

博士学位論文

マニピュレータを搭載した自律型水中ロボットの開発

石塚 誠

目次

第1章	序論	3
1.1	水中ロボット	3
1.1.1	海洋開発と水中ロボット	3
1.1.2	水中ロボットの将来	4
1.2	水中用マニピュレータ	8
1.2.1	Human Occupied Vehicle	8
1.2.2	Remotely Operated Vehicle	10
1.2.3	Autonomous Underwater Vehicle	13
1.2.4	水中用マニピュレータ	14
1.3	モジュール型構造	23
1.4	本論文の目的	27
1.5	本論文の内容	29
第2章	水中ロボットの動作シミュレーション	33
2.1	水中ロボットの力学	33
2.1.1	ロボットのモデリング	33
2.1.2	運動学関係式	35
2.1.3	運動量方程式	35
2.1.4	流体力	36
2.1.5	運動方程式	37
2.2	経路計画	42
2.2.1	動的可操作性	42
2.2.2	動的可操作性楕円体の変化	42
2.2.3	経路計画	44
2.3	手先位置制御シミュレーション	51
2.3.1	制御則の導出	51
2.3.2	手先位置制御シミュレーション	51
第3章	マニピュレータを搭載した 水中ロボットの開発	63
3.1	自律型水中ロボット“Twin-Burger”	63
3.1.1	”Twin-Burger”概要	63
3.1.2	システム構成	65
3.2	モジュール構造化	67

3.2.1	モジュール化の手法	67
3.2.2	“ Twin-Burger ”への適用	71
3.3	AUV の制御システムの開発	77
3.3.1	システムの構成	77
3.3.2	モジュール構造	77
3.4	マニピュレータの開発	82
3.4.1	防水構造	82
3.4.2	モジュール構造	84
3.4.3	外殻の設計	86
3.4.4	マニピュレータの製作	88
第 4 章	水中ロボットの動作実験	93
4.1	AUV 本体の動特性試験	93
4.1.1	強制揺動試験	93
4.1.2	実験結果	93
4.2	マニピュレータの動特性試験	98
第 5 章	結論	103
	参考文献	105
	謝辞	109
付 録 A	流体力項の計算方法	113
A.1	流体力の近似	113
A.2	付加質量・付加慣性モーメント	113
A.3	流体抗力	115
付 録 B	マニピュレータの設計図	119
B.1	設計図	119
B.2	部品表	119
付 録 C	各モジュールの設計図	122
C.1	開発したモジュール群	122

目 次

1.1	水中ロボットの活躍フィールド	5
1.2	海洋開発と海中ロボット	6
1.3	水中ロボットの分類	6
1.4	ALVIN / WHOI (アメリカ)	9
1.5	しんかい6500 / JAMSTEC (日本)	9
1.6	Nautil / Ifremer (フランス)	11
1.7	かいこう / JAMSTEC (日本)	12
1.8	ドルフィン 3K / JAMSTEC (日本)	15
1.9	Tiburon / MBARI (アメリカ)	16
1.10	LEO (上) と VEGA (下) / 広和株式会社 (日本)	17
1.11	LBV300 / SEABOTIX (アメリカ)	18
1.12	Panther Plus (上) と Falcon (下) / Seaeye (アメリカ)	19
1.13	VICTOR 6000 / Ifremer (フランス)	20
1.14	SAUVIM / ハワイ大学 (アメリカ)	21
1.15	ALIVE / The ALIVE project (EU)	21
1.16	水中ロボットの重量とマニピュレータの自由度	22
1.17	M-TRAN / 独立行政法人産業技術総合研究所, 東京工業大学	25
1.18	コンポーネント型コントローラ	25
1.19	MUSASHI / 北九州学術推進機構	26
1.20	自律型水中ロボット”Twin-Burger”	28
2.1	2リンクマニピュレータを装備した Twin-Burger のシミュレーションモデル	34
2.2	動的可操作性楕円体の概念図	43
2.3	各姿勢における動的可操作性楕円体の面積推移	45
2.4	各姿勢における動的可操作性楕円体の面積推移	46
2.5	各流速における動的可操作性楕円体	46
2.6	各流速における動的可操作性楕円体の面積推移	47
2.7	各流速における動的可操作性楕円体の中心の変位	47
2.8	各姿勢における動的可操作性楕円体	48
2.9	水中ロボットに与える外乱	48
2.10	X 軸方向の外乱に対する位置誤差	49
2.11	Y 軸方向の外乱に対する位置誤差	50
2.12	ロボットの初期姿勢と手先の目標位置	52
2.13	ベースの目標位置	53

2.14	ベースの目標角度	54
2.15	手先の目標位置	55
2.16	各時刻におけるロボットの姿勢	56
2.17	手先の軌道	57
2.18	ベースの軌道	58
2.19	ベースの姿勢変化	58
2.20	手先の位置誤差	58
2.21	ベースの位置誤差	59
2.22	ベースの姿勢誤差	59
2.23	関節角度の推移	60
2.24	関節角速度の推移	60
2.25	関節トルクの推移	60
3.1	再構成以前の耐圧容器内の様子	64
3.2	“ Twin-Burger ”の自由度	64
3.3	開発するロボットのシステム構成	66
3.4	モジュール化の例	68
3.5	同一デバイスのモジュール化	70
3.6	直列デバイスのモジュール化	70
3.7	並列デバイスのモジュール化	70
3.8	モジュール化の検討 (2) 同一機能を持つデバイス	72
3.9	モジュール化の検討 (3) 並列に接続されたデバイス	73
3.10	モジュール化の検討 (3) 直列に接続されたデバイス	74
3.11	モジュール化の検討 (3) 直列かつ並列に接続されたデバイス	75
3.12	モジュール化の検討 (4) 単独デバイス	76
3.13	各モジュールの配置	78
3.14	後部耐圧容器に搭載する各モジュールの外観	79
3.15	後部耐圧容器内部に配置するモジュールシステムの外観	79
3.16	前部耐圧容器に搭載する各モジュールの外観	80
3.17	前部耐圧容器内部に配置するモジュールシステムの外観	80
3.18	マグネットカップリングの形状	83
3.19	O-Ring による防水構造	83
3.20	リンク用シリンダの耐圧-円筒板厚の関係	87
3.21	開発したマニピュレータの構造	89
3.22	開発したマニピュレータの外観	90
3.23	開発したマニピュレータを AUV に搭載した状態	90
4.1	位置を目標にした場合の強制揺動試験	94
4.2	速度を目標にした場合の強制揺動試験	94
4.3	Surge 方向の強制揺動試験の結果	95
4.4	Sway 方向の強制揺動試験の結果	95

4.5	Yaw 方向の強制揺動試験の結果	96
4.6	Heave 方向の強制揺動試験の結果	96
4.7	マニピュレータの動作試験の様子	99
4.8	マニピュレータの動作試験方法	99
4.9	マニピュレータの動作試験結果	100
4.10	動作試験と同じ動きをさせた場合のシミュレーション結果	100
A.1	流体中における物体の運動と流体力	114

表 目 次

2.1	マニピュレータの関節角度の組み合わせ	45
2.2	シミュレーションに用いた水中ロボットのパラメータ	57
2.3	ロボットの初期姿勢と手先の目標位置座標	57
3.1	“ Twin-Burger ”の仕様	64
3.2	モジュール化によるシステムの簡略化	81
3.3	マニピュレータの設計性能	87
3.4	マグネットカップリングのサイズと伝達可能トルク	87
3.5	選定したモータとギアヘッドの性能	87
3.6	設計に使用する物理パラメータ	88
3.7	開発したマニピュレータの性能	89
4.1	強制揺動試験の実験パラメータ	97
4.2	導出した動特性パラメータ	97
A.1	水の物性値	114
A.2	一般的な形状の付加質量算出式	116
A.3	一般的な形状の抗力係数	117
B.1	構成部品一覧	120
B.2	購入部品一覧	121
C.1	モジュール図面一覧	123

第1章

序論

第1章 序論

1.1 水中ロボット

1.1.1 海洋開発と水中ロボット

海洋は地球表面上の70%以上を占めており、漁業を中心とした水産資源や空港建設や埋立地といった空間利用、海水浴やマリンスポーツなどのレジャー目的や海底鉱産資源の獲得など、実に様々な局面で利用されている。また、地震メカニズムの解明と予測精度向上のための地殻調査や、地球の環境変動解明のための調査など、科学の発展に対する期待も大きい。

特に海底に目を向けるとその平均深度は3,800[m]と深く、現在も未知の生物や現象の発見が相次いでいる[1]。現在では様々な手法により海洋の動態や生物活動、海底変動など様々な海洋諸現象に関して調査・研究が進められており、海底鉱産物の産出や海底ケーブルの敷設といった海中における活動も増えてきている[2]。

しかし海中は、高圧力、暗闇、視認性の悪さ、低温などの問題があり、人間が直接作業を行うことが難しいため、安全や効率の観点から水中ロボットの開発および運用が期待されている[3][4]。特に、日本は周囲を海で囲まれており、太平洋側は6,000mを超える深い海溝が存在する複雑な海底地形が近海に存在する。こういった日本の状況を考えると、将来の発展のために海洋開発は避けて通れない道であり、海洋開発に必要な水中ロボットの開発は、日本が抱える非常に重要な課題の一つであるといえる。

また海中に限らず、Fig.1.1に示すように多岐に渡って水中ロボットの活躍する場がある。原子力発電プラントのように放射能の危険がある環境における有索のカメラロボや、身近なところでは、水族館やプールなどの水槽掃除ロボット、湖や河川、ダムなどにおける生態・環境調査ロボットなどが挙げられる。

さて、“海洋開発”の現場において水中ロボットはどのようなものが望まれているのだろうか。海底環境の長期観測や海底地形の調査、海中生物の生態調査や海底構造物の建設・保守、海洋資源・海底鉱産資源の発掘などが挙げられる。また、将来においては海難救助などにも応用されることだろう。以上のように、様々な運用が期待されており、現在までに研究・開発された水中ロボットも多種多様である。例として、Fig.1.2にロボットを用いた海洋開発の概略図を示す。

単純に“深海へ行く”という概念から生まれた、オペレータが実際に乗り込んで潜行を行う有人潜水艇であるHOV、オペレータを危険にさらさないように遠隔操作を行う無人潜水機であるROV、その中でも近年は無索で自律して行動を行う自律型水中ロボットであるAUVなどが存在する。他にも長期間に渡って海底を監視する装置や、気象情報を取得するブイ、海底を走行したり、船舶に曳航される形態のロボットも存在する。

以上のように，将来の海洋開発には様々な形態の水中ロボットの開発と運用が期待されている [5]．先にあげたように，水中ロボットは作業目的や環境によって多種多様のタイプがあり，Fig.1.3 に現在運用されている主な水中ロボットの分類を示す．

図に示すように，水中ロボットは主に有人と無人の二種類に大別され，無人機はさらに有索式と無索式に分類される場合が多い．その中でも特に，先に述べた HOV，ROV，AUV の三つが代表的な水中ロボットの形態であろう．また，本稿では文献 [6] の呼び方と分類方法を踏襲することにする．

1.1.2 水中ロボットの将来

人類の発展に伴い，食糧問題や環境問題を始めとして，海洋の重要性はますます増加していくだろう．しかし，前述したように海中という極限環境では人間が直接作業することは適わず，水中ロボットの需要はますます増加していくことだろう．

HOV は研究者が直接現場に行くことのできるという最大の特徴は損なわれず，今後も運用が続いていくことだろう．ただ，欠点としてシステムの大型化と付随する建造費や運航費用・設備の増大が問題となっている．これは人命を扱うため，安全確保のためにシステムが大型化し，結果として建造費がかさみ，関連して，点検項目の増大や大型化したシステムを運用するための支援母船などの経費がかかることになる [7]．

将来的な課題としては，オペレータによる操作を簡易化し乗船しやすいインテリジェントコクピットの開発や，繊細な作業が可能なマニピュレータの開発，安全な着揚収システムの開発などがある．他にも，ロボットの小型化と乗員の安全性向上のための，強度の高い素材を用いた機体の開発なども挙げられている [8]．

ROV は建造費，運用費ともに HOV と比較して低コストであり，長時間のオペレーションが可能だという利点がある．また，電源装置を始めとした様々な機器を陸上のオペレータ側に設置できるため，最大深度などの条件などがそろえば，大幅な小型化も可能である．そのため，様々な小型 ROV が市販されており，定置網や養殖場の点検といったように漁業や河川の管理者などが利用している．

ROV の一番大きな課題は ROV の特徴でもある接続ケーブルである．このケーブルは ROV の行動を制限するだけでなく，ケーブルにかかる流体力が ROV の運動性能にも大きく影響している．2003 年には日本の代表的な ROV である「かいこう」のケーブルが断裂し，ROV の本体を亡失してしまっている．この事件を見ても，ケーブルの構造・強度や点検方法，交換時期などに課題が残っていることが分かる．[9]．

ケーブルの他の点では，機体の制御を ROV 側である程度自律化し，オペレータの負担を軽減する支援システムの開発も課題の一つとされている．また，ROV に限らず水中ロボットの搭載限度は小さく，ミッションに応じてセンサやマニピュレータを適宜交換する必要があるため，交換を容易に行うための各種装備の開発に際し，モジュール性指向を取り入れた設計の必要性もあげられている [8]．

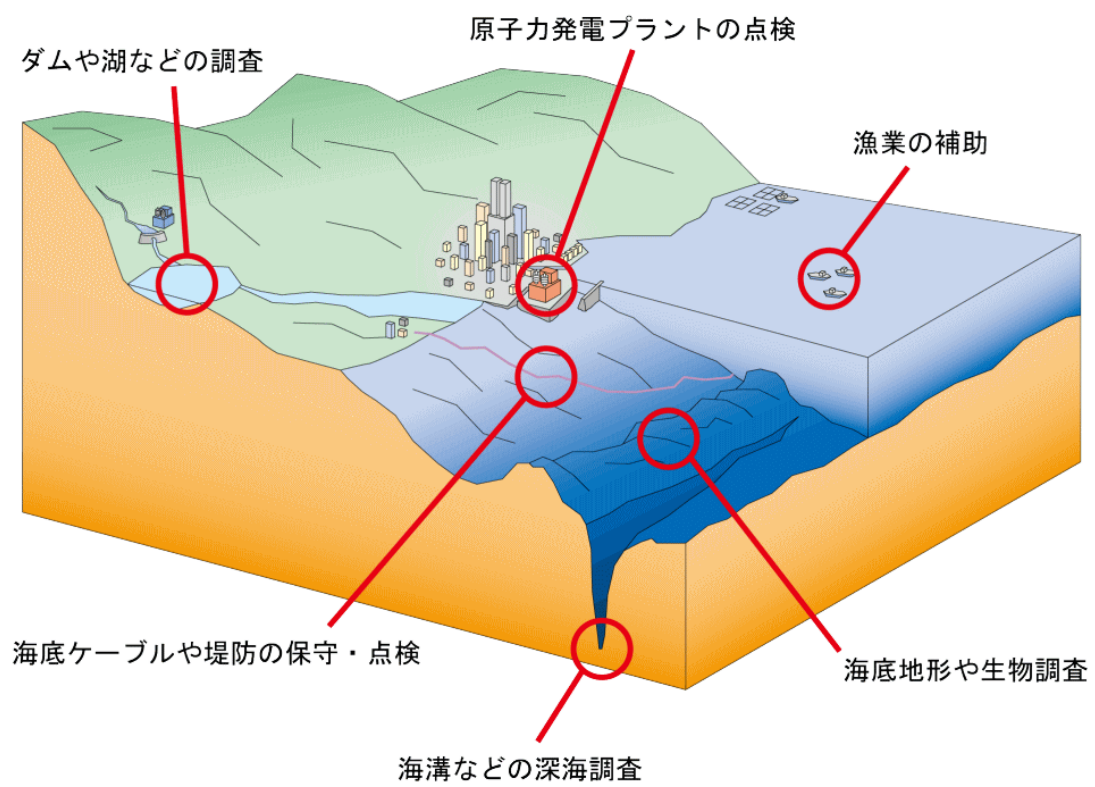


Fig. 1.1: 水中ロボットの活躍フィールド

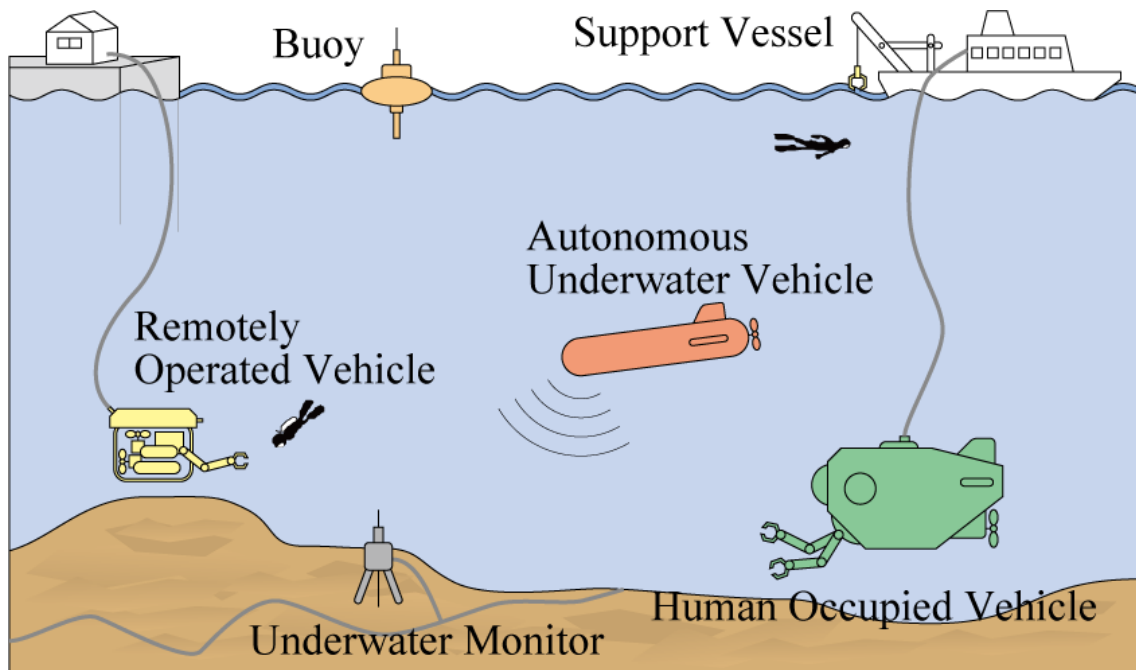


Fig. 1.2: 海洋開発と海中ロボット

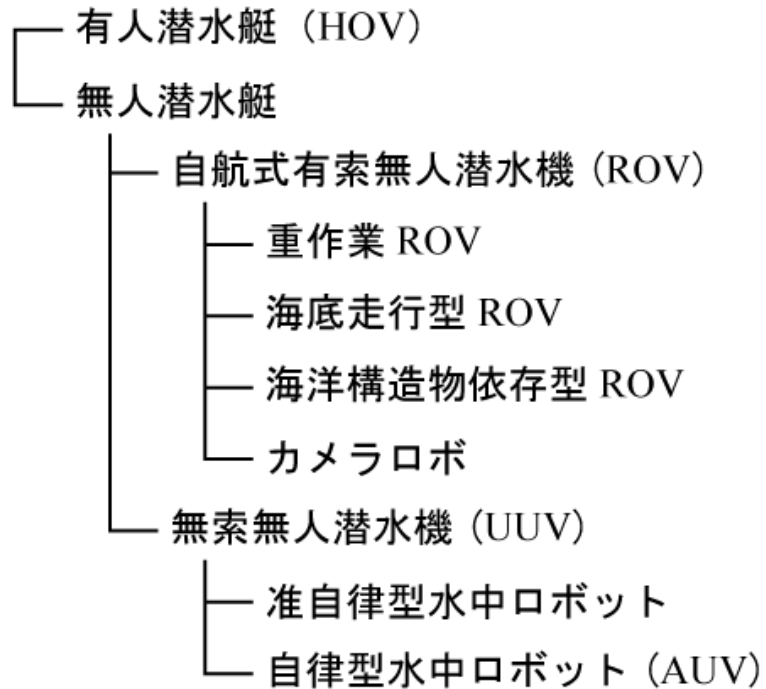


Fig. 1.3: 水中ロボットの分類

AUV は ROV や HOV と違い、オペレータが存在しないため自律行動が必要となる。近年の技術の進化により、以前に比べて小型の情報処理装置や大容量バッテリーが実現されており、AUV の高機能化が進み、現在では広域の調査潜行に成功した結果が世界中から多々報告されている。潜水調査の自動化を行うにはセンシング技術や情報処理技術などの高度化が重要である [10]。

AUV はその運用形態から稼働時間も課題の一つとなっていたが、近年では海洋研究開発機構の開発した AUV “うらしま” により航続距離 317km、56 時間もの潜行を実現している [11],[12]。この用に AUV に求められる課題は多いものの、技術の進展によりそれらの課題が解決する日もそう遠くないだろう。

将来の海洋調査や海洋開発に対応するため、水中ロボットには今以上の様々な機能が求められていくことだろう。本稿では複雑な作業に対応するための水中用マニピュレータと、拡張性や信頼性の向上を目的としたロボットシステムのモジュール化に関して考察していくことにする。

1.2 水中用マニピュレータ

水中におけるミッションには、サンプルの採取をはじめとしたマニピュレーションを行うミッションが想定される。水中ロボットをマニピュレータに関して詳しく見てみると、HOV・ROV に関してはマニピュレータを持つロボットが多数存在するが、AUV に関しては非常に少ない。以下に代表的なマニピュレータを持つ水中ロボットを分類別に紹介する。

1.2.1 Human Occupied Vehicle

HOV はオペレータが実際に乗り込み、操作するタイプの有人潜水艇であるため、複雑な操作を必要とするマニピュレーションを間近で操作することが可能である。そのため、近年運用されている HOV はマニピュレータを装備しているものがほとんどである。しかし、オペレータが存在するためにシステム全体が大型化し運用のためのコストが高く、オペレータが直接乗り込むため高い安全性が要求されるという理由から、大深度まで対応できる HOV は世界でも数台しか存在しない。

ALVIN

アメリカ合衆国海軍が開発し、Woods Hole Oceanographic Institution が運用している HOV“ ALVIN ”(Fig.1.4) は、1964 年に世界初の大深度調査艇として建造され、現在までに 4000 回以上の潜行を行っている。ALVIN は定員 3 名（内、パイロット 1 名）を 4,500m の深さまで潜行することができ、6 基のスラスタを用いて海中を移動する。建造は古いものの、高い頻度で最新の技術を用いたシステムに入れ替えている [13]。

有名な成果として、1966 年に地中海における紛失した水素爆弾の発見、1970 年代の熱水噴出孔の発見、1986 年の沈没したタイタニックの調査などが挙げられる。

しんかい 6500

独立行政法人海洋研究開発機構が開発した HOV であり、現在運行中の有人潜水艇としては世界で一番深く潜ることができる HOV“ しんかい 6500 ”(Fig.1.5) は 1990 年に建造され現在までに 1000 回以上の潜行を行っている。定員は 3 名（内、パイロット 2 名）で、最大深度 6,500m まで潜行可能。二つの 7 自由度のマニピュレータの他、サンプル採取用の可動式バスケットを装備する。

日本近海に限らず、太平洋、大西洋、インド洋等の海域で海底の地形や地質、深海に生息する生物などの調査を行っており、1991 年には日本海溝の深度 6366m においてプレートの裂け目を発見、1998 年にインド洋において有人潜水艇として初めて調査潜水を行っている [8],[14]。



Woods Hole Oceanographic Institution (<http://www.whoi.edu/>)

Fig. 1.4: ALVIN / WHOI (アメリカ)



独立行政法人 海洋研究開発機構 (<http://www.jamstec.go.jp/>)

Fig. 1.5: しんかい 6500 / JAMSTEC (日本)

Nautil

Fig.1.6 に示した HOV “ Nautil ” はフランスの海洋研究所 Ifremer が保有する有人潜水艇である。しんかい 6500 に次ぐ 6,000m まで潜水可能で定員は 3 名。このロボットは通常の潜水・調査に加え、付属の ROV を使用可能という特徴を持っている。1984 年に建造され、今までに 1,500 回以上の調査潜水を行ってきた。4 自由度と 6 自由度の二本のマニピュレータを装備する [15]。

1.2.2 Remotely Operated Vehicle

有索で陸上や海上の支援母船などから電源の供給とロボットの操作を行うため、HOV のように間近では無いが、オペレータによるマニピュレーションが可能。ROV は HOV に比べてシステムを大幅に小型化することが可能であるため、一般に市販されている浅海域用の ROV も存在する。反対に、大深度まで対応する重 ROV と呼ばれるものまで、様々な形状・大きさの物が存在する。海底におけるサンプル採取や海底油田などの実際の作業現場に用いられているものあり、マニピュレータを搭載したロボットも多数存在する。

かいこう

ROV “ かいこう ” は海洋研究開発機構の開発した地球の最深部であるマリアナ海溝を調査することを目的として開発された、11,000m まで潜水可能なロボットである。しかし、2003 年 5 月に潜水調査中に接続ケーブルが事故により切れてしまい、ランチャー部を残して亡失してしまった [9]。Fig.1.7 はその亡失前の画像である。こういった事故を見ても、水中ロボットには様々な課題が残ることがわかる。

現在は UROV7000 という同機構の保有していた AUV を改装してランチャー部にとりつけ、7,000m まで潜行可能な “ かいこう 7000 ” として作り直された。6 自由度のマニピュレータを装備する。

ドルフィン 3K

1987 年に海洋研究開発機構が開発した ROV。3,300m までの潜水調査が可能。5 自由度と 7 自由度の二本のマニピュレータを持つ。

1997 年に沈没したナホトカ号の調査をはじめとして、様々な沈没船や事故機の捜索・発見を行ってきた、日本の ROV 運用の草分け的存在であった。2002 年に退役し、現在は海洋研究開発機構の整備場で一般向けに展示されている [16]。

Tiburon

1997 年に Monterey Bay Aquarium Research Institute で設計および建造が行われた ROV “ Tiburon ”。4,000m までの潜水が可能で、今までに 400 回以上の調査潜行を行っている。7 自由度のマニピュレータを持つ [17]。



French Research Institute for Exploitation of the Sea (<http://www.ifremer.fr/>)

Fig. 1.6: Nautil / Ifremer (フランス)



独立行政法人 海洋研究開発機構 (<http://www.jamstec.go.jp/>)

Fig. 1.7: かいこう / JAMSTEC (日本)

LEO, VEGA

広和株式会社が一般向けに販売する、浅水域用の ROV “LEO” と “VEGA”。非常に小型で軽量な点が特徴で、LEO は約 500m まで、VEGA は 150m までの潜水が可能。両 ROV ともに 3 自由度のマニピュレータが用意されている。[18]。

LBV300

アメリカの Seabotix 社の販売する小型 ROV。ライトやカメラ、マニピュレータなど様々なオプションが準備されており、種々のミッションに対応できる。深度は 300m に限定されるものの、重量が 14kg と非常に軽く、一人でオペレーションを行うことができる。1 自由度の小型マニピュレータを取り付けることが可能 [19]。

Panther Plus, Falcon

アメリカの Saab Seaeye 社が販売する中型の ROV。“Panther Plus” は 1,000m まで潜行可能で二本の油圧マニピュレータを装備する。“Falcon” は 300m まで潜水可能な小型の ROV で、3 自由度の小型マニピュレータを持つ [20]。

VICTOR6000

フランスの Ifremer が 2000 年に建造した ROV。5 自由度と 7 自由度のマニピュレータを持ち、6,000m まで潜水可能 [21]。

1.2.3 Autonomous Underwater Vehicle

水中では空中や宇宙とは違い、無線による通信距離が著しく制限される。そのため水中での遠隔操作は非常に難しく、無索の無人ロボットは自律的に動くことが要求される。AUV は活動時間の制限など ROV と反対の欠点を持つが、作業範囲が制限されないという非常に大きな利点を持つ。昨今の内蔵電源やコンピュータの技術向上により、実用化するための環境が整いつつある。

しかし、無索という最大の特徴がありながらロボットの自律化や稼働時間に課題が残り、マニピュレータを搭載したものはまだ少ない。

SAUVIM

SAUVIM はハワイ大学で研究中の AUV である。深度 6,000m まで潜行可能な AUV に水中用マニピュレータを搭載し、マニピュレータの自律化の研究を行っている [22]。

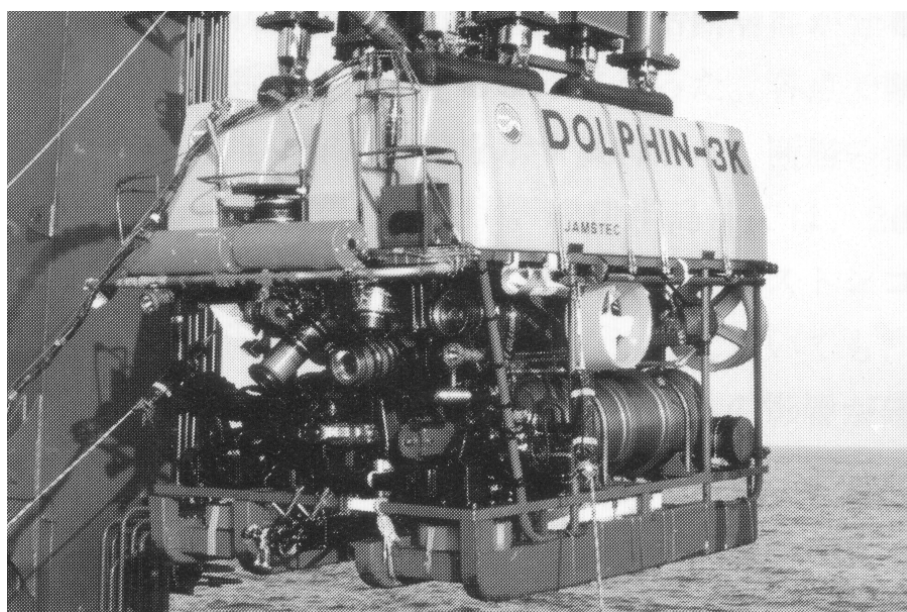
ALIVE

EU が援助している ALIVE プロジェクトチームが開発した AUV . フランスの Cybernetix 社を中心としてイギリス , イタリア , ノルウェーの大学や企業が参加している . 海底ステーションへの自律行動によるドッキングを目指している [23] .

1.2.4 水中用マニピュレータ

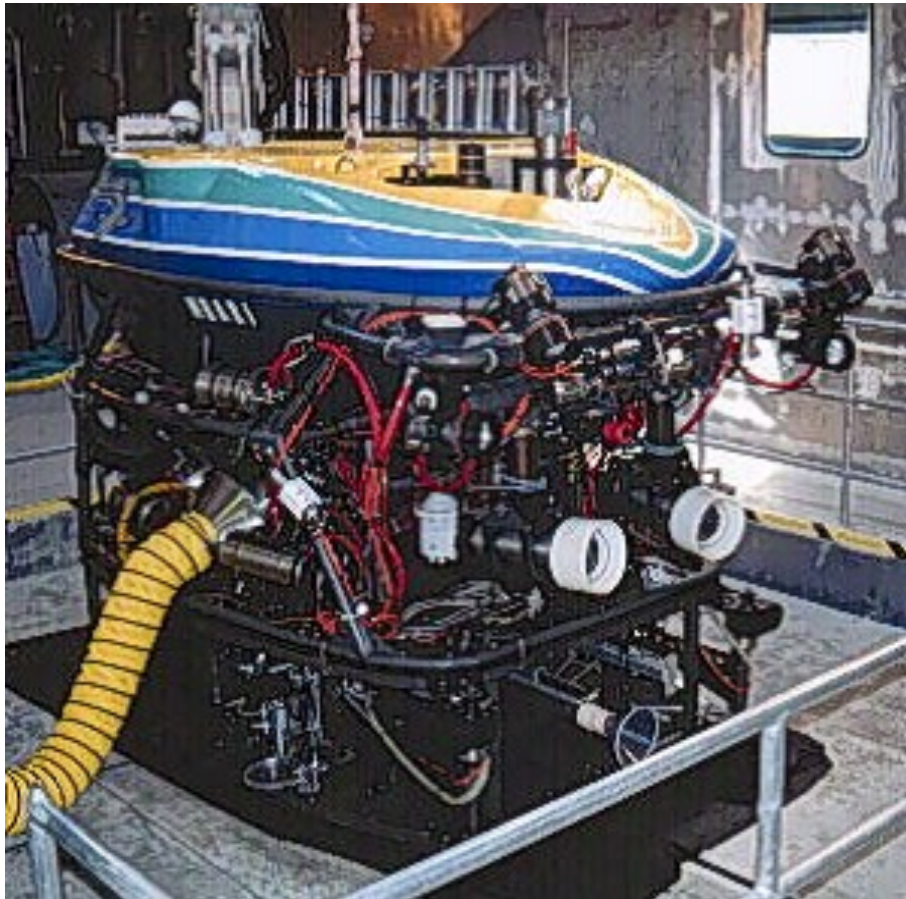
また , マニピュレータの自由度とロボットのサイズをグラフ化してみると Fig.1.16 に示すようになる . なおこの表において , 二つ以上のマニピュレータを持つロボットに関してはマニピュレータの自由度を合計してプロットした .

グラフを見ると , マニピュレータの自由度は重量とともに増大し , 小型ロボットの自由度は非常に少ない . これは , HOV や大深度対応の ROV はロボットが大型化するため慣性によってロボット本体が動きにくく , ロボットを動かさずにマニピュレータのみで対象を補足するような設計になっていると考えられる . 反対に小型のロボットは , 重量やサイズが運用性に関係してくるため , 重量がかさむ多自由度のマニピュレータが装備できない . そのため , 小型ロボットの利点である機動性を用いてマニピュレータの自由度を補っていると考えられる .



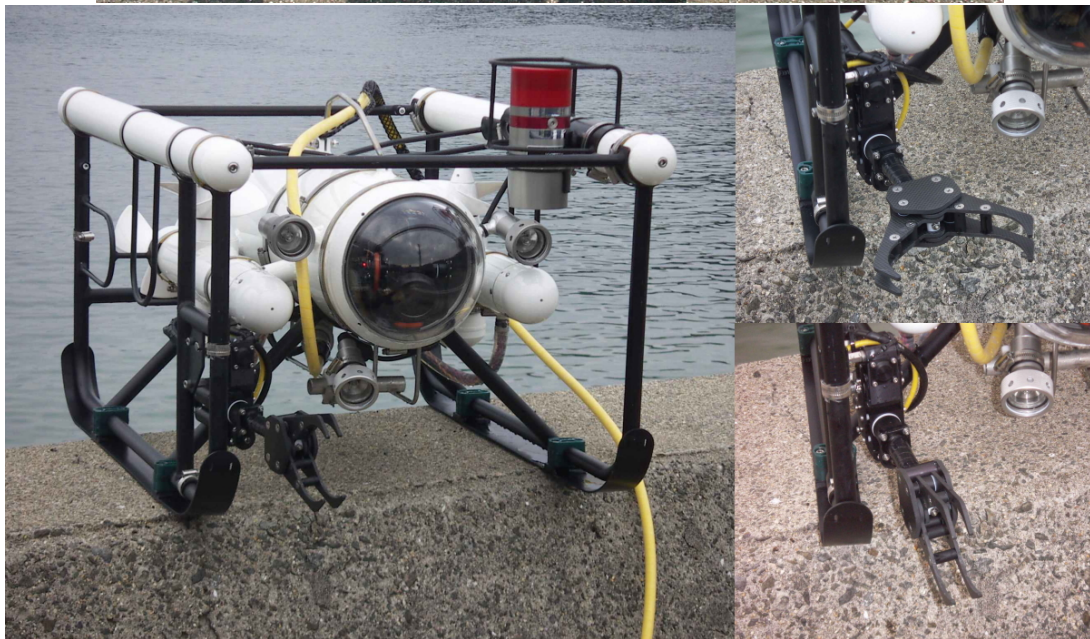
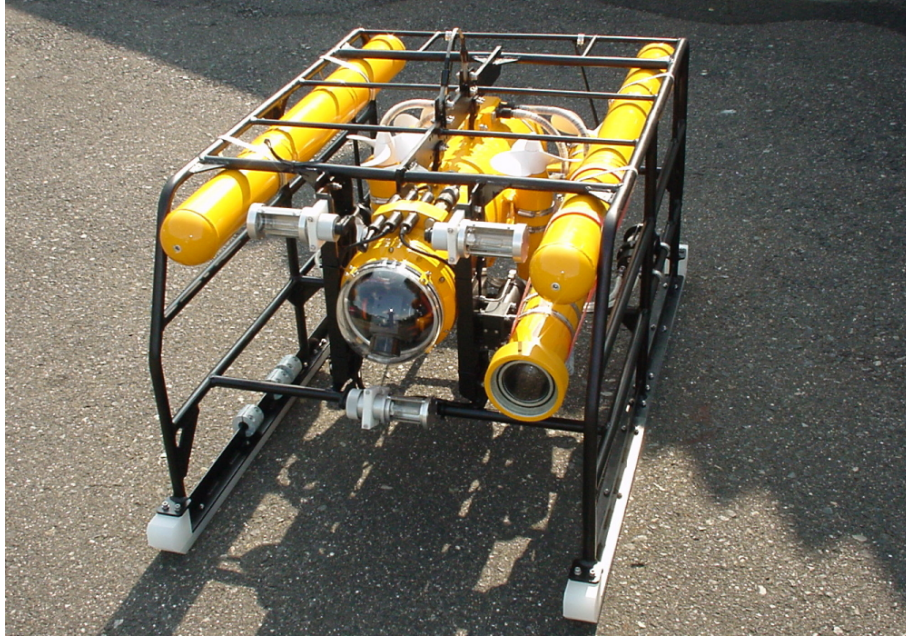
独立行政法人 海洋研究開発機構 (<http://www.jamstec.go.jp/>)

Fig. 1.8: ドルフィン 3K / JAMSTEC (日本)



Monterey Bay Aquarium Research Institute (<http://www.mbari.org/>)

Fig. 1.9: Tiburon / MBARI (アメリカ)



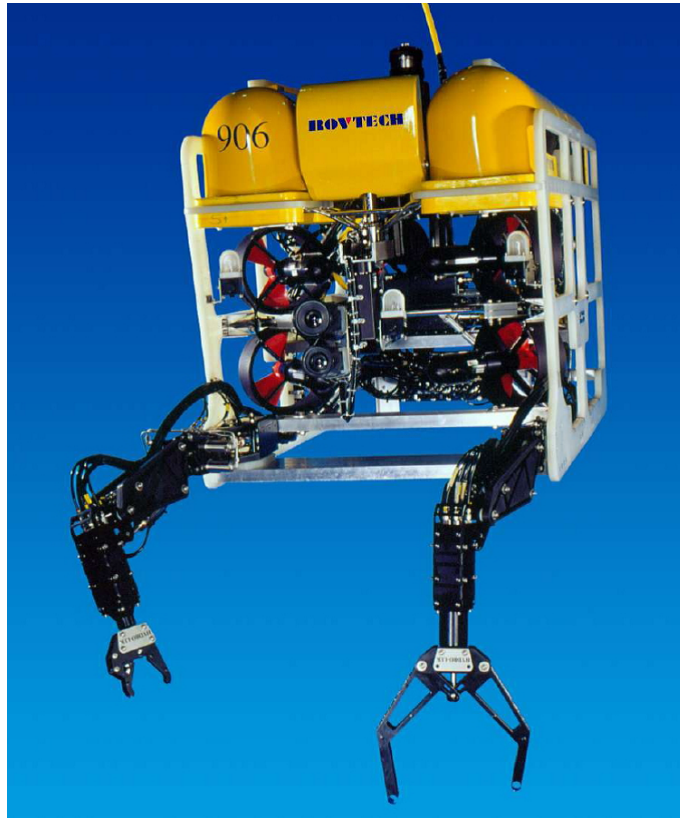
広和株式会社 (<http://www.kwk.co.jp/>)

Fig. 1.10: LEO (上) と VEGA (下) / 広和株式会社 (日本)



SEABOTIX Inc. (<http://www.seabotix.com/>)

Fig. 1.11: LBV300 / SEABOTIX (アメリカ)



Saab Seaeye Limited (<http://www.seaeye.com/>)

Fig. 1.12: Panther Plus (上) と Falcon (下) / Seaeye (アメリカ)



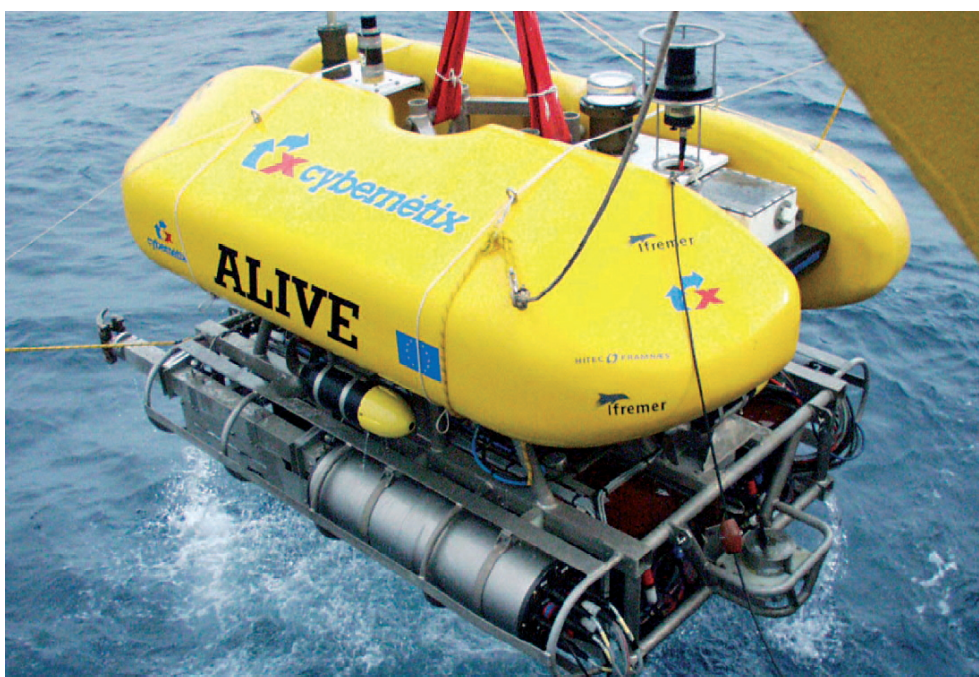
French Research Institute for Exploitation of the Sea (<http://www.ifremer.fr/>)

Fig. 1.13: VICTOR 6000 / Ifremer (フランス)



The University of Hawaii System (<http://www.hawaii.edu/>)

Fig. 1.14: SAUVIM / ハワイ大学 (アメリカ)



Cybernetix (<http://www.cybernetix.fr/>)

Fig. 1.15: ALIVE / The ALIVE project (EU)

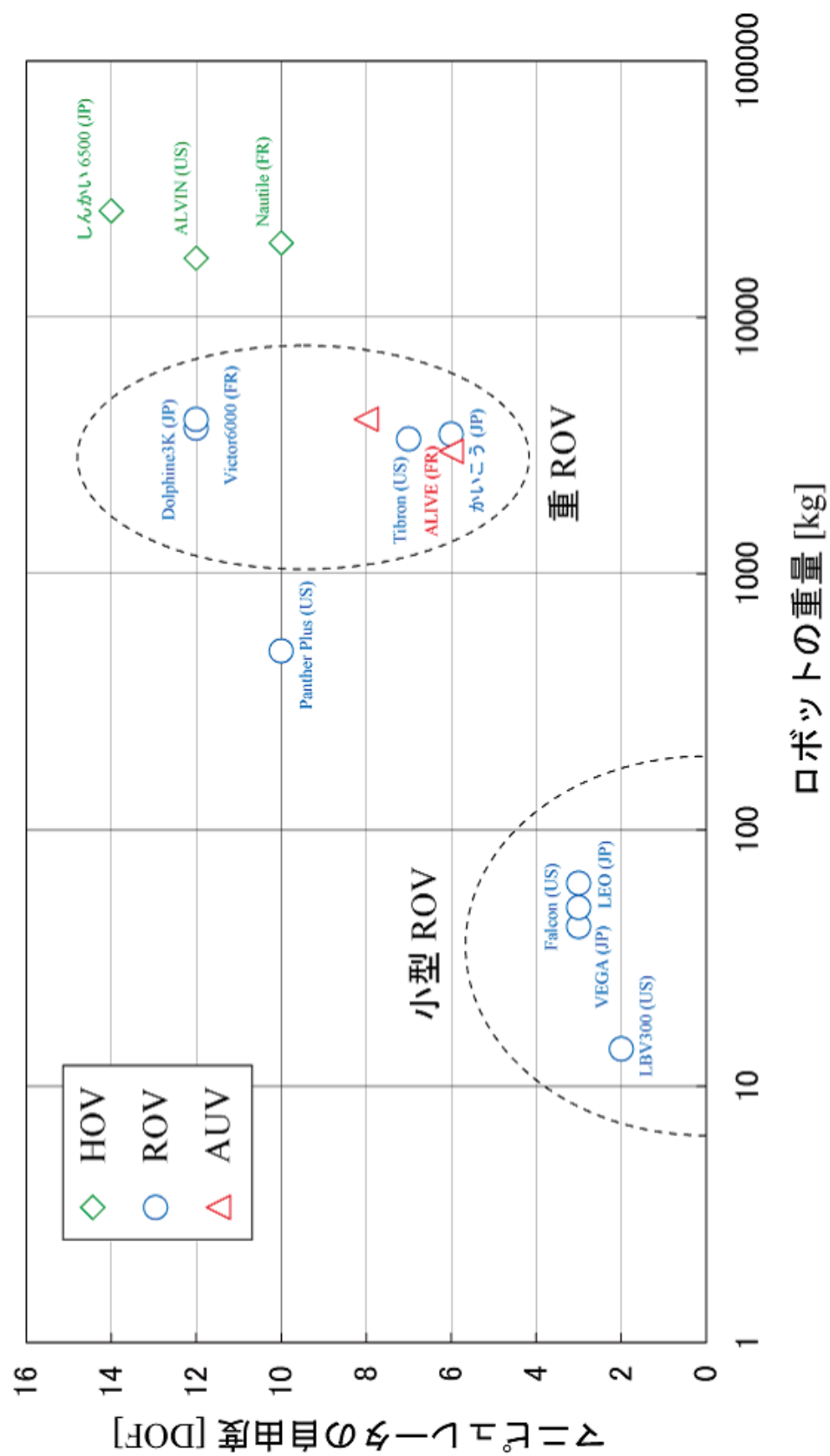


Fig. 1.16: 水中ロボットの重量とマニピュレータの自由度

1.3 モジュール型構造

文献 [8] によると、深海まで潜水が可能な水中ロボットである「しんかい 6500」・「かいこう」に関してもいくつかの技術課題があげられている。その中の一つに「マニピュレータやセンサのモジュール化を行い、ミッションに応じたマニピュレータの交換を容易にする」という課題がある。様々なミッションに対応するセンサやアクチュエータをモジュール化しておくことで、交換整備の手間を軽減し、運用の効率をあげようとする意図がある。

水中ロボットに限らず、ロボットにとってモジュール化は非常に重要な課題の一つであり、これは外部の追加装備に限らず、内部システムにも重要な課題である。

それでは、モジュール化とは具体的になにを指すのだろうか。文献 [24] によれば“モジュール化”とは“複雑なシステムをいくつかの単位（モジュール）に分け、それらをつなげて全体を構成するやり方”を指すと定義している。

システムのモジュール化を行うことで、以下の利点があげられる。

- 1) システムの一部をモジュール化すれば、モジュール内部の機能を入出力のみを考慮すればよい
- 2) 故障や整備の際に、取り付け・取り外し・取り扱いが容易になる
- 3) モジュール化されたシステムを用いることで、ロボットの設計・開発の時間を短縮できる
- 4) 複数のロボットでインターフェースを共通化することで、モジュールを多用途に用いることができる
- 5) モジュールの共通化ができれば大量生産が望めるため、コスト削減や予備の確保が容易になる

このようにロボットをモジュール化することは、システムの簡素化や故障時の対応しやすさにつながり、結果としてシステムの頑健性・信頼性・整備性・柔軟性などを向上させることになる。

ロボットのモジュール化の研究は、単なるハードウェアの構成に限らず、自律分散制御やロボットの再構成、自己組織化にも及んでいる [25]。以下にモジュール化に関する研究を紹介する。

M-TRAN

M-TRAN (Fig.1.17) 独立行政法人産業技術総合研究所と東京工業大学が共同で開発している自己再構成型モジュールロボットである。自己再構成とはモジュール同士の機械的結合を自ら変えて、全体の構造を変更することを指し、この M-TRAN は蛇型や歩行型などさまざまな形状に姿を変えて移動することができる。この機構は関節機構、バッテリーとマイクロコンピュータを内蔵したモジュール開発し、まったく同じモジュールを複数接続することにより実現している。つまりモジュールそれぞれが小さいロボットであり、互いに通信しながら行動している [26]。

マニピュレータの分散制御の研究

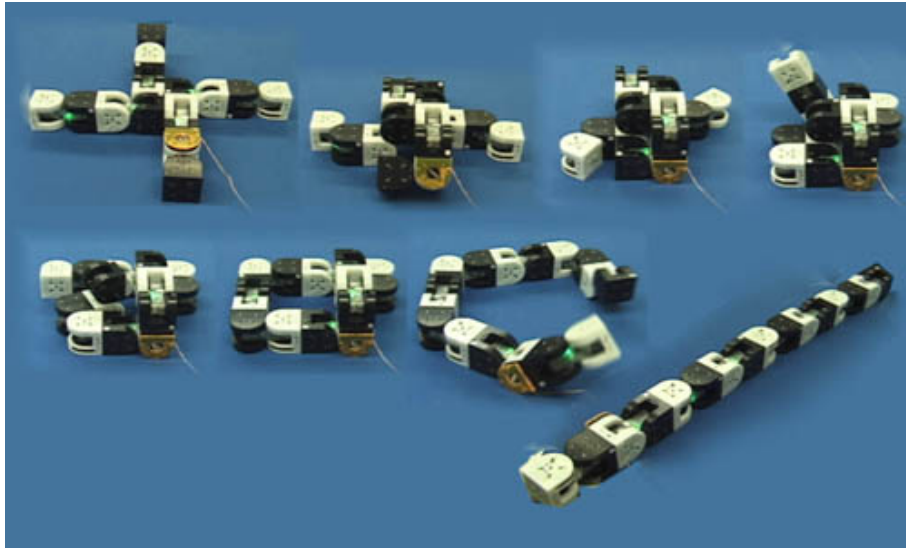
この研究は多関節マニピュレータの各関節を制御するシステムをモジュール化して、各関節モジュールに内臓する研究である [27] .

各関節のロボットモジュールを開発し、結合することでマニピュレータを実現しようと考えた場合、制御システムに関してもモジュール化された制御システム（著者らはコンポーネント型コントローラ (1.18) と呼んでいる）を結合するだけで、マニピュレータの制御が可能になるシステム開発を目指している．各関節のコンポーネント型コントローラは、接続された隣のリモジュールから指令と姿勢の情報を受け取り、自己の関節駆動のみを考慮して操作量を決めている．その際、リモジュールの関節駆動のみを考慮する局所的運動学を解くことで、マニピュレータの軌道制御・位置制御を実現している．

MUSASHI

ロボットによるサッカーコンペティション Robo-Cup[28] に参加しているチームの一つ，“ Hibikino-MUSASHI ”チームのロボット MUSASHI(Fig.1.19) はロボットの構成要素を全てモジュール化している [29] . このロボットは構成要素のモジュール化のみならず、リモジュール間の接続に関しても配線を用いない構造を採用しており、試合時の故障や整備時に、各リモジュールの交換をすばやく行うことができる．

以上のように、全てのロボットにとってモジュール化は非常に重要な課題である．水中ロボットに関しては、内部のシステム構造のみならず、調査目的に応じたセンサやアクチュエータの搭載を容易にする目的で、様々な水中機器単位でのモジュール化も行うべきだと考えられる．



M-TRAN (http://unit.aist.go.jp/is/dsysd/mtran3/J_index.htm)

Fig. 1.17: M-TRAN / 独立行政法人産業技術総合研究所，東京工業大学

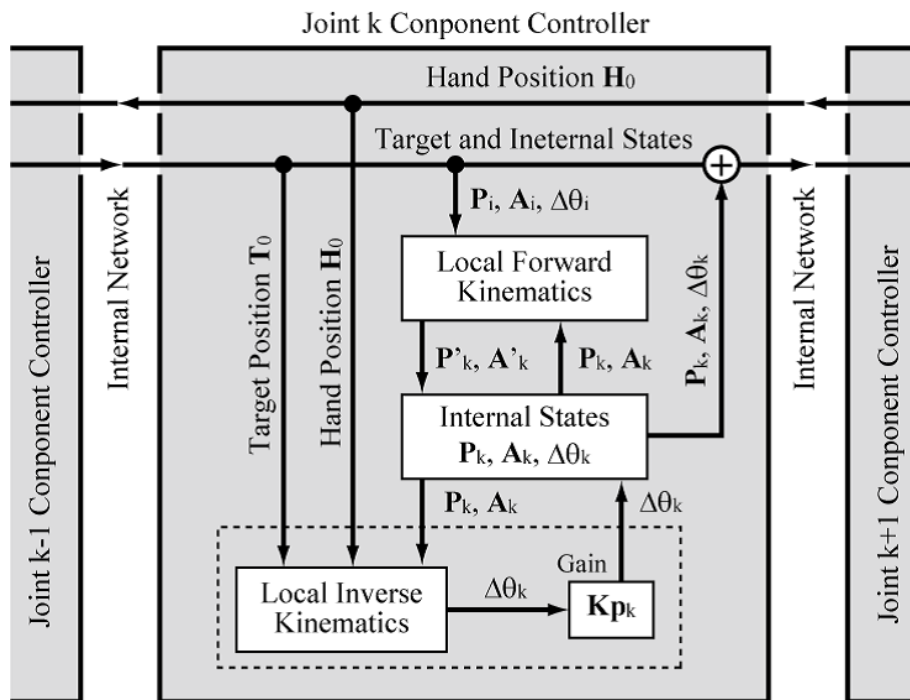


Fig. 1.18: コンポーネント型コントローラ



Hibikino MUSASHI (<http://robocup.ksrp.or.jp/hibikino-musashi/>)

Fig. 1.19: MUSASHI / 北九州学術推進機構

1.4 本論文の目的

本研究は将来の大規模な海洋開発を想定し、そのために必要な高機能の水中ロボットの実現を目指し、マニピュレータを搭載した AUV の実現を目標とする。水中用マニピュレータを開発し、Fig.1.20 に示す AUV”Twin-Burger[32]”に搭載して目標を実現する。

水中用マニピュレータの開発は目標は2自由度のマニピュレータとした。これはFig.1.16で示したように、将来開発されるであろう水中ロボットにおいて、小型の水中ロボットにおいてはマニピュレータの自由度の少なさを機動性で補う可能性が高いためである。本研究ではさらに、手先位置制御の精度を高める目的で動的可操作性による姿勢の決定を提案し、適用する。

また、マニピュレータを含むシステムを構築するにあたり、前述したようなモジュール構造を採用した。モジュール構造を採用することで、システム全体の整備性や配線接続などの信頼性を向上させることが主目的である。

“モジュール”に関しては決定的な定義は無く誤解を招く恐れがあるため、本稿で使用する“モジュール”あるいは“モジュール構造”という言葉を用いるように定義しておく。

- ある機能を持った、独立したサブシステムの単位
- 周囲との接続を簡易化し、取外しが容易な構造を持つ
- 配線が露出しない構造をとる

また、上記の“モジュール”構造を実現することを“モジュール化”すると表現している。

以上の開発目標を達成することにより、マニピュレータを搭載した AUV の実現を目指す。

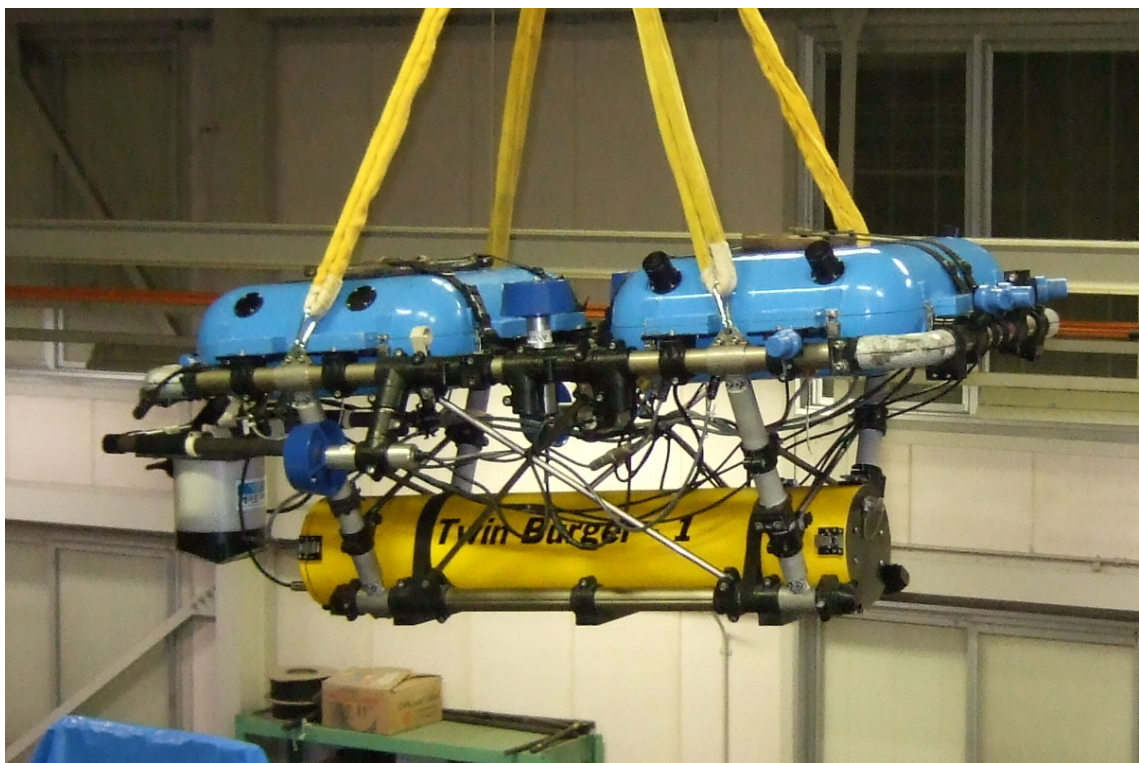


Fig. 1.20: 自律型水中ロボット”Twin-Burger”

1.5 本論文の内容

本稿では、第一章において、水中ロボットの海洋開発に対する必要性を述べ、水中ロボットの開発をする際に、将来的に重要となるであろう“ マニピュレータ ”と“ モジュール構造 ”の二点に関して最近の研究や動向をまとめた。またそれぞれの問題対し、本研究で実現する具体的内容に関して述べた。

第二章では水中用マニピュレータの開発に必要な設計パラメータを求めるために行った動作シミュレーションに関して述べる。開発するロボットシミュレーションモデルを構築し、分解加速度制御則を用いて行った制御シミュレーション結果よりマニピュレータに必要な関節速度と軸出力トルクを算出する。また、手先位置の補償性能を高めるために、動的可操作性を用いて手先位置制御の精度を高める手法を提案し、シミュレーションにおいてその検証を行う。

第三章では水中ロボットの設計及び製作について述べる。まず、第二章で算出した設計パラメータを基に水中用マニピュレータの開発を行う。開発に際しては防水機構にマグネットカップリング機構を採用し、防水性能を高める。また、“ Twin-Burger ”の制御システムは、提案したモジュール化手法を用いて効率的にモジュール化を行い、設計・開発を行う。

第四章では第三章で作成したロボットとマニピュレータに対して行った動作試験に関して述べる。マニピュレータに関しては、マニピュレータのみを動作させて、シミュレーション結果と比較する。“ Twin-Burger ”本体は強制揺動試験を行い、動特性パラメータの推定を行う。

第五章では第四章までの開発と実験の結果を踏まえて、開発したロボットの性能に関して考察する。また、開発したロボットの将来性と展望に関して述べて、結論とする。

第2章

水中ロボットの動作シミュレーション

第2章 水中ロボットの動作シミュレーション

最初に，水中ロボットの動作シミュレーションを行った．本研究で開発するロボットのシミュレーションモデルを作成し，力学的な関係式を導出する．次いで，制御系を組み込んで動作シミュレーションを行い，水中ロボットに必要な力やトルクを推定した．

2.1 水中ロボットの力学

2.1.1 ロボットのモデリング

シミュレーションに用いたモデルの座標系及び主な変数をしたロボットを Fig. 2.1 に示す [33]．また，モデリングを行うにあたり以下の仮定を設定した．

- 1) ロボットを構成する要素はすべて剛体とする．
- 2) ロボットは水面に水平な二次元平面内で運動し，鉛直方向への運動は行わない．
- 3) 静止流体中で運動する．

本論文で使用する主な記号を以下に示す．

- Σ_U : 慣性座標系
- Σ_i : 関節 i を原点としてリンクに固定した座標系 ($i = 0, 1, 2$)
- ${}^A R_B$: Σ_B から Σ_A への座標変換行列
- \mathbf{x}_0 : Σ_U におけるベースの位置・姿勢ベクトル
- l_i : 各リンクの長さ
- \mathbf{x}_E : Σ_U における手先の位置ベクトル
- \mathbf{p}_i : Σ_U における関節 i の位置ベクトル
- \mathbf{v}_i : Σ_i における関節 i の速度ベクトル
- θ_i : 関節 i の関節角度
- ϕ_i : Σ_i における関節 i の角度ベクトル
- $\boldsymbol{\omega}_i$: Σ_i における関節 i の角速度ベクトル
- $\boldsymbol{\phi}$: ロボット全体の関節角度ベクトル ($= [\theta_1 \ \theta_2]^T$)
- m_i : リンク i の質量
- M_{ai} : リンク i の各軸方向の付加質量行列
- I_i : リンク i の各軸方向の慣性モーメント行列
- I_{ai} : リンク i の各軸方向の付加慣性モーメント行列
- $\hat{\mathbf{x}}_i$: Σ_i における関節 i から関節 $(i+1)$ までの位置ベクトル
- $\hat{\mathbf{a}}_i$: Σ_i における関節 i からリンク i の重心までの位置ベクトル
- E : 単位行列

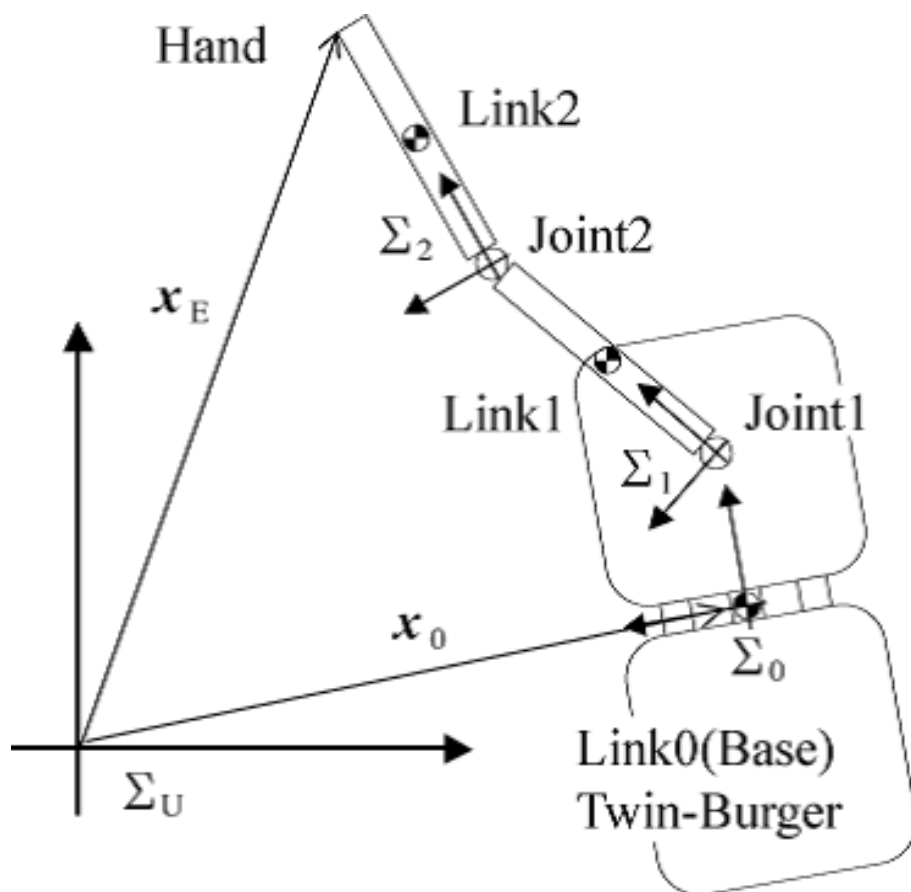


Fig. 2.1: 2 リンクマニピュレータを装備した Twin-Burger のシミュレーションモデル

2.1.2 運動学関係式

使用するロボットモデルの位置・姿勢の幾何学的な関係について以下に述べる．ロボット本体側から順に各関節の位置・姿勢を順に，以下のように計算していく [34]．

$$\mathbf{p}_i = {}^U\mathbf{R}_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{p}_{i-1} \quad (2.1)$$

$$\phi_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \phi_{i-1} \quad (2.2)$$

ただし，

$${}^i\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} C_{ij} & S_{ij} & 0 \\ -S_{ij} & C_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S_{ij} = \sin\left(\sum_{k=i+1}^j \theta_k\right)$$

$$C_{ij} = \cos\left(\sum_{k=i+1}^j \theta_k\right)$$

最終的に手先位置を導出し，時間微分してまとめると以下のように変形できる．

$$\dot{\mathbf{x}}_E = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}\dot{\phi}. \quad (2.3)$$

ここで各項は以下のようになる．

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & A_{13} \\ 0 & 1 & A_{23} \end{bmatrix}, & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}, \\ A_{13} &= -l_0 S_0 + B_{11}, & A_{23} &= l_0 C_0 + B_{21}, \\ B_{11} &= -l_1 S_{01} + B_{12}, & B_{12} &= -l_2 S_{02}, \\ B_{21} &= l_1 C_{01} + B_{22}, & B_{22} &= l_2 C_{02}, \\ S_i &= \sin \theta_i, & C_i &= \cos \theta_i, \\ S_{ij} &= \sin\left(\sum_{k=i}^j \theta_k\right), & C_{ij} &= \cos\left(\sum_{k=i}^j \theta_k\right) \end{aligned}$$

2.1.3 運動量方程式

水中で運動するロボットには常に流体力が影響するため，運動量が保存されない．そこで，運動量の時間変化が外力と等価と考え，運動量方程式を導出する．ロボット全体の水

平方向の運動量を η , ロボット全体の回転方向の運動量を μ とすると ,

$$\begin{aligned}\eta &= \begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 & 0 \end{bmatrix}^T \\ &= \sum_{i=0}^2 [{}^U R_i (m_i \mathbf{E} + \mathbf{M}_{ai}) \dot{\mathbf{a}}_i] \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}\mu &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mu_3 \end{bmatrix}^T \\ &= \sum_{i=0}^2 {}^U R_i (\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_{ai}) \boldsymbol{\omega}_i \\ &\quad + \sum_{i=0}^2 \mathbf{p}_i \times [{}^U R_i (m_i \mathbf{E} + \mathbf{M}_{ai}) \dot{\mathbf{a}}_i] \end{aligned} \quad (2.5)$$

ただし , $\dot{\mathbf{a}}_i = \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{a}}_i$ である .

式 (2.4) , (2.5) をまとめると

$$\begin{aligned}\mathbf{s} &= \begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 & \mu_3 \end{bmatrix}^T \\ &= \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D} \dot{\boldsymbol{\phi}}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで ,

$$\begin{aligned}\mathbf{C} &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} M_{14} & M_{15} \\ M_{24} & M_{25} \\ M_{34} & M_{35} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

となる . ここで , $\mathbf{C} \in R^{3 \times 3}$ と $\mathbf{D} \in R^{3 \times 2}$ はそれぞれベースの姿勢角とおよび各関節角度 , 付加質量と付加慣性モーメントを含む行列であり , M_{ij} は次節の M_{ij} と同じである .

2.1.4 流体力

物体が流体中で運動するとき , その物体は周囲の流体により反力をうける [35],[36] . 本項では , モデル化したロボットに加わる流体力を導出する .

・マニピュレータに加わる流体力

マニピュレータを円柱型と近似し , 各流体力を導出する . 付加質量・付加慣性モーメントは主に物体の形状に影響され , 代表的な形状の物体に対する付加質量・付加慣性モーメントの値は文献 [35] に示されている値を用いて導出した .

流体抗力項は以下の式で導出できる [36] .

$$\mathbf{f}_{di} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} |\mathbf{w}_i| \mathbf{w}_i d\hat{\mathbf{x}}_i, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{t}_{di} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} \hat{\mathbf{x}}_i \times |\mathbf{w}_i| \mathbf{w}_i d\hat{\mathbf{x}}_i \quad (i = 1, 2) \quad (2.8)$$

ただし, $\mathbf{w}_i = \dot{\mathbf{p}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{x}}_i$ であり, ρ , C_{Di} , D_i はそれぞれ流体密度, 抗力係数, リンク幅を示す.

・ AUV に加わる流体力

ロボット本体である Twin-Burger はオープンフレーム構造を採用しており複雑な形状をしているため, 厳密解の導出は難しい. そのため実験により近似したパラメータを運動方程式に用いる [32].

$$M_x \ddot{x}_0 + C_x \dot{x}_0 |\dot{x}_0| = F_x \quad (2.9)$$

$$M_y \ddot{y}_0 + C_y \dot{y}_0 |\dot{y}_0| = F_y \quad (2.10)$$

$$M_z \ddot{\phi}_0 + C_z \dot{\phi}_0 |\dot{\phi}_0| = T_z \quad (2.11)$$

ここで M は付加質量を含んだ質量, C は流体力による減衰係数, F 及び T はスラストによって与えられる x , y 方向の推進力または z 軸周りのトルクを表す.

2.1.5 運動方程式

ここでは, Fig. 2.1 に示したモデルの運動方程式をニュートン・オイラー法により求める.

(1) まず関節 i の位置, 速度, 加速度を求め, リンク i の回転速度, 回転加速度をリンク 0 からリンク 2 に向かって計算し, 各リンク i が上の運動をするために, 質量中心に加えられる力 $\tilde{\mathbf{f}}_i$ とモーメント $\tilde{\mathbf{n}}_i$ を計算する.

(2) 次に回帰的にリンク 2 からリンク 0 に向かって力とトルクの相互作用と関節アクチュエータ・トルクを計算していく.

・ リンク 0

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \ddot{\phi}_0(t) \mathbf{e}_0 \quad (2.12)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_0 = \ddot{\mathbf{a}}_0 = {}^U \mathbf{R}_0^T \ddot{\mathbf{x}}_0 \quad (2.13)$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_0 = (m_0 \mathbf{E} + \mathbf{M}_{a0}) \ddot{\mathbf{a}}_0 \quad (2.14)$$

$$\tilde{\mathbf{n}}_0 = (\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_{a0}) \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \quad (2.15)$$

・リンク i ($i = 1, 2$)

$$\dot{\omega}_i = {}^{i-1}R_i^T \dot{\omega}_{i-1} + \ddot{\phi}_i e_i \quad (2.16)$$

$$\dot{v}_i = {}^{i-1}R_i^T [\dot{\omega}_{i-1} \times \hat{x}_{i-1} + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times \hat{x}_{i-1}) + \dot{x}_{i-1}] \quad (2.17)$$

$$\ddot{a}_i = \dot{\omega}_i \times \hat{a}_i + \omega_i \times (\omega_i \times \hat{a}_i) + \dot{x}_i \quad (2.18)$$

$$\tilde{f}_i = (m_i E + M_{ai}) \ddot{a}_i \quad (2.19)$$

$$\tilde{n}_i = (I_i + I_{ai}) \dot{\omega}_i \quad (2.20)$$

・リンク 2

$$f_2 = \tilde{f}_2 + f_{d2} + f_{g2} \quad (2.21)$$

$$n_2 = \tilde{n}_2 + \hat{a}_2 \times \tilde{f}_2 + t_{d2} + t_{g2} \quad (2.22)$$

・リンク 1

$$f_1 = {}^i R_2 f_2 + \tilde{f}_i + f_{d1} + f_{g1} \quad (2.23)$$

$$n_1 = {}^1 R_2 n_2 + \tilde{n}_1 + \hat{a}_1 \times \tilde{f}_1 + \hat{x}_1 \times {}^1 R_2 f_2 + t_{d1} + t_{g1} \quad (2.24)$$

・ベース (リンク 0)

$$f_0 = {}^0 R_1 f_1 + \tilde{f}_0 + f_{d0} + f_{g0} \quad (2.25)$$

$$n_0 = {}^0 R_1 n_1 + \tilde{n}_0 + \hat{x}_0 \times {}^0 R_1 f_1 + t_{d0} + t_{g0} \quad (2.26)$$

ただし, e_i はリンク座標系 Σ_i において関節 i の関節軸方向を示すベクトルであり, 本論文では水平面内で駆動する 2 リンクを想定しているため, 関節方向はすべて Z 軸方向であるため $e_i = [0 \ 0 \ 1]^T$ となる.

また, \ddot{a}_i はリンク座標系 Σ_i におけるリンク重心の加速度ベクトルを示している.

ロボット本体に流体抗力および重力・浮力以外の外力は働かないとし, ベースに作用する力はスラストがベースに与える力と等しく, 各関節に作用するトルクはアクチュエータの駆動トルクに等しいことを考慮して, 式 (2.7) ~ (2.8) および式 (2.12) ~ (2.20) を式 (2.21) ~ (2.26) に代入してまとめると水中ロボットの運動方程式は次式で与えられる.

$$M(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) + f_D = \tau, \quad (2.27)$$

$$q = [x_0 \ y_0 \ \phi_0 \ \phi_1 \ \phi_2]^T$$

ここで, $M(q) \in R^{5 \times 5}$ は付加質量及び付加慣性モーメントを含んだ行列, $b(q, \dot{q}) \in R^{5 \times 1}$ は遠心力項及びコリオリ力項, $f_D \in R^{5 \times 1}$ は流体抗力項, そして $\tau \in R^{5 \times 1}$ はスラストと関節軸で発生する推力と関節トルクである. ここで各行列は,

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}(\mathbf{q}) &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} \end{bmatrix} \\
\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \begin{bmatrix} bq_{11} & bq_{12} & bq_{13} & bq_{14} & bq_{15} & bq_{16} \\ bq_{21} & bq_{22} & bq_{23} & bq_{24} & bq_{25} & bq_{26} \\ bq_{31} & bq_{32} & bq_{33} & bq_{34} & bq_{35} & bq_{36} \\ bq_{41} & bq_{42} & bq_{43} & bq_{44} & bq_{45} & bq_{46} \\ bq_{51} & bq_{52} & bq_{53} & bq_{54} & bq_{55} & bq_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_0^2 \\ \dot{\phi}_1^2 \\ \dot{\phi}_2^2 \\ \dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_2\dot{\phi}_0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{f}_D &= [f_{D1} \ f_{D2} \ f_{D3} \ f_{D4} \ f_{D5}]^T \\
\boldsymbol{\tau} &= [f_x \ f_y \ \tau_0 \ \tau_1 \ \tau_2]^T
\end{aligned}$$

であり，各要素は以下ようになる．

$$\begin{aligned}
M_{11} &= M_{2x}C_{02}^2 + M_{2y}S_{02}^2 + M_{1x}C_{01}^2 + M_{1y}S_{01}^2 + M_{0x}C_0^2 + M_{0y}S_0^2 \\
M_{12} &= M_{2x}S_{02}C_{02} - M_{2y}S_{02}C_{02} + M_{1x}S_{01}C_{01} - M_{1y}S_{01}C_{01} + M_{0x}S_0C_0 - M_{0y}S_0C_0 \\
M_{13} &= M_{2x}C_{02}(S_{12}l_0 + S_2l_1) - M_{2y}S_{02}(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) \\
&\quad + M_{1x}C_{01}(S_1l_0) - M_{1y}S_{01}(C_1l_0 + a_1) \\
M_{14} &= M_{2x}C_{02}(S_2l_1) - M_{2y}S_{02}(C_2l_1 + a_2) - M_{1y}S_{01}a_1 \\
M_{15} &= -M_{2y}S_{02}a_2 \\
M_{21} &= M_{12} \\
M_{22} &= M_{2x}S_{02}^2 + M_{2y}C_{02}^2 + M_{1x}S_{01}^2 + M_{1y}C_{01}^2 + M_{0x}S_0^2 + M_{0y}C_0^2 \\
M_{23} &= M_{2x}S_{02}(S_{12}l_0 + S_2l_1) + M_{2y}C_{02}(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) \\
&\quad + M_{1x}S_{01}(S_1l_0) + M_{1y}C_{01}(C_1l_0 + a_1) \\
M_{24} &= M_{2x}S_{02}(S_2l_1) + M_{2y}C_{02}(C_2l_1 + a_2) \\
M_{25} &= M_{2y}C_{02}a_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{51} &= -M_{2y}S_{02}a_2 \\
M_{52} &= M_{2y}C_{02}a_2 \\
M_{53} &= (I_2 + I_{a2}) + M_{2y}a_2(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) \\
M_{54} &= (I_2 + I_{a2}) + M_{2y}a_2(C_2l_1 + a_2) \\
M_{55} &= (I_2 + I_{a2}) + M_{2y}a_2^2 \\
M_{41} &= M_{51} + M_{2x}C_{02}(S_2l_1) - M_{2y}S_{02}(C_2l_1) - M_{1y}S_{01}a_1 \\
M_{42} &= M_{52} + M_{2x}S_{02}(S_2l_1) + M_{2y}C_{02}(C_2l_1) + M_{1y}C_{01}a_1 \\
M_{43} &= M_{53} + (I_1 + I_{a1}) \\
&\quad + M_{2x}(S_2l_1)(S_{12}l_0 + S_2l_1) + M_{2y}(C_2l_1)(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) \\
&\quad + M_{1y}a_1(C_1l_0 + a_1) \\
M_{44} &= M_{54} + (I_1 + I_{a1}) + M_{2x}(S_2l_1)^2 + M_{2y}(C_2l_1)(C_2l_1 + a_2) \\
&\quad + M_{1y}a_1^2 \\
M_{45} &= M_{55} + M_{2y}(C_2l_1)a_2 \\
M_{31} &= M_{41} + M_{2x}C_{02}(S_{12}l_0) - M_{2y}S_{02}(C_{12}l_0) + M_{1x}C_{01}(S_1l_0) - M_{1y}S_{01}(C_1l_0) \\
M_{32} &= M_{42} + M_{2x}S_{02}(S_{12}l_0) + M_{2y}C_{02}(C_{12}l_0) + M_{1x}S_{01}(S_1l_0) + M_{1y}C_{01}(C_1l_0) \\
M_{33} &= M_{43} + (I_0 + I_{a0}) \\
&\quad + M_{2x}(S_{12}l_0)(S_{12}l_0 + S_2l_1) + M_{2y}(C_{12}l_0)(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) \\
&\quad + M_{1x}(S_1l_0)^2 + M_{1y}(C_1l_0)(C_1l_0 + a_1) \\
M_{34} &= M_{44} + M_{2x}(S_{12}l_0)(S_2l_1) + M_{2y}(C_{12}l_0)(C_2l_1 + a_2) + M_{1y}(C_1l_0)a_1 \\
M_{35} &= M_{45} + M_{2y}(C_{12}l_0)a_2 \\
bq_{11} &= -M_{2x}C_{02}(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) - M_{2y}S_{02}(S_{12}l_0 + S_2l_1) \\
&\quad - M_{1x}C_{01}(C_1l_0 + a_1) - M_{1y}S_{01}(S_1l_0) - M_{0x}C_0a_0 \\
bq_{12} &= -M_{2x}C_{02}(C_2l_1 + a_2) - M_{2y}S_{02}(S_2l_1) - M_{1x}C_{01}a_1 \\
bq_{13} &= -M_{2x}C_{02}a_2 \\
bq_{14} &= 2bq_{12} \\
bq_{15} &= 2bq_{13} \\
bq_{16} &= bq_{15} \\
\\
bq_{21} &= -M_{2x}S_{02}(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_{02}(S_{12}l_0 + S_2l_1) \\
&\quad - M_{1x}S_{01}(C_1l_0 + a_1) + M_{1y}C_{01}(S_1l_0) - M_{0x}S_0a_0 \\
bq_{22} &= -M_{2x}S_{02}(C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_{02}(S_2l_1) - M_{1x}S_{01}a_1 \\
bq_{23} &= -M_{2x}S_{02}a_2 \\
bq_{24} &= 2bq_{22} \\
bq_{25} &= 2bq_{23} \\
bq_{26} &= bq_{25}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
bq_{51} &= M_{2y}a_2(S_{12}l_0 + S_2l_1) \\
bq_{52} &= M_{2y}a_2(S_2l_1) \\
bq_{53} &= 0 \\
bq_{54} &= 2bq_{52} \\
bq_{55} &= 2bq_{53} \\
bq_{56} &= bq_{55} \\
bq_{41} &= bq_{51} - M_{2x}S_2l_1(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_2l_1(S_{12}l_0 + S_2l_1) + M_{1y}a_1(S_1l_0) \\
bq_{42} &= bq_{52} - M_{2x}S_2l_1(C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_2l_1(S_2l_1) \\
bq_{43} &= bq_{53} - M_{2x}S_2l_1a_2 \\
bq_{44} &= bq_{55} + 2(bq_{42} - bq_{52}) \\
bq_{45} &= bq_{56} + 2(bq_{43} - bq_{53}) \\
bq_{46} &= bq_{45} \\
bq_{31} &= bq_{41} - M_{2x}S_{12}l_0(C_{12}l_0 + C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_{12}l_0(S_{12}l_0 + S_2l_1) \\
&\quad - M_{1x}S_1l_0(C_1l_0 + a_1) + M_{1y}C_1l_0(S_1l_0) \\
bq_{32} &= bq_{42} - M_{2x}S_{12}l_0(C_2l_1 + a_2) + M_{2y}C_{12}l_0(S_2l_1) - M_{1x}S_1l_0a_1 \\
bq_{33} &= bq_{43} - M_{2x}S_{12}l_0a_2 \\
bq_{34} &= bq_{45} + 2(bq_{32} - bq_{42}) \\
bq_{35} &= bq_{46} + 2(bq_{33} - bq_{43}) \\
bq_{36} &= bq_{35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{D1} &= f_{d2x}C_{02} - f_{d2y}S_{02} + f_{d1x}C_{01} - f_{d1y}S_{01} + f_{d0x}C_0 - f_{d0y}S_0 \\
f_{D2} &= f_{d2x}S_{02} + f_{d2y}C_{02} + f_{d1x}S_{01} + f_{d1y}C_{01} + f_{d0x}S_0 + f_{d0y}C_0 \\
f_{D3} &= l_0(f_{d2x}S_{12} + f_{d2y}C_{12} + f_{d1x}S_1 + f_{d1y}C_1) + l_1(f_{d2x}S_2 + f_{d2y}C_2) + t_{d0} + t_{d1} + t_{d2} \\
f_{D4} &= l_1(f_{d2x}S_2 + f_{d2y}C_2) + t_{d1} + t_{d2} \\
f_{D5} &= t_{d2}
\end{aligned}$$

ただし, M_{ix} , M_{iy} は x , y 方向の付加質量を含んだ各リンクの質量, I_i は付加慣性モーメントを含んだ各リンクの慣性モーメント, a_i は各リンクの関節位置から重心までの長さを示す.

2.2 経路計画

本項ではロボットの経路計画に関して述べる

2.2.1 動的可操作性

水中ロボットは浮遊ロボットであり、周囲の流体から常に影響を受けている．この二つの大きな特徴のために、高精度な位置制御を行うことは難しい．そのため、手先が目標位置に到達した後、外力に対して最も手先を動かしやすい姿勢となる経路計画を行う．

マニピュレータは姿勢によって手先の動かしやすさが変化する．これを可操作性と呼び、マニピュレータの性能を評価する指標の一つである．流体力という外力がかかり、土台が固定されていない浮遊型ロボットである水中ロボットにおいては、この可操作性を直接適用することはできない．そのため、流体力を考慮した動的可操作性が提案されており [37][38]、これを用いてマニピュレータの姿勢を決定する．Fig. 2.2 に動的可操作性の概念図を示す．

まず、運動学関係式 (2.3) を微分してまとめると次式を得る．

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{x}_E \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_E \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{A} & \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.28)$$

このとき、上式を運動方程式 (2.27) に代入して整理すると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} M(q)^{-1} \tilde{\tau} \quad (2.29)$$

ただし、 $\tilde{\tau}$ は以下の式で示される．

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} &= \tau - b(q, \dot{q}) - f_D \\ &+ M(q) \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{A} & \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.30)$$

これは手先位置と関節トルクを関係付ける式であり、マニピュレータがある姿勢をとったとき実現できる加速度を導出できる．このとき、手先位置が実現可能な加速度の集合を求めると Fig. 2.2 のように楕円体となり、動的可操作性楕円体と呼ばれる．この楕円体の大きさが手先を動かしやすさを表現するため、この楕円体の面積が最大となる姿勢が外乱に対する補償性能が最も高い姿勢であるといえる [39]．

2.2.2 動的可操作性楕円体の変化

前項で導出した動的可操作性は、周囲の環境やマニピュレータの姿勢などによってその楕円形状が変化する．本稿では、この動的可操作性楕円体の変化に関してシミュレーションを行う．

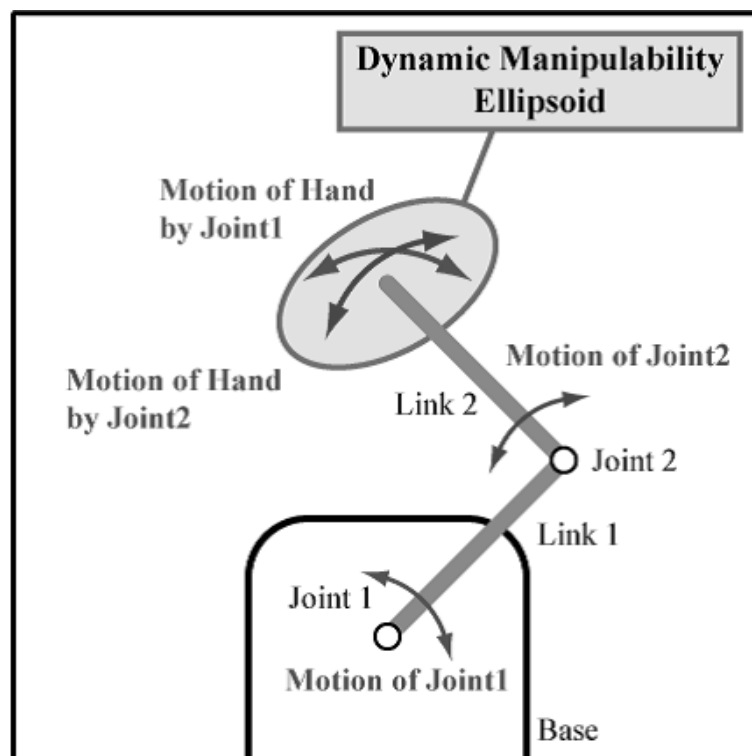


Fig. 2.2: 動的可操作性楕円体の概念図

マニピュレータの姿勢による変化

マニピュレータの姿勢ごとの動的可操作性楕円体の面積を比較する．マニピュレータの姿勢を変化させた場合の，それぞれの姿勢に対する動的可操作性楕円体を Fig. 2.3 に示す．

ロボットの正面に手先がある場合，マニピュレータの姿勢と動的可操作性楕円体の面積を調べると，Fig.2.4 に示すようになる．図からもわかるように，マニピュレータの姿勢は 45 度付近が一番良い結果が出ている．これは関節 2 が 90 度になっているためで，それぞれの関節の動作が直行した方向に作用するためである．

周囲の流体による変化

マニピュレータの姿勢を固定した状態において，周囲の流体が流れている場合の動的可操作性楕円体の変化を比較する． $\phi_1 = 45 \text{ deg}$, $\phi_2 = -90 \text{ deg}$ の場合において，x 軸方向からの流速を与えてシミュレーションを行った．そのときの結果を Fig. 2.5 に示す．

このときの流速に対する楕円の面積の変化を Fig. 2.6 に，楕円中心の変化を Fig. 2.7 にそれぞれ示す．

これらの結果から，動的可操作性楕円体は周囲の流体との相対速度がある場合にも，その形状はほとんど変わらない．しかし，流速によってその楕円体の位置が変化することがわかる．

外乱に対する補償

動的可操作性楕円体の面積が最大となるマニピュレータの姿勢に対して外乱を与え，手先位置の補償性能を比較した．Table 2.1 に示した 3 組のマニピュレータの姿勢を用いて比較を行った．それぞれの姿勢における動的可操作性楕円体の形状を Fig. 2.8 に示す．

このうち，No.2 で示された関節角度の組み合わせが動的可操作性楕円体の面積が最大になる姿勢である．それぞれの姿勢に対し，Fig. 2.9 に示した外乱を x 軸，y 軸方向にそれぞれ与え，x 軸方向の外乱に対するロボットの手先位置の二乗誤差推移を Fig. 2.10 に，y 軸方向の外乱に対する二乗誤差推移を Fig. 2.11 にそれぞれ示す．

以上より，動的可操作性が最大となる，No.2 で示された関節角度の姿勢は，他の二つの姿勢に比べて各方向の外乱に対して安定した補償性能を持つことが分かる．

2.2.3 経路計画

動的可操作性を用いた経路設定のアルゴリズムを以下に示す．

- (1)：手先の目標位置を設定
- (2)：動的可操作性を考慮してマニピュレータの姿勢を決定
- (3)：(2) を実現するベースの位置・姿勢を決定
- (4)：現在位置から最終姿勢までの直線軌道を生成
- (5)：(4) で生成した軌道から目標加速度を導出

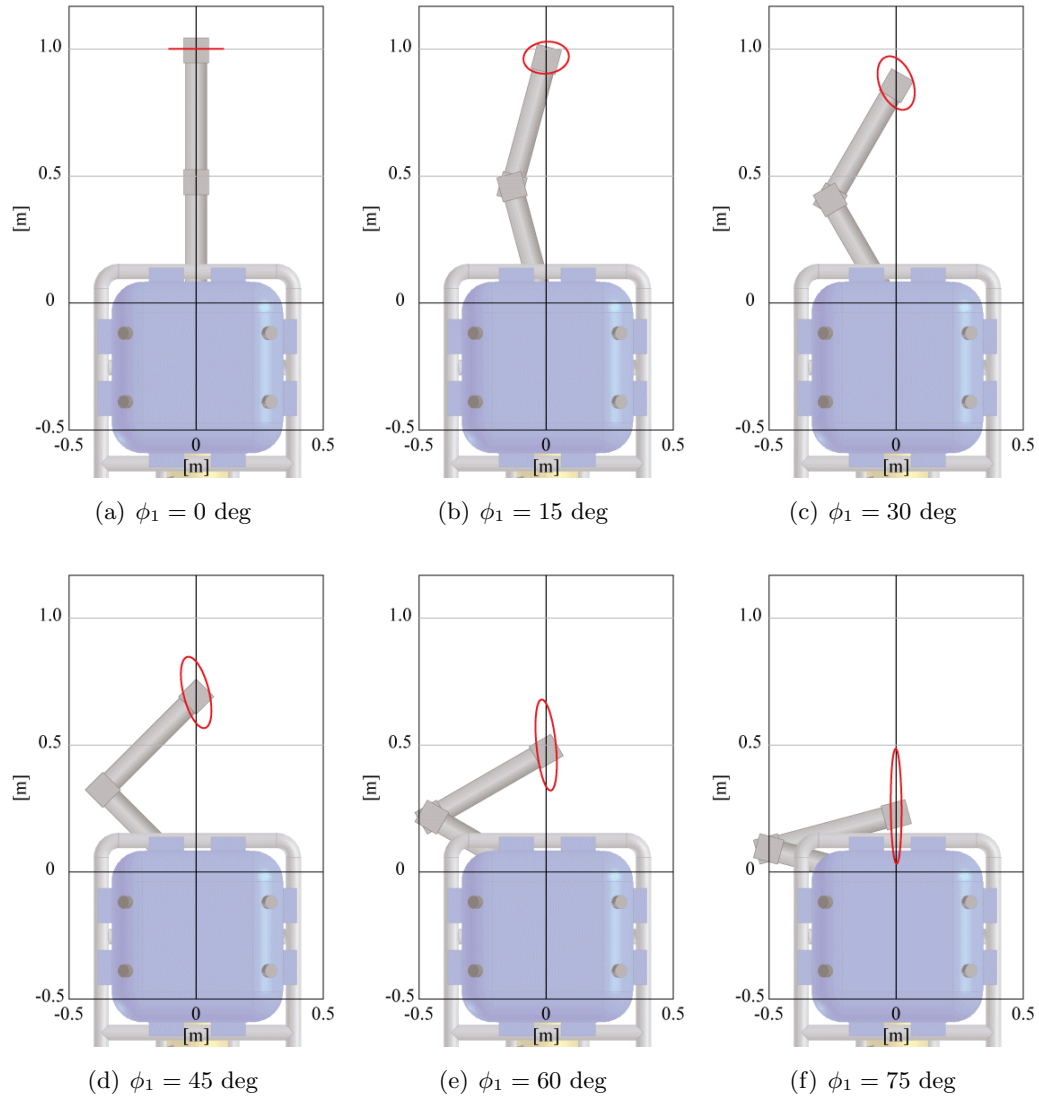


Fig. 2.3: 各姿勢における動的可操作性能楕円体の面積推移

Table 2.1: マニピュレータの関節角度の組み合わせ

Simulation Number	No. 1	No. 2	No. 3
Angle of Joint 0 [deg]	0	0	0
Angle of Joint 1 [deg]	30	48.3	60
Angle of Joint 2 [deg]	60	96.6	120

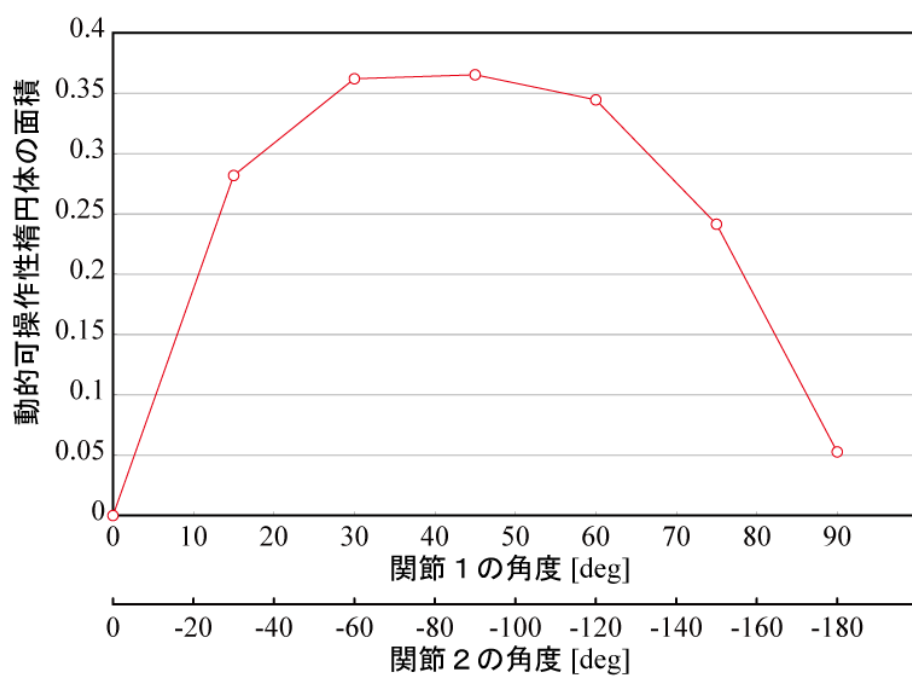


Fig. 2.4: 各姿勢における動的可操作性能楕円体の面積推移

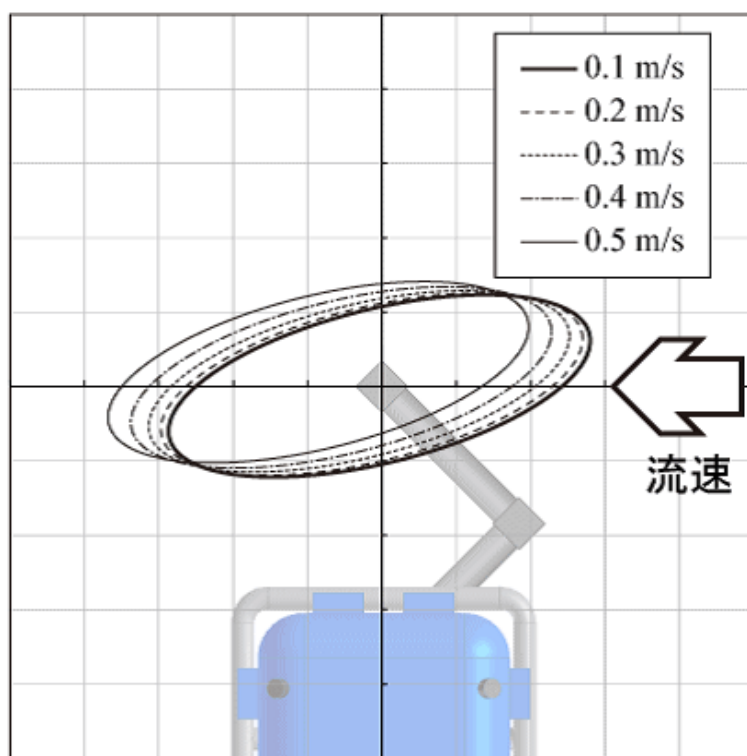


Fig. 2.5: 各流速における動的可操作性能楕円体

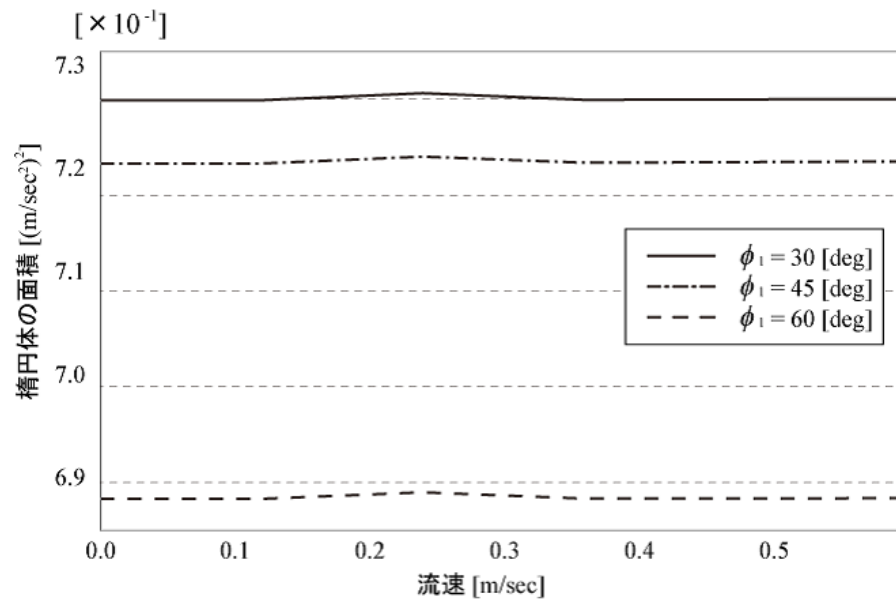


Fig. 2.6: 各流速における動的可操作性楕円体の面積推移

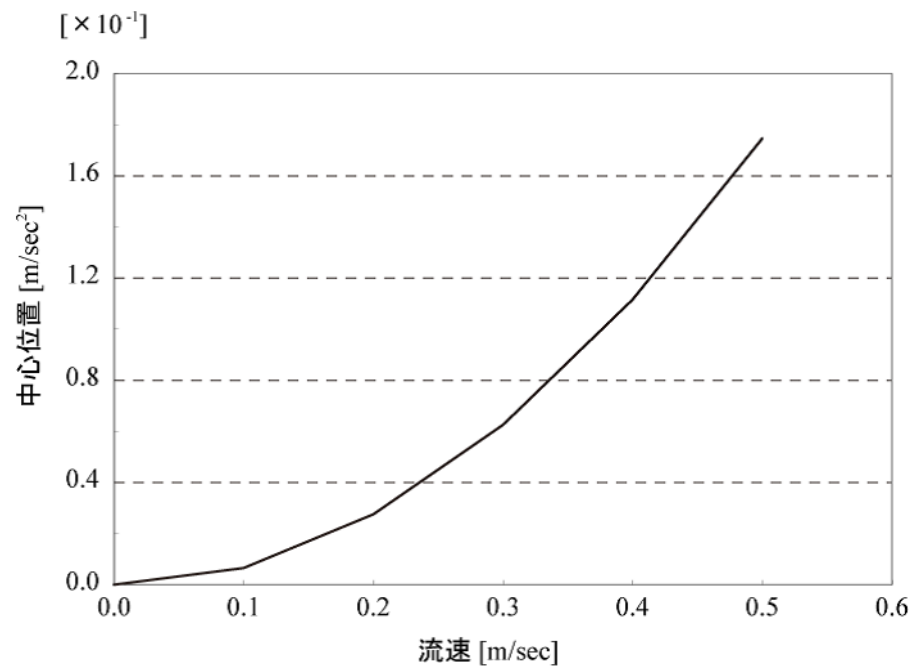


Fig. 2.7: 各流速における動的可操作性楕円体の中心の変位

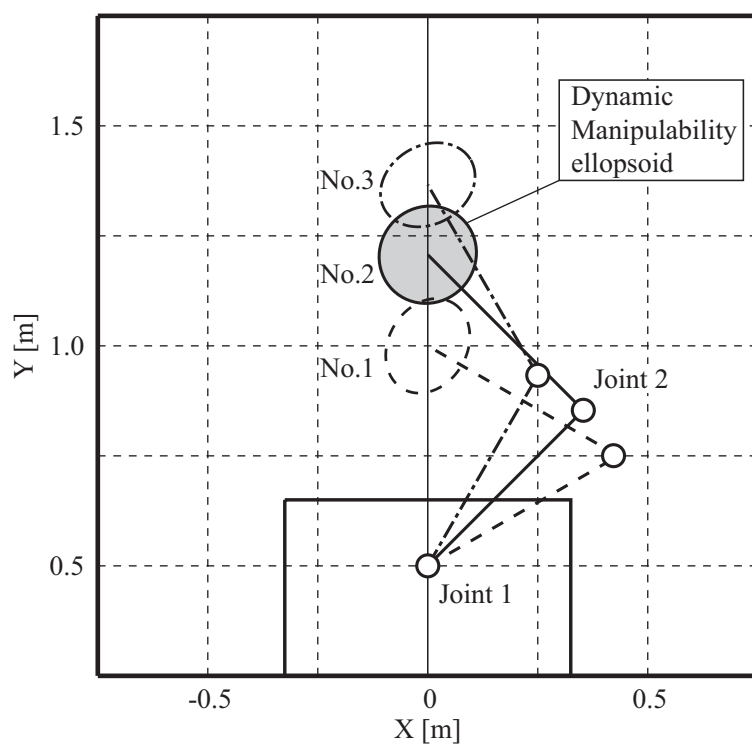


Fig. 2.8: 各姿勢における動的可操作性楕円体

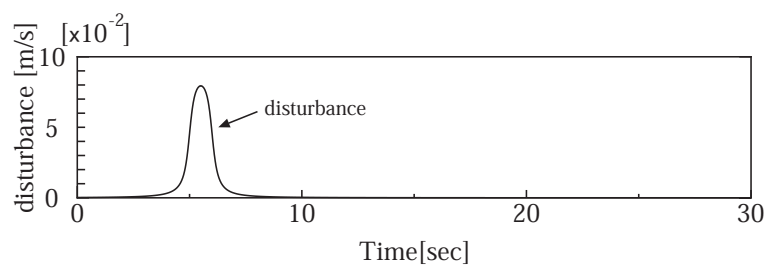
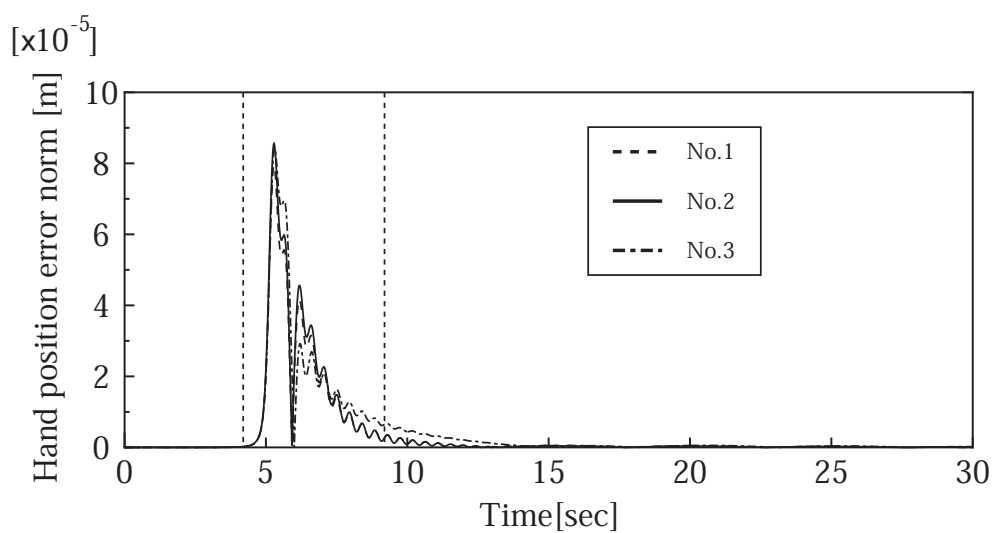
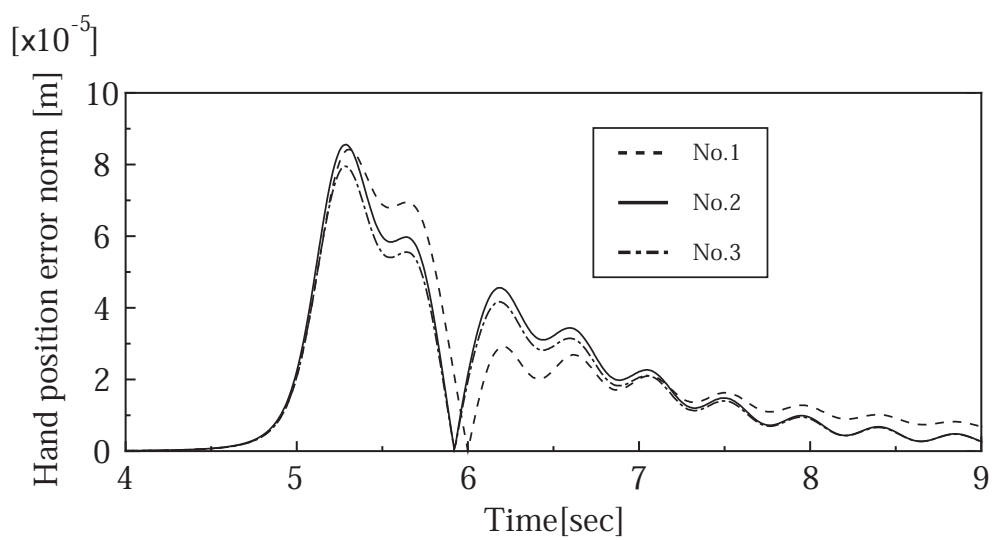


Fig. 2.9: 水中ロボットに与える外乱

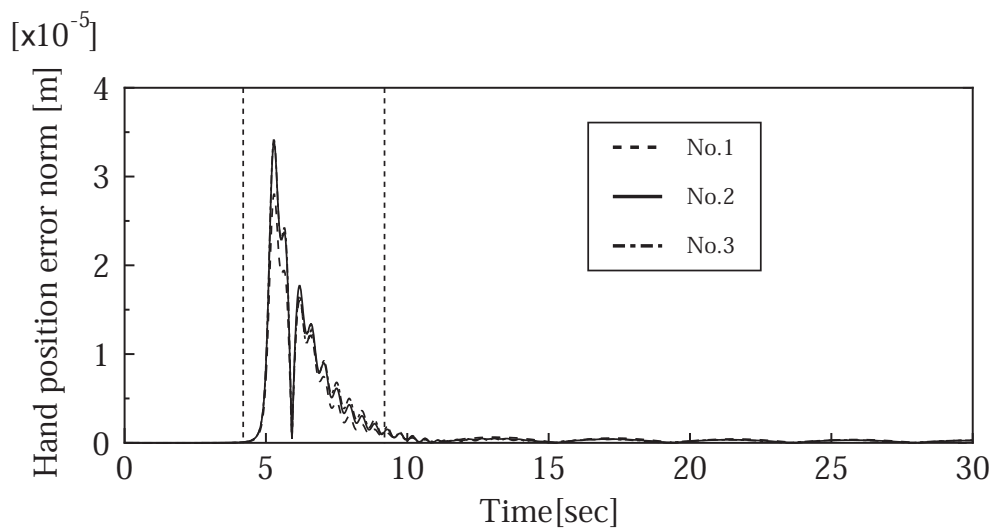


(a) 手先の位置誤差

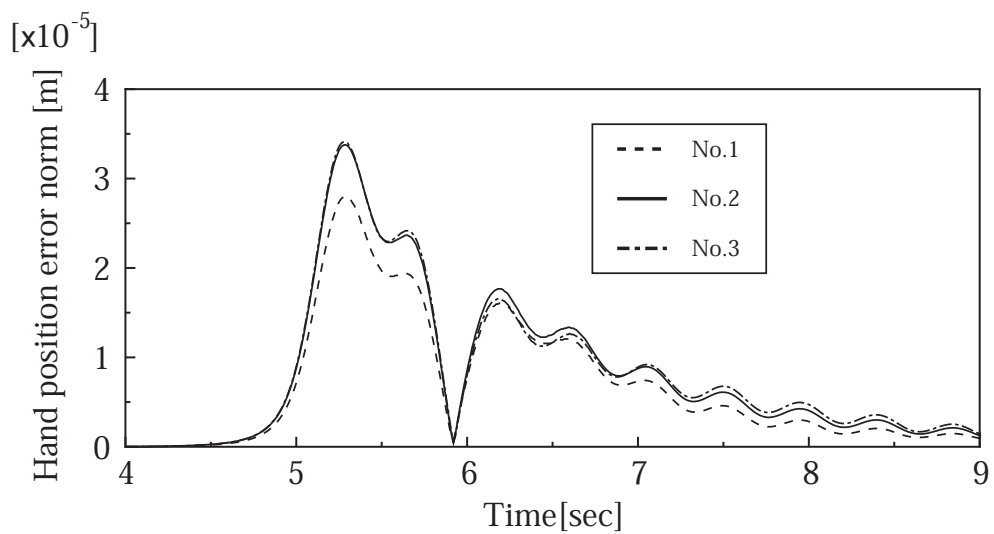


(b) 図 (a) の拡大

Fig. 2.10: X 軸方向の外乱に対する位置誤差



(a) 手先の位置誤差



(b) 図 (a) の拡大

Fig. 2.11: Y 軸方向の外乱に対する位置誤差

2.3 手先位置制御シミュレーション

以上のようにロボットのモデルを用いて，動作シミュレーションを行った．

2.3.1 制御則の導出

式 (2.3)，式 (2.6) を微分してまとめると，手先位置及びベースの位置・姿勢と各関節角度及びベースの位置・姿勢を関係づける分解加速度制御則が得られる [34][40]．

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C + E & D \\ A & B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

ただし，

$$\begin{aligned} z_1 &= \ddot{x}_0 + f_{ext} - (\dot{C}\dot{x}_0 + \dot{D}\dot{\phi}) \\ z_2 &= \ddot{x}_E - (\dot{A}\dot{x}_0 + \dot{B}\dot{\phi}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

であり， f_{ext} はスラストによる力と水の抵抗を含めたロボットに働くすべての外力を示す．さらに実際のシステムにはモデル化誤差が残るため，式 (2.32) の \ddot{x}_0 , \ddot{x}_E を次式の位置，速度フィードバック項を付加した修正目標加速度 \ddot{x}_0^* , \ddot{x}_E^* に置き換える [42]．

$$\ddot{x}_0^* = \ddot{x}_{0d} + K_{Bv}(\dot{x}_{0d} - \dot{x}_0) + K_{Bp}(x_{0d} - x_0) \quad (2.33)$$

$$\ddot{x}_E^* = \ddot{x}_{Ed} + K_{Ev}(\dot{x}_{Ed} - \dot{x}_E) + K_{Ep}(x_{Ed} - x_E) \quad (2.34)$$

ただし，

x_{0d}	ベースの目標位置・姿勢ベクトル
K_{Bv}, K_{Bp}	ベースのフィードバックゲイン
x_{Ed}	手先の目標位置ベクトル
K_{Ev}, K_{Ep}	手先のフィードバックゲイン

である．

2.3.2 手先位置制御シミュレーション

導出した制御則と経路計画法を用いて手先位置制御のシミュレーションを行った．シミュレーションで使用した各パラメータを Table 2.2 に，ロボットに与えた初期位置と目標を Fig. 2.12 と Table 2.3 に示す．

シミュレーションにおいてロボットがアルゴリズムにより算出したベースの移動，回転角度と手先の移動の目標パターンをそれぞれ Fig. 2.13, Fig. 2.14, Fig. 2.15 に示す．

Fig. 2.16 に全体の動作経路を，Fig. 2.20 に手先の位置誤差を，Fig. 2.21 にベースの位置誤差を，Fig. 2.22 にベースの姿勢誤差をそれぞれ示す．

以上のように，モデル化したロボットに対して，導出した制御則を用いて手先位置の制御を実現した．

さらに，このときの各関節の角速度とトルクを Fig. 2.23 と Fig. 2.25 にそれぞれ示す．

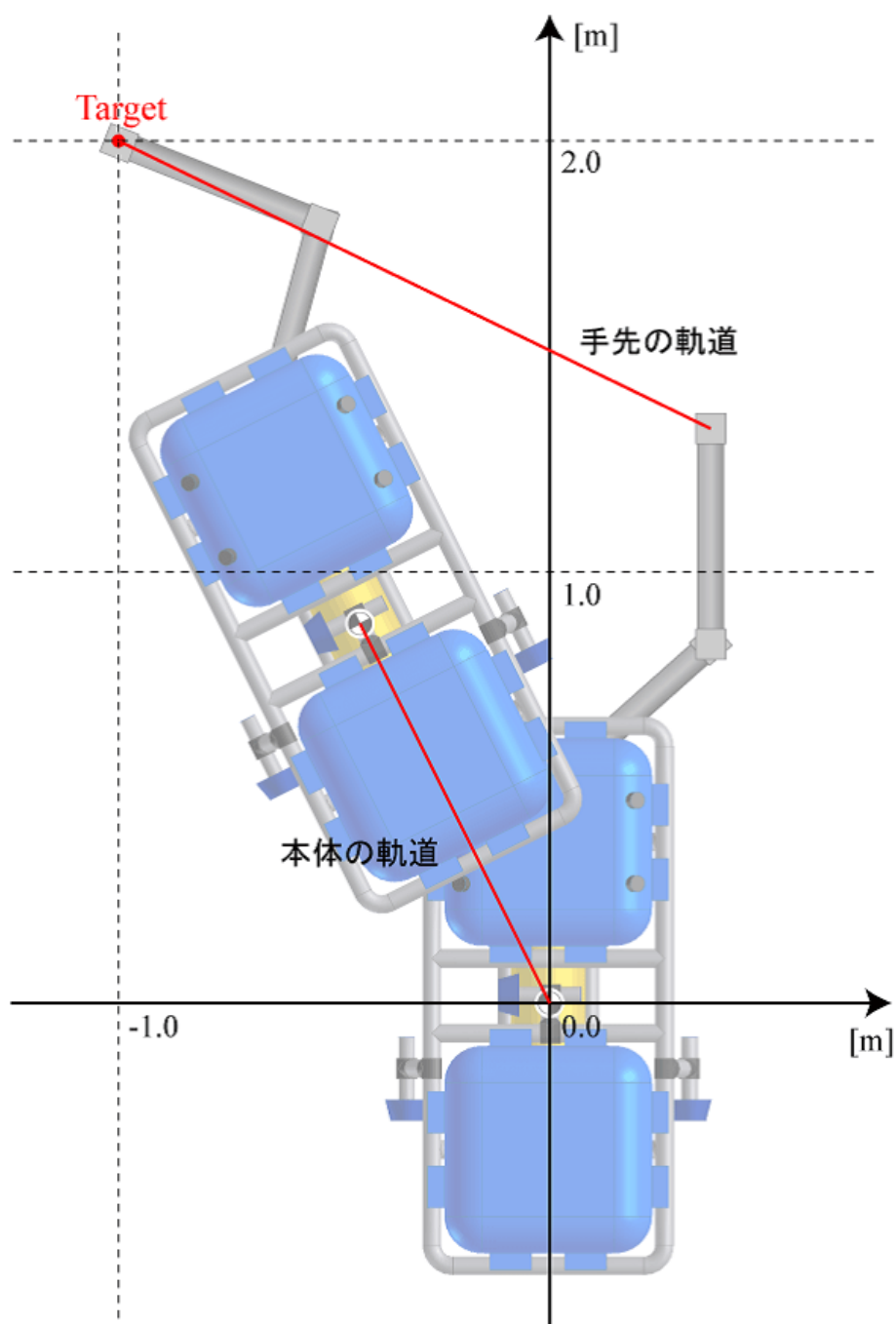
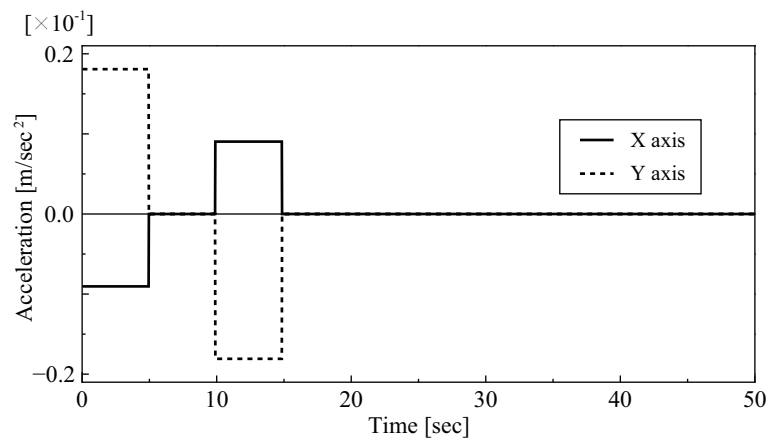
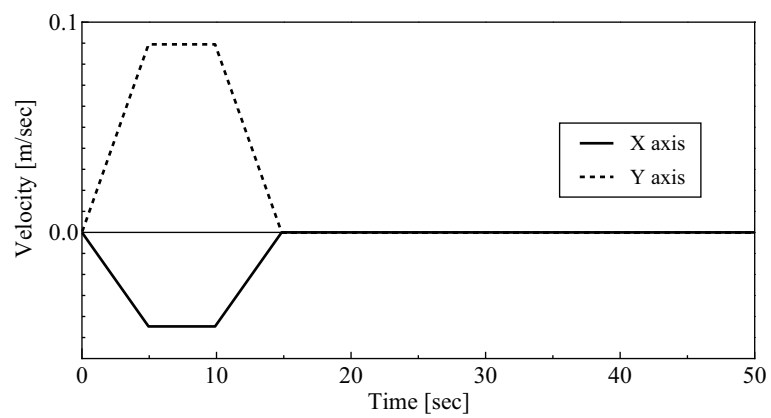


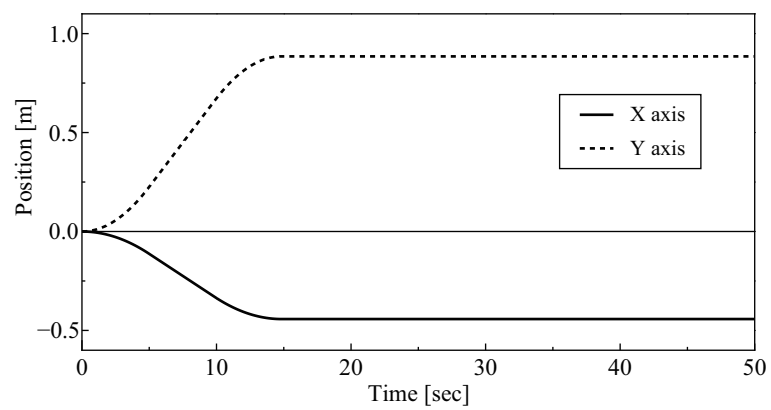
Fig. 2.12: ロボットの初期姿勢と手先の目標位置



(a) acceleration

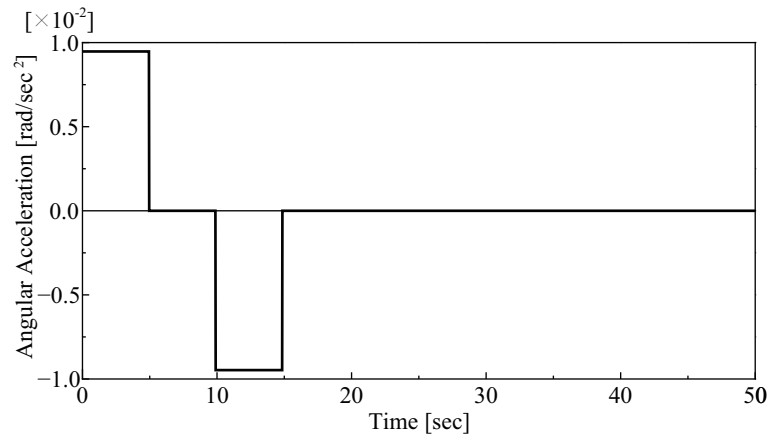


(b) velocity

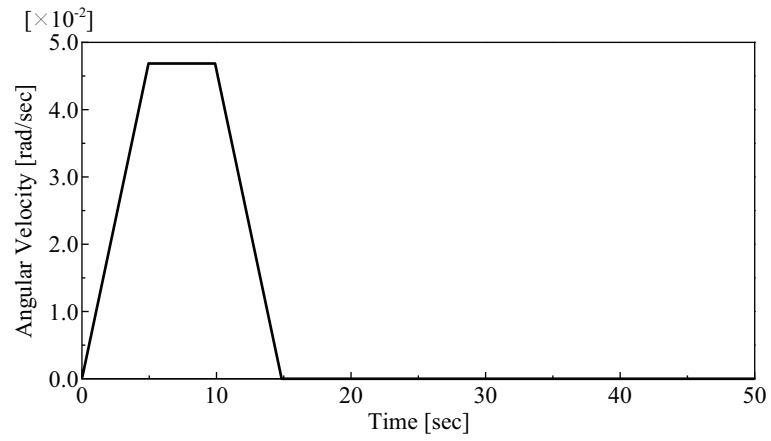


(c) position

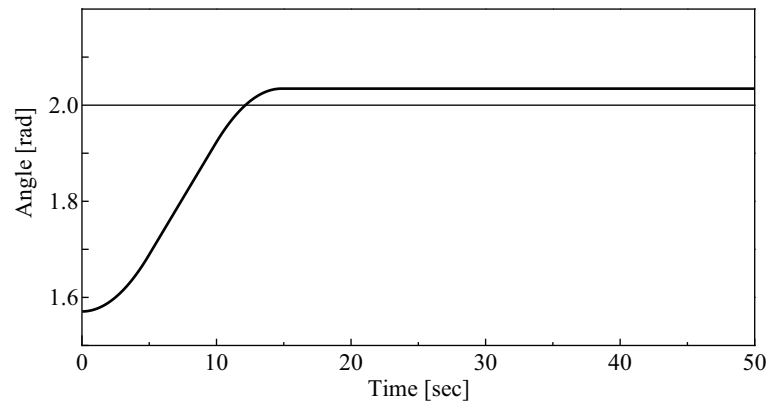
Fig. 2.13: ベースの目標位置



(a) acceleration

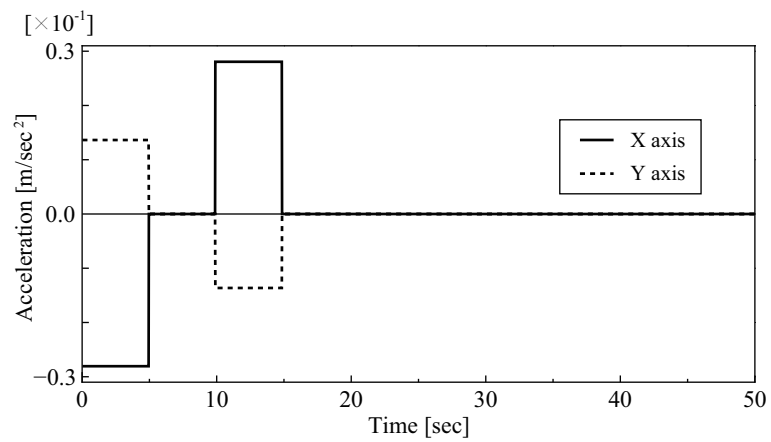


(b) velocity

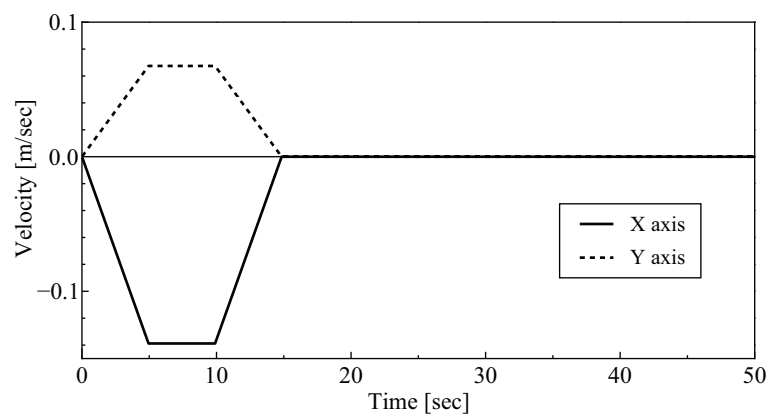


(c) position

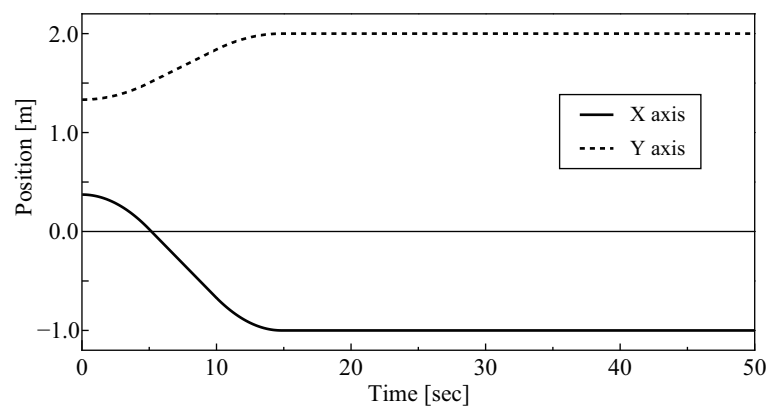
Fig. 2.14: ベースの目標角度



(a) acceleration



(b) velocity



(c) positioin

Fig. 2.15: 手先の目標位置

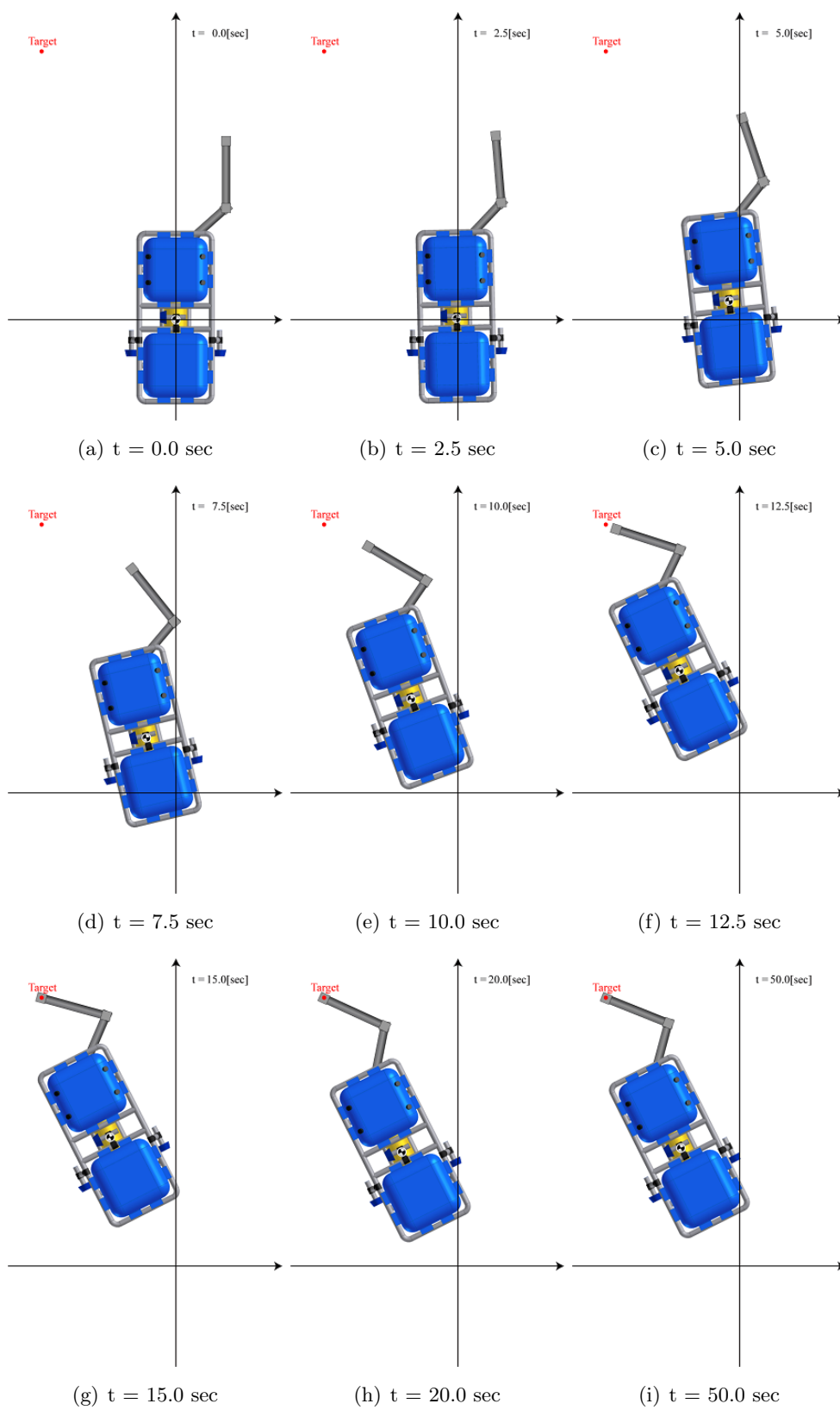


Fig. 2.16: 各時刻におけるロボットの姿勢

Table 2.2: シミュレーションに用いた水中ロボットのパラメータ

	Base	Link1	Link2
Mass [kg]	120.00	6.00	6.00
Moment of inertia [kg m ²]	1.33	0.19	0.19
Link length (x axis) [m]	1.30	0.50	0.50
Link length (y axis) [m]	0.65	0.12	0.12
Added mass(x) [kg]	320.10	2.00	2.00
Added mass(y) [kg]	191.90	5.64	5.64
Added moment of inertia [kg m ²]	29.40	0.47	0.47

Table 2.3: ロボットの初期姿勢と手先の目標位置座標

ベースの重心座標	(0.0 , 0.0)
手先の目標座標	(-1.0 , 2.0)
Joint1 の初期姿勢 [deg]	30
Joint2 の初期姿勢 [deg]	-30

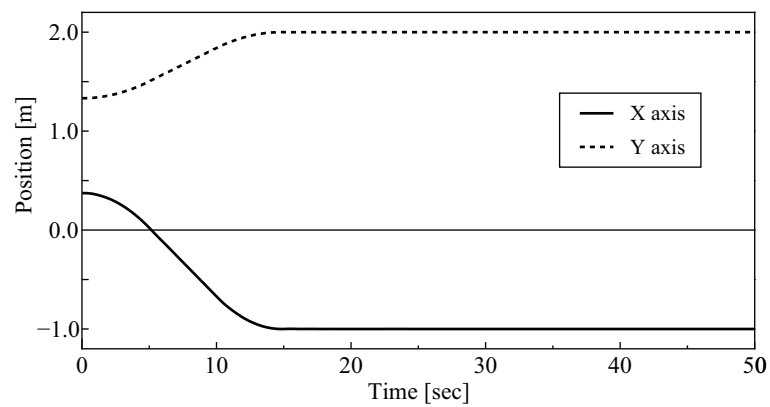


Fig. 2.17: 手先の軌道

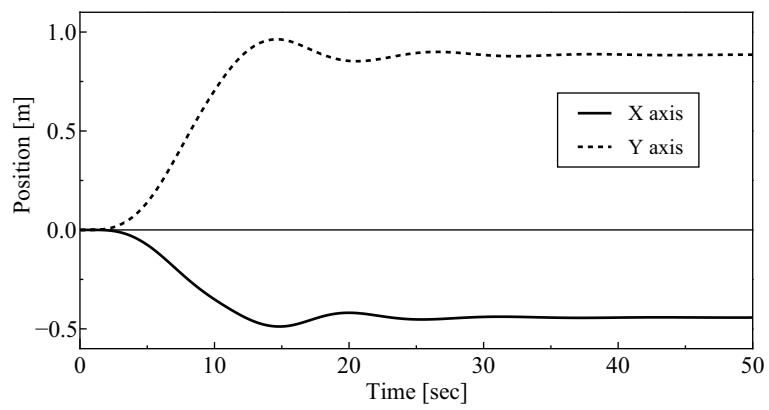


Fig. 2.18: ベースの軌道

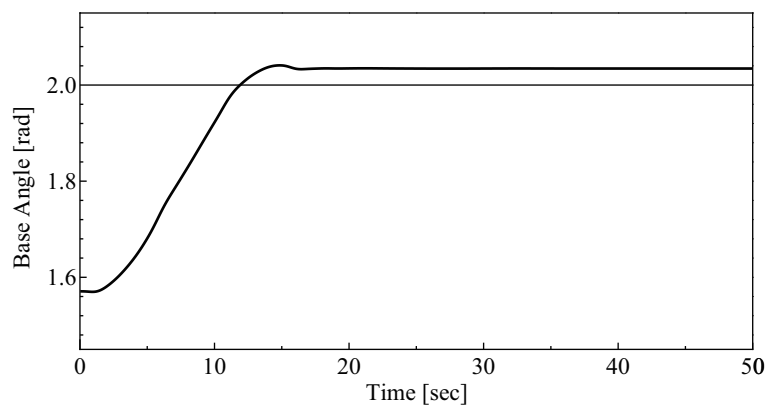


Fig. 2.19: ベースの姿勢変化

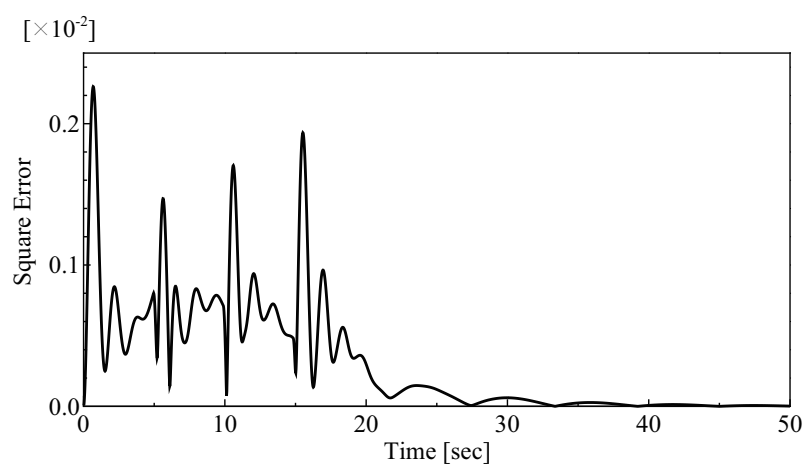


Fig. 2.20: 手先の位置誤差

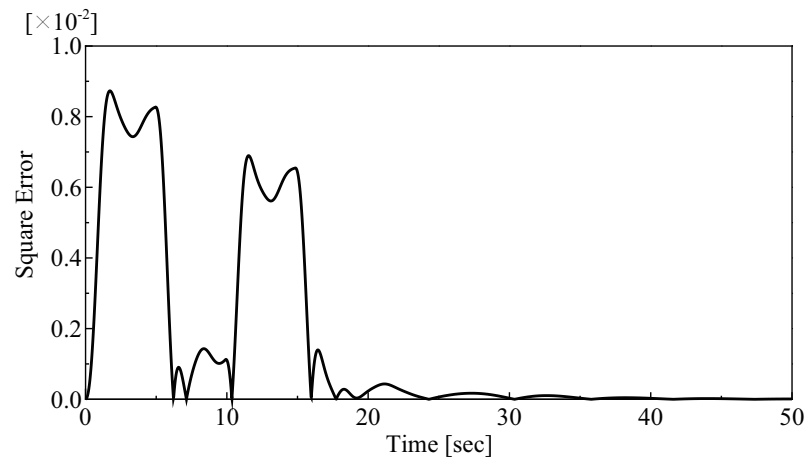


Fig. 2.21: ベースの位置誤差

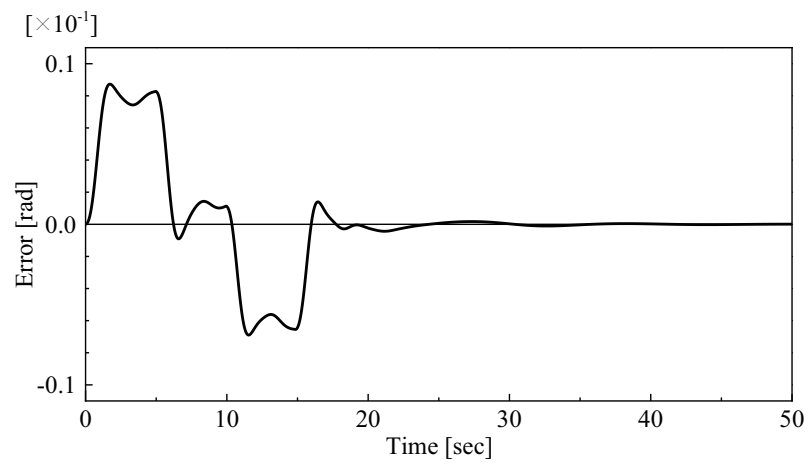


Fig. 2.22: ベースの姿勢誤差

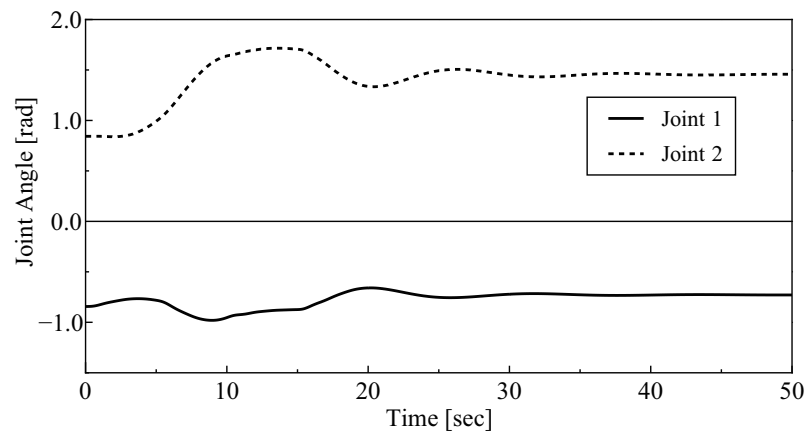


Fig. 2.23: 関節角度の推移

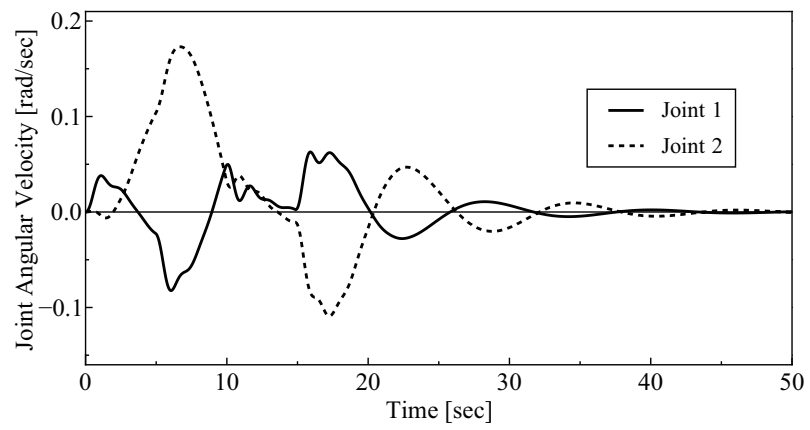


Fig. 2.24: 関節角速度の推移

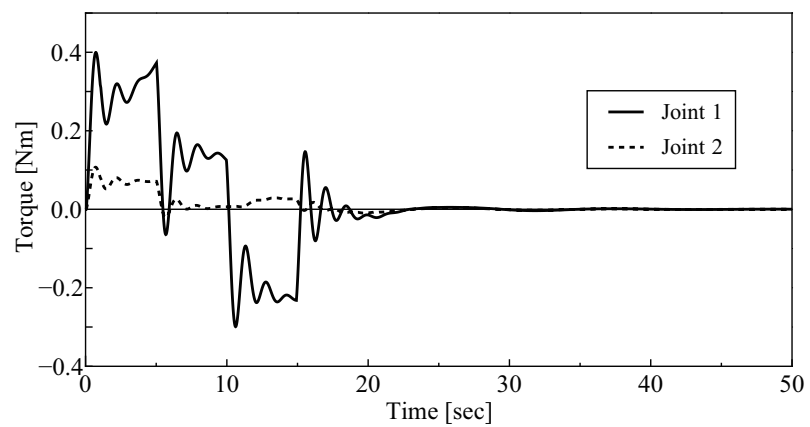


Fig. 2.25: 関節トルクの推移

第3章

マニピュレータを搭載した 水中ロボットの開発

第3章 マニピュレータを搭載した 水中ロボットの開発

本章ではマニピュレータを装備した水中ロボットの開発を目指して行った，ハードウェア面での開発に関して述べる．

システムの構成としては水中ロボット本体に自律型水中ロボット“ Twin-Burger ”を用い，水中用マニピュレータを開発して搭載することで，ロボットシステムの実現を目指す．さらに，システム設計において用いたモジュール構造の概念と，各モジュールの設計に関して説明する．なお，設計には 3D-CAD システムである Autodesk Inventor を使用した．[43]

3.1 自律型水中ロボット“ Twin-Burger ”

本研究で用いる水中ロボット“ Twin-Burger ”は 1992 年に東京大学生産技術研究所において開発された自律型水中ロボットである [32]．システムの老朽化と度重なるシステムの改変に伴い，Fig.3.1 に示すように内部構造が煩雑になってしまっていた．そこで本研究においてシステム全体の再構成を行い，後述するモジュール化手法を用いて新しいシステムを開発した．

3.1.1 “Twin-Burger”概要

“Twin-Burger”はロボットのシステムを納める上部の 2 つの耐圧容器とバッテリーを搭載するための下部の耐圧容器，それぞれを接続するフレームから構成されている．前部の耐圧容器（Hull2）においてスラスタの制御を，後部の耐圧容器（Hull1）においてセンサの情報処理を行い，Ethernet を介して互いに通信して行動を決定するシステムとなっている．

Table 3.1 に Twin-Burger の主な仕様を示す．

アクチュエータ

“ Twin-Burger ”は 5 基のスラスタを装備し，Fig.3.2 に示すように 3 次元の並進移動とヨー方向の 4 自由度の動作が可能となっている．ロボットの重心と浮心の位置関係が離れているため復元力が高く，ピッチ・ロール方向の運動は基本的に行わないものとする．

さらに，本研究では二自由度のマニピュレータを搭載する．

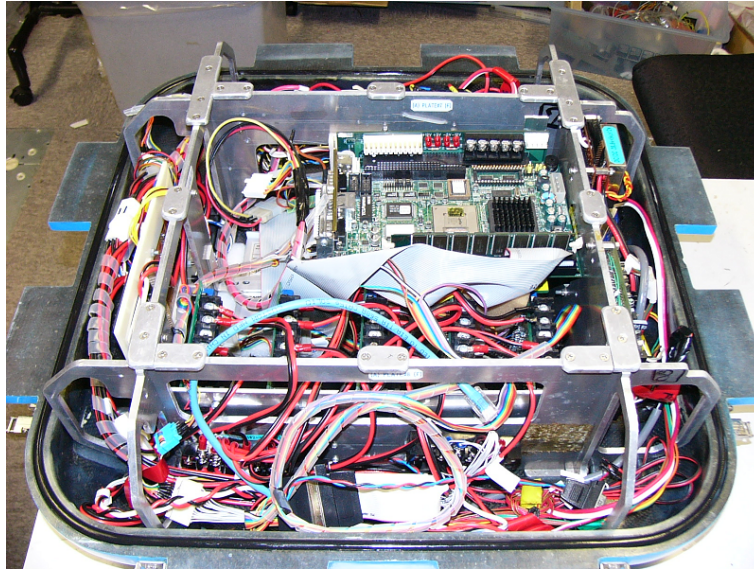


Fig. 3.1: 再構成以前の耐圧容器内の様子

Table 3.1: “ Twin-Burger ” の仕様

大きさ	L 1.2[m] × W 0.6[m] × H 0.5[m]
重量	120 [kg]
電源	Ni-Cd バッテリー 25.6[v] / 28.8[v]
水深	最大 50 [m]

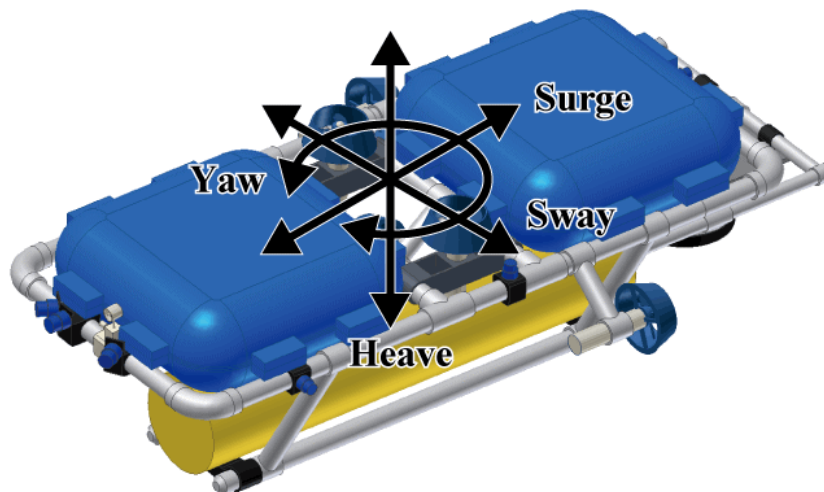


Fig. 3.2: “ Twin-Burger ” の自由度

センサ

“ Twin-Burger ”は動作環境を認識するためのセンサとして、深度（圧力）センサ、距離センサ、流速センサを搭載している。再構成にあたりこれらのセンサに加えて、姿勢センサ、ジャイロセンサ、カメラと複合センサである DVL を新たに搭載する。

制御装置

上部耐圧容器にはラップトップ PC が搭載されていたが、再構築にあたり、ノート型のラップトップ PC へと変更した。ノート型 PC は入出力のインターフェースに限りがあるため、多数のデバイスとの直接接続が困難となる。そのため本研究では USB ポートを使用し、ハブを介して各デバイスと接続する。

3.1.2 システム構成

前項で述べたシステム群のロボットへの搭載構成を接続系統を含めて Fig. 3.3 に示す。

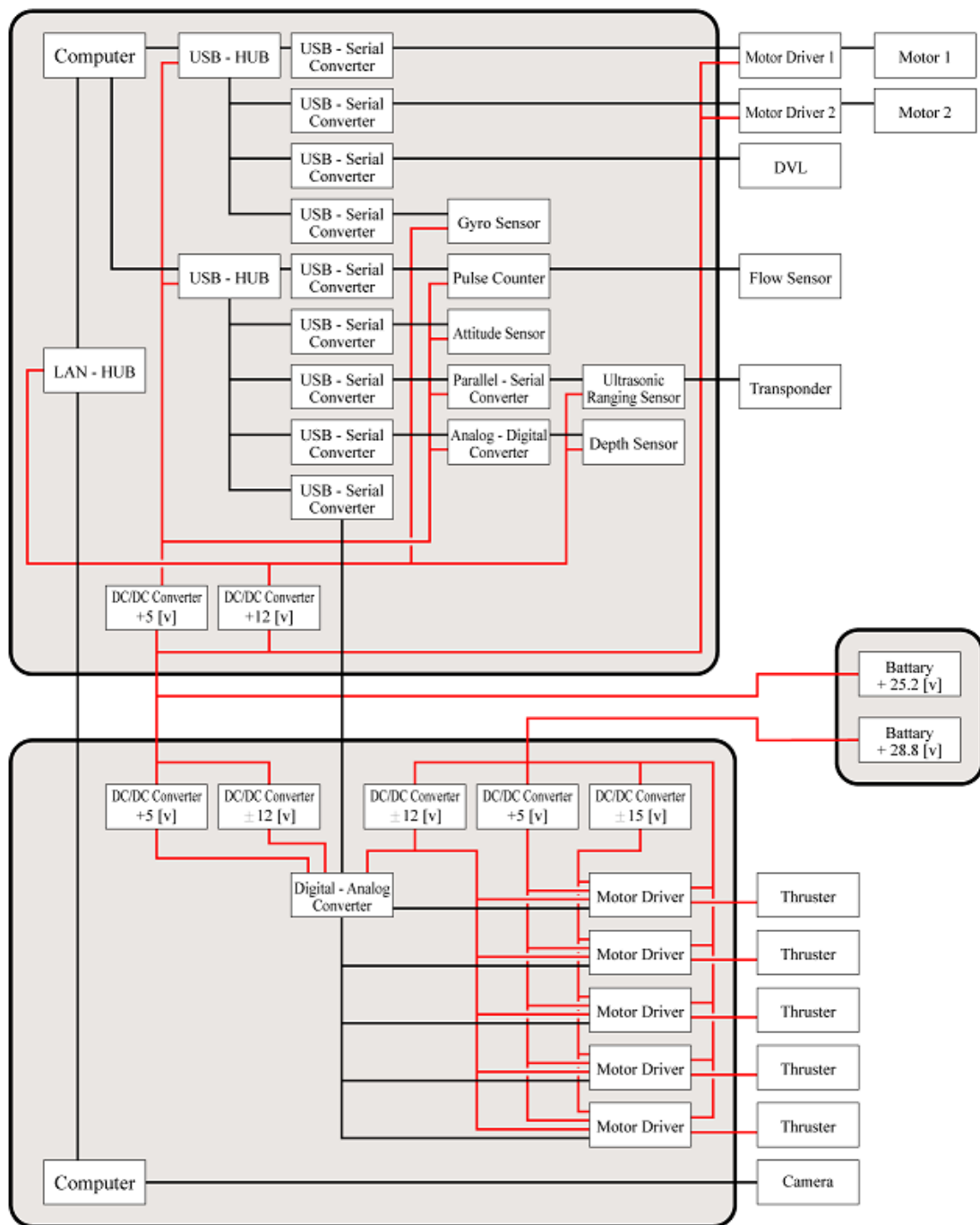


Fig. 3.3: 開発するロボットのシステム構成

3.2 モジュール構造化

一般的なロボットはセンサやアクチュエータなどの多数のデバイスを搭載して作られており、高度な制御が要求される。また、近年の技術の進化により制御機器やセンサ、アクチュエータ等が小型化し、以前に比べて様々なデバイスが搭載されるようになってきた。その反面システムが複雑化し、ロボットの設計から開発、修理に多大な時間を費やさねばならなくなった。そのため、ロボットのシステム簡易化や整備性の向上などは非常に重要な課題の一つである。

こういった問題に対する答えの一つとして、モジュール構造化があげられる。モジュール構造とは、デバイス単体または複数ごとに区分して一つのユニットとして扱う構造を指す。モジュール構造を用いることで、各ユニットを個別に扱うことができ、整備性の向上や信頼性の確保などの可能性がある。しかし、各モジュールごとにユニットを構成するため、構造を最適化して原価低減を図る場合に比べると、コストや開発時間は余分にかかる可能性がある。ロボットの開発・運用において具体的な利点を挙げてみると、

< 開発 >

- ・ 以前設計したモジュールを用いることで新規の設計が不要
- ・ 部品の共通化により生産コストを削減
- ・ 事前にモジュール単位で用意できる場合、組立工数の減少と簡略化が可能

< 整備 >

- ・ 部品の共通化による予備部品調達が容易
- ・ 故障時にモジュールごと交換でき、短時間で復帰が可能
- ・ モジュール単体ごとに点検・整備が可能

反対に問題点としては、以下のような点が上げられる。

- ・ 新規にモジュールを開発する場合の開発時間が必要になる
- ・ 最適化されたシステムに比べ、モジュールの構成部材の分だけコストが増加

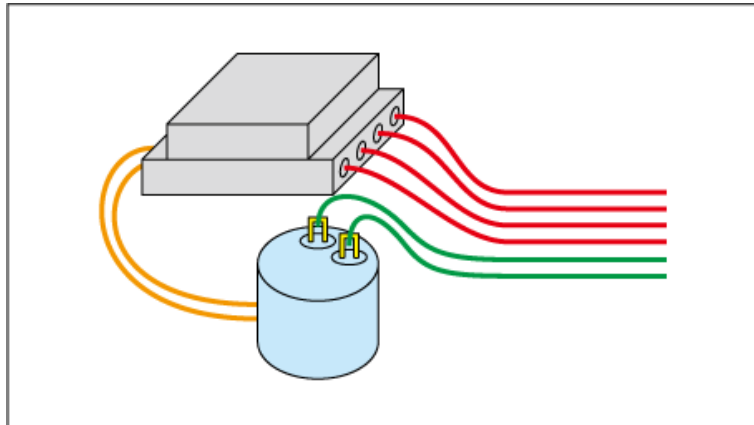
3.2.1 モジュール化の手法

本稿で述べるモジュールの定義として、以下のように定める。

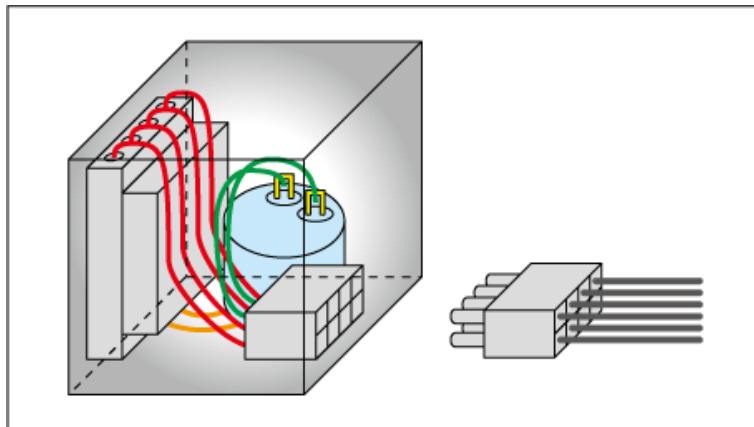
- 1) ある機能をもった、独立したシステムの単位
- 2) 周囲との接続を簡易化し、取り外しを容易にする
- 3) 配線が露出しないような構造をとる

つまり、モジュール構造化とは Fig.3.4 に示すように、前述したモジュールの定義を満たすように、ロボットを構成するデバイスとその配線をユニット化していくことである。理想的なモジュール化は全てのデバイスをそれぞれモジュール化することであるが、システム全体が複雑になればなるほど、開発における時間がかかる。そのため、本研究では効率的なモジュール化をめざす。そのためには、個別にモジュール化する必要の無いデバイスを判別し、複数のデバイスを一つのモジュールとして構成すればよい。

モジュール化の大まかな手順としては、(1) システム構成図を作成し、構成図をもとにモジュール化を行う箇所を検討する。検討する順番としては、(2) 同一機能を持つデバイス、



(a) モジュール化前



(b) モジュール化後

Fig. 3.4: モジュール化の例

(3) 連結された複数のデバイス，(4) 手順 (2),(3) で対象とならなかったモジュール，以上の順番でモジュール化箇所を検討する．各手順について，以下に詳しく説明する．

(1) システム構成図の作成

システムをモジュール化するには，システム全体を把握する必要がある．Fig. 3.3 に示したように，正確で詳細なシステム構成図を作成することが，モジュール化を施すための第一歩となる．この構成図には各デバイスの接続を示す必要があり，特に電源供給ラインと通信ラインが必要となる．さらに，搭載箇所に制限のあるデバイスに関しては，構成図上で容易に見分けがつくように配置しなくてはならない．

こうすることで，システム構成図にデバイスを配置するための情報を盛り込むことができる．

(2) 同一機能を持つデバイスのモジュール化

システム構成図上で，Fig. 3.5 に示すように同一のデバイスを各所で同じ構造で使用している場合，その機能単独でモジュール化を行う．

同一機能を持つデバイスを同じ構造でモジュール化を施せば，全体の開発時間の節約や予備モジュールの確保がしやすいなどの利点がある．さらに他のロボットへの流用や，モジュールの共通化による生産性の向上なども望める．そのため，後述する複数デバイスのモジュール化よりも優先して単独でモジュール化すべき箇所であるといえる．

(3) 複数デバイスのモジュール化

複数デバイスのモジュール化は，各デバイスにおける共通事項を探すことから始まる．

システム構成図上で，Fig. 3.6，3.7 に示すように複数のデバイスが並列または直列に並んでいる場合において，それらのデバイスが機能の上から共通事項がある場合には，一つのモジュールとして扱うことが望ましい．例えば，モータドライバとモータの組み合わせなどは，通常直列に配置される上，“モータを動かす”という機能面での共通性がある．配置に問題なければ共通化すべきデバイスの組み合わせであるといえる．

複数デバイスのモジュール化を行うと，そのうちのデバイスに問題が起きた場合，問題ないデバイスに関しても同時に点検や交換を行う必要が発生してしまう．そのため複数デバイスのモジュール化は，様々な角度から共通性を確認するほうが望ましい．例えば，直列・並列的な接続であっても，PC とセンサなどのように機能面での隔たりが大きい場合には，モジュール化すべきではない．しかし逆に，単純な直列・並列接続でなくても，機能面や配置における共通性が高い場合はモジュール化すべきか検討する必要がある．

(4) 単独デバイスのモジュール化

上記の条件に当てはまらない場合は，周辺のデバイスとの共通性が少なく単独で使われる可能性が高いため，単独でモジュール化を施す．これらのデバイスは他のロボットに使用する場合や，配置などを重要視してモジュール化を施すと良い．

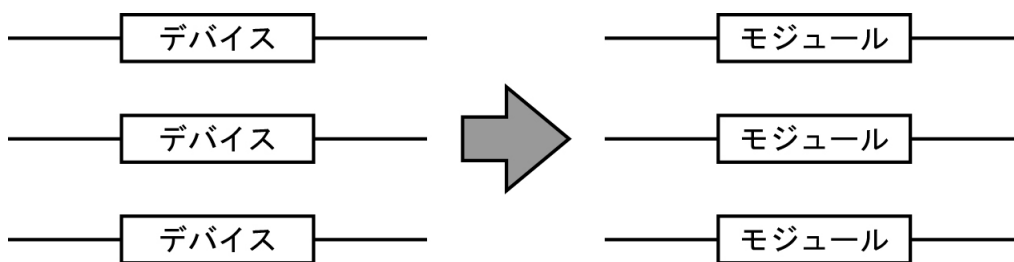


Fig. 3.5: 同一デバイスのモジュール化

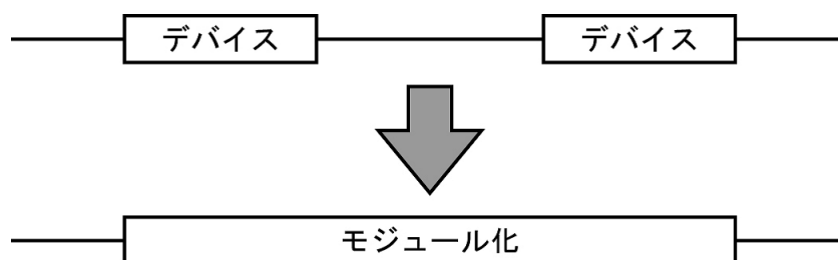


Fig. 3.6: 直列デバイスのモジュール化

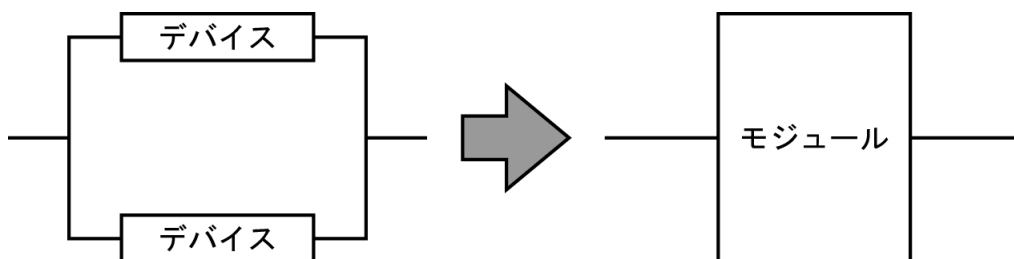


Fig. 3.7: 並列デバイスのモジュール化

3.2.2 “ Twin-Burger ”への適用

前項において示した手順を用いて，Fig.3.3 に示した水中ロボットのモジュール化箇所を検討する．

Fig. 3.3 に対して同一機能を持つデバイス箇所を検討した結果を Fig. 3.8 に，複数デバイスの検討結果を Fig. 3.9～3.11 に，最後に単独デバイスのジュール化箇所を検討した後の，最終的なシステム構成図を Fig. 3.12 にそれぞれ示す．

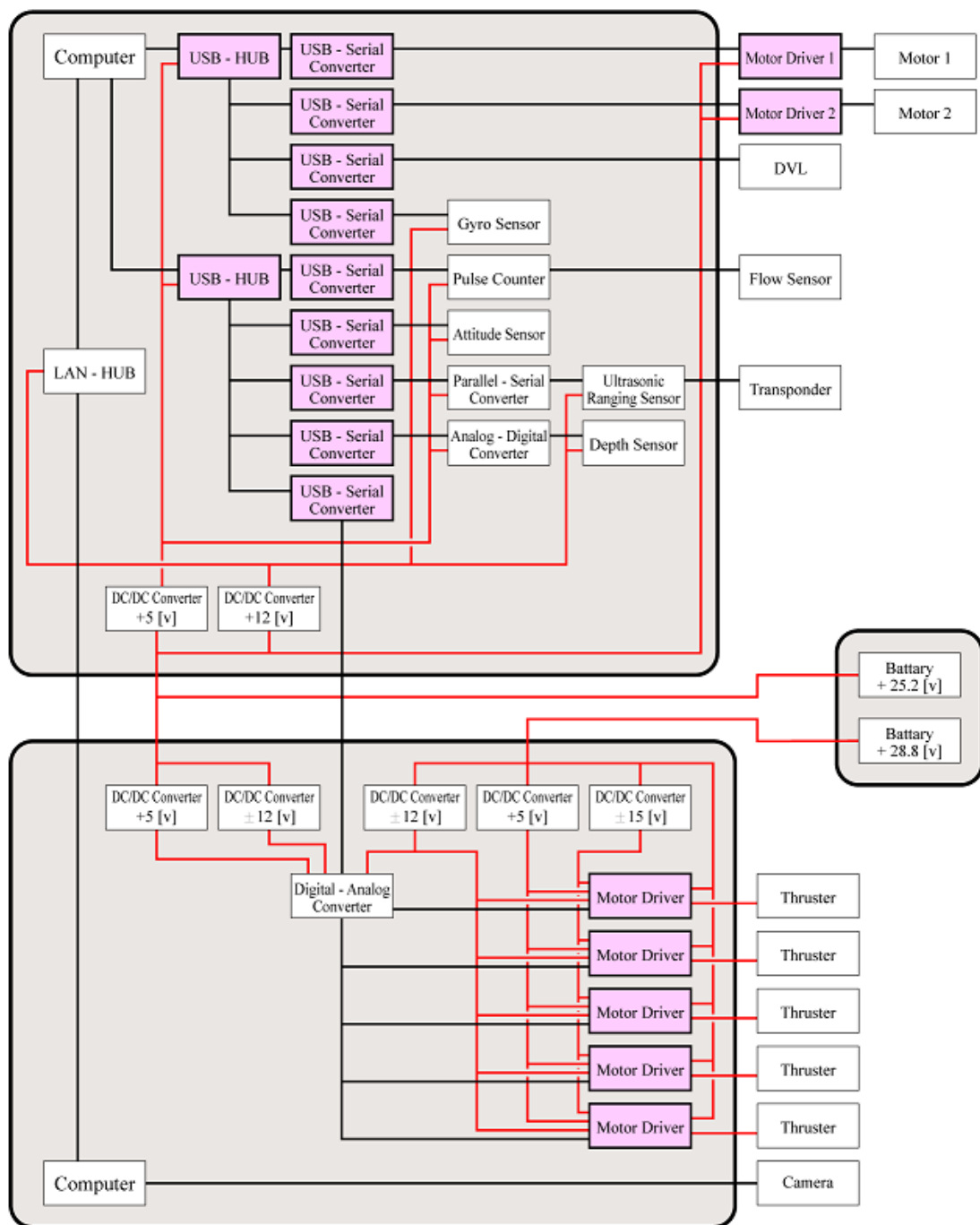


Fig. 3.8: モジュール化の検討 (2) 同一機能を持つデバイス

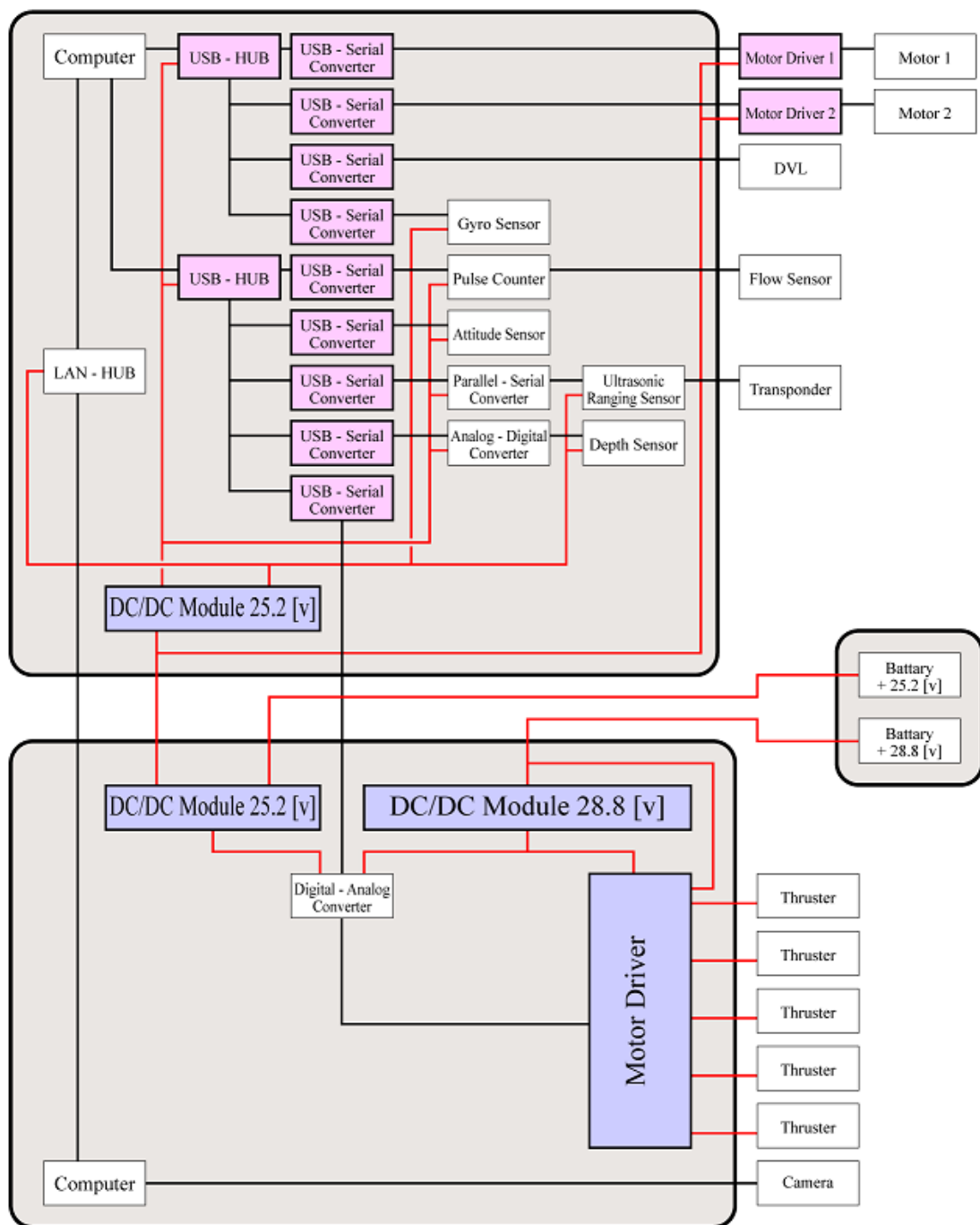


Fig. 3.9: モジュール化の検討 (3) 並列に接続されたデバイス

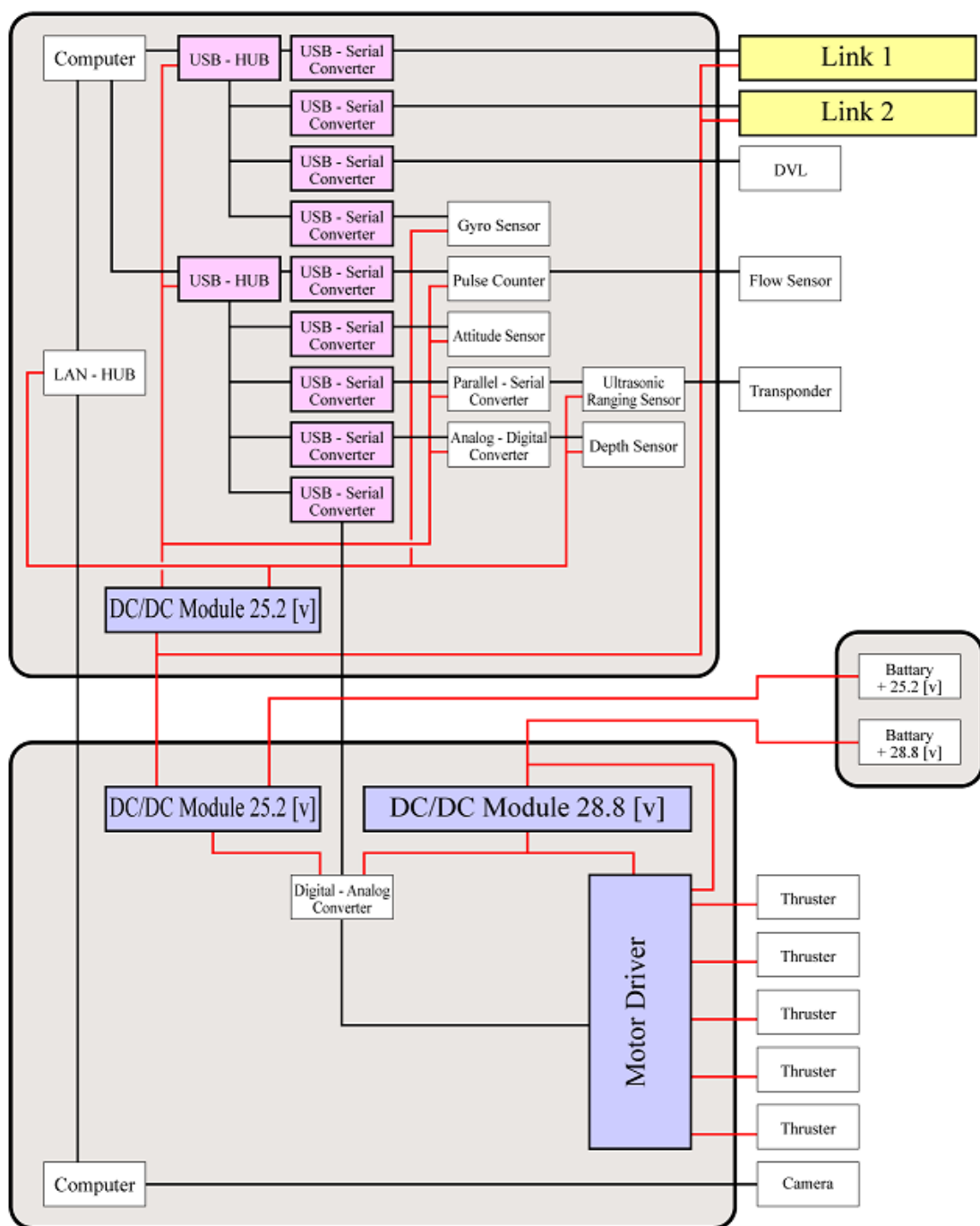


Fig. 3.10: モジュール化の検討 (3) 直列に接続されたデバイス

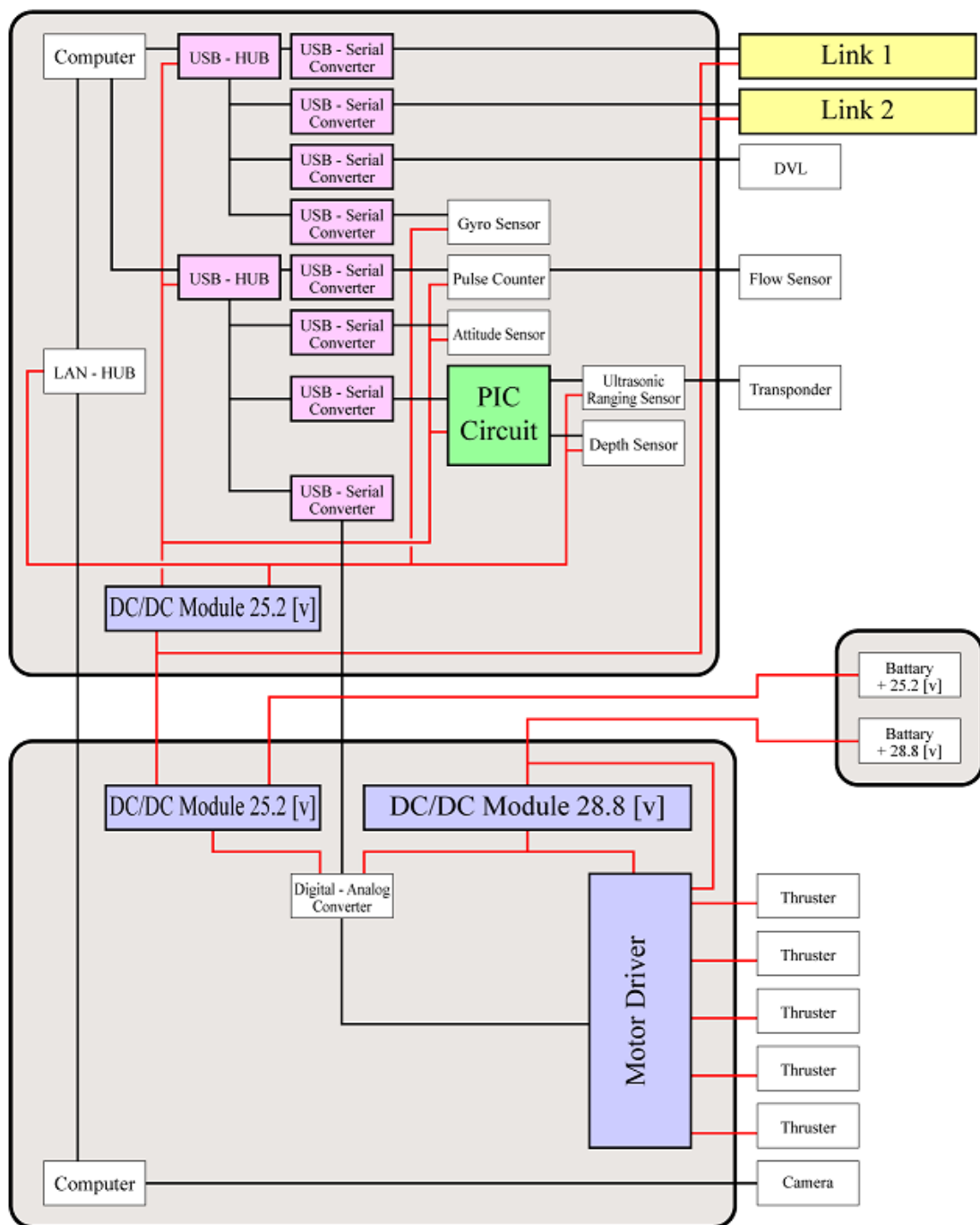


Fig. 3.11: モジュール化の検討 (3) 直列かつ並列に接続されたデバイス

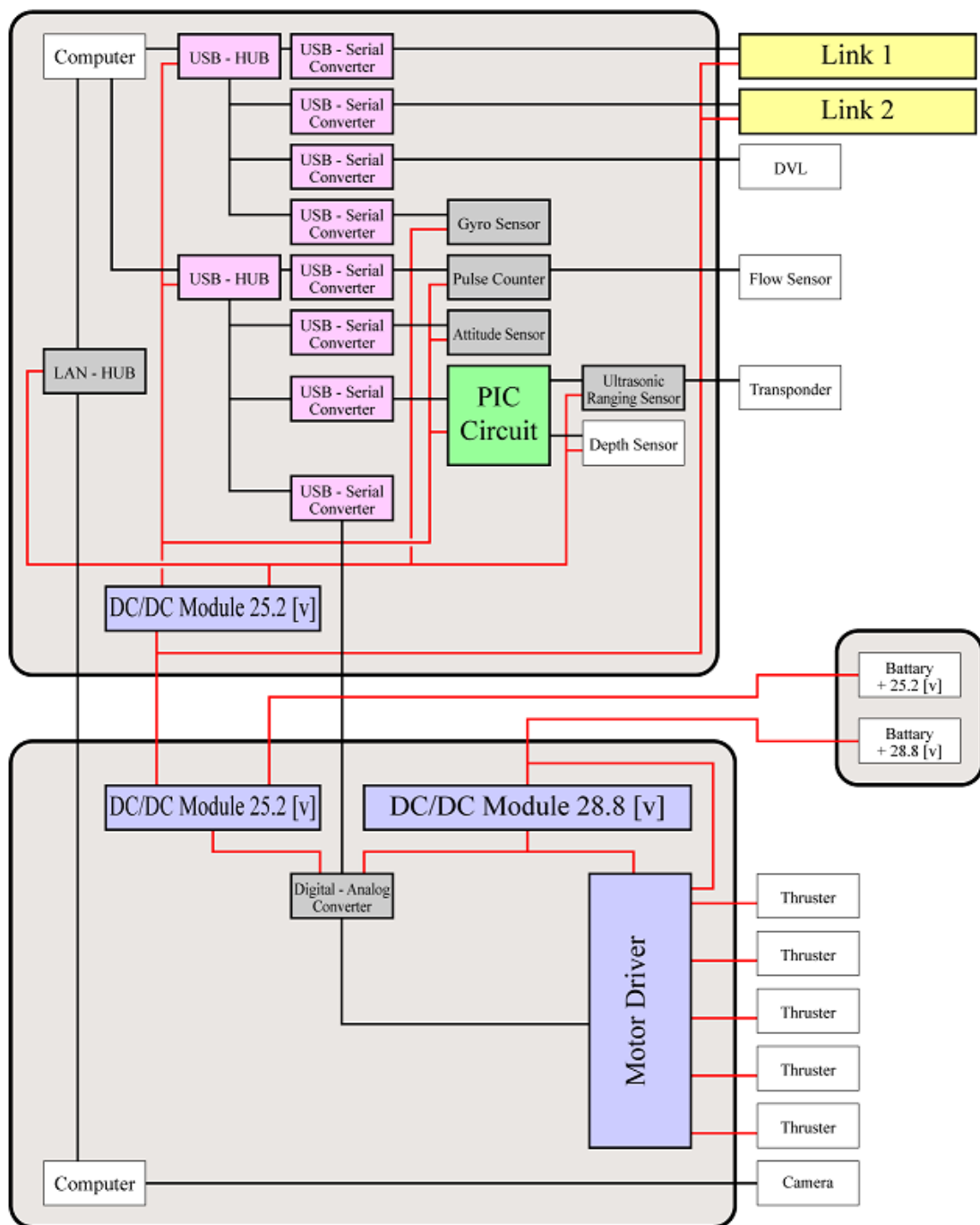


Fig. 3.12: モジュール化の検討 (4) 単独デバイス

3.3 AUV の制御システムの開発

本項では前項のモジュール化箇所の検討結果に従い行った，“Twin-Burger”に搭載するシステムの開発に関して述べる．

3.3.1 システムの構成

様々なデバイスを接続する場合，デバイスの通信規格に合わせてそれぞれ通信ポートを用意する必要がある．本ロボットのシステムにおいては，通信系統の簡略化を図るため USB ポートと USB-Serial コンバータを用いて各デバイスとの接続を行った．通信はすべてシリアル通信を用いて行い，直接シリアル通信によって接続できない場合はマイクロコンピュータを用いて各機器と通信し，インターフェース基板を作成して対応した．これにより USB ポートさえあれば通信ポートの増設を容易に行うことができ，センサやアクチュエータの追加が簡単に行うことができる．

3.3.2 モジュール構造

“Twin-Burger”の耐圧容器内部にはそれぞれ格子状のフレームがあり，すべてのモジュールはこのフレームへ組み合わせた状態で，耐圧容器から簡単に取り外すことができる構造とした．Fig.3.13 にその概要図を示す．さらに，後部耐圧容器 (Hull1)，前部耐圧容器 (Hull2) の各モジュールを Fig. 3.14 と Fig. 3.16 に，フレームへ組み付けた状態を Fig. 3.15 と Fig. 3.17 にそれぞれ示す．

最終的に初期のシステム構成図 (Fig. 3.3) から最終的なモジュール構造 (Fig. 3.12) にいたることで，配線数とシステム構成ユニット数に関して改善することができた．改善した結果を Table 3.2 に示す．

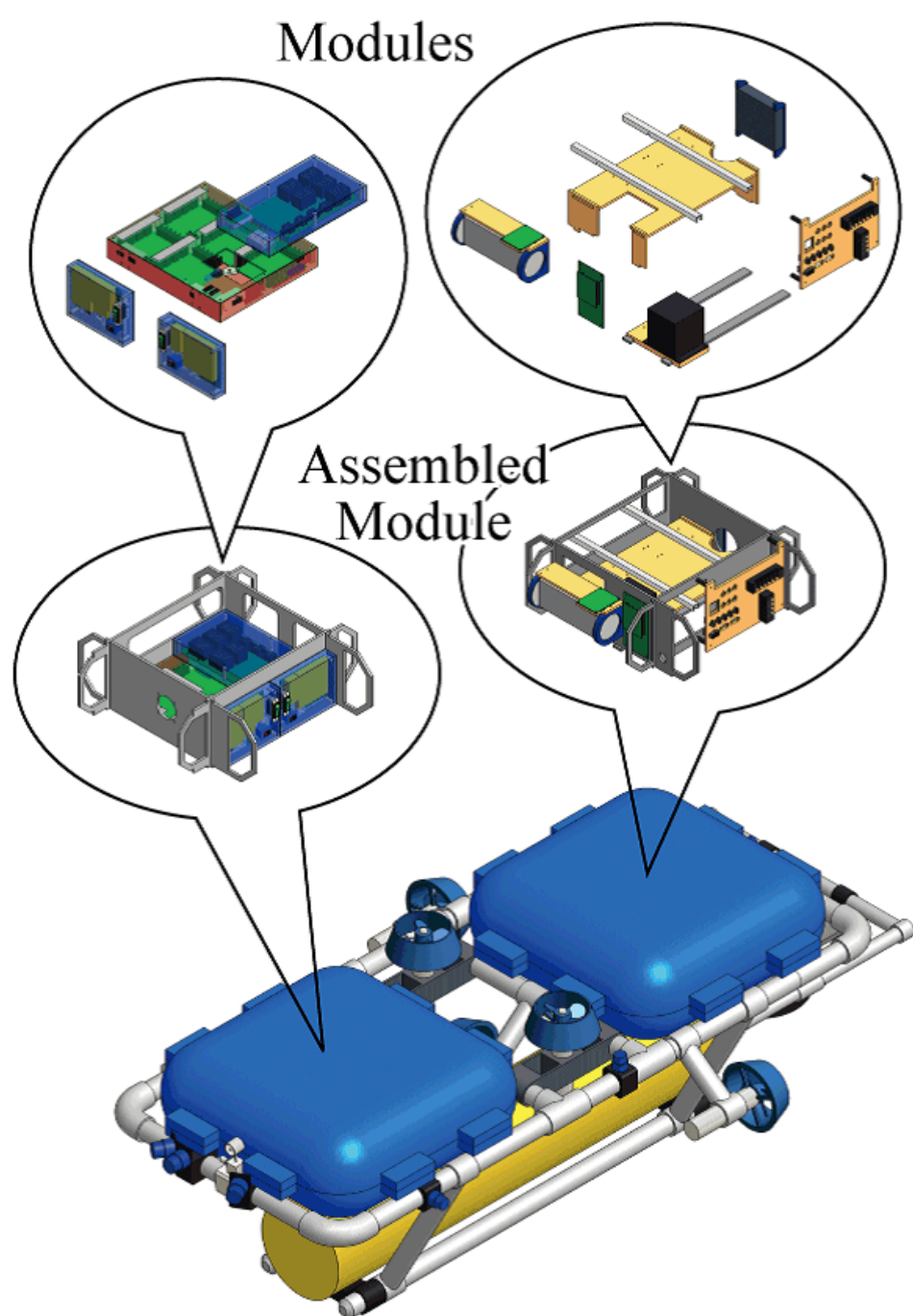


Fig. 3.13: 各モジュールの配置



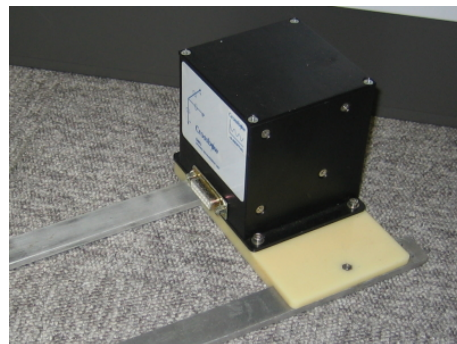
(a) USB-HUB モジュール



(b) 超音波距離センサモジュール



(c) LAN-HUB モジュール



(d) ジャイロセンサモジュール

Fig. 3.14: 後部耐圧容器に搭載する各モジュールの外観

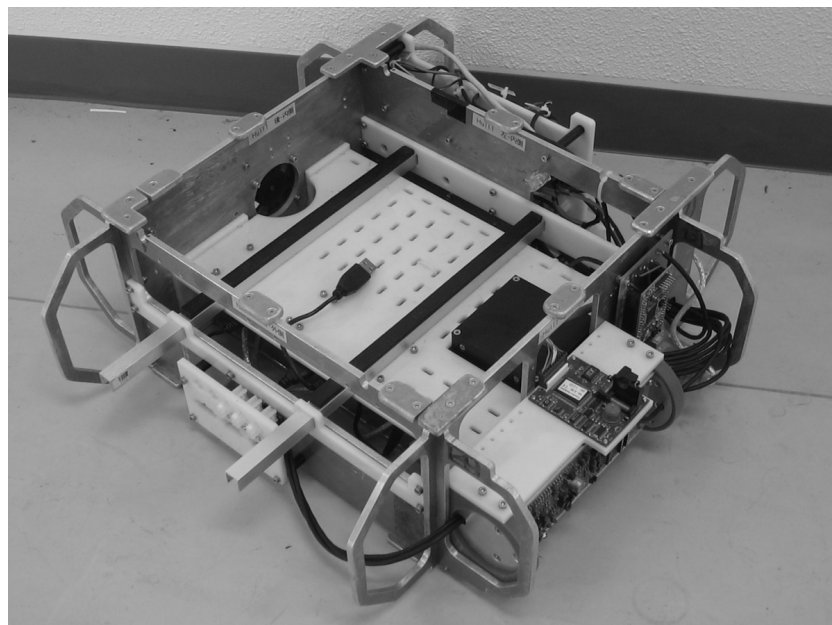
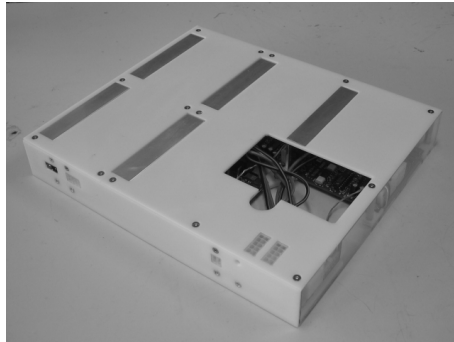
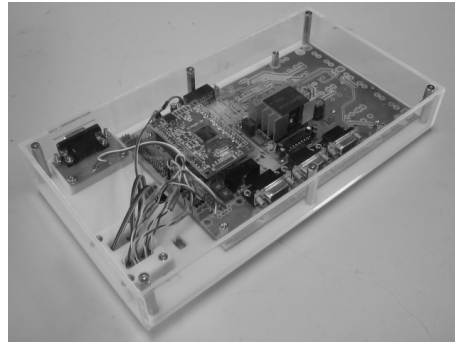


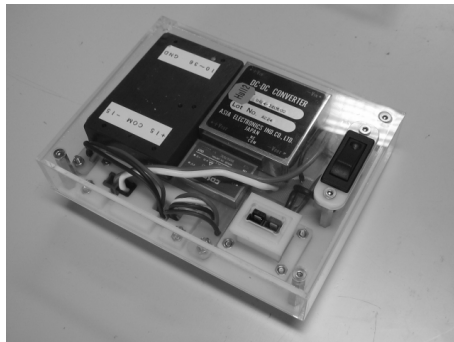
Fig. 3.15: 後部耐圧容器内部に配置するモジュールシステムの外観



(a) モータドライバモジュール



(b) D/A コンバータモジュール



(c) DC/DC コンバータモジュール 1



(d) DC/DC コンバータモジュール 2

Fig. 3.16: 前部耐圧容器に搭載する各モジュールの外観

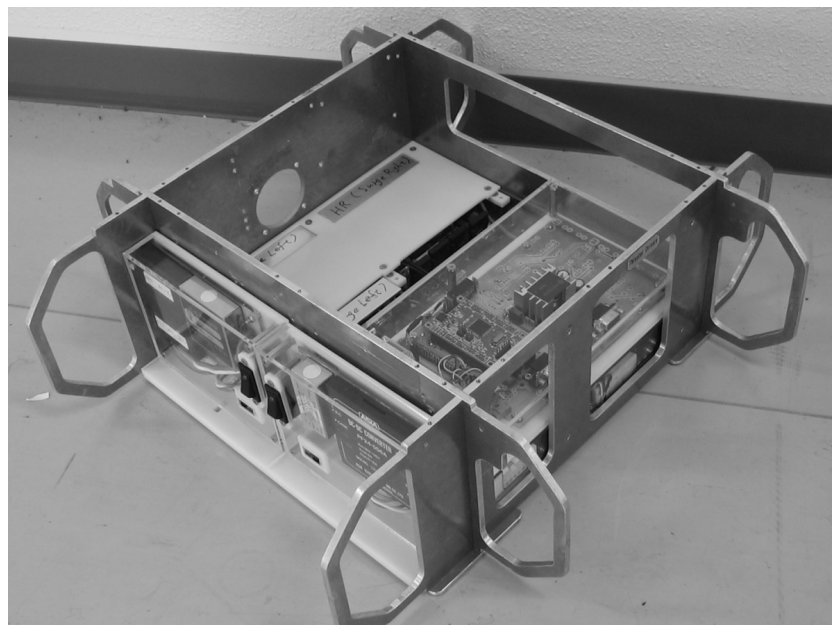


Fig. 3.17: 前部耐圧容器内部に配置するモジュールシステムの外観

Table 3.2: モジュール化によるシステムの簡略化

項目	モジュール化前	モジュール化後	低減率
配線数	89	62	30.3
構成ユニット数	49	38	22.4

3.4 マニピュレータの開発

前項までに行った動作シミュレーションの結果を用いてマニピュレータの関節出力とサイズを決定し、マニピュレータの設計および開発を行った [44] .

3.4.1 防水構造

関節軸部の防水加工

本研究ではマグネットカップリング機構を用いて、マニピュレータの関節駆動部の防水加工を行った。この機構は大きなトルクを必要としないウォーターポンプやスラストの駆動軸に用いられており、磁力の力を利用して完全に分け隔てられた隔壁を通して力を伝達することが可能である。マグネットカップリングを使用することで、駆動軸を持つ構造でも容易に防水構造を実現できる。

マグネットカップリングは磁力でトルクを伝達する方法であるが、図 3.18 に示すようにその形状には大きく分けて 2 種類ある。一つはシリンダータイプで円筒型の磁石を内外に配置して駆動力を伝達する。伝達トルクは大きい、外径も大きくなり、隔壁も複雑な構造となる。もう一つはディスクタイプで円盤型の形状をしている。これは磁石間の距離を調整でき、伝達トルクは設計によって変化する。しかし、基本的な伝達トルクの大きさはシリンダータイプには及ばない。隔壁は簡単な平面でよく、構造が単純になる。本稿で開発するマニピュレータの関節軸にはシリンダータイプのマグネットカップリングを用いる。

マグネットカップリングの特徴として、以下のような点が上げられる。

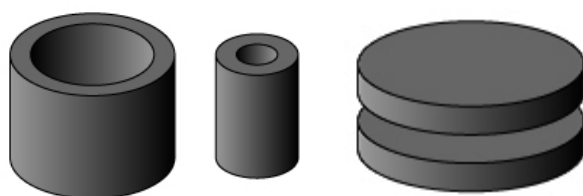
- 1) 伝達トルクが小さい
- 2) 強いトルクを与えた場合にはバックラッシュが生じる。

大きなトルクを伝達することが可能なマグネットカップリングは非常に大きなものになってしまう。そこで、マグネットカップリングを介して伝達された動力をギア機構によって減速し、必要なトルクを得る構造とした。この構造に関しては、後で詳しく述べる。

パーツ接合部の防水加工

水中ロボットを設計するには、電子機器などを格納する部分を防水構造としなければならない。一般的な防水構造は O-Ring などを使用することが多く、本論文で設計するマニピュレータの外殻も O-Ring を使用する。

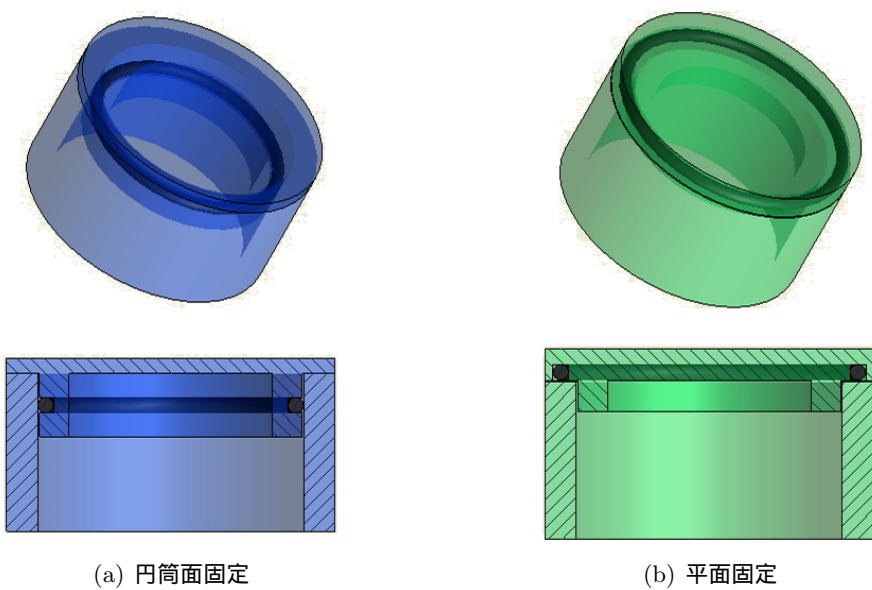
実際に O-Ring を使用して防水加工するには図 3.19 に示すように大きく分けて円筒面固定と平面固定の 2 つの設計方法がある。どちらも有効な方法であるが、構造に差が出る。平面固定の構造では相対する面にある程度の大きさを確保する必要があり、そのため、円筒部の隔壁の厚さが増える傾向にある。一方、円筒面固定の構造では前述した円筒部の壁厚は薄くなるものの、蓋部の構造が複雑化し重くなるという点が挙げられる。この 2 種の構造を場所によって使い分けて設計を行った。



(a) シリンダータイプ

(b) ディスクタイプ

Fig. 3.18: マグネットカップリングの形状



(a) 円筒面固定

(b) 平面固定

Fig. 3.19: O-Ring による防水構造

3.4.2 モジュール構造

本論文では2リンクのマニピュレータを目標としている．構造の単純化し拡張性を持たせるために，Fig. 3.21 のようにアクチュエータ（モータ）と関節機構を一つずつ含むモジュール構造とする．このユニットを多数連結することで，多リンクのマニピュレータや複数腕を作成することが可能である．また，モータドライバも内蔵しているため，ロボット本体にアクチュエータのドライバを設置する必要が無く，電源ラインと指令値を送信する通信ポートだけを準備すれば接続が可能となっている．以下に各部の細かい設計に関して述べる

駆動部の構造

マニピュレータの駆動軸にはリンクを駆動する力だけでなく，水の抵抗なども作用する．そのため，マグネットカップリングによって伝えられた力を用いて関節を駆動させるためには，

- 1) 大きな力を伝えることのできるマグネットカップリングを使用する．
- 2) マグネットカップリングによって伝達された力をギア機構によって大きくする．

上記のような設計を行う必要がある．しかし前者の方法では大きなマグネットカップリングを使う必要がある．そのため，後者の方法を用いて設計を行う．

手順としてはまず，シミュレーションより必要な駆動トルクおよび角速度を得る．次にマグネットカップリング機構で伝えられる駆動トルクを調査し，関節駆動に必要なトルクを発生させるギア機構を設計する．最後にマグネットカップリングへ伝える必要回転数と必要トルクを算出し，それに適合するモータを選定する．

駆動部の必要条件

前述したようにマニピュレータの関節軸の駆動時の必要条件として，トルクと角速度が挙げられる．前章のシミュレーション時のデータから得られる必要なトルクと角速度を実現できるように，駆動部の設計を行う．

前項のシミュレーションより得られた結果を元に決定した，マニピュレータの設計性能を Table 3.3 に示す．この条件を考慮して関節軸駆動部の設計を行う．

マグネットカップリングの選定

本稿で開発するマニピュレータにマグネットカップリングを用いることは述べたが，ここでは，マグネットカップリングの選定に関して述べる．

選定にあたり，市販されているマグネットカップリングのサイズと伝達可能トルクを表 3.4 にまとめる．

サイズとトルクを考慮すると最も効率がよいのは外径 40[mm] のマグネットカップリングであり，今回のマニピュレータの製作に用いる．

ギア機構の設計

前述した項より得られた関節の駆動に必要な予測トルクとマグネットカップリングで伝達できるトルクからギア機構を設計する．様々な種類のギアがあるが，大きなギア比が必要な点，モータの出力軸と関節の駆動軸が直交する点からウォームギアを使用する．

まず，ギア機構に必要なギア比を算出する．ここで，

R ： ギア比

τ_{in} ： 入力トルク [mNm]

τ_{out} ： 出力トルク [mNm]

η ： ギア効率

とおく．入力トルクはマグネットカップリングから伝達されるトルクなので，最大でも $1.2[\text{kgf} \cdot \text{cm}]$ である．単位を変換すると $117.68[\text{mNm}]$ となる．必要な最大出力トルクは，3.1.1 項で得られた結果を考慮して， $1.0[\text{Nm}]$ に設定した．さらにウォームギアのギア効率は，商品の仕様の中で最小値の 0.36 を用いる．以上の数値を使用すると，

$$\begin{aligned} R &= \frac{\tau_{out}}{\tau_{in} \times \eta} \\ &= \frac{1000}{117.68 \times 0.36} \\ &= 23.61 \end{aligned}$$

以上のようにギア比が 23.61 と算出できる．この結果にくわえて，市販されているウォームギアのギア比と大きさ・設計上の問題も考慮し，ギア比を 40 と設定した．

モータの選定

関節軸の動力源は DC モータを用いる．モータからの出力をマグネットカップリングの入力へ直接導いているため，モータの最大出力は最低でも $117.68[\text{mNm}]$ 必要となる．さらにモータの回転数はそのまま関節軸の角速度に影響する．マニピュレータの関節軸の最大速度は 3.1.1 項で得られたとおり， $0.4[\text{Rad/sec}]$ である．この最大値にさらに余裕を持たせ， $0.8[\text{Rad/sec}]$ を設計目標とする．ここで，

ω ： 角速度 [Rad/sec]

Rot ： モータ回転数 [rpm]

R ： ギア比

とすると，モータの必要回転数は単位を考慮して次式で表される．

$$\begin{aligned} Rot &= 60 \times \omega \times \frac{1}{2\pi} \times R \\ &= 60 \times 0.8 \times \frac{1}{2\pi} \times 40 \\ &= 305.73 \end{aligned}$$

以上よりモータに必要な条件が回転数 305.73[rpm] 以上，トルク 117.68[mNm] 以上であることがわかった．また，ベースとなる Twin-Burger の電源が 28[V] であることを考慮し，それに近い入力電圧のモータを選定する．

以上より maxon motor 社の RE25 にギアヘッド GP26A（ギア比 16:1）を組み合わせたモータを選定した．このモータの性能は表 3.5 に示す通り．トルクも回転数も必要要件を満たしている．

3.4.3 外殻の設計

前項において，駆動部の構造が決定した．ここで防水構造を含めた外殻の設計を行う．基本的には予測される使用深度における水圧に耐えうる強度を持った外殻が必要である．一般的には円筒や球の形状であれば圧縮応力が生ずるために水圧に対して強い．そのため多くの水中ロボットの耐圧容器の形状は円筒もしくは球であることが多い．しかし，マニピュレータの複雑な内部構造を考慮すると，すべての形状を円筒と球で構成することは困難である．そこで，今回設計するマニピュレータはギアボックス部を直方体，リンク部分を円筒とする．

円筒部

円筒部の耐圧設計は [5] に記述してあるとおり，次式で表される．

$$P_k = E \left[\frac{\pi^4}{n^4(n^2 - 1)} \times \left(\frac{r}{l} \right)^4 + \frac{n^2 - 1}{12(1 - \nu^2)} \times \left(\frac{t}{r} \right)^2 \right] \left(\frac{t}{r} \right) \quad (3.1)$$

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）
- l : 円筒長さ

ここで弾性座屈圧力を圧壊圧力と考えればよいので，式 (3.1) 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．このときの各数値は表 3.6 に示す通り．尚，円筒部の製作にはアルミニウム（JIS 規格 A6063 相当品）を使用する．

このときの板厚と弾性座屈圧力の関係を図 3.20 に示す．使用深度を 50[m] で安全率を 2 とするならば，必要な耐圧力は約 10 気圧（= 1.01[MPa]）であるので，図 3.20 より板厚が最小でもおおよそ 1.2[mm] は必要ことが読み取れる．しかし，今回はアルミニウム素材と加工方法の問題により，板厚を 3[mm] とした．

Table 3.3: マニピュレータの設計性能

耐水深度	50 [m]
最大出力トルク	1.0 [Nm]
最大出力回転数	0.8 [rad/sec]

Table 3.4: マグネットカップリングのサイズと伝達可能トルク

外径 [mm]	厚み [mm]	磁石間距離 [mm]	伝達可能トルク [kgf・cm]
35	15	2.0	0.3
38	12	4.1	0.25
40	15	1.4	1.2
51	15	5.0	0.9
56	22	5.0	1.8
60	30	3.1	3.8

Table 3.5: 選定したモータとギアヘッドの性能

maxon motor RE25			
定格出力 [W]	20	公称電圧 [V]	24
最大許容回転数 [rpm]	11000	最大連続トルク [mNm]	26.1
最大連続電流 [mA]	1210	最大効率 [%]	85
Gearhead GP26A			
ギア比	16:1	連続最大トルク [mNm]	500
推奨入力回転数 [rpm]	8000	最大効率 [%]	84

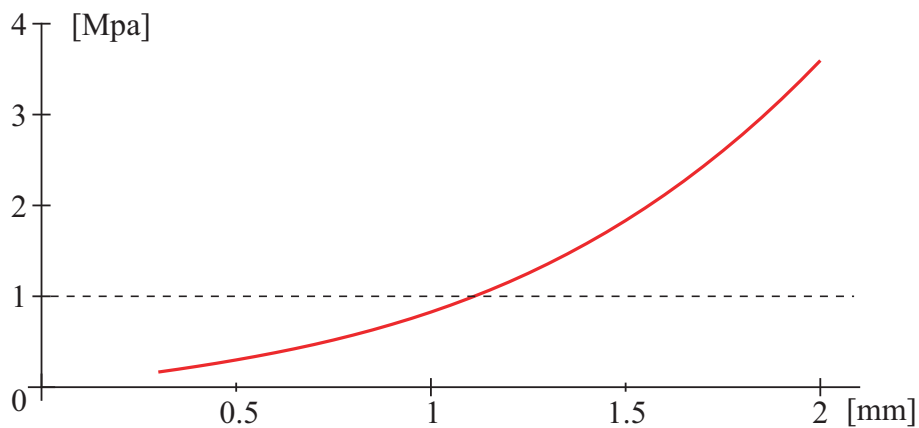


Fig. 3.20: リンク用シリンダの耐圧-円筒板厚の関係

Table 3.6: 設計に使用する物理パラメータ

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
円筒外径	0.08 [m]
引張強度	250 [MPa]
円筒長さ	0.36 [m]

関節部

直方体は水中における耐圧容器としては有効な形ではない．しかし加工方法や内部構造を考慮すると円や球の形状にするのは難しいため，直方体の構造とする．直方体の形状は耐圧容器として用いられることはほとんど無く，文献にも計算式は明記されていない．そこで円板の耐圧計算式を利用することにする．駆動部の直方体はおおよそ内部が $80[\text{mm}] \times 80[\text{mm}] \times 80[\text{mm}]$ のサイズになる．つまり，一面は $80[\text{mm}] \times 80[\text{mm}]$ の一枚の板と考えられる．この板が内接することが可能な円板を耐圧計算に用いることにする．

円板部の耐圧力の計算式は

$$\begin{aligned}
 P_a &: \text{圧壊圧力 [MPa]} \\
 \sigma &: \text{許容応力 [MPa]} \quad (= \text{引張強度} \div \text{安全率}) \\
 t &: \text{板厚 [mm]}
 \end{aligned}$$

とすると，耐圧計算式に各数値 (3.6) を代入して

$$\begin{aligned}
 \sigma &= 1.24 \frac{P_a^2}{t^2} \\
 t^2 &= 1.24 \frac{P_a^2}{\sigma} \\
 t &= \sqrt{1.24 \frac{P_a^2}{\sigma}} \\
 &= 3.52 < 4.0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

以上より板厚:3.52[mm] が得られた．

3.4.4 マニピュレータの製作

前項の条件を踏まえて，3D-CAD システムである Autodesk Inventor を使用してマニピュレータの設計を行い，製作を行った．開発したマニピュレータを Fig. 3.22 に，性能を Table 3.7 に示す．また，AUV へ搭載した状態を Fig. 3.23 に示す．

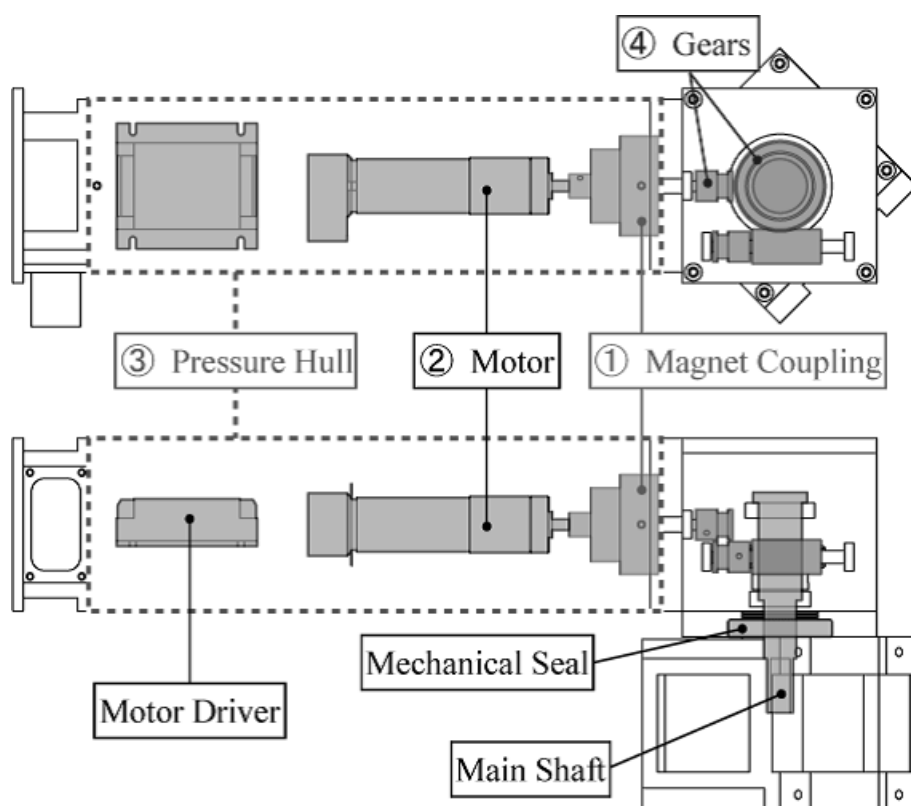


Fig. 3.21: 開発したマニピュレータの構造

Table 3.7: 開発したマニピュレータの性能

サイズ	90×90×500 [mm]
重量	3.4 [kg]
水中重量	300 [g]
関節軸出力トルク	4.8×10^{-1} [kgm](max)
関節軸出力回転数	2 [rpm]



Fig. 3.22: 開発したマニピュレータの外観

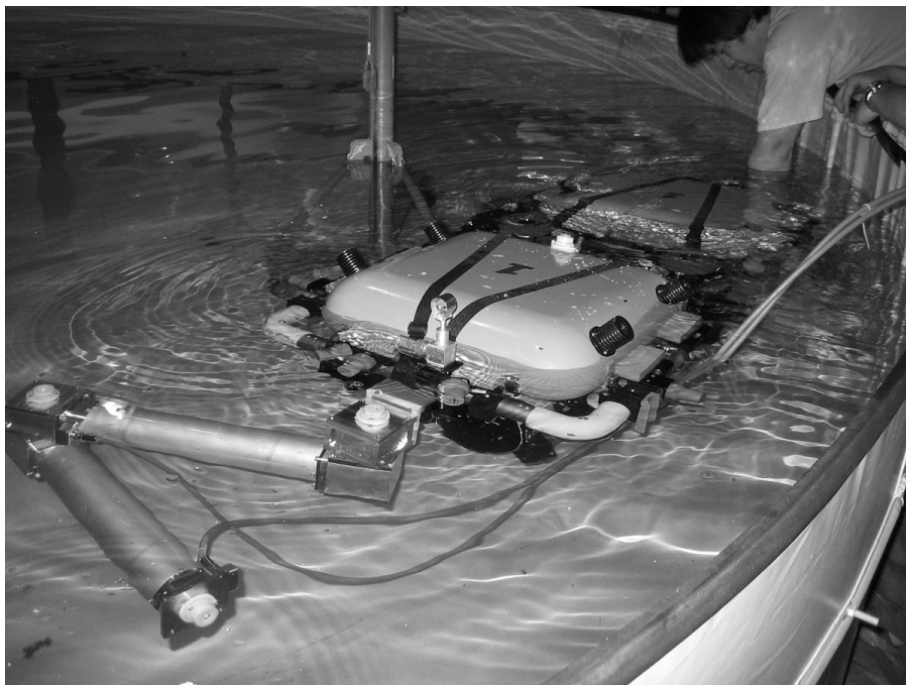


Fig. 3.23: 開発したマニピュレータを AUV に搭載した状態

第4章

水中ロボットの動作実験

第4章 水中ロボットの動作実験

4.1 AUV 本体の動特性試験

4.1.1 強制揺動試験

水中ロボット”Twin-Burger”の動特性パラメータは前述したように、建造時にパラメータ推定が行われているが、本研究の過程で、様々な装置の入れ替えを行ったため、パラメータが変化した可能性が高い。そのため、動特性を調べるための実験を行った。

動特性を求めるための実験として、強制揺動試験（リミットサイクル試験）を行った。この実験の概要を Fig. 4.1, 4.2 に示す。この試験は定めた目標に達するまで出力一定でロボットを駆動させ、目標到達後、出力と目標をを反対方向へ向けて繰返し動作させる実験である。ロボットには航行用のセンサが多数ついているが、各方向に対して位置センサが搭載されている場合は Fig. 4.1 に示されているように目標位置を与える。速度センサが搭載されている場合は同様に Fig. 4.2 に示すように目標速度を与えて実験を行う。

本研究における水中ロボットにおいては、Surge 方向・Sway 方向には流速センサを用いているため目標速度を、Heave 方向には深度センサ、Yaw 方向には方位センサをそれぞれ用いているため目標位置を与えて実験を行った。

実験で得られたデータより、パラメータの推定を行う。推定するパラメータの式は次式で与えられる。

$$M\dot{v} + Cv|v| = F \quad (4.1)$$

このとき、 M は付加質量を含むロボットの質量を、 v はロボットの移動速度を、 C は流体抗力係数、 F はスラストにより与えられる力を示す。このうち、 M と C の値を推定する。

ある M と C のパラメータにおけるリミットサイクル試験のシミュレーションを行い、定常状態における速度データと、実験により得られた速度データの二乗誤差を求め、その二乗誤差が最小になる M と C をロボットの動特性パラメータとする。

4.1.2 実験結果

水中ロボットに与えた実験条件を Table 4.1 にまとめて示す。各運動方向に対して、それぞれ適当と思われるパラメータを設定した。

これらの実験により得られた速度データと、推定したパラメータによりシミュレーションを行った結果を重ねて表示したものを以下に示す。Fig. 4.3 ~ 4.6 はそれぞれ Surge, Sway, Yaw, Heave 方向の実験結果である。

この結果より、式 4.1 を用いて導出したパラメータを Table 4.2 に示す。

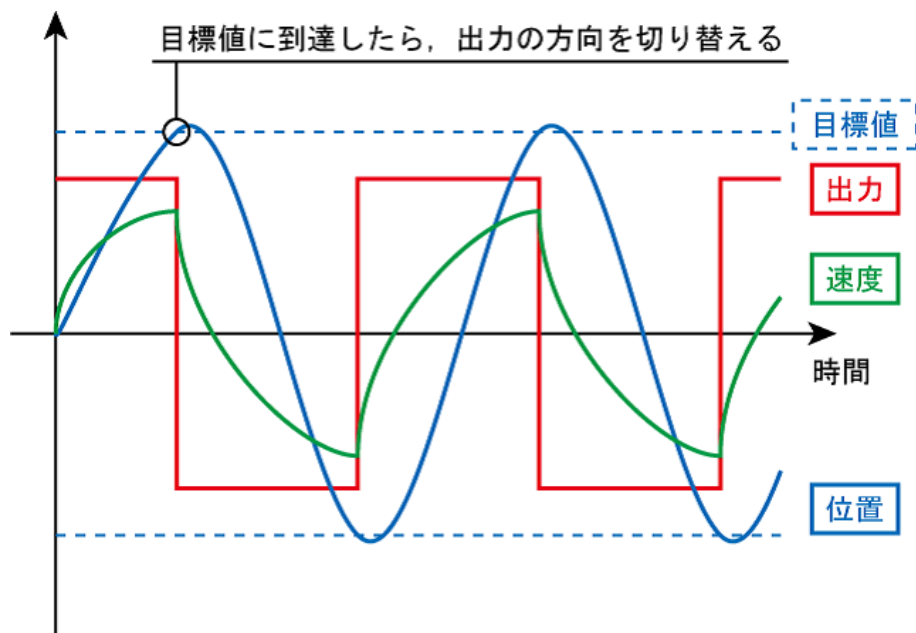


Fig. 4.1: 位置を目標にした場合の強制揺動試験

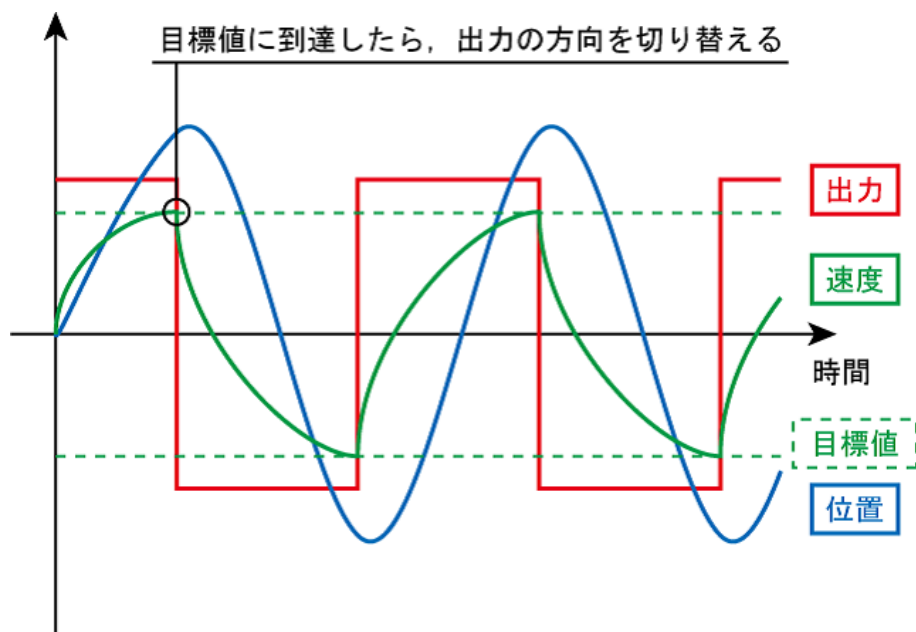


Fig. 4.2: 速度を目標にした場合の強制揺動試験

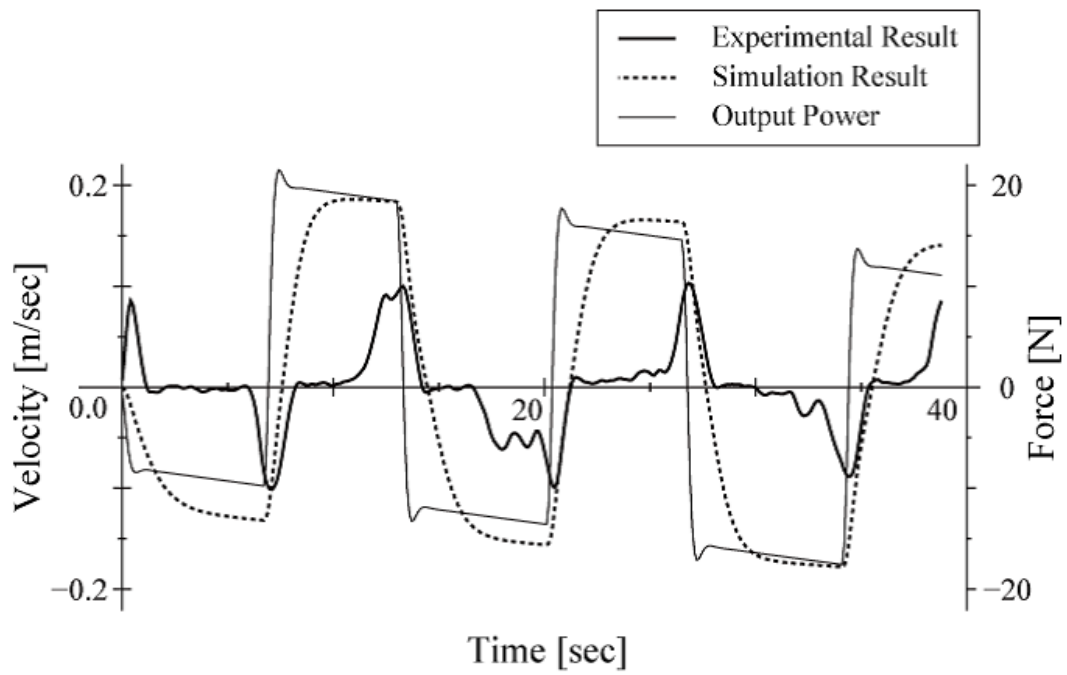


Fig. 4.3: Surge 方向の強制揺動試験の結果

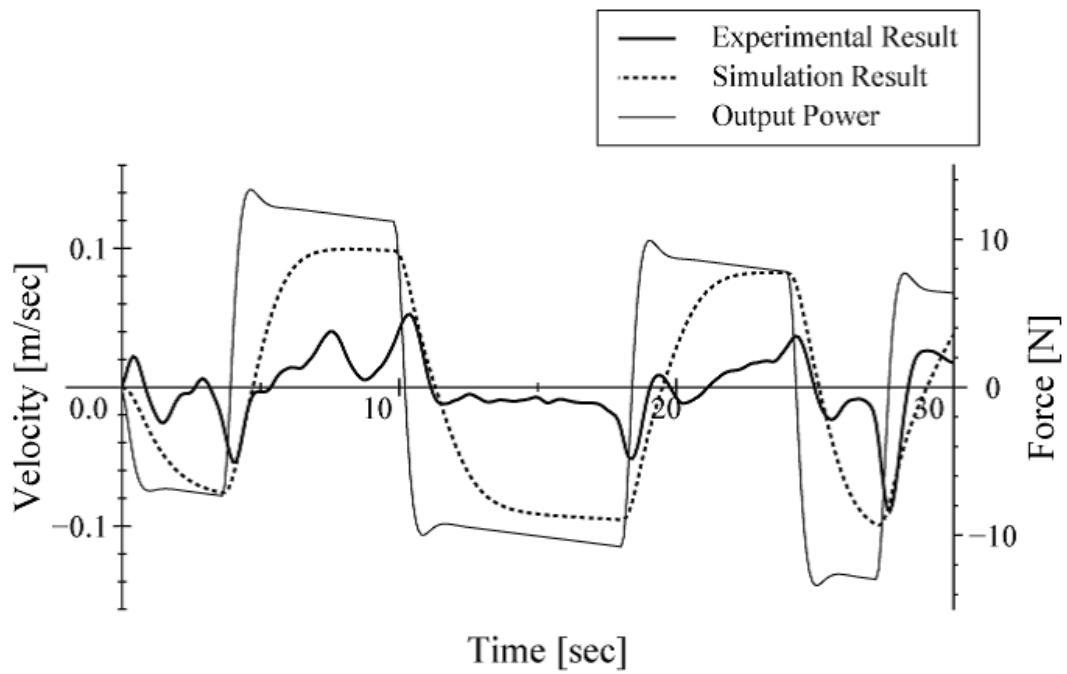


Fig. 4.4: Sway 方向の強制揺動試験の結果

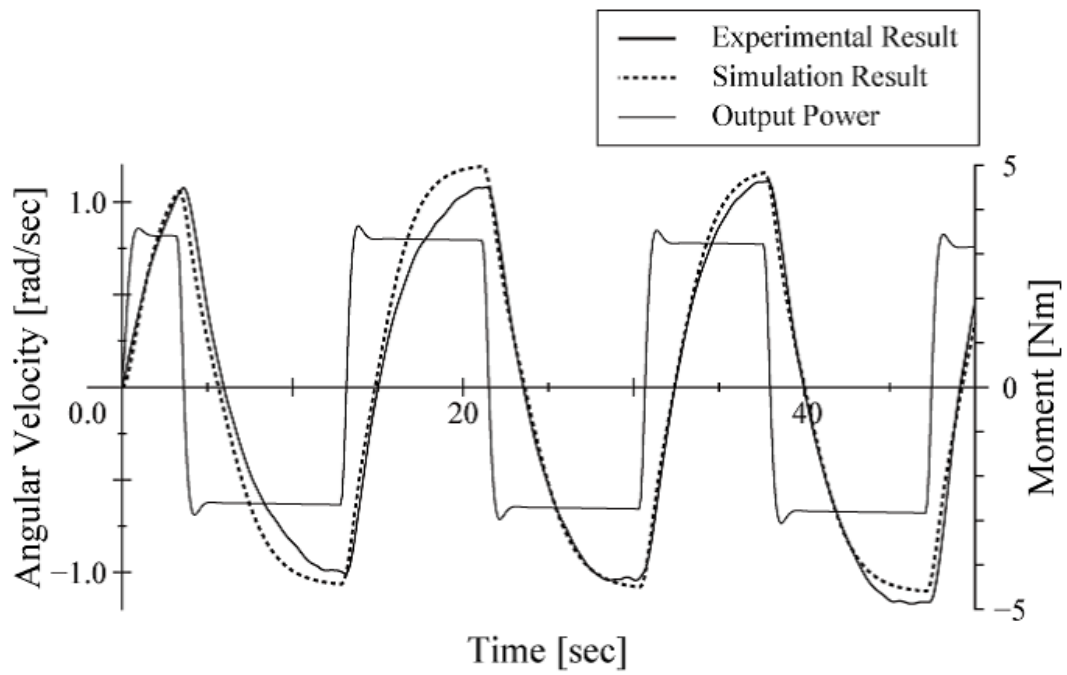


Fig. 4.5: Yaw 方向の強制揺動試験の結果

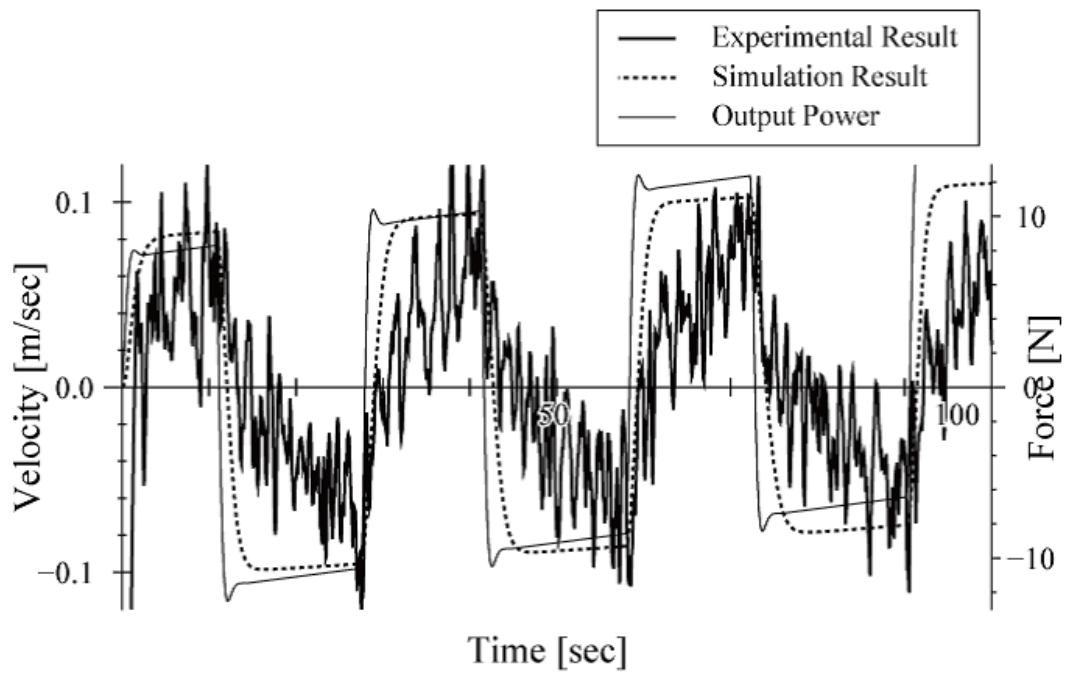


Fig. 4.6: Heave 方向の強制揺動試験の結果

Table 4.1: 強制揺動試験の実験パラメータ

運動方向	出力	目標値
Surge	15 [N]	0.1 [m/sec]
Sway	10 [N]	0.05 [m/sec]
Yaw	3 [Nm]	0.52 [rad] (30 [deg])
Heave	10 [N]	0.5 [m]

Table 4.2: 導出した動特性パラメータ

運動方向	M	C
Surge	116.4	550.0
Sway	92.6	1468.2
Yaw	6.65	2.29
Heave	150.4	1168.2

4.2 マニピュレータの動特性試験

開発したマニピュレータと AUV のシステムを用いて動作試験を行った．そのときの状況を Fig. 4.7 に示す．Fig. 4.8 に示すように各関節と AUV に LED マーカーを取り付け，関節 1 を 90 度駆動させたときのロボットの軌跡をモーションキャプチャシステムにより計測した．このときの結果を Fig. 4.9 に，同じ動作をさせたときのシミュレーションの結果を Fig. 4.10 に示す．

結果を比較すると，マニピュレータの軌跡はシミュレーション結果と一致しており，設計したとおりの性能が実現できていると考えられる．

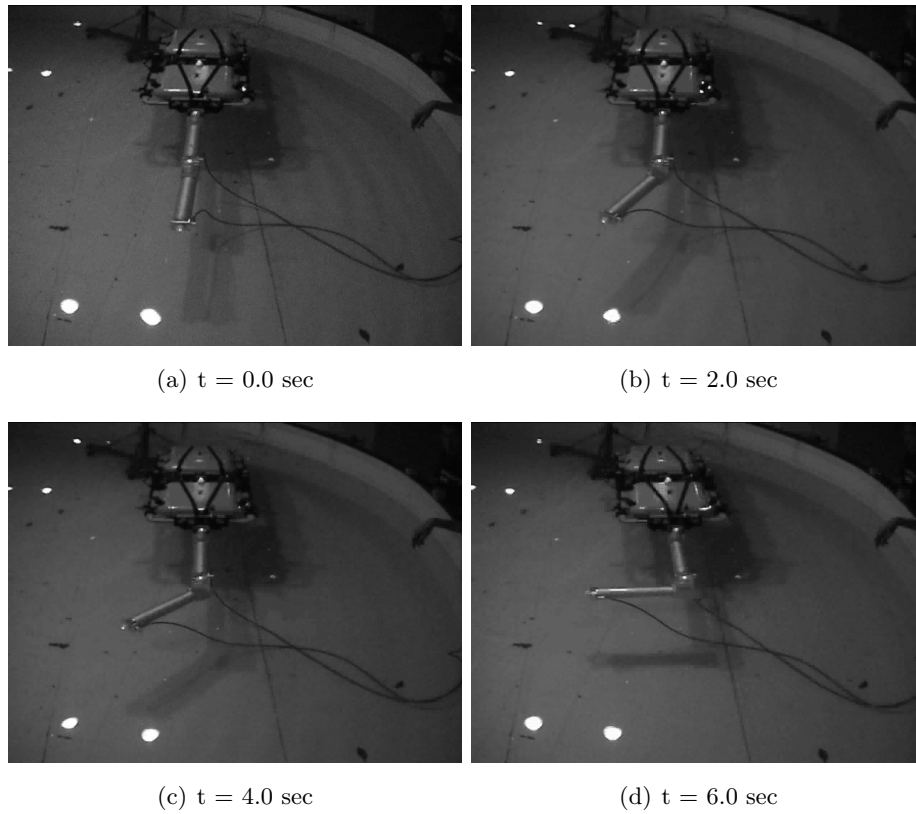


Fig. 4.7: マニピュレータの動作試験の様子

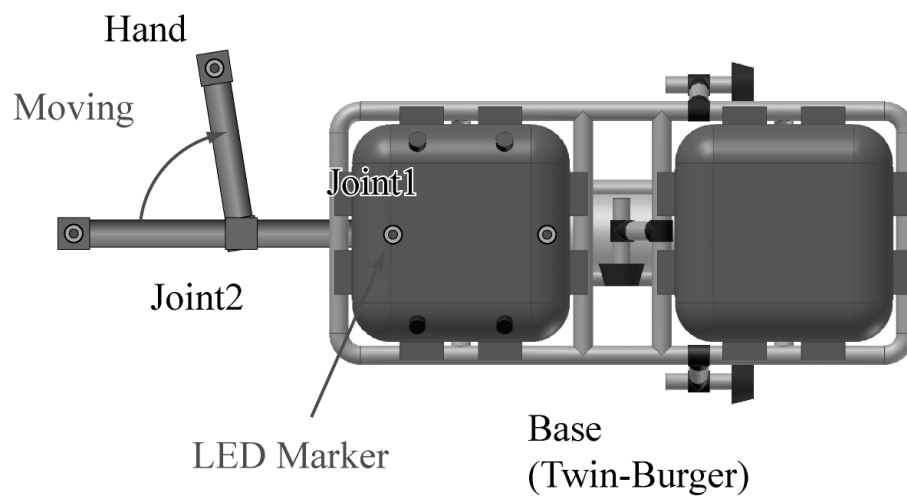


Fig. 4.8: マニピュレータの動作試験方法

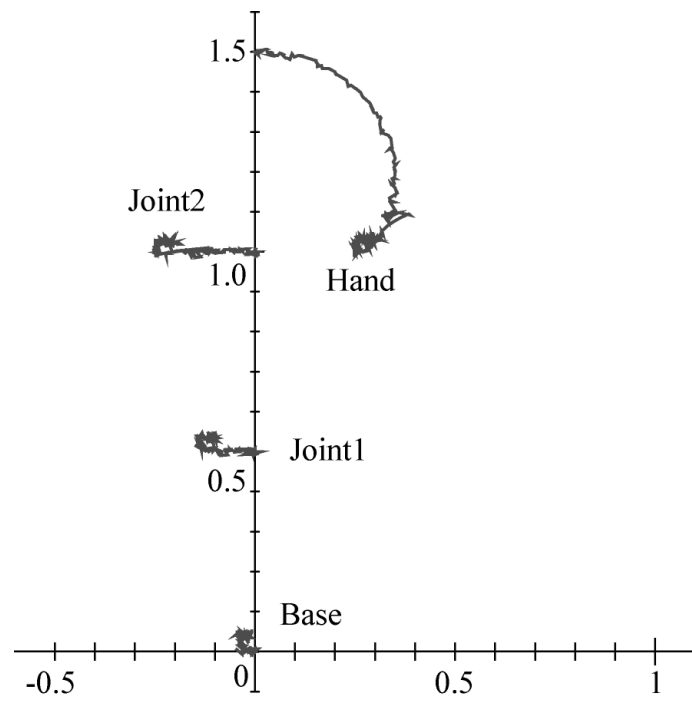


Fig. 4.9: マニピュレータの動作試験結果

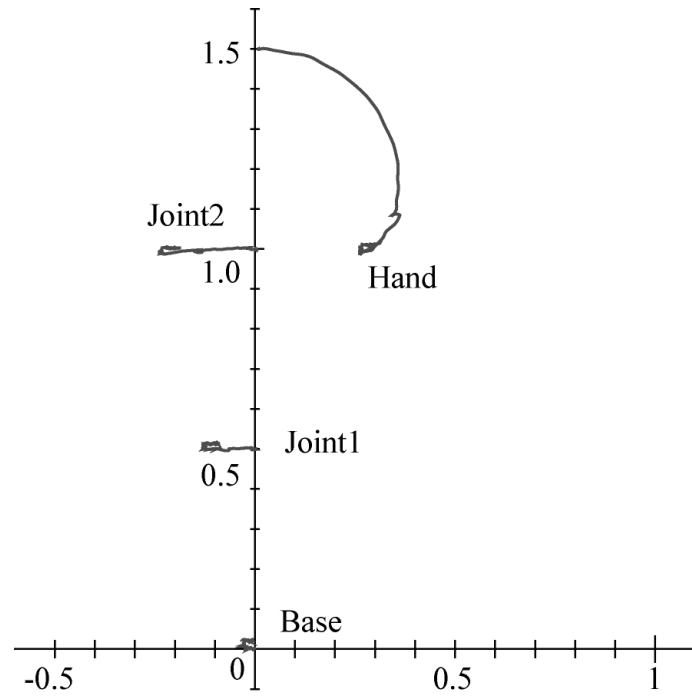


Fig. 4.10: 動作試験と同じ動きをさせた場合のシミュレーション結果

第5章

結論

第5章 結論

第二章でマニピュレータを搭載した水中ロボットの位置制御シミュレーションを行った．マニピュレータの手先は目標に到達しているものの，関節軸トルクをみると細かに振動しており，制御則のフィードバックゲインが大きすぎるためであり，まだ改善の余地が残っていると考えられる．

また，動的可操作性を用いて最終姿勢を決定する手法を提案し，シミュレーションによってその有効性を示した．マニピュレータが最適な姿勢を取った場合には x, y 両方向からの外乱に対して安定した補償性能を発揮している．提案した手先の目標位置のみを考慮しているため，静止流体中における補償性能のみを改善している．手先の目標移動経路に対する補償性能を求める場合には，運動中のマニピュレータが常に動的可操作性を大きく取るようにロボットが動作する必要がある．このように動作全般において，手先の補償性能を向上させることができる可能性がある．

第三章では，水中ロボット及びマニピュレータの開発に際して，モジュール化手法を提案し，ロボットの開発を行った．

マニピュレータに関しては，仕様を満たした設計・開発ができたものの，関節軸部が大型化してしまい，全体として質量の増加につながった．材質や機構の見直しを行うことで，より軽くて小型のマニピュレータを開発できれば，小型の水中ロボットの利点である機動性を損なうことなく，マニピュレータを搭載することができるだろう．また，マニピュレータのリンクごとのモジュール化手法は，ミッションに応じて様々な装置を取り付けたり，自由度を変更できる利点があり，今後の幅広い使用を期待できる．

Twin-Burger のシステムは以前に比べて整備性が格段に向上した．水中ロボットに限らず，水中で使用する機器はすべては防水加工や耐圧試験を行う必要がある．特に防水容器・耐圧容器は事前の試験が重要であるが，内部システムをモジュール化して取外しを容易にしたことで，容器のみの防水・耐圧試験を容易に行うことができるようになった．このため，システムの改変に伴う水中コネクタの変更のたびに必要だった，防水・耐圧試験を行う準備の時間が格段に短縮された．

本研究で開発した各モジュールの仕様は本研究で用いた水中ロボット専用の形状・仕様をとっている．これを規格化し，他のロボットにも容易に使用することができれば，第一章でも述べたように大量生産や開発時間の短縮などの様々な利点が生まれ，今後のロボット開発の労力を軽減することが可能になる．そのためには，今回提案した機能ごとに区分するモジュール化手法に加えて以下のような手法を同時に用いれば，モジュールの共通化がしやすいと考えられる．

- 最小デバイスの単位で，モジュール化を行う．
- 機能ごとに分割した単位で最小モジュールを接続するモジュールを作成する．

- 1, 2を組み合わせることで、機能ごとのモジュールを作成する。
 - 機構ごとに分割した単位で機能モジュールを接続するモジュールを作成する。
- 最小単位ごとにモジュール化するため、ロボットの開発時間は増大してしまうが、将来的に共通のモジュールが使用できれば、総合的な開発時間の減少につながる可能性が高い。

第四章では開発したロボットの動作試験を行った。マニピュレータの動作試験に関しては、さらに位置制御試験などを行い、第二章で提案した手法を実験において有効性を照明する必要がある。

ロボット本体の動特性パラメータの導出に関しては、非常に単純な付加質量と流体抗力項を用いた近似式であり、複雑な流体力を詳しく表現しているとは言い難い。流体力の近似精度はそのまま指令値生成に用いる運動方程式にえいきょうするため、より高精度の位置制御を行うのであれば、さらに細かい式を用いなければならないと考えられる。

本研究で開発した水中ロボットはハードウェア的な開発がほとんどで、実際の作業である“つかむ”や“はこぶ”などの動作を自立的に行うための手法までは及んでいない。実際の作業現場で活躍するためには

- 周囲の環境を認識するシステム
- 各作業に対応したハンドモジュールの開発
- 稼働時間の延長
- 作業員や他作業ロボットとのコミュニケーション
- 協調作業への対応
- 緊急時や事故時等の状況判断

など、様々なシステム開発が課題として残っている。これらの課題を一つ一つクリアしていくことができれば、将来、海洋開発の最前線でAUVが活躍することになるだろう。

参考文献

- [1] 芦寿一郎, 青池寛, 中村恭之, 斎藤実篤, 倉本真, 木下正高, 森田澄人, 角皆潤, 小島茂明, ピエール・アンリ: ”遠州灘沖第2 渥美海丘の地質構造と冷湧水”, 日本海洋研究開発機構 JAMSTEC 深海研究 第24号, pp.1-11, 2004
- [2] 東海大学海洋学部編: ”宇宙から深海底へ 図説海洋概論”, 講談社サイエンティフィク, 1997
- [3] (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
- [4] 山本, 柿倉ほか: ”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
- [5] 浦, 高川: ”海中ロボット総覧”, 成山堂書店, 1994
- [6] 浦環: ”海中に求められるロボット”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 no6, pp.2-6, 2004
- [7] 田代省三: ”有人潜水調査船”, 日本造船学会誌 no.883, pp79-83, 2005
- [8] 山本郁夫: ”「しんかい6500・かいこう」の開発”, 日本造船学会誌 no.885, pp.107-110, 2005
- [9] 渡邊正之, 橋本菊雄: ”10,000m 級無人探査機「かいこう」の活躍と亡失”, 日本造船学会誌 no.883, pp22-25, 2005
- [10] 浦環: ”全自動化への道”, 日本造船学会誌 no.883, pp86, 2005
- [11] 海洋研究開発機構: ”巡航探査機の世界新記録航続距離 317km を達成”, <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/PR/0503/0301/>, 2005
- [12] 青木太郎: ”深海巡航探査機の研究開発”, 電気通信大学紀要 19 巻 1・2 合併号, pp.7-117, 2006
- [13] S.Lerner, D.Fornari and B.Walden: ”The Alvin Frame-Grabber System DRAFT TECHNICAL REPORT”, Wood Hole Oceanographic Institution, 2003
- [14] 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
- [15] ”Ifremer Homepage”,
http://www.ifremer.fr/fleet/systemes_sm/engins/nautille/nautille.htm

- [16] 内田徹夫：“無人探査機「ドルフィン - 3 K」の軌跡”，日本造船学会誌 no.883, pp34-35, 2005
- [17] ”MBARI Homepage”,
http://www.mbari.org/dmo/vessels_vehicles/tiburion/specifications.html
- [18] ”広和株式会社 HP”, <http://www.kwk.co.jp/marine/index/rov.htm>
- [19] ”SEABOTIX Inc. Homepage”, <http://www.seabotix.com/products/tjg301.htm>
- [20] ”SAAB Seaeye Ltd. Homepage”, <http://www.seaeye.com/>
- [21] ”Ifremer Homepage”, http://www.ifremer.fr/fleet/systemes_sm/engins/victor.htm
- [22] P.Ridao, J.Yuh, J.Battle, K.Sugihara : ”On AUV control architecture”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2000 Vol.2, pp.855-860, 2000
- [23] J.Evans, P.Redmond, C.Plakas, K.Hamilton and D.Lane : ”Autonomous Docking for Intervention-AUVs using Sonar and Video-based Real-time 3D estimation”, OCEANS 2003. Proceedings Vol.4, pp.2201-2210, 2003
- [24] 村田智：“モジュラーロボットの研究”，日本ロボット学会誌 Vol.21 No.8, pp.830-831, 2003
- [25] 福田敏男：“モジュラーロボットの可能性”，日本ロボット学会誌 Vol.21 No.8, pp.829, 2003
- [26] 黒川, 吉田, 神村, 富田, 村田, 小鍛冶：“変形し移動する自立モジュール型ロボット (M-TRAN)”，日本ロボット学会誌 Vol.21 No.8, pp.855-859, 2003
- [27] 原楨真也, 林朗弘, 佐竹利文：“多関節ロボットの分散協調制御 - 回転・直動関節を有するロボットの逆運動学 -”, Proceedings of ROBOMECH2007, 2A1-L09, 2007
- [28] “ ロボカップ日本委員会 公式ホームページ ”, <http://www.robocup.or.jp/>
- [29] Amir A.F. Nassiraei, Yasunori Takemura, Atsushi Sanada, Yuichi Kitazumi, Yu Ogawa, Ivan Godler, Hiroyuki Miyamoto, and Ahmad Ghaderi : ”Concept of Mechatronics Modular Design for an Autonomous Mobile Soccer Robot”, Proc. of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 178-183, 2007
- [30] 石塚, 石井：“マニピュレータを搭載した水中ロボットの開発”，日本船舶海洋工学会論文 集 第 6 号, pp.35-43, 2008
- [31] 石塚, 石井, 大畑：“浅水域探査を目的とした小型水中ロボット及びマニピュレータの研究開発”，日本設計工学会 第 43 巻 第 3 号, pp.121-129, 2008

- [32] 藤井, 浦: "自律海中ロボット「ツインバーガー」の開発", Proc.Techno-Ocean'94, pp.421-426, 1994
- [33] 五百井, 伊藤: "水中マニピュレータのモデリングとシミュレーション", 日本ロボット学会誌 Vol.6 No.2, pp.160-166, 1988
- [34] S.Yamada, S.Sagara: "Resolved Acceleration Control of an Underwater Robotwith Vertical Planar 2-Link Manipulator'", Proc. 7th Int. Symp. Artificial Life and Robotics, pp.230-233, 2002
- [35] 日本機学会編: "機械工学便覧 A5 流体力学", 丸善, 1986
- [36] 田古里, 荒川: "流体力学", 東京大学出版会, pp.233-235, 1989
- [37] 足達, 吉田: "水中浮遊ロボットの作業領域と動的操作性", 日本ロボット学会誌 Vol.12 No.6, pp.863-871, 1994
- [38] 足達, 吉田: "流体抗力を考慮した水中浮遊ロボットマニピュレータの動的操作性", 日本ロボット学会誌 Vol.14 No.3, pp.415-421, 1996
- [39] Ishitsuka, Ishii, Sagara: "Dynamics Analysis and Resolved Acceleration Control of an Autonomous Underwater Vehicle Equipped with a Manipulator", Underwater Technology '04 C3-2, pp.277-281, 2004
- [40] J.Y.S.Luh, M.W.Walker, R.P.C.Paul: "Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans. A.C. Vol.25 No.3, pp.468-474, 1980
- [41] 石塚, 石井, 相良: "水中用マニピュレータの分解加速度制御", 第4回計測自動制御学会 SI 部門講演会 3A2-4, pp.734-735, 2003
- [42] 山田, 相良, 田村: "垂直駆動型2リンク水中ロボットの分解加速度制御実験'", 日本機械学会 ROBOMEC'02 講演論文集 (CD-ROM), 1A1-A07, 2002
- [43] ダニエル T・バナック, トラビス・ジョーンズ: "Autodesk Inventor で始めるメカニカル設計", トムソンラーニング, 2003
- [44] 石塚, 石井, 相良: "水中用マニピュレータの開発及びAUVへの搭載と制御", 第5回計測自動制御学会 SI 部門講演会 2K4-3, pp.789-790, 2004

謝辞

本稿を終えるにあたり，COE マルチスチューデントプログラムのみならず，懇切なる御指導・御校閲頂きました山川烈教授，石川眞澄教授，ならびに，本研究のきっかけとなり多大なる御指導を賜りました相良慎一准教授に深謝いたします。

また，研究会や学会をはじめとした様々な研究・学習の場を与えていただいた東京大学の浦環教授，実験を中心に何かと御協力いただき，ロボット開発に御指導を賜りました東海大学の渡邊啓介准教授，細かい御校閲や御助言を賜りました北九州市立大学の山本郁夫教授に感謝いたします。

そして五年もの長い期間，公私にわたり終始御指導や御助言を頂きました石井和男准教授と石井研究室の学生諸君に心よりの感謝の意を表します。

最後になりますが，都合十年もの私の大学生活を支えてくれた父と母に心からの感謝の念を表して，謝辞とさせていただきます。

付録

付 録 A 流体力項の計算方法

ここでは本論文における流体力の取り扱いや導出方法に関して示す．

A.1 流体力の近似

世の中に存在する物質は固体・液体・気体のいずれかの状態で存在している．このうち自由に形状が変化できる液体と気体の状態を流体と呼ぶ．物体が流体中で運動を行う場合周囲の流体から様々な力を受けており，本研究で扱う水中ロボットも例外ではない．

水中ロボットの運動を表現するに当たり，詳細な流体力を用いることが望ましいが，複雑な流体力を表現することが非常に困難である．そのため，本研究では水中ロボットの流体力を簡単な数式で近似して用いることにする．

水中における物体の運動を簡単に表したものを Fig. A.1 に示す．

図に示すように，流体中で運動する物体には大きく分けて二種類の流体力が影響する．一つは物体周辺の流体が運動に伴って動くことにより，見掛けの質量・モーメントが増加する付加質量・付加慣性モーメント項，もう一つは一般的に水の抵抗と呼ばれる，相対速度の二乗に比例して反対方向に作用する流体抗力である．

これらの項のみを考慮した水中での物体の運動を表現すると以下ようになる．

$$F = (M + M_{add})\dot{v} + C|v|v$$

ただし，

M : 物体の質量

v : 物体の速度

M_{add} : 付加質量

C : 流体抗力に関する係数

である．このうち C は流体力学における流体抗力係数 C_D とは違うので注意されたい．この式における M_{add} と C を求めることであれば，流体中における物体の運動を近似できる．

なお，本章で用いる水のパラメータは Table A.1 に示す値を用いるものとする．

A.2 付加質量・付加慣性モーメント

物体が流体中で運動を行う場合，周囲の流体を動かすための余分な力が必要になる．これは物体の質量があたかも増加したかのように影響し，見掛けの質量（付加質量）と呼ばれる．また，回転運動の場合には見掛けの慣性モーメント（付加慣性モーメント）が生じる．

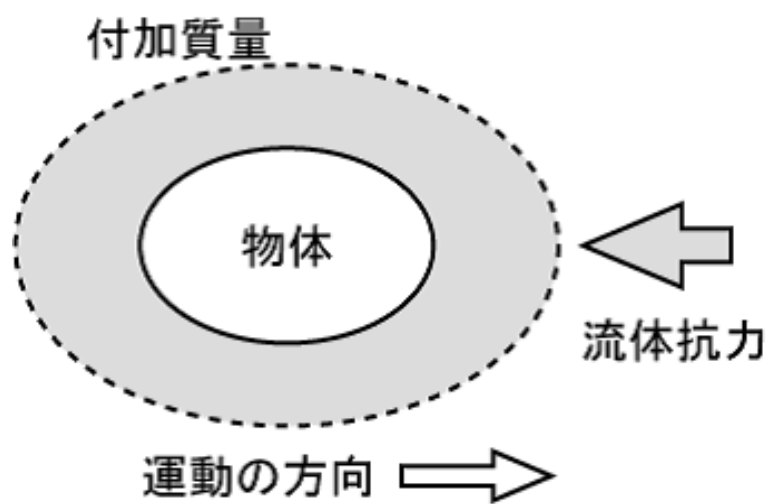


Fig. A.1: 流体中における物体の運動と流体力

Table A.1: 水の物性値

圧 力	—	1 [atm]
温 度	—	20 [°C]
密 度	ρ	998.22 [kg/m ³]
粘 度	μ	1002.6 [Pa · s]
動粘度	ν	1.004×10^{-6} [m ² /s]

付加質量・付加慣性モーメントは，平板や円柱などの代表的な形状に関して一般化された算出式が求められている．Table A.2 に代表的な形状に関する付加質量の算出方法をまとめる．付加慣性モーメントに関しては，付加質量を用いて慣性モーメントの算出を行えばよい．

例えば，マニピュレータの形状を単純な円柱形状と近似し，2.2 に示す Link1 の M_y のパラメータを求めると，

$$\begin{aligned} M_y &= \frac{1}{4}\pi\rho l^2 w \\ &= \frac{1}{4}\pi \times 998.22 \times (0.12)^2 \times 0.50 \\ &= 5.64 \end{aligned}$$

以上のように算出できる．

同様に付加慣性モーメント I_z に関しては，単純な柱形状であれば回転中心を起点に長さで積分すればよいので，

$$\begin{aligned} I_z &= \int_0^w \frac{1}{4}\pi\rho l^2 \\ &= \int_0^{0.50} \frac{1}{4}\pi \times 998.22 \times (0.12)^2 \\ &= 0.47 \end{aligned}$$

以上のように算出できる．

A.3 流体抗力

流体中で運動する物体には，物体と流体の相対速度に関する流体力が作用する．このとき，流体抗力 F_D は相対速度 v と流体抗力係数 C_D を用いて

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \\ F_D &= \frac{1}{2}C_D\rho v^2 A \end{aligned}$$

以上のように表すことができる．ただし， A は代表面積（物体の流れに垂直な面に対する投影面積）を示す．

この式より，流体抗力の表現には抗力係数 C_D が必要ながわかる．この抗力係数は物体の形状とレイノルズ数 Re によって決まる係数であり，代表的な形状に関しては抗力係数が実験的に求められている．このうち，レイノルズ数は以下の式から算出できる．

$$Re = \frac{vw}{\nu} \quad (A.1)$$

ただし， w は代表長さであり，柱形状においては柱の長さが代表長さにあたる．

代表的な物体形状に関するレイノルズ数と抗力係数を Table A.3 に示す．

Table A.2: 一般的な形状の付加質量算出式

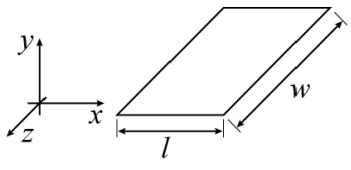
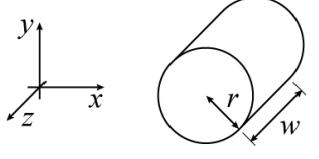
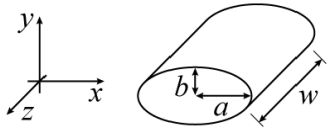
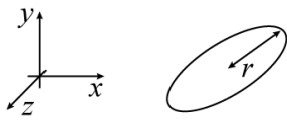
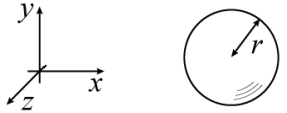
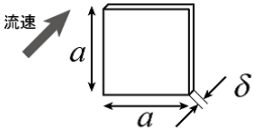
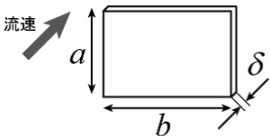
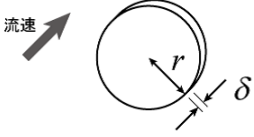
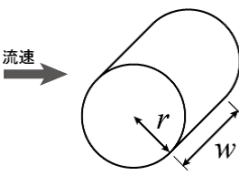
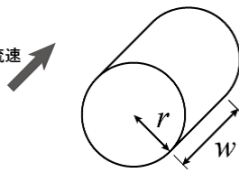
	形状	x 軸方向	y 軸方向
平板		$M_x = 0$	$M_y = \frac{1}{4}\pi\rho l^2 w$
円柱		$M_x = \pi\rho r^2 w$	$M_y = \pi\rho r^2 w$
楕円柱		$M_x = \pi\rho b^2 w$	$M_y = \pi\rho a^2 w$
円板		$M_x = 0$	$M_y = \frac{8}{3}\pi\rho r^3$
球		$M_x = \frac{2}{3}\pi\rho r^3$	$M_y = \frac{2}{3}\pi\rho r^3$

Table A.3: 一般的な形状の抗力係数

形状	寸法の割合	代表面積	レイノルズ数	抗力係数
<div>平板</div>  	$\delta = 0.01a$	a^2	3.9×10^5	1.14
	$\frac{a}{b} = 2$	ab	$0.3 \sim 3.9 \times 10^5$	1.15
	$= 5$			1.22
	$= 10$			1.27
	$= 20$			1.50
	$= \infty$			1.86
<div>円板</div> 	$\delta = 0.01d$	πr^2	9.6×10^5	1.12
<div>円柱</div>  	$\frac{w}{2r} = 1$	$2wr$	0.9×10^5	0.64
	$= 2$			0.68
	$= 5$			0.76
	$= 10$			0.80
	$= 20$			0.92
	$\frac{w}{2r} = 0.5$	πr^2	3.6×10^5	1.00
	$= 1.0$			0.84
	$= 2.0$			0.76
	$= 4.0$			0.78
	$= 6.0$			0.80
	$= 7.0$			0.88

例えば，マニピュレータの形状を単純な円柱形状と近似し，2.2 に示す Link1 の C_D のパラメータを求める．まず，適用速度域をレイノルズ数から算出する．式 A.1 より

$$\begin{aligned} v &= \frac{Re\nu}{w} \\ &= \frac{0.9 \times 10^5 \times 1.004 \times 10^{-6}}{0.5} \\ &= 0.18 \end{aligned}$$

以上より，流速が 0.2 [m/sec] 近辺であれば表 A.3 における C_D 値が適用できることが分かる．このとき円柱の外形は

$$\begin{aligned} \frac{w}{2r} &= \frac{0.5}{2 \times 0.06} \\ &= 4.17 \end{aligned}$$

となるため，表より $C_D = 0.76$ を用いて計算を行う．

$$\begin{aligned} F_D &= \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \\ &= \frac{1}{2} \times 0.76 \times 998.22 \times v^2 \times 2 \times 0.5 \times 0.06 \\ &= 22.76 v^2 \end{aligned}$$

以上のように速度の二乗に比例する形で流体抗力が近似できる．

ただし，これらの計算は，ロボットの形を単純形状とみなした上で，近似式を用いて流体力を求めている．モデル化誤差を抑えるためには，はさらに精度の高い式を用いて，実際の形状に則した計算を行う必要がある．

付 録 B マニピュレータの設計図

ここでは第 3 章で設計したマニピュレータの設計図と使用した部品表を示す．

B.1 設計図

設計・製作した部品の一覧表を Table B.1 に，すべての図面を巻末に示す．設計および図面の出力は Autodesk Inventor を用いた．

B.2 部品表

Table B.2 に購入・使用した一覧表を示す．

Table B.1: 構成部品一覧

部品名	素材	数量	図面番号
Bolt _ Left	アルミ	8	B-01
Bolt _ Right	アルミ	8	B-01
Cap _ under	アルミ	2	B-02
Cap _ upper	アルミ	2	B-03
Flange _ 12	アルミ	2	B-04
GearBox	アルミ	2	B-05
GearHolder1	アルミ	2	B-06
GearHolder2	アルミ	2	B-07
GH _ Plate1	アルミ	2	B-08
GH _ Plate2	ABS	2	B-09
GH _ tensioner	ABS	2	B-10
Mag _ Cover	アルミ	2	B-11
Mag _ coupling	アルミ	2	B-12
Pipe _ End	アルミ	2	B-13
Pipe _ Main	アルミ	2	B-14
Pipe _ shaft	ステンレス (s45c)	8	B-15
MainShaft	アルミ	2	B-16
Shaft1	アルミ	2	B-17
Shaft2	アルミ	2	B-17
UB _ MainBox	アルミ (A6063)	2	B-18
UB _ Stopper	ステンレス (s45c)	2	B-19
UB _ UnderCap	アルミ	2	B-20
UB _ UpperCap	アルミ	2	B-21
Motor _ Cap	アルミ	2	B-22

アルミは表記が無い場合 , JIS 規格 A5052 相当品を使用する .

Table B.2: 購入部品一覧

品名	規格	発注先	数量
Motion Controller	MCDC2805	FAULHABER	2 [個]
シリアルデバイスサーバ	Nport5210	MOXA	2 [個]
MIL ソケットコネクタ	HIF3BD-10PD-2.54R-MC	FACE	2 [個]
マグネットカップリング	281/282	マグナ	2 [個]
オイルシール	UE 型 35-48-8	武蔵オイルシール工業	2 [個]
O リング 1 種 A	G-40	日本シール精工	2 [個]
O リング 1 種 A	G-70	日本シール精工	4 [個]
O リング 1 種 A	G-85	日本シール精工	4 [個]
O リング 1 種 A	G-90	日本シール精工	4 [個]
O リング 1 種 A	JASO-F404 1033	日本シール精工	2 [個]
水中コネクタ / ストレートコネクタ	R04-P12M -6.3	FACE	2 [個]
水中コネクタ / パネルマウント	R04-R12F	FACE	2 [個]
水中コネクタ / 防水キャップ	R04-CR7	FACE	2 [個]
ベアリング / 小径玉軸受	B695ZZ	FACE	10 [個]
ベアリング / 深溝玉軸受	B6804ZZ	FACE	2 [個]
ベアリング / 深溝玉軸受	B6902ZZ	FACE	2 [個]
ハイトルクタイミングプーリ	HTPA18 S2M040-K-P5	FACE	4 [個]
ハイトルクタイミングベルト	HTBN100 S2M40	FACE	2 [本]
C リング	STWS5	FACE	2 [個]
300V スーパーシールドケーブル	NANB-25-5P-10	FACE	10 [m]
スラストニードルベアリング	NTB2035	RS	2 [個]
ウォームギア	SWG1-R1	RS	2 [個]
ウォームホイール	AG1-40R1	RS	2 [個]
DC モータ	RE25+GP26A+HEDL5540	maxon Japan	2 [組]
ステン割りピン	4×25	-	2 [個]
ステンキャップボルト	M3×6[mm]	FACE	1 [箱]
ステンキャップボルト	M3×8[mm]	FACE	1 [箱]
ステンキャップボルト	M3×12[mm]	FACE	1 [箱]
ステンキャップボルト	M4×8[mm]	FACE	1 [箱]
ステンキャップボルト	M4×12[mm]	FACE	2 [箱]
ステンキャップボルト	M4×16[mm]	FACE	1 [箱]
ステンキャップボルト	M3×8[mm]	FACE	1 [箱]
ステンワッシャー	M3	FACE	1 [袋]
ステンワッシャー	M4	FACE	1 [袋]
ステンスプリングワッシャー	M3	FACE	1 [袋]
ステンスプリングワッシャー	M4	FACE	1 [袋]
位置決めボルト	M3×6[mm]	FACE	1 [袋]

付 録 C 各モジュールの設計図

ここでは第 3 章で設計した各モジュールを含めたデバイス群を示す．

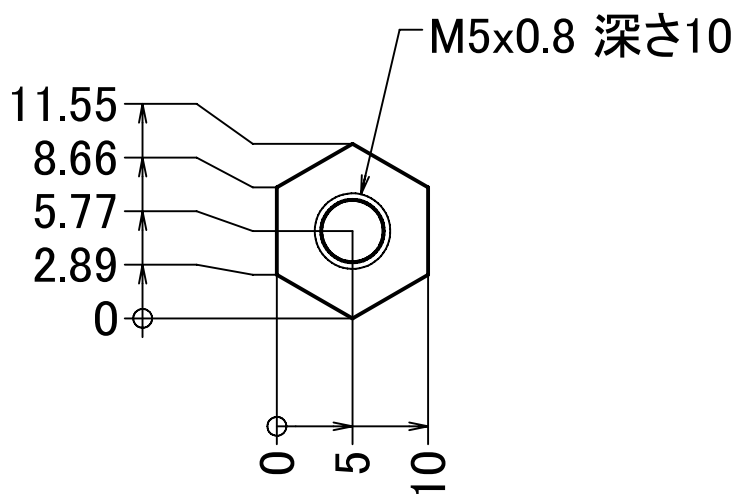
C.1 開発したモジュール群

設計・製作した各モジュール図面を巻末に示し，一覧表を Table C.1 に示す．設計および図面の出力は Autodesk Inventor を用いた．

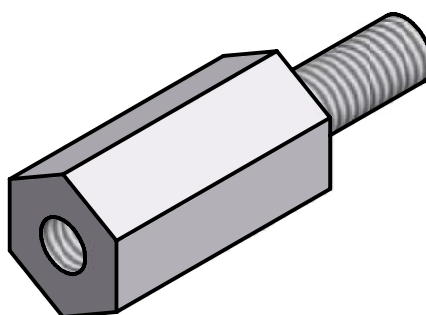
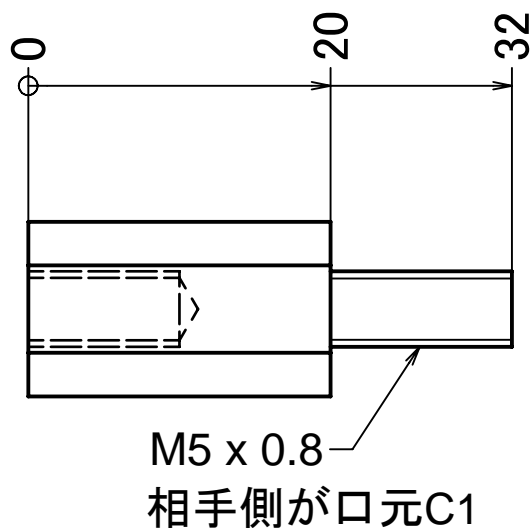
Table C.1: モジュール図面一覧

モジュール名	構成デバイス	構成部品材質	図面番号
ジャイロセンサモジュール	6 軸ジャイロセンサ	アルミ, ABS	C - 01
LAN-HUB モジュール	LAN-HUB	NC ナイロン	C - 02
超音波センサモジュール	超音波センサ 姿勢センサ	ABS NC ナイロン	C - 03
USB-HUB モジュール	USB-HUB	NC ナイロン	C - 04
Hull1 用メインフレーム	-	アルミ, ABS	C - 05
モータドライバモジュール	モータドライバ (× 5)	アクリル, ABS	C - 11
D/A コンバータモジュール	D/A コンバータ回路	アクリル, ABS	C - 12
DC/DC コンバータモジュール 1	DC/DC コンバータ (× 3)	アクリル, ABS	C - 13
DC/DC コンバータモジュール 2	DC/DC コンバータ (× 2)	アクリル, ABS	C - 14
Hull2 用メインフレーム	-	アルミ	C - 15

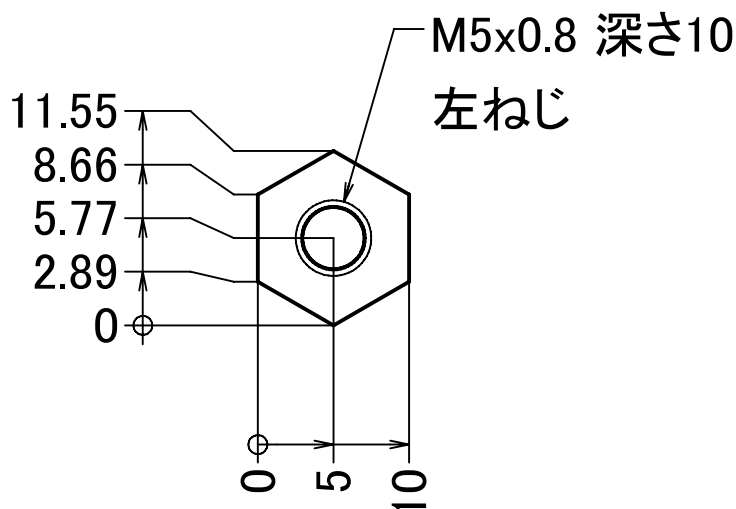
Bolt_Right



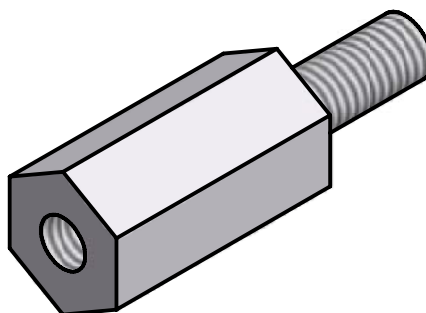
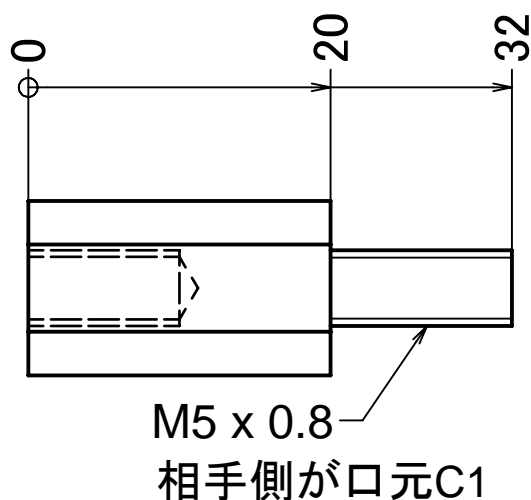
対辺10mmの正六角形



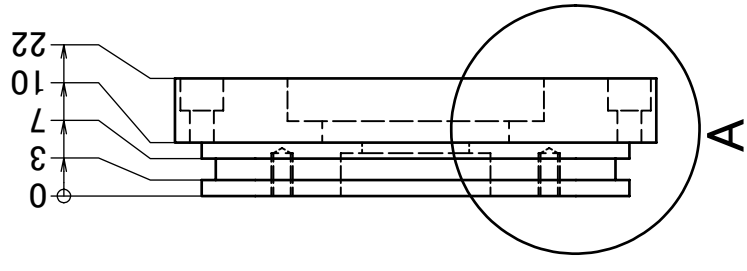
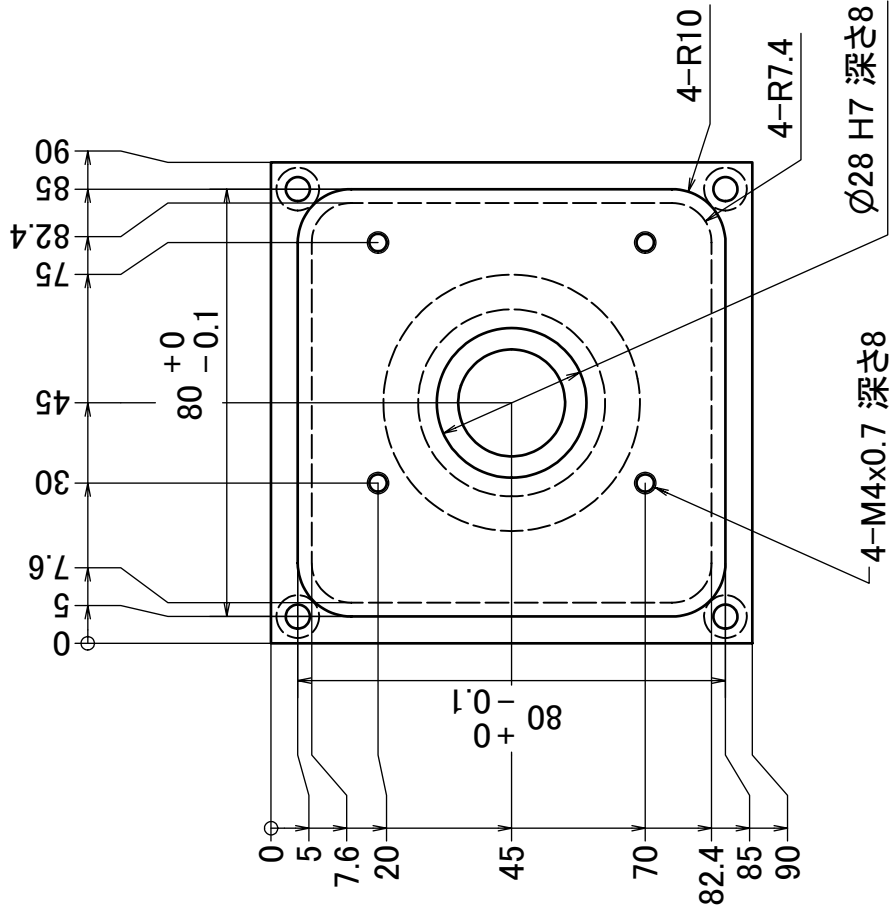
Bolt_Left



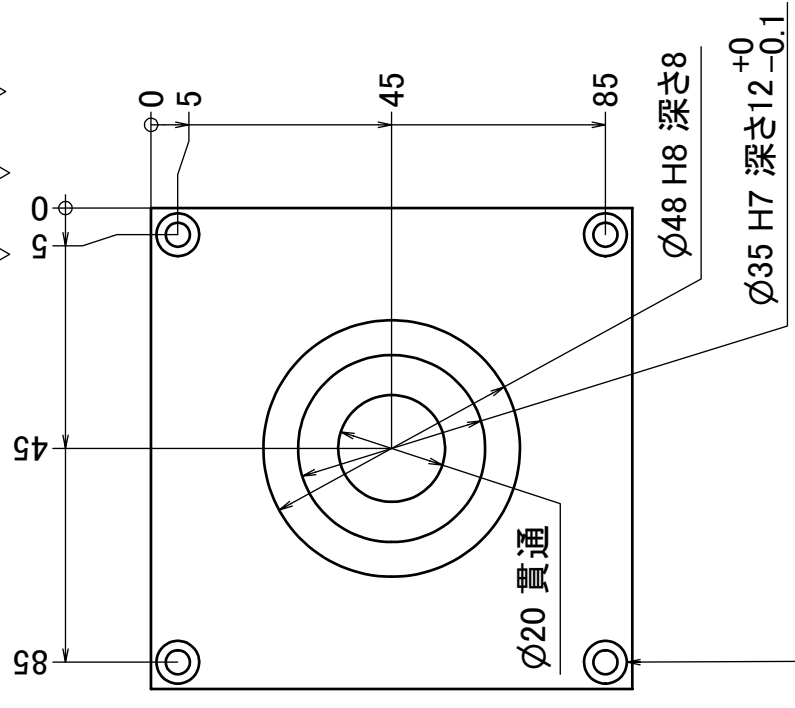
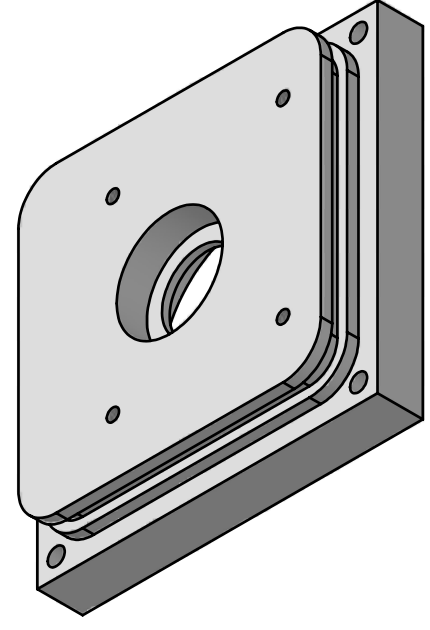
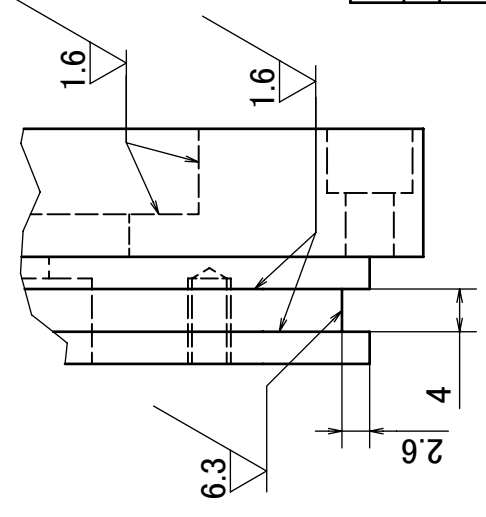
対辺10mmの正六角形



<材質> アルミ	<必要数> 各 4	<手配数量> 各 14	<処理> 処理不要
作成者			Bolts
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/05	提出日	B-01

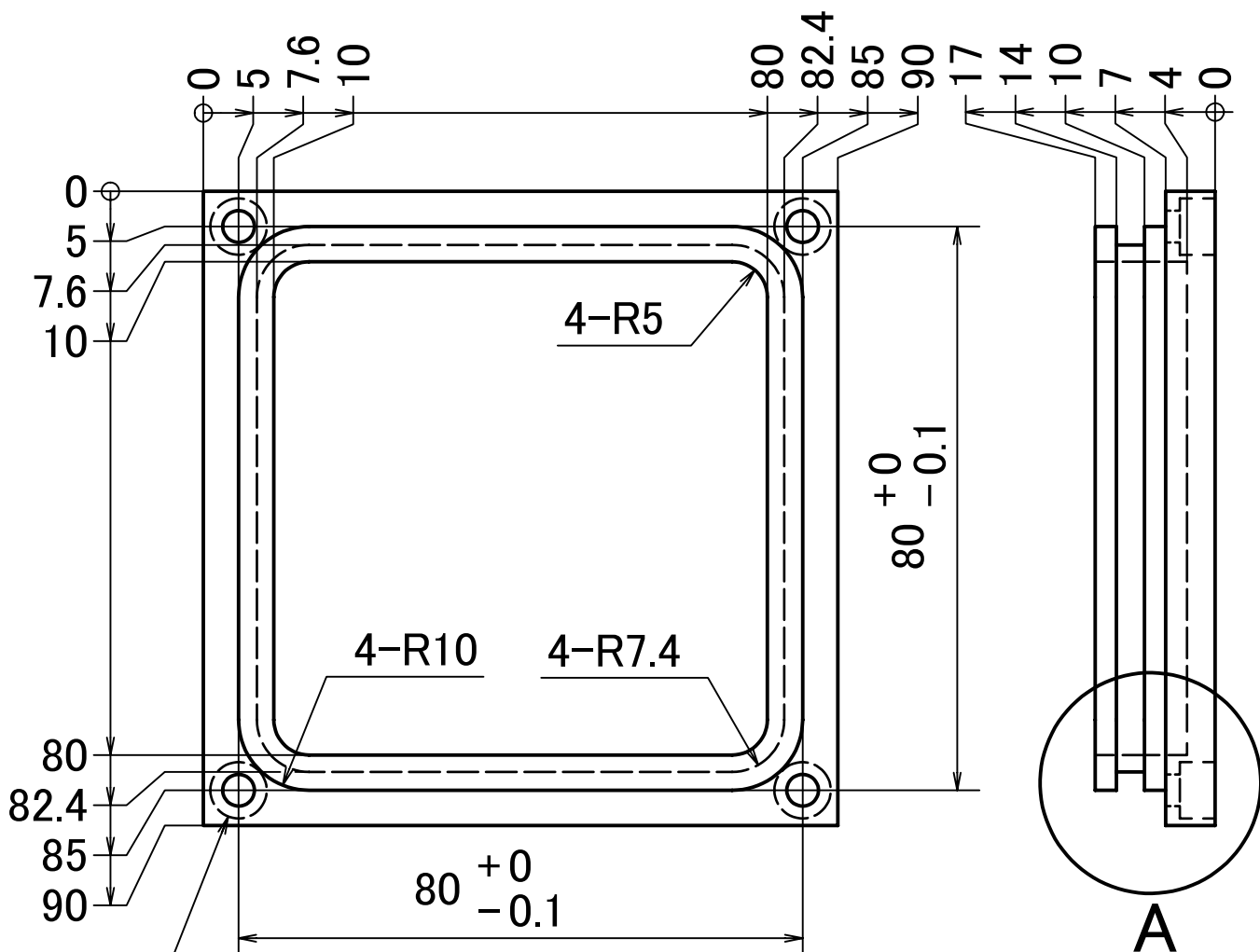


A (2:1)

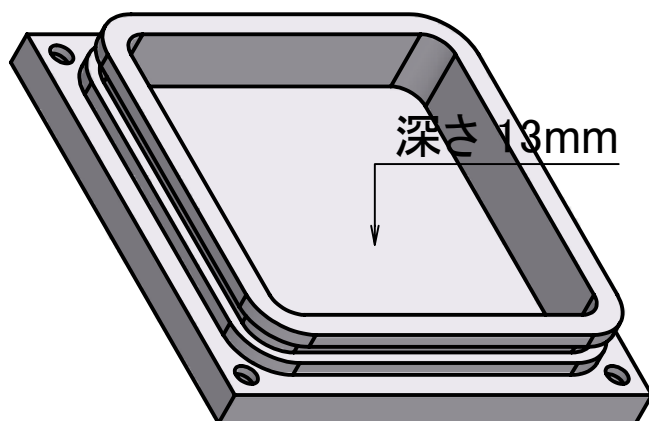


4-Ø4.5 貫通, 8 ズグリ 深さ 6

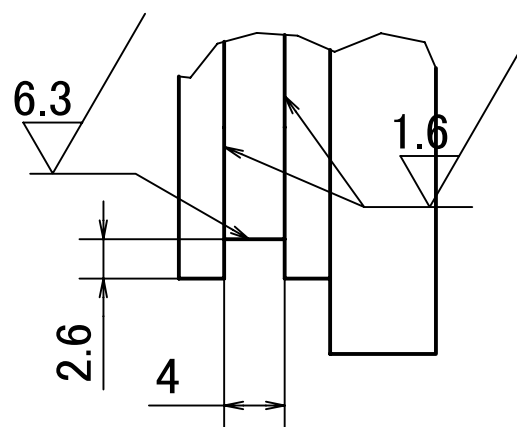
＜材質＞	アルミ	＜必要数＞	1	＜手配数量＞	3	＜処理＞	処理不要
作成者				Cap_under			
九工大 石井研究室 石塚 誠	作成日	提出日		B-02			
TEL&FAX 093-695-6102	2004/12/24						



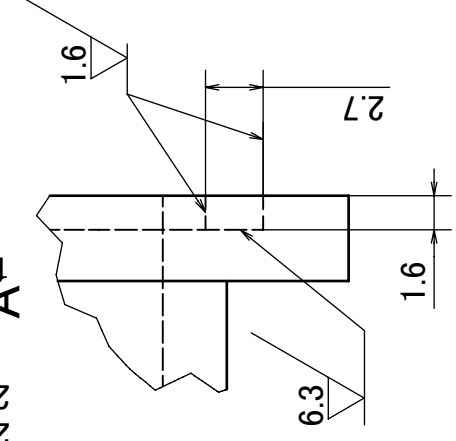
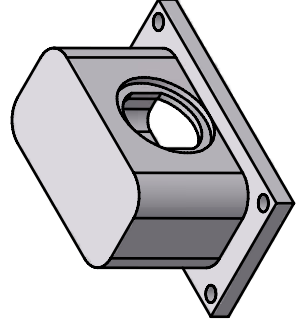
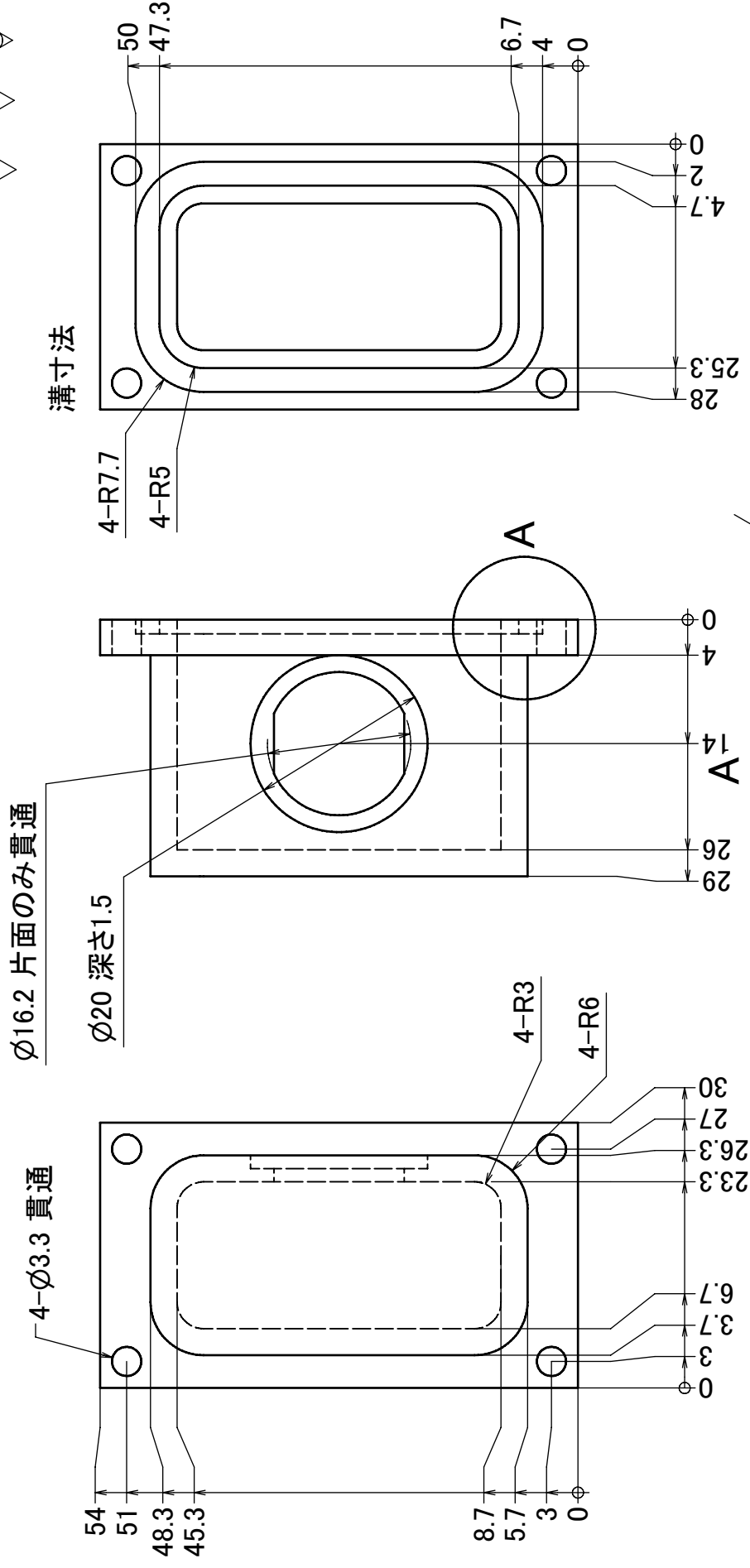
(裏より)4- ϕ 4.5貫通, 8ざぐり 深さ5



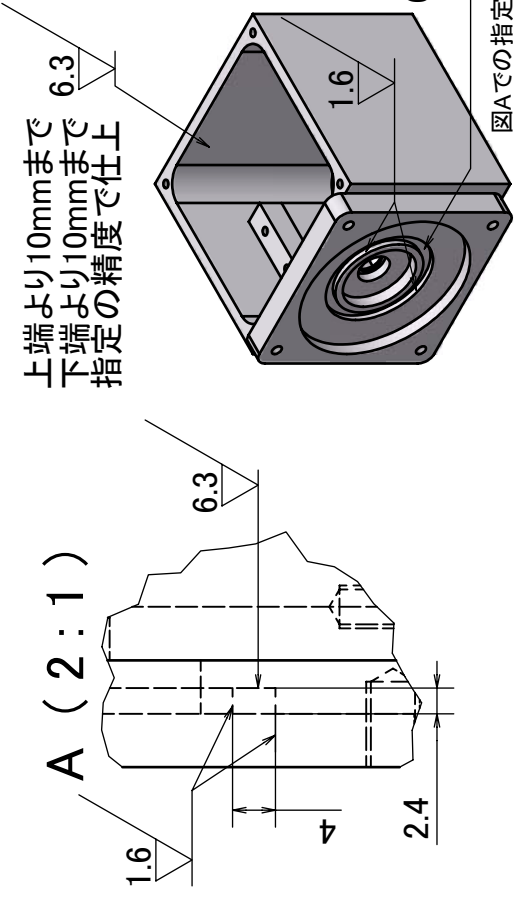
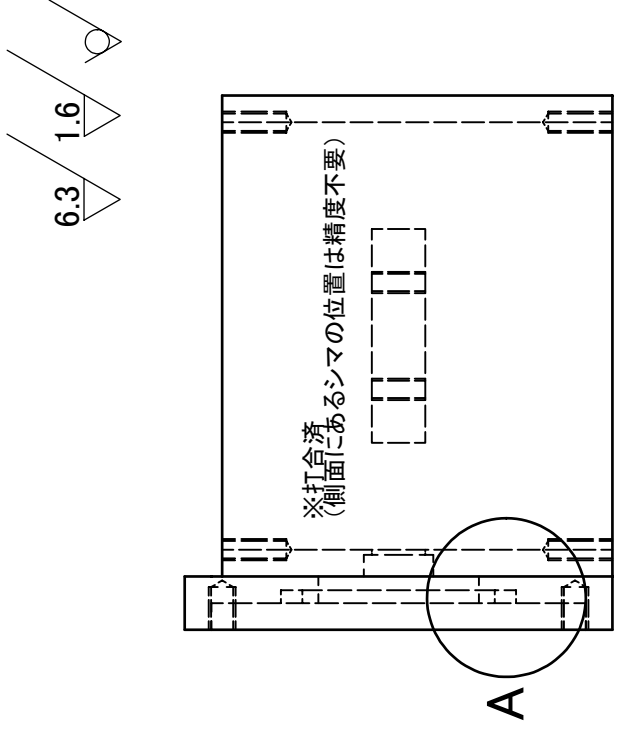
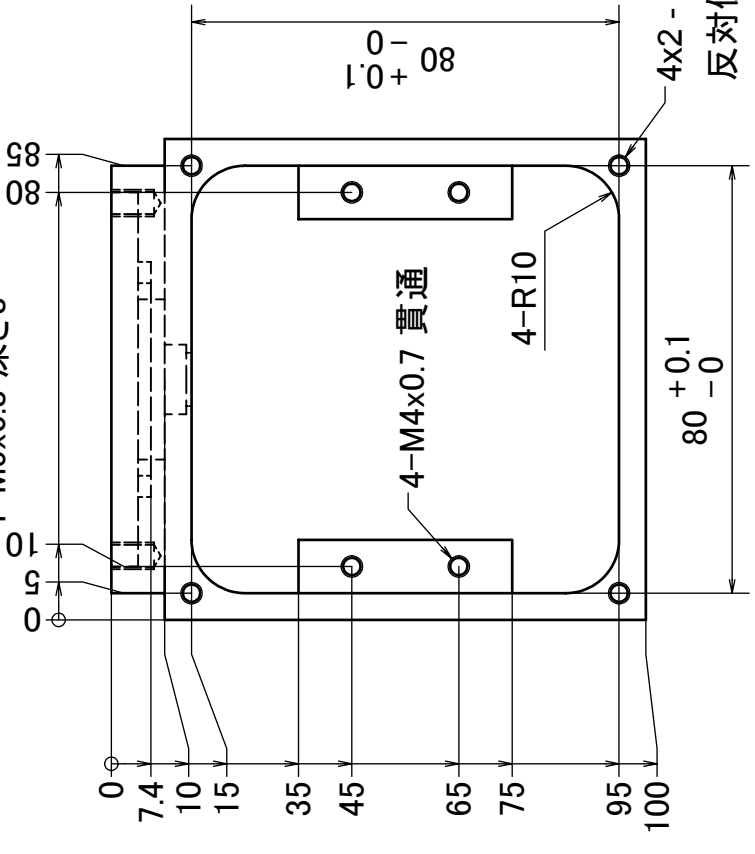
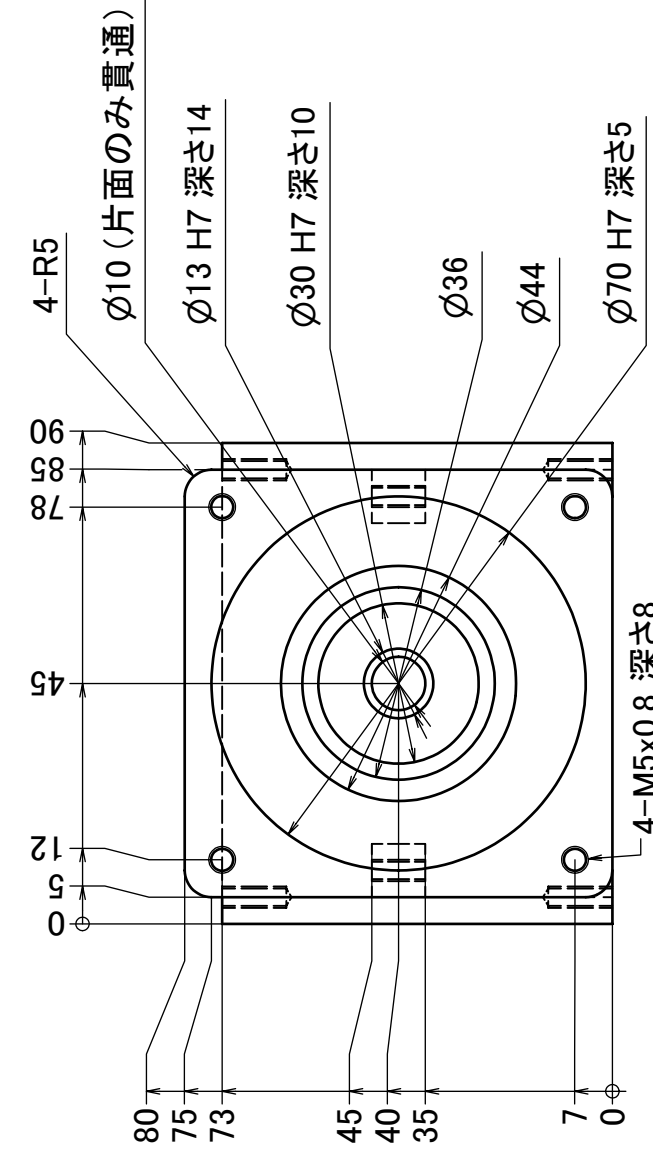
A (2:1)



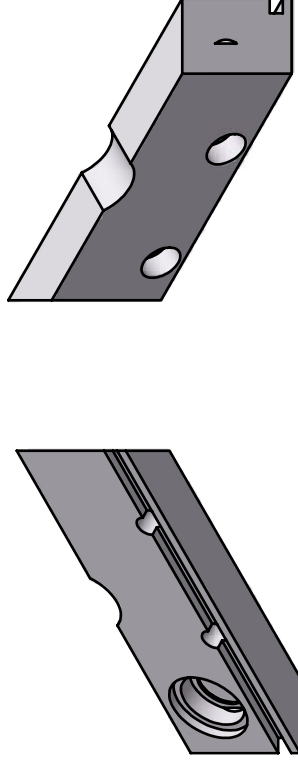
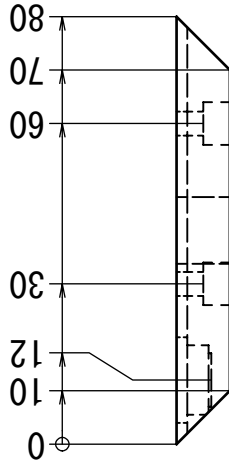
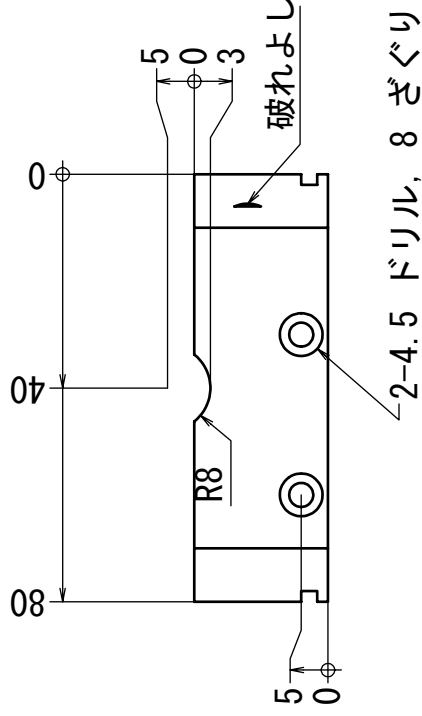
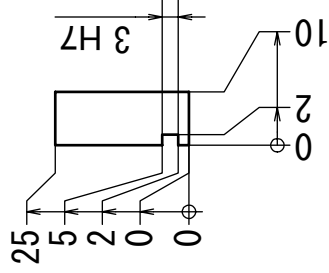
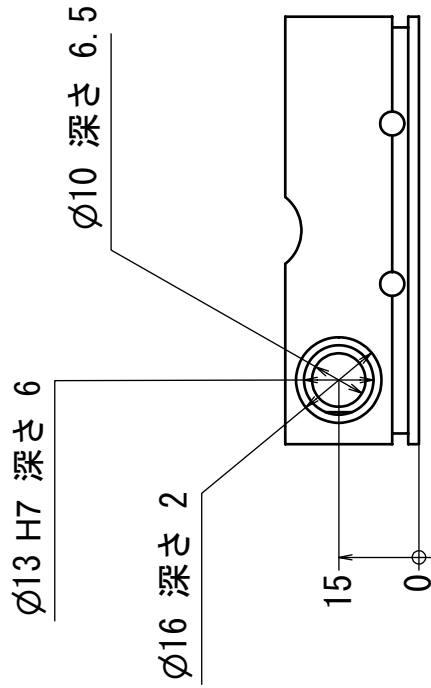
<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			Cap_upper
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2004/12/27	提出日	B-03



＜材質＞	アルミ	＜必要数＞	1	＜手配数量＞	3	＜処理＞	処理不要
作成者							Flange_12
九工大 石井研究室 石塚 誠	作成日		提出日				
TEL&FAX 093-695-6102		2005/01/18		B-04			



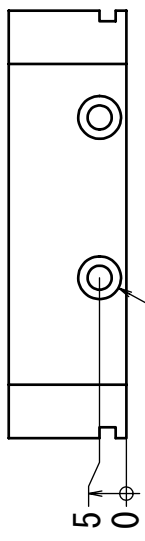
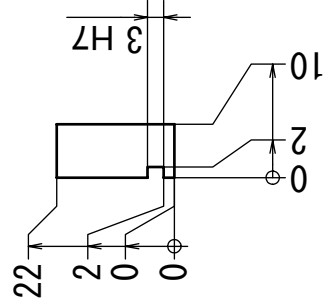
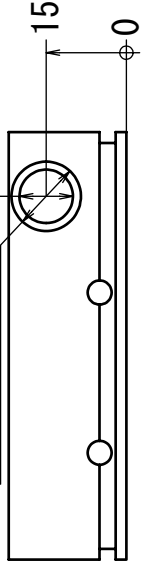
＜材質＞	アルミ	＜必要数＞	1	＜手記数量＞	3	＜処理＞	処理不要
作成者							GearBox
九工大 石井研究室	作成日	提出日					
石塚 誠	2004/12/24						
TEL&FAX 093-695-6102							
B-05							



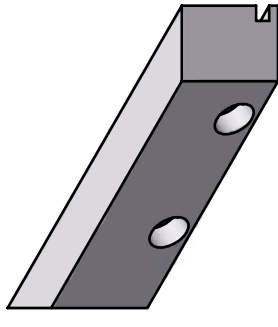
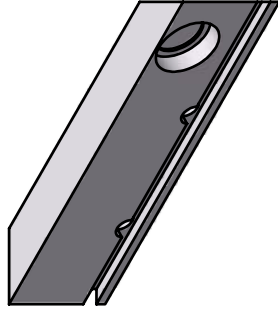
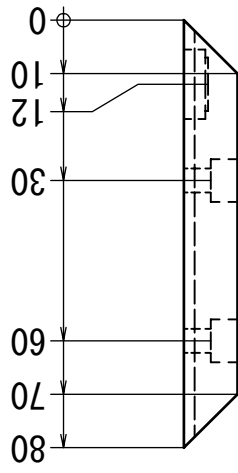
<材質>	アルミ	<必要数>	1	<手配数量>	3	<処理>	処理不要
作成者							
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日			提出日			
	2004/12/06						
						GearHolder1	
						B-06	

Ø10 深さ 4.5

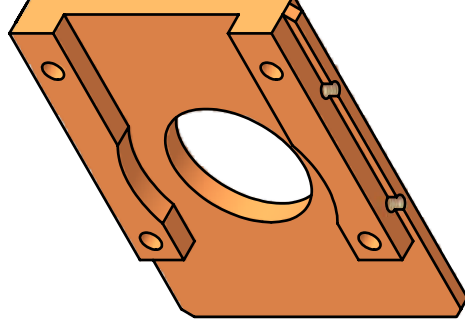
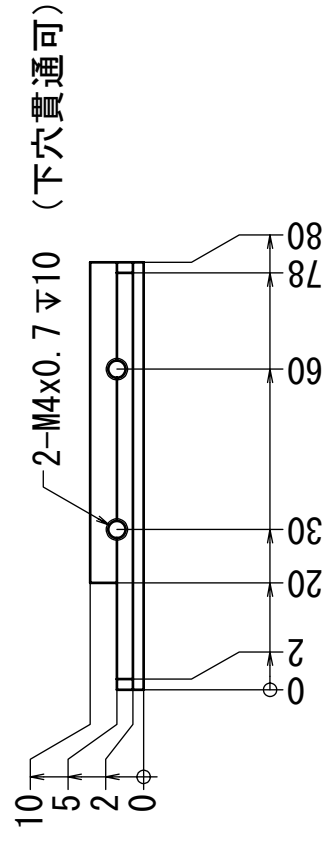
Ø13 H7 深さ 4



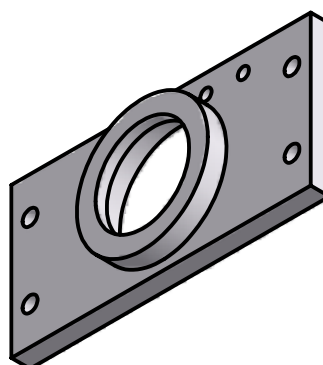
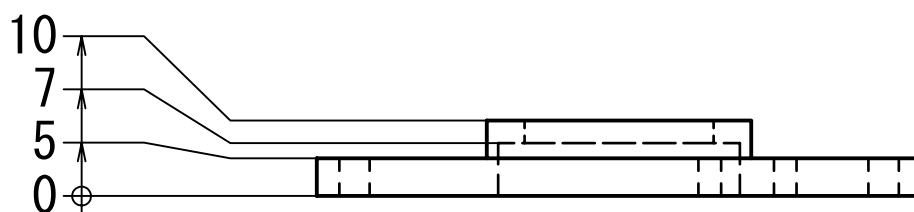
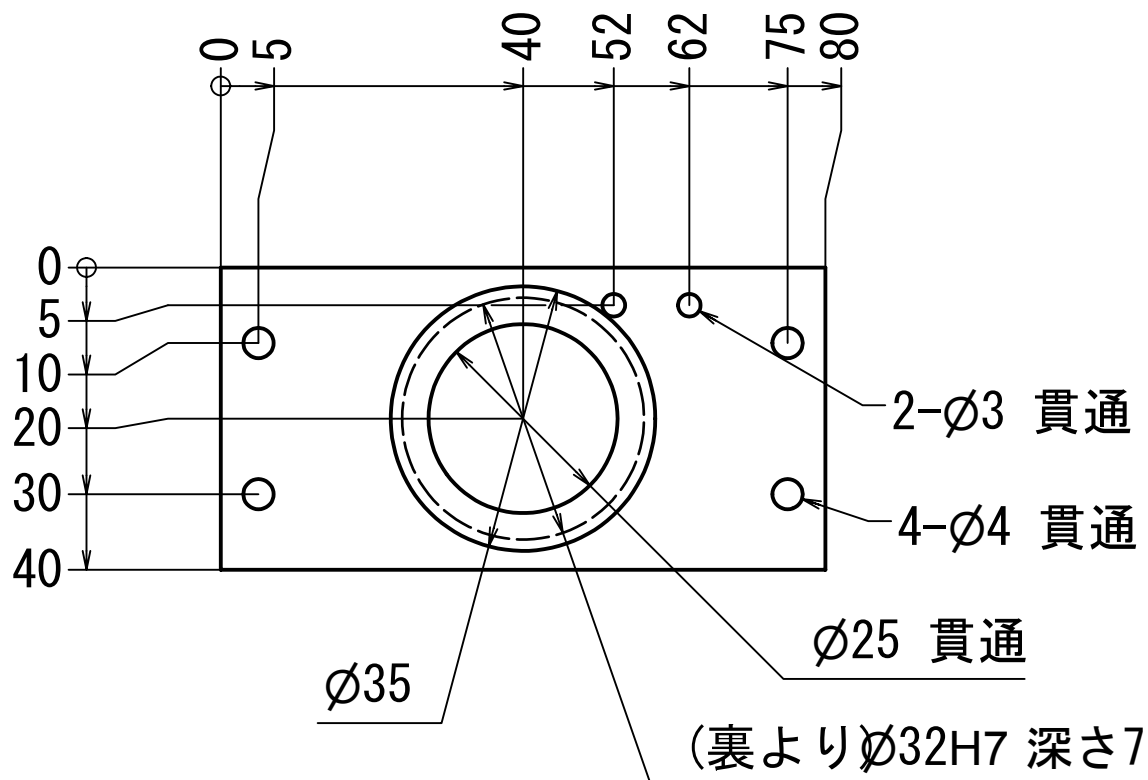
2-4.5 ドリル, 8 ざぐり 深さ 5



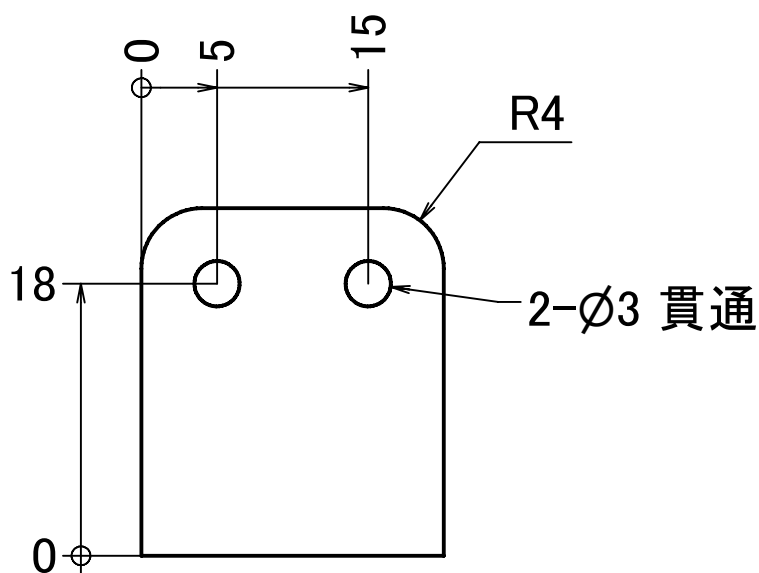
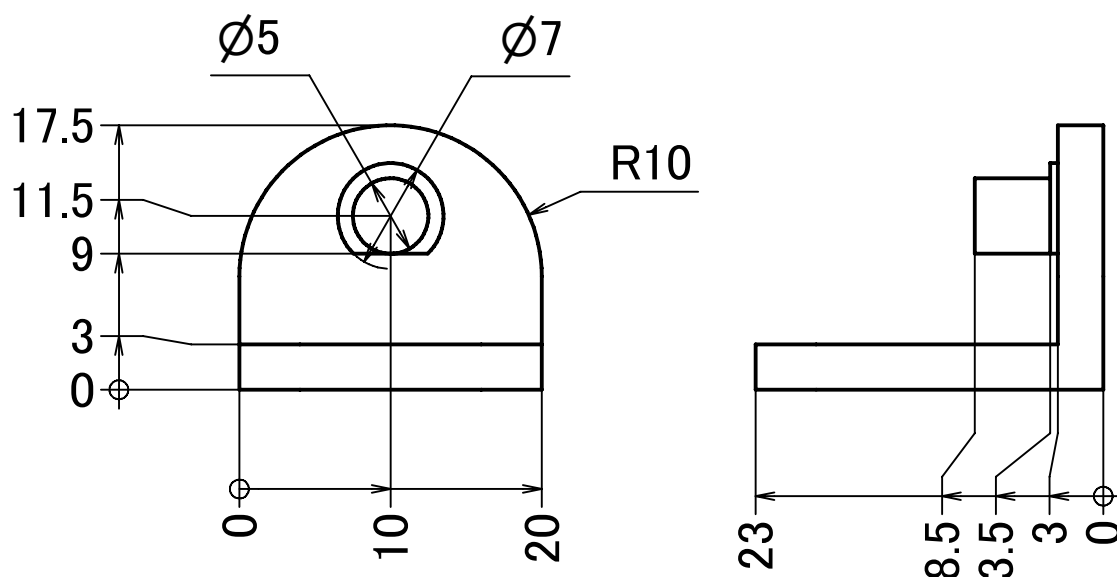
<材質>	アルミ	<必要数>	1	<手配数量>	3	<処理>	処理不要
作成者							
九工大 石井研究室	作成日	提出日					
石塚 誠	2004/12/08						
TEL&FAX 093-695-6102							
GearHolder2							
B-07							



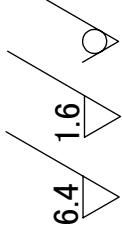
＜材質＞	アルミ	＜必要数＞	1	＜手配数量＞	3	＜処理＞	処理不要
作成者							GH_Plate1
九工大 石井研究室		作成日		提出日		B-08	
石塚 誠		2004/12/08					
TEL&FAX 093-695-6102							



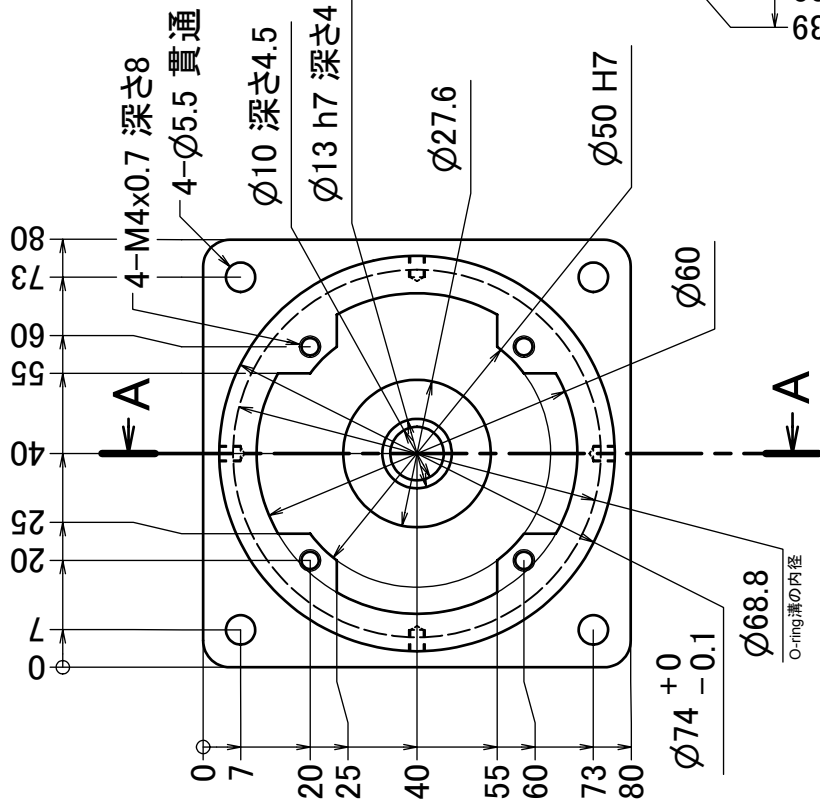
<材質> ABS	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			GH_Plate2
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/02/24	提出日	B-09



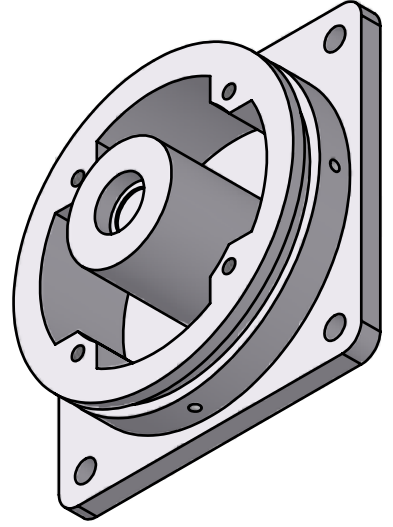
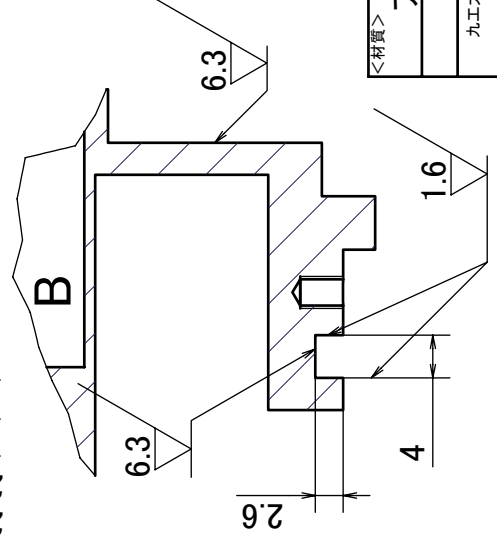
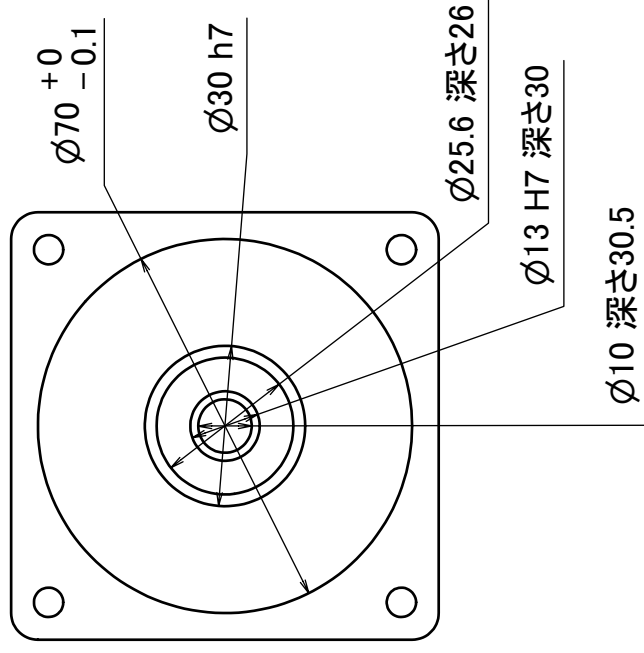
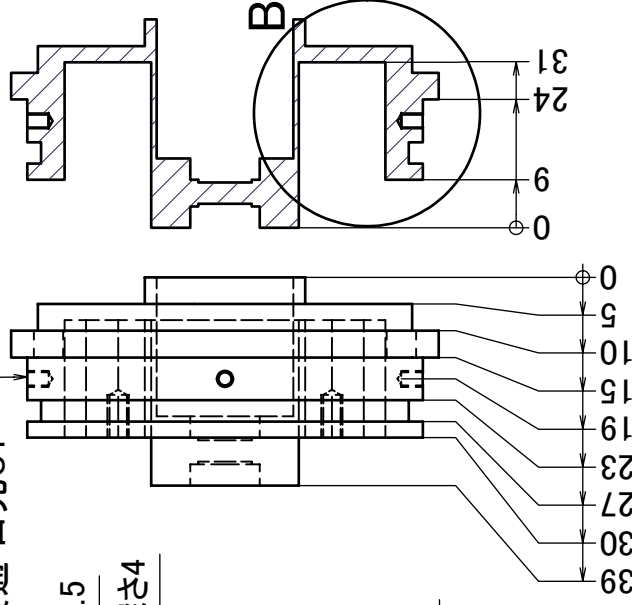
<材質> ABS	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			GH_tensioner
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/02/24	提出日	B-10



90度ずつ4方向から穴をあける
4-M3x0.5 深さ4



A-A



<材質>	アルミ	<必要数>	1	<手配数量>	3	<処理>	処理不要
作成者							Mag_Cover
作成日							提出日
2004/12/24							B-11

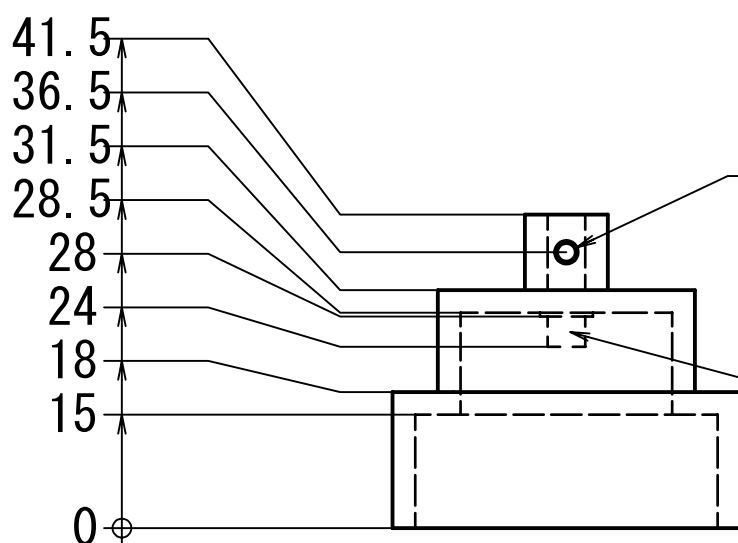
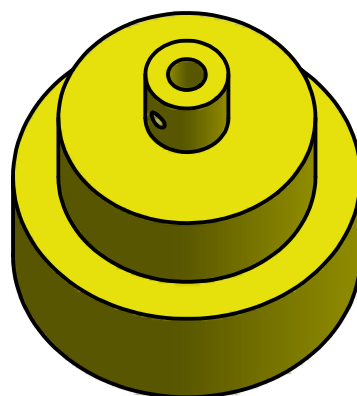
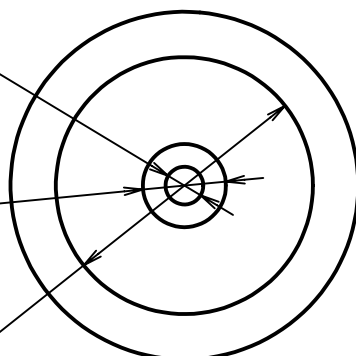
九工大 石井研究室
石塚 誠
TEL&FAX 093-695-6102

Ø5 H7 深さ10

有効深さは8mm以上

Ø11

Ø34



M3x0.5

(片面のみ貫通)

突起に取り付けるベアリングを持参

Ø46

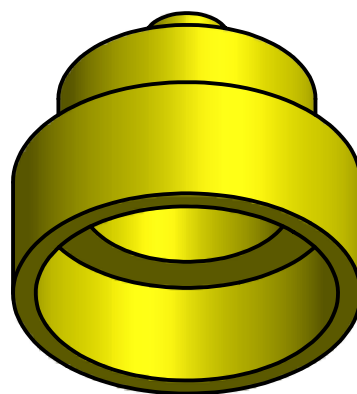
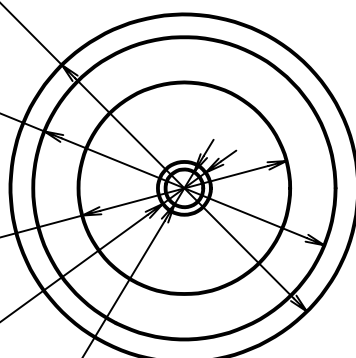
Ø40 H7 深さ15

マグネットに現合

Ø28

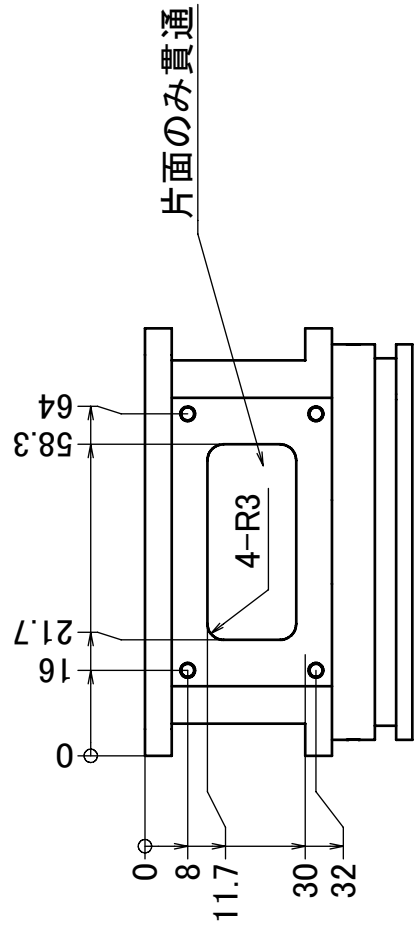
Ø7

Ø5 h7

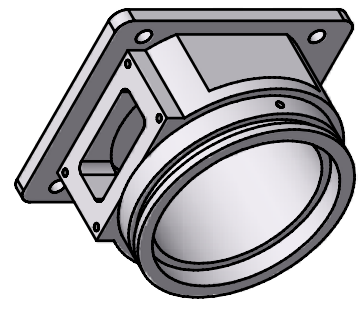
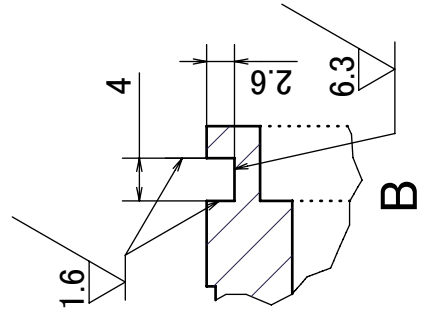


<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			Mag_cuppring
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2004/12/25	提出日	B-12

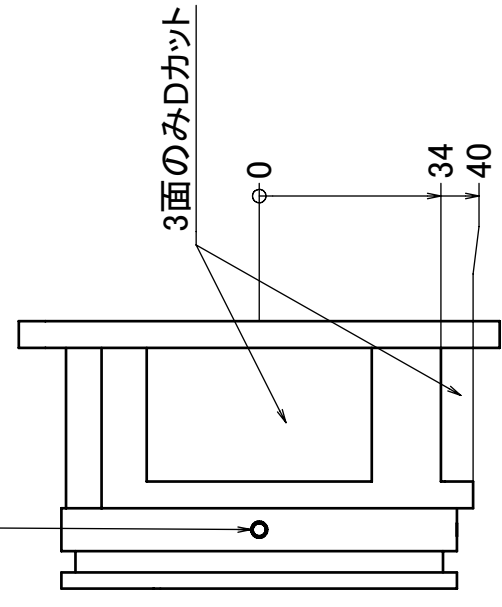
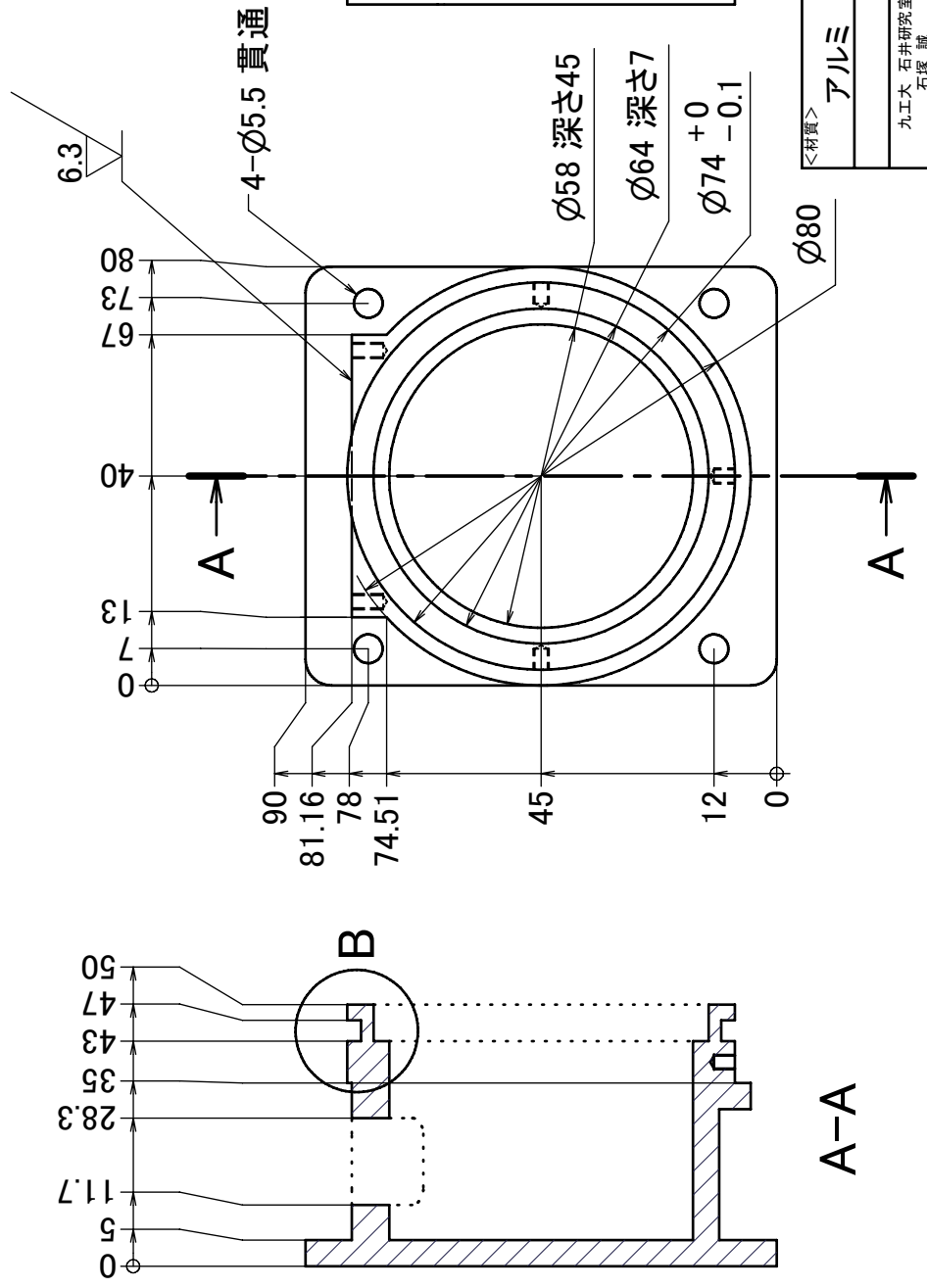
6.3 1.6



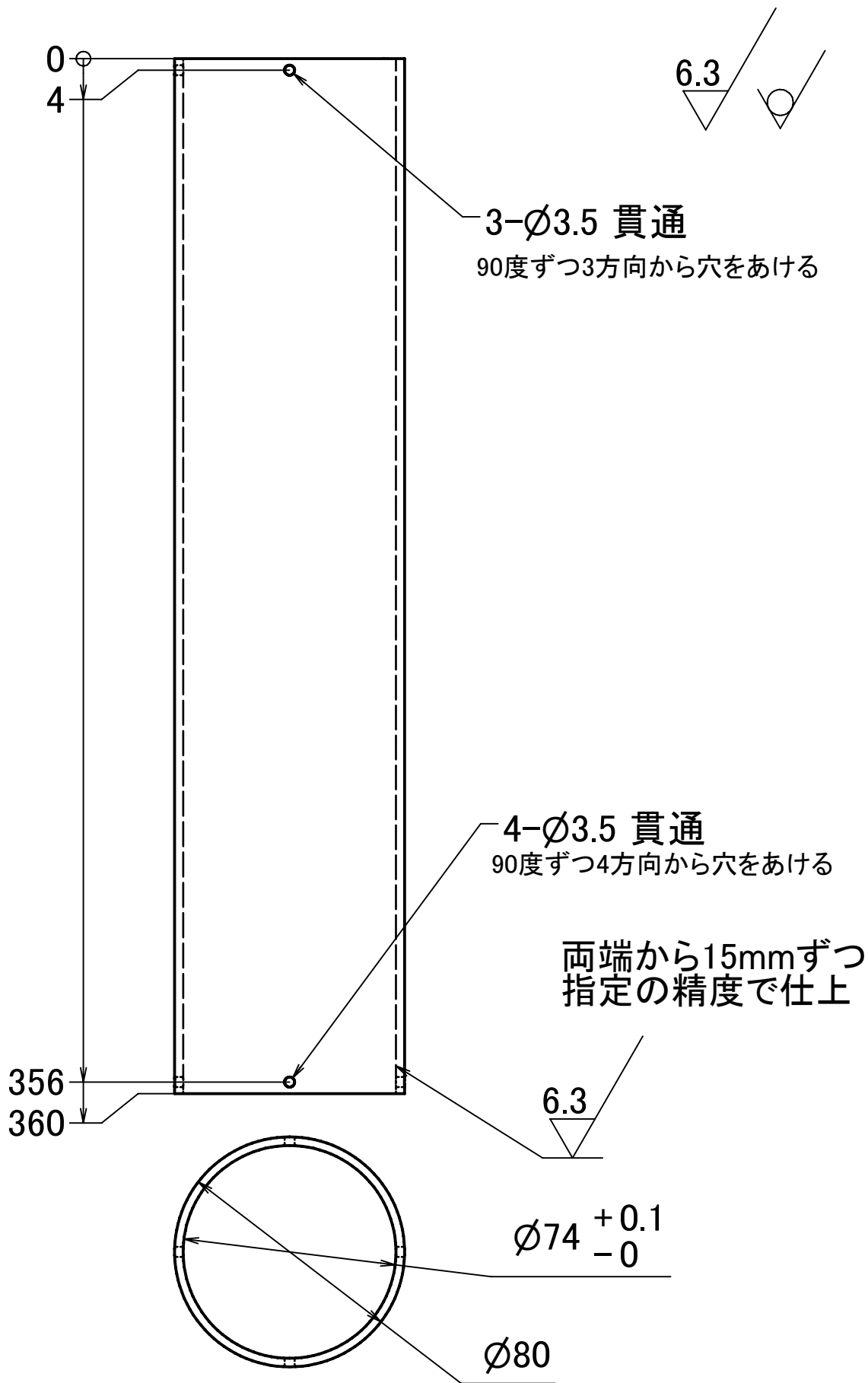
片面のみ貫通



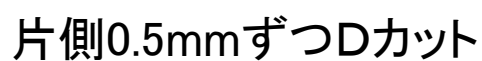
3-M3x0.5 深さ4
下穴7mmまで可
90度ずつ3方向から空ける



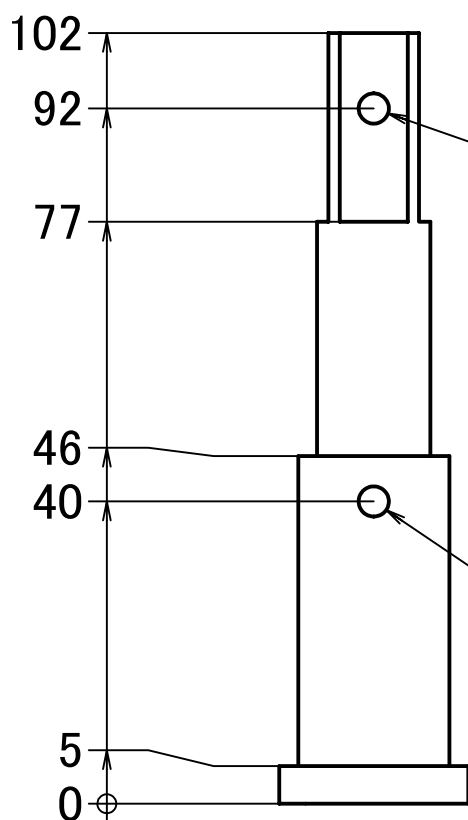
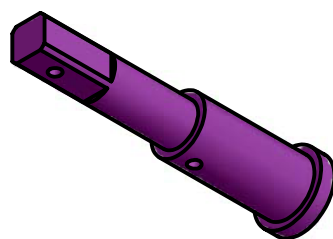
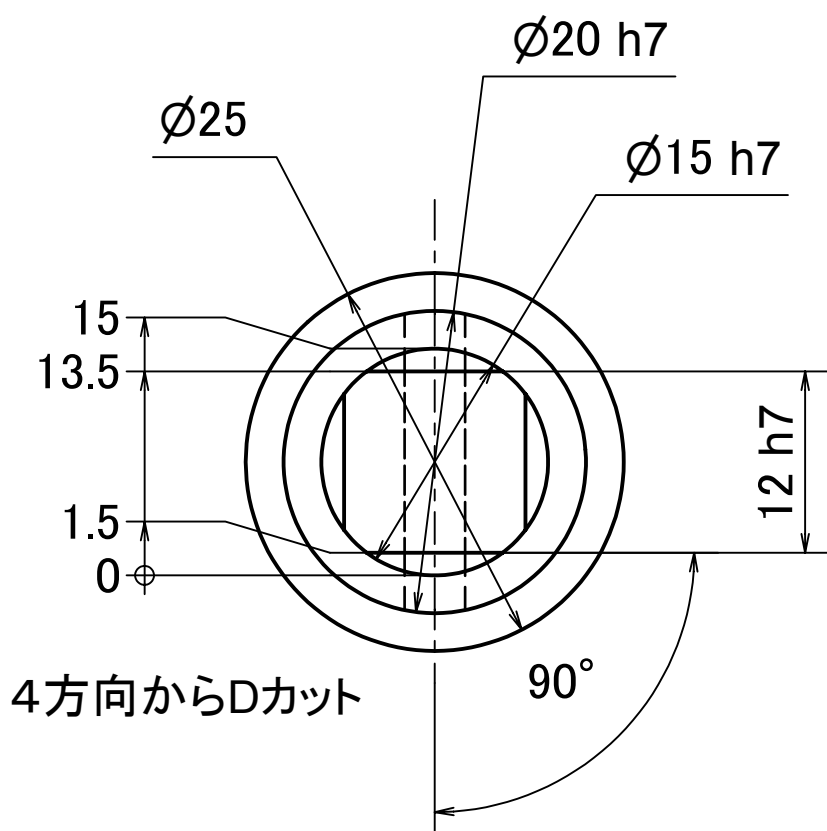
＜材質＞		アルミ	＜必要数＞	1	＜手配数量＞	3	＜処理＞	処理不要
		作成者						Pipe_End
九工大 石井研究室		作成日		提出日				
石塚 誠		2005/01/18		B-13				
TEL&FAX 093-695-6102								



<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			Pipe_Main
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/07	提出日	B-14



<材質> ステンレス	<必要数> 4	<手配数量> 14	<処理> 処理不要
作成者			Pipe_shaft
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/09	提出日	B-15



Ø4 貫通
割リピンを挿入
一つの面に対し垂直にあける

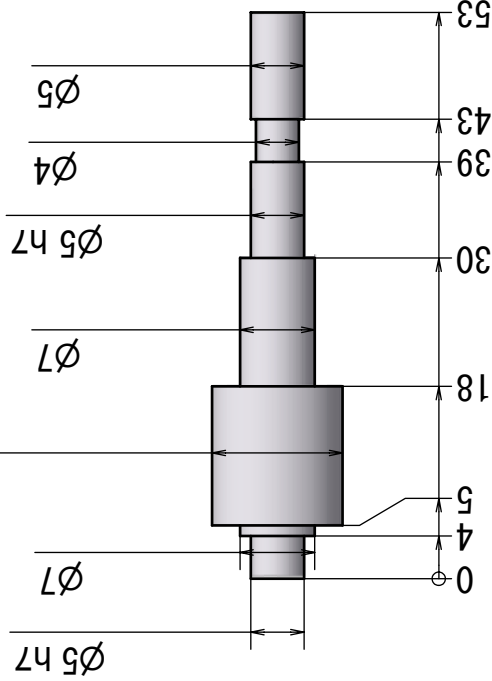
Ø4 貫通
割リピンを挿入
方向に指定無し

(2 : 1)

<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			MainShaft B-16
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/09	提出日	

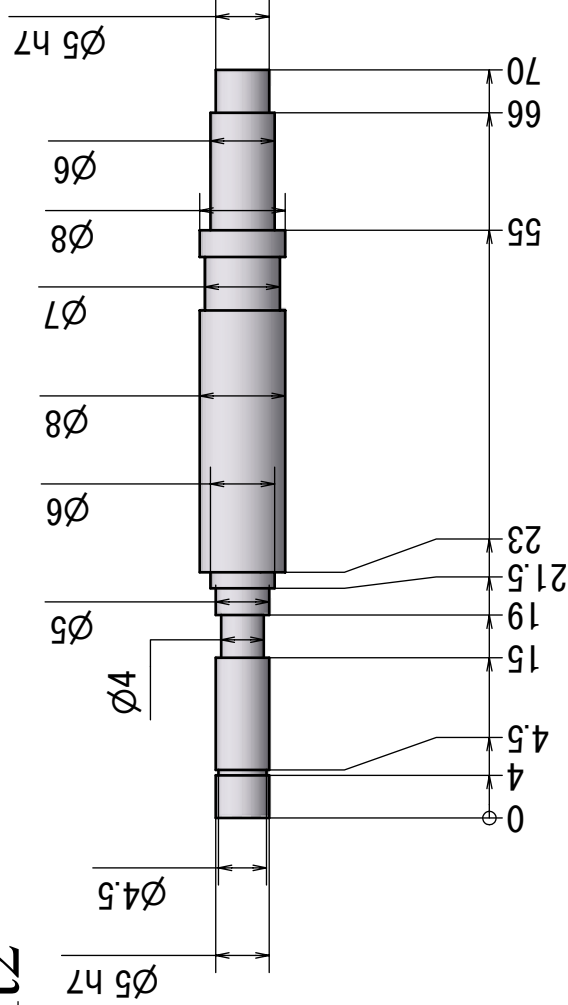
Shaft1

($\phi 12.2$) 磁石に現合

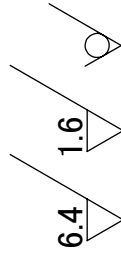


作成する4本のシャフトのうち、
3本は磁石に現合してください。
残りの一本は $\phi 12.2$ で作成して下さい。

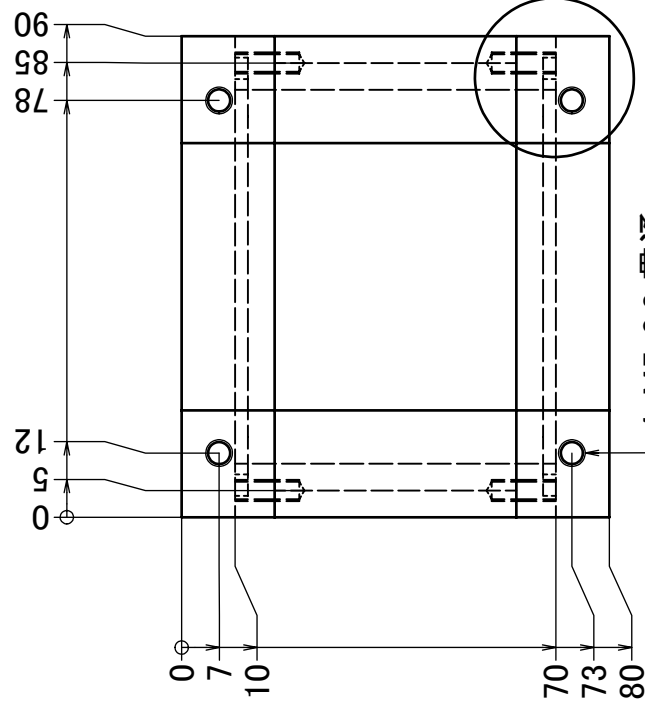
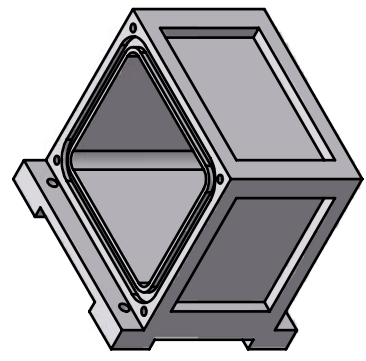
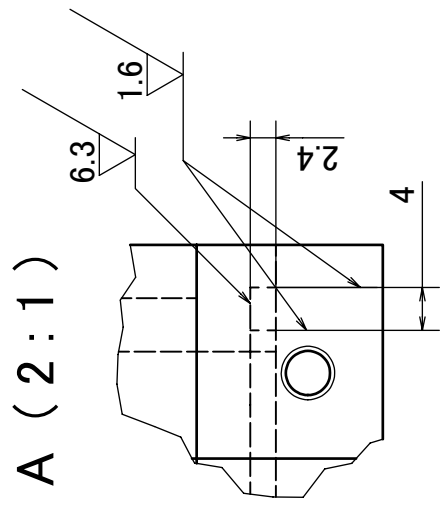
Shaft2



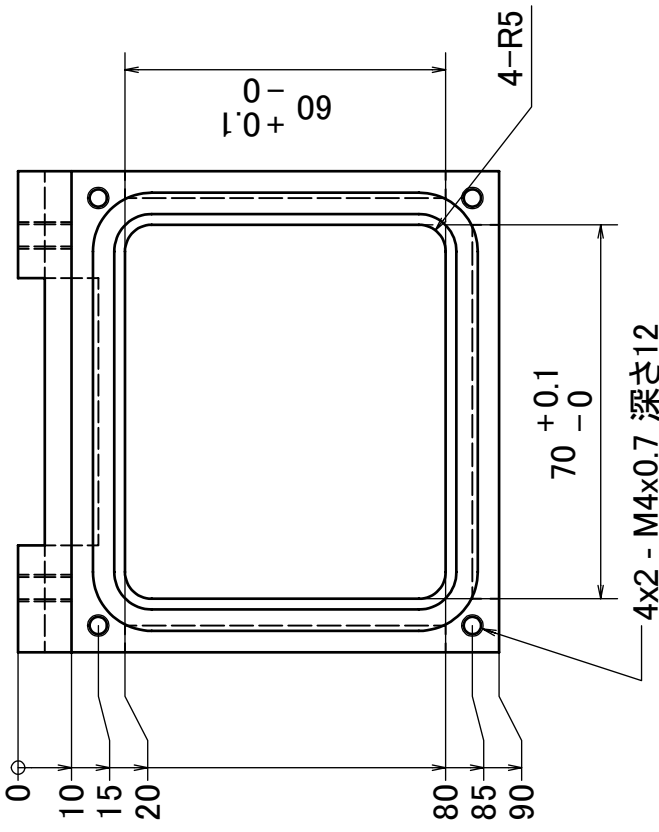
<材質>		<必要数>	<手配数量>	<処理>	
アルミ		1	各 4	処理不要	
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102		作成者		Shaft	
				提出日	
				2004/12/08	
				B-17	



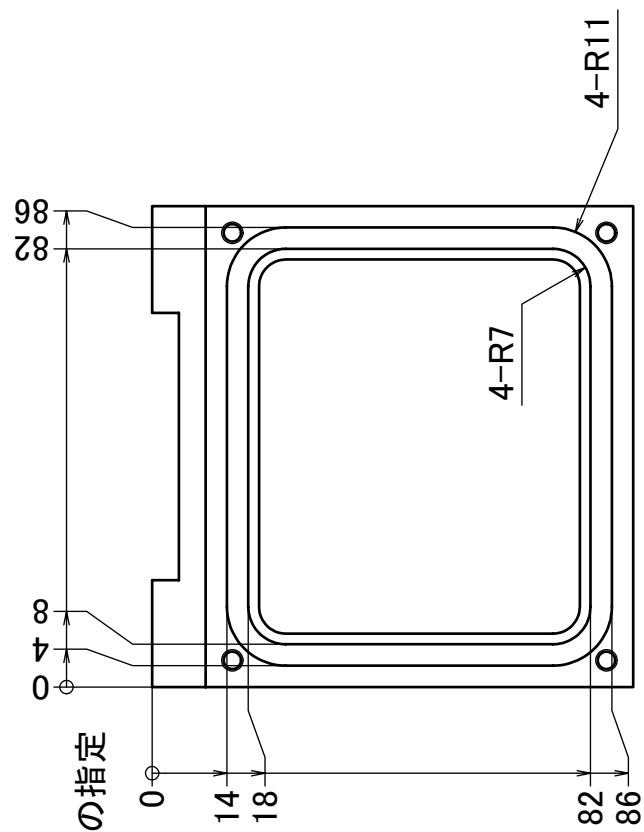
A (2:1)



4-M5x0.8 貫通



溝の指定



＜材質＞	アルミ	＜必要数＞	1	＜手配数量＞	3	＜処理＞	処理不要
作成者							
九工大 石井研究室		作成日		提出日			
石塚 誠		2005/01/09					
TEL&FAX 093-695-6102		UB_MainBox					
		B-18 (1Page)					

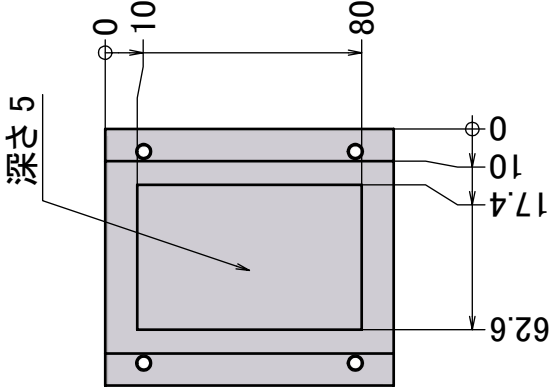
2枚目の図面にポケットの加工指定有り
反対側も同様

4x2 - M4x0.7 深さ12

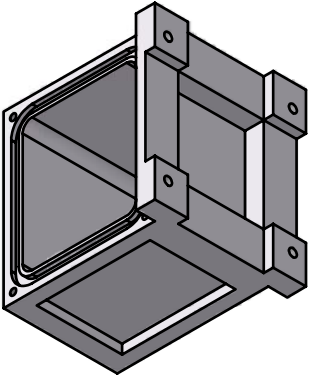
UB_MainBoxのポケット加工指定

すべての角はR可

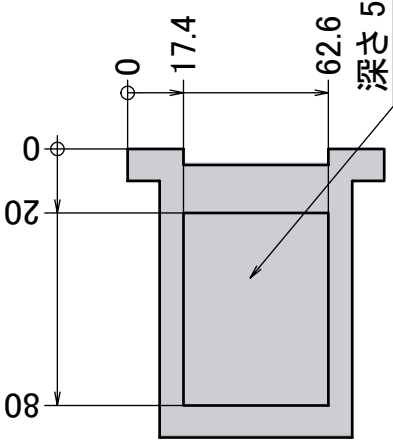
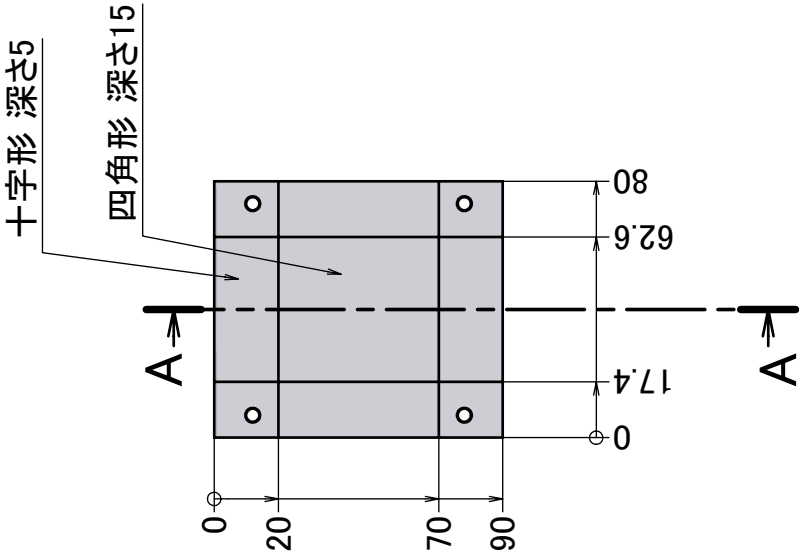
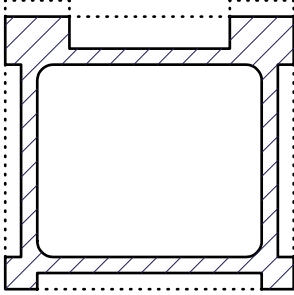
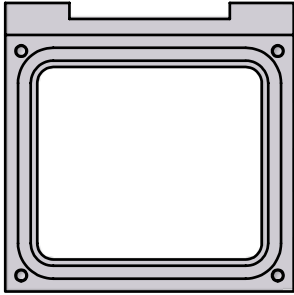
(0.60 : 1)



(1 : 2)

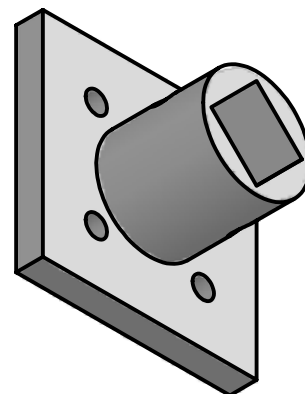
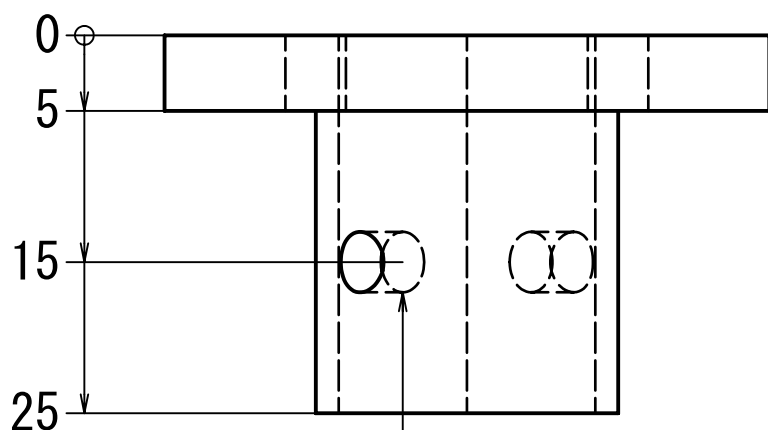


A-A

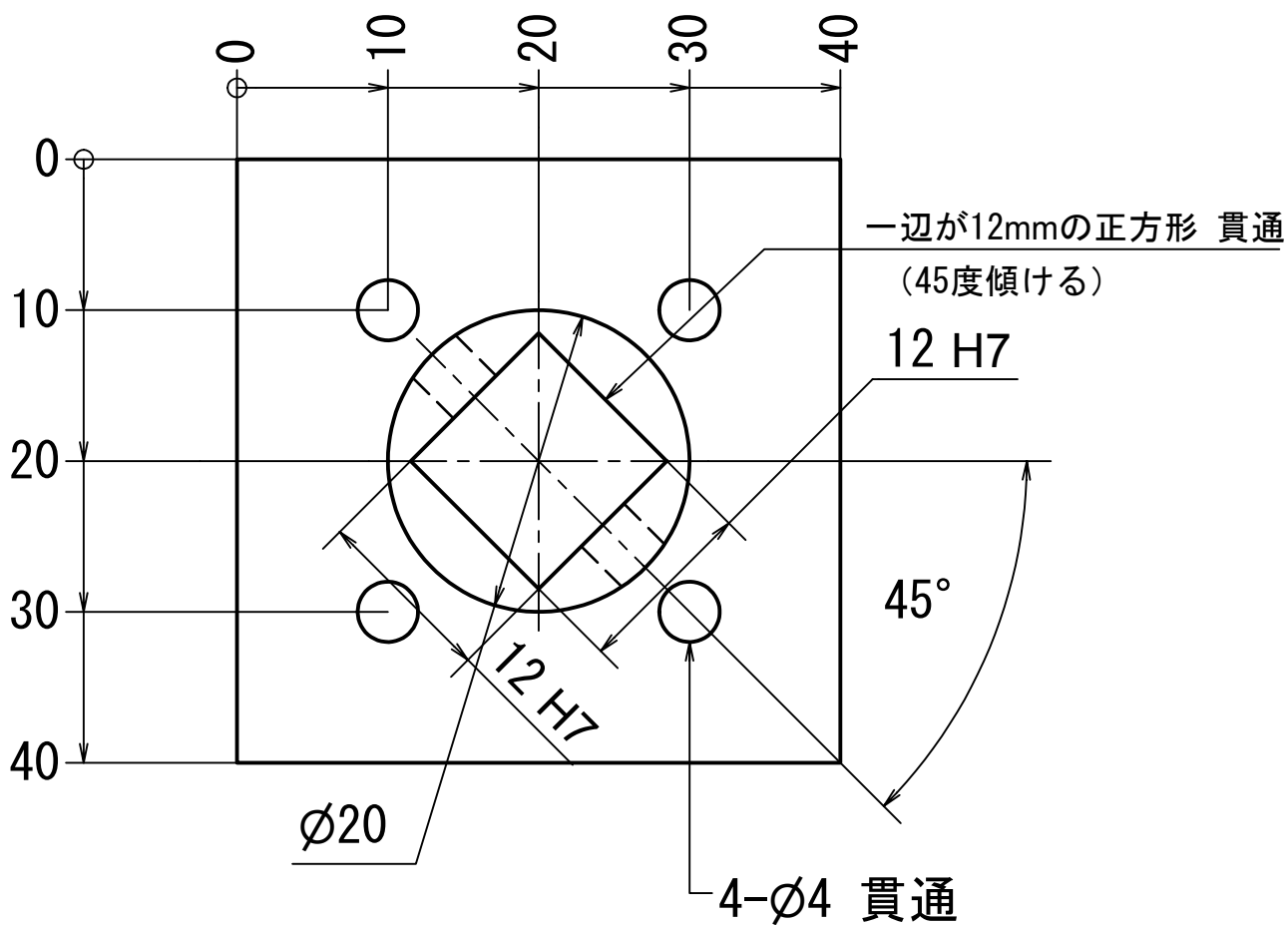


裏面もポケット加工有り

＜材質＞ アルミ	＜必要数＞ 1	＜手記数量＞ 3	＜処理＞ 処理不要	
			作成者	
			作成日	提出日
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102			UB_MainBox	
			B-18 (2Page)	

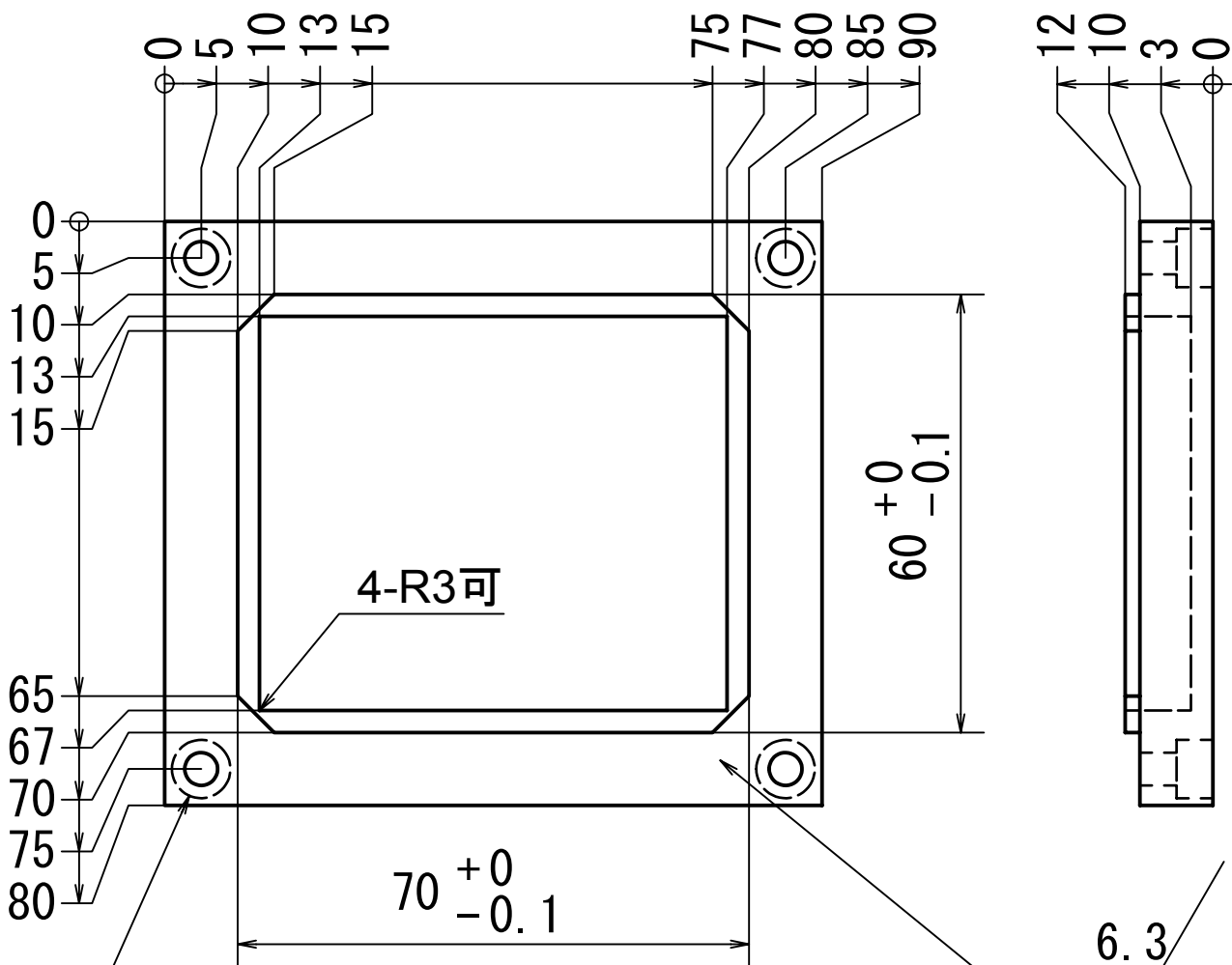


Ø4 貫通
内側の正方形の一面に垂直にあける



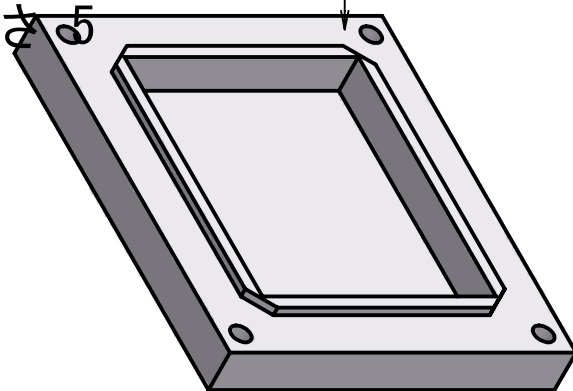
<材質> ステンレス	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			UB_Stopper
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/09	提出日	B-19

6.3

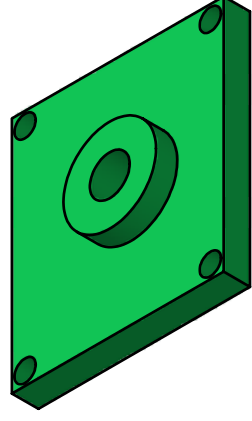
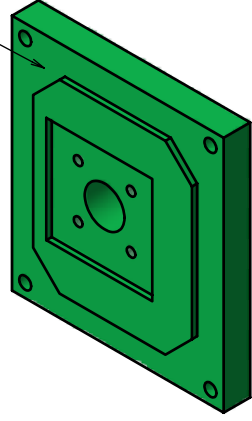
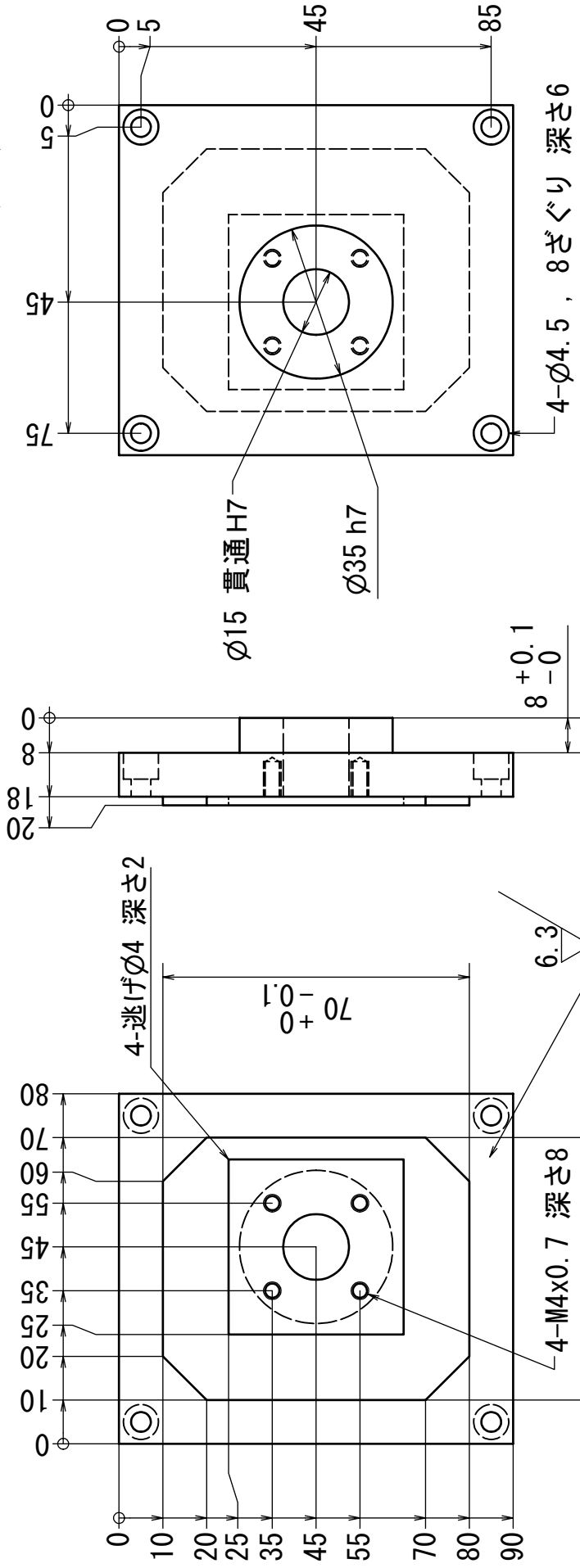
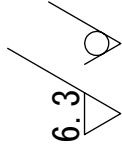


(裏より)

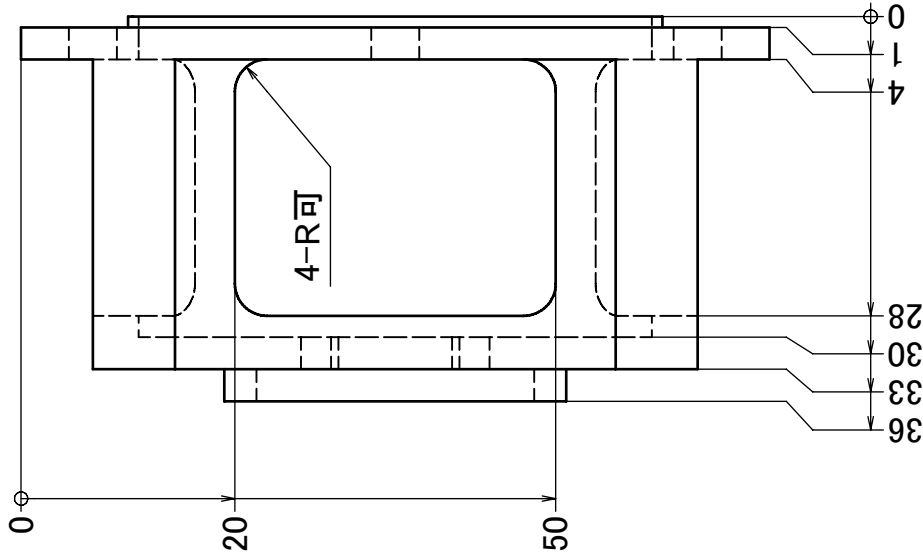
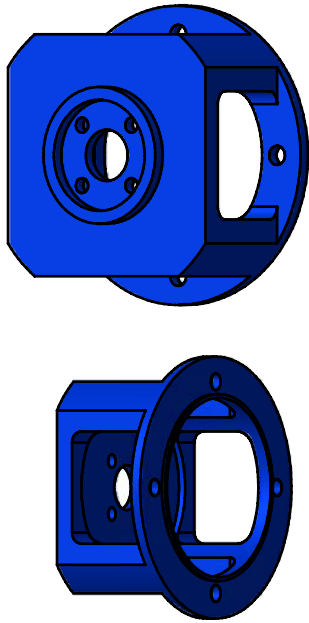
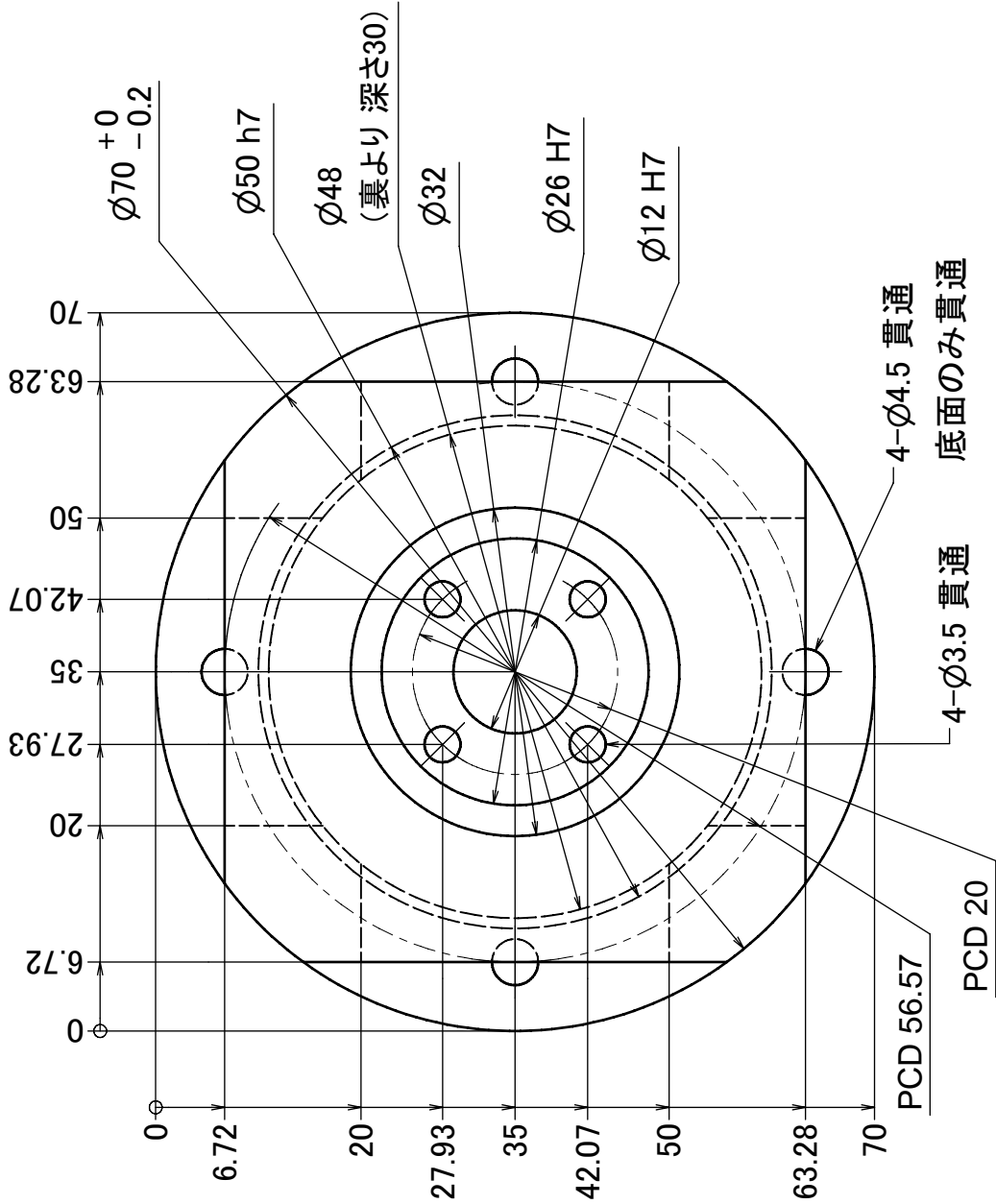
4- ϕ 4.5 貫通 , 8ざぐり 深さ 5



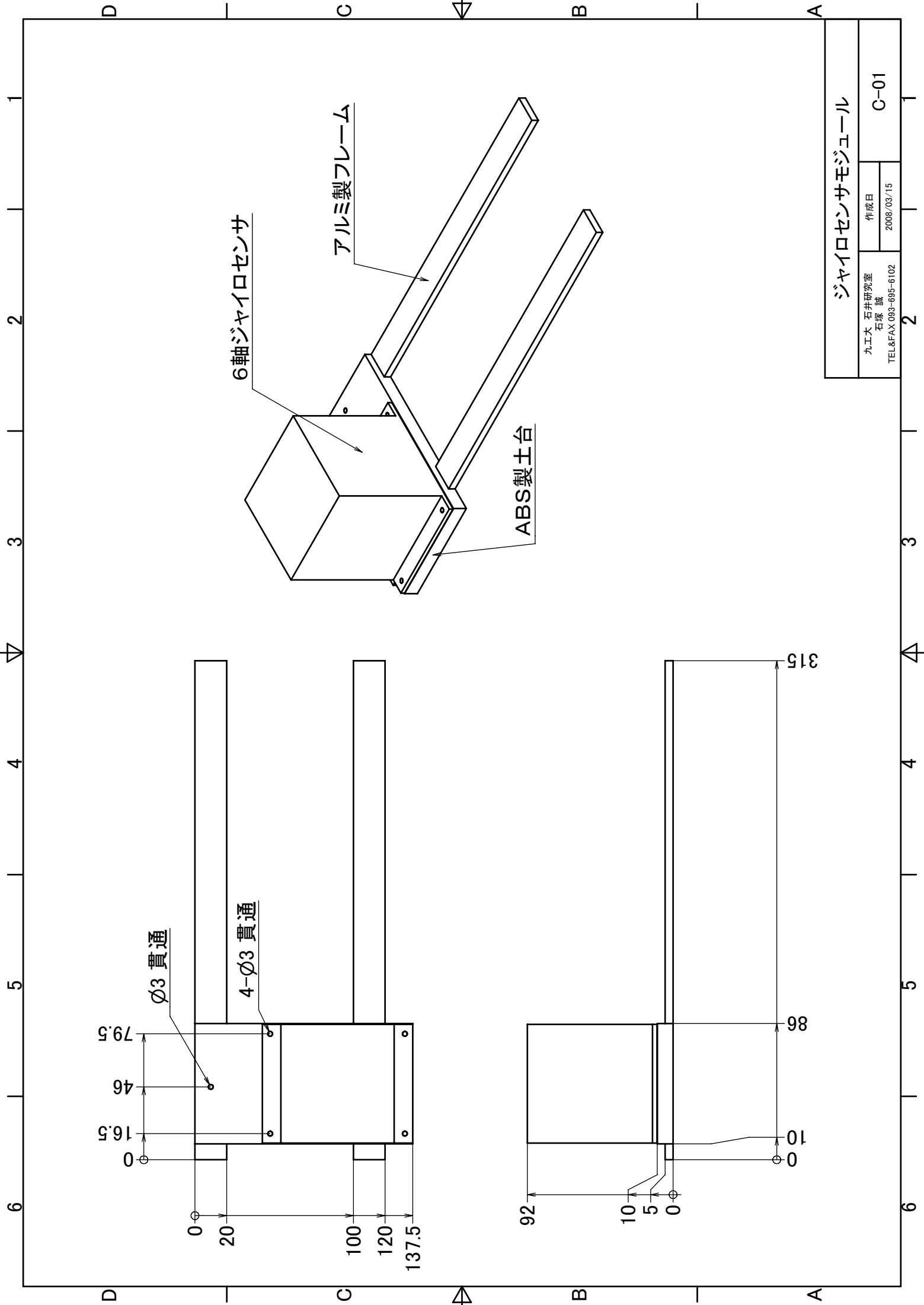
<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要
作成者			UB_UnderCap
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日 2005/01/09	提出日	B-20



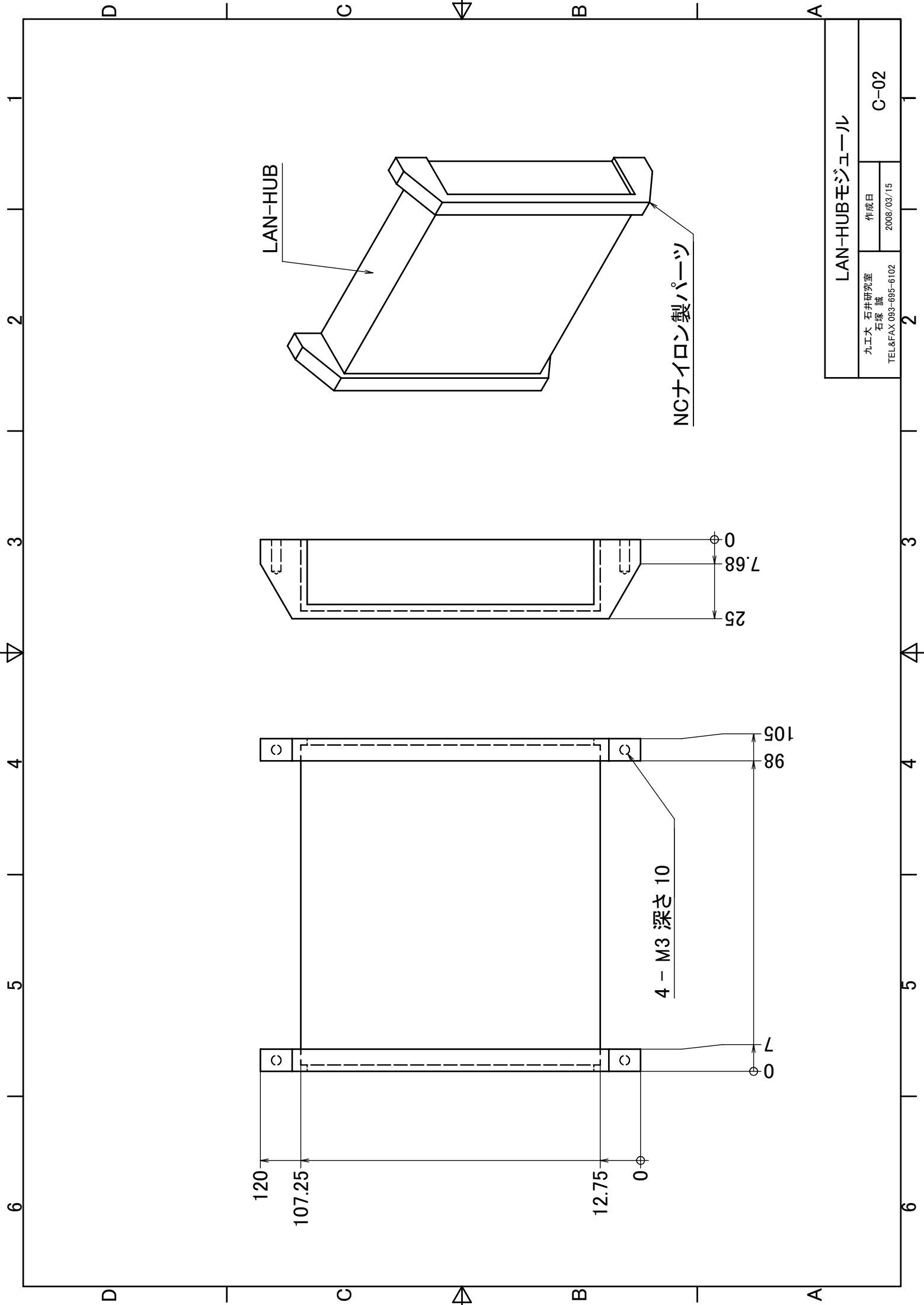
<材質>	アルミ	<必要数>	1	<手配数量>	3	<処理>	処理不要
作成者							
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		提出日				
	2005/01/09						
UB_UpperCap							
B-21							



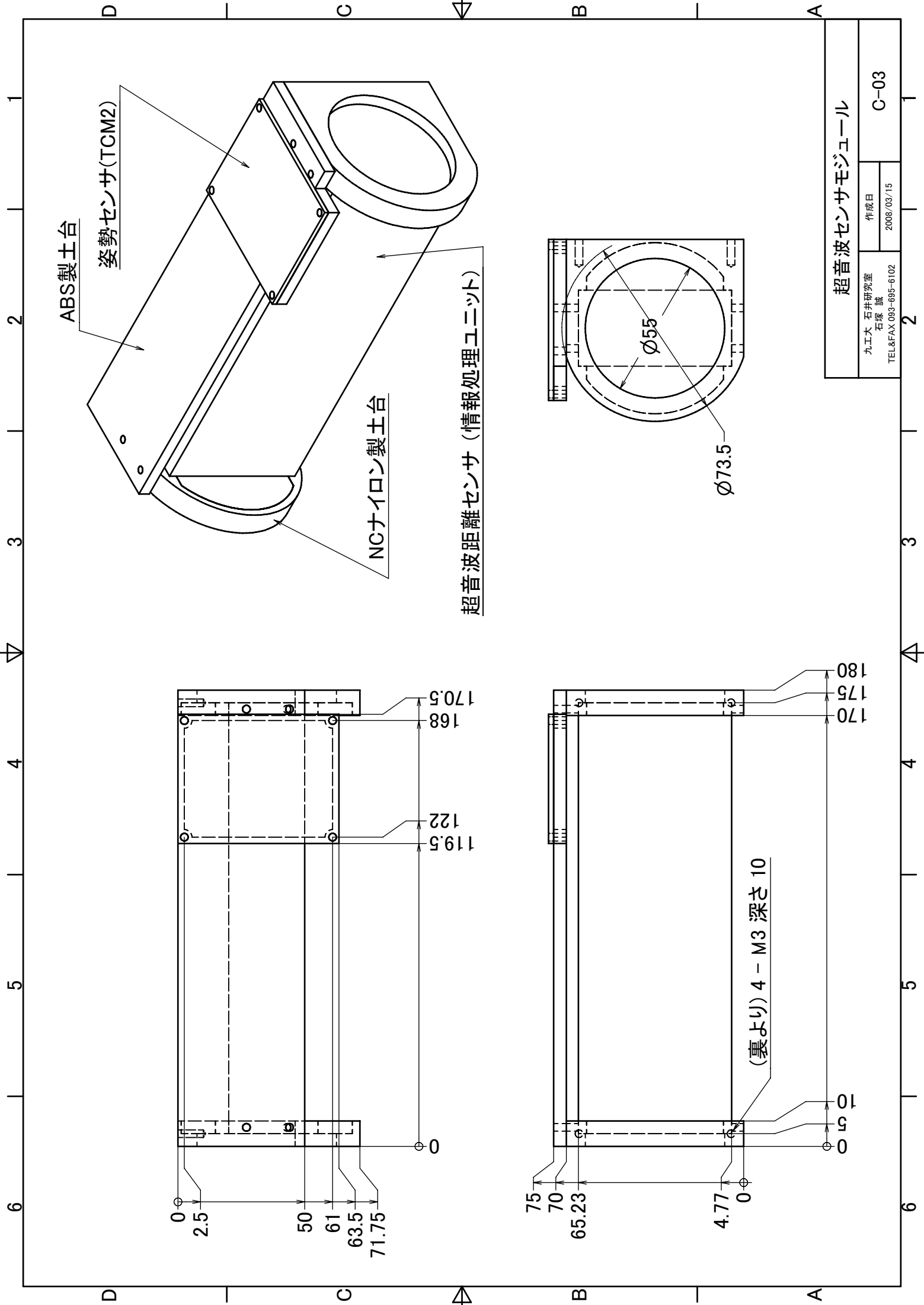
<材質> アルミ	<必要数> 1	<手配数量> 3	<処理> 処理不要	
			Motor_Cap3	
			B-22	
作成者				
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日	提出日		
	2005/01/12			



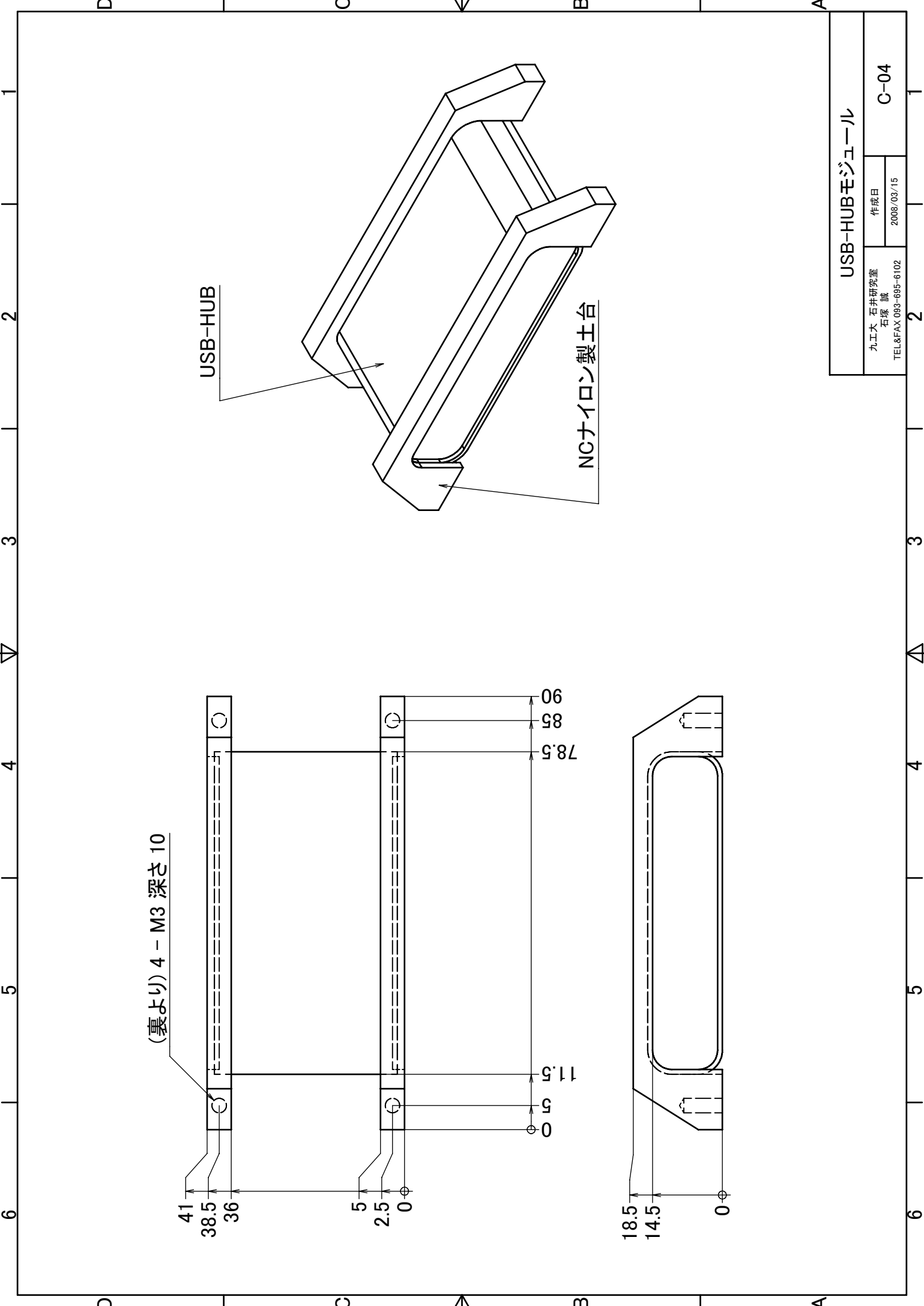
ジャイロセンサモジュール		
九工大 石井研究室 石塚 誠	作成日	C-01
TEL&FAX 093-695-6102	2008/03/15	



LAN-HUBモジュール			
九工大 石井研究室 石塚 誠	作成日		C-02
	2008/03/15		
TEL&FAX 093-695-6102			

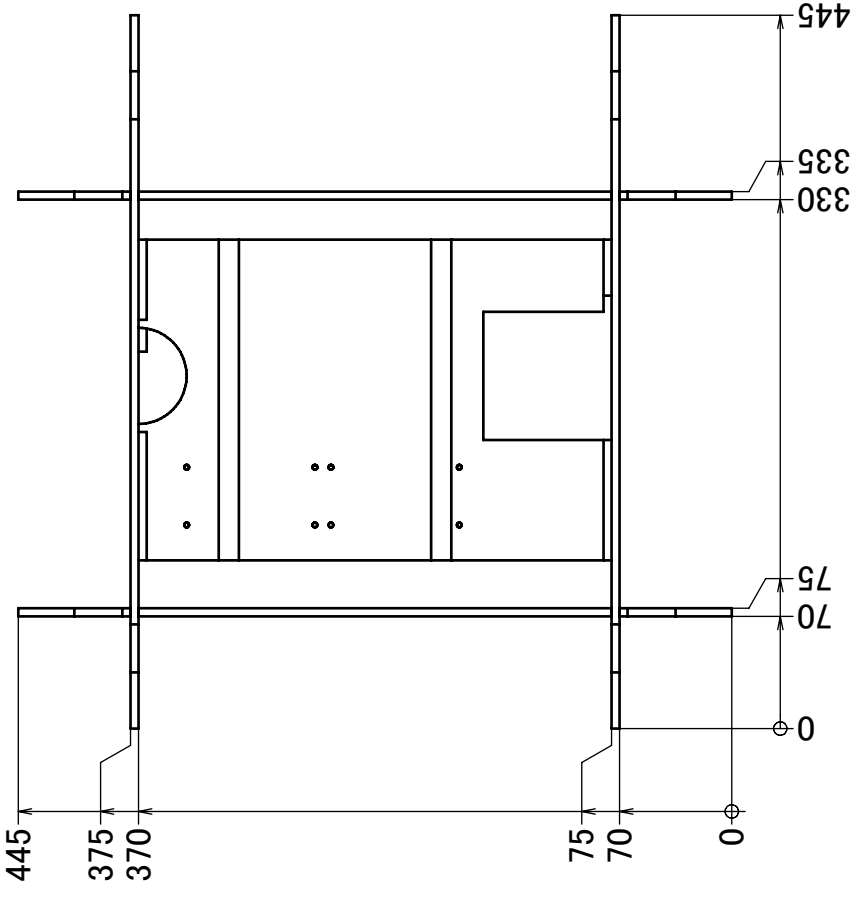
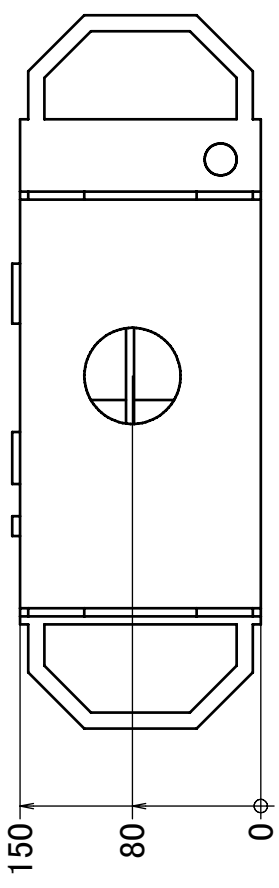
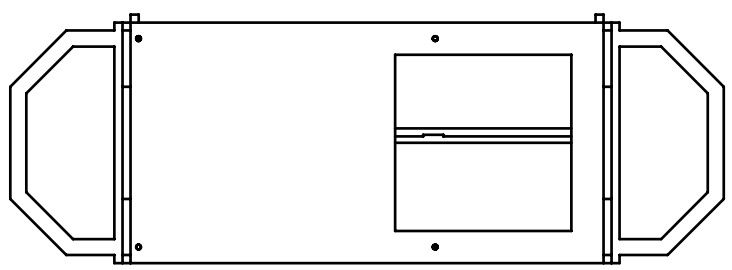
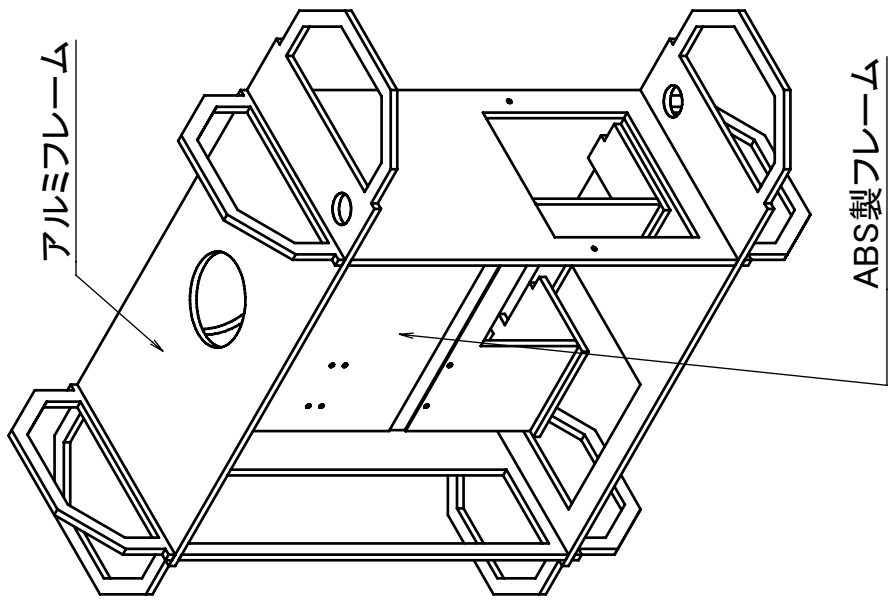


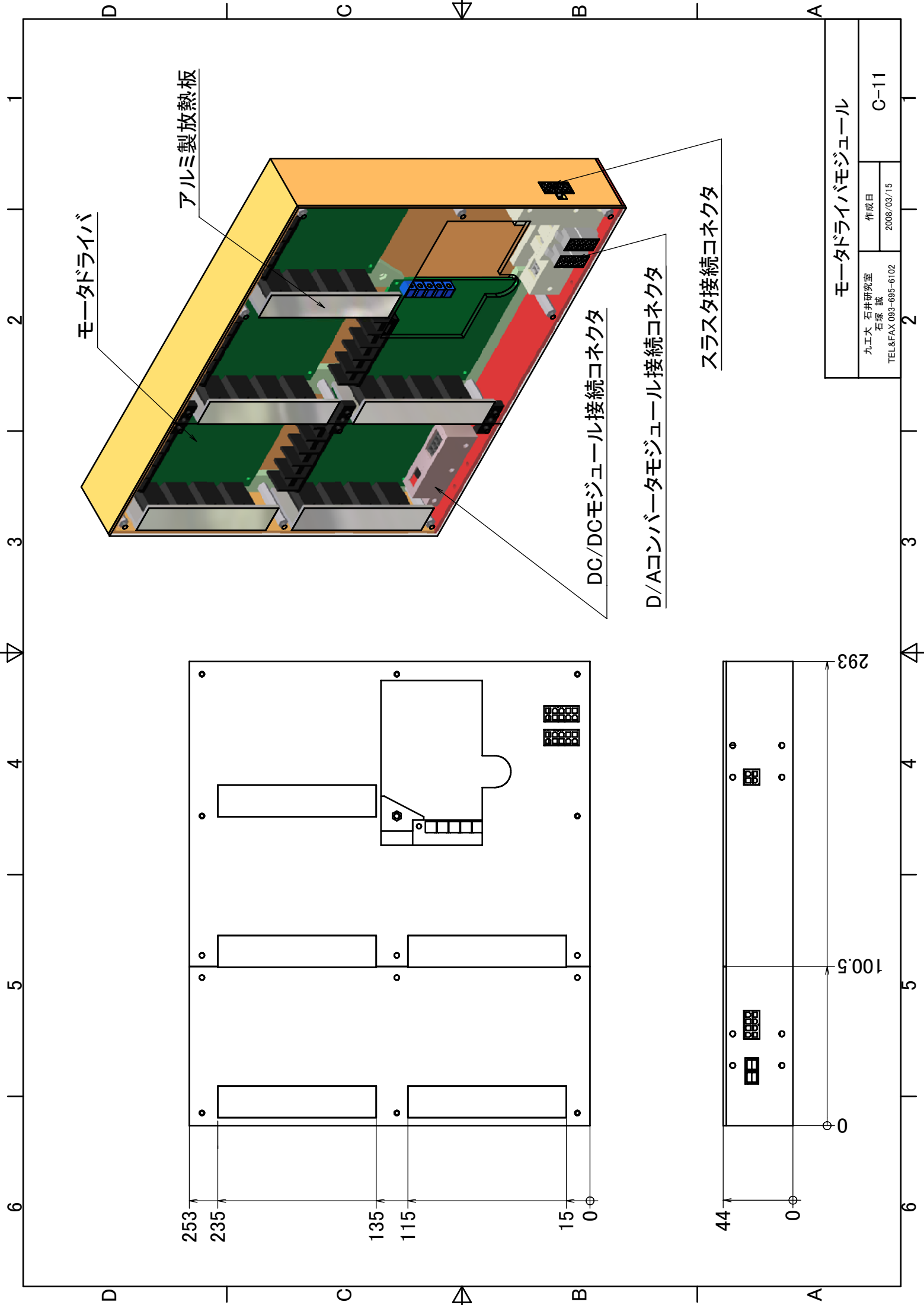
超音波センサモジュール			
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		C-03
	2008/03/15		



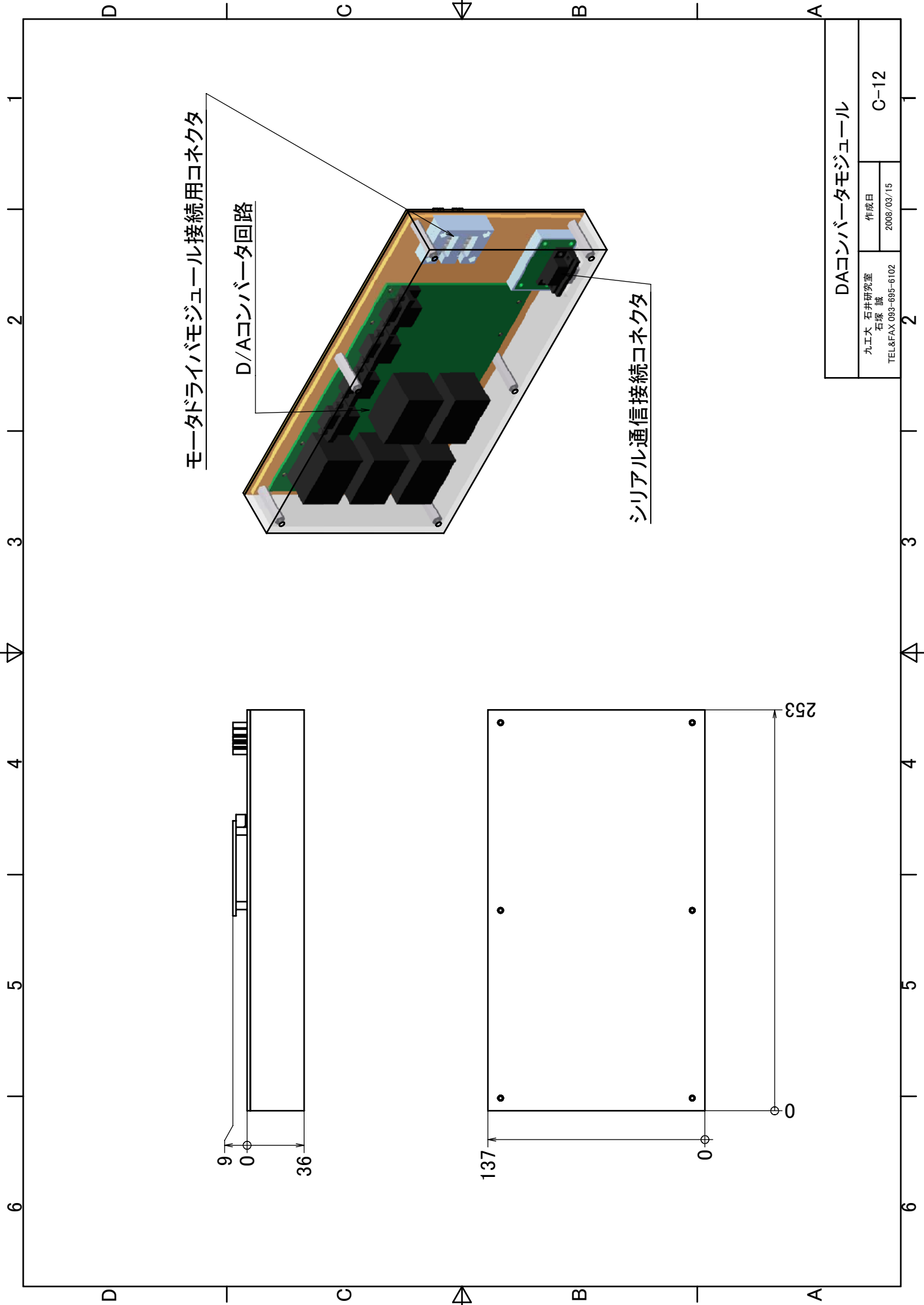
USB-HUBモジュール			
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		C-04
	2008/03/15		

Hull1用メインフレーム		
九工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日	C-05
	2008/03/15	





モータドライバモジュール			
丸工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		C-11
	2008/03/15		



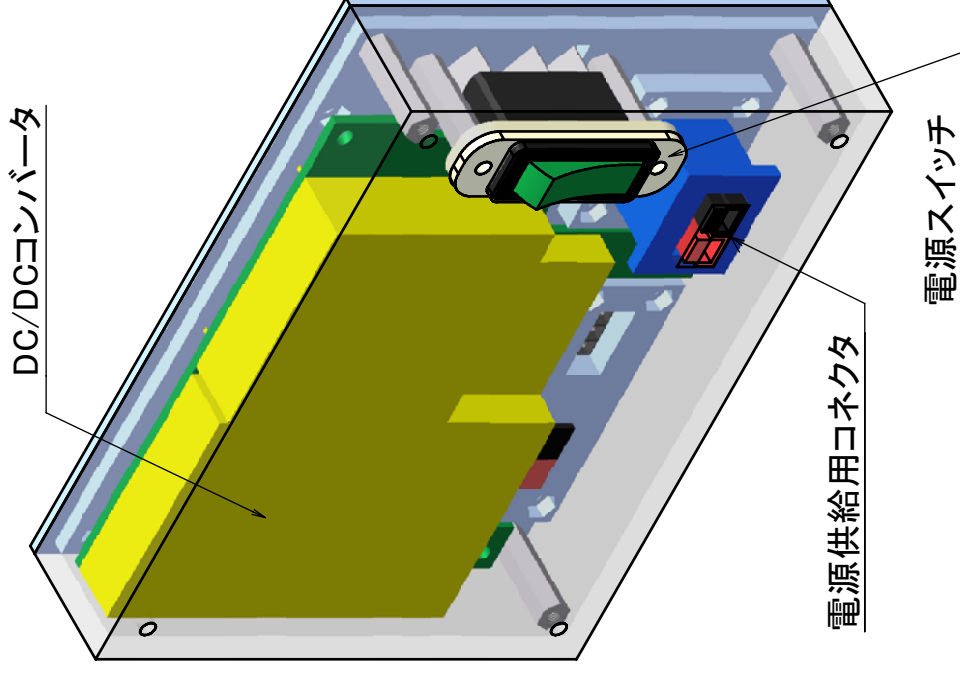
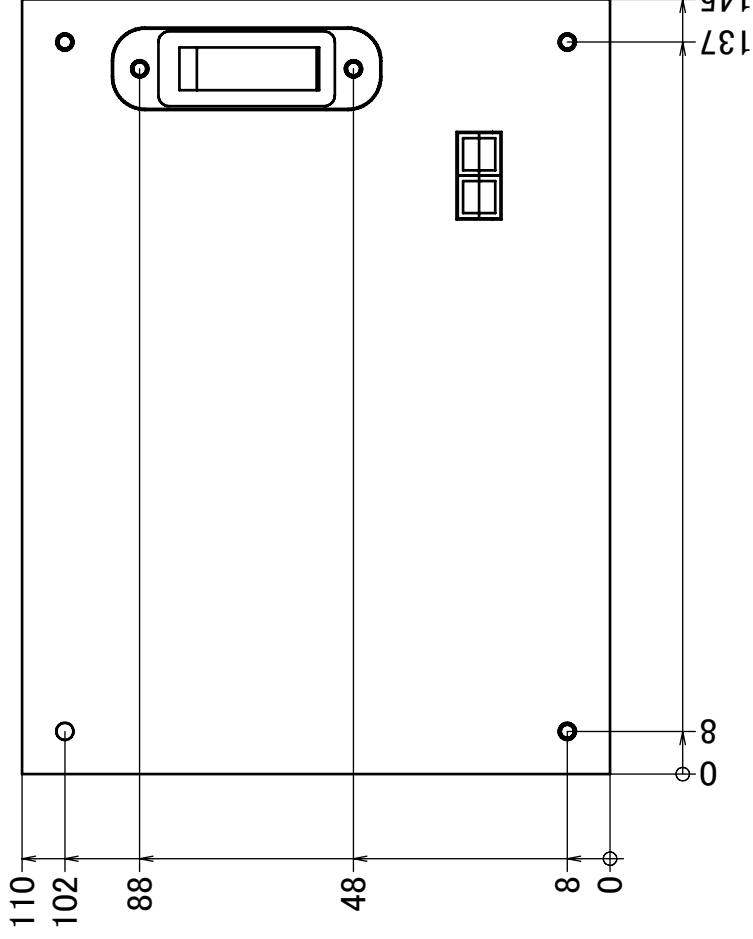
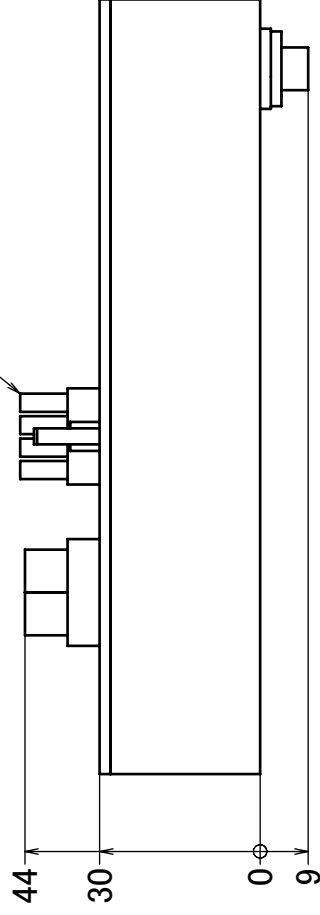
モータドライバモジュール接続用コネクタ

D/Aコンバータ回路

シリアル通信接続コネクタ

DAコンバータモジュール			
丸工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		C-12
	2008/03/15		

モータドライバモジュール接続用コネクタ



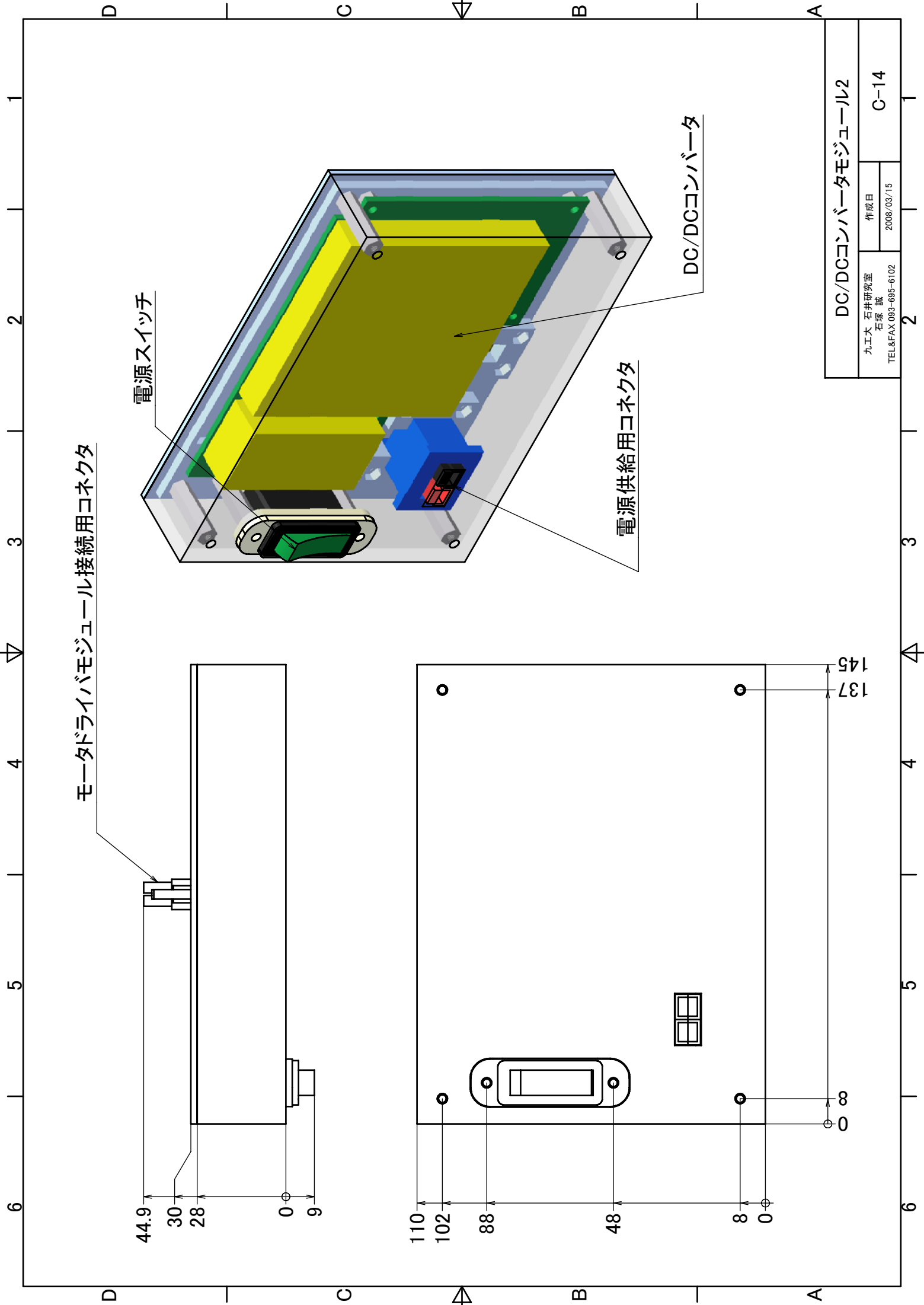
DC/DCコンバータモジュール1

九工大 石井研究室
石塚 誠

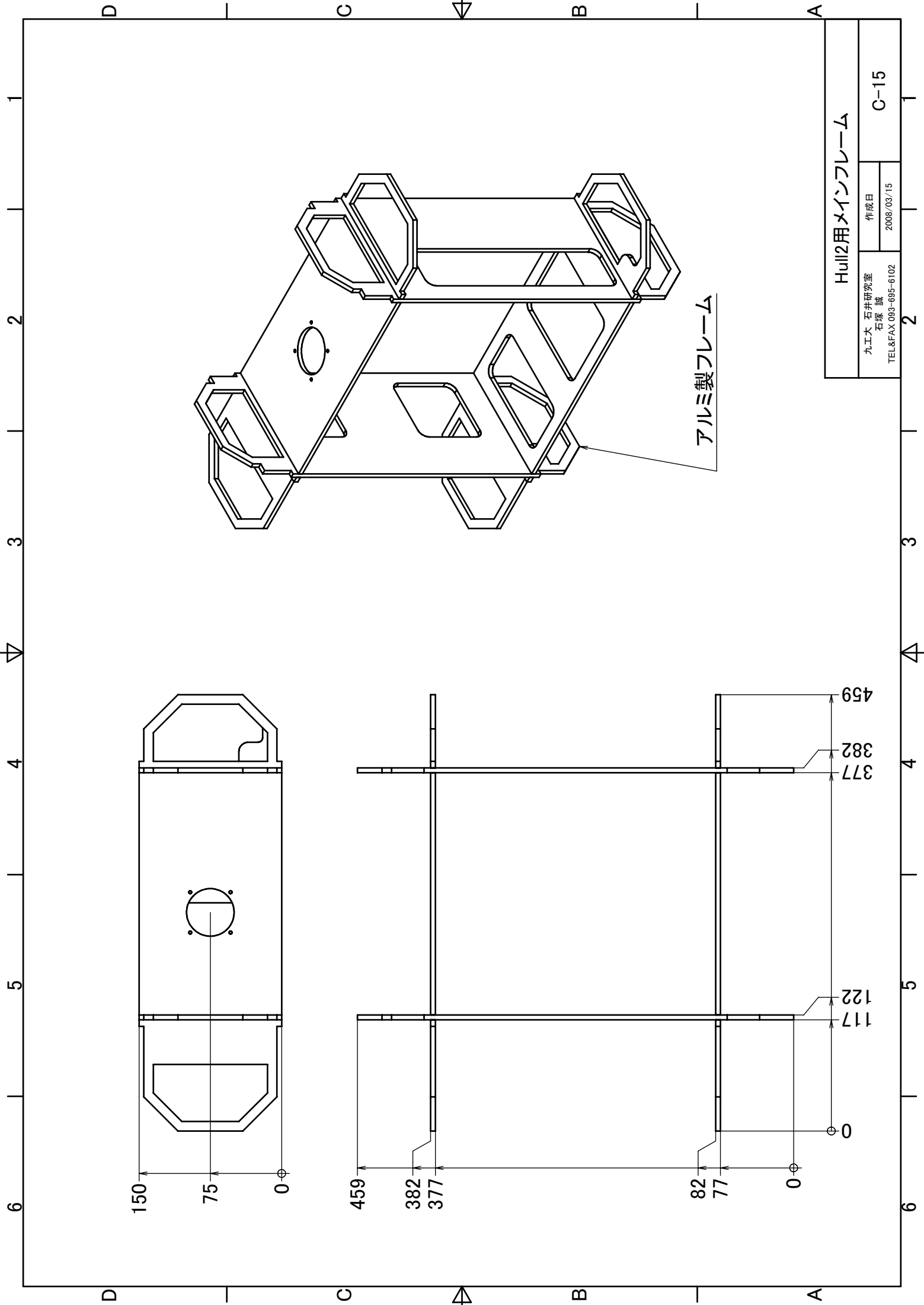
作成日
2008/03/15

C-13

TEL&FAX 093-695-6102



DC/DCコンバータモジュール2			
丸工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日		C-14
	2008/03/15		



Hull2用メインフレーム		
丸工大 石井研究室 石塚 誠 TEL&FAX 093-695-6102	作成日	C-15
	2008/03/15	