

深海モニター用小型ロボットシステムの技術開発

上野 道雄¹, 安藤 裕友², 渡辺 巖³, 二村 正¹,
 前田 克弥², 大川 豊⁴, 田村 兼吉², 浦 環⁵,
 浅川 賢一⁵, 藤井 輝夫⁵, 近藤 逸人⁵, 小島 淳一⁶,
 伊藤 譲⁷, 久松 勝久², 佐伯 延博⁸, 和田 保弘²

Development of Technologies for a Deep-sea Monitoring Robot System

by

Michio UENO, Hirotomo ANDO, Iwao WATANABE, Tadashi NIMURA,
 Katsuya MAEDA, Yutaka Ohkawa, Kenkichi TAMURA, Tamaki URA,
 Kenichi ASAKAWA, Teruo FUJII, Hayato KONDO, Junichi KOJIMA,
 Yuzuru ITO, Katsuhisa HISAMATSU, Nobuhiro SAEKI and Yasuhiro WADA

Abstract

Research project for developing key technologies to realize a compact deep-sea monitoring robot system that has both features of ROV and AUV has been conducted by National Maritime Research Institute and Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo. This project aims to give one of solutions to increasing demands for observation and exploration in deep-sea. These demands concern utilization of deep-sea space and resources at seabed, surveillance of sunken ships or airplanes for protecting ocean environment or seeking causes of such kind of accidents and so on.

Key technologies for realizing the compact deep-sea monitoring robot system are high-speed acoustic data link for transmitting video image, optimal design of launcher's configuration from a hydrodynamic point of view, autonomy for remote control using acoustic data link and architectures of compact system.

This report describes the development of these four key technologies and performance test using prototype of the vehicle in the deep-sea basin at Natinal Maritime Research Institute.

1 操縦・制御研究グループ, 2 深海技術研究グループ, 3 理事, 4 海洋資源利用研究グループ,
 5 東京大学生産技術研究所海中工学研究センター, 6 (株)KDDI 研究所, 7 (株)海洋工学研究所,
 8 (株)三井造船昭島研究所, (以上 1-8 の所属は 2003 年 3 月研究終了時)

原稿受付 平成 年 月 日

審査済 平成 年 月 日

目 次

1. 緒言	2
1章図表	2
2. 高速画像通信装置	3
2. 1. はじめに	3
2. 2. 設計条件	3
2. 3. 高速音響通信システムの構成	4
2. 4. 変調・復調処理	5
2. 5. 通信試験結果	6
2. 6. まとめ	7
2章図表	8
3. 中継機降下運動特性	19
3. 1. はじめに	19
3. 2. 降下運動の非線形釣合方程式	19
3. 3. 流体力項の表現	19
3. 4. 流体力データに基づく方程式の係数	20
3. 5. 降下運動の非線形推定計算 (ひれ付き状態)	21
3. 6. ひれ無し状態とひれ付き状態の 推定計算による比較検討	22
3. 7. 深海水槽における降下実験	23
3. 8. まとめ	23
3章図表	24
4. ビークルの自律機能及び遠隔操縦機能	32
4. 1. 自律機能及び遠隔操作機能の設計	32
4. 2. テストベッドを利用した手法の検討	34
4. 3. まとめ	37
4章図表	37
5. 軽量小型システムの統合化	43
5. 1. はじめに	43
5. 2. ビークル	43
5. 3. 中継機	46
5. 4. アンビカルケーブルの詳細設計	48
5. 5. 支援装置の詳細設計	48
5. 6. まとめ	49
5章図表	50
6. ビークルプロトタイプの実験	59
6. 1. はじめに	59
6. 2. ソフトウェア搭載	59
6. 3. ビークルの調整(陸上)	62
6. 4. ビークルの試運転	63
6. 5. 深海水槽での総合性能試験	63
6. 6. まとめ	64
6章図表	64
7. 結言	83
参考文献, 発表論文等一覧	83

1. 緒言

危険物積載船舶の沈没に伴う海洋環境の監視や二酸化炭素の深海貯留技術の開発等に関連して深海域の調査の重要性が増している。深海域の調査には潜水機が用いられることが多いが、深海の状況や目的に応じて有人潜水船、遠隔操縦型有索潜水機(Remotely Operated Vehicle; ROV)、自律型無索潜水機(Autonomous Underwater Vehicle; AUV)などが用いられる。

有人潜水船は乗員の安全を深海域環境下で確保する必要があるため必然的に大規模なシステムとなり、その運用にも時間と費用がそれ相応にかかることになる。遠隔操縦型有索潜水機は母船と潜水機がケーブルで結ばれており、一般にこれを通じて必要なエネルギーの供給をおこなうと同時に深海域の状況等の情報を母船上に送り、これを監視しながら必要な作業を遠隔操縦によっておこなうことが可能となる。この場合、有人潜水船のように人命を危険にさらすことが無くなることは利点であるが、ケーブルが絡まることで潜水機を回収できなくなる可能性があり、

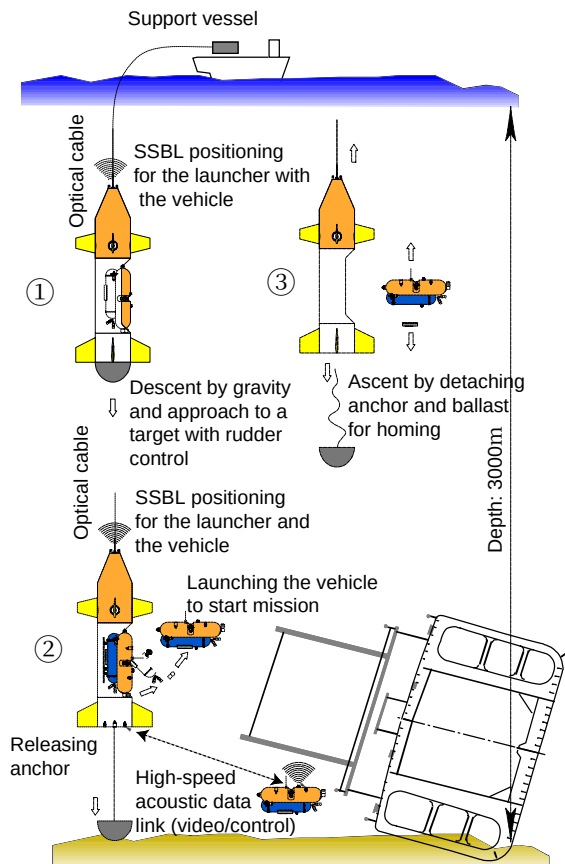


Fig. 1.1 深海モニター用小型ロボットシステム運用概念図

このことがしばしば活動の制約になる。また、深海域で使用するシステムはやはり大規模なシステムになることが多い。自律型無索潜水機は人命を危険にさらすことも絡まることを心配するようなケーブルもない。近年、特に海底ケーブルの検査等の長距離航行型の自律型無索潜水機が実用化され成果を上げている。しかし、自律型無索潜水機は事前にプログラムされた作業を自律的に処理する任務には適しているが、深海域での変化に応じた任務には適さない。

本研究では、上記のような現有の潜水機を持つ問題を解決するため、東京大学生産技術研究所海中工学研究センターとの共同研究を通じて、ROV と AUV の両者の長を併せ持つ深海モニター用小型ロボットシステムの技術開発をおこなうことを目標としている。このロボットシステムの主な長は、1)潜水機は索を持たず、2)深海のモニター画像によって必要な作業を実時間で人間が判断して潜水機を遠隔操縦する、3)軽量小型で特定の母船を必要としない機動性に富むシステム、である。深海モニター用小型ロボットシステムの運用概念図を Fig. 1.1 に示す。まず、ビークルを内部に格納した状態で中継機が海上から海底に向けて重力のみによって降下する。中継機はデータ送受信の光ファイバーケーブルのみによって船上装置と結ばれる。降下中は SSBL(Super Short Base Line)方式の音響航法装置を用いて位置計測をしながら舵によって水平位置を制御して海底の目標点に近づく。海底近くでアンカーを投下し、さらにビークルを切り離す。ビークルと中継機とは音響通信によってデータを送受信する。船上の操縦者は高速音響通信による画像を見て必要な判断をその場でおこないながらビークルを遠隔操縦する。音響通信の時間遅れや障害物等による通信途絶に対しては自律機能によってこれを補う。任務が完了したらビークルと中継機はそれぞれバラストとアンカーを切り離して浮力のみで海上に帰還する。

この深海モニター用小型ロボットシステム実現のために必要な要素技術は大きく分けて4つある。高速の画像伝送を可能とする音響通信装置の開発と重力で海底まで降下する際の効果的な水平移動に適した中継機形状の設計、音響通信の時間遅れや障害物等による音響通信不能時のための自律機能の開発、全体システムの小型統合化である。本報告はこれら4つの要素技術の開発およびビークルプロトタイプ製作とこれを用いた性能試験の結果について述べたものである。

2. 高速画像通信装置

2. 1. はじめに

無索式ビークルから動画像を送るためには、最低 64kbits/s 程度の通信速度は必要と考えられる。しかし、これまでに報告されている音響通信装置の伝送速度は最大で 32kbits/s であった。そこで今回、最大 128kbits/s の通信速度を実現する装置を開発し、その性能評価試験をおこなった。

水槽での基本的な動作試験をおこなった後、30m 程度の浅海で通信試験を行い、128kbits/s の通信が行えることを確認した。

2. 2. 設計条件

2. 2. 1. 仕様

本装置を搭載する無索式ビークルの設計条件から、音響通信装置の仕様を Table 2.1 に示す。本システムは小型のビークルに搭載することを目的としているため、可能な限り小型、軽量、かつ低消費電力であることを目標とした。また、使用周波数は、下記に述べる、伝送距離、伝送速度、送受波器のサイズを考慮して約 100kHz とした。

海中伝搬で特徴的な点の一つは音波のドップラーシフトが無視できないほど大きいことである。ビークルの航行速度は 1m/s 程度なのであまり問題にならないが、後述するビークル試験機と母船が直接通信する場合を含めて考えると、母船の動揺により受波器が上下することによるドップラーシフトが大きくなることが考えられる。そこで、本システムでは許容されるドップラーシフトを 0.3% とした。この値は、4.5m/s の相対速度に相当し、ビークルの航行速度は 1m/s 程度であり、中継機は静止していると考えられるので、実用上十分な値である。

2. 2. 2. 送波レベルの検討

水中において音波が距離 r だけ伝搬したときの伝搬損失 TL は次式で近似される。

$$TL = 20 \log r + \alpha r \quad (2.1)$$

ここで、 α は減衰係数であり、周波数に依存するパラメータである。周波数が高いほど大きい値になる。本システムで使用する周波数は、送受波器の検討から約 100kHz と決定したので、この周波数における伝搬損失は、参考文献 1) から約 0.034dB/m である。従って、伝搬距離 $r=500\text{m}$ における減衰は 71dB になる。ここで、送波音圧レベルを 185dB と仮定すれば、受信音圧レベルは 114dB が得られる。受信に必要な S/N を 14dB とすれば、受波器近傍の環境ノイズは 32kHz 帯域で 100dB 以下である必要がある。この条件は、水深 2000m 程度の水中では十分満足できる。

2. 2. 3. 変調方式の検討

これまで、ピークルで使用されている高速データ伝送の変調方式としては、周波数の利用効率や誤り率の特性から、4 相位相変調 (PSK4, Phase Shift Keying-4) が多く使用されている。これは、2 ビット毎のデジタルデータを Fig. 2.1(a)に示す 4 点の位相情報として伝送する方式である。

しかし、PSK4 の応用では、ピークルと海中の中継機間の通信のため、ピークルと母船間の通信に比べ、S/N やドップラーシフト等の外乱の影響が小さいと考えられる。そこで、周波数利用効率がよい 8 相位相変調(PSK8)および 16 値振幅位相変調(QAM, Quadrature Amplitude Modulation(直交振幅位相変調))を使用することとした。これにより、同じ周波数帯域(変調速度)で、PSK4 に比べて、それぞれ、1.5 倍と 2 倍の通信速度が得られる。

ここで、8 相位相変調とは 3 ビット毎のデジタルデータを 8 点の位相情報として伝送する方式である (Fig. 2.1(b))。また、16 値振幅位相変調とは 4 ビット毎のデジタルデータを振幅と位相情報を用いて、Fig. 2.1(c)に示す 16 点の配置で情報を伝送する方式である。

受信信号に雑音が入った場合には、これらの図に示す基準位置を中心に受信信号がばらつくことになる。隣の領域に入ると、受信誤りが発生する。従って、16 値振幅位相変調の場合には、4 相位相変調に比べて、隣接する信号点との距離が近くなるため、信号に雑音が入った場合には、誤りを発生しやすいことが判る。そこで、この場合は周囲雑音や通信距離により変調方式を変え、通信速度を落とすことが必要になる。

Table 2.2 に、本装置で使うことが出来る、変調速度と変調方式の組み合わせによる通信速度を示す。この表から、128kbits/s の伝送には、40kHz の周波数帯域が必要であるので、広い帯域の送受波器の開発が必要になる。

2. 3. 高速音響通信システムの構成

試作した高速音響通信システムは、(1) 送信部、(2) 受信部、(3) 送受波器から構成されている。

2. 3. 1. 送信部

Fig. 2.2 に送信部のハードウェアの構成を示す。ハードウェアは、DSP 基板、電源・D/A・周波数変換基板、電力増幅基板、電源から構成されている。このうち、電源は室内試験をおこなうために装備されているが、ピークルに組み込む場合には、不要である。

信号の流れとしては、送信データを他のコンピュータから RS232C インターフェースで受け取り、DSP 基板により変調処理をおこなう。DSP として

は、アナログデバイス社の浮動小数点演算型の DSP である SHARC(50MHz)を用いている。変調方式としては、前述した PSK4、PSK8、QAM から一つを選択することができ、また、変調速度も 16kHz と 32kHz が選択可能である。これらの選択は、DSP ボード上のスイッチ、およびコマンドでおこなうことが可能である。

変調されたデータは、電源・D/A・周波数変換基板上の D/A 変換器にて中心周波数 32kHz のアナログ信号に変換される。この信号は、同基板上の周波数変換部により約 100kHz の送信信号に変換される。送信信号は、電力増幅基板上にて、送波器を駆動する電圧まで増幅される。

また、電源・D/A・周波数変換基板では、外部から直流 24V を入力し、各基板上に必要な電源を供給している。従って、送信部は、直流 24V 単一電源で動作可能である。

Fig. 2.3 に室内試験用の装置の外観、Fig. 2.4 に内部の写真を示す。Fig. 2.2 に示した基板類は、室内あるいは海上で、装置単体での試験が行えるように専用の筐体に組み込まれている。ピークルに組み込む場合には、Fig. 2.2 の基板部分を取り出して使用する。

2. 3. 2. 受信部

Fig. 2.5 に受信部ハードウェアの構成を示す。受信部のハードウェアは、DSP 基板、電源・D/A・周波数変換基板、受信基板、電源から構成されている。DSP 基板と電源・D/A・周波数変換基板は、送信部と共通の基板である。

信号の流れとしては、受波器で受信した音響信号は、受信基板上にて増幅され、電源・D/A・周波数変換基板上の周波数変換部により中心周波数 32kHz の信号に変換される。その信号は、受信基板上の A/D 変換器によりデジタル化され、DSP に取り込まれる。受信状態のモニターをおこなうために、電源・D/A・周波数変換基板上の D/A 変換器により、アイモニタ信号を出力している。Fig. 2.1 はこの信号を X-Y モードで表示したパターンであり、これによって復調状況を観測することができる。

DSP では、信号のフィルタリング、タイミング復調、自動等化器による波形整形と信号の復調をおこなっている。復調結果は、RS232C インターフェースにより外部に出力される。送信部と同様、復調方式としては、前述した PSK4、PSK8、QAM を選択することができ、また、変調速度も 16kHz と 32kHz が選択可能である。これらの選択は、DSP ボード上のスイッチ、およびコマンドでおこなうことが可能である。

Fig. 2.6 に室内試験用の装置の外観、Fig. 2.7 に

内部の写真を示す。送信部と同じ形状である。これらの基板類も、室内あるいは海上で、装置単体での試験が行えるように専用の筐体に組み込まれている。ビークルに組み込む場合には、Fig. 2.5 の基板部分を取り出して使用する。

2. 3. 3. 送受波器

(1)設計

高速なデータ伝送をおこなうためには、広帯域のトランスデューサが必要になる。また、小型ビークルに搭載するためには、小型でかつ、電力が限られているので送波感度が高い事も重要である。さらに、位相変調は、多重反射の有る環境下では復調できないので指向特性も重要な要素である。

電気信号を音響信号に変換するトランスデューサには、これまでリング型あるいはコイン型の圧電型振動子が用いられていた。しかし、指向特性と広帯域を両立させるために、新たにピエゾコンポジット型の振動子を採用することとした。これは、細い円柱状の圧電振動子を多数集合して板状の振動素子とするもので、各振動子が理想的なピストン運動を行なえるようになり、帯域と指向特性の制御を容易に行える。また、素子の設計は、有限要素法によるコンピュータシミュレーションにより最適な設計をおこなっている。

Fig. 2.8 に開発したトランスデューサの構造を示す。ピエゾコンポジット型圧電素子の前面にマッチング層を配置し周波数特性の拡大を図っている。また、振動子後面からの放射は Backing Layer にて吸収し、指向特性の改善を図っている。圧電素子の前面には、パターン電極が蒸着されており、電極のパターンを工夫することにより、周波数特性と指向特性の両立を図っている。

本トランスデューサは、コンピュータシミュレーションにより、形状や電極のパターンの最適設計がなされている。Fig. 2.9 に送波感度のシミュレーション結果と測定結果の比較を示す。

(2)測定結果

Fig. 2.10 に試作した送受波器の外観を示す。寸法、重量は、

寸法:直径 60mm, 全長 80mm(コネクタ部を除く)

重量: 空中 0.48kgf, 水中 0.32kgf

である。

Fig. 2.11 に送波感度の周波数特性、Fig. 2.12 に受波感度の周波数特性を示す。いずれも、初期の計画通りの特性が得られており、約 100kHz を中心として ± 20 kHz の帯域が得られている。

指向特性については、80kHz、100kHz、120kHz の 3 通りの周波数で測定をおこなった。Fig. 2.13、Fig. 2.14 及び Fig. 2.15 に測定結果を示す。周波数

が高いと指向特性が狭まることが判る。

2. 4. 変調・復調処理

今回開発した音響通信装置は、パソコン通信等で用いられるモデムとほぼ同じ構成である。通常のモデムとの相違点は、伝送媒体が電話線を通る電気信号ではなく海水中を伝搬する音波であるという点である。

Fig. 2.16 に音響通信システムで使用している送信部と受信部のブロック図を示す。下半分がビークルに搭載される送信部、上部が中継機に搭載される受信部である。

2. 4. 1. 変調処理

送信データは、スクランブラにより、0 や 1 が連続しないようなデータ系列に変換される。つぎに、このデータ系列から、変調方式に対応して 2、3、あるいは 4 ビット毎にデータを切り出して、信号点発生部により、Fig. 2.1 に示した信号を作る。この信号を、ロールオフフィルタにより帯域制限し、32kHz の複素キャリア信号を乗算して、振幅位相変調された信号を作り出す。その後、D/A 変換器によりアナログ信号に変換する。これらの処理は DSP のソフトウェアで実現している。D/A 変換された変調信号は中心周波数が 32kHz なので、周波数変換回路により約 100kHz の信号に変換され、さらに増幅されて送波器により水中に放射される。

実際の通信では、データの送信に先立ち、トレーニング信号を送信している。トレーニング信号は、ある決まったパターンのデータ列である。受信部では、この信号を用いて同期の確立と、適応型等化器のタップ係数の収束をおこなっている。

2. 4. 2. 復調処理

受信処理も DSP のソフトウェアで実現している。受波器で受信された信号は、周波数変換回路により中心周波数 32kHz の信号に変換されたのち A/D 変換される。デジタル化された受波信号は、AGC 回路（自動利得調整回路）により振幅を一定にされ、複素キャリア $e^{j\omega t}$ を乗算してベースバンド信号に変換される。次に、ローパスフィルタにより不要な帯域の信号を取り除いた後、適応型等化器に入力される。適応型等化器は、時々刻々変化する伝送路の特性を補償する回路である。適応型等化器の出力は判定回路に入力され、ここで Fig. 2.1 の信号配置と比較してどの位置のデータが送信されているかを判断することにより、送信データが復調される。

判定したデータと基準信号との差を用いて、適応型等化器のタップ定数の更新とキャリア同期をおこなっている。

タイミング抽出部では、受信信号からタイミング

信号を取り出し、送信側と同じタイミング（送信周波数）を再生している。

ドップラーシフトが発生すると、送信側と受信側のタイミングのずれが発生するが、このずれはタイミング抽出回路およびキャリア同期回路で吸収される。

送信開始時には、送信データに先立ち、トレーニング信号が送出されるので、受信部でも同じ系列の信号を同期して発生させ、両者を比較することにより等化器の収束を図っている。

2. 5. 通信試験結果

2. 5. 1. 受信部周波数特性

(1) 測定方法

受信部のアナログ回路の周波数特性を Fig. 2.17 の方法で測定する。測定対象は、受波器の入力から A/D 変換器の入力部分までとしている。

(2) 測定結果

Fig. 2.18 に測定した受信部の周波数特性を示す。受信部には、入力信号レベルが変動しても出力を一定にする AGC 回路が装備されている。この測定では、AGC 回路の利得を 0dB に固定している。100kHz の周波数を中心に ± 20 kHz の範囲で、ほぼ平坦な特性が得られている。また、約 65dB の利得が得られている。AGC による利得可変範囲は ± 40 dB なので、受信利得は、25dB $\sim$ 105dB となっている。

50kHz 以下の周波数は、コマンドリンクや位置測定用のトランスポンダに使用する予定である。そのため、これらの装置からの干渉を避けるために、50kHz 以下の信号は、60dB 以上減衰させる必要がある。この図では、40dB 程度の減衰量に見えるが、利得 30dB 以下の測定は、測定系の S/N の問題で、正しく測定されていない。入力信号レベルを増大させて測定した結果によれば、50kHz 以下の周波数帯域では、70dB 以上の減衰量が確保されている。

2. 5. 2. ビットエラーレートの測定

(1) 測定方法

装置単体での性能を確認するために、送信部と受信部を電氣的に接続し、誤り率の特性の測定をおこなう。測定は、下記の要領でおこなう。

- Fig. 2.19 に示すように、送信部の送信信号をノイズ発生器から発生させたノイズと電氣的に加算し、受信部の受波器入力に接続する。
- アッテネータの減衰率を変えて、S/N を変化させる。
- S/N は、受信部の A/D 変換器の入力で計測する。すなわち、ノイズのみの電圧値と信号のみの電圧値を測定し、A/D 変換器入力における

S/N を計算する。さらに、デジタルフィルタにより帯域制限をおこなっているため、その補正を行い、実際の S/N とする。

- 外部の計算機により誤り率測定のためのテストパターンを発生し、受信された結果を計算機に取り込み、送信データと比較して誤り率を算出する。
- 測定は、Table 2.2 に示している 6 種類の組み合わせでおこなう。

(2) 測定結果

Fig. 2.20 $\sim$ Fig. 2.21 に測定結果を示す。誤り率の測定は約 2 分間行い、誤りのビット数から誤り率を算出している。誤り率と S/N の関係は、理論的には、変調周波数に依存せずに、変調方式のみに依存する。両者のグラフを比べてみると、ほぼ同じ特性であることが判る。Fig. 2.20 $\sim$ Fig. 2.21 には理論値も示したが、実際にモデムを作成した場合にこの理論値と同じ特性を得ることは困難で、伝送路のひずみが全くない理想的な状態でも約 1 $\sim$ 2dB 状態劣化する。したがって、理論値との相違は測定精度の問題などから考えて妥当と考えられ、変調方式の違いによる特性は、PSK4 と QAM ではほぼ理論値²⁾に近い値が得られていると言ってよい。誤り訂正符号化をおこなった場合には、誤り率が 10^{-3} 以下ならば実用上問題のない通信が可能³⁾である。

2. 5. 3. ドップラーシフト補償範囲の測定

(1) 測定方法

水中伝搬で定量的なドップラーシフトを発生させることは難しいので、Fig. 2.19 に示した構成で、送信部のクロックを周期的に変化させ、ドップラーシフトと等価な信号を発生させる。送信部のクロック発信器の代わりに、FM 変調可能な外部発信器を接続し、0.3%の周波数変移を持つ信号を発生させる。変化の周期は、母船の動揺周期から 5 秒としている。

(2) 測定結果

周期 5 秒、周波数変移 0.3%の変動に対しても、エラーなく通信が可能であった。

2. 5. 4. 水槽試験

開発した送受波器を用いて、室内の水槽にて近距離での通信試験を行い、128kbps/s の通信が可能であることを検証する。また、最小受信レベルの計測を行い、深海での最大通信距離の推定をおこなうことを目的としている。

(1) 測定方法

- 長さ 4m 程度のパイプに送波器と受波器を 1m の間隔で対向させて取り付ける。受波器の位置には、音圧レベルを測定するための標準ハイドロフォンを取り付ける。上記構成の送受波器を

水槽中央部分に吊りおろし、通信試験をおこなうとともに、送波器から送信される音圧を測定する。

- ・送信するデータは、ランダムデータとし、受信された信号を送信データと比較して誤り率を算出する。
- ・送信電圧を低減し、受波器で受ける受波音圧と通信誤り率の測定をおこなう。
- ・測定は、室内実験と同じく Table 2.2 に示した 6 通りのビットレートでおこなう。

(2) 測定結果

Fig. 2.22 に測定の様子を示す。左から、水中音圧計、オシロスコープ、受信部、送信部、送信データ作成用パソコン、受信および誤り率計測用パソコンである。

Fig. 2.23 に変調速度 16kHz の測定結果、Fig. 2.24 に変調速度 32kHz の測定結果を示す。誤り率は約 2 分間の通信で発生する誤りビット数から計算している。送信レベルを変化させて誤り率を測定した。

Fig. 2.25～2.27 に受信信号のアイパターンを示す。この例は S/N が良い状態で観測したので、受信信号点のばらつきがほとんどなく、誤りが発生しない状況である。

誤り率のグラフは、ノイズを加算して誤り率の特性を測定した結果とほぼ同じ傾向を示している。すなわち、受信音圧が低い場合には、S/N が低下して誤りが増大している。

両者のグラフを比較すると、変調速度 32kHz の方が、特性が 4～5dB 程度悪化している。受波信号レベルは一定であるが、帯域が 20kHz から 40kHz に 2 倍に増えているため、ノイズスペクトルを一樣とすれば、受信ノイズは 3dB 増大することになる。そのため、変調速度 32kHz の S/N は、変調速度 16kHz に比べ 3dB 悪化することになり、測定結果の理由となっている。実際は、ノイズスペクトルが一樣ではないので、さらに特性が悪くなったと思われる。

送波レベルの項(2.2.2)で検討したが、距離 500m の通信では、受波音圧レベルは 114dB になる。この音圧レベルでは、本測定結果によると、変調方式が PSK4 で通信速度 64kbps/s の通信が可能であることが判る。

今回の水槽における測定では、外来の電氣的なノイズが大きく、電氣的なアースの取り方で、誤り率の測定結果が大幅に変化していた。受信限界を決める要素は、外来雑音（音響ノイズ、電気ノイズ）と装置自身の熱雑音である。理論的には、128kbps/s の通信が行える S/N が確保されているが、今回の測定では、外来雑音の電氣的なノイズが大きく、受信

限界を悪くしていた。

2. 5. 5. 浅海での通信試験

(1) 試験方法

水深約 30m の海域に係留されている台船から、送波器と受波器を上下方向に並べて吊り下げ、通信試験をおこなう。試験要領を Fig. 2.28 に示す。また、測定系を Fig. 2.29 に示す。パソコン 1 にて試験用データを作成する。パソコン 2 では、受信データの誤り率の測定と画像の表示をおこなう。この試験は浅海にておこなったため外来雑音の影響が比較的大きかったが、開発した装置の単独状態での基本性能を確認する上では十分なデータが得られた。

(2) 試験用ソフトウェア

音響通信装置の試験をおこなうために、下記の機能を有し、Windows 上で動作するソフトウェアを作成した。Fig. 2.30 に送信プログラム、Fig. 2.31 に受信プログラムの画面イメージを示す。

- ・誤り率の測定送信プログラムから、特定のパターンを送信する。受信プログラムは、受信データと送信データを比較して、誤りのビット数を積算する。受信したビット数と誤りのビット数から誤り率を計算し、表示をおこなう。
- ・ファイルの送信プログラムからディスクに格納されているファイルを順次送信する。受信プログラムでは、受信したデータのヘッダを解析し、画像ファイルならばその内容を画面のウィンド内に表示する。
- ・誤り訂正送信データには、リードソロモン誤り訂正符号を付加し、受信側では誤り訂正をおこなう機能を有する。
- ・通信速度、変調方式の選択変調周波数と変調方式を選択することにより、Table 2.2 に示した通信速度を選択する。

(3) 試験結果

ランダムデータによる通信試験では、Table 2.1 に示した 32kbps/s から 128kbps/s の通信速度で通信可能であることを確認した。

次に、送受波器の取り付け位置を水平方向に変え、指向角度による影響を調べた。その結果、通信速度が速い場合には、指向角度が 20 度を超えると通信が困難になることが判明した。Fig. 2.14 に示すように、周波数が高い場合には、指向特性が狭くなっている。これは、伝送速度が 128kbps/s の場合には信号成分が 120kHz まで延びているため、この指向特性の影響を大きく受けるためである。また、送受波器の周波数特性は低域まで伸びているので、中心周波数を 95kHz 程度まで下げれば、指向特性の影響を少し低減させることが可能である。

2. 6. まとめ

最大 128kb/s の通信速度を実現する装置を開発した。水槽での基本的な動作試験をおこなった後、30m 程度の浅海で通信試験を行い、128kb/s の通信が行えることを検証した。

送受波器は周波数特性に関しては十分な特性が得られている。指向特性が若干狭くなったが、中継機に搭載する受波器を無指向性により実用上問題ないと考えられる。

Table 2.1 高速音響通信装置仕様

項 目	仕 様
送波音圧レベル	185dB 以上
通信方式	片方向のみ
変調方式	4 相 PSK 、8 相 PSK、あるいは 16QAM
伝送速度	64? 128kb/s
周波数	100kHz 帯
指向特性	±30 度（両側、目標）
伝送距離	500m 以上
ドップラーシフト	音速の 0.3%まで補償
外部インターフェース	RS232C
電源	DC24V, 2A（組み込み時） AC100V（室内試験用）

Table 2.2 変調方式と通信速度

変調周波数 (kHz)	周波数帯域 (kHz)	変調方式と通信速度(kb/s)		
		PSK4	PSK8	QAM
16	20	32	48	64
32	40	64	96	128

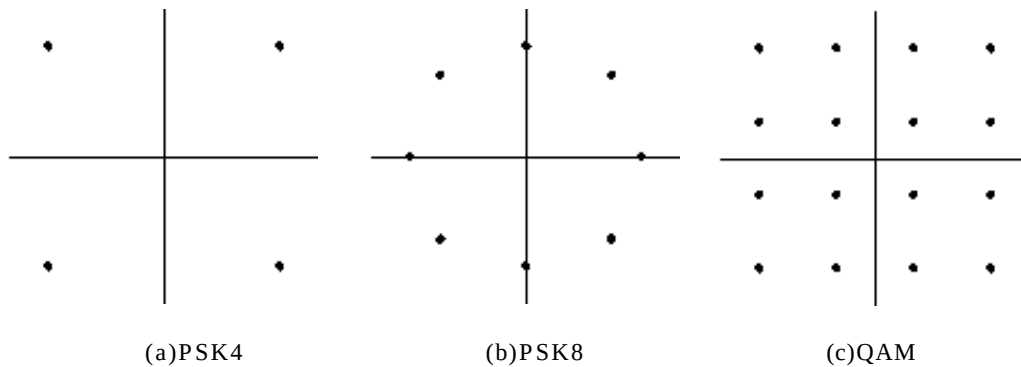


Fig. 2.1 各種変調方式による信号点の配置

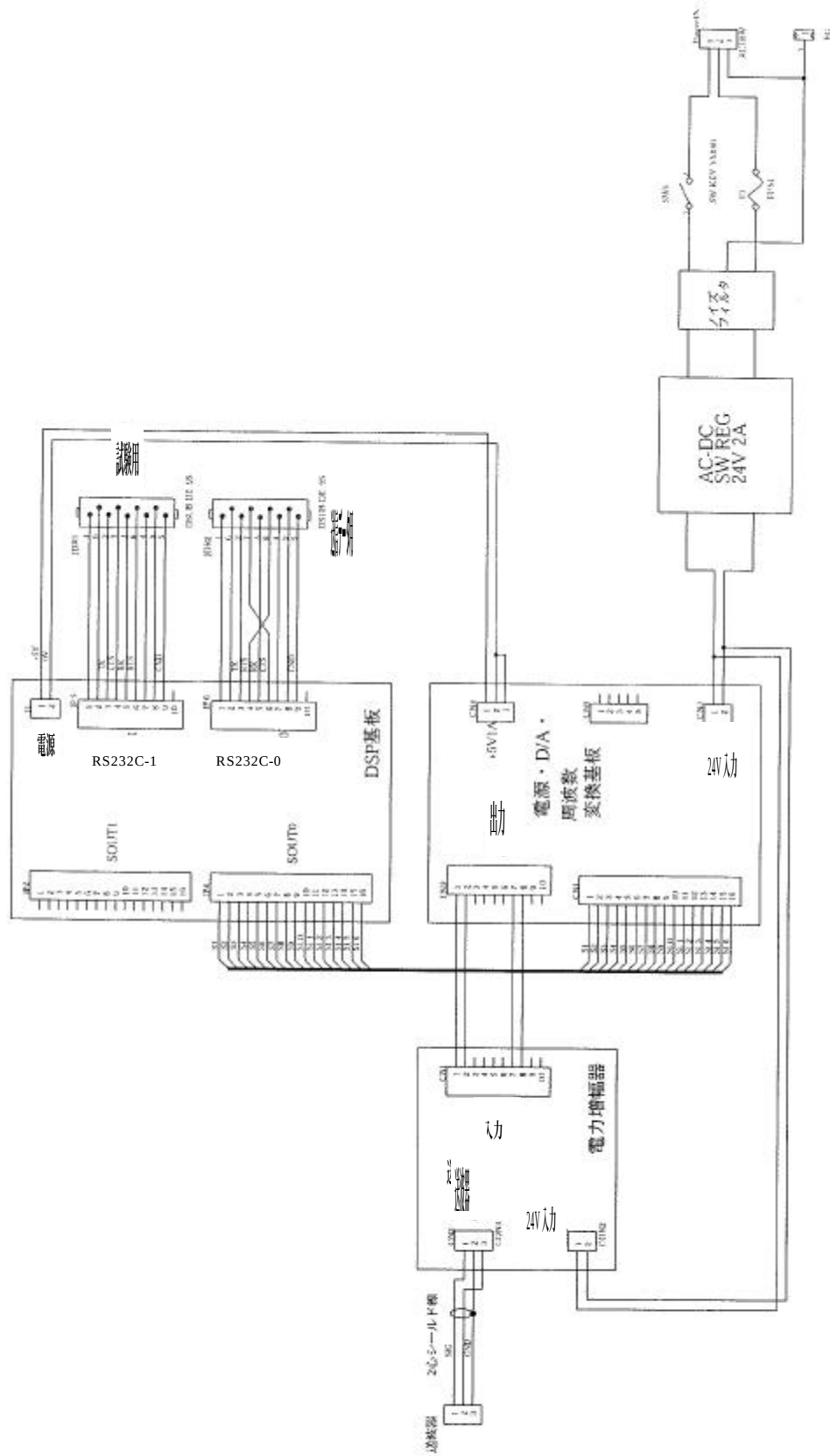


Fig.2.2 送信部のハードウェア構成



Fig. 2.3 送信部外観

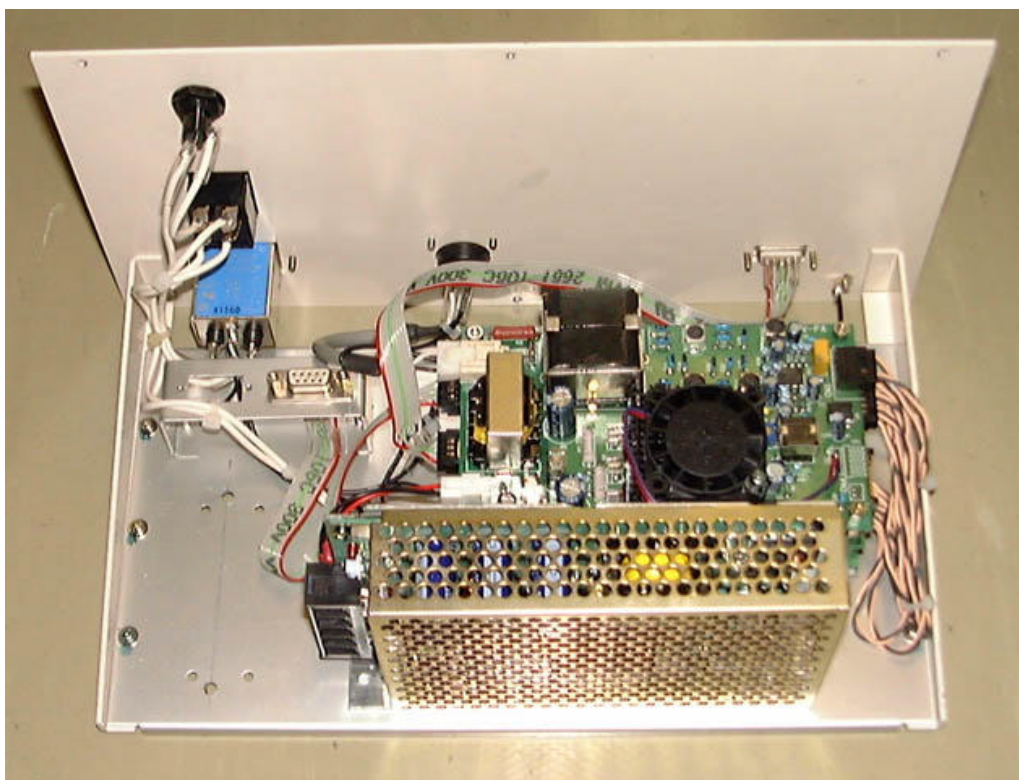


Fig. 2.4 送信部内部

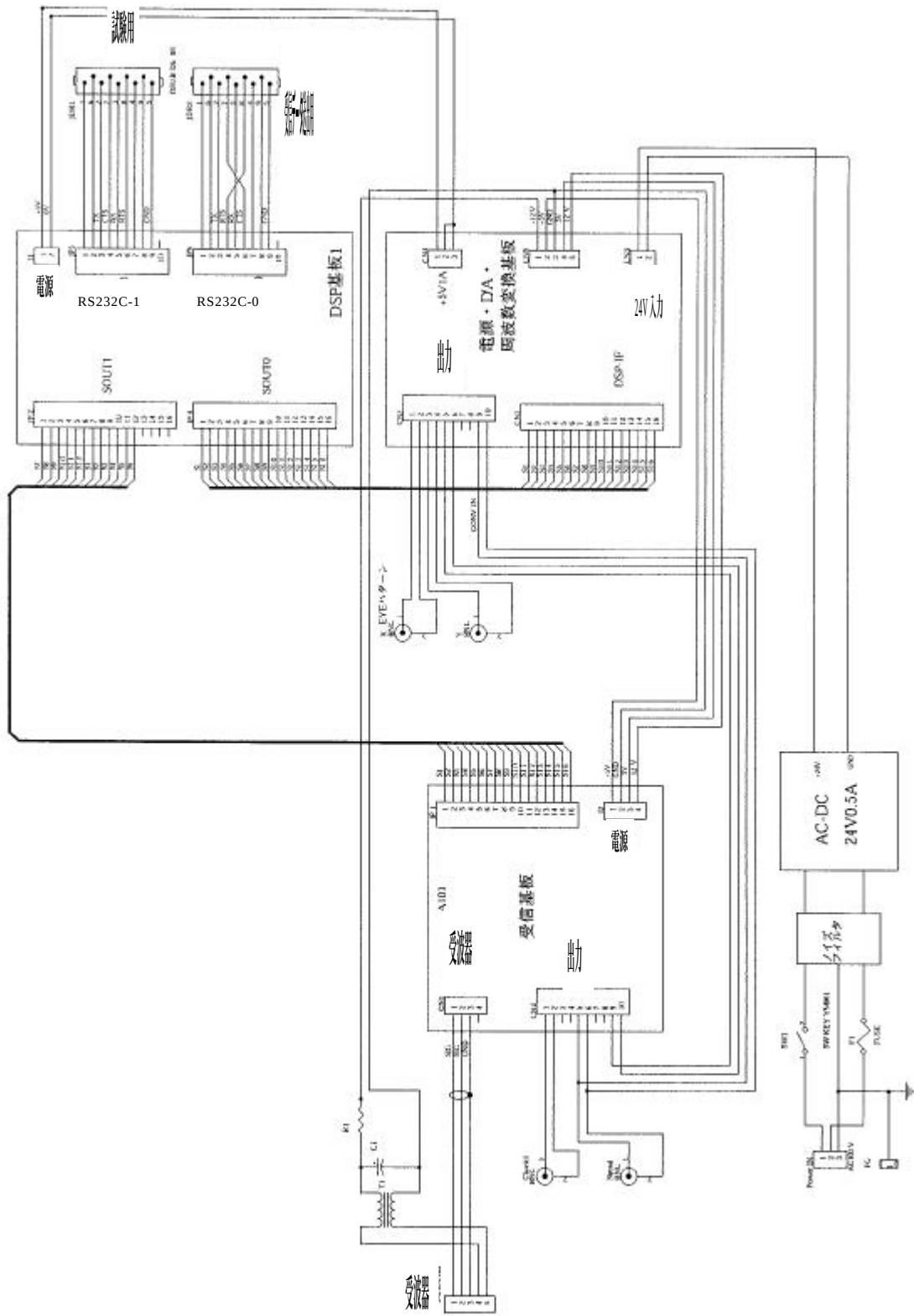


Fig.2.5 受信部のハードウェア構成



Fig. 2.6 受信部外観

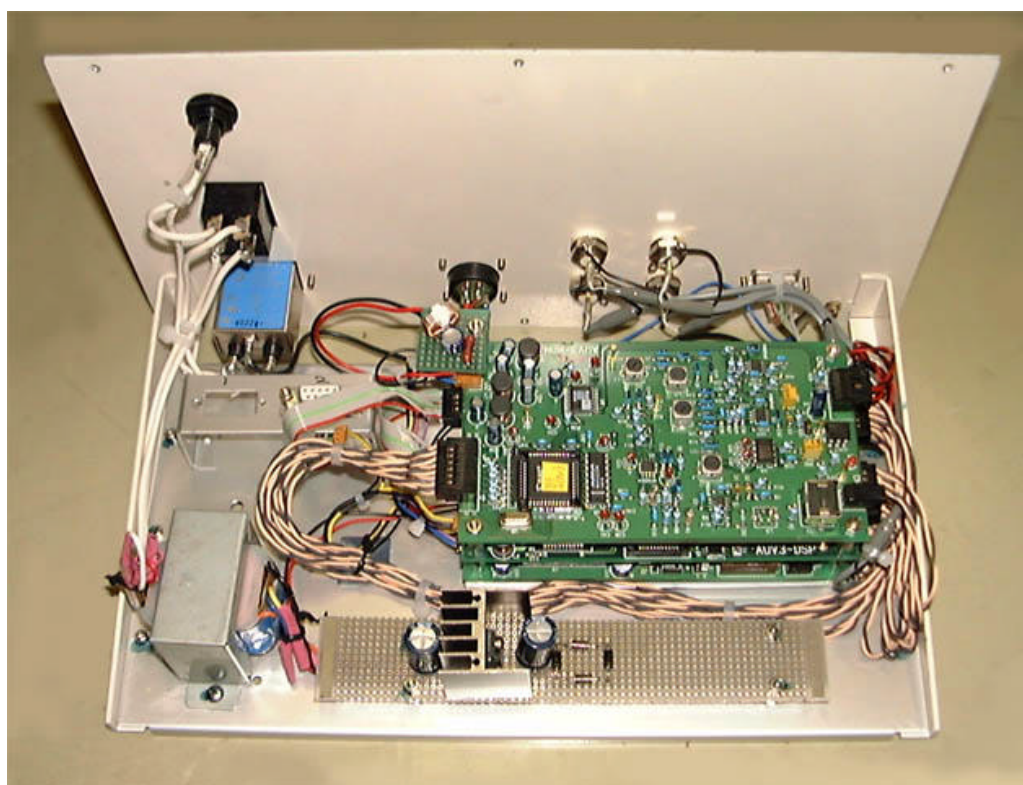


Fig. 2.7 受信部内部

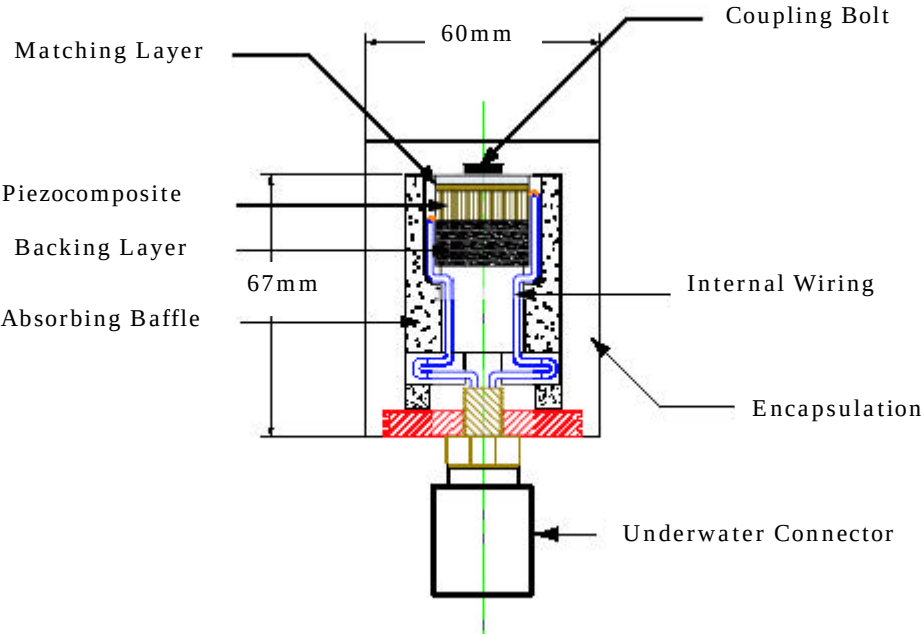


Fig. 2.8 送受波器の構造

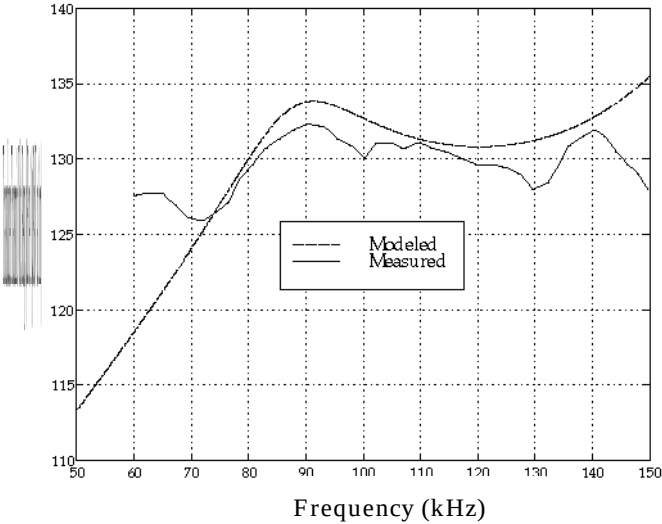


Fig. 2.9 送波感度の設定値



Fig. 2.10 送受波器の外観

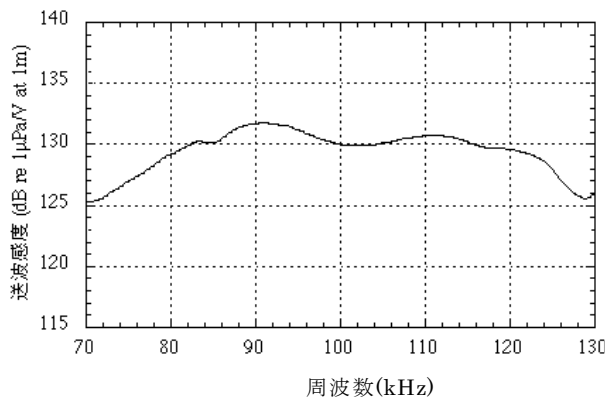


Fig. 2.11 送波感度の周波数特性

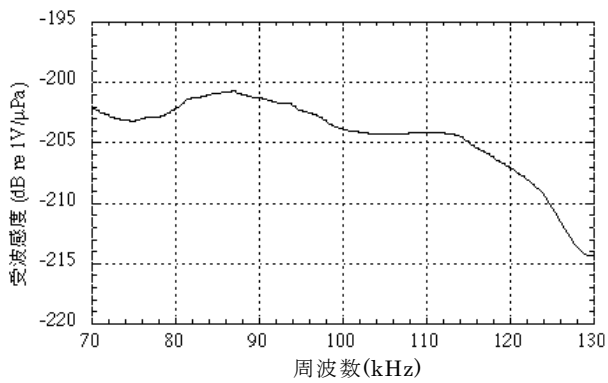


Fig. 2.12 受波感度の周波数特性

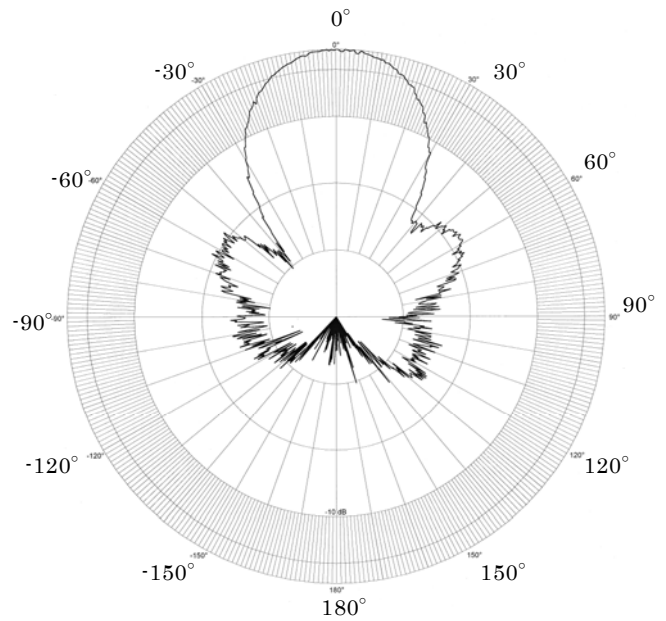


Fig. 2.14 送波感度の指向特性(周波数 100kHz)

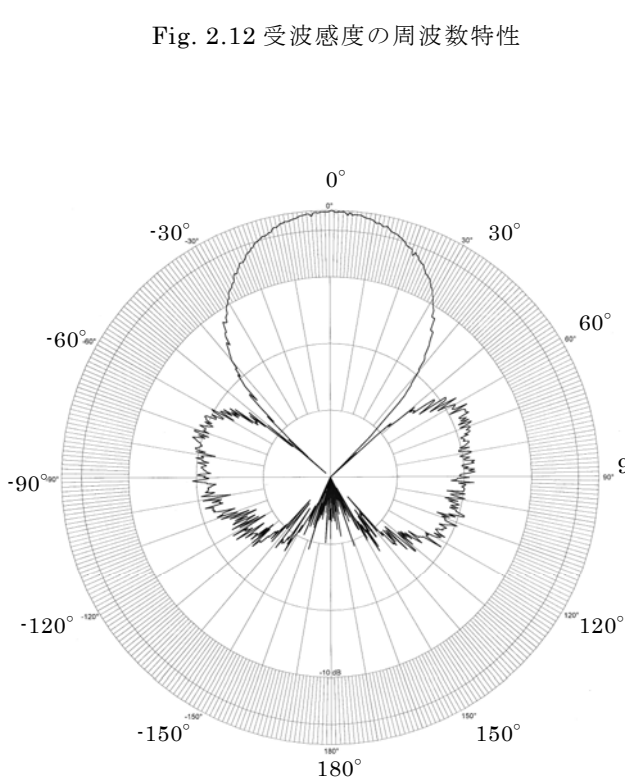


Fig. 2.13 送波感度の指向特性(周波数 80kHz)

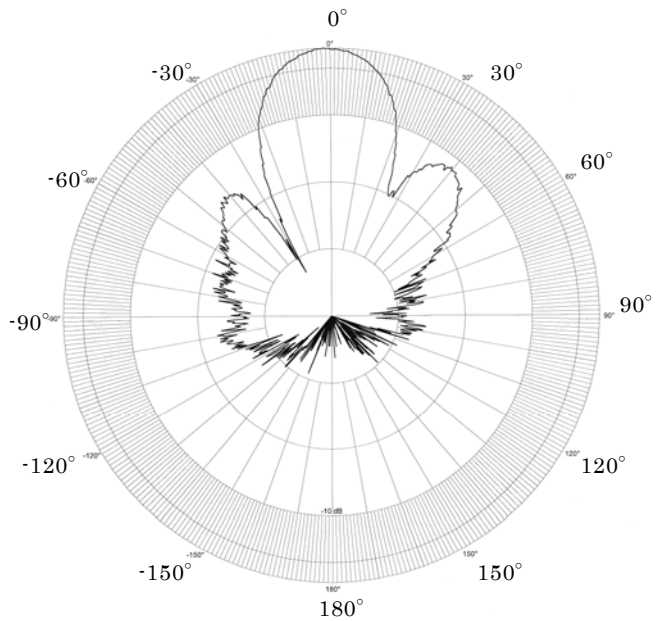


Fig. 2.15 送波感度の指向特性(周波数 120kHz)

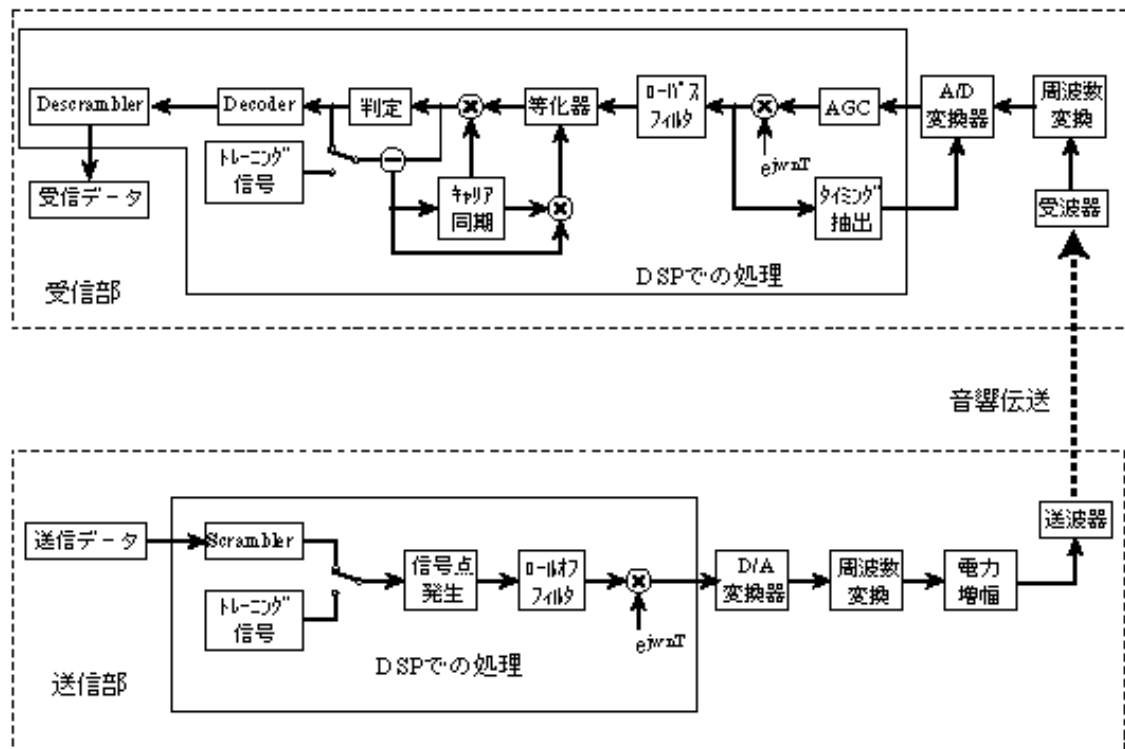


Fig. 2.16 変調・復調のブロック図

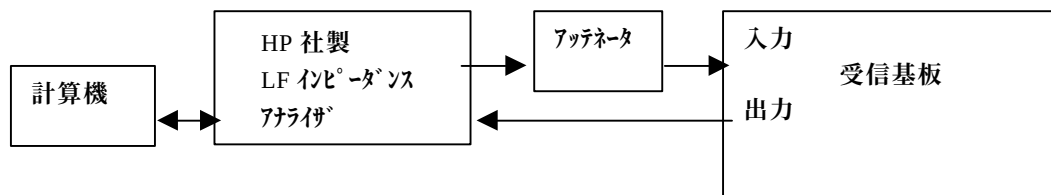


Fig. 2.17 周波数特性の測定

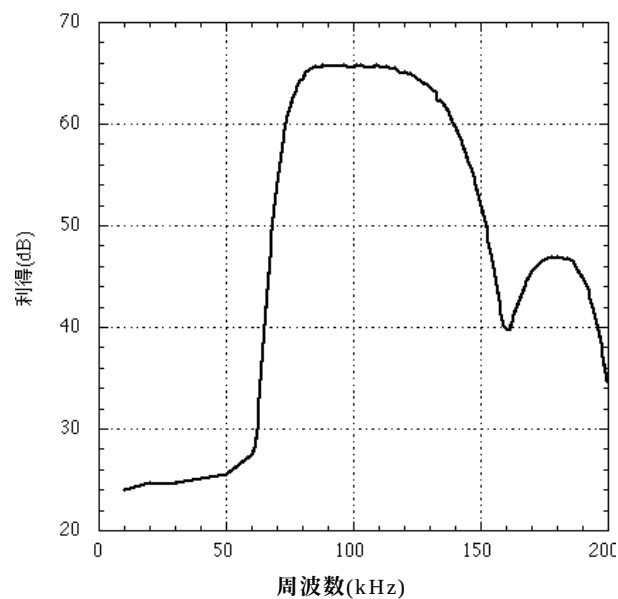


Fig. 2.18 受信部の周波数特性

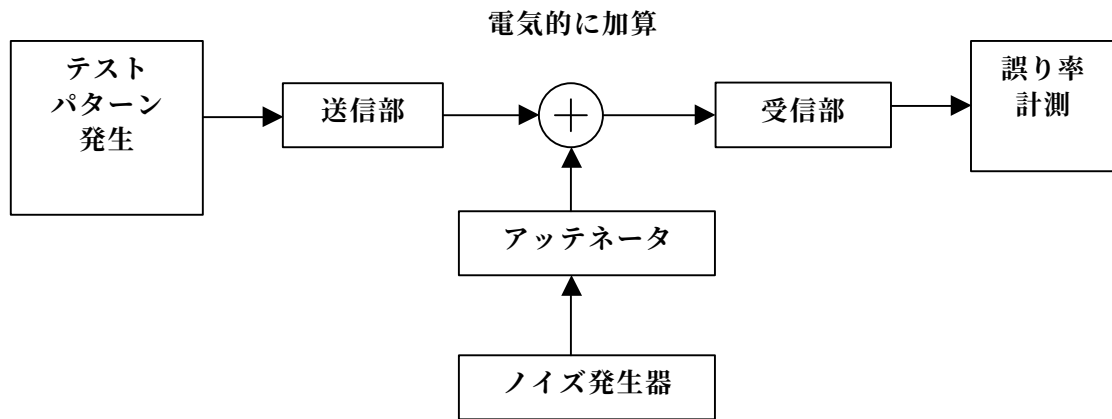


Fig. 2.19 誤り率の測定

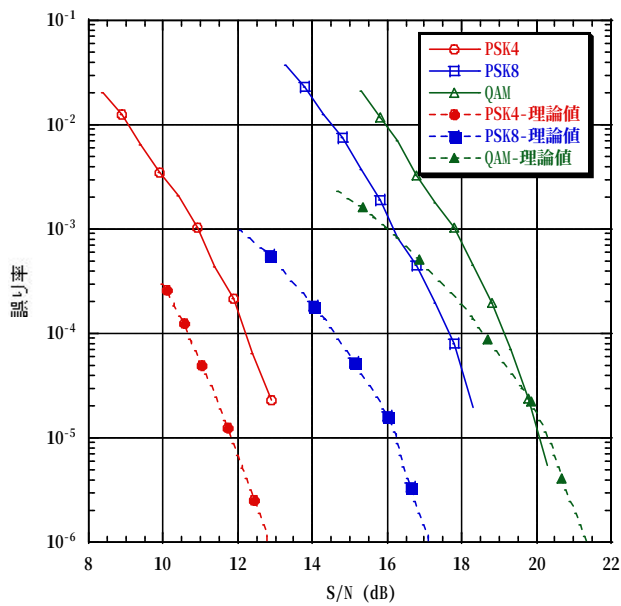


Fig. 2.20 変調周波数 16kHz における誤り率

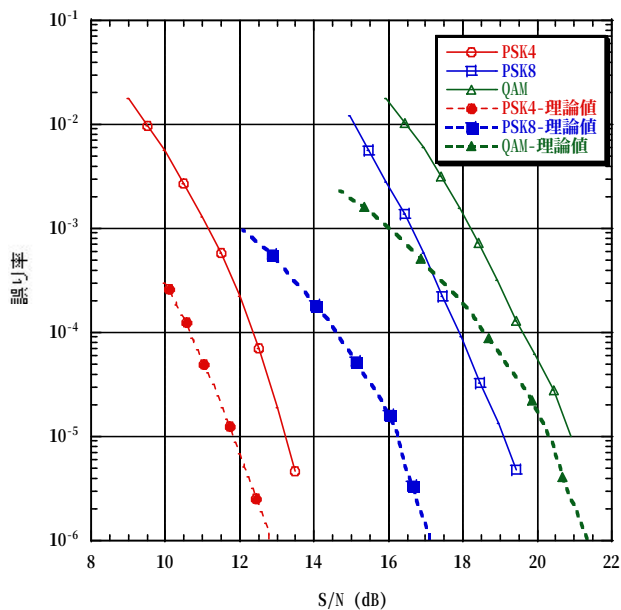


Fig. 2.21 変調周波数 32kHz における誤り率



Fig. 2.22 ドップラーシフト補償範囲の測定用機材

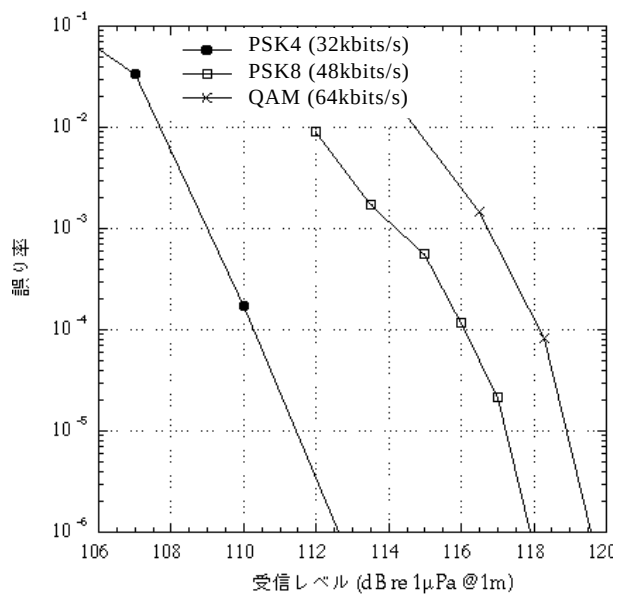


Fig. 2.23 変調周波数 16kHz における誤り率
(水槽試験)

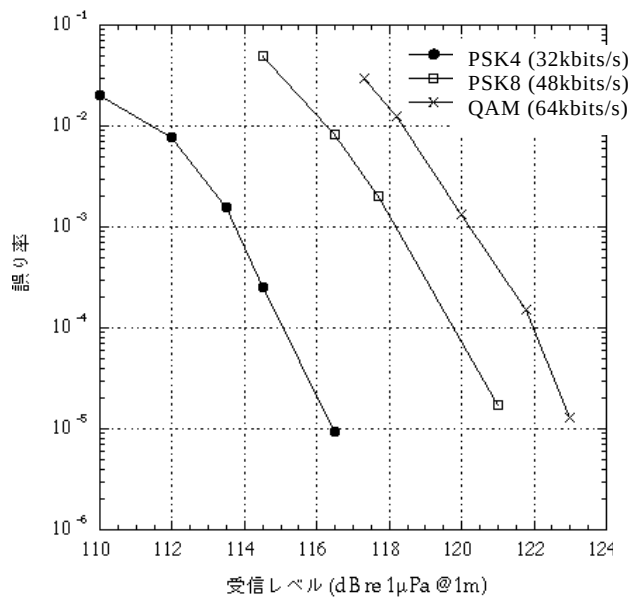


Fig. 2.24 変調周波数 32kHz における誤り率
(水槽試験)

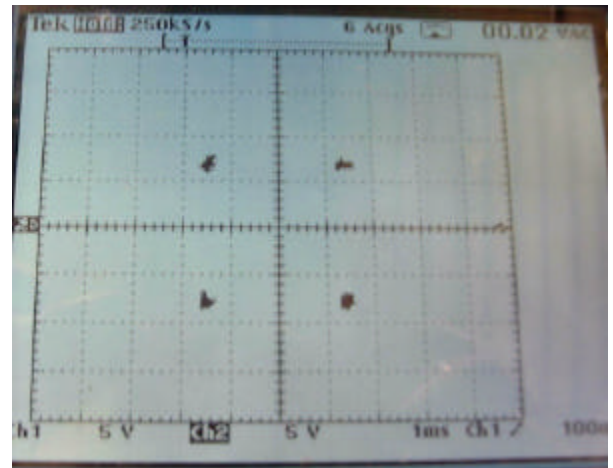


Fig. 2.25 PSK4(64kb/s)受信信号パターン

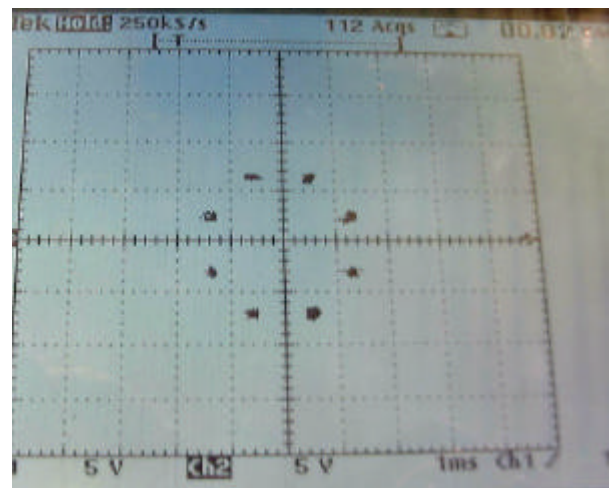


Fig. 2.26 PSK8(96kb/s)受信信号パターン

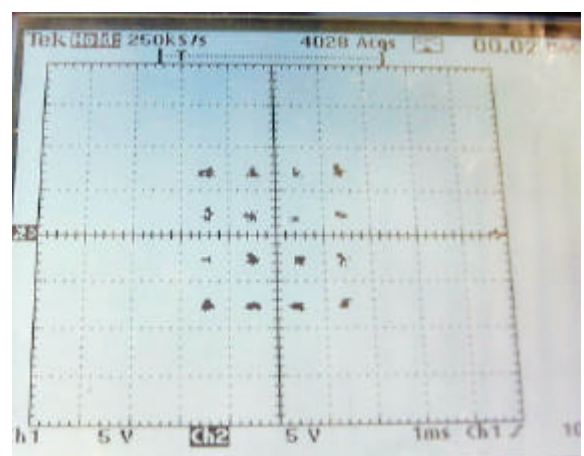


Fig. 2.27 QAM(128kb/s)受信信号パターン

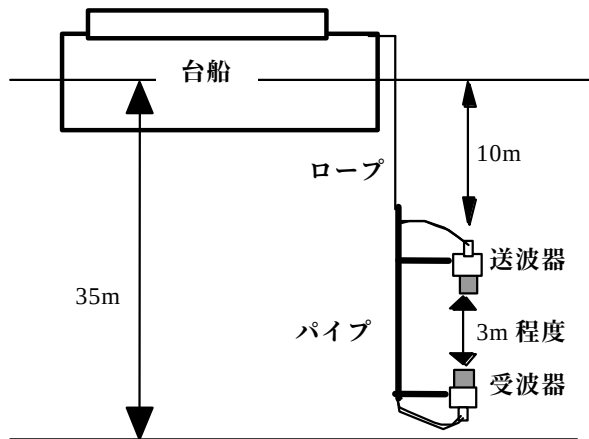


Fig. 2.28 浅海での通信試験

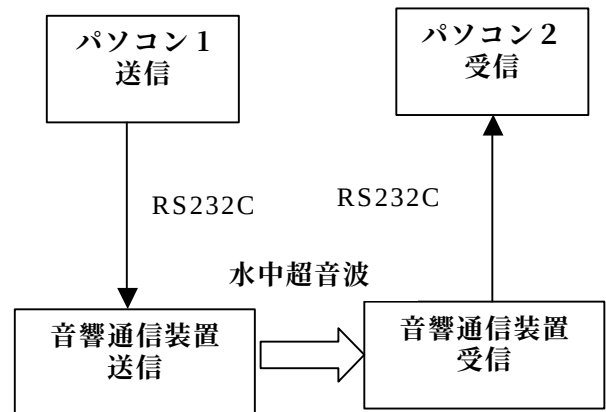


Fig. 2.29 測定系

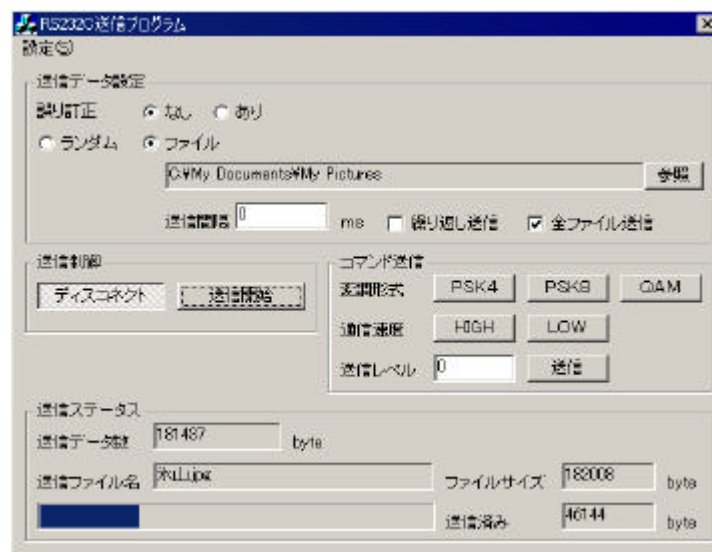


Fig. 2.30 送信プログラムの画面



Fig. 2.31 受信プログラムの画面

3. 中継機降下運動特性

3. 1. はじめに

本研究で開発を目標としている深海モニター用小型ロボットシステムは、ビークルを中継機の内部に格納した状態で、重力によって海面から海底まで降下していく。中継機が海底から 500m の位置にあり、音響通信装置の指向性が 30 度とするとビークルの行動範囲は中継機を中心とした半径 250m の範囲内に限られることになる。従って、ビークルが十分活動するためには中継機が海底目標地点上へできるだけ接近する必要がある。

本章では中継機が降下運動時に効率的に水平方向移動するための形状を流体力学的観点から検討した結果について述べる。基本となる中継機形状は、Fig. 3.1 の座標系に示すように、中継機本体の後部(上部)に 2 対の舵、前部(下部)に 2 対のひれを備えた形状とする。

まず、降下運動時の非線形釣合方程式を導き、曳航模型実験データをもとに具体的な係数を求める。次に、実測した流体力データをもとにした非線形釣合方程式を解くことによって降下時運動の基本特性を明らかにする。さらに、この非線形釣合方程式をもとにひれがある場合とない場合との降下時運動特性の比較検討をおこない、重心と浮心の距離が十分短くない場合はひれがない状態の方が効果的に水平移動できることを明らかにする。最後に、降下運動を実際に計測するための模型を製作し深海水槽で降下時運動の計測をおこなって上記の一連の理論計算結果が正しいことを確認する。

3. 2. 降下運動の非線形釣合方程式

Fig. 3.1 に座標系を示す。座標系 $o-x_1, x_2, x_3$ は物体固定の座標系である。速度成分は u_i で表し、 i は 1 から 6 の値を取る。1, 2, 3 は並進運動、4, 5, 6 は回転運動を表す。舵角は d_i で表し、ここで i は 2 対の舵に応じて 1 あるいは 2 の値を取るものとする。

x_3 軸に関する対称性を考慮して重心位置 (x_{g1}, x_{g2}, x_{g3}) と浮心位置 (x_{b1}, x_{b2}, x_{b3}) に関して次式が成り立つとする。

$$\begin{cases} x_{g1} = x_{g2} = 0 \\ x_{b1} = x_{b2} = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

対称性を考慮すれば付加質量に関しては次式が成り立つ。

$$m_{11} = m_{22} \quad (3.2)$$

以上より、非線形の降下運動時の釣合方程式は回転運動を無視することによって次式のように得られる⁴⁾。

$$\begin{cases} 0 = X_{F1} + X_{R1} + X_{B1} - (m - rV)g \sin q \\ 0 = X_{F2} + X_{R2} + X_{B2} + (m - rV)g \sin f \cos q \\ 0 = X_{F3} + X_{R3} + X_{B3} + (m - rV)g \cos q \cos f \\ (m_{33} - m_{11})(\bar{u}_3 + \tilde{u}_3)u_2 = X_{F4} + X_{R4} + X_{B4} \\ \quad - (mx_{g3} - rVx_{b3})g \sin f \cos q \\ -(m_{33} - m_{11})(\bar{u}_3 + \tilde{u}_3)u_1 = X_{F5} + X_{R5} + X_{B5} \\ \quad - (mx_{g3} - rVx_{b3})g \sin q \end{cases} \quad (3.3)$$

X_{Fi} , X_{Ri} , X_{Bi} はひれと舵と本体に働く流体力をそれぞれ表す。 m と V は質量と排水容積をそれぞれ表す。 r は水の密度、 g は重力加速度を表す。 q と f はオイラー角を表す。 m_{33} は x_3 軸方向運動に対する付加質量を表す。

$\bar{u}_3$ は鉛直下向きにまっすぐ降下していく際の速度を表す。 $\tilde{u}_3$ は u_3 成分の $\bar{u}_3$ からの変位を表す。これらの関係は次式で表される。

$$u_3 = \bar{u}_3 + \tilde{u}_3 \quad (3.4)$$

$\bar{u}_3$ は C_D を抵抗係数としたとき次式で定義される。

$$(m - rV)g = \frac{1}{2}C_D r L^2 \bar{u}_3^2 \quad (3.5)$$

上式は真っ直ぐに降下する場合の釣り合い状態を表す。

3. 3. 流体力項の表現

ひれと舵と本体に働く流体力 X_{Fi} , X_{Ri} , X_{Bi} は次式で表されると仮定する。

$$\begin{cases} X_{F1} + X_{R1} + X_{B1} = F_{F1} + F_{R1} \cos d_1 \\ X_{F2} + X_{R2} + X_{B2} = F_{F2} + F_{R2} \cos d_2 \\ X_{F3} + X_{R3} + X_{B3} = -F_{R1} \sin d_1 - F_{R2} \sin d_2 \\ \quad - \frac{1}{2} C_D r L^2 \bar{u}_3 (\bar{u}_3 + 2\tilde{u}_3) \\ X_{F4} + X_{R4} + X_{B4} = -x_{F3} F_{F2} - x_{R3} F_{R2} \cos d_2 \\ X_{F5} + X_{R5} + X_{B5} = x_{F3} F_{F1} + x_{R3} F_{R1} \cos d_1 \end{cases} \quad \begin{cases} a_{F1} = g_{F1} b_1 \\ a_{R1} = d_1 + g_{R1} b_1 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$(3.6)$$

F_{Fi} と F_{Ri} はひれと舵に働く直圧力を表す。 x_{F3} と x_{R3} はひれと舵の座標を表す。上式において本体の流体力はその左辺に明記されていないが、以下に述べるように F_{Fi} と F_{Ri} の項に実験係数を用いることで考慮することとする。

舵とひれに働く流体力は基本的に船の舵に働く力の推定法をもとに計算することとする。対称性を考慮して2対のひれと舵に働く流体力 F_{F1} , F_{R1} を次式で表す。

$$\begin{cases} F_{F1} = r A_F f_{(l_F)} U_{F1}^2 \sin a_{F1} \\ F_{R1} = r A_R f_{(l_R)} U_{R1}^2 \sin a_{R1} \end{cases} \quad (3.7)$$

A_F と A_R は1つのひれあるいは舵の面積を表す。 $f_{(l)}$ は、 l をひれまたは舵の縦横比としたとき次式で表される揚力傾斜を表す。

$$f_{(l)} = \frac{6.13l}{l + 2.25} \quad (3.8)$$

l_F と l_R は1対のひれまたは舵の縦横比を表し、これらは次式で計算される。

$$\begin{cases} l_F = 2S_F^2 / A_F \\ l_R = 2S_R^2 / A_R \end{cases} \quad (3.9)$$

S_F と S_R はひれと舵の翼としての幅を表す。 U_F と U_R はひれと舵への有効流入速度を表し、それぞれ次式で定義される。

$$\begin{cases} U_{F1}^2 = u_3^2 + (m_F u_1)^2 \\ U_{R1}^2 = u_3^2 + (m_R u_1)^2 \end{cases} \quad (3.10)$$

m_F と m_R は本体がひれと舵への有効流入速度におよぼす影響を表す実験係数である。 a_F と a_R はひれと舵への有効流入角を表し、次式で定義される。

g_F と g_R は本体がひれと舵への有効流入角におよぼす影響を表す実験係数である。 b_1 は次式で表される斜航角を表す。

$$b_1 = \tan^{-1}(-u_1 / u_3) \quad (3.12)$$

付加質量はひれと舵およびこれらの間の本体からの寄与によって次式によって計算されると仮定する。

$$\begin{cases} m_{11} = pr \left\{ \left(\frac{S_F}{6} \frac{C_{Fr}^3 - C_{Ft}^3}{C_{Fr} - C_{Ft}} + \frac{D^2}{4} C_{Fr} \right) \right. \\ \quad \left. + \left(\frac{S_R}{6} \frac{C_{Rr}^3 - C_{Rt}^3}{C_{Rr} - C_{Rt}} + \frac{D^2}{4} C_{Rr} \right) \right\} \\ m_{33} = \frac{2}{3} pr \left(\frac{D}{2} \right)^3 \end{cases} \quad (3.13)$$

D は本体の直径、 C_{Fr} , C_{Rr} と C_{Ft} , C_{Rt} はひれと舵の翼としての弦長を表す。

3. 4. 流体力データに基づく方程式の係数

3. 4. 1. 流体力計測実験

中継機模型を曳航して流体力を計測し具体的な係数を求めた。曳航模型寸法を Table 3.1 に示す。実機長さを 3.9m とした時、実機との寸法比は 1/7.378 である。ひれと舵は M と S の2種類の大きさを用意した。

模型の設置状態を Fig. 3.2 に示す。模型内部に防水型検力計を装着している。計測した力とモーメントは、 x_1 軸方向の力 X_1 、 x_3 軸方向の力 X_3 、 x_2 軸まわりのモーメント X_5 である。

実験状態を Table 3.2 に示す。曳航速度 U は次式で定義される。

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_3^2} \quad (3.14)$$

3. 4. 2. 流体力係数

斜航試験状態の流体力を Fig. 3.3 に示す。実線と破線は推定式による計算値である。ただし、この計算では実験係数を次式の値として計算した。

$$\begin{cases} \mu_F = 1.01, \gamma_F = 1.96 \\ \mu_R = 1.04, \gamma_R = 1.70 \end{cases} \quad (3.15)$$

上記の値から、本体の影響は主に流入角の係数 γ_F と γ_R に表れていることがわかる。船の舵への流入角に対する旋回角速度の影響を表す係数には一般に2.0という値が用いられるが、上記の値はこれに近い値となっている。

抵抗係数 C_D は斜航角 β_1 が零の時の値から次式のように求めた。

$$C_D = \begin{cases} 0.00672 & (\text{Fin \& Rudder} - S) \\ 0.00782 & (\text{Fin \& Rudder} - M) \end{cases} \quad (3.16)$$

舵角試験の結果を Fig. 3.4 と Fig. 3.5 に示す。推定式から計算した値は実験値とほぼ一致していることがわかる。

3. 5. 降下運動の非線形推定計算(ひれ付き状態)

上述の実験係数を用いてひれ付き状態の中継機の降下運動を表す非線形方程式を、Newton-Raphson 法を用いて解いた。未知数は $u_1, u_2, \tilde{u}_3, \phi, \theta$ である。

得られた解は空間固定座標系に変換して整理した。

3. 5. 1. 空間固定座標系

空間固定座標系を $o-x_{1e}, x_{2e}, x_{3e}$ と表す。水平方向速度成分 u_{1e}, u_{2e} と鉛直方向速度成分 u_{3e} は次式で計算される。

$$\begin{cases} u_{1e} = u_1 \cos \theta + u_2 \sin \phi \sin \theta + u_3 \cos \phi \sin \theta \\ u_{2e} = u_2 \cos \phi - u_3 \sin \phi \\ u_{3e} = -u_1 \sin \theta + u_2 \sin \phi \cos \theta + u_3 \cos \phi \cos \theta \end{cases} \quad (3.17)$$

降下中の水平方向の移動距離 D_{H1} と D_{H2} は次式で近似できる。

$$\begin{cases} D_{H1} = u_{1e} t_D \\ D_{H2} = u_{2e} t_D \end{cases} \quad (3.18)$$

t_D は降下時間を表し、次式で近似できる。

$$t_D = H_V / u_{3e} \quad (3.19)$$

ここで、 H_V は降下する鉛直方向の移動距離を表す。方程式を解くにあたり、まっすぐ鉛直下向きに降下した場合の速度 $\bar{u}_3$ を次式のように1.5ktと仮定した。

$$\bar{u}_3 = 0.7717 \text{ (m/s)} \quad (3.20)$$

これに対応する抵抗係数 C_D は0.03169である。模型実験で得られた C_D 値とは大きく異なるが、これは、実際の中継機が模型のようになめらかな形状ではなくピークルを格納した状態における不均一な形状の影響で抵抗が大きくなることが予想されるためである。

海底におけるアンカーワイヤーの長さを200mと仮定して、3,000mの水深を考えると鉛直方向移動距離 H_V は次の値となる。

$$H_V = 2,800 \text{ (m)} \quad (3.21)$$

浮心は次式で表すように座標原点にあると仮定する。

$$x_{b3} = 0.0 \text{ (m)} \quad (3.22)$$

3. 5. 2. 重心位置の影響

重心位置の影響を調べるために次の条件で計算をおこなった。舵角は次式のように片側だけ35度にとることとした。

$$\begin{cases} \delta_1 = 35.0 \text{ (deg)} \\ \delta_2 = 0.0 \text{ (deg)} \end{cases} \quad (3.23)$$

対称性より次式の関係が得られる。

$$\begin{cases} \phi = 0.0 \\ u_2 = 0.0 \\ D_{H2} = 0.0 \end{cases} \quad (3.24)$$

重心座標 x_{g3} の影響を調べた計算結果を Fig. 3.6 に示す。図中のF&R-SとF&R-MはそれぞれSとMの大きさのひれと舵を付けた状態を表す。

x_{g3} の値が大きいことは傾斜時の復原モーメントが大きいことを意味する。そのため、傾斜角 θ の絶対値は x_{g3} の値が大きいほど小さくなっている。

鉛直方向速度 u_{3e} と降下時間 t_D は傾斜角 θ ほど重心座標 x_{g3} の影響を受けない。ひれと舵の面積が大きいほど鉛直方向速度 u_{3e} が小さいのは降下に対する抵抗が増加するためと考えられる。

最も重要な点は水平方向速度 u_{1e} が重心座標 x_{g3} によってその符号を変化させるという点である。ひれ付き状態の当初の設計概念では正の舵角は負の水平方向速度 u_{1e} を誘起する。しかし、推定計算結果では重心座標がある値より大きくなる広い範囲で正の値を示している。

この現象は次のように説明できる。当初の設計思想では、水平移動の推進力であるひれの力は傾斜によるひれへの流入角によって発生する。傾斜角は舵の力に基づく傾斜モーメントによって発生する。しかし、重心と浮心の距離が大きいと傾斜に対する復原力が大きく、同じ舵の力でも傾斜角が小さくなるためひれへの流入角が十分大きくなり、ひれの発生する力は十分大きくなり、その一方で、舵の発生する力は意図する移動方向とは逆方向に働くためひれが十分大きな力を発生できない場合は舵の力そのものによって意図した方向とは逆に移動してしまうのである。従って、当初の設計思想通りに意図した方向へ効率的に移動するには重心と浮心の距離を十分小さくする必要があることになる。

3. 5. 3. 2 対の舵の干渉影響

次式で表す 2 対の舵角を取った状態と(3.23)式に示す 1 対の場合の比較を Fig. 3.7 に示す。

$$\begin{cases} \delta_1 = 35.0 \text{ (deg)} \\ \delta_2 = 35.0 \text{ (deg)} \end{cases} \quad (3.25)$$

Fig. 3.7 に示したのは、ひれと舵は大きさが S の場合である。2 対の舵角を取った場合について、Fig. 3.7 に示されていない状態変数 ϕ , u_{2e} , D_{H2} は次式で表される対称性を考慮すれば容易に得ることができる。

$$\begin{cases} \phi = -\theta \\ u_{2e} = u_{1e} \\ D_{H2} = D_{H1} \end{cases} \quad (3.26)$$

一方、1 対の舵角を取った場合は(3.24)式が成立する。

2 対の舵を作動させた場合は 1 対の場合より傾斜角が小さくなる。水平方向速度の大小関係は重心位置に依存して変化する様子が見られる。しかし、水平方向移動距離は重心位置に依存せず 2 対作動の場合は 1 対の場合より負の方向に変化することがわかる。これは、2 対作動の場合の鉛直方向速度 u_{3e} が 1

対の場合よりも小さくなり降下時間 t_D が大きくなるためである。

3. 5. 4. 舵角の影響

舵角の影響を重心座標 x_{g3} が次式のように十分小さい場合について計算によって調べた。

$$x_{g3} = 0.15 \text{ (m)} \quad (3.27)$$

舵は 1 対のみの作動状態として計算した。

物体固定座標系で定義される状態変数を Fig. 3.8 に示す。横方向移動速度 u_1 はひれと舵が M の状態より S の状態の方が大きいことがわかる。この傾向は舵角が大きい方が顕著である。舵角が大きいと β_1 が大きくなる。しかし、斜航角に対するひれと舵の大きさの影響は小さい。

上記と同じ降下状態を空間固定座標系で定義した状態変数で見ると Fig. 3.9 のようになる。斜航角に対するひれと舵の大きさの影響は Fig. 3.8 では小さかったが、傾斜角 θ には両者で差が見られる結果となっている。

鉛直方向速度 u_{3e} は長さ方向速度 u_3 と類似の傾向を示している。一方、横方向速度 u_1 と水平方向速度 u_{1e} の符号が逆となっている。より重要な点は、水平方向速度 u_{1e} と水平方向移動距離 D_{H1} の最大値が舵角の最大値に一致していない点である。このことは水平移動を制御する際に注意すべき問題となると考えられる。

3. 6. ひれ無し状態とひれ付き状態の

推定計算による比較検討

3. 6. 1. ひれ無し状態とひれ付き状態

前節までの模型実験データに基づく理論計算によって降下時の運動特性に対する重心と浮心位置の重要な役割が明らかになった。その結果、ひれと舵を持つ当初の形状で効率的に水平移動をおこなうためには重心と浮心の距離を十分小さくする必要があることがわかった。

しかし、中継機の実機にはアンカー等があることから、重心と浮心の距離を短くすることは困難と考えられる。

そこで、本節では重心と浮心位置が離れている場合でも効率的に水平移動をおこなえる形状として Fig. 3.10 に示すようなひれ無し形状を提案し、ひれ付き形状との運動特性の理論計算による比較検討をおこなうこととする。比較をおこなうのはひれと舵の大きさが S の状態とし、浮心は座標原点にあると仮定した。

このひれ無し状態の設計思想は舵の発生する傾斜

モーメントを利用する当初のひれ付き状態の設計思想とは全く逆で舵の発生する力そのものを水平方向の動力として用いようとするものである。従って、同じ舵角方向で当初の移動方向とは逆方向の水平移動をすることとなる。

3. 6. 2. 重心位置の影響

重心位置の影響をひれ付き状態とひれ無し状態と比較した結果を Fig. 3.11 に示す。重心位置が浮心位置からある程度離れると当初の設計の意図に反して水平方向速度 u_{1e} と移動距離 D_{H1} が正の値を示す。特にひれ無し状態ではひれ付き状態より広い範囲でこの傾向を示す。そして、重心位置の広い範囲でひれ無し状態の方が効果的に水平移動が可能となっていることが分かる。降下時間 t_D と傾斜角 θ はいずれもひれ無し状態の方が小さな値となっている。

3. 6. 3. 舵角の影響

舵角 δ_1 の影響をひれ付き状態とひれ無し状態と比較した結果を Fig. 3.12 と Fig. 3.13 に示す。Fig. 3.12 は物体固定座標系で定義した状態変数、Fig. 3.13 は空間固定座標系で定義した状態変数で示している。いずれも重心座標 x_{g3} は比較的大きな値である 1.3 m とした。斜航角 β_1 の絶対値はひれ無し状態の方が大きな値を示しているのに対し、傾斜角 θ は逆の傾向となっている。ひれ無し状態の水平方向移動における優位性は水平方向速度 u_{1e} と水平方向移動距離 D_{H1} に表れている。さらに、舵角が大きくなった場合、ひれ無し状態の降下時間 t_D はひれ付き状態ほどには長くはならない。この特性もひれ無し状態のもう一つの利点と考えられる。なぜならば降下時間が短いことは本研究で提案しているシステム全体の任務遂行時間の短縮につながるからである。

上述の計算結果は重心座標 x_{g3} が 1.3m の場合についてであるが、Fig. 3.11 で見たように、ある程度重心座標 x_{g3} が大きい場合は同じ定性的特質を持つものと考えられる。

3. 7. 深海水槽における降下実験

ここまで、曳航模型における流体力計測実験とそのデータに基づく非線形計算によって中継機の降下時の運動特性について論じてきた。

本節では実際に降下模型を用いて降下実験をおこないその運動特性を計測した結果について述べる。

3. 7. 1 深海水槽と降下模型

中継機の 1/4.61 の模型寸法を Table 3.3 に示す。Table 3.3 では舵とひれの寸法は省略したが、これらは Table 3.2 に示した S 状態の寸法と相似である。本降下模型は内部に角速度計とそのデータを用いて

回転運動を押さえる制御装置を備えているが、ほとんどの実験状態では安定した降下運動を示し回転運動は誘起されなかったためこの制御系は用いていない。ひれ無し状態にある降下模型の写真を Fig. 3.14 に示す。模型につけられた 2 箇所の帯と丸い印は光学式運動計測装置のための目標点である。

実験は海上技術安全研究所の深海水槽⁵⁾で実施した。深海水槽の概略図を Fig. 3.15 に示す。最大水深は 35m で、下部 30m の直径は 6m である。光学式運動計測装置は水槽側面に配置された 20 台のカメラでとらえた目標を非接触で計測する。その時系列を解析することによって降下模型の運動データを得ることができる。また、モニター用のカメラも水槽壁面のレールに取り付けられており、これを移動することによって降下運動を観察することが可能である。

降下実験はひれ付き状態とひれ無し状態で実施した。重心と浮心の距離 l_{BG} および舵角を変化させ、その影響を実験的に調べた。

3. 7. 2. 降下模型実験計測結果

Fig. 3.16 に重心浮心距離 l_{BG} の傾斜角 θ と水平方向速度 u_{1e} 、鉛直方向速度 u_{3e} に対する影響を示す。舵角は 15 deg の状態である。水中重量や抵抗係数等は理論計算で示した状態とは異なるが、定性的にはこれまでに理論計算結果で見てきた傾向と同じ傾向を示していることが分かる。

定量的な違いとしては理論計算では重心浮心距離が長い場合にひれ付き状態とひれ無し状態で水平方向速度と鉛直方向速度に大きな違いが見られるのに対し、実験結果ではそれ程の違いは見られない。その違いの理由は理論計算が舵角 35deg の状態に対応したものであるのに対し実験が 15deg の状態に対応するものであると考えられる。このことは次の Fig. 3.17 でも確認される。

Fig. 3.17 は舵角 δ_1 の傾斜角 θ と水平方向速度 u_{1e} 、鉛直方向速度 u_{3e} に対する影響を示したものである。重心浮心距離 l_{BG} はひれ付き状態では 52.9mm、ひれ無し状態では 53.3mm の上位での計測値である。Fig. 3.17 はひれ付き状態とひれ無し状態の違いが舵角が大きくなるに従って大きくなる傾向を示している。従って、Fig. 3.16 に見られた 2 状態の違いは舵角が大きくなるとより大きくなると考えられる。

Fig. 3.16 と Fig. 3.17 に示したそれぞれの実験状態に対応する推定計算結果は上述の実験結果の傾向をほぼ説明している。

3. 8. まとめ

中継機の定常降下運動に関する非線形釣合方程式を示し、中継機模型の曳航実験データを用いて方程

式の係数を求め当初の設計形状であるひれ付き状態を対象に降下運動の推定計算をおこなった。その結果、重心位置が浮心位置から離れた場合、意図した方向とは逆の方向に水平移動してしまうことが分かった。そこで、異なる設計思想に基づきひれ無し形状を提案し、理論計算によってその有効性を示した。さらに、降下模型を用いた深海水槽における降下実験によって理論計算で示してきたことが正しいことを確認した。

一連の計算と実験を通して、降下運動時に効果的な運動制御が可能な中継機形状はどのようなものであるかを示してきた。今回開発された推定計算プログラムと深海水槽における実験技術は今後の実機製作の際の有力な開発手段となると考えられる。

Table 3.1 曳航模型寸法

	Fuselage with Fin-S & Rudder-S	Fuselage with Fin-M & Rudder-M
(Fuselage)		
L(m); Length overall	0.5286	0.5286
D(m); Parallel body diameter	0.1000	0.1000
L _t (m); Tail length	0.1143	0.1143
D _t (m); Tail diameter	0.0250	0.0250
(Rudder)		
x _{R3} (m); Coord. at rudder axis	-0.1071	-0.1071
S _R (m); Height for unit rudder	0.0571	0.0686
C _{Rr} (m); Chord length at root	0.0571	0.0686
C _{Rt} (m); Chord length at tip	0.0286	0.0343
t _R (m); Rudder thickness	0.0020	0.0020
(Fin)		
x _{F3} (m); Coord. at fin center	0.1851	0.1793
S _F (m); Height for a unit fin	0.0571	0.0686
C _{Fr} (m); Chord length at root	0.0714	0.0857
C _{Ft} (m); Chord length at tip	0.0429	0.0514
t _F (m); Fin thickness	0.0020	0.0020

Table 3.2 曳航実験状態

Item	Towing velocity	Oblique angle	Rudder angle
Note	U(m/s)	β_1 (deg)	δ_1 (deg)
Oblique motion test	0.7	-5.0 to 35.0	0.0
Rudder angle test	0.7	0.0, 8.0, 16.0	-5.0 to 35.0

Table 3.3 降下模型寸法

Item	Note	With-fin cond.	W/o-fin cond.
L(mm): Length overall		845.8	845.8
D(mm): Parallel body diamet		160.0	160.0
Wa(gf): Weight in air		142.210	141.135
Ww(gf) Weight in water		4.0	3.0

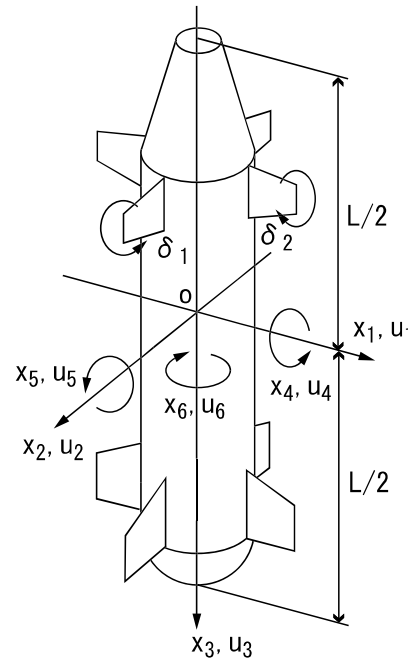


Fig. 3.1 座標系

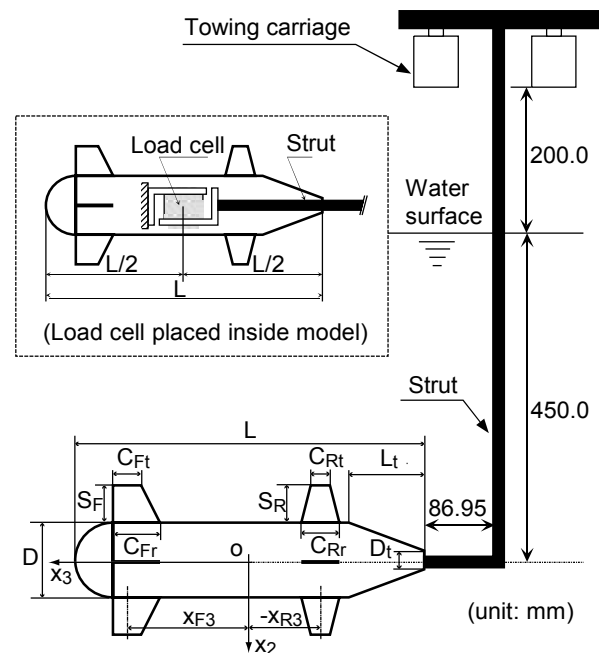


Fig. 3.2 曳航模型

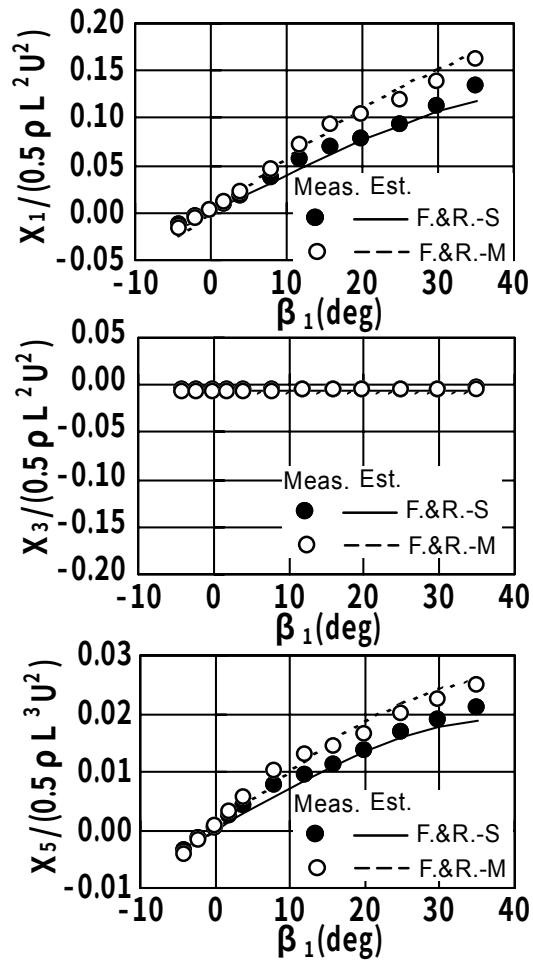
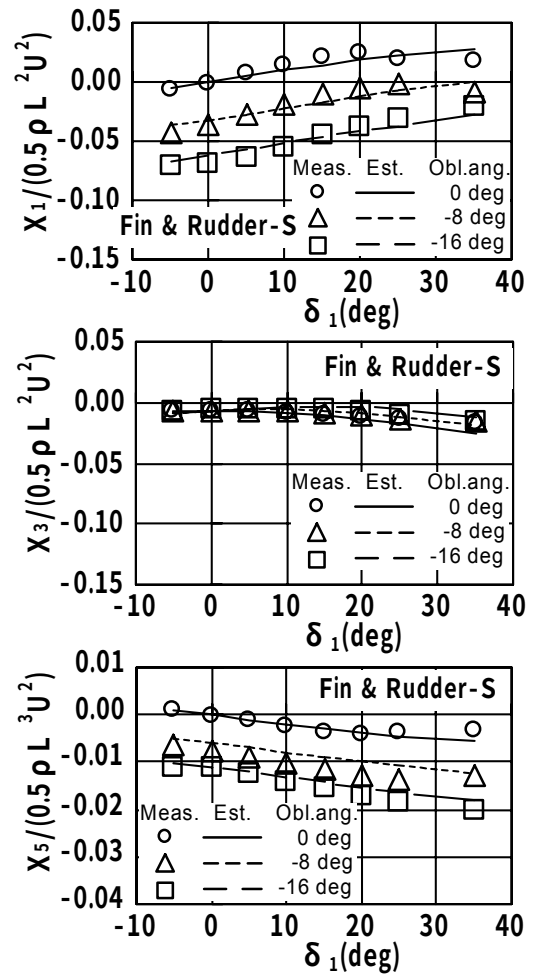


Fig. 3.3 斜航試験状態における流体力特性

Fig. 3.4 舵角試験状態における流体力特性
(ひれ・舵 S)

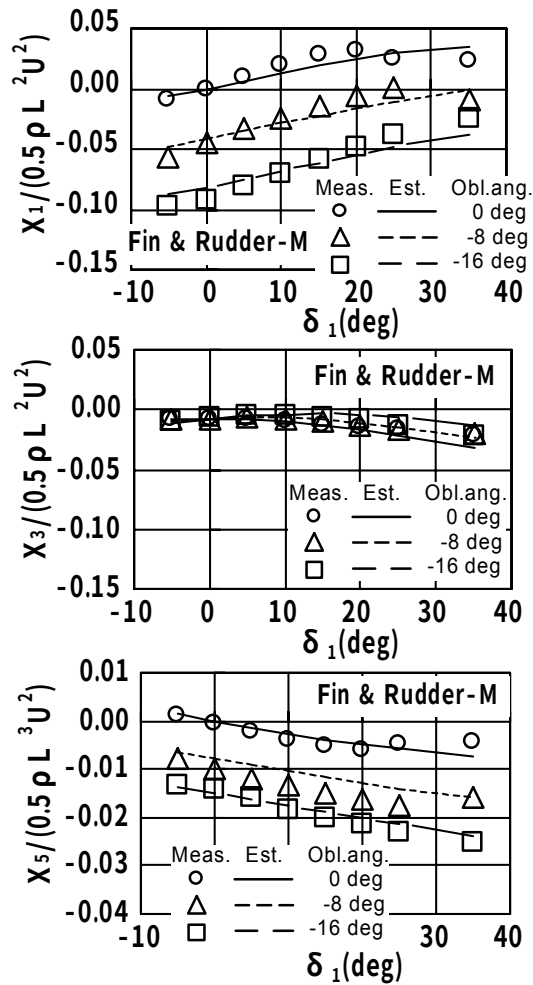


Fig. 3.5 舵角試験状態における流体力特性
(ひれ・舵 M)

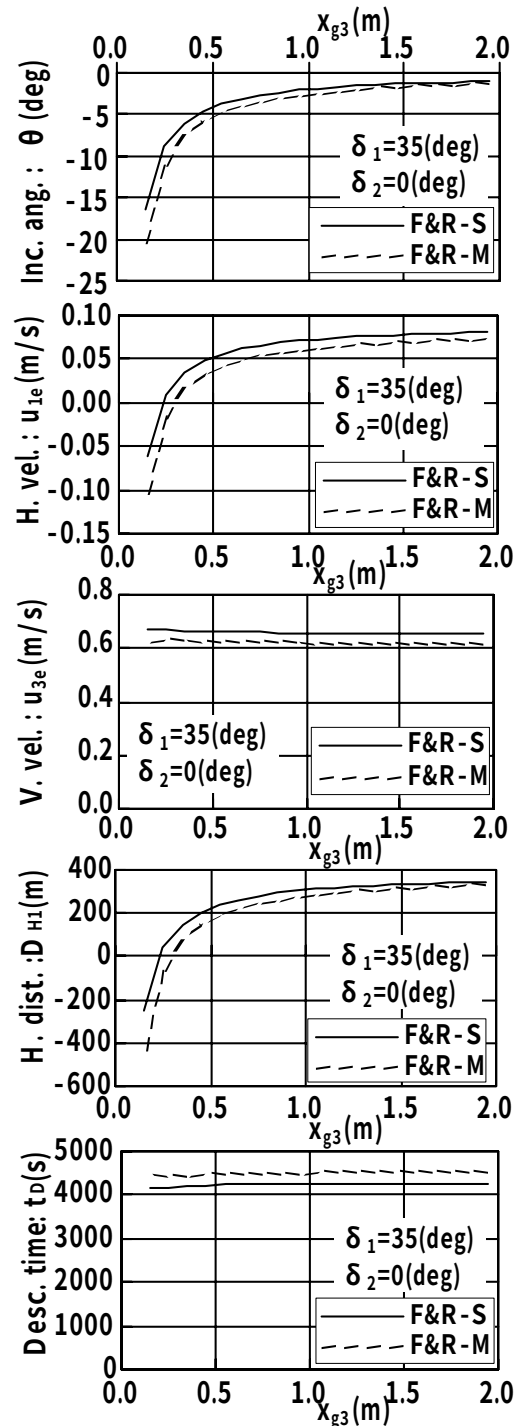


Fig. 3.6 重心位置の影響(ひれ付き状態)

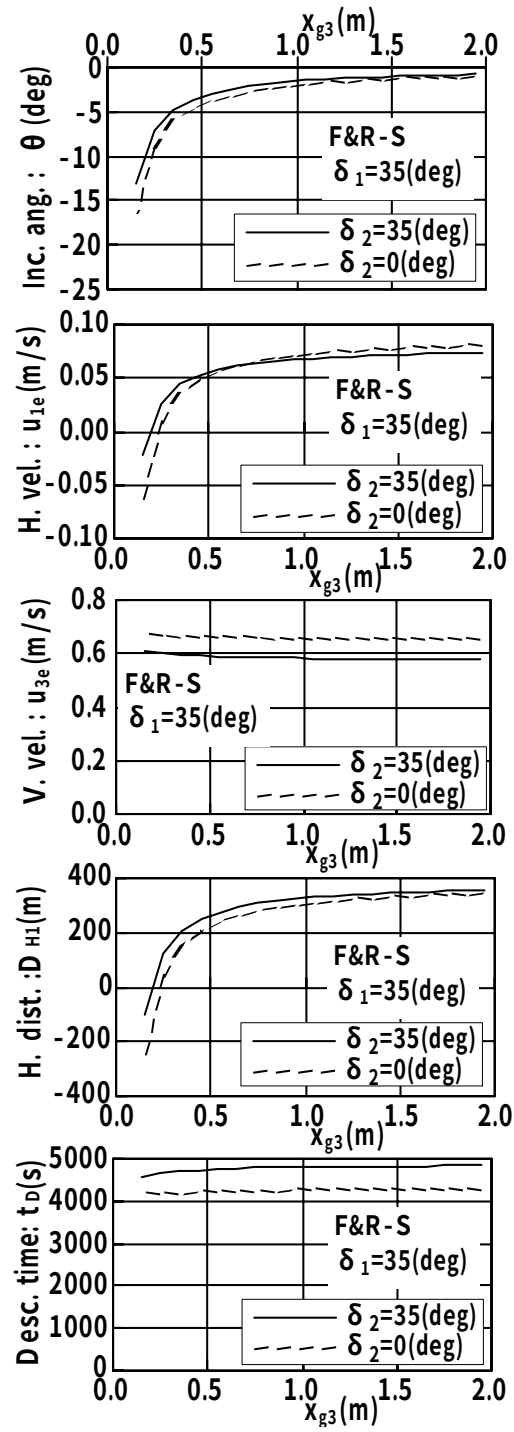
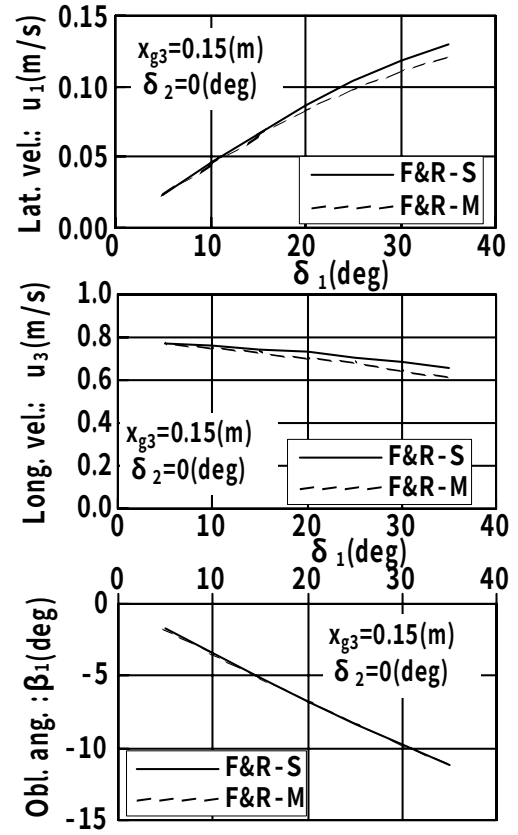


Fig. 3.7 舵の干渉影響(ひれ付き状態)

Fig. 3.8 舵角の影響
(物体固定座標系, ひれ付き状態)

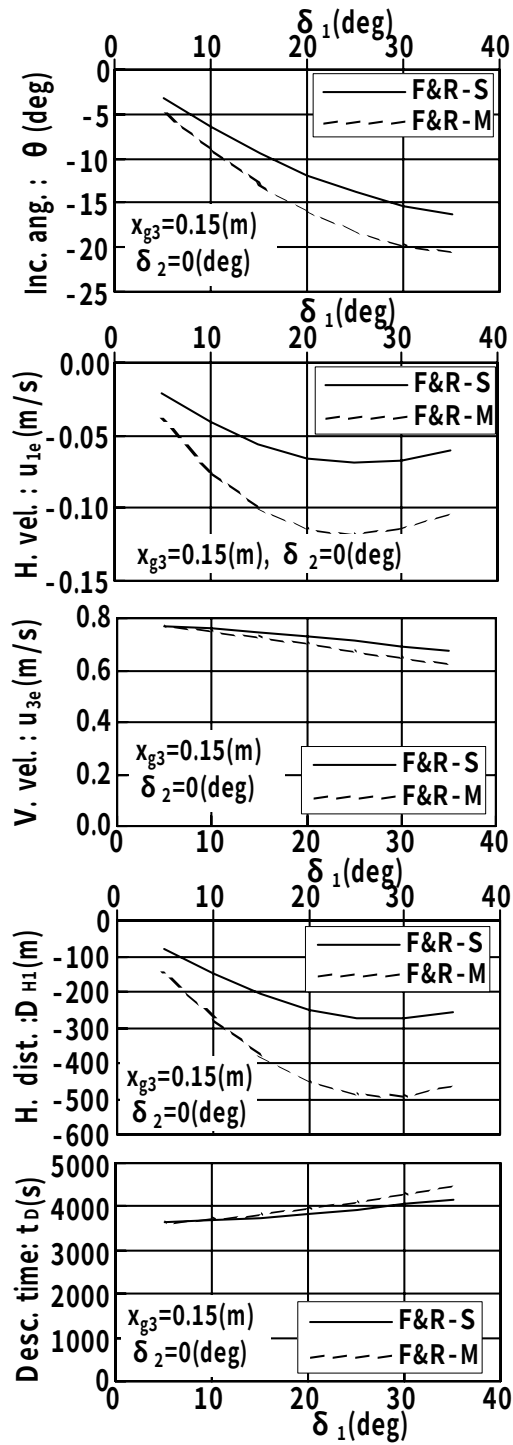


Fig. 3.9 舵角の影響
(空間固定座標系, ひれ付き状態)

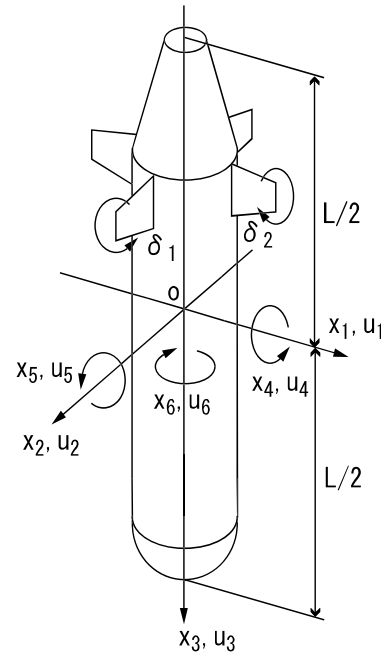


Fig. 3.10 ひれ無し状態の中継機

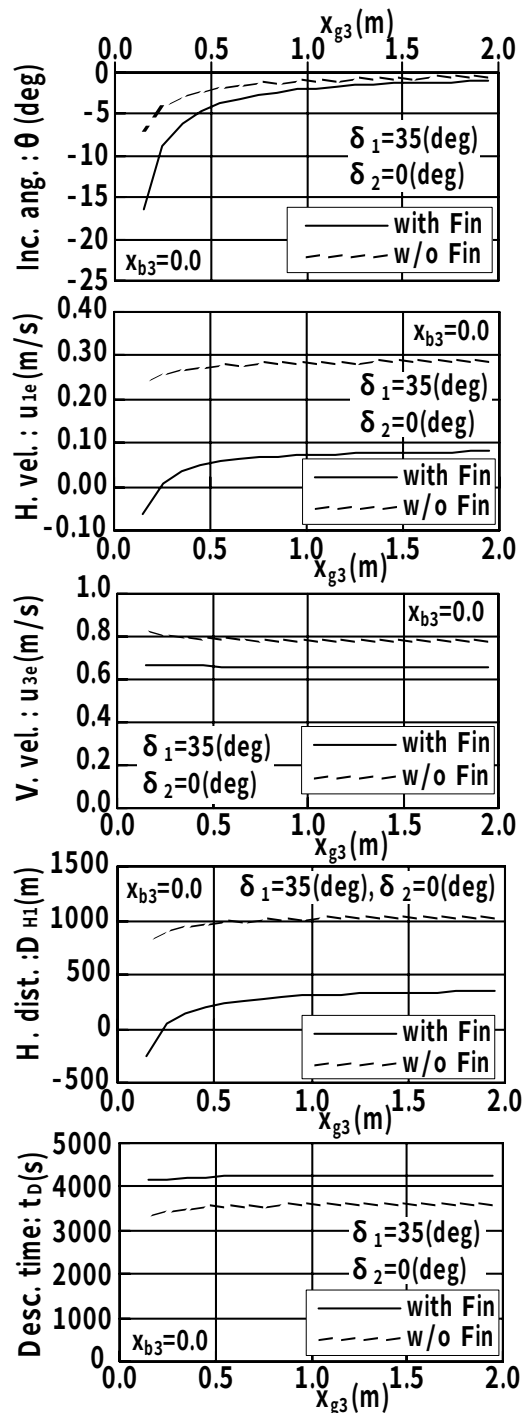
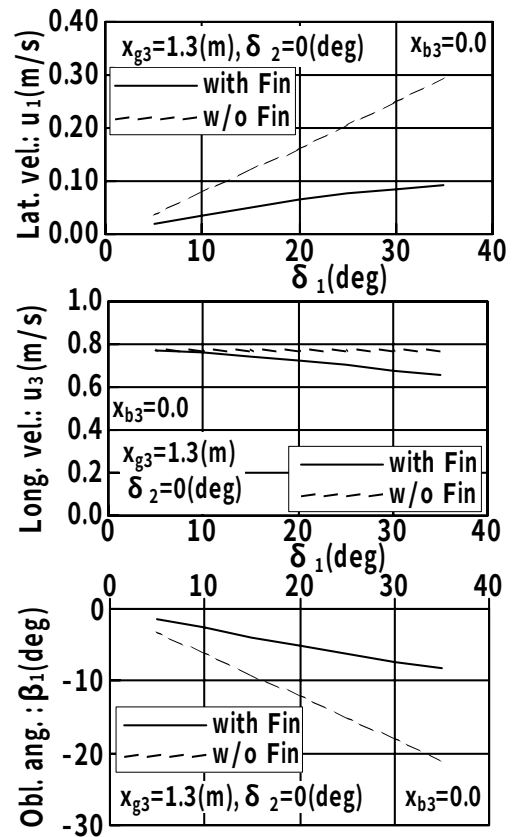


Fig. 3.11 重心位置の影響(ひれ有無の比較)

Fig. 3.12 舵角の影響
(物体固定座標系, ひれ有無の比較)

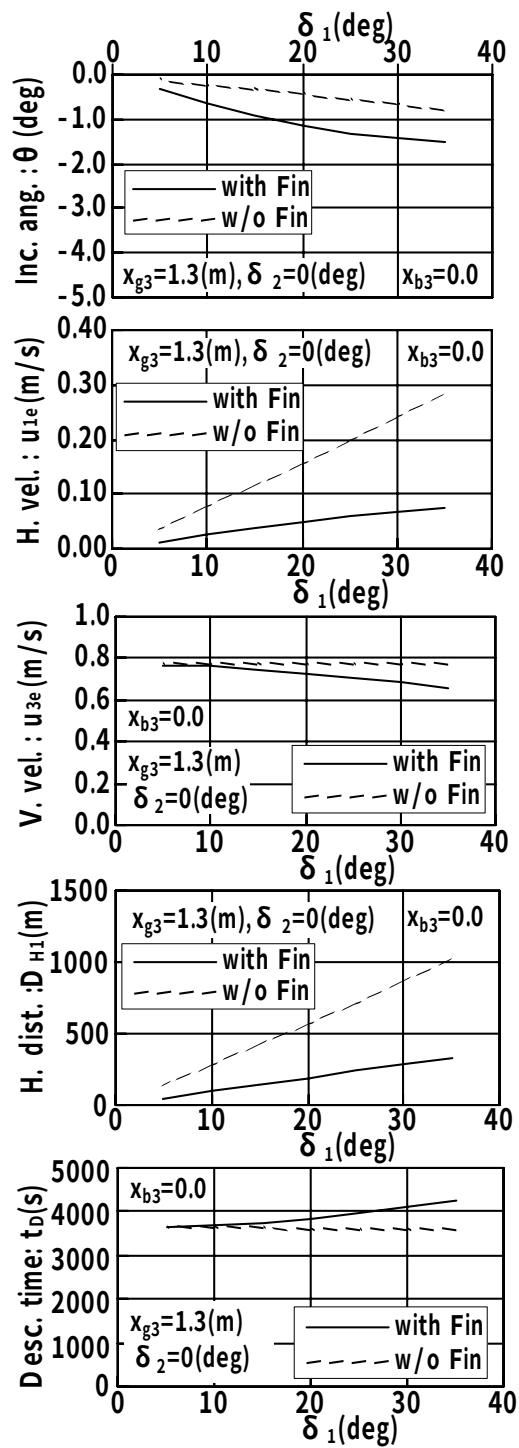


Fig. 3.14 降下模型

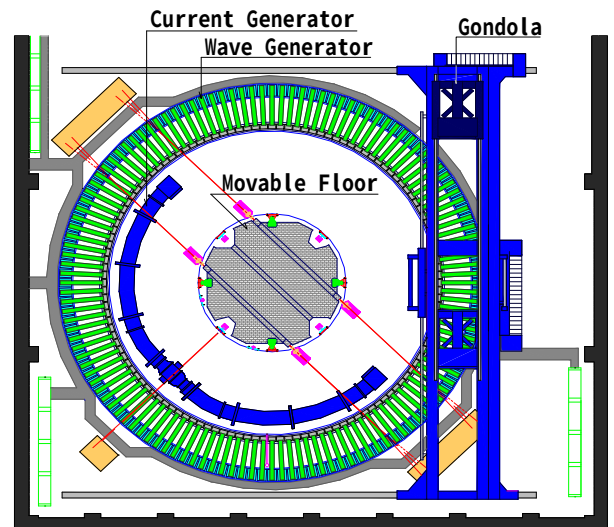
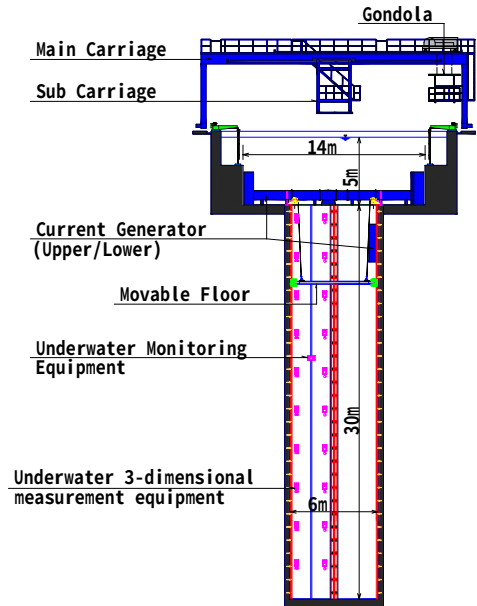


Fig. 3.15 深海水槽

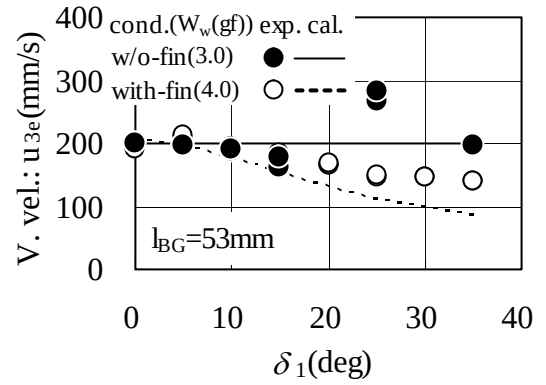
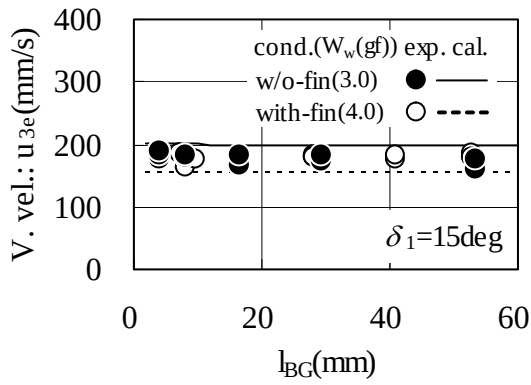
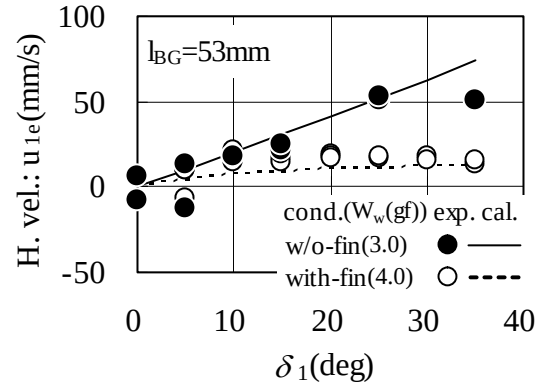
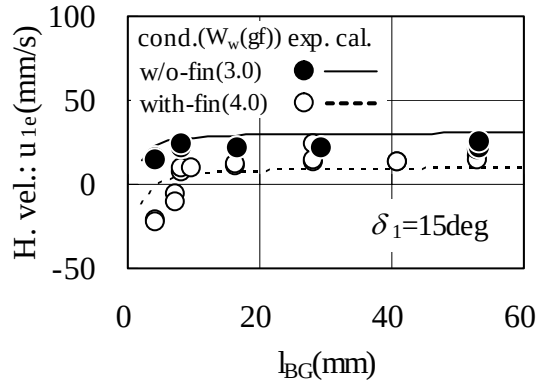
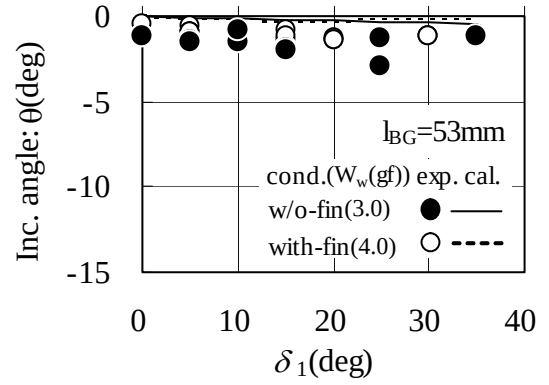
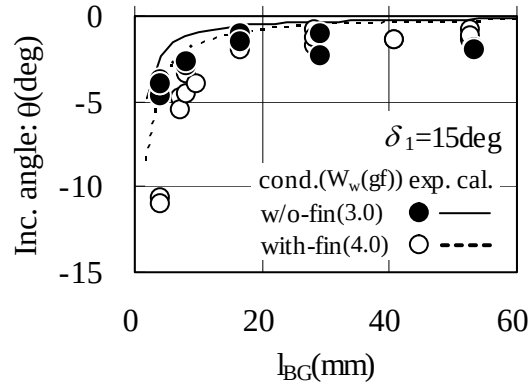


Fig. 3.16 重心位置の影響(降下実験)

Fig. 3.17 舵角の影響(降下実験)

4. ビークルの自律機能及び遠隔操作機能

4. 1. 自律機能及び遠隔操作機能の設計

ビークルと中継機との間の通信手段は音響通信であり、その通信には以下の2つの問題がある。

a) 通信時間差：オペレータ側から送信された制御情報がビークル側に受信されるまでの時間差と、ビークルからの情報をオペレータが受信するまでの時間差の問題

b) 通信速度：単位時間あたりに通信可能なデータビット数の問題

ビークルから送られてくる静止画像をもとに、オペレータが観測したい対象物を発見した時、ビークルは既に他の場所に移動してしまっている。このような条件の下で、オペレータにストレスの無い観測環境を提供するためには、

a) 少ない命令で行動するためのビークルの自律機能

b) 時間遅れに対処するための機能

が必要となる。

ここでは、ビークルの持つべき自律機能とオペレータによる遠隔操縦手法について述べる。

4. 1. 1. 自律機能と遠隔操縦の分離

通信時間差と通信速度の問題を含む環境下でビークルを遠隔操縦するためには、オペレータはできるだけ単純な命令のみを与え、運動制御はビークルの自律機能に任せることが望ましい。

ビークルの運動制御は、

a) SSBL や前方探査ソナー等のデータによる目標物への自動接近制御または手動制御

b) テレビカメラ画像を用いたオペレータによる制御

c) 前方探査ソナー、方位、深度などによる自律制御

の3modeを計画している。

オペレータによる遠隔操縦は、ビークルから一定間隔で送られてくる水中画像と測位装置からの位置情報を判断材料としておこなわれる。観測する対象物が既にテレビカメラで視覚的に捉えることができている状況であれば、オペレータは主に画像を見ながら遠隔操縦命令を与える。この命令として想定されるのは、画像として映っている対象物のある特定の点を指して、その位置へ接近し位置保持をおこないつつ対象物を視野に捉えて移動を指示したりするものである。

ビークルの自律機能としては、オペレータの命令を受信した時点で既に指定された位置から移動してしまっている問題に対処し、その位置まで復帰することや、画像処理により、指定された目標物へ接近

して位置保持をおこなうことなどが必要となる。

4. 1. 2. ミッション計画の概要

ミッションの概要を Fig. 4.1 に示す。ビークルはテレビカメラで取得した画像を母船上のオペレータに送信しながら水中を移動する。このとき母船のオペレータは通信時間差により数秒遅れの画像を見ていることになる。オペレータがビークルから送られてきた画像の中に観測したい対象物を見つけたら、画面上の位置を指示することで、その対象物を指定する命令をビークルに送信する。送られたコマンドは通信時間差によりさらに遅れてビークルに届く。ビークルはこの通信時間差を補正して、オペレータが指定した対象物が見えていた位置に復帰し、指定された対象物を再発見する。次に、ビークルは対象物までの距離を計測して観測に適する距離まで接近し、定点保持をおこなう。これ以降、観測に適する距離まで接近する行動の具体的な例として、マニピュレータで対象物に触れることを想定して議論を進める。オペレータはマニピュレータで触るポイントを指定する命令をビークルに送信し、ビークルは命令を受け取って、姿勢制御をおこないつつ指定された点に触る。マニピュレータには Tilt と直動の2自由度を持つものとする。

4. 1. 3. 時間遅れの対処とマンマシン・インターフェース

ビークルとオペレータ間の通信時間差によって画像が3秒に一枚の速度で送られてくると仮定すると、オペレータは7秒遅れの画像を3秒に一度静止画として得ることになる。この場合のオペレータとビークルの情報のやりとりを Fig. 4.2 に示す。

ビークルは画像取得と同時にビークルの姿勢と座標を取得し、これら3つのデータを構造体として時系列でデータベース化していく。それぞれの時間に得られた構造体には参照番号 (ID) を付与しておき、ビークルは画像とこれらの構造体をオペレータに送信する。オペレータは観測対象物を発見したら、ID を付与したコマンドをビークルに送信し、ビークルは ID をもとに参照すべき構造体をデータベースの中から抽出する。参照された姿勢および座標データと現在のビークルの姿勢および座標データをもとに、ビークルはオペレータに指定された地点まで復帰する。

上の操作をおこなうためのインターフェースを Fig. 4.3 に示す。トップパネルにビークルから送られてきた画像を表示する。トップパネルの下部にビークルの座標を、右下にあるコンパスにビークルの姿勢を表示する。左下にコマンドボタンは様々なコマンドをビークルに送る為のものである。オペレー

タが観測対象物を発見した時、トップパネルのなかでその点をダブルクリックするだけで、ピークルがその対象物を再発見できるようにする。指定された点は、画像上に×印として表示される。

4. 1. 4. デッドレコニングによる復帰

オペレータがインターフェース画面上で観測対象物を指定すると、その対象物の画面上での座標値と参照番号がコマンドとしてピークルに送信される。ピークルはコマンドを受信したら、参照番号から目標位置を設定する。その座標と現在の座標の差からデッドレコニングを用いて位置制御をおこない、オペレータの所望の位置まで復帰する。このとき、デッドレコニングによる位置誤差の問題があるが、位置制御は現在の位置と元の位置の相対的位置関係によりおこなわれるため、絶対座標系で生じる位置誤差には依存しない。従って、元のポジションに戻るとき、復帰に要するせいぜい直線距離 10m 程度の航行で生じる位置誤差が問題となるが、デッドレコニングによる位置誤差が 1% だとすると、10m で 10cm 程度の位置誤差しか生じないことになり、これは対象物の再発見にはほとんど影響しないものと考えられる。

4. 1. 5. 画像処理による目標物への接近と位置保持

(1) 画像フィルタとテンプレートマッチング

ピークルは観測対象物を視野に捉えることができたなら、オペレータにより指定された対象物が、今見えている視野の中でどこに存在するかを再認識しなければならない。マニピュレータで対象物に接触するためには、オペレータが指定した対象点に対象物上のどこなのかを画像で認識することも必要となる。このために、画像フィルタとテンプレートマッチングの技術を用いる。画像フィルタはテンプレートマッチングの精度を上げるために必要となる。

海中における様々なノイズ、不均一な明度、コントラストの中で、ピークルは観測対象物を画像認識しなければならない。これらの影響を小さくするために、画像処理ボードを用いて Laplacian of Gaussian filter (LoG) を作成する。フィルタは、Gaussian フィルタで画像のノイズを除去し、Laplacian フィルタでエッジ検出をしてから 2 値化 (binarization) をおこなうものである。

画像平面上の座標(x, y)の光の強度を $I(x, y)$ とし、フィルタ後の光の強度を $J(x, y)$ とすると、LoG は次式で表される。

$$J(x, y) = \text{binarize}[\nabla^2 G * I(x, y)] \quad (4.1)$$

ただし、

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right], \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (4.2)$$

Fig. 4.4 に明度とコントラストだけが異なる画像をそれぞれフィルタリングしたときの様子を示す。画像の明度やコントラストが異なってもフィルタ後の画像はほぼ同じとなる。

テンプレートマッチングは、オペレータに指定された点を中心とする局所画像を抜き出し、この画像をテンプレートとしておこなう。ピークルは、現在見えている視野の中で正規化相関値が最も高い点を、オペレータに指定された対象物として認識し、リアルタイムでトラッキングをおこなう。

(2) 目標物までの距離測定

ピークルは観測対象物を画像処理により認識した後、接近するために目標物までの距離を測定する。これには平行に設置した 2 つのレーザポイントとテレビカメラの画像処理によりおこなう。2 つレーザ光線を作業対象物に照射して反射点を画像処理で抽出し、画像平面上における 2 つの照射点間の距離から観測対象物までの距離を計算する。作業対象物がピークルから遠いほど、2 つの反射点の距離は小さくなる。

画像平面上での反射点の抽出には、画像処理ボードを用いてカラー抽出処理をおこなう。テレビカメラで取得した画像から、レーザの反射点のみが抽出されるように輝度と色差に閾値を設けてカラー抽出をおこない、得られた画像にラベリング処理をおこなって、ラベルの重心座標を求めることにより反射点の座標位置を決定する。

(3) 目標物への接近

ピークルは、距離測定で得られた値をもとに、対象物の付近までデッドレコニングを用いた位置フィードバック制御で接近する。対象物に接近する際に注意しなければならない点は、以下のようなことである。

- a) 観測対象物への衝突を避けるため、精度の良い制御が必要であり、レーザを用いたビジュアルフィードバックで物体からの距離が一定となるように制御する
- b) 接近により対象物が画角から外れないようにする
- c) 観測対象物がマニピュレータに隠されないように、マニピュレータは画角の外に、レーザポイントの反射点は画角の中に収まるようにマニピュレータの Tilt を制御する

(4) 位置保持

ビークルは、観測対象物に対してある距離に達したら、対象物に対して位置保持をおこなないながら観測あるいはマニピュレータによるマニピュレーションをおこなう。オペレータは、インターフェース画面でより詳細にマニピュレータの接触点を指定する。ビークルは、接触点を指定するコマンドを受け取ったら、レーザによる測距とテンプレートマッチングを用いた対象物のトラッキングをおこなう。これにより、Surge、Sway、Heave、Yaw のそれぞれの自由度を制御して位置保持をおこなう。トラッキングは、対象物のテンプレートを作成し、画像上の探査範囲をテンプレートマッチングすることでおこなわれる。マニピュレータで作業対象物に触れるときには、対象物がマニピュレータの死角に入り、マッチングの精度が落ちることも懸念される。レーザポイントによりトラッキングする部分にレーザ光線が照射されることにより、正規化相関値が低くなることも考えられる。これらの影響はテンプレートの大きさを大きくすることで低減できるものと考えられる。

ビークルは位置保持をしながら、マニピュレータの Tilt、直動の 2 自由度を制御して、オペレータに指定された目標点を触る。以下、ビークル、マニピュレータの各自由度の制御方法を示す。

Surge 方向の位置保持制御は、対象物までの距離を計測することによりビークル自身の変位を求め、これが一定となるようにビークルの位置制御をおこなう。

Sway 方向の位置保持制御は、指定された点が画像平面で左右方向の中心になるように位置制御をおこなう。

Heave 方向の位置保持制御は、画像情報を用いて Sway と同様におこなうことも可能であるが、当面は深度計を用いて深度一定の制御をおこなう。

Yaw 方向の位置保持制御は、画像情報によりおこなうことが可能である。すなわち、レーザポイントを 2 本搭載することでそれぞれの照射点までの距離を計算することにより、対象物に対してのビークルの角度を計算することが可能である。作業対象物が滑らかな形状であれば、作業対象物に対して一定角度を保つような制御を安定しておこなうことが可能であるが、ここでは、対象物の形状に依存しないで定点保持をおこなうことを可能とするために、Yaw 方向の制御は方位センサを用いておこなう。

4. 2. テストベッドを利用した手法の検討

水中で行動する自律移動ビークルは、海流外乱などのように未知の環境に出会うことが多い。定点での位置保持など局所的かつ比較的遅い動きが多いため、流体により受ける運動への影響も予想が難しく、

運動モデルで表現された挙動に一致しないことが多い。そこで、実際にビークルを構築して水中で行動させることにより、開発したソフトウェアの有効性を検証することが非常に重要である。ここでは、テストベッドを使用した手法の検証について述べる。

4. 2. 1. テストベッドビークル「Tri-Dog 1」の概要

Tri-Dog 1 (Fig. 4.5) の設計方針としては、

- (a) 人間が数人で扱える程度の大きさ・重さであり、実験用の水槽で実験が可能であること。同時に、湖沼や浅海域での実験に耐えうるものであること。
- (b) 長距離を高速で航行する必要はないかわりに、ある対象物へ接近して観測をおこなうなどの、定点に留まる行動が可能なこと。
- (c) 自律的な航行を可能とするために必要なセンサ類を備えること。
- (d) 研究開発のために十分な計算能力と運動性能を備えること。
- (e) プログラムの変更や実験データのハンドリングを容易におこなえるようにして、実験を効率良くおこなえるようにすること。
- (f) 信頼性と経済性の良い汎用の入出力ボードを搭載可能とし、改良や交換が容易であること。また、これらのドライバ・プログラム等は、研究者がプログラム開発に集中できるように、あらかじめ準備されていること。
- (g) 研究者の負担を減らすため、ビークルのプログラムと外部インターフェースのプログラムを同じ環境で開発可能なこと。

以上の条件を考慮する。

(1) 概要

Tri-Dog 1 の一般配置図を Fig. 4.6 に、仕様を Table 4.1 に示す。本ビークルは全長 1.85m、乾燥重量は約 170kgf である。艇体はおもに円筒胴と平蓋板を組み合わせた 3 本の圧力容器から構成し、構造部材としての役割を兼ねさせる。3 本の内訳はメインシリンダ 1 本、バッテリーシリンダ 2 本である。圧力容器には A5083 アルミニウム合金を使用し、アルマイト処理と塗装による防食処理を施す。耐圧仕様は水深 100m 耐圧として設計する。

メインシリンダにはコンピュータシステムのほか、各種電気回路や記録装置など搭載機器全般を収納する。2 本のバッテリーシリンダには Ni-Cd 組電池を 2 群ずつ、合計 4 群収納する。

ビークルの浮力は、メインシリンダと 2 本のバッテリーシリンダを合わせた 3 本のシリンダにより得られるが、比較的重量の大きいバッテリーシリンダを下部に配置することで、水中での重心を下方にとり、

浮心－重心距離を長く取ることにより Pitch、Roll に関して静的な安定性を確保する。

ビークル自身の運動を計測する電磁流速計とドップラ式流速計は、運動の計測や解析が極力容易になるように、ビークルの中心軸上に配置する。

スラストの配置としては、メインシリンダ両脇の前後進用サイドスラストを、他の運動自由度への影響を極力少なくするため、全長方向の中央に配置し、左右移動および回頭用ラテラルスラストを、運動性を高めるように Yaw 軸に対してできるだけ距離をおいて配置する。

(2) 推進器

運動の制御には、プロペラ式のスラストを 6 基搭載する。Surge、Sway、Heave の 3 方向にそれぞれ 2 基を配置して、Yaw、Pitch を加えた 5 自由度を独立に制御可能とする。スラストには 24V、100W の DC ブラシレスギアードモータを使用し、耐水圧仕様のためにマグネットカップリングによりプロペラが連動する機構のものとする。6 基あるスラストのうち、Heave 用の垂直スラスト 2 基はトンネル式とした。

(3) 電源

Tri-Dog 1 のバッテリーとしては、価格と取り扱いの容易さ、および安全性を考慮して、ニッケル・カドミウム (Ni-Cd) 二次電池を採用する。必要なバッテリーの容量から、25.2V、20Ah の組電池を 4 群搭載することとする。これらを電気回路系と動力系のバランスを考慮して、1 つをコンピュータおよびセンサなどの電気回路系用とし、残りの 3 つを、それぞれスラスト 2 基ごとに配分する。実験用水槽では、外部電源ケーブルにより電源を供給することで、長時間の実験もおこなえる。

(4) センサ

ビークルの運動を計測するセンサとして、姿勢センサ (Attitude and Heading Reference System; AHRS)、ドップラ式流速計 (Doppler Velocity Log; DVL)、電磁流速計、深度計としての圧力センサ、浮上時に使用する Global Positioning System (GPS) を搭載する。

水中環境を認識するためのセンサとしては、超音波レンジセンサとパン・チルト機構を備えた CCD カメラを搭載する。この CCD カメラは、レーザポインタと組み合わせて、レーザ測距システムとしても機能する。超音波レンジセンサは 8 個設置し、それぞれの振動子の方向に存在する障害物までの距離を計測する。

ビークルの内部状態を監視するセンサとしては、バッテリーの電圧、各スラストの回転数および電流値、メインシリンダ内の水漏れを監視するセンサを搭載する。

(5) データ記録装置

センサによる測定値やアクチュエータへの出力値など、コンピュータシステムが扱うほとんどすべてのデータはハードディスクに記録する。

画像撮影には、ビークル前部に搭載する CCD カラーカメラを用いる。この信号は画像処理ボードで信号処理される。記録用にはデジタルビデオデッキを搭載し、CCD カメラからの生信号と画像処理ボードで処理された信号を選択的に記録できるようにする。水中コネクタを経由して、NTSC 信号を外部にも出力できるため、外部の画像処理用コンピュータで処理をおこなったり、ROV のように外部モニターに映像を出力したりすることもできる。これにより、画像処理を用いたミッションを想定する場合、デバッグなどを効率良くおこなえる。

CCD カメラによる撮影のための照明装置としては、24W の水中ライトを 2 灯設置する。低消費電力でありながら明るく、かつ水中で減衰の少ない波長の光を多く含む、アークランプを使用する。

(6) 通信システム

外部のコンピュータシステムと通信する手段としては、無線 LAN と超音波コマンドリンクシステムを搭載する。無線 LAN は浮上時に使用可能で、実験中のプログラム変更作業やデータのハンドリングを容易におこなえる。これにより実験効率が飛躍的に向上する。潜航時の通信には超音波コマンドリンクを使用する。

その他の通信手段としては、イーサネット用の水中コネクタを備える。実験用水槽等では、イーサネットケーブルを介して外部のコンピュータに接続することができ、各プログラムの一部を外部のコンピュータで実行することも可能となる。研究者が制御系の定数をリアルタイムに変更しながら調整する実験や、仮想環境シミュレータと連携させた実験等もおこなえる。

(7) コンピュータシステム

本ビークルの演算装置は、その用途が研究開発であるために、十分な計算能力を有する必要がある。そのため、以下に示す 3 台のコンピュータを搭載する。

- (a) 自律機能を実現する高レベル制御のためのコンピュータ (High Level Control PC)
- (b) 各機器との入出力と低レベル制御のためのコンピュータ (Low Level Control PC)
- (c) CCD カメラの画像情報処理を担当するコンピュータ (Image Processing PC)

これらは役割に応じて計算負荷を分散し、イーサネットにより相互に必要な情報のみをやりとりする。それぞれのコンピュータは、汎用の入出力ボードを搭載可能とするため、工業用ボードパソコンとパッ

クプレーンによる構成とし、ISA および PCI バスを備える。各コンピュータと機器の構成を Fig. 4.7 に示す。

(8) オペレーティングシステム

OS には以下の理由から Windows NT 4.0 Workstation を採用する。

- (a) 汎用の入出力ボードのドライバ・プログラムが入手しやすい。
- (b) 外部インターフェースプログラムをピークル内部のプログラムと同じ環境で開発できることから、研究者の負担を減らすことができる。
- (c) 3次元グラフィックスを含めた GUI プログラミングの環境として、近年大幅に用いられるようになってきた。

4. 2. 2. 2 自由度マニピュレータ

マニピュレータの設計方針としては、

- (a) マニピュレータの自由度は少なくする。
- (b) マニピュレータは完全にモジュール化する。
- (c) ピークルとは RS232C で通信をおこなう。
- (d) 最大潜航深度は 100m とする。
- (e) レーザポインタを搭載する。
- (f) エンドエフェクタは付け替えられるようにする。
- (g) ほぼ中性浮力となるようにする。

以上を考慮する。

(1) 概要

マニピュレータモジュールの全体図を Fig. 4.8 に、主要目を Table 4.2 に示す。自由度は起倒、直動の 2 自由度であり、アクチュエータには起倒間接、直動間接ともに、ステッピングモータを用いる。防水方法としては、油漬けによる均圧方式をとる。

起倒関節の関節トルクは 0.2kgf-m、水中での最大の回転速度は 48degree/s である。

直動部分の機構は、台形ねじを用いてモータの回転運動を直動運動に変換することにより実現される。台形ねじには耐水処理としてのハードクロムメッキを施し、ナットの部分には含油プラスチックを使用する。直動推進力は 1.0kgf であり、水中での直動関節の最大速度は、5.5cm/s である。

(2) レーザポインタ

搭載するレーザポインタの仕様を Table 4.2 に示す。一般に赤色レーザは海水中での減衰率が高いため、水中ではグリーンレーザを用いることが望ましいが、グリーンレーザは価格が高く、また、レーザの技術的な問題により光軸の精度、光出力安定性の優れたものが少なかったため、高出力の赤色レーザを使用することにした。赤色レーザの減衰率はグリーンレーザのおよそ 100 倍であり、せいぜい水中では 20m 程度が使用限界であるが、レーザの透過率

が悪いということは視認性が悪いということになり、対象物を画像認識できないので、それほど高出力、高波長であることは要求されない。レーザポインタを用いた画像処理をおこなう場合、レーザの光軸の精度を出すことが非常に重要であるが、レーザの治具を 4 本のねじで固定して、光軸をねじで微調整できるようにした。

(3) プロセッサ

搭載するマイコンは日立製の H8 3048F (20MHz) を用いる。H83048F は 16 ビットアーキテクチャで、64K バイトのメモリ空間を持ち、RS232C 通信チャンネルを 2 つ持つなど十分な機能を有する。フラッシュ ROM 内蔵、ISP 対応であり、プログラムの修正に伴うターン・アラウンド・タイムを大幅に縮小し、開発スピードを上げることができるなどの点を考慮して選定した。

(4) 電源

バッテリーとしてはエネルギー密度の高く、メモリ効果のないリチウムイオン電池を使用する。マニピュレータモジュールのアーム部分をほとんど中性浮力にしたため、モータの効率が良く、バッテリーは単三サイズの電池を 6 本まとめた組電池であり、非常に小さなもので済ませることができた。

(5) 耐圧容器

マニピュレータモジュールの制御装置類、マイコンボード、モータドライバ、電池などは耐圧容器に収納し、耐圧容器内の制御装置、電池とアクチュエータ、レーザは防水コネクタにより接続される。またマニピュレータモジュールの電源のオンオフをするためのスイッチをとりつける。

(6) 材料

均圧にするためのモータのケースと制御系を格納するための耐圧容器は、アルミニウムに耐水性を良くするためにハードクロムメッキをしたものを使用する。それ以外の部分は高密度ポリエチレンを使用する。高密度ポリエチレンは強度が強く、水を吸わないなどの特徴があり、比重が 0.96 とほぼ中性浮力であることから水中で使用する材料として優れていると考えられる。

(7) マニピュレータモジュールの制御装置

Fig. 4.9 にマニピュレータの制御系を示す。マイコンがモータドライバを介して、ステッピングモータを制御する。シリアル通信で Tri-Dog 1 の High Level PC と通信をする。

4. 2. 3. 検証実験の概要と結果

これまで述べた手法の有効性を検証するための水槽実験をおこなう。Fig. 4.10 に実験で使用する観測対象物を示す。中央部の四角形の部分（縦横 5cm × 6cm）にマニピュレータで接触することをミッシ

ョンとする。実験は便宜的にイーサネットと画像用 NTSC のケーブルを繋ぎ有線でおこなう。通信の時間遅れはソフトウェアで擬似的に生じさせる。

Fig. 4.11 に実験時に得られたビークルの内部カメラ、実験風景撮影用外部カメラ、ユーザインターフェースの3つの視点からの画像を時間軸に合わせて示す。インターフェースを用いてオペレータは対象物を指定する。コマンドを受け取ったビークルは通信時間差を補正し、対象物の画像認識をして、距離計測をした後に、正面まで接近している。次にオペレータは接触するポイントを正確に指定するコマンドを送信し、ビークルはほぼ正確に指定されたポイントに接触していることが分かる。さらに、オペレータがエンドエフェクターを水平方向、および鉛直方向の接触角度を変更するコマンドを送信して、ビークルはコマンドを遂行している。

重要な点は、通信時間差の補正、指定されたポイントへの接触、エンドエフェクタの姿勢制御の3点である。最初のコマンドを送信した時のインターフェース上の画像とタイムラグ補正後のビークル内部カメラの映像を比べると、正確に元のポジション

に戻っていることが分かる。次に、オペレータは接触点を指定する2回目のコマンドで、中央部の四角形の中心を指定している。対象物接触時の外部カメラから得られた映像(Fig. 4.12)から分かるように、ほぼ正確に接触している。さらにオペレータは、水平方向、鉛直方向の接触角度を変更するコマンドを送信したが、姿勢変更前の像と変更後の画像を比べると、各方向に接触角を変更していることが分かる。

4. 3. まとめ

ビークルの持つべき自律機能とオペレータによる遠隔操縦手法について検討した。通信時間差と通信速度の問題を含む環境下でビークルを遠隔操縦するため、オペレータはできるだけ単純な命令のみを与え、運動制御はビークルの自律機能に任せるという設計思想に基づいてソフトウェアを開発し、テストベッドを用いて機能の有効性を検証した。

本研究によって、音響通信による無索ビークルの遠隔操縦と自律機能の基盤技術が開発されたと考えられる。

Table 4.1 Tri-Dog1 仕様

Length overall	1.85m
Breadth overall	0.58m
Depth	0.53m (0.9m include antennas)
Dry weight	170kgf
Operating depth	100m max.
Maximum speed	1.4knots
Duration	more than 2.5hours
Structures	Aluminum Pressure Hulls (Main Cylinder x1, Battery Cylinder x 2)
Actuators	100W Thrusters x 6 (Rotation, Amp. feedback)
Processors	Intel Pentium MMX 233MHz × 3 (High Level, Low Level, Vision)
Sensors	Attitude and Heading Reference System
	Doppler Velocity Log
	Electromagnetic Flow Meter
	Pressure Sensor (Depth Sensor)
	Real Time Kinematics GPS (RTK-GPS)
	Acoustic Ranging Sensor x 8
	CCD Camera with Pan & Tilt Mechanism
Communications	Acoustic Command Link
	Wireless LAN
	430MHz Wireless Modem for RTK-GPS
Lights	24W Arc Lamp x 2
Batteries	25.2V Ni-Cd Battery 20Ah x 4

Table 4.2 マニピュレータ仕様

Freedom	2 Joint, 1 Revolution 1 Linear
Length Max.	1085mm
Length Min.	713mm
Weight in Water	400g Approximately
Operating Depth	100m
Duration	1.5hour
Driving Method	Microcomputer Control
Actuator	Stepping Motor x 2
Performance	Linear Joint : Force 1.0kgf , Velocity 5.5cm/sec max. Revolution Joint : Torque 2.0Nm, Velocity 48 degree/s
Material	Polyethylene , Aluminum (Alumite)
Processor	H83048F , 16MHz (Hitachi)
Communication	RS232C x 2 channels
Laser	Semi-conductor Laser , Wave Length 635nm
Battery	Lithium Ion Battery , 24V , 1.5AH

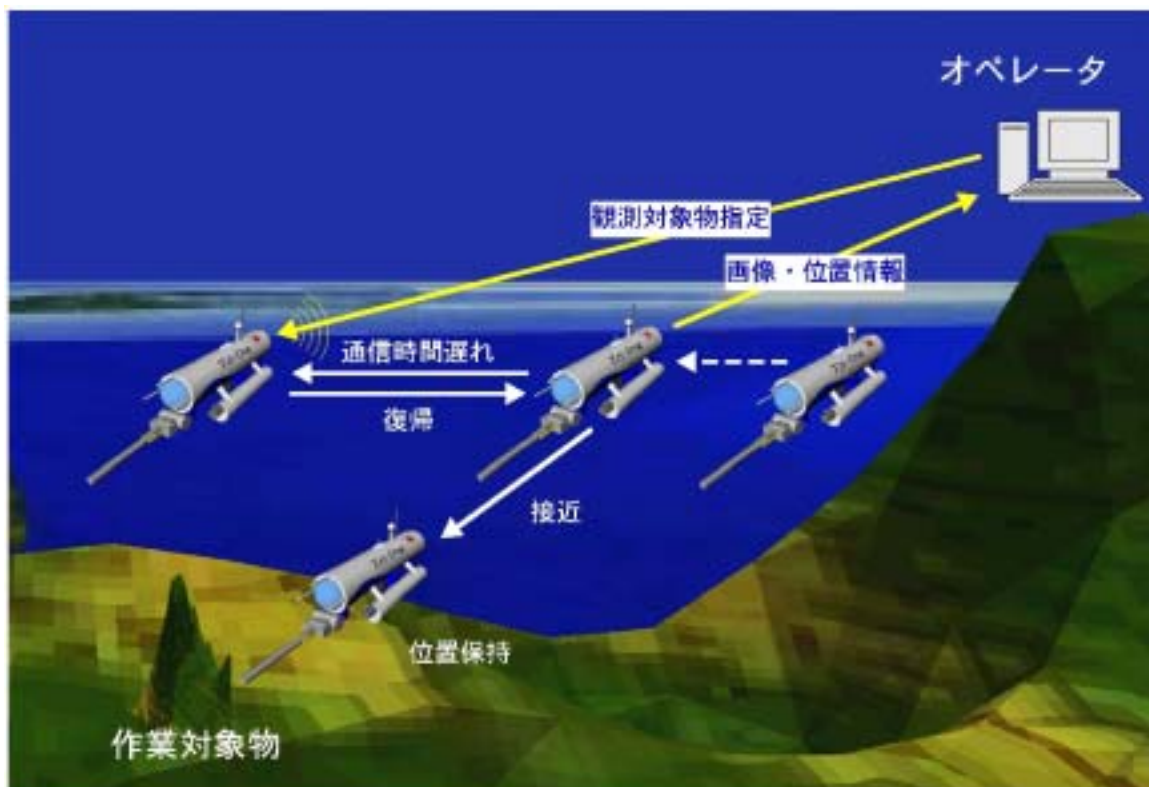


Fig. 4.1 ミッション概要

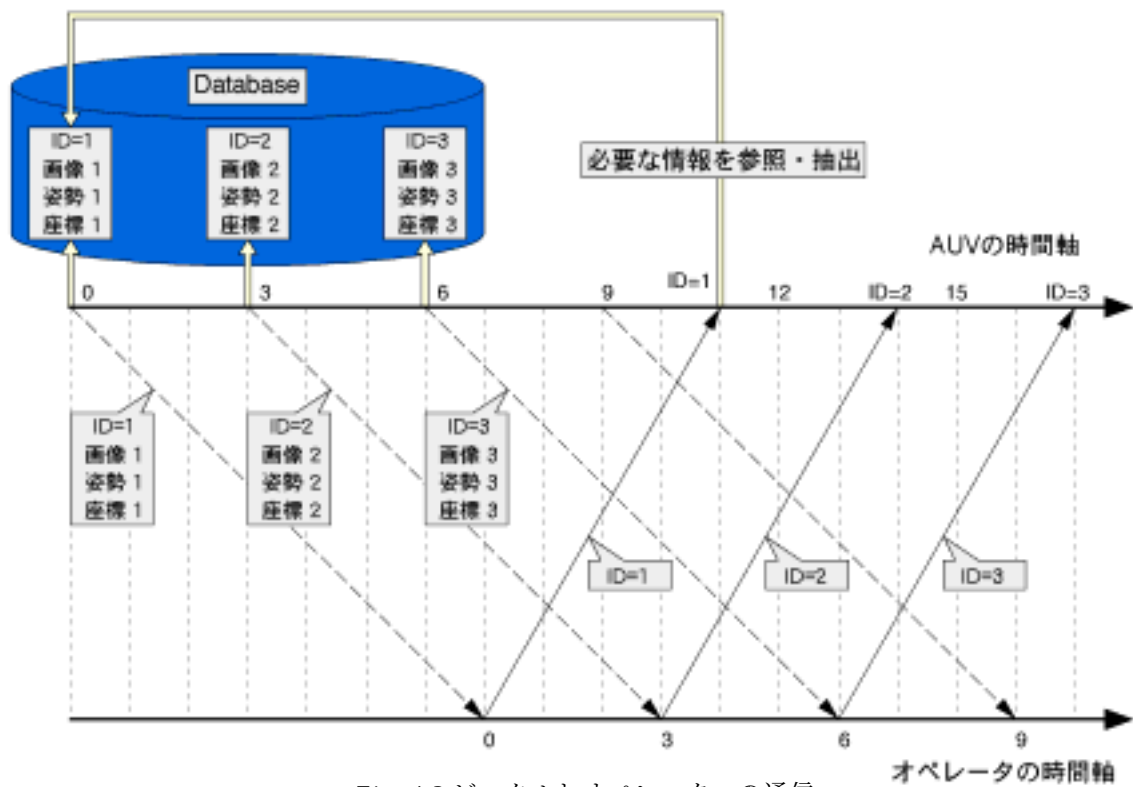


Fig. 4.2 ビークルとオペレーターの通信

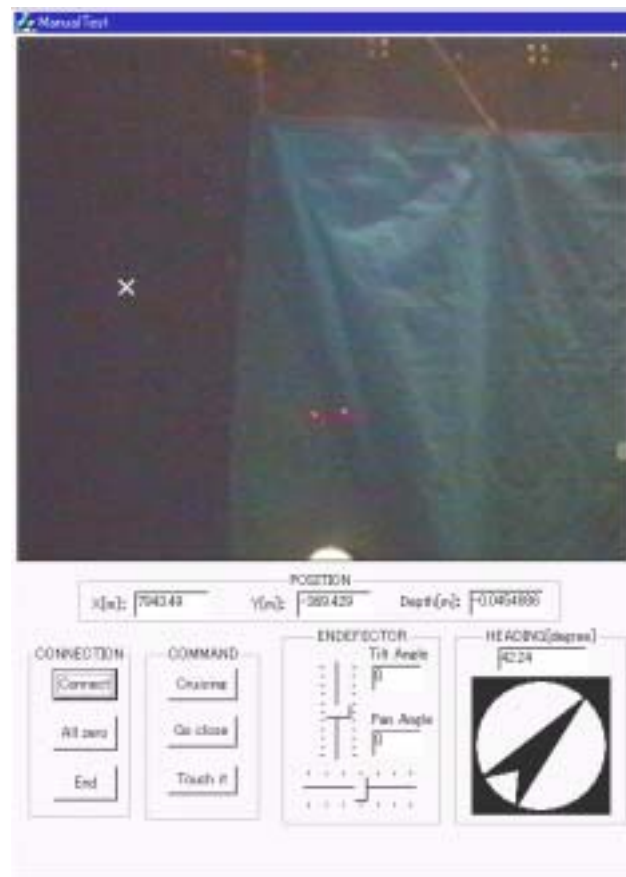


Fig. 4.3 インターフェース

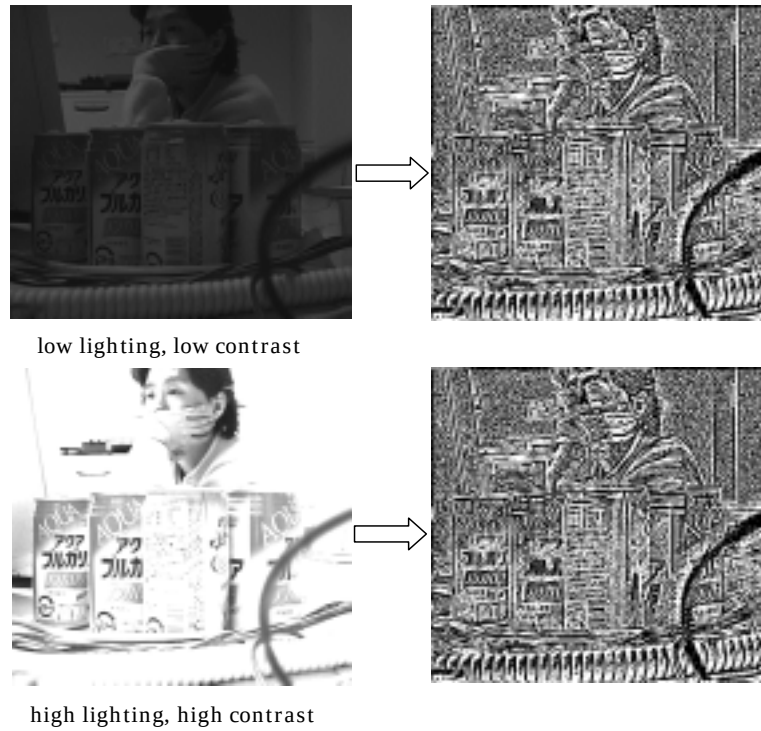


Fig. 4.4 Laplacian of Gaussian フィルタの効果



Fig. 4.5 AUV "Tri-Dog 1"

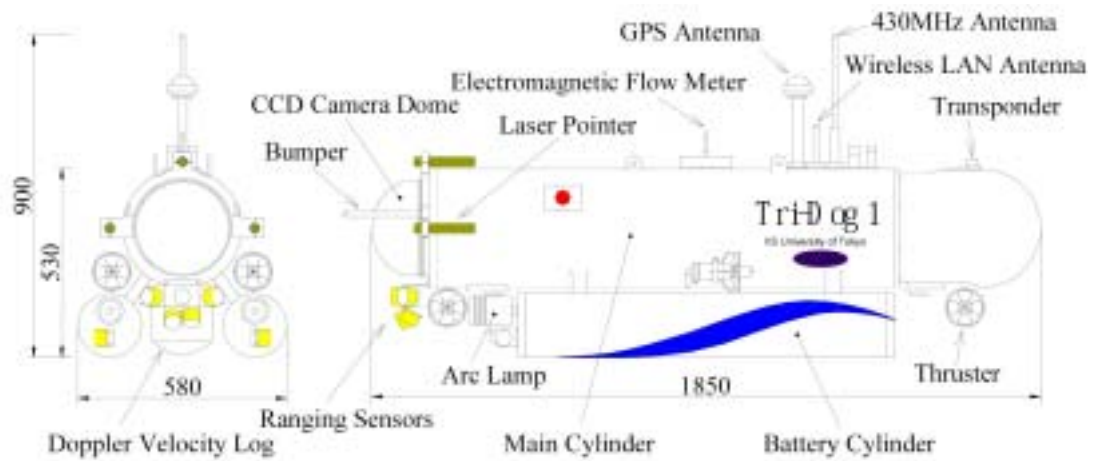


Fig. 4.6 Tri-Dog 1 一般配置図

(unit: mm)

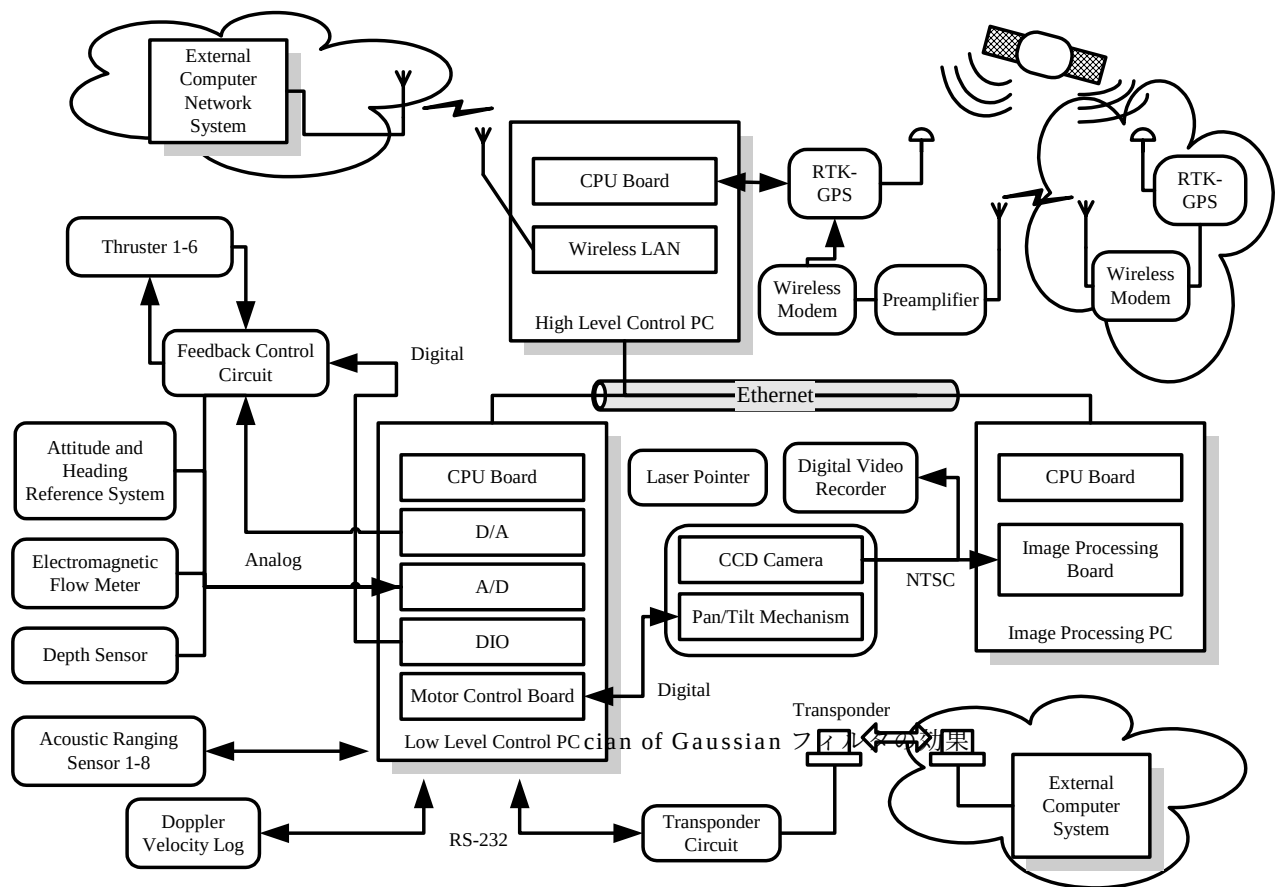


Fig. 4.7 システム構成

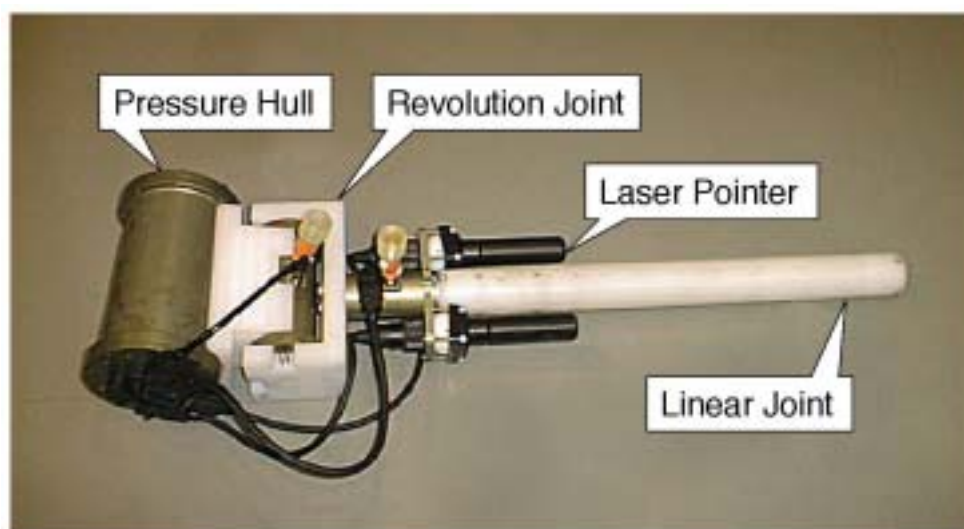


Fig. 4.8 2 自由度マニピュレータ

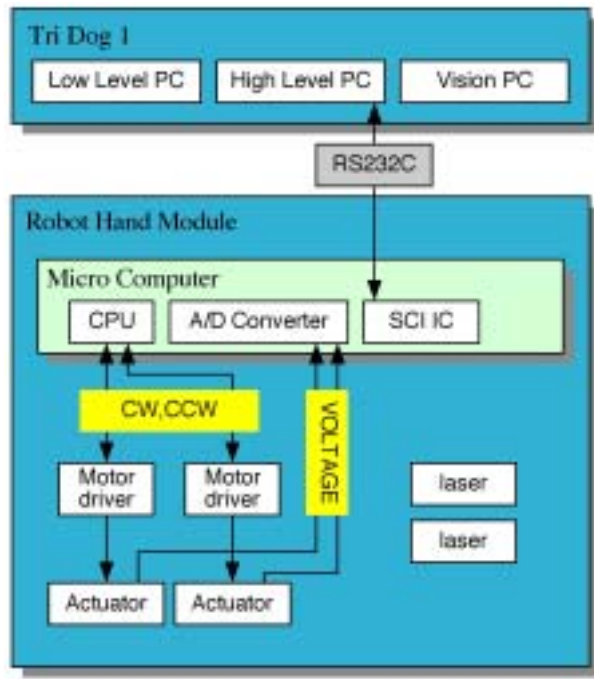


Fig. 4.9 マニピュレータシステム図



Fig. 4.10 観測対象物



Fig. 4.12 対象物への接触

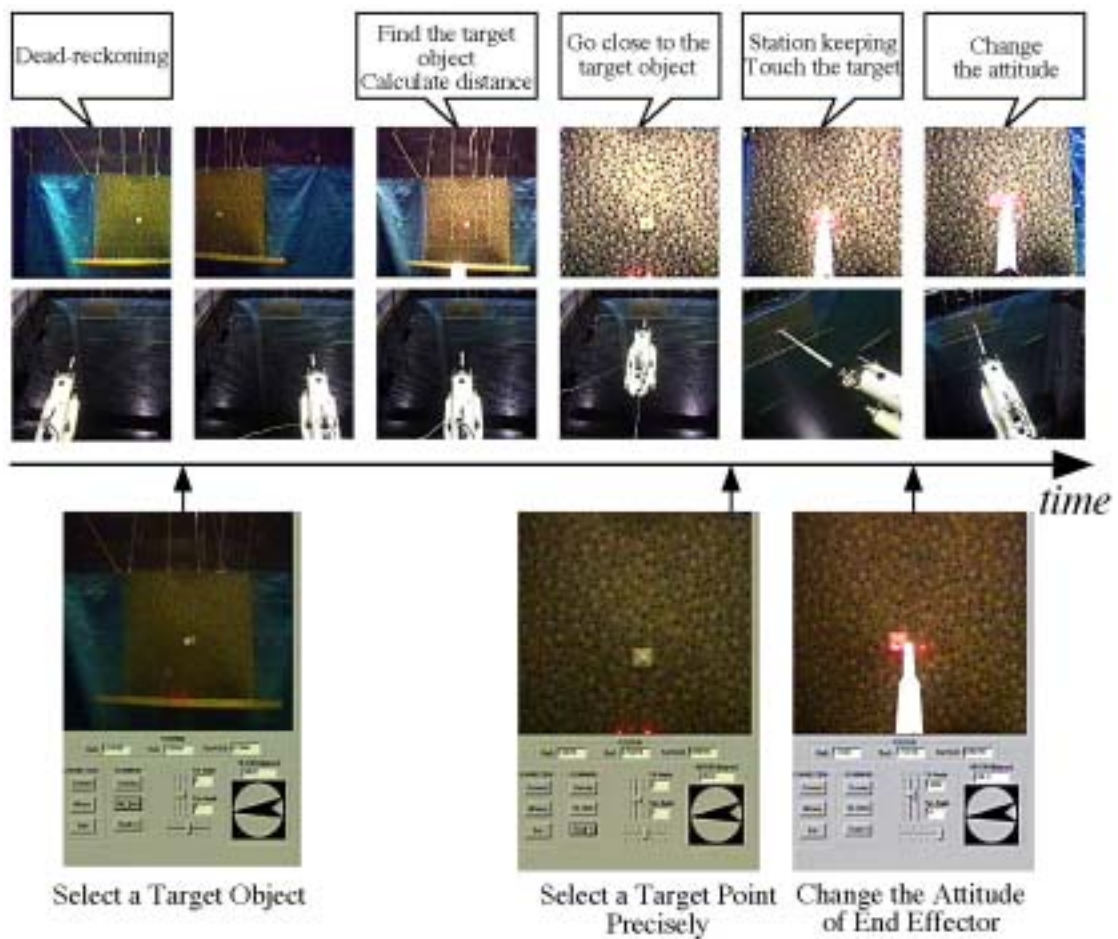


Fig. 4.11 水槽実験の様子

5. 軽量小型システムの統合化

5. 1. はじめに

本研究で開発しようとしているのは軽量小型で機動性に富むシステムである。目標とするシステムを実現するためには装置やソフトウェア等に関する技術開発だけでなく、必要最小限の計測機器や装備を簡潔な形でまとめる設計が必要とされる。

本章では深海モニター用小型ロボットシステム全体の詳細設計についてとりまとめた。

5. 2. ビークル

5. 2. 1. ビークルの詳細設計

(1) 環境条件

ビークルの環境条件を次の通りとする。

- 1) 水深 3,000m 以上
- 2) 水温 0 度
- 3) 海底近傍の流速 0.25m/s 以下
- 4) 海底近傍の透視度 10m 以上
- 5) 海面近傍の流速 100m 深度まで
1m/s 以下
- 6) 海面での風速 20m/s 以下
- 7) 有義波高 2m 以下
- 8) 支援母船 1000 トン以下の一般船(特定の調査装置を持たない)
- 9) 対象の形状情報 事前には無し

(2) 基本計画

1) 目標への接近・離脱

目標への接近・離脱に関しては、以下の 4 Case を考慮する。

*母船から目標近傍まで

中継機に内蔵し、中継機を目標追尾制御。

*目標近傍から対象物まで

中継機から離脱し、ビークルを自動制御する。或いは SSBL のデータを用いて手動制御する。

*ビークルの対象物からの離脱

重錘を投下し、浮力で浮上する。回収は SSBL で概略の位置を定め、フラッシャーや Radio Beacon で回収する。

*中継機の目標近傍からの離脱

アンカーを投下し、浮力で浮上する。回収は SSBL で概略の位置を定め、フラッシャーや Radio Beacon で回収する。

2) ビークルの運動制御

ビークルの運動自由度と運動制御に関して以下のように計画する。

*運動自由度: Surge, Sway, Yaw, Heave の 4 自由度運動とする。Pitch, Roll は浮力・重力モーメントにて安定化する。

*運動制御: 運動制御は以下の 3 mode とする。

a: SSBL (超短基線超音波位置計測装置) や前方探査ソナー等のデータによる目標物への自動接近制御または手動制御。

b: テレビカメラ画像を用いた、操縦者による制御。

c: 前方探査ソナー、方位、深度などによる自律制御。

(3) ビークル機能

- 1) 操縦 TV カメラからの画像情報による遠隔操縦
- 2) 自律性 遠隔操縦が不可能なときには自律的に行動し、通信を確保する。

3) 行動時間

- *1.5 ノット航行 1 時間
- *静止状態 2 時間
- *TV 撮影状態 3 時間
- *降下状態 0 時間(中継機が対応)

4) 浮上・潜航

潜航時は中性浮力で中継機に搭載し、浮上時は重錘の切離により自己浮上する。

(4) 機体構造

1) 基本構造

- *型式: オープンフレーム構造
- *浮力材: syntacticfoam
- *耐圧容器材料: A6061-T6
- 2) 寸法: 1300mm(L)×575mm(W)×504mm(H)
- 3) 重量: 空中重量 186kgf
バラスト降下時の浮上浮力 12kgf

(5) ビークルの搭載装備品

1) 動力装置

- *電源: リチウム 2 次電池 1 式
- *推進: ダクト付きプロペラ 4 台

2) 制御コンピュータ

- *自律制御用コンピュータ: 自律制御 1 台
- *機器制御用コンピュータ: 内部機器制御 1 台
- *映像処理用コンピュータ: 画像圧縮 1 台
- *映像処理ボード: 画像処理 1 台

3) 通信装置

- *画像通信装置: 超音波高速データ通信 1 式
- *データ通信装置: 超音波高速データ通信 1 式

4) 観察装置

- *テレビカメラ: 高感度 CCD テレビカメラ 2 台
- *照明灯: 高輝度白色 LED 2 台
- *VTR: DV 方式 VTR 1 台
- *前方探査ソナー: SeaPrince 475

Profiler Head 1 台

5) センサ

- *位置測定: SSBL トランスポンダ 1 台
- *方位センサ: 磁気コンパス 1 台
- *角速度: 角速度計 1 台
- *深度: 深度計 1 台

6) その他装備

＊機体回収用浮力調整装置：重錘投下装置 1 台
 ＊機体回収用目標：回収用無線ビーコン、フラッシャー各 1 台

（６）ビークルの形状

中継機にビークルが収納された状態に於いて、中継機の流体力学的特性が良好となるよう、ビークルの収納位置と、浮力材形状を検討した。ビークルの形状を Fig. 5.1 に示す。また、浮力材の立体形状を Fig. 5.2 に示す。

浮力材の上面の曲率を中継機の胴部の曲率に等しくし、ビークルの浮力材の上面を中継機の胴部と連続となるよう配置した。以上の対策で中継機の胴部は、ほぼ連続した面となった。

（７）ビークルの系統図

ビークルの系統図を Fig.5.3 に示す。

５．２．２．ビークルの搭載機器に関する詳細設計

（１）浮力材

材料：syntacticfoam(3000m 仕様, 比重: 0.6)
 形状：Fig.5.2 及び Fig. 5.4 に示す。
 寸法：1220mm(L)×575mm(W)×290mm(H)

（２）耐圧容器

材料：A6061-T6
 形状：Fig.5.5 に示す。
 寸法：910mm(L)×288mm(φ)

（３）動力装置

＊電源：リチウム 2 次電池, 26V, 25.5AH
 ＊推進機：ダクト付きプロペラ（詳細は 5.2.3 による）

（４）制御コンピュータ

用途：自律制御用、機器制御用、映像処理用各 1 台

規格：PC-104

CPU：80486 66MHz 以上

（５）映像処理ボード

用途：映像処理
 規格：Hitachi IP-7000 相当

（６）画像通信装置

用途：超音波高速画像伝送（送信部）

仕様：送波音圧レベル 185dB 以上
 通信方式 片方向のみ
 変調方式 4 相 PSK、8 相 PSK、16QAM
 伝送速度 64～128kbits/s
 周波数 100kHz 帯
 指向特性 ±30 度
 伝送距離 500m 以上
 ドップラーシフト 音速の 0.3%まで補償
 外部 I/F NTSC
 誤り訂正 リード・ソロモン符号

動画像圧縮方法 MPEG-4
 準拠あるいは QM
 フレームレート 10～15fps（176×144 画素、64kbits/s）
 静止画圧縮方式 JPEG
 画素数 160(H)×120(V)、320(H)×240(V)
 電源 DC24V, 2A

（７）データ通信装置

用途：超音波高速データ通信

仕様：送波音圧レベル 175dB 以上
 送受波指向特性 無指向性
 通信方式 双方向全二重
 変調方式 FSK
 伝送速度 125～250 bits/s（伝搬状況により可変）

周波数 40kHz/48kHz
 伝送距離 500m 以上
 誤り訂正 リード・ソロモン符号
 送信データ長 20byte, packet

（８）テレビカメラ

型式：高感度 CCD テレビカメラ 2 台
 仕様：CCD 素子 1/4" interline color CCD

有効画素数 380000
 SCAN 2:1 interlace
 Sync inner
 Video 出力 composit, 1.0V_{P-P}, 75Ω

解像度 470 TV line
 S/N 48 dB
 感度 3.0 lux, F=1.2
 外形 Fig.5.6 による

（９）照明灯

型式：水中 LED 照明灯 2 台
 総合仕様：LED 使用数 144/台
 外形 Fig. 5.7 による

LED 仕様：順電圧 約 3.6V
 順電流 約 20mA
 光度 約 1600mcd

（１０）VTR

型式：デジタルビデオカセットレコーダー

仕様：使用カセット Mini-DV Cassette

ビデオ信号 NTSC Color
 入出力 composit, S1, DV, USB, LANC
 電源 8.2VDC, 5.0W
 外形 Fig. 5.8 による
 重量 約 880gf

（１１）前方探査ソナー

型式：SeaPrince 475 Profiler Head

仕様：

動作周波数	475kHz
バンド幅(鉛直)	3.8°
バンド幅(水平)	3.8°
最大距離	100m
最小距離	0.4m
解像度	5・250mm (距離に依存)
Source level	210dB
パルス長	.20- 300microsec
システムバンド幅	35kHz
スキャンモード	解像度と速度により変化
機械的ステップ幅	0.45°, 0.9°, 1.8°
機械的解像度	0.225°
スキャン幅	360° まで可変
連続 360° モード	可
オフセットモード	可
最大直径	70mm
最大長さ	261 mm
重量(空中/水中)	1.2kgf/0.6kgf
最大動作水深	3,000 m 4,000m (ステンレスの場合)
材料	Aluminum alloy-HE30, RPU
仕上げ	Hard anodised black
動作温度	-10°C to +35°C
保管温度	-20°C to +50°C
電源	18 to 36 VDC @ 6VA
データ通信速度	156kBaud
通信ケーブル	Twisted pair, modem or coax
(12) SSBL トランスポンダ	
型式:	UAT-376 Underwater Acoustic Transponder
仕様:	
動作範囲	
受信	26 kHz
送信	25, 27, 28, 29, 30, 31, 32 kHz
音響出力	180dB
応答時間	20 ms
パルス幅	4 ms
電源	9V アルカリ または リチウム トランジスタバッテリー, 2 個
動作水深	3000 m 仕様
容器材料	Aluminum
容器寸法	長さ 18.56 cm, 直径 5.12 cm
重量(空中/水中)	0.57 kgf/0.22 kgf
(13) 方位センサ	
型式:	Flux Gate 方式 地磁気センサ
仕様:	
方位精度	1°以上
方位分解能	0.25°以上
サンプリング速度	10sample/s 以上

出力	RS-232C
電源	5VDC, 100mW
(14) 角速度センサ	
型式:	振動型 角速度センサ
仕様:	
検出範囲	±300°/s
感度	0.67mV/°/s 以上
直線性	±0.5% F.S.以上
応答性	50Hz 以上
電源	5VDC, 25mW

(15) 深度センサ	
型式:	水晶振動子型圧力センサ (絶対圧)
仕様:	
動作水深	3000 m 仕様
精度	±0.01% F.S.
ヒステリシス	±0.01% F.S.
再現性	±0.01% F.S.
出力信号	RS-232C
電源	6VDC, 32mA

(16) 機体回収用浮力調整装置	
型式:	重錘投下装置
仕様:	
駆動方法	DC モータ駆動
重錘	Pb: 13.5kgf

(17) 回収用無線ビーコン	
型式:	RF Beacon
仕様:	
周波数	43.528MHz
出力	100mW/200mW 切換
信号	モールス信号
電池	単 2 アルカリ電池 4 個
電池寿命	100 時間以上
ON/OFF	12m/22m

(18) 回収用無線ビーコン	
型式:	Xenon Flusher
仕様:	
点滅特性	single または double
点滅間隔	1~60flush/min
出力	4.6km~7.3km
電池	単 2 アルカリ電池 4 個
電池寿命	50 時間以上
ON/OFF	水圧 (12m/22m), 日光

5. 2. 3. ビークルのスラストに関する詳細設計

- *後進 (Surge) 旋回 (Yaw) 運動
機体後部左右に各 1 台の推進機を配置する。
- *横進 (Sway) 浮上・潜航 (Heave)
機体中心部左右に各 1 台 45 度傾けて配置する。
推進機の仕様は以下の通りとする。外形図を Fig. 5.9 に示す。

型式	ブラシレス電動プロペラ
モータ方式	PWM 制御内蔵、 ブラシレスギヤードモータ
カップリング	マグネットカップリング

最大推力	前進	約 2.9kgf
	後進	約 2.1kgf
最大使用深度		500m (海水)
非動作時周囲温度		-10℃～+50℃
寸法重量	外径	約 110mm
	長さ	約 190mm
	重量	約 900gf
プロペラ諸元	翼数	4 翼
直径		94mm
ボス直径		37mm
ピッチ比		0.94
展開面積比		0.71
ボス比		0.40
供給電源	モータ入力	DC24V、12A
制御入力		DC12V、15mA
回転数指令		アナログ±5V
回転数出力		2.2mV／rpm

5. 3. 中継機

5. 3. 1. 中継機の詳細設計

中継機に関する環境条件と基本計画については

5. 2. 1. と同様である。

(1) 必要機能

- *ピークルを搭載する。
- *潜航しながら目標に接近する。
- *目標近傍に停留する。
- *ピークルを発進させる。
- *ピークルと超音波で通信し、支援装置へは光 LAN で中継する。
- *母船の指示で浮上する。

(2) 目標への接近・離脱

目標への接近・離脱に関しては、以下の 4Case を考慮する。これらを Fig. 5.10 に示す。

*母船から目標近傍まで

ピークルを内蔵し自重で潜航する、目標物に接近するよう誘導或いは追尾制御をおこなう。

*目標近傍での停留

目標近傍へ到着したらアンカーを投下し、停留する。

*ピークルの信号中継

超音波の高速データ通信でピークルとデータを送受し、光 LAN で中継して母船上の支援装置とピークルの通信を確立する。

*中継機の目標近傍からの離脱

アンカーを投下し、浮力で浮上する。回収は SSBL で概略の位置を定め、フラッシャーや RadioBeacon で回収する。

(3) 中継機の運動制御

*運動自由度

Roll、Pitch、Yaw の 3 自由度運動とする。制御

は重力による落下を利用し、翼による揚力制御でおこなう。この方法は必要な動力が少なく済む利点がある。機体は前部（下方）に主翼と後尾部（上方）に尾翼を持つ。尾翼は直行型で 4 枚ある。Yaw は垂直尾翼で制御し、Pitch は水平尾翼で制御する。Roll は 2 枚の水平尾翼或いは垂直尾翼に逆方向の迎え角を与えることで実現する。潜航状態での制御であるから、Roll は光ファイバーのねじれを防ぐための姿勢安定制御である。尾翼により機体に Pitch、Yaw の角度が付くことにより、主翼の揚力で水平方向の制御をおこなう。

*運動制御

誘導制御と目標追尾制御とする。SSBL で求めた母船と中継機の相対位置データと、GPS 等で求めた母船位置を用いて中継機の位置を求め、これを既知の対象物の位置に接近するよう制御する。

追尾制御は目標点に Pinger 等がある場合におこなう。この場合は前方探査ソナーで Pinger の信号を捉えこれが進行方向となるように制御をおこなう。

(4) 機体構造

1) 基本構造

- *型式 : CFRP モノコック構造
- *浮力材 : syntacticfoam
- *耐圧容器材料 : A6061-T6
- 2) 寸法：胴部 3900mm(L)×700mm(φ)
翼を含む 1500mm(φ)

- 3) 重量：空中重量 300kgf
バラスト降下時の浮上浮力 15kgf

(5) 中継機の搭載装備品

1) 動力装置

- *電源 : リチウム 2 次電池 1 式
- *翼制御装置 : DC モータ駆動 4 台

2) 制御コンピュータ

- *機器制御用コンピュータ : 機器制御 1 台

3) 通信装置

- *画像通信装置 : 超音波高速データ通信 1 式
- *データ通信装置 : 超音波高速データ通信 1 式
- *光通信装置 :

- 中継機・船上装置間データ通信 1 式

4) センサ

- *位置測定 : SSBL トランスポンダ 1 台
- *方位センサ : 磁気コンパス 1 台
- *角速度 : 角速度計 1 台
- *深度 : 深度計 1 台
- *高度 : 超音波高度計 1 台

5) その他装備

- *アンカー投下装置 : 重錘投下装置 1 台
- *アンカー切離装置 : 切離装置 1 台
- *機体回収用目標 :
- 回収用無線ビーコン、フラッシャー 各 1 台

(6) 中継機の形状

中継機の一般配置図を Fig. 5.11 に示す。また、構造図を Fig. 5.12 に示す。

(7) 中継機の系統図

中継機の系統図を Fig. 5.3 に示す。

5. 3. 2. 中継機の搭載機器に関する詳細設計

(1) 浮力材

材料 : syntacticfoam(3000m 仕様, 比重: 0.6)
形状 : Fig. 5.11 に示す。
寸法 : 1400mm(L)×700mm(φ)

(2) 動力装置

＊電源 : リチウム 2 次電池, 26V, 25.5AH

＊翼駆動装置: 中継機制御用翼駆動装置

仕様: 駆動方法 DC モータ駆動
角速度 15°/s
トルク 0.03kgf-m

(3) 制御コンピュータ

用途: 機器制御用 1 台
規格: PC-104

CPU: 486 66MHz 以上

(4) 画像通信装置

用途: 超音波高速画像伝送 (受信部)

仕様: 通信方式 片方向のみ

変調方式 4 相 PSK、8 相 PSK、16QAM

伝送速度 64~128kbits/s

周波数 100kHz 帯

指向特性 ±30 度

伝送距離 500m 以上

ドップラーシフト 音速の 0.3%まで補償

外部 I/F NTSC

誤り訂正 リード・ソロモン符号

動画画像圧縮方法 MPEG-4 準拠

あるいは QM

フレームレート 10~15fps (176×144

画素、64kbits/s)

静止画圧縮方式 JPEG

画素数 160(H)×120(V)、

320(H)×240(V)

電源 DC24V, 2A

(5) データ通信装置

用途: 超音波高速データ通信

仕様: 送波音圧レベル 175dB 以上

送受波指向特性 無指向性

通信方式 双方向全二重

変調方式 FSK

伝送速度 125~250 bits/s (伝搬
状況により可変)

周波数 40kHz/48kHz

伝送距離 500m 以上

誤り訂正

リード・ソロモン符号

送信データ長 20byte, packet

(6) 光通信装置

用途: 中継機・船上装置間データ通信

仕様: 型式 光 LAN 装置

インターフェイス 100BASE-TX

電気コネクタ RJ-45×1 (MDI)

光コネクタ SC 型光コネクタ×1

中継機

船上装置

発光波長 1300nm 帯 1550nm 帯

受光波長 1550nm 帯 1300nm 帯

最小受光レベル-14 dBm 以下 -22 dBm 以下

許容損(dBm)0-10(1300nm)/0-7(1550nm)

伝送距離 0~5km 以上

(7) SSBL Transponder

型式: UAT-376 Underwater Acoustic Transponder

仕様:

動作範囲

受信 26 kHz

送信 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32 kHz

音響出力 180dB

応答時間 20 ms

パルス幅 4 ms

電源 9V アルカリまたはリチウム
トランジスタバッテリー 2 個

動作水深 3000 m 仕様

容器材料 Aluminum

容器寸法 長さ 18.56 cm, 直径 5.12 cm

重量(空中/水中) 0.57 kgf/0.22 kgf

(8) 方位センサ

型式: Flux Gate 方式 地磁気センサ

仕様: 方位精度 1°以上

方位分解能 0.25°以上

サンプリング速度 10sample/s 以上

出力 RS-232C

電源 5VDC, 100mW

(9) 角速度センサ

型式: 振動型 角速度センサ

仕様: 検出範囲 ±300°/s

感度 0.67mV/°/s 以上

直線性 ±0.5% F.S.以上

応答性 50Hz 以上

電源 5VDC, 25mW

(10) 深度センサ

型式: 水晶振動子型圧力センサ (絶対圧)

仕様: 圧力範囲 3000 m 仕様

精度 ±0.01% F.S.

ヒステリシス ±0.01% F.S

再現性 ±0.01% F.S

出力信号 RS-232C

電源	6VDC, 32mA
(1 1) 高度センサ	
型式：超音波高度センサ	
仕様：計測範囲	0～100 m
精度	±1% (対計測値)
計測回数	5sample/s
(1 2) アンカー投下装置	
型式：重錘投下装置	
仕様：駆動方法	DC モータ駆動
アンカー重量	Fe：30kgf
(1 3) アンカー切離装置	
型式：切離装置	
仕様：駆動方法	DC モータ駆動
使用荷重	30kgf
(1 4) 回収用無線ビーコン	
型式：RF Beacon	
仕様：周波数	43.528MHz
出力	100mW/200mW 切換
信号	モールス信号
電池	単 2 アルカリ電池 4 個
電池寿命	100 時間以上
ON/OFF	12m/22m
(1 5) 回収用無線ビーコン	
型式：Xenon Flusher	
仕様：点滅特性	single または double
点滅間隔	1～60flush/min
出力	4.6km～7.3km
電池	単 2 アルカリ電池 4 個
電池寿命	50 時間以上

5. 4. アンビリカルケーブルの詳細設計
アンビリカルケーブルは下記の仕様とする。
型式：光ファイバアンビリカルケーブル
全長：5,000m
構造：Fig. 5.13 による。
光ファイバ：SM 光ファイバ
圧力保護：SUS パイプ
抗張力体：ZYLON HM
破断荷重：504.0kgf
許容荷重：252.0kgf
質量：7.4kgf/km
水中重量：2.9 kgf/km
仕上外径：2.4mm

5. 5. 支援装置の詳細設計

支援装置の系統図を Fig.5.3 に示す。

5. 5. 1. 支援装置の構成

(1) 操作盤

1) 通信装置

画像伸張コンピュータ：MPEG 画像伸張 1 台

光通信装置：中継機・船上装置間データ通信 1 式
2) 制御コンピュータ
機器制御用コンピュータ：中継機、ビークル操縦
1 台

3) 操縦装置

操縦装置：Man-Machine Interface 1 式

4) センサ

位置測定装置：SSBL 船上装置 1 台

(2) 甲板装置

ケーブルリールとトラクションウインチ、ヒープ
コンペンセータと SSBL 送受波器で構成される。

1) アンビリカルシステム

ケーブルリール：電動ケーブルリール 1 台

トラクションウインチ：

電動トラクションウインチ 1 台

ヒープコンペンセータ：

受動型ヒープコンペンセータ 1 台

2) その他装備

SSBL 送受波器：送受波器および架台 1 式

5. 5. 2. 支援装置の構成機器に関する詳細設計

(1) 操作盤

1) 画像伸張コンピュータ

用途：MPEG 画像伸張

仕様：規格 PC/AT 互換

CPU INTEL Pentium4、2GHz 以上

RAM 512MB 以上

HDD 40GB 以上

LAN 100Base-TX

モニター 17" LCD SXGA

2) 光通信装置

用途：中継機・船上装置間データ通信

仕様：型式 光 LAN 装置

インターフェイス 100BASE-TX

電気コネクタ RJ-45×1 (MDI)

光コネクタ SC 型光コネクタ×1

中継機 船上装置

発光波長 1300nm 帯 1550nm 帯

受光波長 1550nm 帯 1300nm 帯

最小受光レベル-14 dBm 以下 -22 dBm 以下

許容損失(dBm) 0～10(1300nm)/0～7(1550nm)

伝送距離 0～5km 以上

3) 機器制御コンピュータ

用途：機器制御

仕様：規格 PC/AT 互換

CPU INTEL Pentium4、2GHz 以上

RAM 512MB 以上

HDD 40GB 以上

LAN 100Base-TX

モニター 17" LCD SXGA

4) 操縦装置

用途：Man-Machine Interface

構成：Joy Stick Lever

スイッチ類等

5) 位置測定装置

用途：SSBL 船上装置

仕様：

- ・ 距離精度：1.0 feet (0.3m)
- ・ 方位精度：0.1degree
- ・ 目標位置再現性：0.2% 勾配距離以下
- ・ 距離精度：±0.5m
(トランスポンダ・レスポンスモードの場合)
- ・ 水平位置精度：2% 勾配距離以内
- ・ システム再現性：0.15% RMS 勾配距離以下
- ・ 検定精度：0.25% RMS 勾配距離以下
- ・ 電源：97-132/170-264 VAC, 47-63 Hz, 200W
- ・ 動作温度：ディスプレイ-10 ~ +55 degrees C
：ハイドロフォン-4 ~ +40°C
- ・ 制御 / 表示ユニット：6in. × 25in.
- ・ ハイドロフォン重量：12 kgf(空中)

6) 操作盤の概形図を Fig.5.14 に示す。

(2) 甲板装置

1) ケーブルリール

用途：アンビリカルケーブル収納

仕様：駆動方法 DC モータ駆動

ケーブル長	5,000m
ケーブル径	2.4mm
ドラム径	500mm
ドラム幅	500mm

巻取力 15.3kgf

巻取/繰出速度 3m/s

巻き層数 15 層

2) トラクションウインチ

用途：アンビリカルケーブル巻取

仕様：型式 ケーブルトラクションウインチ

駆動方法 DC モータ駆動

ケーブル径 2.4mm

巻取力 0~153.1kgf

巻取/繰出速度 3m/s

3) ヒープコンペンセータ

用途：母船動揺吸収

仕様：型式 ピストンアキュムレータ型

駆動方法 中性点自動調整

ケーブル径 2.4mm

最大平均張力 30.6kgf

最小平均張力 3.06kgf

最小補償ストローク ±3m

母船上下揺周期 4.0~10.0s

概要を Fig. 5.15 に示す。

5. 6. まとめ

深海モニター用小型ロボットシステムの軽量小型化を実現するための詳細設計をとりまとめた。

実際の製作時には机上の設計だけでは予想できなかった問題点が明らかとなる場合も考えられる。ビークルに関しては本研究で浅海域仕様のプロトタイプを実際に製作したので製作上の問題点等も解決されたと考えて良い。製作したビークルプロトタイプの性能試験については次章で述べる。

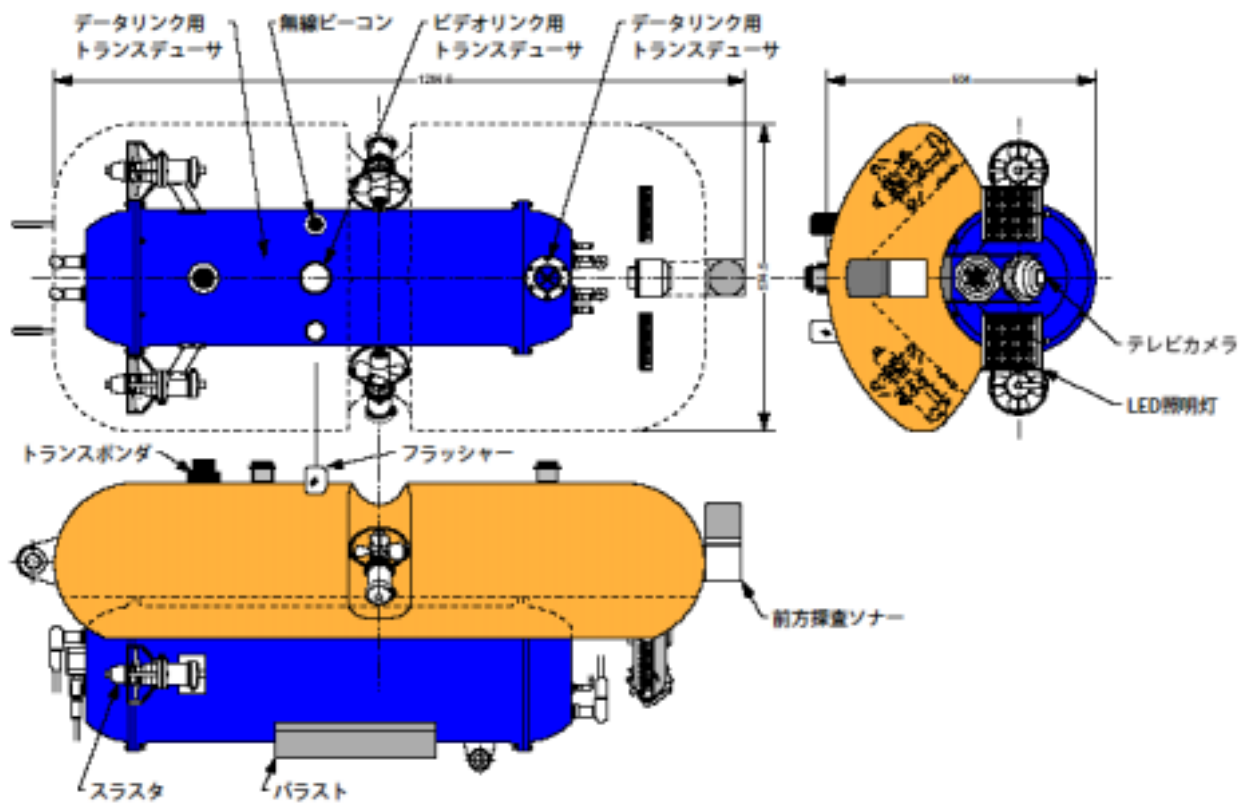


Fig. 5.1 ビークルー一般配置図



Fig. 5.2 浮力材立体図

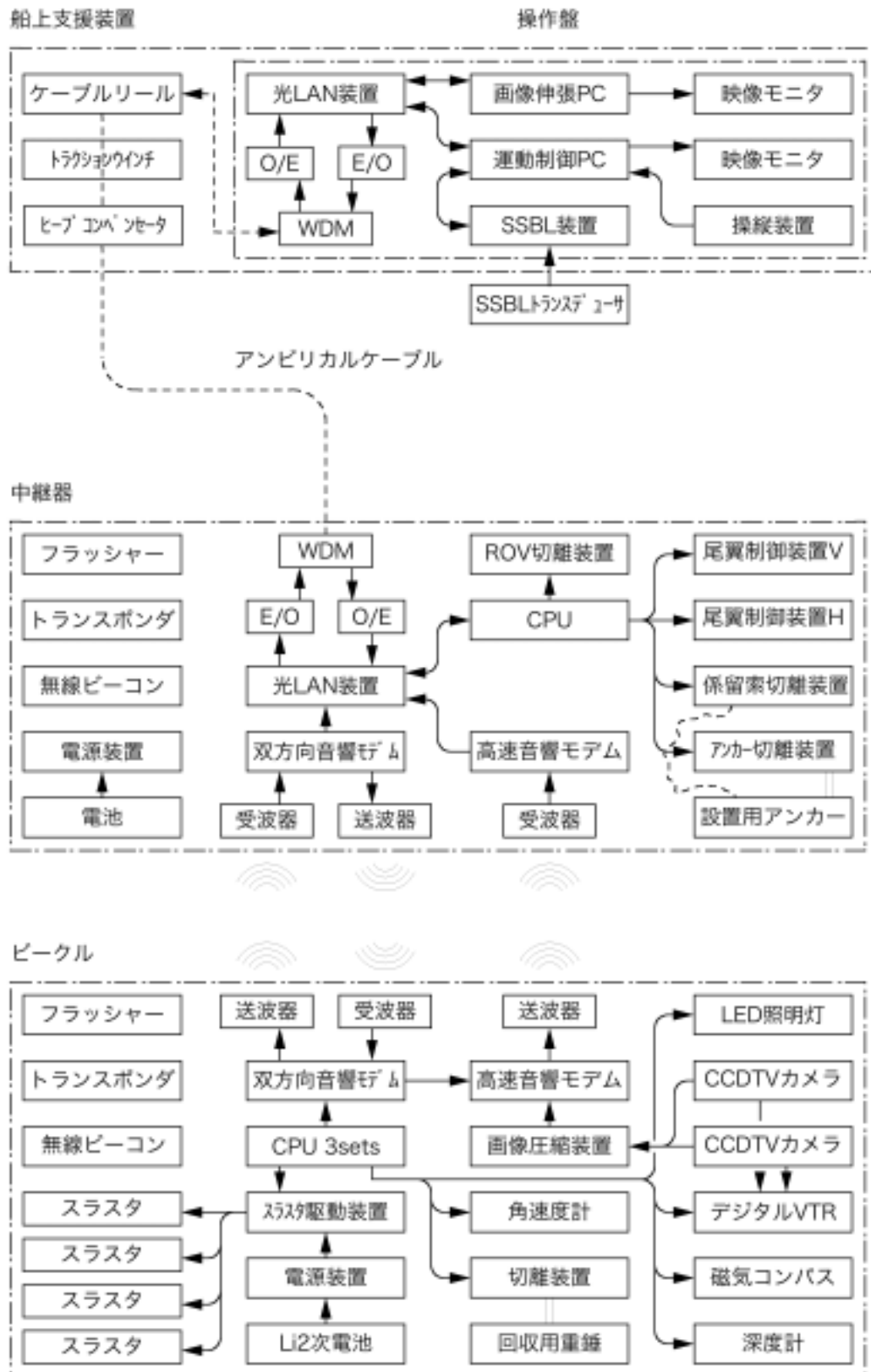


Fig. 5.3 深海モニター用小型ロボット系統図

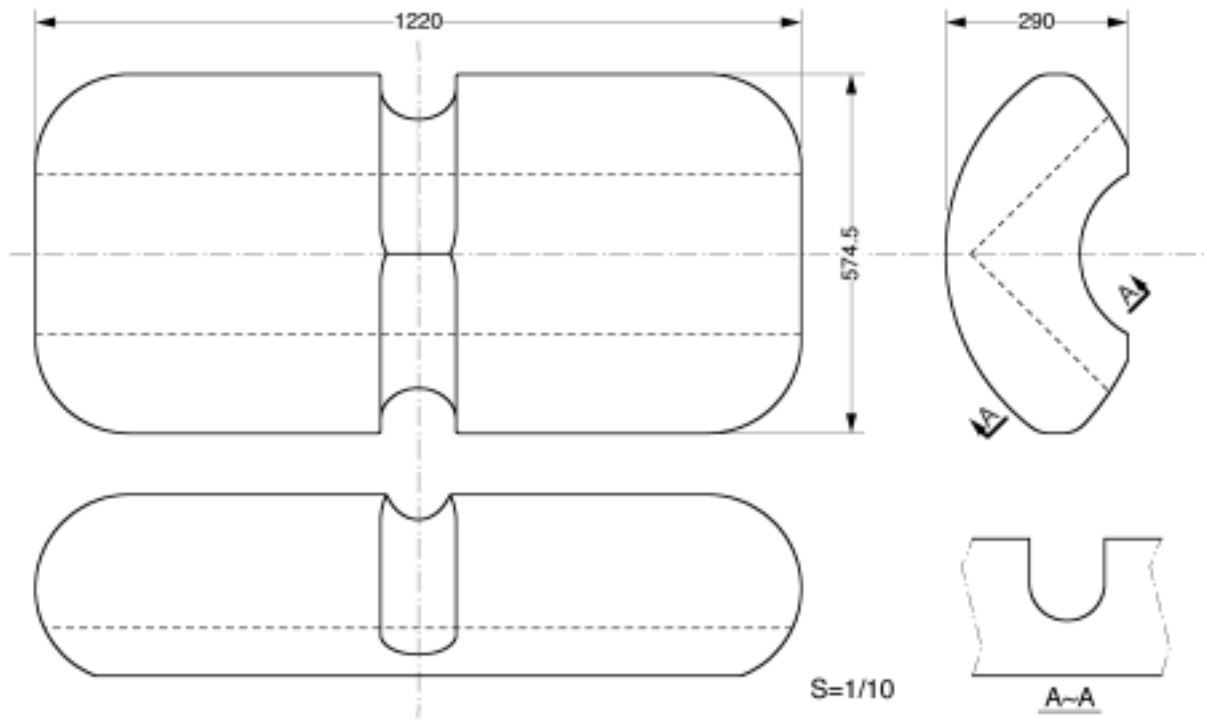


Fig. 5.4 浮力材

(unit: mm)

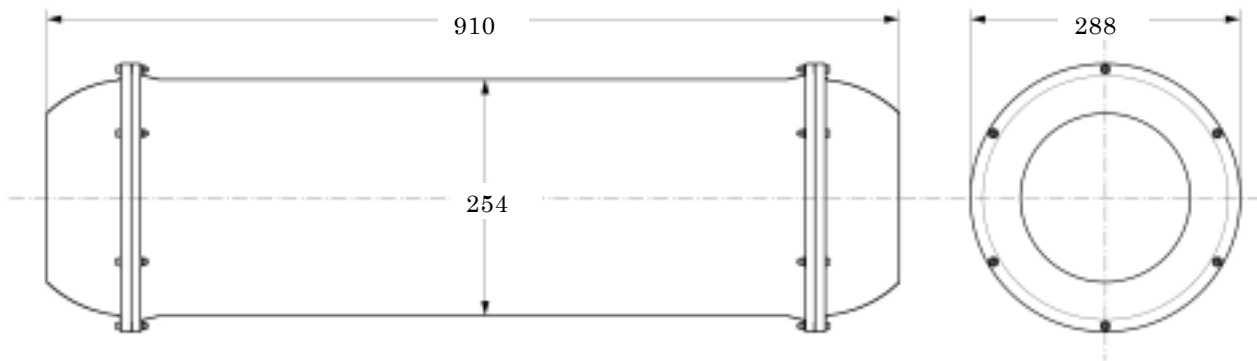


Fig. 5.5 耐压容器

(unit: mm)

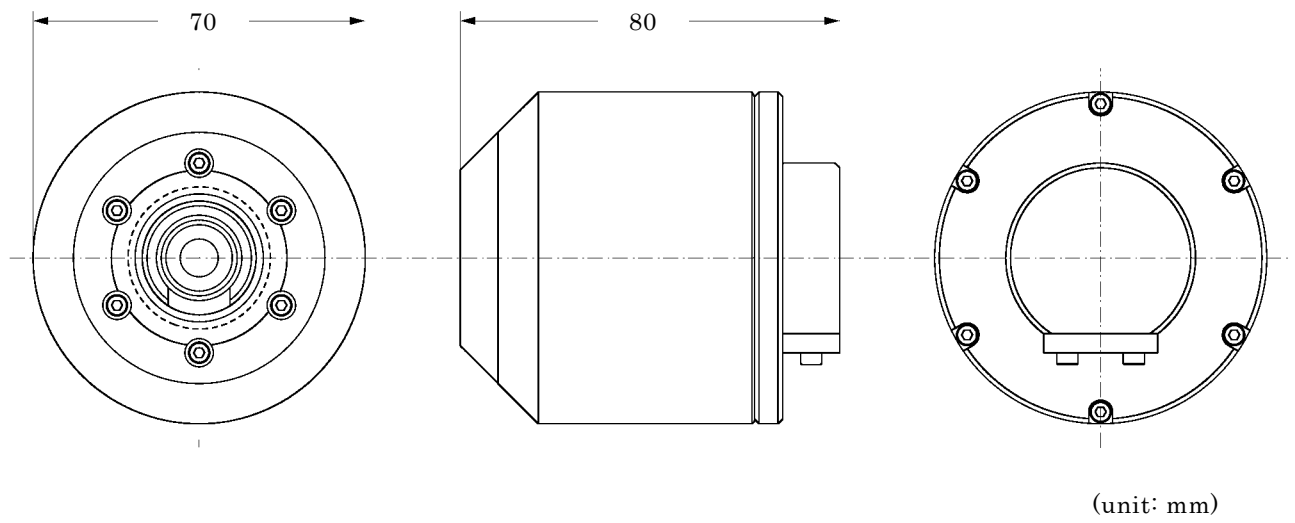


Fig. 5.6 TV カメラ容器外系図

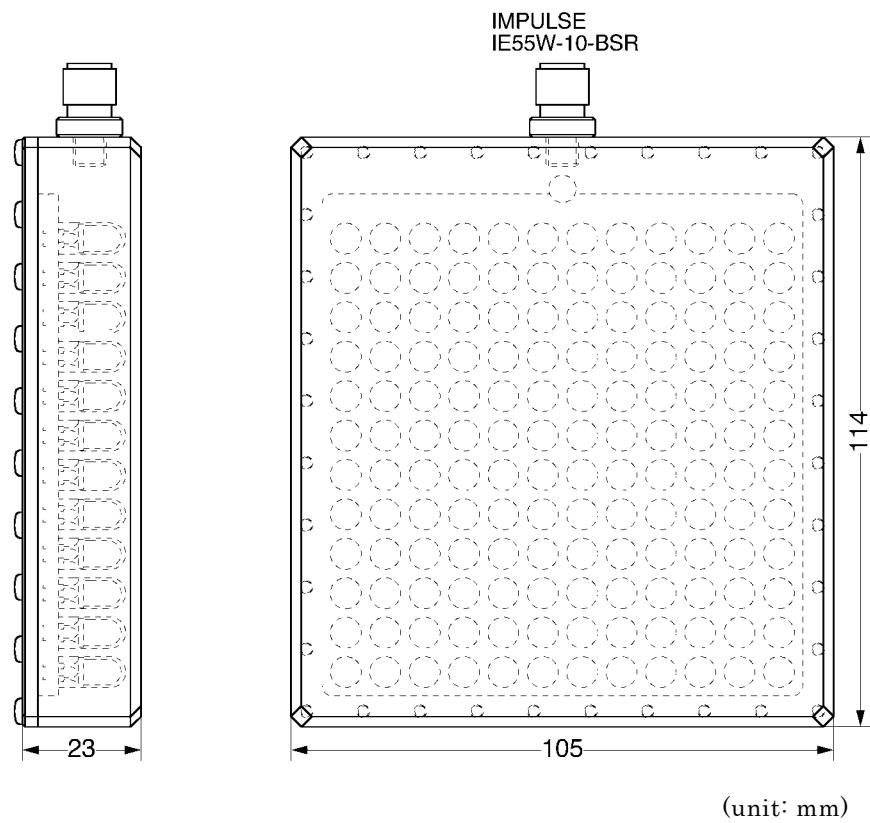


Fig. 5.7 LED 照明灯

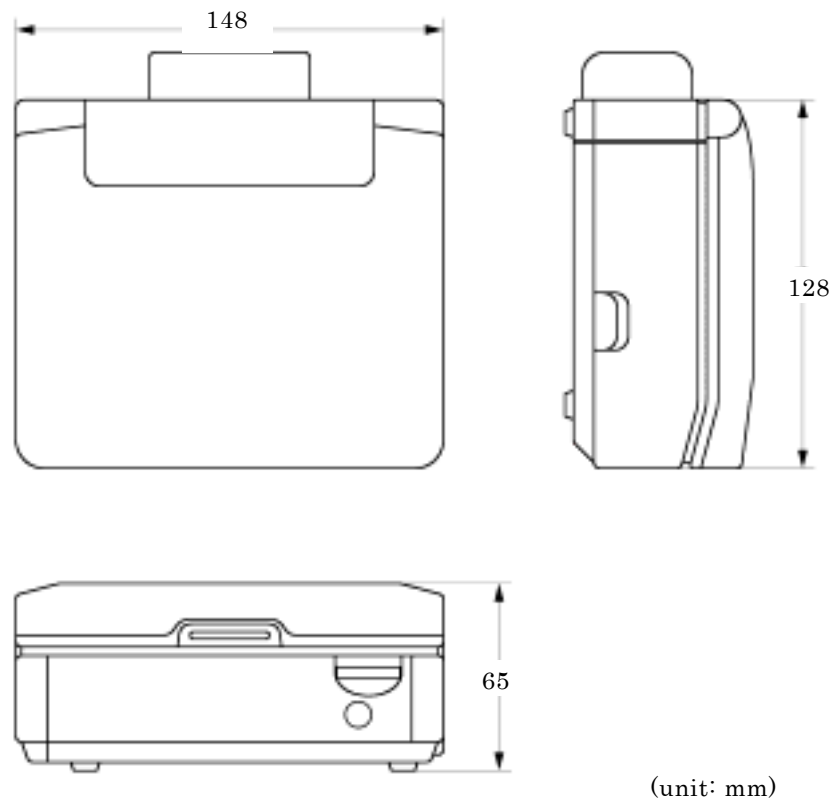


Fig. 5.8 VTR

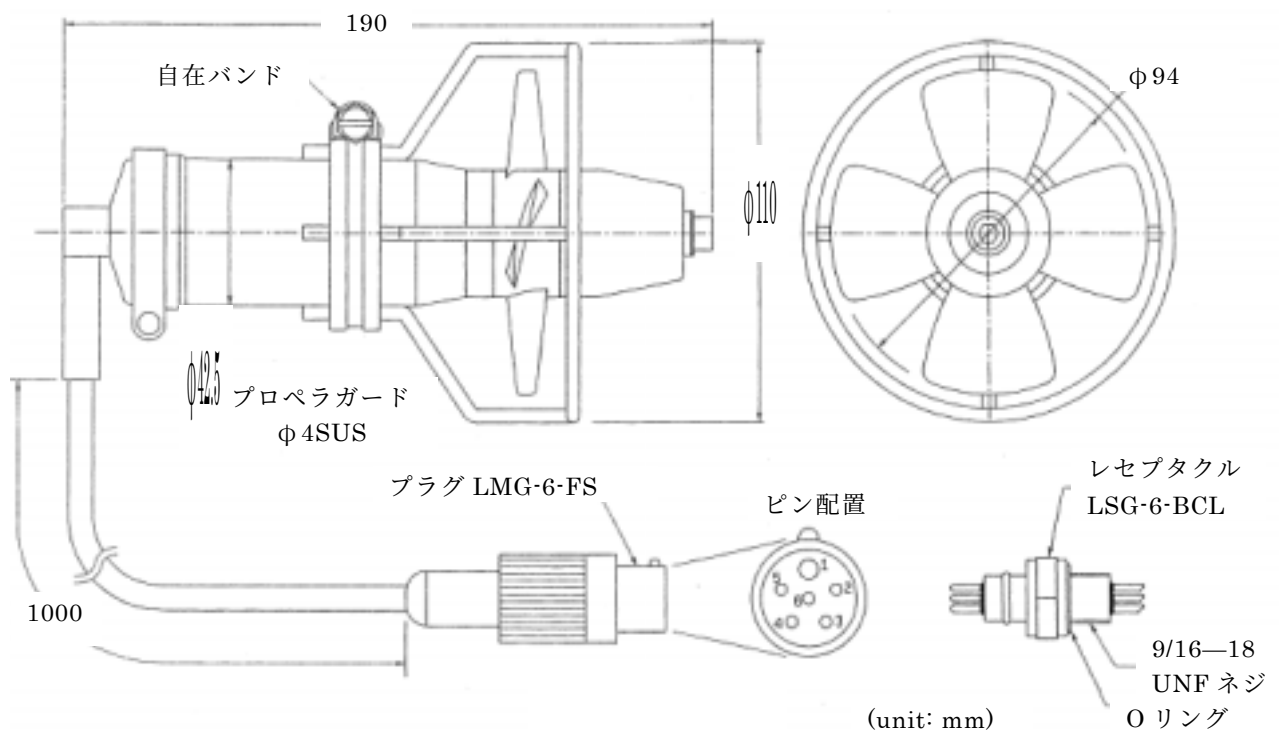


Fig. 5.9 スラスト

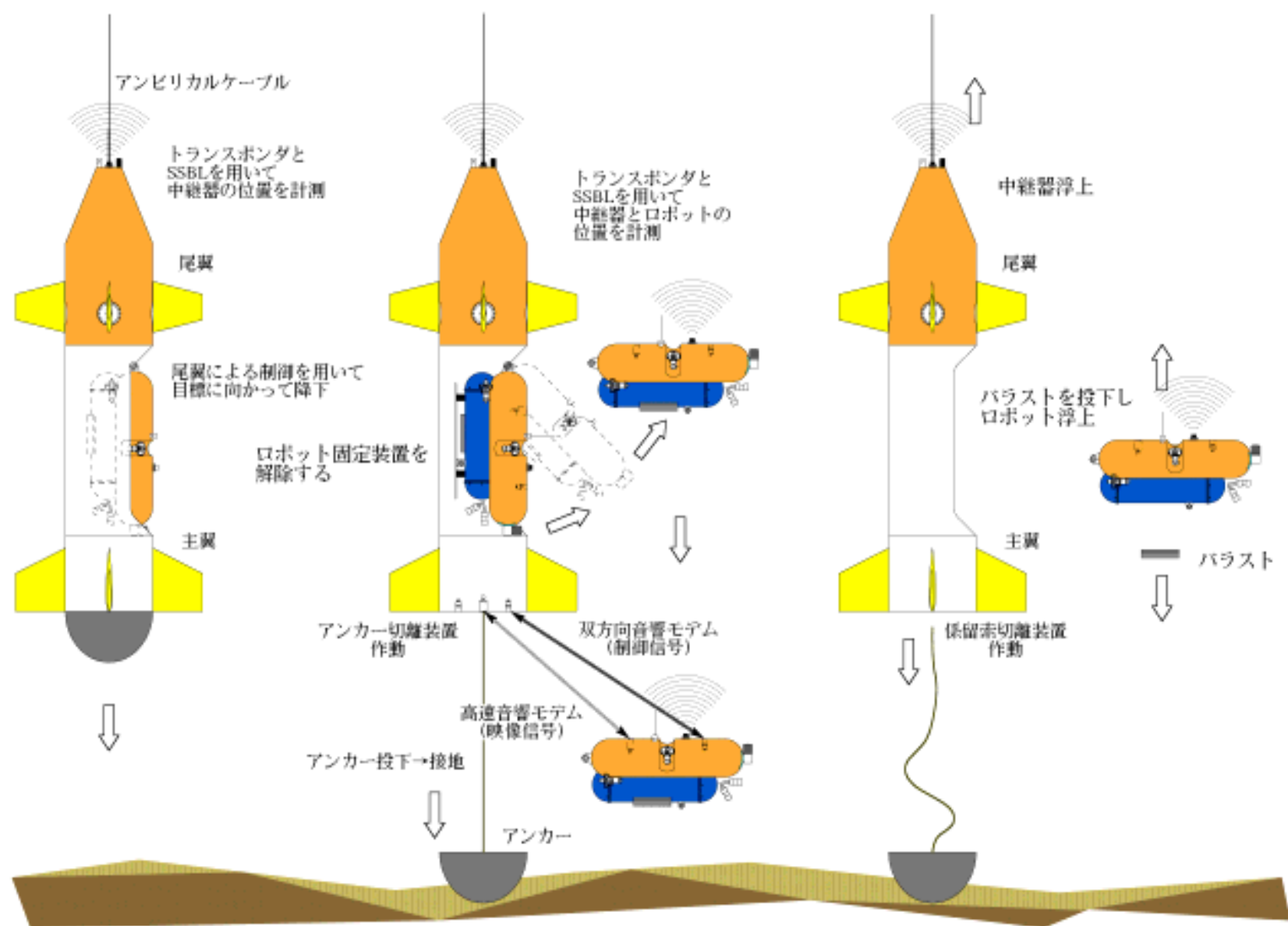


Fig.5.10 中継機運用図

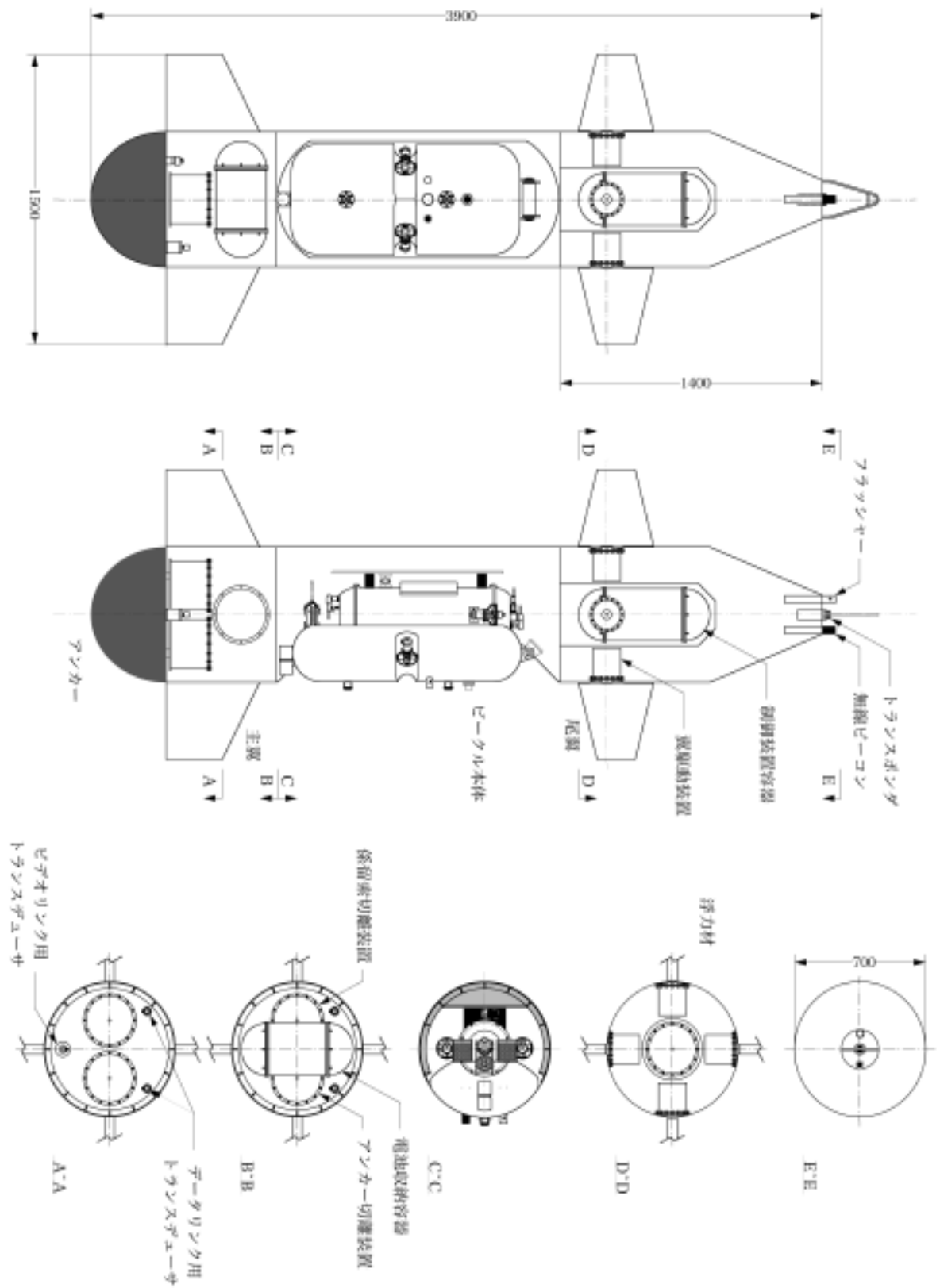


Fig.5.10 中継一般配置図

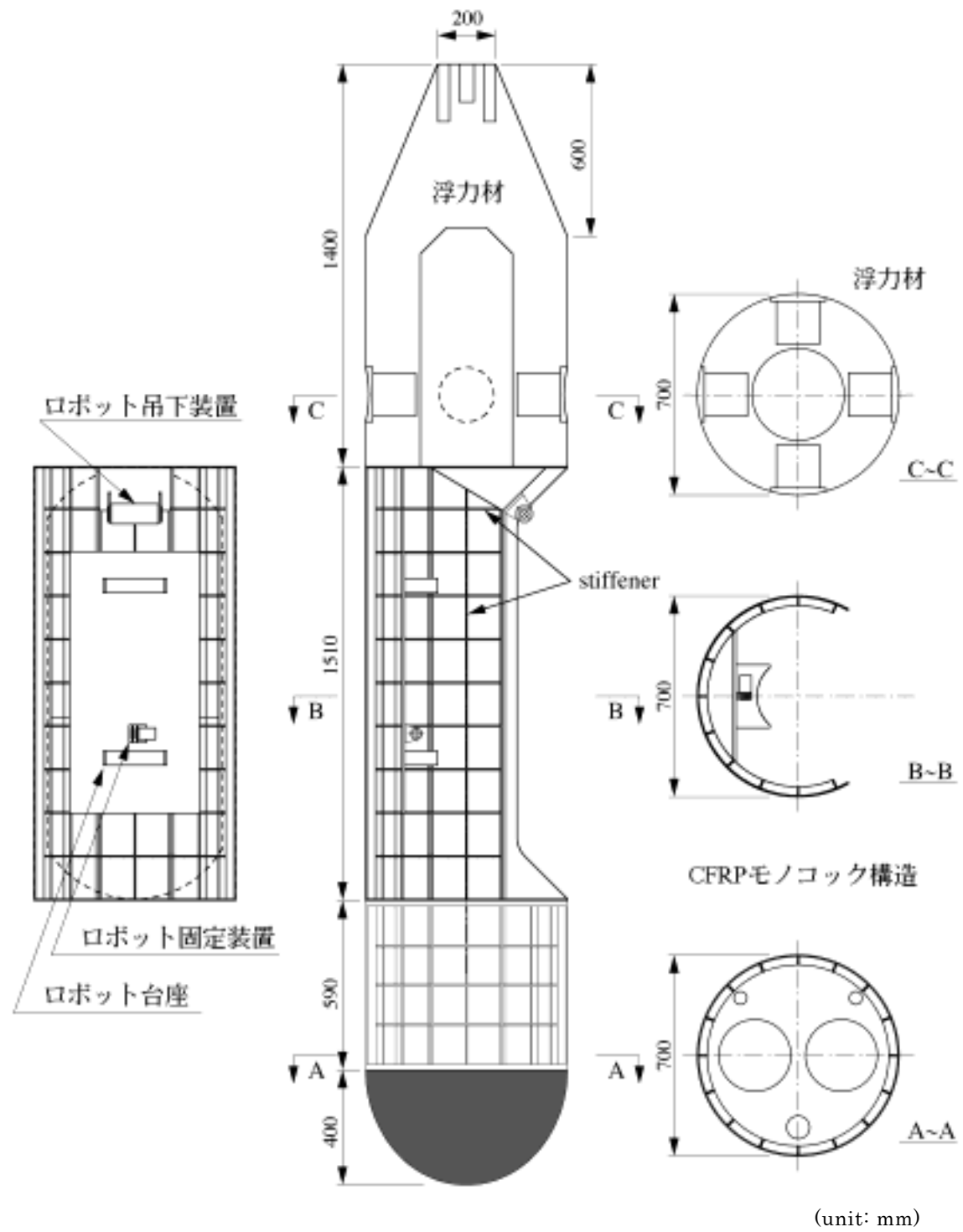


Fig. 5.12 中継機構造図

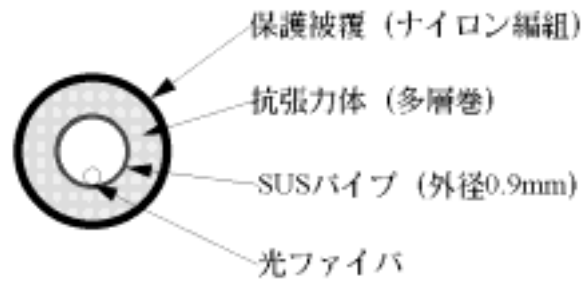


Fig. 5.13 アンビリカルケーブル

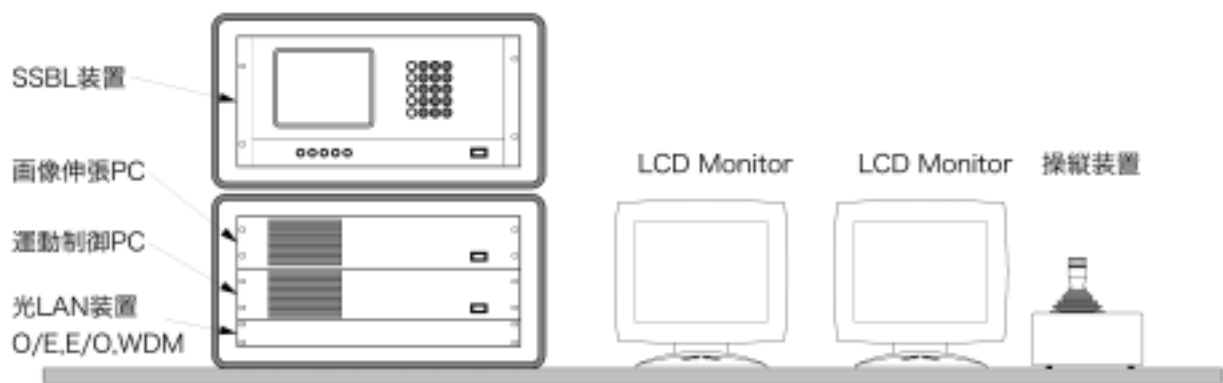


Fig. 5.14 操作卓外観図

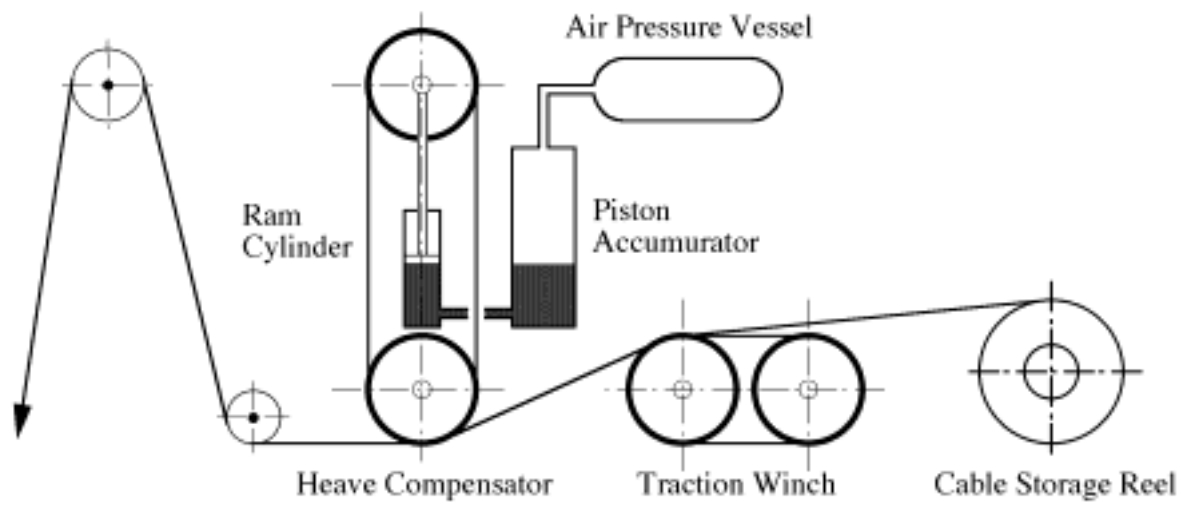


Fig. 5.15 ケーブル取り扱い装置

6. ビークルプロトタイプの性能試験

6. 1. はじめに

本章では、浅海仕様のビークルプロトタイプを前章の詳細設計に基づいて製作し、これにソフトウェアを搭載して調整した上で水槽試験によって性能試験を実施した結果について述べる。

製作したビークルのプロトタイプを Fig. 6.1 に示す。浅海域仕様と深海域仕様で大きく異なるのは耐圧容器と浮力材であるが、その他の機能については深海域仕様と変わりはない。

6. 2. ソフトウェア搭載

ソフトウェアの搭載をおこなった。本節では、制御の概略とソフトウェアの構造を述べる^{6),7),8)}。

6. 2. 1. 制御対象

Fig. 6.2 に全体の系統図を、Table 6.1 に制御・計測項目を示す。

センサ類の概略について以下に解説する。

(1) 運動計測センサ

*姿勢センサ

方位、姿勢を計測するセンサとして、2 軸傾斜センサと 3 軸の磁力計から構成される、Precision Navigation 社製の電子コンパス TCM2 を搭載する。TCM2 は、内蔵したマイクロプロセッサにより環境磁気および傾斜を補正した方位と、傾斜センサによりピッチおよびロール方向の傾斜角を計測する。シリアルインターフェース (RS-232C) により、データ、コマンドの送受信をおこなう。

*角速度センサ

旋回運動における角速度を計測するセンサとして、1 軸方向の回転を検出し、角度および角速度を計測するファイバ・オプティカル・ジャイロを用いる。レーザー光の位相差を利用した計測により、高精度のデータを得られる。シリアルインターフェース (RS-232C) により、データ、コマンドの送受信をおこなう。

*深度センサ

深度センサとしては、圧力計を用い、水压を測定し水深を算出する。圧力モジュール内の拡散型半導体圧力感知エレメントにより、絶対圧を測定する。総チタン製ボディで海水での使用も可能である。測定範囲は 0~1MPa で、深度 100m までの測定が可能である。

*超音波距離計測センサ

超音波送受波器より周波数 175kHz の超音波を送出し、水底面および障害物に反射し送受波器に戻ってくるまでの時間を計測する距離センサである。

センサは、1 台を下向きに、1 台を上向きに配置する。残りの 2 台は左右に向けて設置し、テレビカ

メラでは観測できない部分の障害物を観測する。4 台について順次 20Hz でスキャンし、シリアルシリアルインターフェース (RS-232C) によりデータを出力する。

(2) 機器状態監視センサ

*漏水センサ

圧力容器の前方及び後方に漏水検知センサをおき、漏水が検知された場合はエラー処理をおこなう。

*電圧センサ

電源電圧および DC/DC コンバーターにより整流した 5V、±12V、24V のそれぞれについて電圧を測定する。電源電圧に関しては、24V を大きく下回ると機器が正常に動作しなくなることと、充電に時間を要することになるので、監視し正常の範囲を超えた場合はエラー処理をおこなう。整流された各電圧に関しては、供給電圧が正常範囲内でない場合はエラー処理をおこなう。

*電流センサ

電流センサでは、電源電池における電流を計測する。上限を超える場合はエラー処理をおこなう。

*温度センサ

圧力容器内では機器が密集しており、密閉されているので温度を測定する必要がある。温度は、A/D 変換基板上のサーミスターと、姿勢センサ TCM2 により計測する。

6. 2. 2. ビークルコンピュータシステム

(1) CPU

ビークルには、以下の 2 台のコンピュータを搭載している。

(a) メインコンピュータ

ハードウェア制御や運動制御演算などのビークル全体の制御をおこなう。

(b) 画像伝送コンピュータ

テレビカメラからの画像を圧縮し伝送する。

CPU ボードには、低消費電力の NS GX1-300 MHz を実装した、Advantech 製 PCM-3350F-GOA1 (Fig. 6.3) を用いている。2 台のコンピュータは、Ethernet によって通信する。

振動衝撃などの障害や小型化を考慮して、ハードディスクではなく、ソリッドステートドライブ (SSD) のコンパクトフラッシュを搭載している。SSD は、従来の HDD と比較して、アクセス時間が短いこと、また、取り外しが容易なことから他のコンピュータとのデータのやり取りが容易に行えるという利点もある。

(2) ハードウェアインタフェース

ハードウェアインタフェースとして、KDDI 研究所製の ADC 基板および PC104 バス規格準拠の PC104 4 ポート D/A 基板を用いる。これらの基板

は、CPU ボードとサイズが等しい。

また、CPU ボード提供のシリアル通信速度は遅いので、Advantech 製の PC104Bus, 4Port, RS-232Module の PCM-3641 を用いる。

CPU ボードには、3 枚までのモジュールが接続できる。メインコンピュータでは、これら 3 枚の基板を組み合わせる。この状態を Fig. 6.4 に示す。画像伝送コンピュータは、DSP ボードとの接続のため、4 ポート RS-232 モジュールで構成される。

6. 2. 3. ビークルソフトウェア

以上のようなハードウェアの構成と運動制御などをおこなう基本ソフトウェアを作成した。

(1) オペレーティングシステム

ハードウェアを制御するにあたって、リアルタイム性をもつ必要がある。そこで、オペレーティングシステムには、リアルタイムマルチタスキングシステムである、VxWorks を採用した。開発環境にはクロス開発環境の Tornado2 を使用した。

(2) ソフトウェアの構成

リアルタイム OS では、取り扱うプログラムのことをタスクと呼ぶ。タスクを機能で分類し、同じものをまとめてタスク群とすると、以下のように分類される。タスク群間の関係を Fig. 6.5 に示す。

- (a) 通信タスク群：操縦者とビークルの通信をおこなう。
- (b) 指令処理タスク群：操縦者から受信したコマンドを解析、処理する。
- (c) 時間管理タスク群：時刻、タスクの起動周期の管理をおこなう。
- (d) 運動制御タスク群：制御演算をおこなう。
- (e) 機器制御タスク群：各機器の管理およびデータ処理をおこなう。
- (f) データ記憶タスク群：動作状況や、イベントを記録する
- (g) 下位入出力タスク群：A/D、D/A 変換、I/O 制御をおこなう。
- (h) 異常監視タスク群：ビークルの内部状態を監視し、エラー時に処理をおこなう。

A/D 変換器のサンプリング周波数が 1 フレーム 20Hz であることから、A/D 変換器の割り込みをタイマーとして利用し、タスクの起動周期を 20Hz とする。各タスクが正しく動作するように、セマフォを利用する。

各タスク間の通信には、共有メモリとメッセージキューを用いる。センサデータや演算結果などの情報は、共有メモリを介してデータのやり取りをおこなう。メッセージキューは、コマンドの通信に用い、コマンドを解析タスクで処理し、各タスクに送信す

るさいに利用する。

(3) タスクの機能

(a) 通信タスク

通信タスクには、音響通信、Ethernet 通信における送信、受信タスクがある。

受信タスクでは、操縦者からのコマンドを受け取り、コマンド処理タスクに、メッセージキューを介して渡す。

送信タスクでは、共有メモリの内容を定期的に操縦者に送信する。

(b) 指令処理タスク

指令処理タスクには、通信タスクから送られたコマンドを受信するタスクと、解析するタスクがある。

コマンドのデータ長は 24bit で、8bit のメインコマンドと 8bit のサブコマンド、8bit のパラメータから構成され、必要に応じてサブコマンドを外してパラメータを 16bit にする。解析タスクは、コマンドの構成を判定し、パラメータの設定変更やサブコマンドのあるものに対応し、タスクへメッセージキューをデータ送信する。

(c) 時間管理タスク

時間管理タスクには、CPU ボード上に搭載されているリアルタイムクロックを用いて時刻を管理するタスクと、セマフォの発行管理により DSP 処理タスクと運動制御タスクの同期をとり、起動周期を管理するタスクがある。

時刻を管理するタスクでは、現在時刻をカウントした変数を提供しており、他のタスクでデータを記録する際に、時刻をあわせて記録できる。

運動制御をおこなうにあたって、タスクの起動周期が一定になるよう、タスクの同期管理タスクで、セマフォを発行し、A/D 変換器からのデータを DSP ボードで処理した後、運動制御タスクが動作し、スラスタの出力をおこなうようにする。また、セマフォのタイムアウト機能により、機器およびタスクの管理をおこなう。

(d) 運動制御タスク

運動制御タスクでは、各制御方向ごとに独立のタスクがあり、モード設定および制御演算をおこなう。

運動制御に関しては、制御目標およびセンサ測定値を共有メモリから読み取り、各モードに対応したスラスタの推力指令値を算出し、モータドライバに渡す。

詳細については、(4) に示す。

(e) 機器制御タスク

機器制御タスクでは、I/O 制御による電源管理や、センサのデータ処理および管理をおこなう。

(f) データ記録タスク

データ記憶タスクでは、イベントなどをファイルにテキスト形式で記録するログ機能であり、記録さ

れるファイル名は、1 日単位で日付をベースに作成され、追記される。コマンドの受信記録や、タスクの動作状況記録などを時刻とともに記録することにより、動作確認が行える。

(g) 下位入出力タスク

下位入出力タスクには、A/D 変換タスクと、D/A 変換タスク、I/O 制御タスクがある。

A/D 変換タスクでは、A/D 変換器からのデータを取り込み、物理量への変換、データフィルタリングを行い、共有メモリに書き込む。取り込んだデータは、電圧値であるので、物理量に変換する必要がある。変換に用いる式は、変換係数、増幅器の利得、オフセットを入れたファイルを用意し、これを読み込んで設定する。これにより、オフセットの修正など係数の変更が、プログラムを起動した状態で行える。

D/A 変換タスクでは、運動制御タスクで計算された推力指令値を、スラスタの特性と電源電圧を考慮して電圧指令値に変換し出力する。

I/O 制御タスクでは、LED、スラスタなどの電源制御、テレビカメラの切り換え、バラストの管理などをおこなう。

(h) 異常監視タスク

異常監視タスクは、共有メモリからデータを読み込み、各センサの測定値のチェックや内部状態、通信途絶時間などの監視をおこなう。異常があった場合は、エラー処理をおこなう。

(4) 運動制御ソフトウェア

ビークルには推進器としてスラスタを 4 基搭載おり、Surge、Sway、Heave、Yaw の 4 自由度の運動制御が可能である。このうち、ビークルに搭載されているセンサ情報をもとにフィードバック制御ができるのは、Heave と Yaw の 2 自由度である。この 2 自由度について、PID 制御を用いて運動制御をおこなう。

フィードバック制御では、各方向の推力の目標制御値を算出して、スラスタに出力する。

(a) スラスタ制御

オープンループでスラスタの制御をおこなうため、必要な推力に対応した制御電圧を計算する必要がある。推力－指令電圧の関係は直線的ではなく、近似式による算出となり精度が悪い。スラスタの回転角速度と推力の関係は、推力を F 、スラスタの回転角速度を ω 、 C_t を比例定数とすると以下の通りである。

$$F = C_t \cdot \omega \cdot |\omega| \quad (6.1)$$

また、スラスタの動力源は DC モータであり、ス

ラスタの回転数と推力の関係はほぼ直線的である。これより、必要推力から回転角速度の二乗を求め、これを平方した目標角速度に対応した制御電圧を算出し、駆動電圧を考慮して求める。スラスタが発生する推力は、耐水速度により変化するが、フィードバック制御はビークルの速度が極めて遅い領域で行われるため、 C_t を一定として差し支えない。

制御演算において目標値近傍では、スラスタの制御出力値の正負が変動することが予想される。スラスタのモータはブラシレスモータであるため、制御電圧を急激に変化させると、モータの焼きつきなど故障の原因となる。これを回避するため、制御電圧の変化量に制限を設け、前回の出力電圧と比較し、制限以上の変化が起こらないようにする。これにより、制御電圧が短時間で正転逆転が入れ代わるような、大きな変動がないようにした。

また、スラスタの正転と逆転ではスラスタ形状等の影響により最大出力推力に違うため、作動出力を用いた Yaw の運動制御において十分な制御できない。また、4 基のスラスタについても、それぞれに最大出力推力が異なる。これより、スラスタの出力推力の制限を設ける。逆転時の出力最大値で 4 基のスラスタの中で最も小さい出力を上限とし、電源電圧ごとの上限を設ける。動き始めに関しては、スラスタごとに測定値をもとに出力電圧の下限を設定した。

(b) Surge と Sway に関する運動制御

Surge、Sway に関しては、運動状態を測定するセンサがないので、推力制御のみをおこなった。

(c) Heave に関する運動制御

Heave に関しては、推力制御と深度制御をおこなった。深度制御には圧力計の測定値を用いる。圧力計の深度情報をフィードバックし、制御推力を算出する PI 制御をおこなった。誤差の大きいところでは積分の項の作用が大きくなり応答が遅くなるので、比例制御で残るオフセットから閾値を求め、偏差が閾値内にあるときに積分の項を入れる。これより、目標深度との誤差が閾値以上にあるときは比例制御を行い、誤差が閾値内にあるときは、比例制御と積分制御をあわせておこなうこととなり制御速度と精度の向上を図った。微分制御を行わなかったのは、ビークルの運動抵抗が大きく、オーバーシュート後の復帰に時間がかかるため、微分項の効果によりオーバーシュートが大きくなり、結果として収束が遅くなってしまうことと、微分の項を入れなくても十分な応答が得られたことにある。各項のゲインは試行錯誤により求めた。

(d) Yaw に関する運動制御

Yaw に関しては、推力制御と角速度制御をおこなった。角速度制御は、ジャイロの測定値を用いた。

ジャイロセンサの角速度情報をフィードバックして、制御推力を算出する PI 制御をおこなった。深度制御と同様に、積分の項は目標値との誤差が閾値内にあるときにおこなう。微分制御を行わなかったのは、水中ではその場にとどまることができないため非常に細かい振動を繰り返していることから、微分の項を入れると不安定になってしまうことにある。各項のゲインは試行錯誤により求めた。

(5) Ethernet 通信システム

外部コンピュータとの接続が可能なように、Ethernet 接続用コネクタを設けた。VxWorks では、ネットワーク上の他のコンピュータから起動することができ、Ethernet 通信により、ソフトウェアのデバックや水槽実験時にリアルタイムで変更、調整が可能である。また、ソケット通信によるデータ伝送が可能である。

6. 2. 4. 母船上コンピュータシステム

(1) 概要

母船上コンピュータシステムは、1 台の Note 型 PC である。OS には Windows 2000 を用いている。

(2) 通信インターフェース

通信インターフェースとして、制御用ジョイスティックのために USB を、ビークルとの通信用に Ethernet を用いた。

(3) 遠隔操縦システム

ビークルと操縦者は音響通信によって通信を行い、ビークルはテレビカメラで撮影した画像とセンサ計測値などのビークルの状態情報を送信し、操縦者はビークルから送られてくる画像や情報に基づいてビークルの状態や環境を把握しながらコマンドまたはジョイスティックにより指令を送信し遠隔操縦する。環境影響による通信途絶の際は、ビークルの自律機能により通信可能範囲に復帰する。(Fig. 6.6)

音響通信には、以下の制約がある。

*通信時間遅れ

単位時間に通信可能なデータビット数が少ないため、通信速度が遅く、操縦者から制御情報が送信されビークルに受信されるまでの時間差と、ビークルが獲得した情報を操縦者が獲得するまでの時間差がある。

*通信途絶

音響通信には指向特性がある。画像伝送装置では±30度で、通信可能範囲が限られており不安定である。また、ビークルと中継機の間観測対象物や、周囲の障害物などがはいると通信が途切れる。

以上の問題点により、操縦者から送信できる指令情報は少なく、ビークルの細かい運動についてまで指定することはできない。このような条件下で、操

縦者の負担が少ない観測をおこなうために、ビークルの運動制御にあたって、操縦者は動作の指定、目標深度の設定などの単純な命令のみを与え、ビークルが自律機能により指令に従った観測行動をおこなう遠隔操縦機能を持つ。

ビークルに送信するコマンドのデータ長は 24bit で、構成される。伝送速度が 125~250bits/s より 1 秒間に約 5 個のコマンドの送信が可能である。コマンドにより、ビークルの運動制御のほかに、各センサの状態やパラメータの変更などをおこなう。

コマンドの送信方法としては、ユーザインタフェースのパネル上で深度や推力の目標値およびコマンド番号を設定する方法と、ジョイスティックを操作することにより制御方向と出力推力を指定する方法から選択して実行可能である。

(4) ユーザインタフェース

ビークルからの画像およびのデータ情報の表示と、ビークルに対する操作をおこなうユーザインタフェースを作成した。ユーザインタフェースの全景を Fig. 6.7 に示す。

ビークルの操作をおこなう画面では、ビークルの姿勢情報、各制御モード、推力の指定、深度などの目標値の設定、LED、テレビカメラの切り換えなど機器の制御などが行え、その他の内容に関しては、直接コマンド番号を入力するようになっている。(Fig. 6.8)

ビークルから送信された画像は Fig. 6.9 のように表示される。カメラの切り換えにより、表示画面が切り換わる。

ビークルは、共有メモリの内容を送信しており、運動制御に関するデータや、内部状態監視のための情報について表示する。

6. 3. ビークルの調整 (陸上)

6. 3. 1. スラスタの特性試験

(1) 基本特性試験

運動制御をおこなう際に必要なスラスタの特性を調べるため、各スラスタについての特性試験を以下の条件でおこなった。

*計測形態	ボラードプル
*モータ駆動電源	24VDC
*制御電圧	4.5V~4.5V (0.5V 毎)

また計測内容と使用した計測器は以下の通りである。

*プロペラの回転数	ストロボ回転数計
*推力	検力計 (スラスタ取付脚のモーメントを歪ゲージで計測)
*回転数電圧出力	電圧計
*モータ電流	電流計

試験結果より、制御電圧－推力、回転数の二乗－推力、回転数－制御電圧、回転数電圧出力－回転数の関係を求めた。結果を Fig. 6.10～6.13 に示す。

(2) 電源電圧変動の影響

電源として二次電池を用いるので、使用時間の経過に伴って電源電圧が降下する。スラスタの駆動用電源は、電池から直接供給されるので、電池電圧の降下に伴い、制御電圧に対応する出力推力が低下し、スラスタの特性が変化する。電源電圧をパラメータとしたスラスタ特性の試験をおこなった。結果を Fig. 6.14～6.17 に示す。また結果をまとめたものを Table 6.2 に示す。

6. 3. 2. 組合せ試験およびソフトウェアのデバッグ

以上の準備のうえで組合せ試験と、ソフトウェアのデバッグを実施した。組合せ試験とデバッグは、ビークルの内部電子機器を耐圧容器から出した状態で机上に設置し、各要素機器を接続し、操作用のコンピュータとは Ethernet で接続して実施した。

6. 4. ビークルの試運転

水槽内での試運転と調整を実施した。この試験では特に最終的な重量重心の調整が重要である。本ビークルは浮力材の浮力が過剰であったため、鉛の付加重量を用いて調整をおこなった。また各機器の水中の動作確認や、容器類の水密性の確認も併せて実施した。試運転の様態を Fig. 6.18 に示す。

6. 4. 1. 深度 (Heave) 制御試験

深度制御試験は目標値を step 入力として与え、ビークルの運動を調べた。結果を Fig. 6.19 に示す。

Thruster Command は入力とともに立ち上がり、ビークルが目標値に近づくとともに急速に減衰している。正常な比例制御が行われていることがわかる。目標値に達するまでに 25 秒程度掛かり、ビークルの流体抵抗に比較して、スラスタの推力が不足気味であることがわかる。

300 秒以降の浮上時のデータが潜行時と異なるのは、ビークルが水面に出たためである。

およそ 1 分程度で安定するが、微少な振動が残る。この振動の振幅は $\pm 5\text{cm}$ 、振動周期 50sec 程度であり、観測活動における画像の振動はそれほど大きくない。

下段のグラフは同時に自動的に行われている方位 (Yaw) の自動制御のスラスタに対する指令値で、潜行開始時の変動が補正されていることがわかる。

6. 4. 2. 方位 (Yaw) 制御試験

方位制御試験は目標値を step 入力として与え、ビークルの運動を調べた。結果を Fig. 6.20 に示す。

Thruster Command は入力とともに立ち上がり、ビークルが目標値に近づくとともに急速に減衰している。正常な比例制御が行われていることがわかる。目標値に達するまでの時間は 6 秒程度であり、スラスタの推力が十分であることがわかる。

応答波形は極めて安定しているが、Over Damping ぎみである。最初の立ち上がりの部分の擾乱はケーブルなどによる外乱の影響である。

下段のグラフはビークルの深度データであり、同時に自動的に行われている深度 (Heave) の自動制御が正常に行われていることがわかる。

6. 4. 3. 試運転結果

推力制御は、スラスタの特性試験のデータをもとに制御定数を設定し、制御出力値を求めているので、各自由度において左右のスラスタからの出力推力が均等であり、安定した走行が得られ、ビークルが観測行動をおこなうのに十分な運動性能を持つことが検証された。

6. 5. 深海水槽での総合性能試験

水槽内での総合試験として、自動制御性能の確認をおこなった。実験は海上技術安全研究所の深海水槽で実施した。深海水槽の概略図を Fig. 3-15 に示す。

総合試験として以下の試験を実施した。

- ・速力試験：ビークルの速力試験をおこなった。
- ・音響センサ作動試験：Ranging Sonar の動作試験をおこなった。
- ・総合動作試験：総合的な動作の確認をおこなった。

6. 5. 1. 速力試験

ビークルの速度試験をおこなった。試験項目と条件、および結果を Table 6.3 に示す。

後進時の速度が非常に遅いのが特徴であるが、これはスラスタの後進の推力が小さいことと、配置が機体後部で後進時の水流が機体に沿って流れるための損失が大きいためと思われる。また、水槽内で直進距離が十分に確保できないため、最大速度に至っていない可能性もある。

6. 5. 2. 音響センサ作動試験

Ranging Sonar の動作試験をおこなった。Ranging Sonar は、前方、左右、下方に向けて計 4 台配置されている。これらのセンサの動作試験と精度の確認をおこなった。

(1) 高度センサ

高度センサのデータを深度センサのデータと共に Fig. 6.21(a) に示す。水深の浅い間は壁面などの多重反射などの影響でデータの乱れが大きい。水深 15m 以深では良好なデータが得られている。

高度データと深度データの和を示したものが Fig. 6.21(b) である。深度一定制御中は数 cm の誤差であ

ることが解る。

(2) 左右距離センサ

左右距離センサの計測データを Fig. 6.22(a)に示す。壁面の構造物などの影響や電気雑音のため、雑音が多いが距離計測は可能である。左右のデータの和を Fig. 6.22(b)に示す。安定時には 10cm 以内の誤差である。

6. 5. 3. 総合動作試験

総合的な動作の確認をおこなった。

(1) 深度一定制御

深度一定制御の結果の内、水深 4m 迄のものを Fig. 6.23(a)に、水深 25m 迄のものを Fig. 6.23(b)に示す。深度一定制御の安定性は良好である。

(2) 方位一定制御

深度一定制御の結果の内、全力前進時のものを

Fig. 6.24(a) に、全力後進時のものを Fig. 6.24(b)に示す。全力前後進ではスラスタの余剰推力がなく、左右のスラスタの推力減少のみで方位制御をおこなうため、誤差が大きくなる。前進時の方がスラスタの効率が高いため方位精度はよくなっている。

試験中の写真を Fig. 6.25 に示す。

6. 6. まとめ

詳細設計に基づいてピークルのプロトタイプを製作し、ソフトウェアを搭載・調整の上、深海水槽で総合性能試験を実施した。

机上の設計にとどまらず製作上も問題がないことを確認して実際の使用に耐えるプロトタイプを完成させた意義は大きい。さらに、深海水槽において所定の性能を確認したことは今後の実機製作へ向けての有意義な成果であると考えられる。

Table 6.1 制御・計測項目

制御・計測項目	制御装置項目	通信方法	概略仕様
Thruster	Thruster Driver	Analog 4ch.	100W, Magnet Coupling Thruster
TV Camera	Video Switcher	Digital 1ch.	CCD Camera
LED Light	Power Supply	Digital 2ch.	LED Light
Attitude Sensor	TCM2	RS232C	Electronic Compass Sensor Module
Rate Sensor	JG-35FG	RS232C	Fiber Optic Gyro
Depth Sensor	PCX-1860	Analog 1ch.	Strain Gauge Type
Ranging Sonar	Sonar Board	RS232C	4ch. Raging Sonar
Water Intrusion Sensor	Electrode	Analog 2ch.	Resistance Type
Voltage Sensor	Power Supply	Analog 4ch.	
Current Sensor	Battery	Analog 1ch.	Hole Sensor Type
Temperature Sensor	A/D, TCM2	RS232C	Thermistor Type
U/S Data Link	U/S MODEM	RS232C	KDD Type
U/S Video Link	DPS Board	RS232C	KDD Type

Table 6.2 電源電圧変動の影響

Supply Voltage	Positive Revolution		Negative Revolution	
	Tendency (rpm ² /V)	Rate	Tendency (rpm ² /V)	Rate
24V	545.71		-524.41	
(26V Tendency /24V Tendency)		1.0602		1.0600
26V	578.57		-555.89	
(28V Tendency /26V Tendency)		1.0621		1.0641
28V	614.52		-591.57	

Table 6.3 速度試験結果

試験名	深度	計測間隔	平均時間	速度
Surge(forward)	2m	2.35m	3.92sec	0.60m/s
Surge(reverse)	2m	2.35m	8.21sec	0.29m/s
Heave(up)				0.28m/s
Heave(down)				0.28m/s
Yaw	2m			18deg/s



Fig. 6.1 ビークルプロトタイプ完成状態



Fig. 6.3 CPU ボード

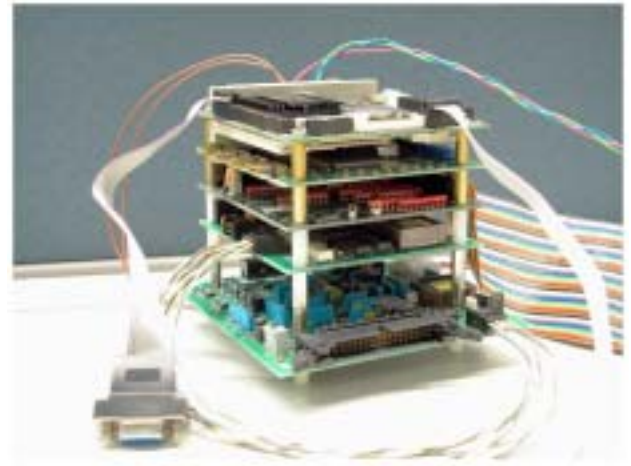


Fig. 6.4 CPU セット

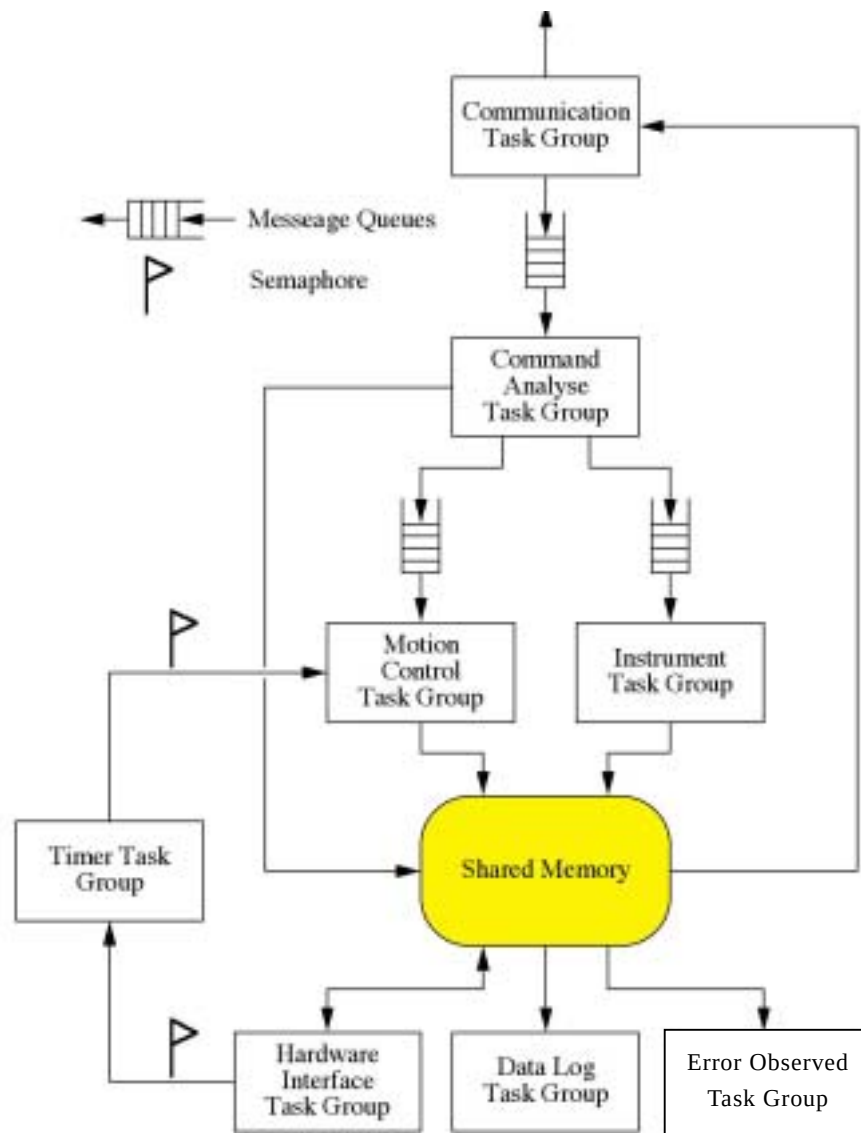


Fig. 6.5 基本ソフト構成

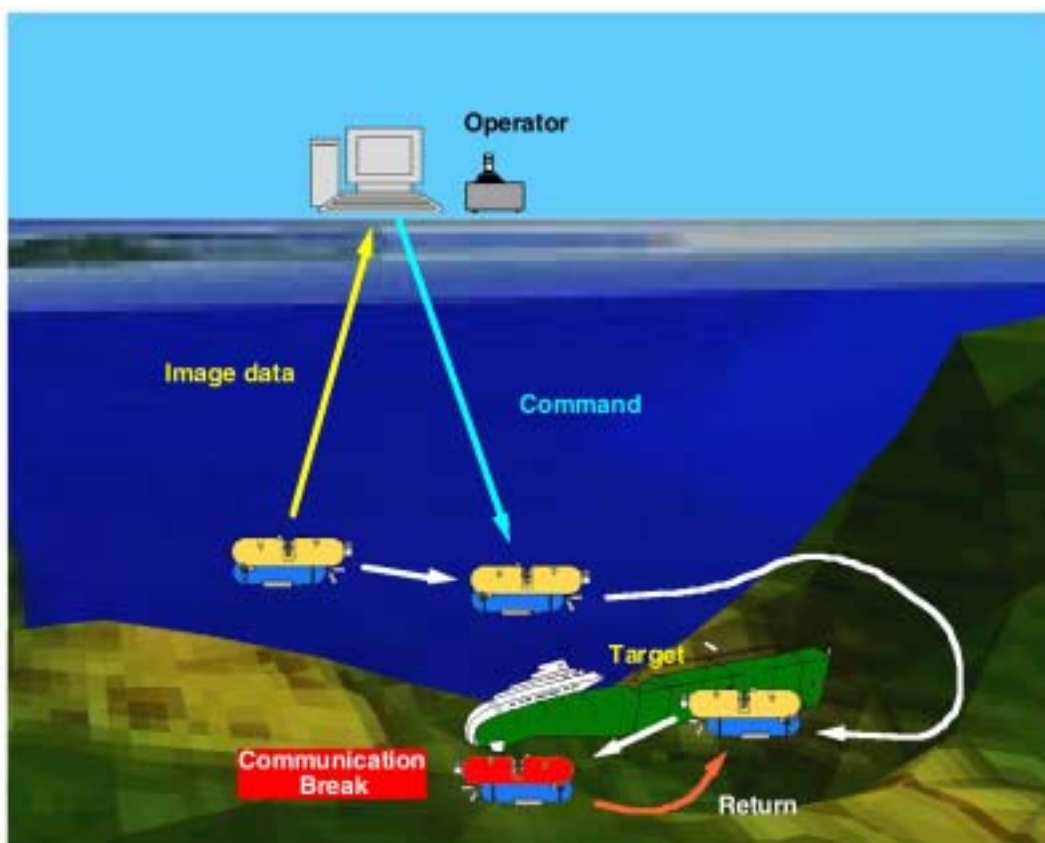


Fig. 6.6 遠隔操縦システムの概要



Fig. 6.7 遠隔操縦装置

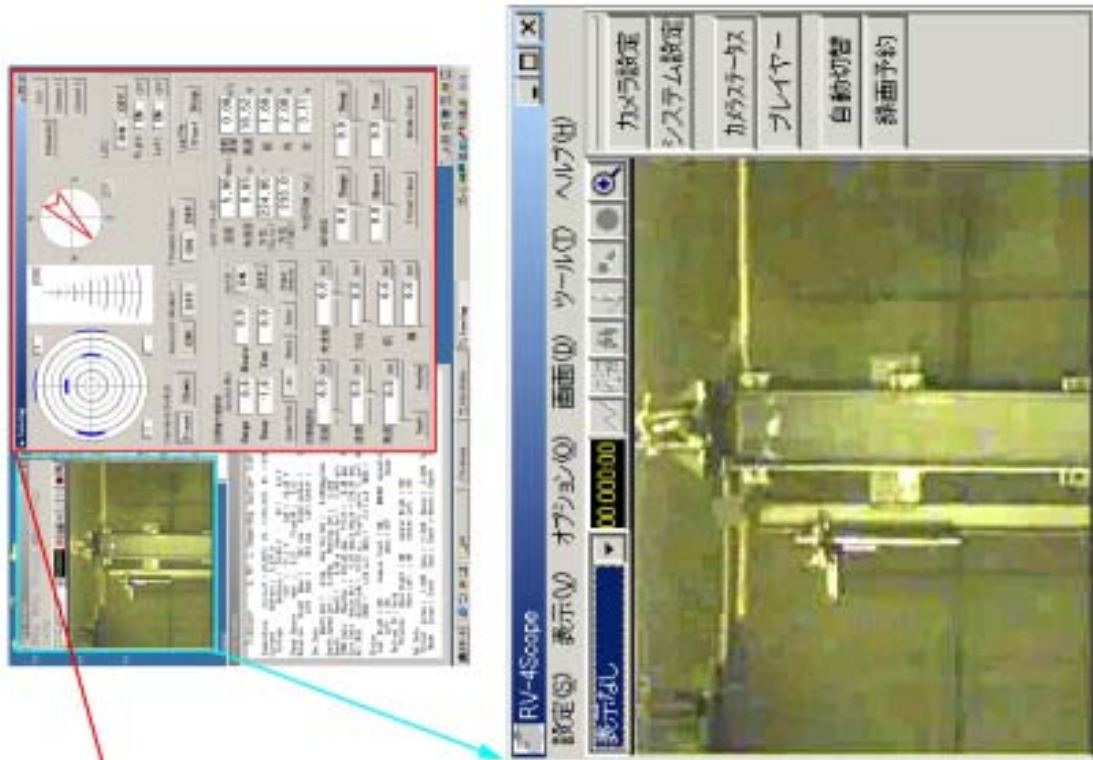


Fig. 6.9 遠隔操縦用画像表示画面

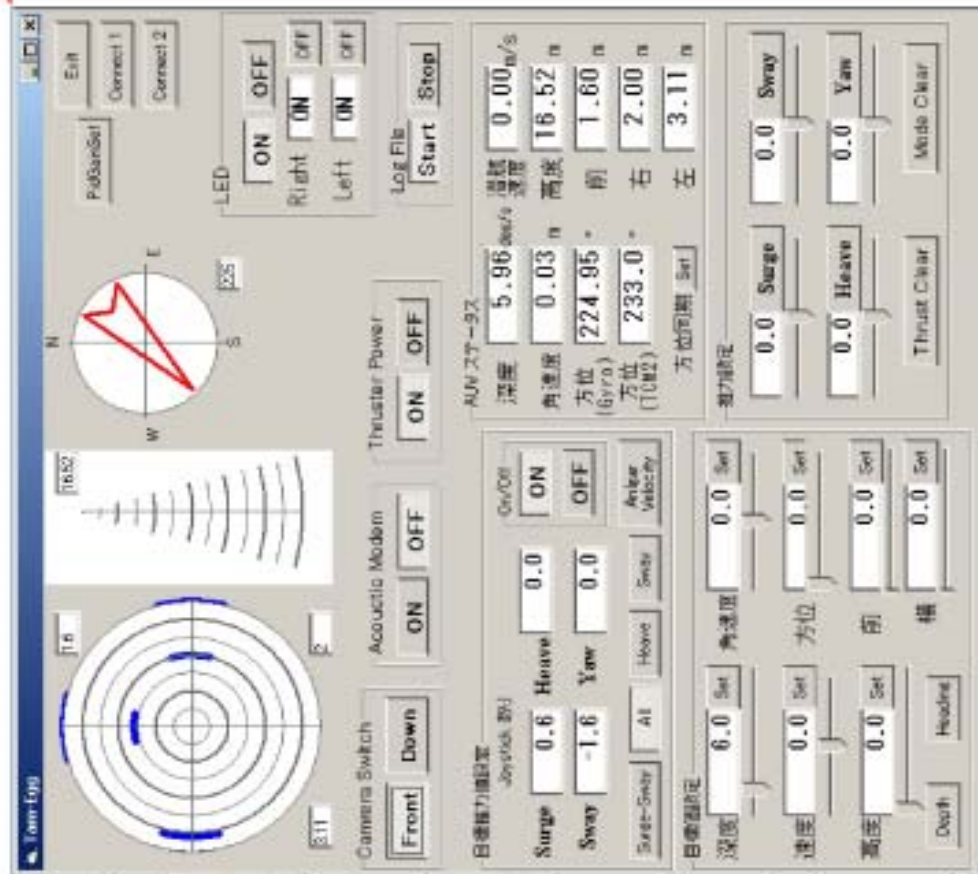


Fig. 6.8 遠隔操縦用画面

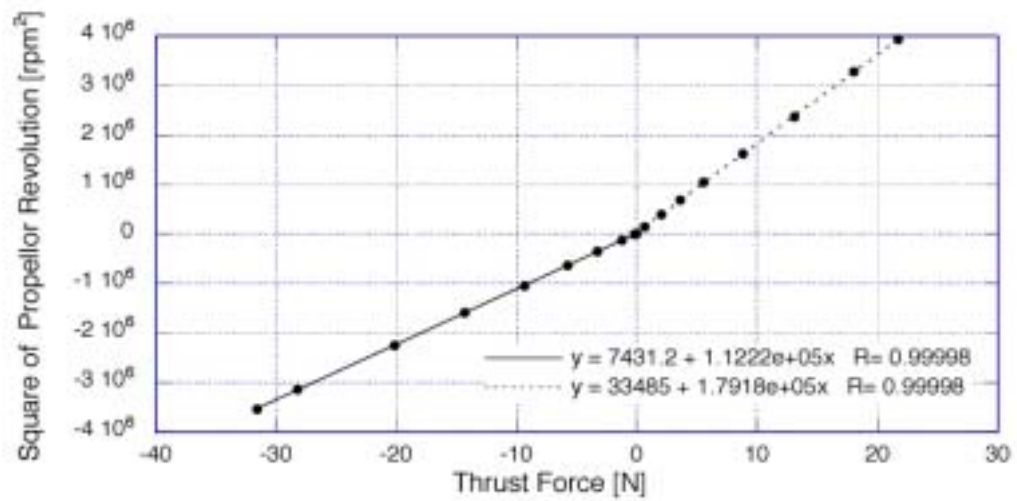


Fig. 6.10(a) 第1スラスト特性曲線（推力-回転数）

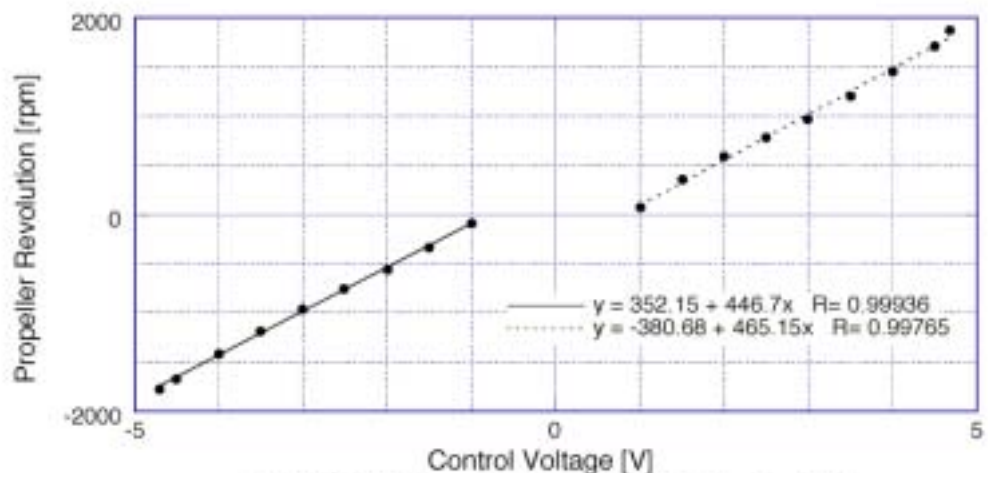


Fig. 6.10(b) 第1スラスト特性曲線（電圧-回転数）

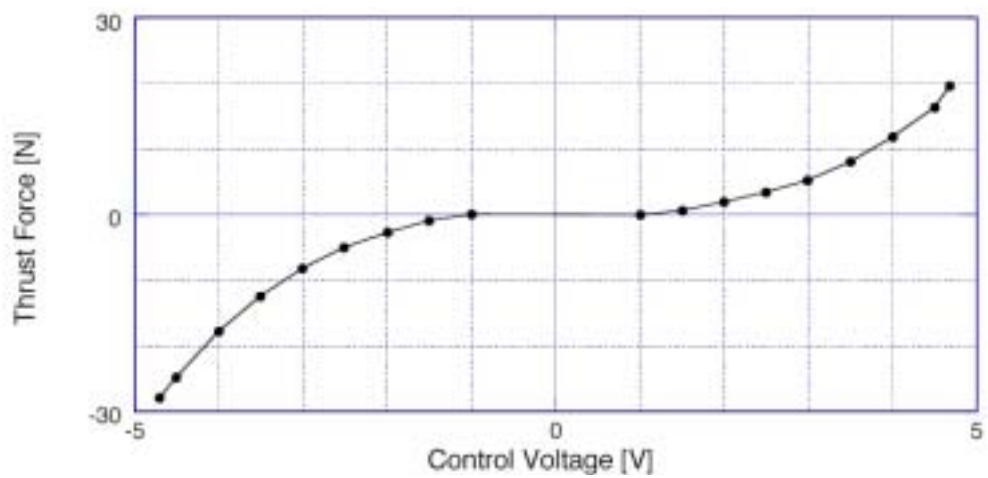


Fig. 6.10(c) 第1スラスト特性曲線（推力-電圧, 24V 電源）

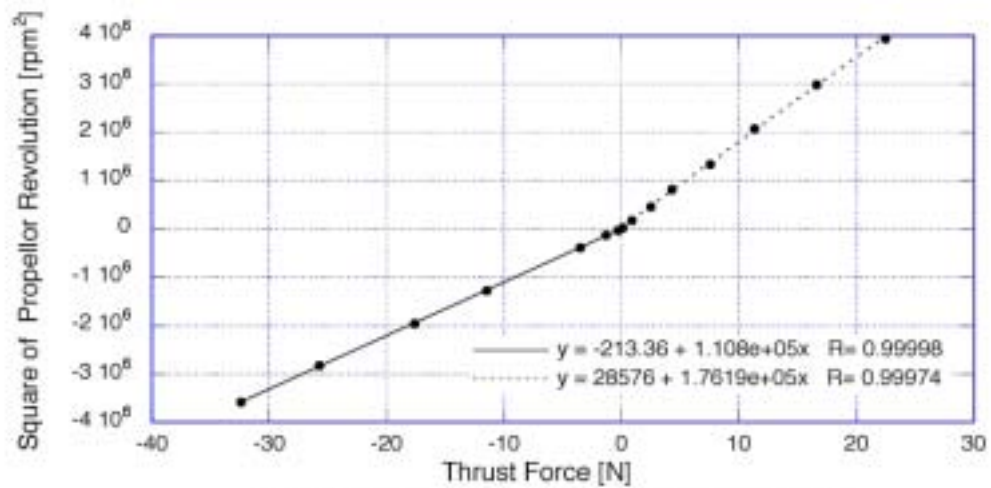


Fig. 6.11(a) 第2スラスト特性曲線（推力-回転数）

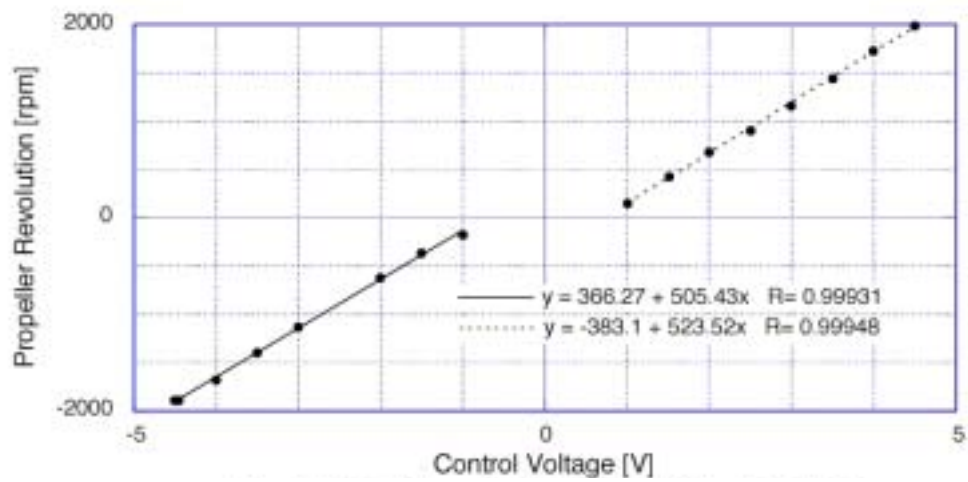


Fig. 6.11(b) 第2スラスト特性曲線（電圧-回転数）

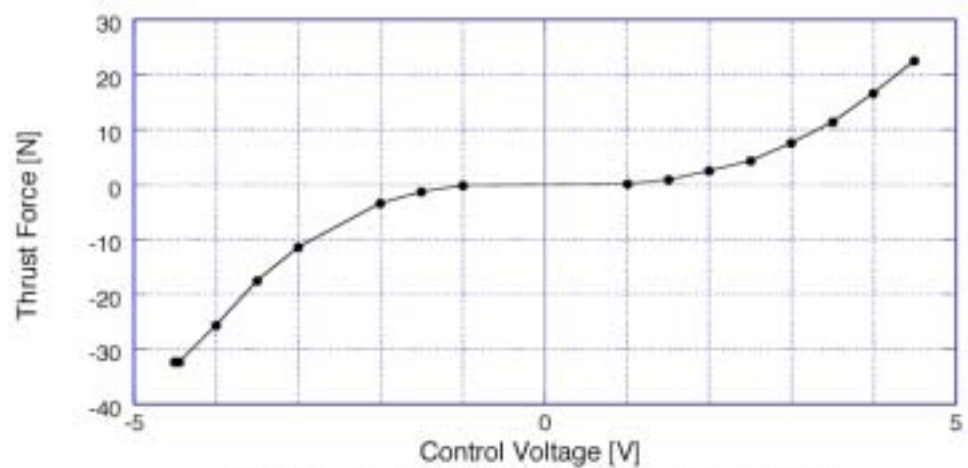


Fig. 6.11(c) 第2スラスト特性曲線（推力-電圧, 24V 電源）

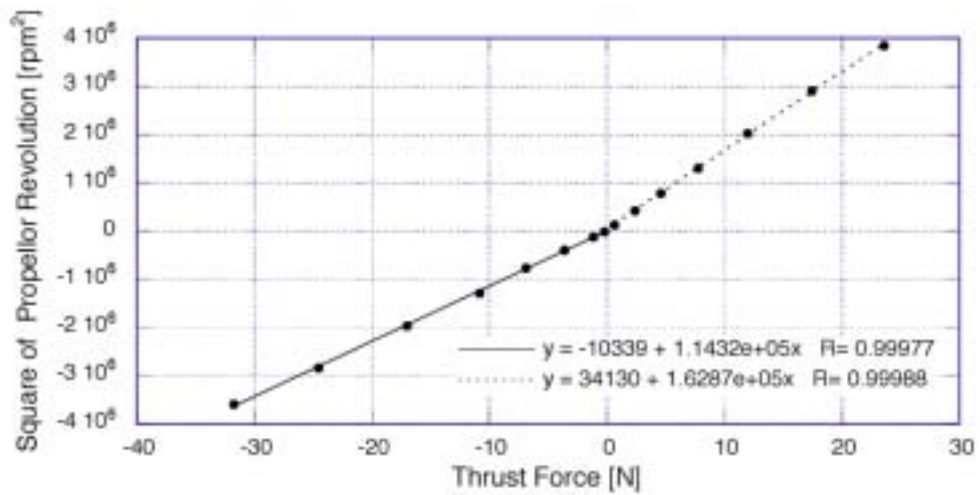


Fig. 6.12(a) 第3スラスト特性曲線（推力-回転数）

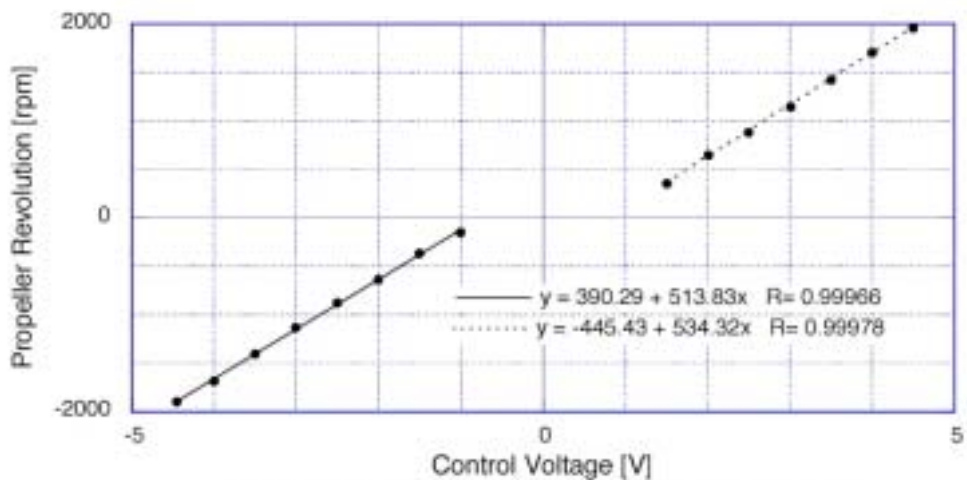


Fig. 6.12(b) 第3スラスト特性曲線（電圧-回転数）

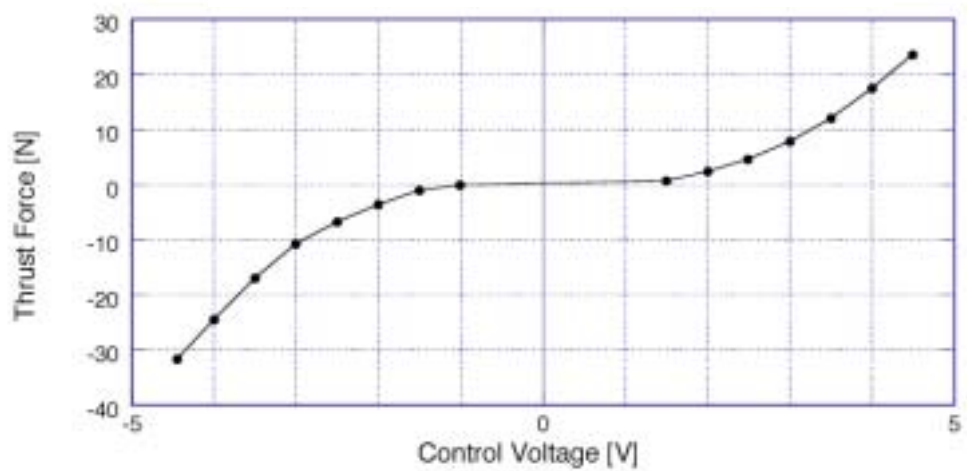


Fig. 6.12(c) 第3スラスト特性曲線（推力-電圧, 24V 電源）

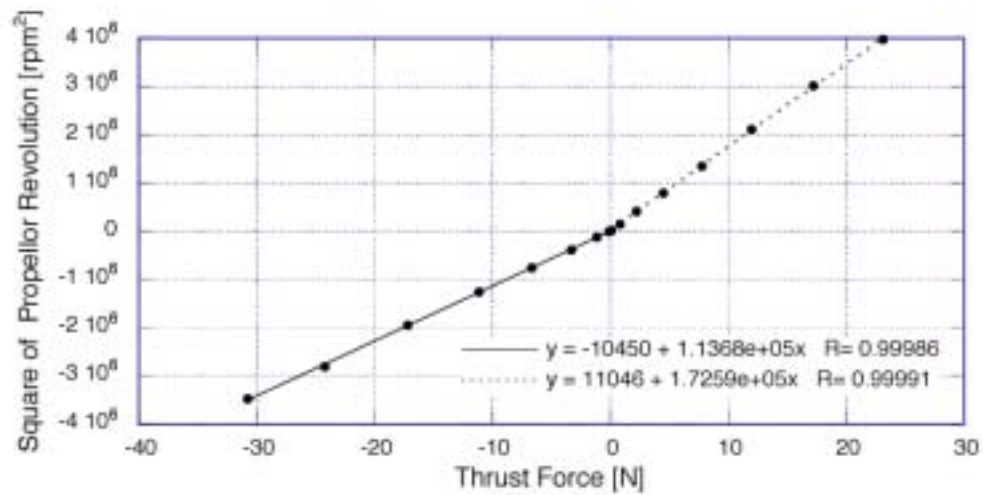


Fig. 6.13(a) 第4スラスト特性曲線（推力-回転数）

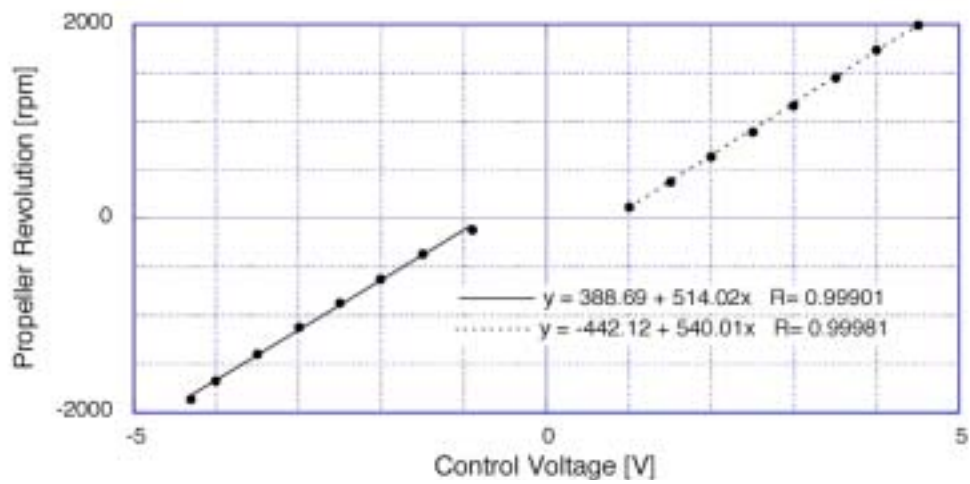


Fig. 6.13(b) 第4スラスト特性曲線（電圧-回転数）

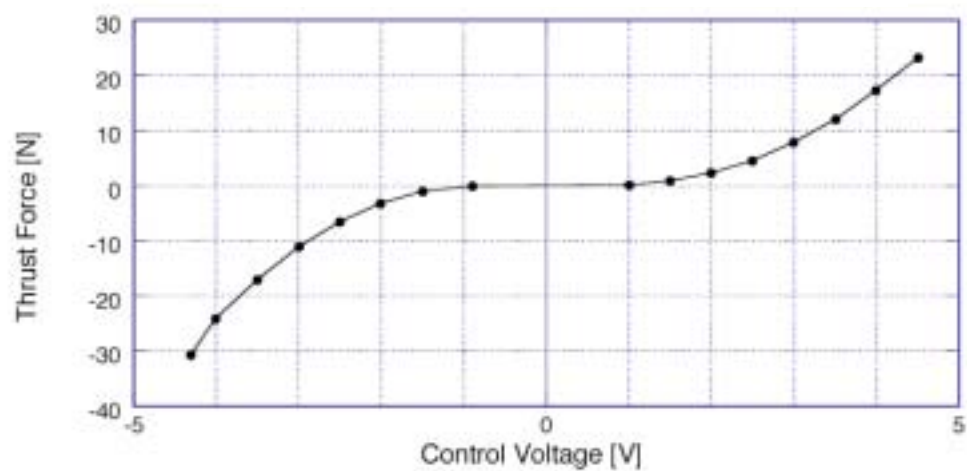


Fig. 6.13(c) 第4スラスト特性曲線（推力-電圧, 24V 電源）

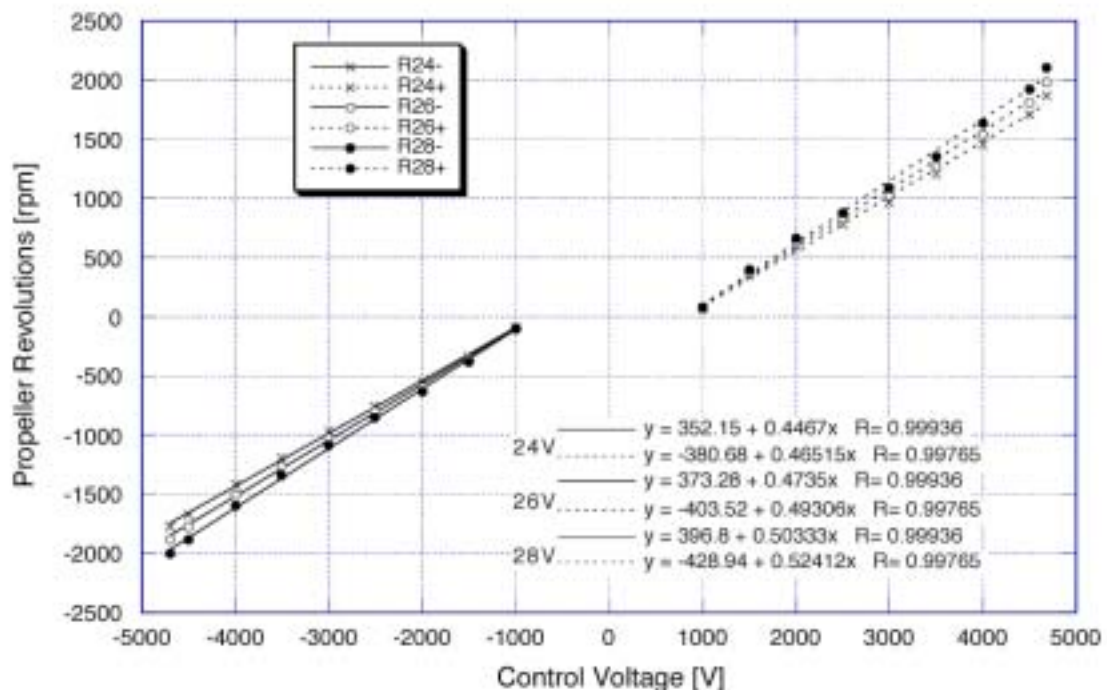


Fig. 6.14 第 1 スラスト特性曲線（電源電圧変動の影響）

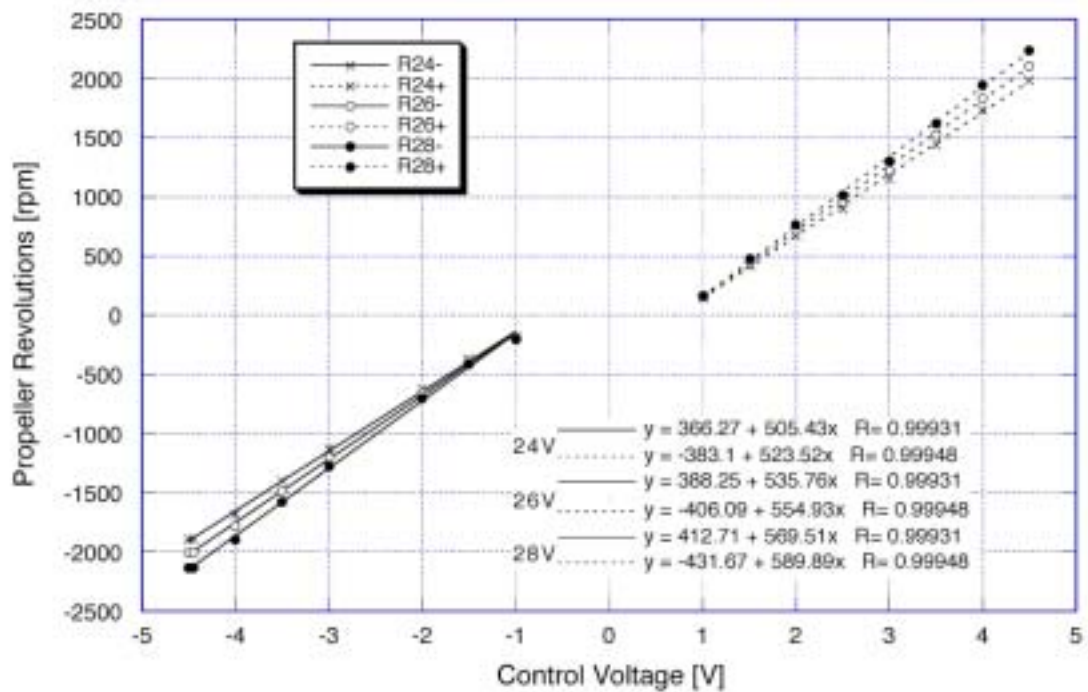


Fig. 6.15 第 2 スラスト特性曲線（電源電圧変動の影響）

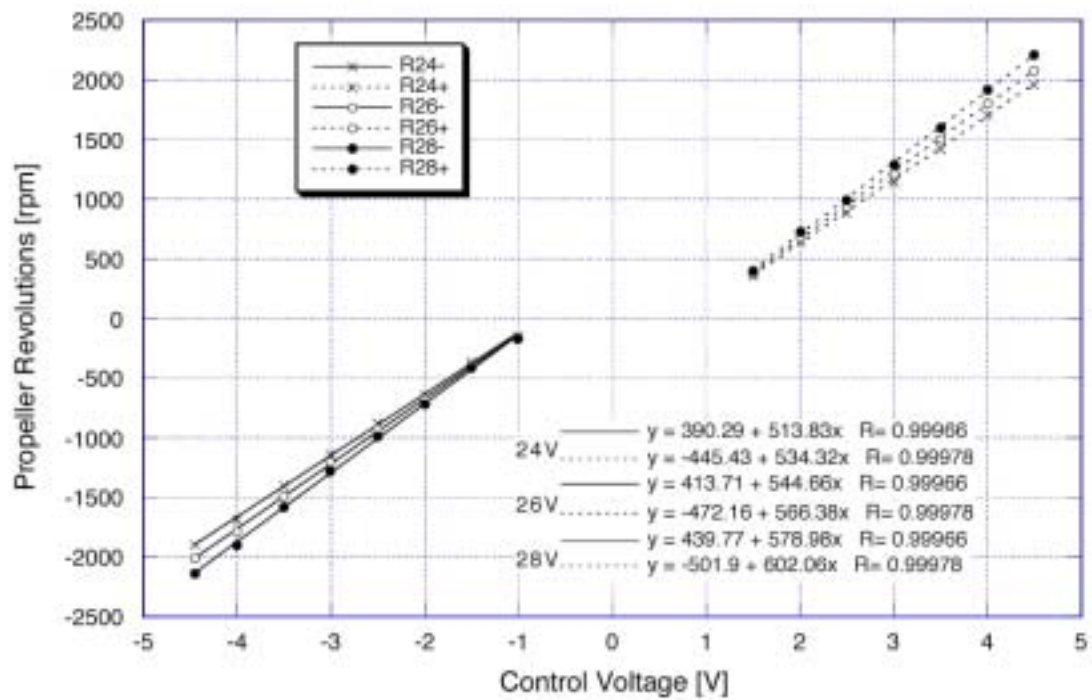


Fig. 6.16 第3スラスト特性曲線（電源電圧変動の影響）

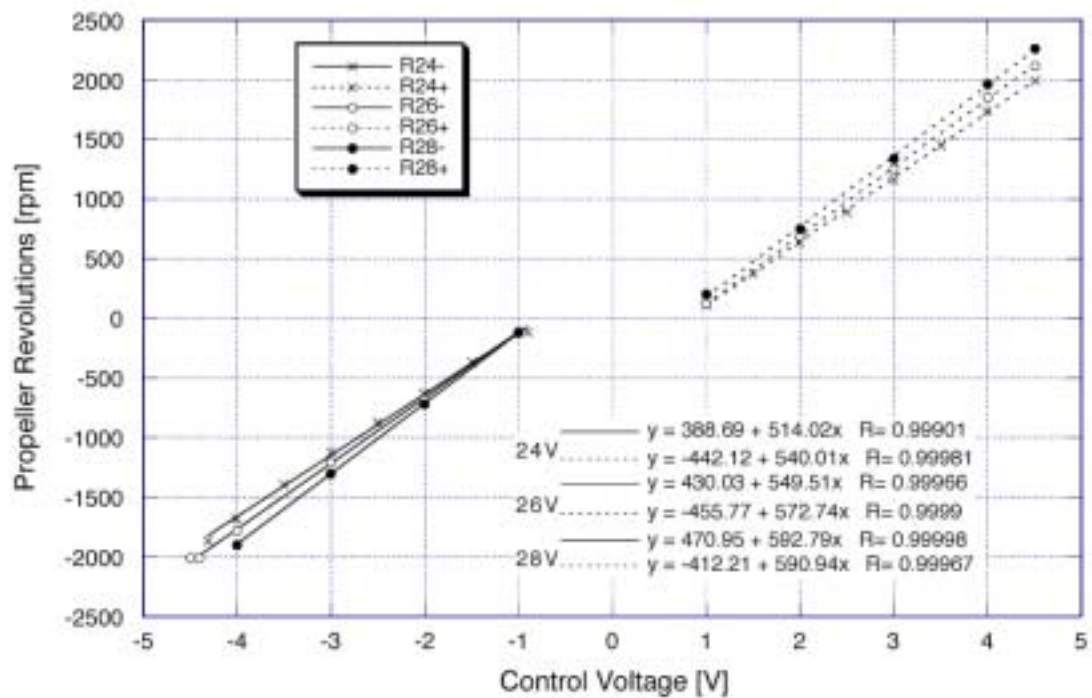
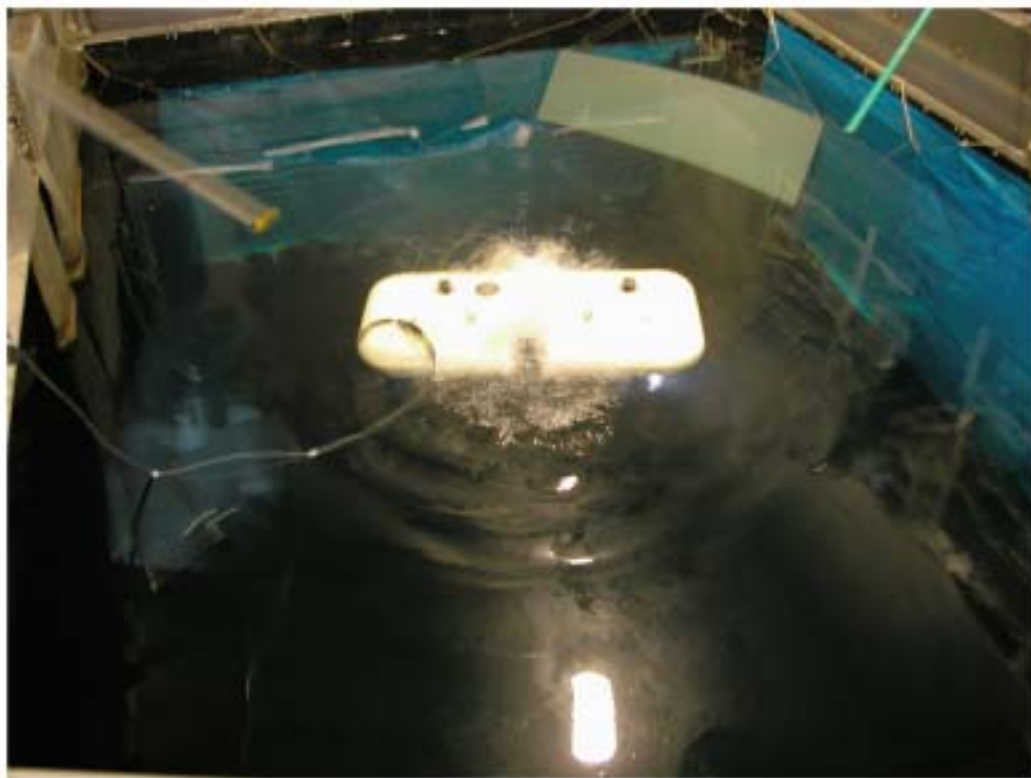


Fig. 6.17 第4スラスト特性曲線（電源電圧変動の影響）



(重量・重心調整)



(垂直スラスト試験)

Fig. 6.18 試運転状況

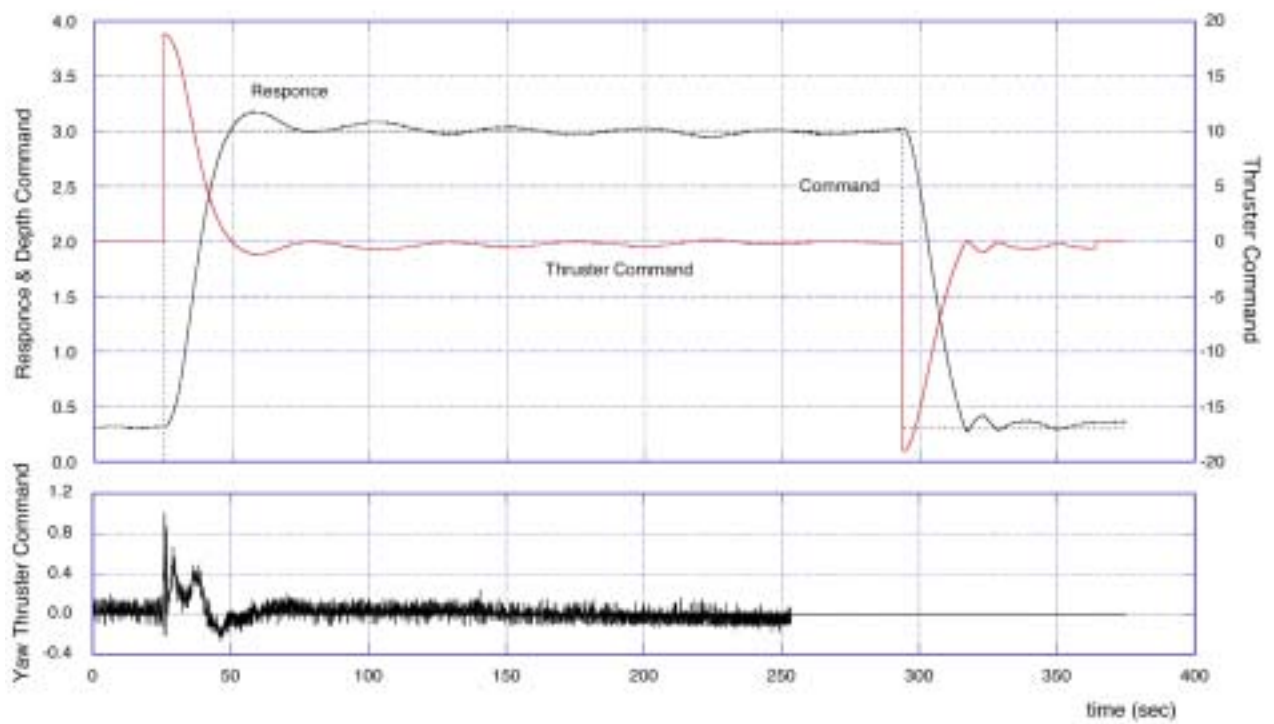


Fig. 6.19 フィードバック制御による上下揺れ応答

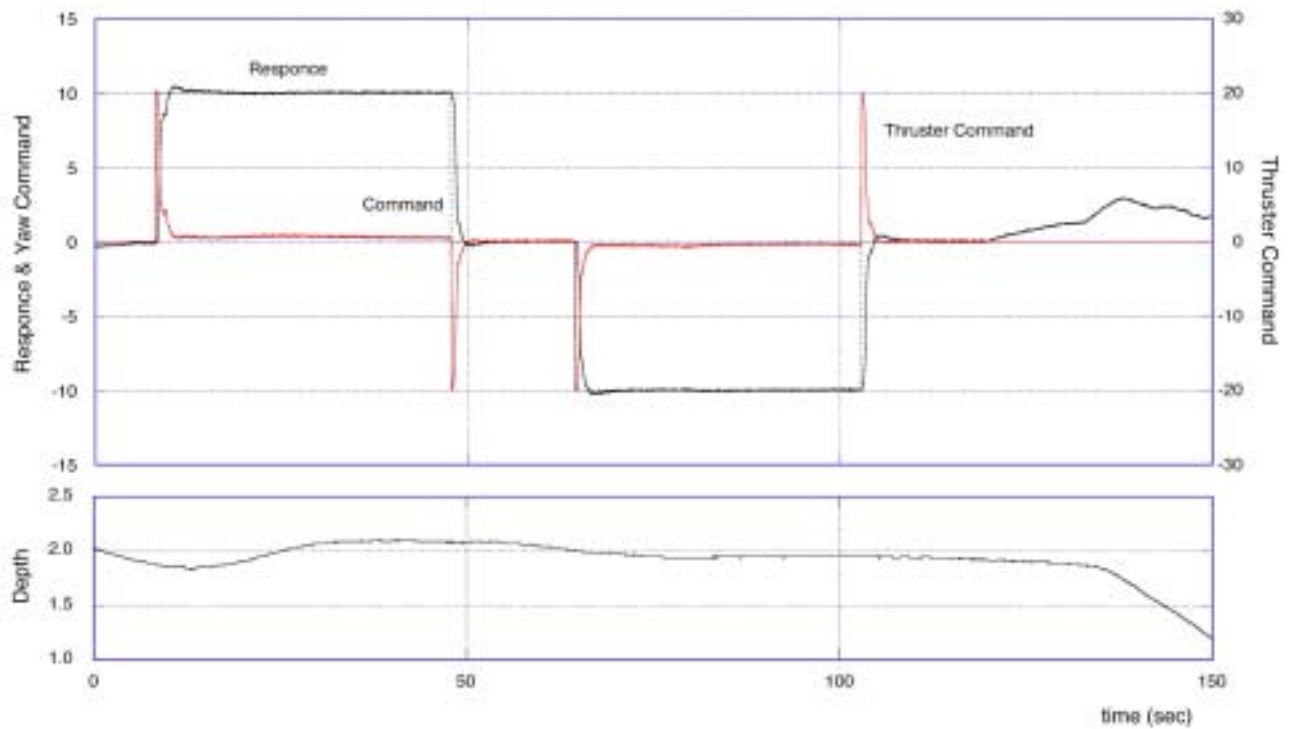


Fig. 6.20 フィードバック制御による船首揺れ応答

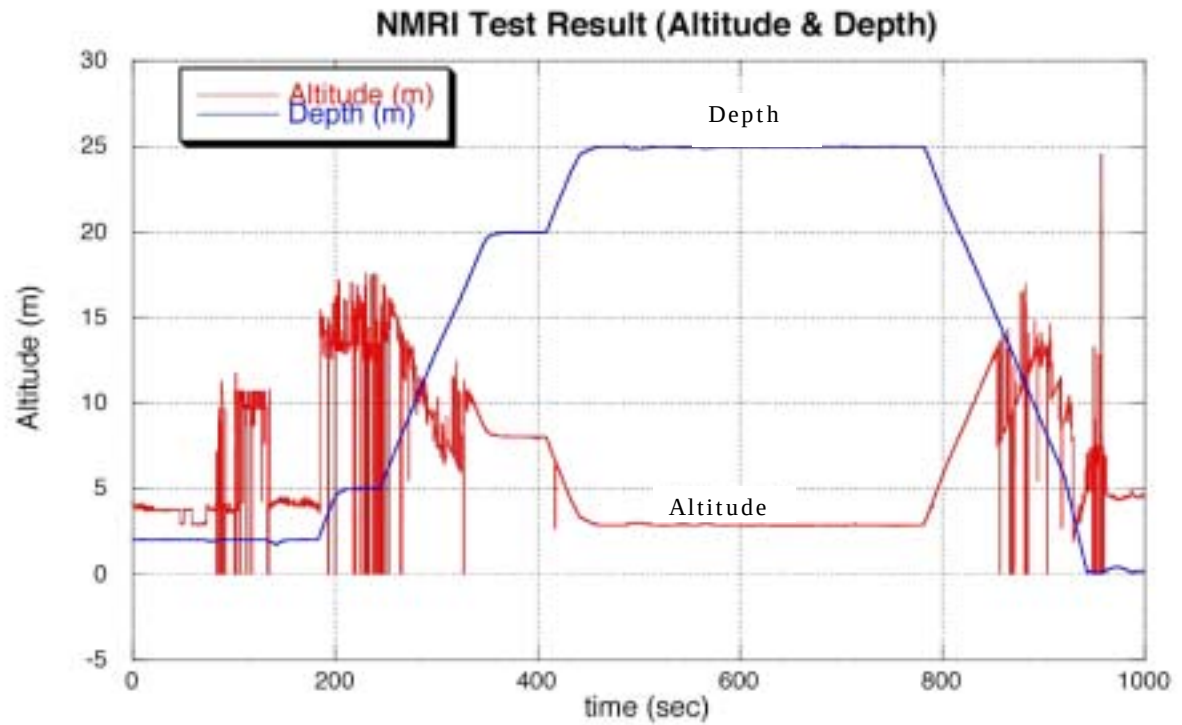


Fig. 6.21(a) 深度・高度データ

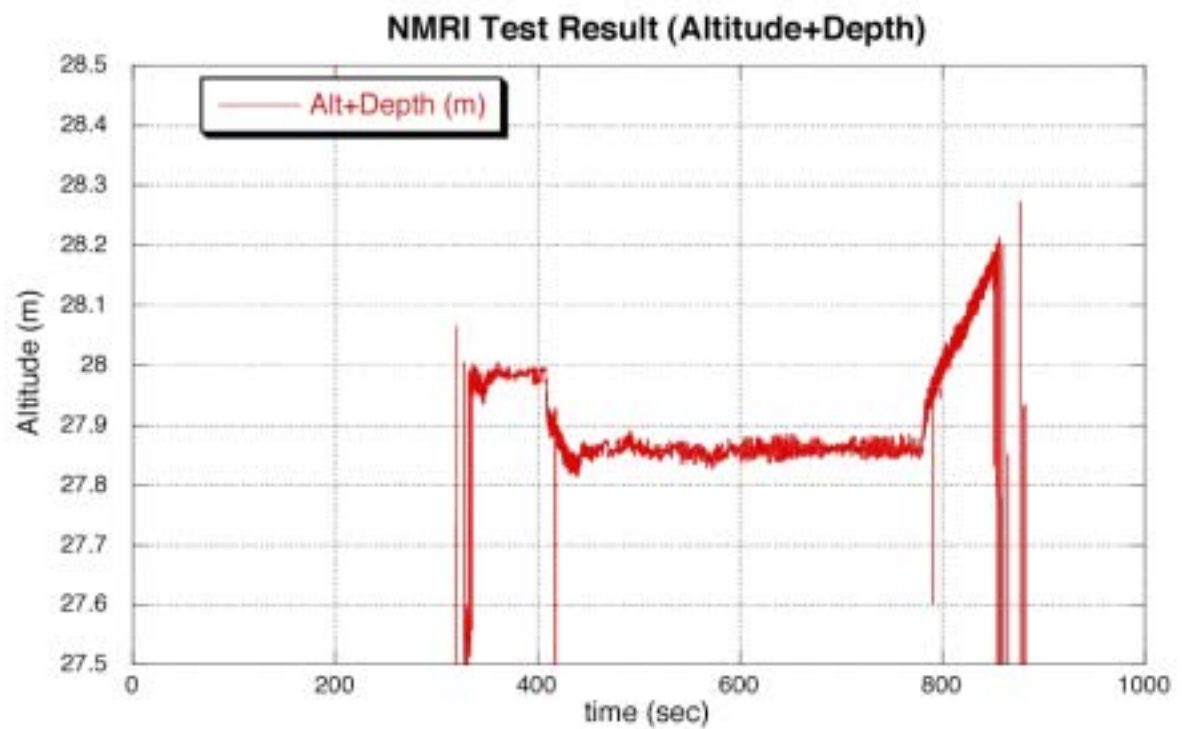


Fig. 6.21(b) 深度・高度データの和

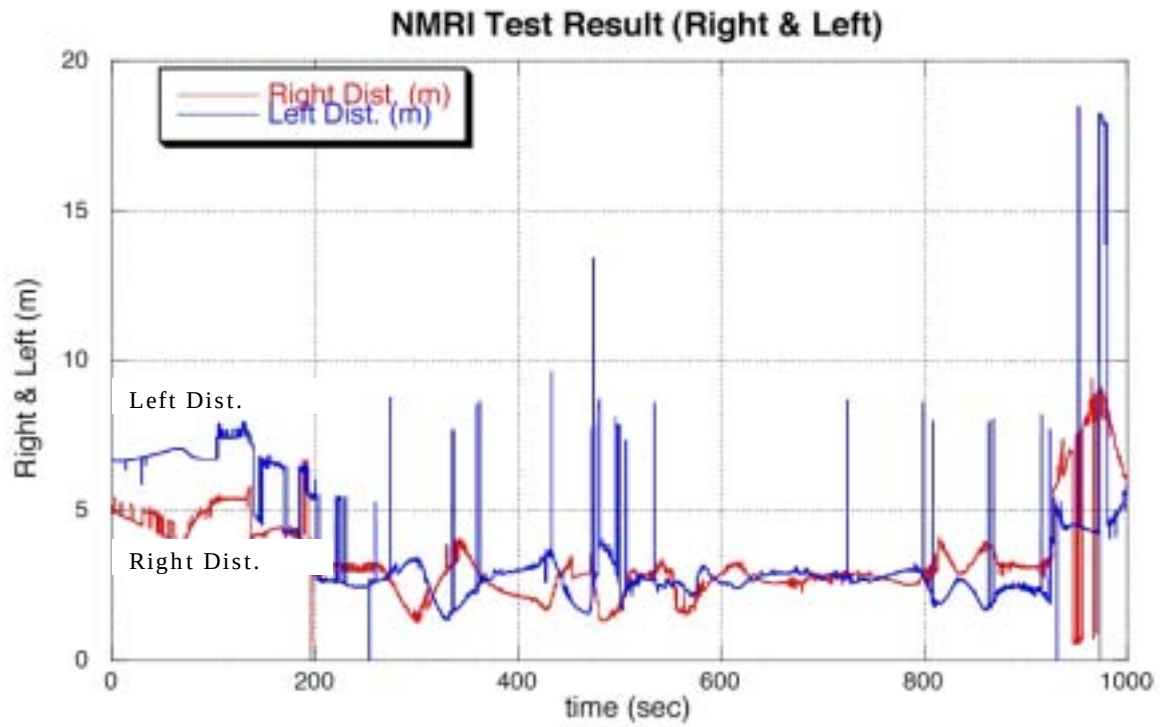


Fig. 6.22(a) 左右センサデータ

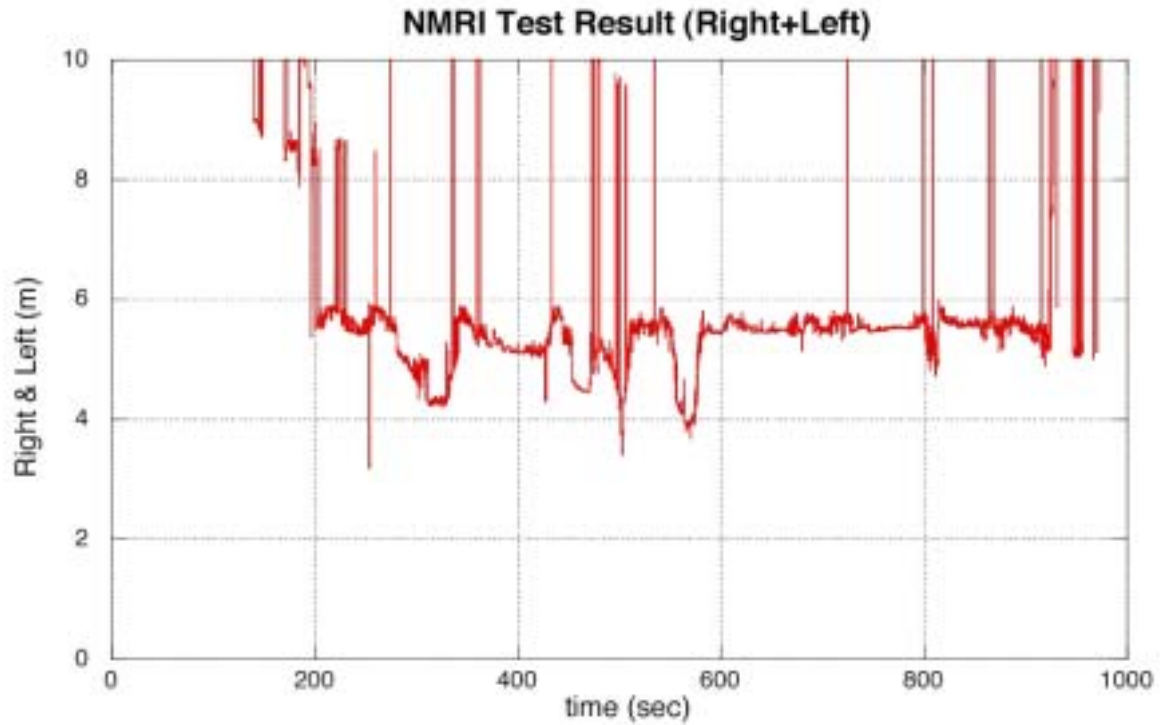


Fig. 6.22(b) 左右センサデータの和

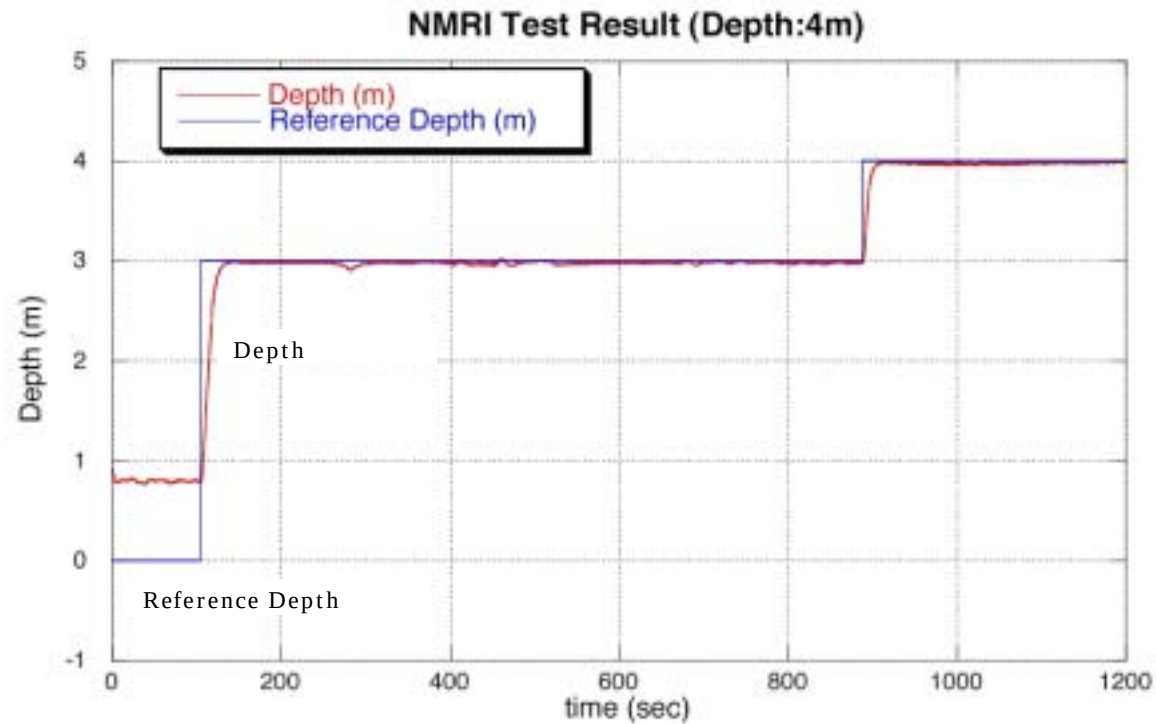


Fig. 6.23(a) 深度自動制御（4m）

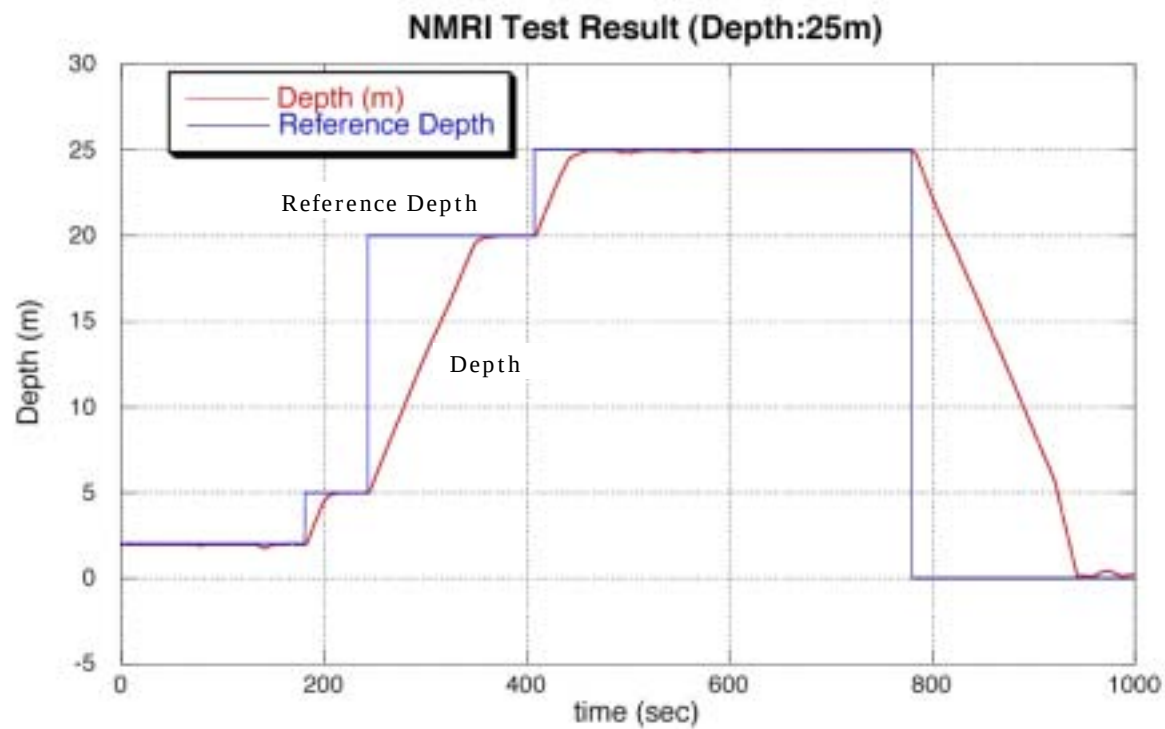


Fig. 6.23(b) 深度自動制御（25m）

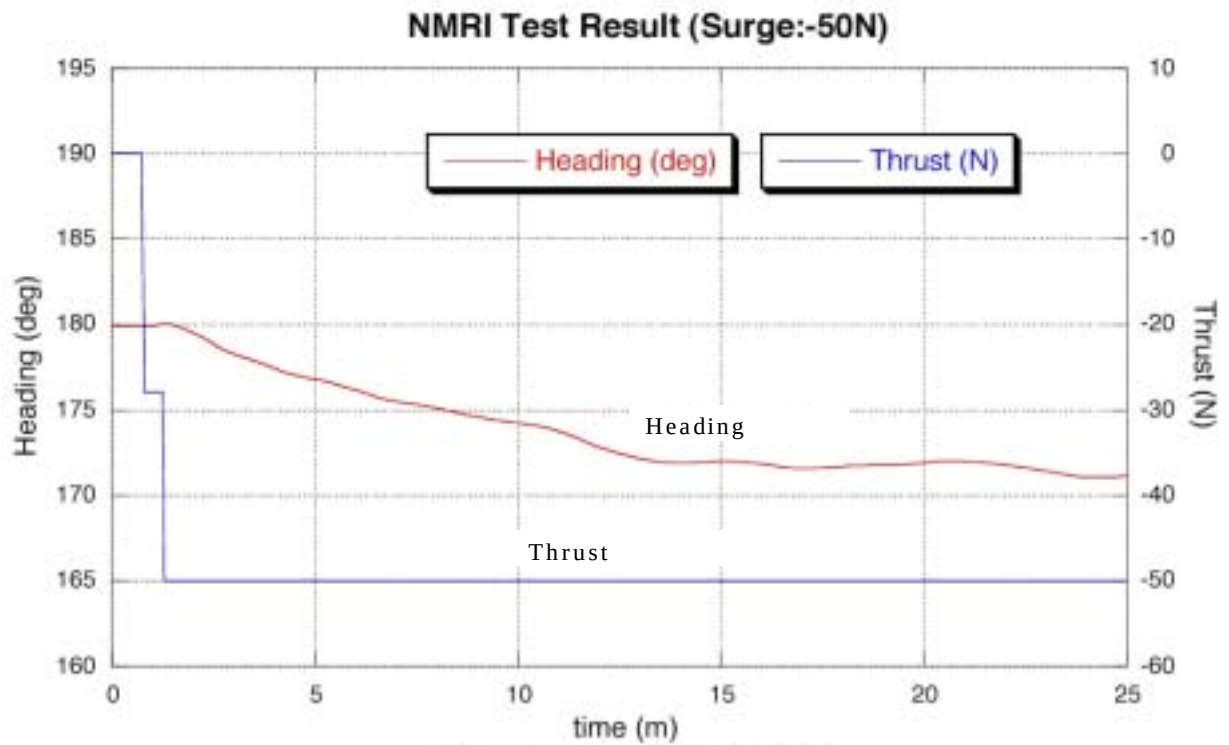


Fig. 6.24(a) 前進時方位制御

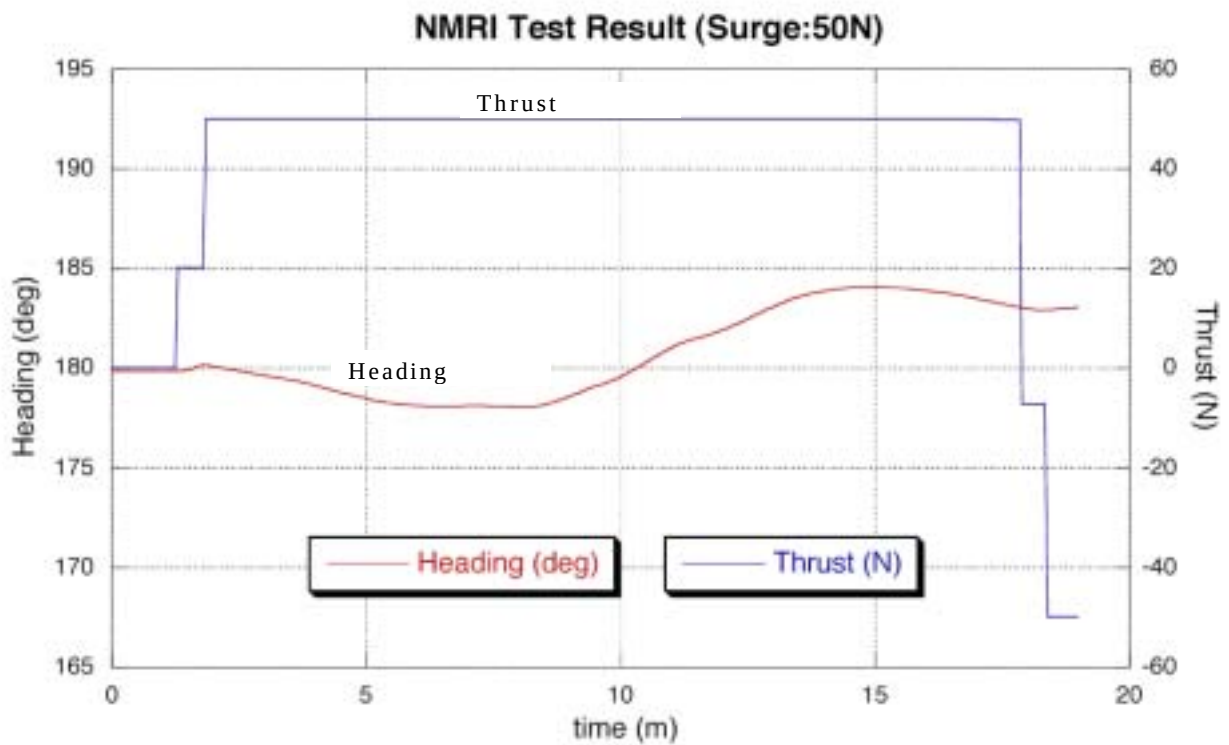


Fig. 6.24(b) 後進時方位制御



7. 結言

ROVとAUVの両者の特長を併せ持つ深海モニター用小型ロボットシステムの要素技術の開発研究を東京大学生産技術研究所海中工学研究センターと共同でおこなった。ビークルが索の制約を受けることなく、人間が画像情報によって必要な作業を判断しながら遠隔操縦でき、かつ軽量小型で機動性に富むシステムの実現を目標とした。開発要素は大きく分けて4つある。高速の画像伝送を可能とする音響通信装置の開発、重力で海底まで降下する際の効果的水平移動に適した中継機形状の設計、音響通信の時間遅れや障害物等による音響通信不能時のための自律機能の開発、全体システムの小型統合化である。

高速音響通信装置の開発においては、最大128kbits/sの通信速度を実現する装置を開発した。水槽での基本的な動作試験をおこなった後、30m程度の浅海で通信試験を行い、128kbits/sの通信が行えることを検証した。

中継機の効果的な水平移動に関しては、曳航実験結果に基づく降下運動の推定計算によって重心位置と浮心位置との距離が大きく影響をおよぼすことを明らかにした。そして、当初の形状を改良して異なる設計思想に基づいたひれ無し形状を提案し、理論計算によってその有効性を示すとともに、降下模型を用いた深海水槽における降下実験によって推定計算結果が正しいことを実証した。

通信時間差と通信速度の問題を含む環境下でビークルを遠隔操縦するため、ビークルの持つべき自律機能とオペレータによる遠隔操縦手法について検討した。オペレータはできるだけ単純な命令のみを与え、運動制御はビークルの自律機能に任せるという設計思想に基づいてソフトウェアを開発し、テストベッドを用いて機能の有効性を検証した。

深海モニター用小型ロボットシステムの軽量小型化を実現するための詳細設計をおこない、ビークルに関してはその設計に従って浅海域仕様のプロトタイプを実際に製作した。さらに、ビークルのプロトタイプにソフトウェアを搭載・調整の上、深海水槽で総合性能試験を実施しその基本性能を確認した。

本研究で開発され実海域や試験水槽あるいはプロトタイプの製作によって検証された技術はいずれも深海モニター用小型ロボットシステム実機製作のために不可欠の中核的要素と考えられる。今後、ビークルプロトタイプを用いた実海域実験等の研究開発をさらに進めることにより、深海モニター用小型ロボットシステム実機実現につなげていくことが期待される。

参考文献

- 1) 土屋明訳, "水中音響の原理", 共立出版
- 2) 村上, 海上, "情報・通信におけるデジタル信号処理", 昭晃堂
- 3) 小島, 白崎, "無索式水中ロボット用水中画像超音波伝送システムの開発", 日本造船学会海洋工学シンポジウム, No.13, pp.371-376, 1995.
- 4) 上野道雄, 沢田博史, "海中移動体に働く流体力に関する研究", 船舶技術研究所報告, 船舶技術研究所, 第30巻, 第1号, pp.1-41, 1993.
- 5) Ando, H., Tamura, K., Maeda, K. "Introduction of Deep-sea Basin in National Maritime Research Institute", Proceedings of Techno Ocean 2002, 2002.
- 6) 近藤 逸人, "自律型水中ロボットの観測行動に関する研究", 東京大学博士論文, 2001.
- 7) 藤井 輝夫, "海中ロボットの知的行動に関する研究", 東京大学博士論文, 1992.
- 8) 川崎 俊嗣, "航行型海中ロボットの運動制御に関する研究", 明治大学卒業論文, 2001.

発表論文等一覧

1. Ueno M., et al., On Descending Attitude of a Compact Deep-sea Monitoring Robot System, Proceedings of TechnoOcean2000, 2000.11.
2. 小島淳一ほか, 無索式水中ロボット用高速音響データ伝送システムの開発, 海洋工学シンポジウム講演集, 2001.7.
3. Ueno M., et al., An Analysis of Steady Descending Motion of a Launcher of a Compact Deep-sea Monitoring Robot System, Proceedings of Oceans2002, 2002. 10.
4. Ueno M., et al., Hydrodynamic Characteristics of a Launcher of a Compact Deep-sea Monitoring Robot System, Proceedings of Techno Ocean 2002, 2002.11.
5. 上野道雄ほか, 深海モニター用小型ロボットシステムの技術開発について, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 2002.6.
6. 伊藤譲ほか, 半遠隔式の簡易型ロボット開発, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演集, 2002.12.
7. 安藤裕友ほか, 深海モニター用小型ロボットシステムの模型実験, 海上技術安全研究所研究発表会講演集, 2003.6.
8. 上野道雄ほか, 深海ロボット中継機模型の降下運動計測実験, 第17回海洋工学シンポジウム論文集, 2003.7.
9. Ueno M., et al., Descending Motion of a Launcher of a Deep-sea Robot System, Proceedings of MCMC2003, 2003.9.

10. Ando H., et al., Model Experiment of a Launcher of a Compact Deep-Sea Monitoring Robot System, Proceedings of Oceans 2003, 2003.9.
11. 運輸省船舶技術研究所, 平成 11 年度海洋環境の画像によるモニタリングシステムの開発に関する調査報告書, 2000.3.
12. 海上技術安全研究所, 平成 12 年度深海モニター用小型ロボットシステムに関する調査報告書, 2001.3.
13. 海上技術安全研究所, 平成 13 年度モニター用小型ロボットの調査報告書, 2002.3.
14. 海上技術安全研究所, 平成 14 年度深海モニター用小型ロボットの調査報告書, 2003.3.