの手法を利用して生成したモザイク画像を Fig.4-14 に示す。さらにアフィン変換して生成したモザイク画像を Fig.4-15 に示す。

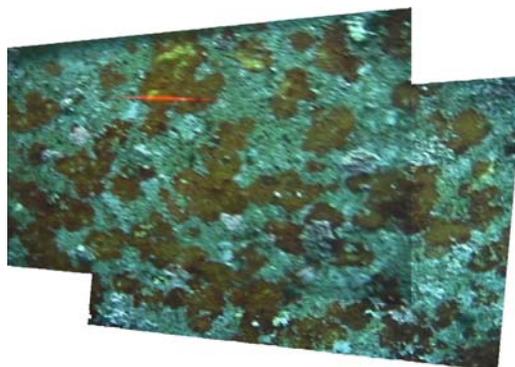


Fig.4-12 Image combine

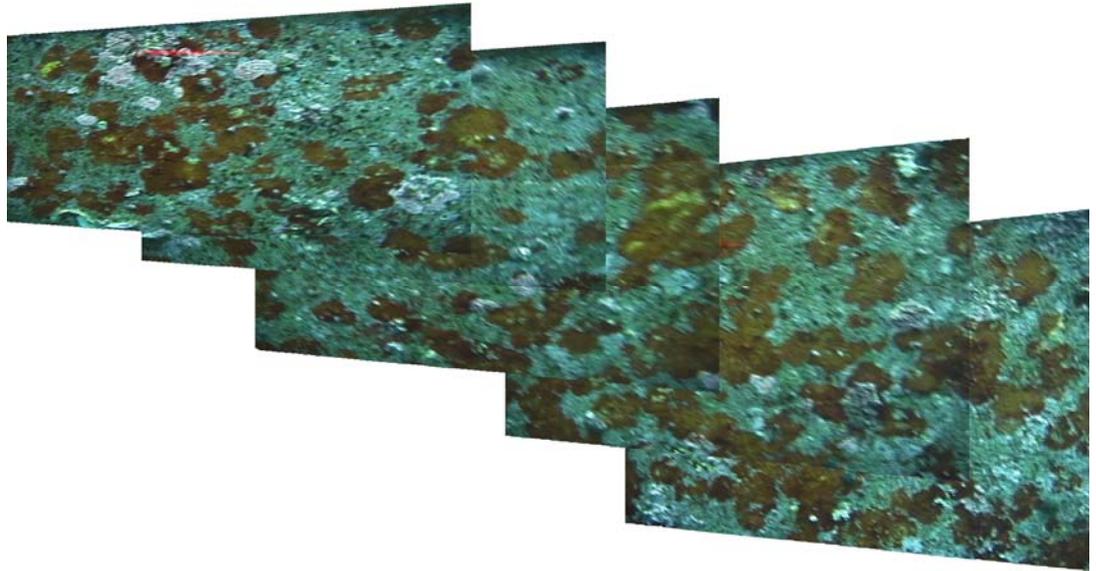


Fig.4-13 Mosaic image

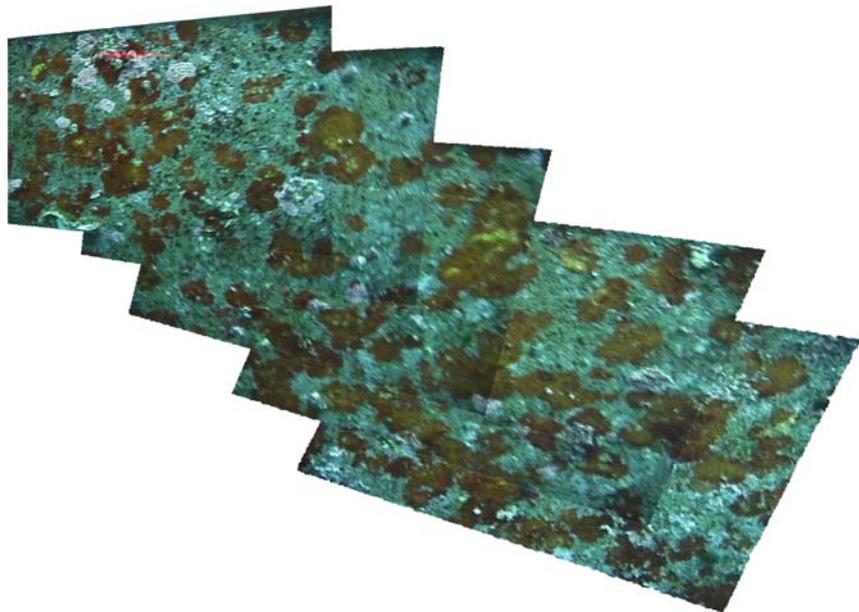


Fig. 4-14 Mosaic image (Affine transformation)

4.4 小型 ROV “RTV100” への搭載

初年度は、既存の水中ロボットに画像・位置取得のためのカメラおよびレーザー照射機を搭載した。水中ロボットは遠隔操縦型 Mitsui RTV100(Fig.4-15)を使用し、システムの搭載を可能とする治具を開発した。

4.4.1 RTV100 の概要

RTV100 は、水中を自由に移動できるビークルと、船上からこのビークルを遠隔操作する制御装置およびビークルと船上を結ぶ水中ケーブルで構成されている。仕様については以下に示す。

最大使用深度： 100[m]

電源： AC100V

外形寸法： 長さ 約 80[cm]

幅 約 55[cm]

高さ 約 36[cm]

空中重量： 約 28[kg] (水温計、濁度計搭載時)

速力： 約 2.5[ノット] (静水中)

浮力： 約 0.1[kg]

推進装置 (スラスト)：

水平スラスト	前後進/旋回用	出力	170[W]	2台
--------	---------	----	--------	----

垂直スラスト	上昇/下降用	出力	170[W]	1台
--------	--------	----	--------	----

横スラスト	横進用	出力	170[W]	1台
-------	-----	----	--------	----

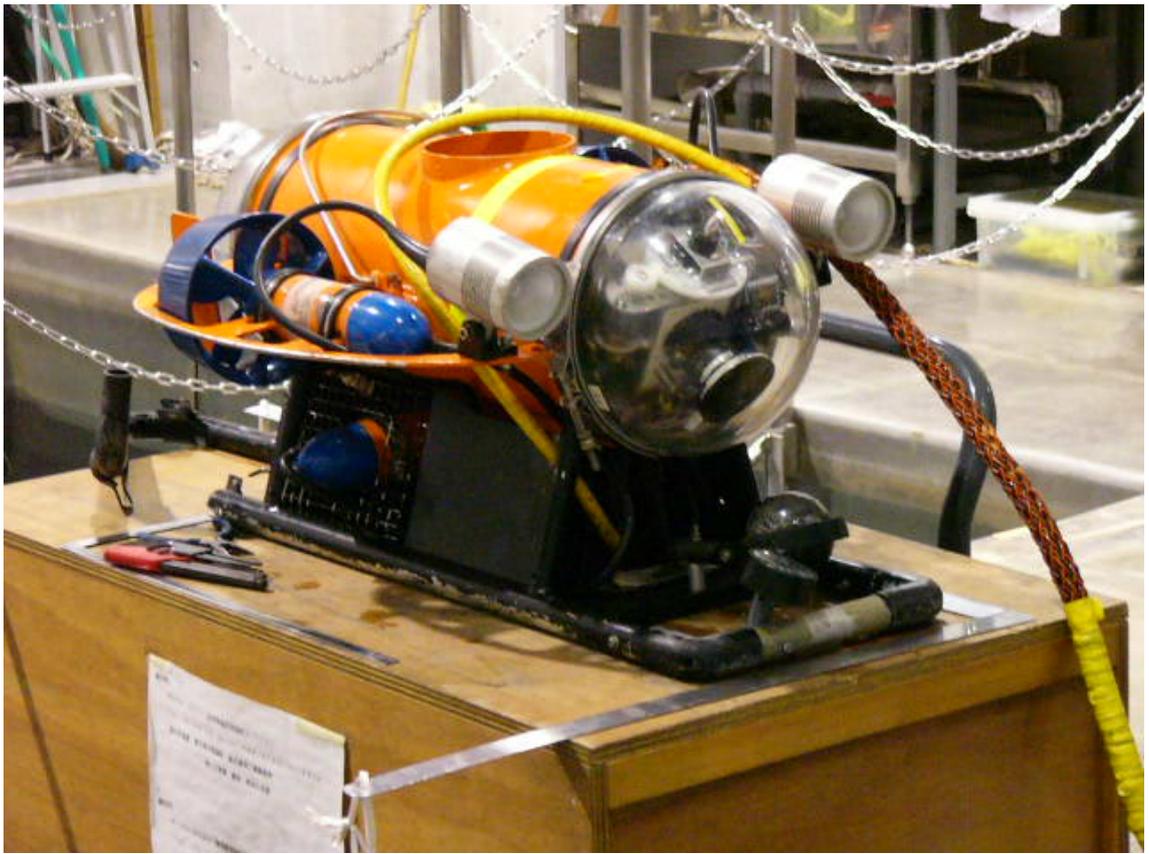


Fig. 4-15 MitsuiRTV100

4.4.2 画像取得システムの設計方針

RTV100 は、ロボット単体で使用することが前提である。そのため浮力、重心位置のバランスは調整されている。従って RTV100 に画像取得システムを搭載する場合には、浮力、重心位置のバランスを考慮する必要がある。そこで画像取得システムの設計方針として、RTV100 の動作の弊害にならないように中性浮力で、重心位置も考慮した設計にする。しかしながら、カメラについてはマリパックを搭載するために条件が満たされるとは限らない。そこで治具を構成する部品などにできるだけ中性浮力の材料を選定することとした。

4.4.3 画像取得システムの設計・製作

画像取得システムは、主にレーザー照射機、マリパックカメラの2つから構成されている。レーザー照射機は、マリパックカメラの上部に配置した (Fig.4-16)。また、レーザー照射機の両脇には、RTV100 のライトを搭載できるように製作した。詳細は付録に示す。完成図を Fig.4-17 に示す。

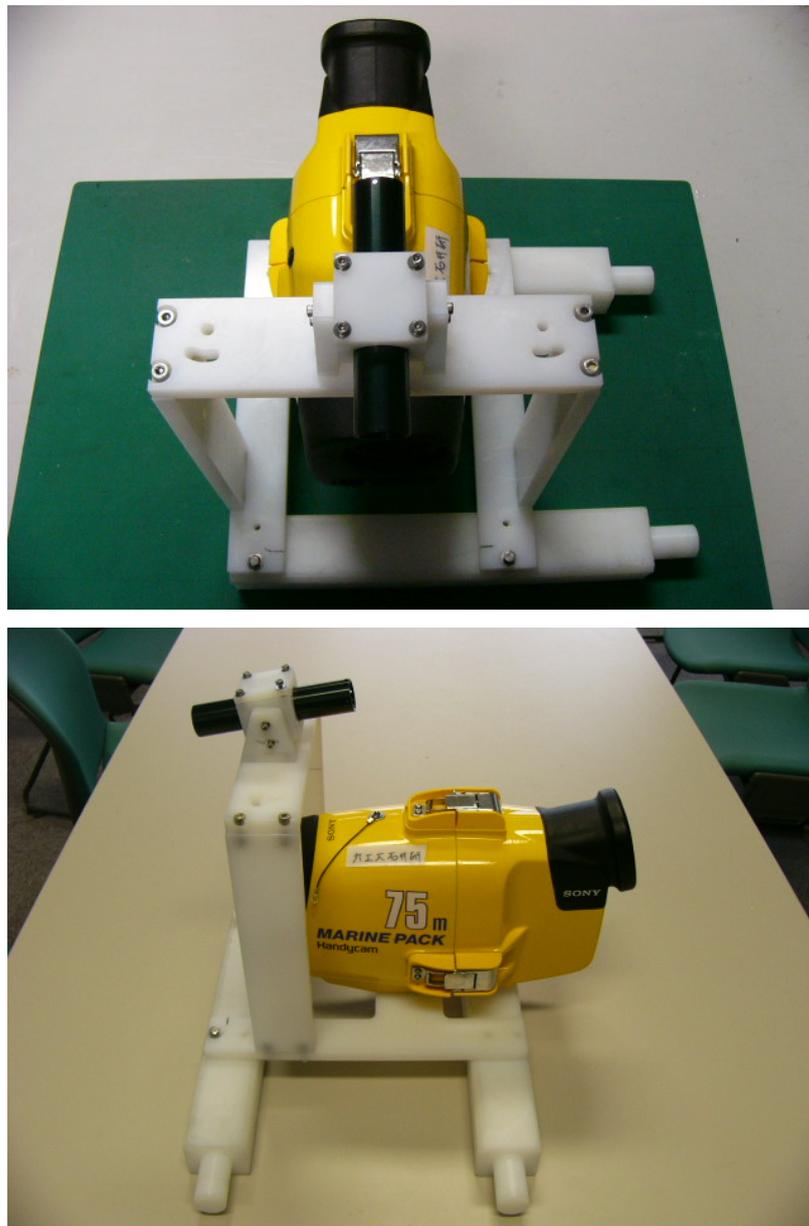


Fig. 4-16 Measurement system (Upper : Top view, Lower : Side view)

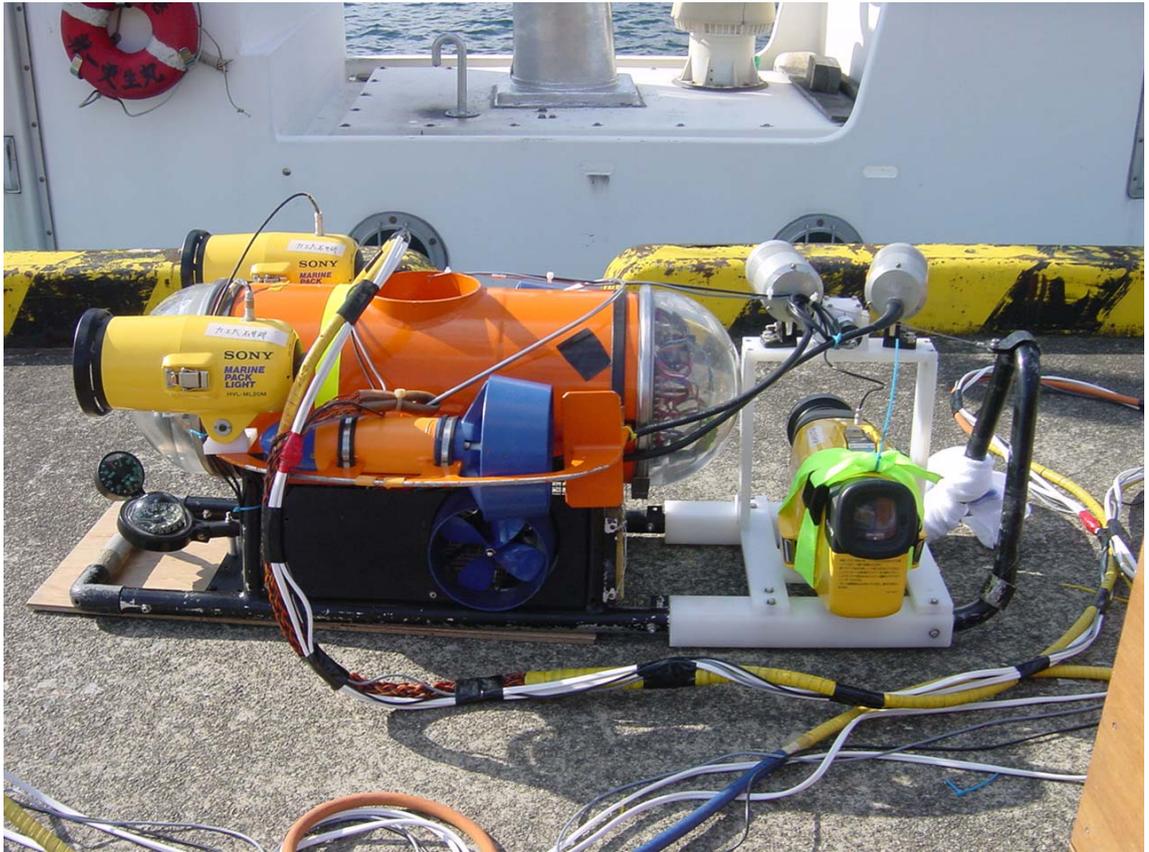


Fig. 4-17 Measurement system mounted on RTV100

4.4.4 実験場所

製作したシステムを用いて実海域において実験を行った。実験は、Fig.4-18 に示すように岩手県釜石市に所在する重要港湾釜石港港内の泉作業基地および泉防波堤で実施した。本港は、明治 7 年に国営製鉄所が建設されたことにより、三陸地方の中樞港湾として発展してきており、最近では CGC 船（混載自動車専用船）の定期航路が名古屋港との間で開設されている。現在、水深 11[m]、水深 7.5[m]の公共埠頭の整備が進められているほか、特に港湾部に津波防止を兼ねた世界最大水深の湾口防波堤の建設が国の直轄事業として実施されている。撮影対象とした泉防波堤は、ブロック部とケーソン部で構成されており、深い部分で水深 10[m]程度である。また、湾口防波堤などに使用するケーソン製作用の作業場として整備された泉作業基地を機器の調整などを行うためのスペースとした。Fig.4-19 に平面図を、Fig.4-20 に縦断図を示す。



Fig.4-18 Kamaishi port

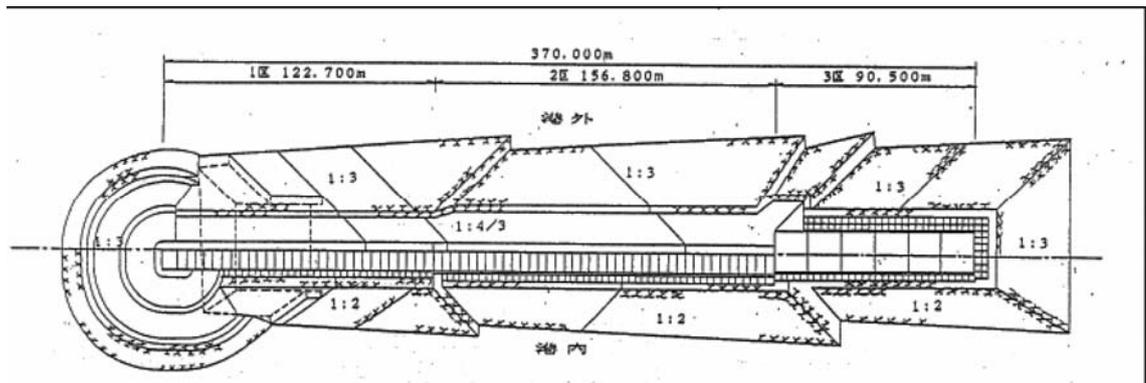


Fig.4-19 Caisson top view

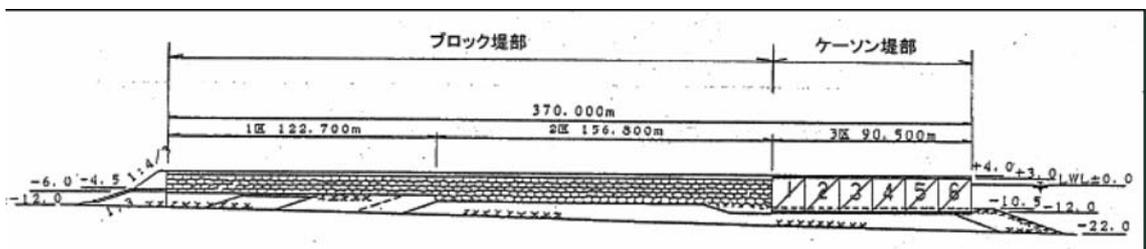


Fig.4-20 Caisson side view

4.4.5 画像取得システムを搭載した“RTV100”による実験

撮像実験では、Fig.4-21 に示すように、RTV100 の水深およびケーソン壁面からの距離をできるだけ一定に保つように防波堤上から RTV100 を遠隔操作し、1 ケースにつき、およそ 20[m]の距離を約 1 ノット程度の定速で移動させ、防波堤の壁面を撮影した。この際、同時に画面内にマーカーとして RTV100 に搭載されたレーザー照射機からのラインレーザーの画像も映しこんだ。これを数ケース繰り返し、映像データを取得した。

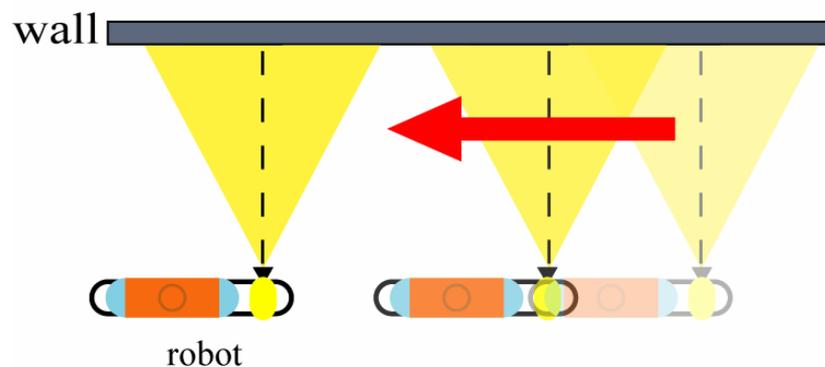


Fig.4-21 Motion image of RTV100

4.4.6 実験結果

Fig.4-22~25 に実験状況を示す。すべての実験結果を収録した DV から、防波堤の壁面およびラインレーザーの画像が比較的鮮明に撮影されている部分を抽出して、これからモザイク処理を行うための静止画像をサンプリングした。Table.4-1 にサンプリングした静止画データ数と、画面に写しこまれたレーザーラインの位置情報から、それぞれの画像の壁面からの距離と傾きの平均値を算出したものを示す。取得した映像からサンプリングした静止画の一部を Fig.4-26~29 に、モザイク処理したものを Fig.4-30 に示す。



Fig.4-22 Put in sea

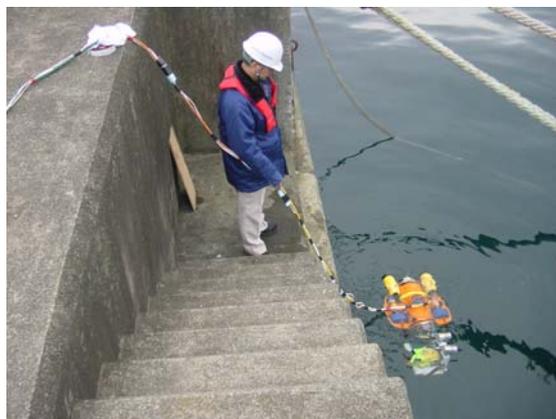


Fig.4-23 Mission start



Fig.4-24 Mission



Fig.4-25 Experimental devices

Table 4-1 Number of acquisition data

ケース番号	静止画数	壁面からの平均距離[m]	壁面に対する平均傾き[°]
1	26	0.72	-7.6
2	49	0.63	1.3
3	261	0.69	-2.8
4	28	0.52	-9.8
5	264	0.56	9.0
6	110	0.58	-0.5
7	73	0.61	-3.1
8	48	0.58	2.0



Fig.4-26 Acquisition image 1



Fig.4-27 Acquisition image 2

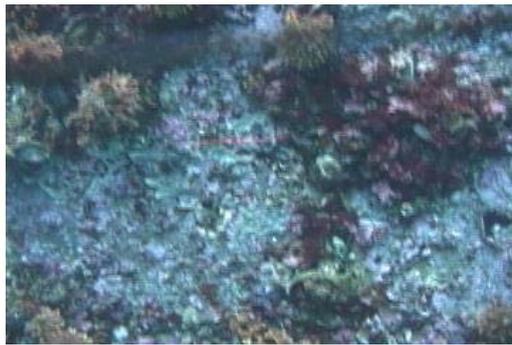


Fig.4-28 Acquisition image 3



Fig.4-29 Acquisition image 4

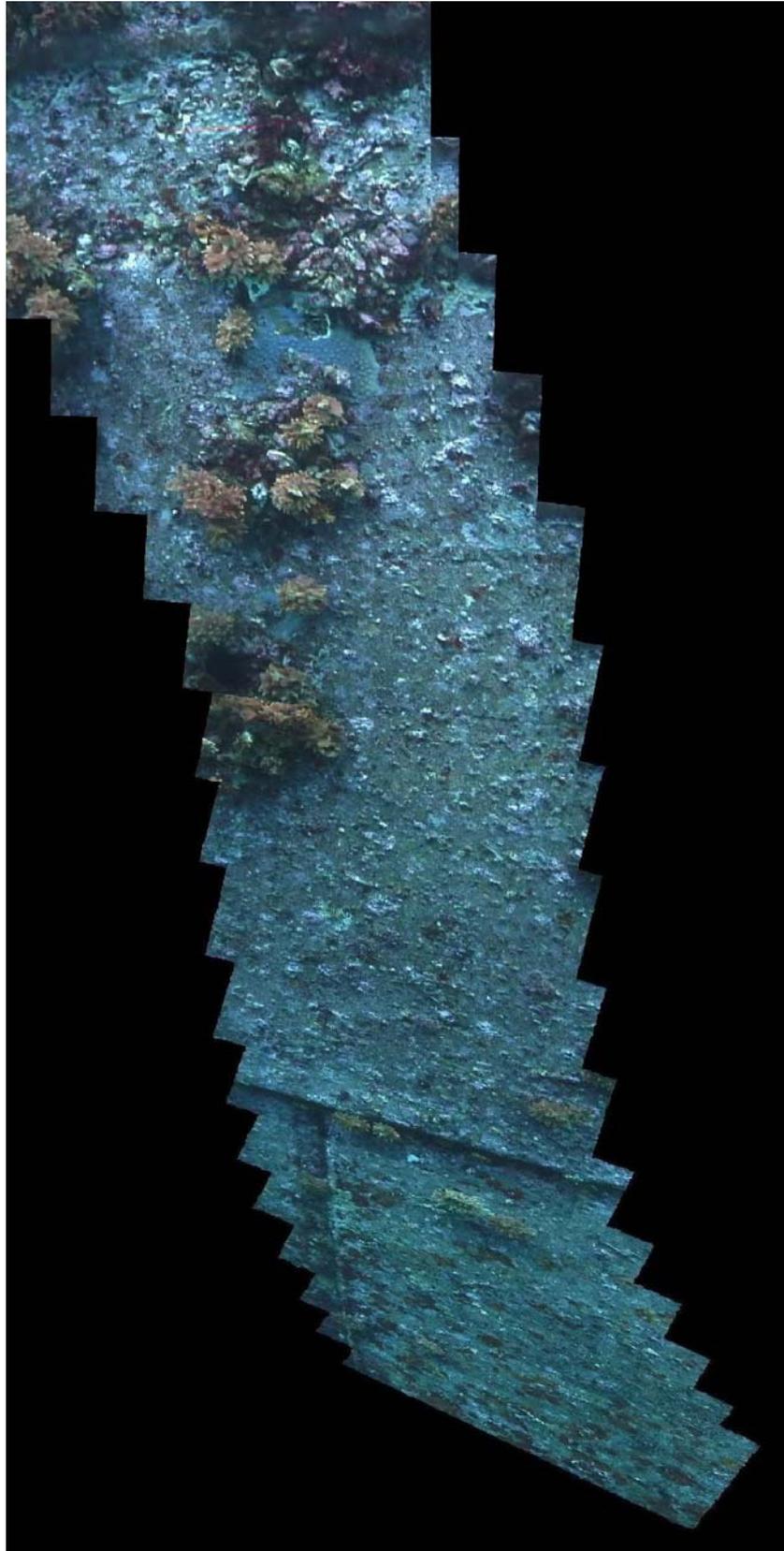


Fig.4-30 Mosaic image

4.4.7 実験の考察

当初、壁面から 1[m]程度の距離において撮影する予定であったが、レーザーの出力が小さいことやレーザーの色や形状の関係から、画面内に明確にレーザーを写しこむためには 0.5[m]に近づく必要があった。また、潮流はさほど大きくなかったが、それでも RTV100 を一定速度で、壁面から一定の距離に維持しながら移動させることは容易ではなかった。そのために取得した画像がぶれていることが多く見受けられた。また、RTV100 の海中への投入と揚収については、空中重量が約 38[kg]の小型のものであっても、RTV100 の保護のためには、ある程度防波堤壁面から離れた位置での作業が必要であり、足場の悪い防波堤からの作業は困難で危険であった。またロボットには、持つ部分がほとんどなかったことなどの影響も考えられる。さらに、潮位が下がった場合には、人力だけではほとんど不可能であると考えられた。

取得した画像から生成したモザイク画像についてだが、見て分かるように画像下部が歪んでいることがわかる。これはロボットが撮像する際にロールしたためである。つまりロボットがロールすることによってカメラはピッチしてしまう。Fig.4-30 に関しては、ロボットがロールし、カメラはピッチしながら撮像していることが分かる。これは画像処理によって多少は改善できる問題ではあるが、解像度等の関係からロボットが壁面に対して正対して画像を取得することが望ましい。

以上のことから、課題としてレーザーの出力や色、形状について使用海域の天候に合わせて選択する必要がある。また、操作性の面から ROV をある程度コンピュータによって自動制御するか、あるいは AUV によるミッションが望ましいと思われる[52][53]。

4.5 “AquaBox I”による観測

前節では、画像取得システムを既存の RTV100 に搭載した。水中ロボットにとってバランスの調整は非常に重要である。バランスによって ROV であれば、操作性の良し悪しが決まる。これは前節で使用した RTV100 にも同様のことがいえる。画像取得システムは、約 4[kg]あり RTV100 に搭載し、対象物から一定の距離を保持しつつ操作することは非常に困難である。本節では、開発した AquaBox I に画像取得システムを搭載することを考える。AquaBox I は、拡張性を考えフレーム構造としており、カメラ等の機器はあらかじめ搭載している。本節では、AquaBox I を使用した実海域調査について述べる。

4.5.1 観測システム“AquaBox I”

AquaBox I には、4.4 で述べた画像取得システムを搭載している(Fig.4-31)。AquaBox I は各機器がモジュール化されていることから組み立て、解体が容易である。また、上部に浮力の大きいシリンダを配置することにより、重心位置と浮心位置間をできるだけ距離をとることでピッチとロールに関する静的な安定性を確保した設計となっている(2.2)。従って、RTV100 を使用した場合と比較して画像取得という目的に関していえば、操作性は向上している。AquaBox I の動作イメージを Fig.4-32 に示す。



Fig.4-31 Measurement system mounted on AquaBox I

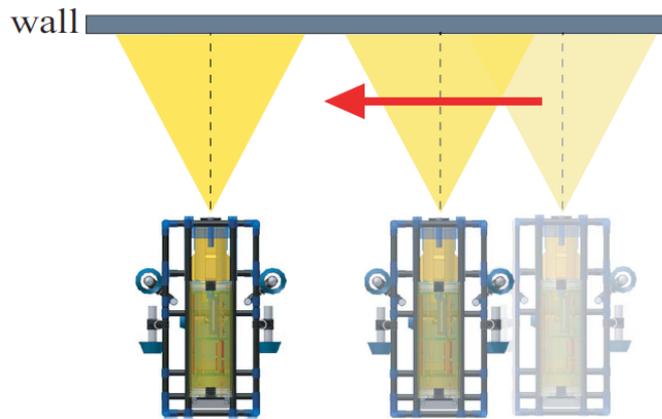


Fig.4-32 Motion of AquaBox I

4.5.2 ケーソン撮像調査

AquaBox I を用い、岩手県釜石市で 2 回目のケーソン撮像調査を行った。調査地は前回と同様、泉防波堤で AquaBox I の動作試験およびケーソンの撮像を行った(Fig.4-5-3)。実験は、オペレータが取得映像を確認しながら操縦するといった方法で行った。これは水深 5[m]程度潜航するとロボットを防波堤上から確認することができないためである。



Fig.4-33 Survey the caisson (AquaBox I)

4.5.3 調査結果

調査は、Fig.4-32 のように AquaBox I を壁面に対して平行移動させながら撮像した。取得した有効画像数は、160 枚であり、一部の画像を Fig.4-34 に示す。また、取得した画像から生成したモザイク画像を Fig.4-35 に示す。

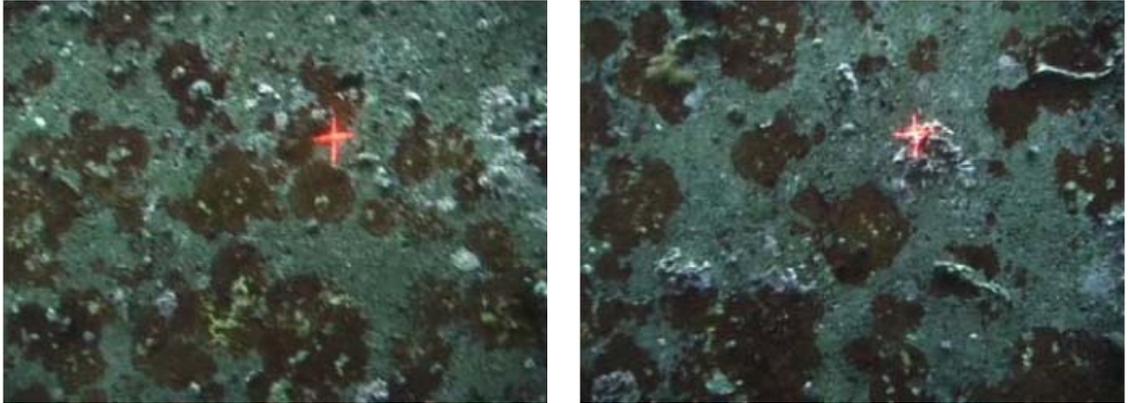


Fig.4-34 Acquisition data



Fig.4-35 Mosaic image

4.5.4 考察

位置情報はオペレータが表示された情報を確認しながら操作するという方法であった。本調査では、位置情報をロボットには入力しておらず、波の影響を受けずにロボットを動作させることは、困難であった。今後は、ロボットに壁面との相対角・位置を入力し制御することが必要である。ロボットの輸送に関して AquaBox I はフレーム構造を採用しているため簡易に分解、組み立てが可能である。従って、手荷物として空輸することができた。また、大人二人で防波堤からの着水、揚収が可能であった。特別な支援母船を必要とすることなく、ロボットを輸送、運用することが可能となったことが分かる[54][55]。

位置情報によりロボットの制御を導入することで、撮像技術が向上すると考えられる。

4.6 “AquaBox II”による観測システム

ここでは AquaBox II を利用した観測システムの今後の展望について述べる。AquaBox II は、ペイロードを重視した設計である。従って、観測機器としての利用だけではなく陸上と海中との物資の輸送システムおよびダイバー補助等に適用できる可能であり、今後、潜水作業の完全無人化がなされるまでの技術として、人間とロボットの強調作業は必要なシステムであると考えられる。現在の水中での作業は、ダイバーによって行われている。海中工事には、サルベージ、港湾建設、水産、海洋石油開発などがある。また、工事ではないが、水中作業として人命救助等も考えられる。近年、これらの作業は ROV 等の利用がなされつつ場合もあるが最終的にはダイバーが行っている。例えば、ケーソン設置のためのマウンド造成、発電所内の排水設備の建設、調査、点検など、未だダイバーによって行われている。マウンド造成には、捨石投入、測量などがあり、湾口部付近に建設される場合には、作業水深 25~40[m]と深くなる。従って船上との工具、部品等の物質的なやり取り、測量等の補助が必要となってくる。ダイバー自身が直接やりとりをすることは、作業の効率性と安全性から判断してあまり有効とはいえない。また、人命救助に関していえば、自律型のロボットとしてだけではなく、人間が水中で操作する水中スクーターのような利用が考えられる。これは、移動するだけの水中スクーターではなく、知能を持ち、周囲の情報を収集し、人間に伝えるといった機能を持ったシステムである。これは要救助者が必ずしも視界の良い環境ではないということであり、先述したようなシステムであれば、ソナーを利用しての要救助者の発見等、救助システムに適用可能である。

AquaBox II は、まだ開発段階であるが、ペイロードを重視したロボットとして水中における新たな分野の研究に繋がればと考えている。

4.7 “AquaBox III”による観測

AquaBox III は、港湾構造物に限定することなく沿岸域を広範囲に観測することを目的としたロボットである。従って、海底面調査用のカメラ、周囲を一度に撮像できる全方位カメラを搭載している。また、ハイドロフォンを搭載しており、将来的には音響観測等にも利用できると考えられる。現在、開発を行っているシステムは、ライントラッキングによる海底面調査、全方位カメラによる自己位置同定法の確立を行い、環境調査である。これらに加えてテストベッドとしての運用も考えている。開発したソフトウェアをすぐに実海域で試験をすることは、危険である。そこで本年度、AquaBox III を利用し、毎年米国にて行われている “AUVSI & ONR’s 9th International Autonomous Underwater Vehicle Competition” に参加することとした。この大会の目的は、若手技術者が現実的なミッションに挑戦することで自律型水中ロボットの技術促進を図ること、若手技術者と水中ロボット関係の技術者の連携を図ることである。この大会のミッションには、技術者としての意識等の評価およびロボットによる競技によって評価される。技術者の意識評価とは、競技中の態度、開発したロボットのアピールを正確に説明することができるかなどである。ロボットによる競技は、実際のミッションを想定したミッションが与えられクリアしていくものである (Fig.4-36)。ミッションには、ドッキングを想定したミッション (Fig.4-37)、パイプラインの破損箇所を特定するミッション (Fig.4-38)、指定位置に浮上してくるミッションである (Fig.4-39)。ドッキングでは、水中に設置された Docking station をロボットの先端に接触させ、Docking station に搭載されたライトの点滅が変化すればドッキング成功となる。パイプラインの破損箇所を発見するミッションでは、予め指定された的にマーカーをロボットから投下し、的に近いほど高得点となる。指定位置で浮上するミッションでは、指定位置からのピンガーを頼りにロボットは浮上位置を確認する。このミッションも指定位置に近いほど高得点となる。これらのミッションを時間内に遂行し、達成度によって評価される。本年度は、これらのミッションを達成することはできなかったが、我々の技術力の評価は高かった。競技会には、さまざまなタイプのロボットが参加していたが、実際のミッションを想定したロボットはほとんどなく、競技専用ロボットであった。しかしながら AquaBox III は実際の運用を視野に置いて設計されている。今後、AquaBox III の開発を進め、競技会にも挑戦する予定である。

AquaBox III の運用面に関しては、実海域でも運用可能なシステムでありながら重量 40[kg] と大人二人で着水、揚収が可能であり、輸送に関しても AquaBox I 同様、フレーム、モジュール構造であるため分解、組み立ても簡易であり、米

国への輸出の際、手荷物として空輸できる程度に分解することができた。このことから運用面に関して AquaBox プロジェクトのコンセプトどおりであることを確認することができた[56][57]。

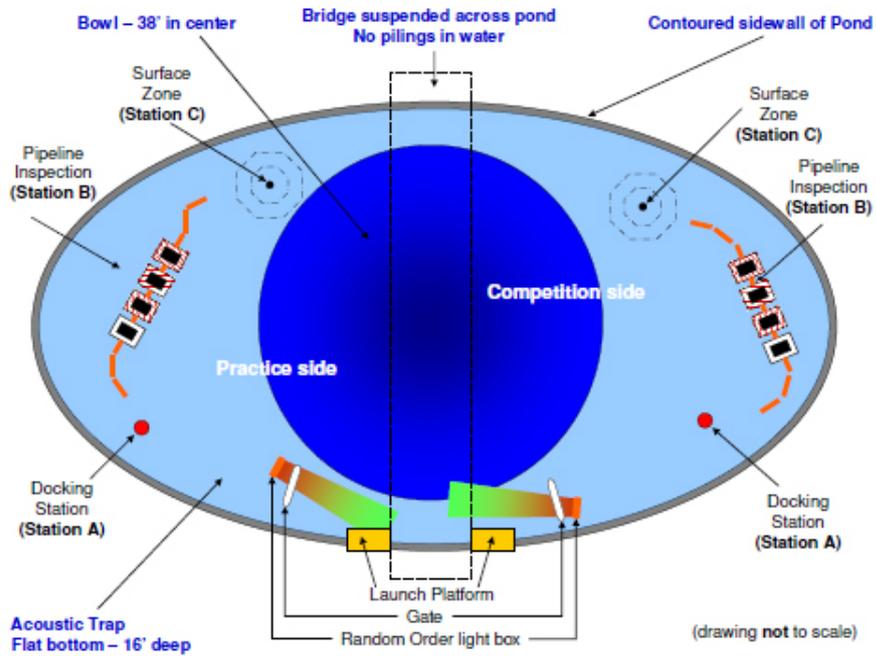


Fig. 4-36 General layout of Arena[58]

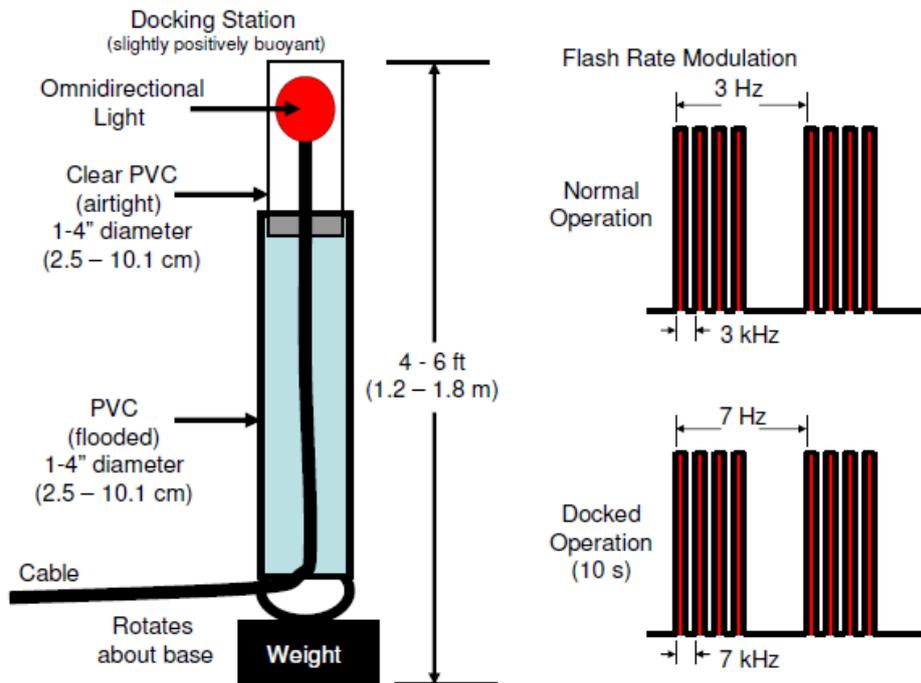


Fig.4-37 Layout of the Docking station and Indicator light[58]

第5章

考察および結論

第5章 考察および結論

本研究では、沿岸域における観測を目的とした水中ロボットシステムの開発を目的としておこなった。研究、開発を行うにあたり、まず現在ある水中ロボットの動向について調べ、今後どのようなシステムが必要であるか考察した。その結果、社会的、学術的にも未発達な研究分野への挑戦として、ROV および AUV としての機能を持ち、運用、輸送に関して簡易であるシステムの研究開発を目指すこととした。そして AquaBox プロジェクトを立ち上げ、ロボットシステムの構築を行った。本研究で提案した AquaBox プロジェクトのコンセプトは、以下のとおりである。

- ・特定の支援母船を必要とせず、2、3人で運用できるシステムとする。
- ・ミッションに応じてロボットの形体を組み替え可能とする。

このコンセプトに従い、はじめに ROV “AquaBox I” の開発を行った。AquaBox I は、プロジェクトのコンセプトに従った仕様となっており、オープンフレーム構造を採用し、耐圧容器、カメラを有しており実海域での運用を視野にいたした構成となっている。これらのシステム設計には CAD を使用し、ロボットのサイズ、重量等について十分考察を行い、仕様を決定した。操作系統は、AUV としても運用することを考えた仕様になっている。上位制御、下位制御に分割することで、ROV として運用する際には、上位制御をオペレータである人間が行い、下位制御は、ロボット自身が行う設計となっている。

次に AUV の開発を行った。AUV については、プロジェクトのコンセプト内で仕様、目的の異なる 2 種類のロボット “AquaBox II”、“AquaBox III” を提案し、設計、開発を行った。

AquaBox II は、ペイロードを重視し、フェアリングを有し、エレベータ機能があるためグライディングのような動作をすることができる。AquaBox I では、耐圧容器 1 器であったが、新たに、電源、上位制御を担うコンピュータを搭載した耐圧容器を設計した。また、現在進行中であるが AquaBox II の運動特性試験も行っている。AquaBox II の開発により、水中における人命救助や作業の補助機器など観測等とは異なったロボットの利用方法としての新たな研究分野が期待できる。

AquaBox III は、AUV であり、実海域での運用も視野にいたした仕様としながら小型軽量を実現した水中ロボットである。AquaBox I 同様、オープンフレームを採用しプロジェクトのコンセプトに従い、簡易に分解、組み立てのできるロボ

ットである。AquaBox III は、カメラ 2 基、ハイドロフォン 2 基を搭載している。カメラには、全方位カメラを搭載するなど現在までの水中ロボットには見られない、カメラとした。今後、このカメラを利用したロボットの制御、観測が期待できる。また、AquaBox III には、100[W]型スラスタを新たに搭載した。これにより、実海域における性能向上を図ることが可能となった。

次に、開発した AquaBox のロボットを利用した観測システムの開発を行った。観測システムは、ケーソンの撮像調査といった現在必要とされている技術に着目した。森らによって行われた位置情報取得システムの基礎技術開発から有効性の実証実験を行った。位置情報取得システムは、基礎研究ではラインレーザーを使用していたが、クロスレーザーを採用し、ロボットの対象物に関する相対位置 (Pitch、Roll) の取得が可能となった。この観測システムを AquaBox I に搭載し、水中構造物の点検作業を目的としたシステムの開発をおこなった。さらに、取得画像からモザイク画像生成に関する基礎的検討もおこなった。この AquaBox I を利用したシステムでは、岩手県釜石市釜石港にて水中調査実験を行い、有効性、課題等の評価を行った。

AquaBox II、AquaBox III を利用してのシステムの提案を行い、現在、具体的なミッション遂行のための開発を行なっている段階である。AquaBox III では、AUV の基本性能である、超音波距離センサを利用した障害物の回避実験を行った。

本研究で開発した小型水中ロボットシステムは、重量を数十キロに抑え、潜航深度も 50[m]と実海域において十分ミッションを遂行できる能力を有している。これは観測範囲を設定し、必要な能力にあわせて制御回路などのハードウェア設計を行ったことによるものである。本システムを世界中で開発されている水中ロボットと比較すると Fig.5-1 のようになる。開発した AquaBox I、II、III は、支援母船を必要とせず簡易に運用できるシステムとなっていることが分かる。

開発したそれぞれのロボットに対する今後の課題は以下のとおりである。

<AquaBox I>

- ・位置情報取得システムによって取得した対象物との相対位置に関する情報をロボットの姿勢制御への適用
- ・オペレータにロボットの状態などを表示させる GUI の開発が挙げられる。

<AquaBox II>

- ・運動特性の解析を行い、妥当性の評価を行う。
- ・エレベータシステムの開発

- ・特徴を生かしたアプリケーションの開発である。

<AquaBox III>

- ・全方位カメラを利用した自己位置同定法、観測システムの確立
- ・下方向カメラによりライントラッキングを利用した海底面の観測システムの確立[59]
- ・Pitch 方向の制御システムの開発

以上のように本研究には、解決すべき課題があり、今後も研究、開発を行っていかねばならない。

本研究は、小規模で沿岸域での運用を目的として研究しているものである。このような研究は、現在のところあまり注目されておらず、ほとんど研究されていない状況である。しかしながら、大規模化、大水深化する港湾構造物の保守作業など、港湾工事の安全性、効率性の向上、地球温暖化による珊瑚礁等の生態系への影響調査、海底に沈む海底遺跡、海底洞窟の調査など海洋考古学、海洋地質学に至るまで社会的ニーズは、増加してきている。これは水中ロボットの技術が向上しているために発生したニーズであり、今後さらに拡大することが予想される。これらの社会的ニーズへの対応のひとつとして本研究が挙げられる。一方、本研究による学術面の利益は、沿岸域での活動を目的とした水中ロボットシステムの開発という現在まであまり研究が行われていない、新たな分野の開拓をおこなった。この背景には、近年のコンピュータ技術の発展により、コンピュータの小型化、高機能化が実現し、それらを安価に手にいれることができるようになったことによるものである。従って、今後さらに活発な研究開発が行われていくことが予想されるものであり、本研究はそれらのパイオニアのひとつである。次に、現在開発され運用されている自律型水中ロボット (AUV) は、様々なミッションを行うことができるシステムとなっている。従って、各々のミッションに対してロボットシステムの冗長な部分が発生することは避けられない。この理由として、水中という環境が関係してくる。それは、AUV を考えた場合、電子機器、電源等は水や圧力から保護された密閉容器に搭載する必要がある。またそれらから出力するコネクタに関しても耐水圧のコネクタを必要とするなど、一度設計し、製作すると簡単に変更することは困難である。従って、一度開発されたロボットの筐体は変更されることなく様々なミッションを遂行するのである。これは、水中ロボットの役割が簡単な軽作業、主に観測、調査などに限られていたからで、形状は冗長性を持たせたもので許されてきた。しかしながら、水中ロボットの技術も向上し、目的に応じたロボットの必要性が生まれてきた。このニーズに答える方法として、目的に応じたロボットを複数台所有することであるが、コスト面から考えて現実的で

はない。そこで本研究では、現在まで行われていなかったロボットの形態を提案している。それは、各パーツをモジュール化してロボットをミッションに応じて組み替えるということである。本研究では、ロボットの形状を組み替えることが可能となるように設計し、ひとつのシステムでROV、AUVに変更できるシステムを有している。このことに関しても現在の水中ロボットでは、研究されておらず、本研究によって新たな研究分野の開拓ができるのではないかと考えている。

最後に本研究は、社会的、学術、教育面で今後、必要とされるであろう新たな分野への挑戦である。したがって本研究のような新たな研究分野の開発が進み社会的、学術的への貢献することを期待して本論文の結びとする。

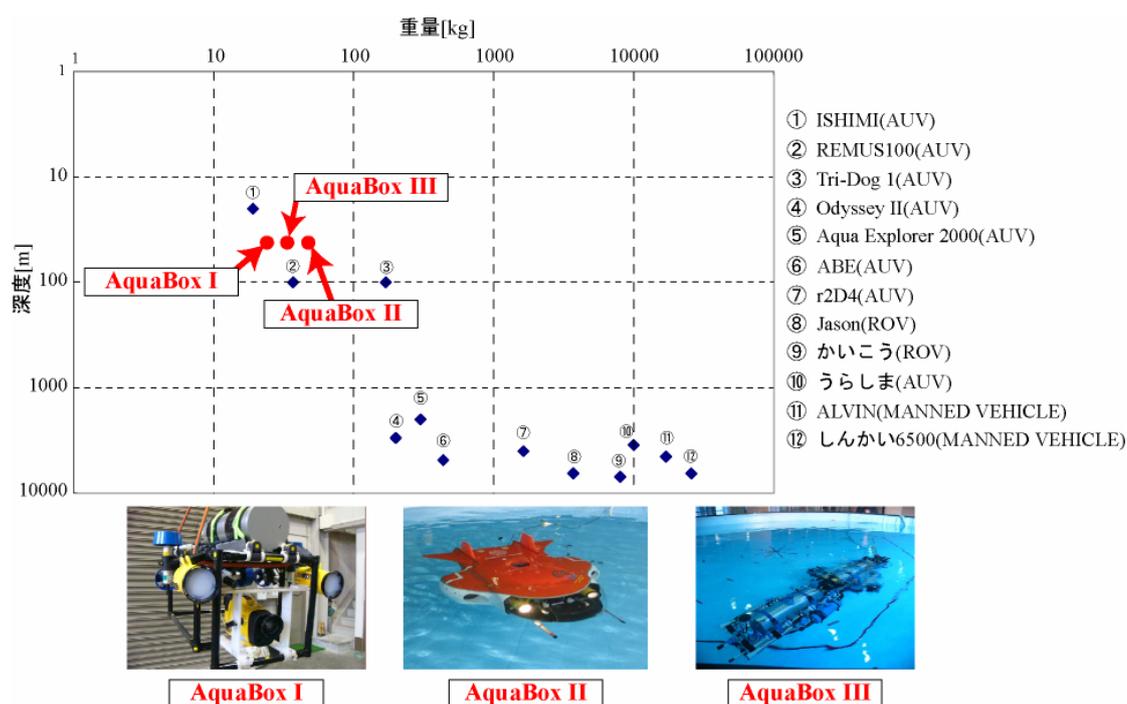


Fig. 5-1 Position of developed system

参考文献一覧

- [1]細田祐司: “人間共生ロボットの開発への取り組み”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, no3, pp.20-23, 2006
- [2]下笹洋一, 若林潔ら: “警備ロボット “ガードロボ” に警備サービス”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, no3, pp.32-35, 2006
- [3]景山浩二, 石田健蔵: “エンタテインメントロボットビジネス”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, no7, pp.8-11, 2002
- [4]柴田崇徳: “メンタルコミットロボット・パロとロボット・セラピーの展開”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, no3, pp.43-46, 2006
- [5]井上博允: “人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創生”, 日本ロボット学会誌, Vol.22, no1, pp.2-5, 2004
- [6]比留川博久: “人間型ロボットの近未来応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.22, no1, pp.6-9, 2004
- [7]山本欣市, 柿倉正義: “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
- [8]S.Hayati, et al. : “The Rocky 7 Rover: A Mars Sciencecraft Prototype”, Proc.of ICRA'97, 7 pages, 1997
- [9]T.Ura, K.Nagahashi, A.Asada, K.Okamura, K.Tamaki, T.Sakamaki, K.Iizasa: “Dive into Myojin-sho Underwater Caldera”, CD-ROM, Proc.of OceansASIA'06, 5 pages, 2006
- [10]浦環, 高川真一: 海中ロボット総覧 成山堂書店, 1994
- [11]T. Ura, “Free Swimming Vehicle PTEROA for Deep Sea Survey,” Proc. of ROV'89, pp. 263-268, (1989)
- [12]Fujii T., et. al, “Development of a versatile test-bed “Twin-Burger” toward realization of intelligent behaviors of autonomous underwater vehicles,” Proc, of OCEANS'93, vol.1, pp. I186-I191, (1993)
- [13]T. Ura, “Development of autonomous underwater vehicles in Japan”, Advanced Robotics, Vol.6, No. 1, pp. 3-15, (2002)
- [14]S.Ishibashi, T.Aoki, et al.: “An Ocean Going Autonomous Underwater Vehicle “URASHIMA” equipped with a Fuel Cell”, Proc.of UT'04, pp209-214, 2004
- [15]熊谷道夫, 石川可奈子: “自律型潜水ロボット「淡探」を用いた琵琶湖研究の高度化と展望”, 日本造船学会誌, no.883, pp52-56, 2005
- [16](社)日本造船学会海中技術専門委員会編: “海中技術一般”, 成山堂書店, 1992
- [17]大畑智海, 石井和男, 酒井浩, 田中敏成: “水中モザイク画像の取得を目的とした水中ロボットの開発” CD-ROM, Proc.ROBOMECH2005, 2A1-S-009 4 pages, 2005
- [18]S.Ohata, K.Ishii, H.Sakai, T.Tanaka, T.Ura, “Development of an Autonomous Underwater Vehicle for Observation of Underwater Structures”, Proc.of OCEANS'05, vol.1, pp.I186-I191, (2005)
- [19]大畑智海, 石井和男 “沿岸域における観測を目的とした水中ロボットの開発” 計測自動制御学会(SI2005)CD-ROM 2G1-2, pp.645-648, 2005
- [20]S.Lerner, D.Fornari, B.Walden: “The Alvin Frame-Grabber System” DRAFT TECHNICAL REPORT, Wood Hole Oceanographic Institution, 2003
- [21]A.Bennett, J.Leonard, J.Bellingham : “Bottom Following for Survey-Class Autonomous Underwater Vehicles”, Proc.UUST, pp.327-336, 1995

- [22]R.Stoley,A.Roup : “Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle”,CD-ROM,Proc.Oceans'05,4pages,2005
- [23]WHOI,MarineOperations,Jason/Medea:
<http://www.whoi.edu/marops/vehicles/jason/>
- [24]International Submarine Engineering Ltd. : <http://www.ise.bc.ca/index.html>
- [25]PAN-MOOK LEE, BONG-HUAN JUN, et al.:“Navigation and Control System of Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle‘HEMIRE’”
- [26]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,pp3-7,2005
- [27]渡邊正之,橋本菊雄ら: “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,pp22-25,2005
- [28]Tamaki Ura: "An Autonomous Vehicle R1 for One-Day Investigation over Mid-Ocean Ridge", InterRidge News Letter No.4, (1992)
- [29]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,pp.19-23,2004
- [30]小原敬史: “アールワン・ロボットから r2D4 へ”,日本造船学会誌,no.883,pp42-47,2005
- [31]白崎: “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,pp48-51,2005
- [32]H. Kondo, T. Ura,"Underwater Structure Observation by the AUV with Laser Pointing Device", Proc. UT02, pp.178-183, (2002)
- [33]T.Maki,H.Kondo,T.Ura,T.Sakamaki:“Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle for Photo Mosaicing of Shallow Vent Areas”,CD-ROM,Proc.of OceansASIA'06, 7 pages,2006
- [34]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”,CD-ROM, Proc.ROBOMECH2005, 2P1-S-013 4 pages,2005
- [35]西田周平: “海中ロボットのシステム開発および行動計画” 2001 年度九州工業大学修士論文
- [36]浦環,大坪新一郎: “グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その1)”,生産研究,37 巻 12 号,pp.539-542,1985
- [37]浦環,大坪新一郎: “グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その2)”,生産研究,39 巻 4 号,pp.149-152,1987
- [38]浦環,大坪新一郎: “グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その3)”,生産研究,39 巻 5 号,pp.183-186,1987
- [39]浦環: “グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その4)”,生産研究,40 巻 2 号,pp.117-120,1987
- [40]北野まどか: “航行型水中ロボット AquaBox II の運動特性推定実験及び流体力の推定” 2005 年度九州工業大学修士論文
- [41]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 “AquaBoxII” の開発～運動特性の解析と制御系設計～”,Proc.Of ROBOMECH2006,1P1-E30, 3pages,2006
- [42]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(2006) 2006W-G-6 pp.19-20
- [43]S.Ohata,K.Ishii,H.Sakai,T.Tanaka,T.Ura:“An Autonomous Underwater Vehicle for

- Observation of Underwater Structure”,BrainIT2005,International Congress Series 1291,pp.277-280,2006
- [44]大畑智海,森忠司,石井和男,酒井浩,田中敏成,浦環: “AUV を用いたモザイク画像取得に関する研究” 計測自動制御学会(SI2003) CD-ROM,Proc.Of SI2003, pp.736-737
- [45]H.Sakai,T.Tanaka,T.Mori,S.Ohata,K.Ishii,T.Ura:“Underwater Video Mosaicing Using AUV and Its Application to Vehicle Navigation”,Proc. Of UT'04, pp.405-410
- [46]R. L. Marks, S. M. Rock, M. J. Lee, “Real Time Video Mosaicking of the Ocean Floor”, IEEE J. of Oceanic Eng., Vol.20, No.3, pp. 229-241, (1995)
- [47]W.K. Stewart, “Remote-sensing issues for intelligent underwater systems,” in Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 230-235, (1991)
- [48]J. Pollio, “Stereo-photographic mapping from submersibles,” in SPIE, vol. 12, pp. 67-71, (1968)
- [49]Y. Kanazawa, K. Kanatani. “Image Mosaicing by Stratified Matching,” IEICE. D-II, Vol. J86-D-II, No. 6 (2003), pp.816-824.
- [50]N.Chiba, H.Kano, M.Minoh, M.Yasuda, M.Osumi, “Feature-Based Image Mosaicing,” IEICE D-II Vol.J82-D-II, No.10 pp.1581-1589
- [51]N.Terashima, S.Takeuchi, H.Tominaga, “High Resolution Image Digitization by Layered Image Mosaicing using Projected Mask” IEICE VOL.J83-DII No.4 April 2000
- [52]酒井浩,田中敏成,大畑智海,石井和男,浦環: “水中におけるモザイク画像取得に関する研究” ,Proc.ROBOMECH2004,2A1-L2-27,2 pages,2004
- [53]H.Sakai, T.Tanaka, S.Ohata, M.Ishitsuka, K.Ishii, T.Ura: “Applicability and Improvement of Underwater Video Mosaic System Using AUV”, Proc. Oceans'04/Techno-Ocean'04, pp.659-664(2004)
- [54]大畑智海,石井和男,酒井浩,田中敏成,浦環: “水中画像の取得を目的とした小型水中ロボットの開発及びモザイク処理システムへの適用” ,計測自動制御学会(SI2004) CD-ROM,Proc.Of SI2004, pp.787-788
- [55]大畑智海: “小型水中ロボットを用いたモザイク処理システムの開発” 2004年度九州工業大学修士論文
- [56]S.Ohata,Y.Eruginchi,K.Ishii:“AquaBox : A Small Underwater Robot System for Coastal Observation”,Workshop for Asian and Pacific Universities' Underwater Roboticians(APuuRobo 2006)
- [57] “AquaBox:沿岸域における観測を目的とした小型水中ロボットシステム -AUVSI & ONR's 9th International Autonomous Underwater Vehicle Competition 報告-” 計測自動制御学会(SI2006) CD-ROM,Proc.Of SI2006, 2 pages
- [58] AUVSI and ONR's International Autonomous Underwater Vehicle Competition: <http://www.auvsi.org/competitions/water.cfm>
- [59] Y. Ito, N. Kato, J. Kojima, S. Takagi, K. Asakawa and Y. Shirasaki , “Cable Tracking for Autonomous Underwater Vehicle,” in Proc. AUV'94, pp. 218-224, (1994)

Appendix

AquaBoxIII の設計図面を以下に示す。AquaBox I、II に関しては、AquaBoxIII と同様なシステムであるので省略する。

謝辞

本論文は、私の九州工業大学情報工学部制御システム工学科、大学院生命体工学研究科脳情報専攻における約 5 年間の生活を通して多くの方々のご指導、ご鞭撻を頂いたおかげではじめて完成したものです。ここにお世話になった方々のお名前を挙げて、感謝の意を表したいと思います。

九州工業大学大学院生命体工学研究科石井和男助教授には、学部 4 年から 5 年間にわたり、指導教官としてご指導していただきました。研究においては、的確な助言と方向性、そして何より力強く励ましていただきました。また私事でも親身になって様々な助言、そしてご理解をしていただきました。この 5 年間は、私の人間性を向上させたことは言うまでもありません。人生のこの時期に石井研究室で研究生活を送れたことは私にとって大きな宝となると思います。

先輩の西田周平氏（北九州市立大学）には、研究室に入ったころより研究についてだけではなく、さまざまな事柄についてご教示していただきました。また、私が躓いたときなどは、自分のことのように支援していただきました。

先輩である佐藤雅紀氏には、研究で困ったときなどいつも励まし、助け舟をだしていただきました。また、研究室の雰囲気にはいつも敏感で気を使っていたいただきました。

ロボティクス研究所の Amir.A.F.Nassiraei 氏は、あるときは友人であり、あるときは先生、先輩として学部 4 年の卒論から英語の話せない私に技術者としての心得を丁寧に、そして時には厳しく教えていただきました。大変お世話になりました。

同級の松尾貴之氏は、開発するロボットの電気回路について相談にのっていただき、私のわがまを聞いてくれました。研究以外でも研究室の雰囲気を無意識のうちに明るくしてくれました。石塚誠氏は、釜石での実験をはじめ、いざというときに的確な支援をしてくれ、また、彼にはさまざまな遊びを教えてもらいました。杉山公一氏は、ロボット開発で行き詰ったときに大いに手助けをしてくれ、いつも研究室での話題を提供してくれました。そして研究室の雰囲気を盛り上げてくれました。正門聖士氏は、卒業してからも応援してくれました。この 4 人は、よきライバルであり、友人でもありました。心から感謝しています。ありがとう。

後輩の博士課程 1 年園田隆君には、開発した水中ロボット AquaBox の名前と Logo マークを考えていただきました。独創的な考えを持った園田君は、石井研究室では貴重な存在のひとりです。同じく博士課程 1 年の王雪冰君は、中国のさまざまな文化を教えてくださいました。修士 2 年の江里口優君には、ロボットの開発から実験までいつも真剣に取り組んでくれました。彼のおかげでスムーズ

に研究を行うことができたと思います。そして私の戯言にも付き合ってくれました。ありがとうございます。修士 2 年の武村泰範君は、いつも周囲に気を使い、研究室を盛り上げてくれていたと思います。神田敦司君は、ロボットの工作において無理難題を多々聞いてくれたと思います。白石武尊君は、私が研究で忙しいときなどよく手伝ってくれたと思います。真田篤君は、私の要求を確実に実現してくれたと思います。私のわがまを素直に受け入れてくれた君達には、本当に感謝しています。

修士 1 年の草壁亮君、徳賀健太郎君、西田裕也君、野畑慎伍君、伴健志君、望月隆吾君、横山健君、渡邊伸人君、張軼広君、そして学部 4 年生の荒木聡史君、森邦洋君、君達も私のわがまを素直に受け入れ、自分達のことのように実行してくれました。ありがとうございます。そしてこれからも石井研究室を盛り上げて行って欲しいと思います。

卒業した先輩、同期、後輩、そして現在のメンバーには、水中ロボットの開発という時間と労力のかかる作業を手伝っていただき大変感謝しています。これらの経験からチームの必要性を再認識されました。

東京大学生産技術研究所浦環先生には、水中ロボットの機材等の提供を含め、多くの支援をしていただきました。東海大学渡邊啓介先生には、自分の研究室の学生のように接していただき、相談や多くの経験をさせていただきました。大変お世話になりました。

水中ロボットを開発するにあたり、耐圧容器等の加工、そして製図について何も分からない私の指導もしてくださった、鈴木社長、森山さんをはじめとする三ツ和金属株式会社の皆様方、おかげでスムーズに研究を行うことができました。ありがとうございます。

九州工業大学生命体工学研究科の事務の方々には、さまざまな無理を聞いていただき大変お世話になりました。戸畑総務係の会計課岩村さんには、水中ロボットの輸出入手続きに際して大変お世話になりました。

最後になりましたが、私を育て支えてくれた両親の雅英、陽子そして兄姉達、祖父母には心から感謝の意を表して謝辞といたします。

2007 年 3 月 16 日