

無索無人潜水機運動制御 試験用機体の試作

狩野 芳治^{*1} 服部 陸男^{*1} 野本 昌夫^{*1}
高橋 賢一^{*1} 和田 一育^{*1} 野村 隆^{*2}

水中光源を検知して無人潜水機との相対位置を計測し、ビークルの六自由度位置姿勢制御を行う運動制御装置の性能確認用に無人潜水機を試作した。この機体には試験中でも運動制御プログラムを扱えるように運動制御装置の一部がなく、陸上に分離設置されている。両者間では双方向無線通信によりデータの伝送が行われ、機体の運動が制御される。この陸上に設置された運動制御装置を機体内に格納すれば、自律型無人潜水機となる。

ビークルには2個の光点位置検出センサ、磁方位センサ、3軸加速度センサ、3軸レートジャイロと圧力センサからなるセンサ類と運動制御装置、10個の鉛蓄電池、八基のスラスタとそのドライバ八基が搭載されている。

ビークルのセンサから得られたデータは無線モデムで陸上に送信され、陸上の運動制御装置はこのデータに基づきスラスタ制御データを出力する。ビークルはこのデータに基づき各スラスタを駆動し、運動制御をする。

キーワード：無索無人潜水機，運動制御，自律型無人潜水機，夢作 I，無人潜水機

An Experimental Cableless ROV for Testing the Six Degree of Freedom Motion Control

Yoshiharu KANO^{*3} Mutsuo HATTORI^{*3}
Masao NOMOTO^{*3} Ken-ichi TAKAHASHI^{*3}
Kazuyasu WADA^{*3} Takashi NOMURA^{*4}

A cableless remotelyoperated underwater vehicle system operated in model tanks was constructed for the characterisitic test of the six degrees of freedom mo-

*1 深海開発技術部

*2 日本飛行機株式会社

*3 Deep Sea Technology Department

*4 Japan Aircraft Mfg. Co., Ltd.

tion control system for remotely operated underwater vehicle (ROV). This motion control system controls the motion of an underwater vehicle by detecting the lamp located in water with two cameras and by calculating the distance and the direction from the vehicle to the lamp based on the output data from the cameras.

This vehicle systems is composed of the vehicle and a motion control unit placed beside the model tank. The vehicle and the controller communicate mutually by a set of wireless MODEM. The vehicle has two cameras, a fluxgate type direction sensor, three accelerometers, three angular velocimeters, a pressure gauge, ten lead acid batteries, an onboard control unit, eight thrusters and their drivers. The data obtained by sensors are sent to the motion control unit. The thruster control data are calculated by the motion control unit and sent back to the vehicle.

Key word : ROV, Cableless, AUV, Autonomous, PSD, Untethered, Motion control, MUSAC I

1 はじめに

無索無人潜水機六自由度位置姿勢制御をスラストを使って行う無人潜水機運動制御装置が日本飛行機株式会社との共同研究で開発された。この運動制御装置は、水中に設置された光源を2個の光点位置検出センサで検知して、この光源と潜水機の相対位置を算出し、この光源に対して潜水機を自動的に運動制御するもので、無人潜水機の運動制御装置として使用され、与えられた指令に基づき光源をもった水中物体に接近しドッキング後各種作業をすることも可能にする装置である。この作業には、ランチャー式無人潜水機のランチャーとビークルの自動結合、自律型無人潜水機の水中ステーションへの帰還或いは有人潜水調査船の救難時の救難索結合作業等が考えられる。

我々は、このような機能を持つ運動制御装置を開発するにあたり、運動制御試験のための試験用機体（以後、ビークルと称す。）を製作した。本報告では、この試験用ビークルの試作について、報告する。

2 ビークル基本仕様

本運動制御装置は、水中に設置された光源の発する光をビークルに取り付けられた光点位置検出センサで検知し演算処理することによって得られる光源に対するビークルの相対位置に加えて、ビー

クルの三軸加速度及びレート、深度、地磁気による方位のデータを運動制御プログラムに与え、ビークルの六自由度位置姿勢制御を行うシステムである。

運動制御装置を試験に供するために、次の条件を考慮した。

- ① 運動制御装置の核をなす運動制御プログラムは本来ビークル内に格納すべきであるが、試験中いつでも扱えるように、陸上に置く。
- ② いつでも簡単に運動制御プログラムをビークル内に移設できるようにしておく。
- ③ ビークルと陸上は、電波を使った通信によりデータの伝送を行う。

この結果、本ビークルに使用する運動制御装置は次のように計画された。まずビークルのセンサで得られたデータは、ビークル内の演算処理装置で物理量に変換され、電波に乗せて陸上に送信される。陸上では、受信したデータを運動制御プログラムにかけ、与えられた位置姿勢制御指令と比較して、スラスト制御信号を電波でビークルに送信する。ビークルは、このスラスト制御信号に従ってスラストを駆動する。これは、運動制御の1ループで、このループが高速で繰り返されて、実際の運動制御が行われる。

この装置の運動制御試験概要図を図1に示す。

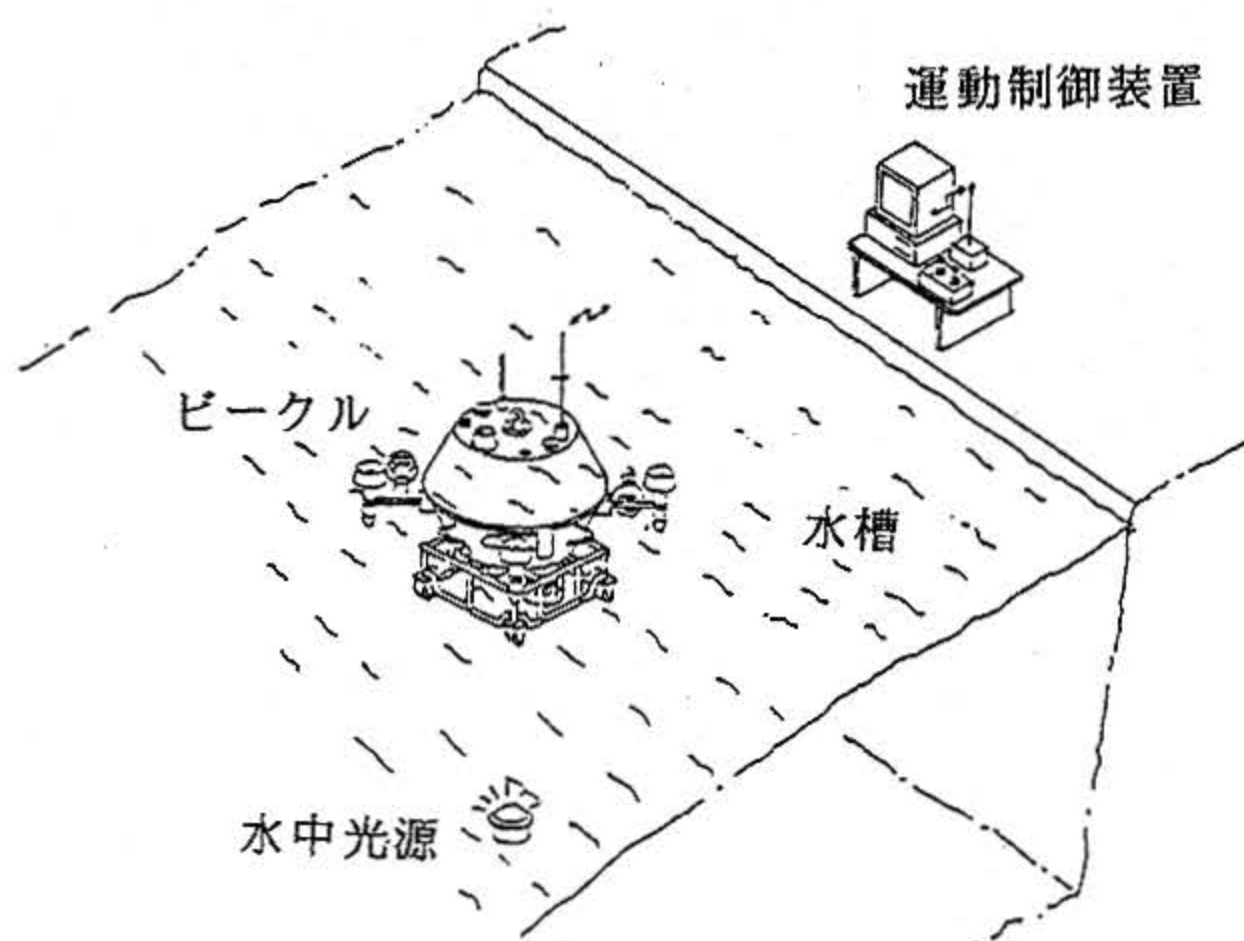


図 1 運動制御試験概要図

Fig. 1 The motion control test

2.2 設計基本方針

ビークルを設計するに当たって、基本性能をほぼ決定する以下の方針を設定した。

- ① ビークルは、無索式とする。
- ② 運動制御試験は、水中に容易に光源が設置でき、ビークルの運動状況も確認できるようにセンター内の水槽で実施する。そのため、設計深度は10mとする。
- ③ 動力源は蓄電池とし、ビークル内に格納する。
- ④ 機体形状は、水平運動、上下運動それぞれに対し非対称性が生じず、水の抵抗が小さくなる上下対象の円盤形状とする。
- ⑤ ロール、ピッチ運動については、ビークルの固有安定性を小さくするために、機器配置を十分考慮して、重心浮心間垂直距離をゼロに近付ける。
- ⑥ ビークルの構造は、搭載機器を格納する主容器と光点位置検出センサ（以後、PSDと称す）用容器で構成され、スラスト及びPSD以外の機器はすべて主容器に格納または取り付けられる。

3 ビークル構造及び機器

第2章で計画された基本仕様に基づき詳細に検討を加えた結果、構造は大きく分けてビークル主要機器を搭載する主容器、PSDを格納する2個のPSD用容器、スラスト取付用の4本のアーム及びビークル下部ガード兼格納台となる脚部で構成さ

れる。

ビークルの形状、主要目及び完成状態を各々図2、表1及び写真1に示す。

3.1 主容器

運動制御装置の主要部及び動力用蓄電池を格納する主容器の仕様は以下のとおりとする。

- ① 重量については、動力用蓄電池、運動制御ボックス、各種センサ及びスラストドライバ等を内蔵し、将来の機器追加装備にも耐えられるように、単体での水中重量を -160kgf とする。
- ② 形状は、流体抵抗特性の良い算盤玉型とする。
- ③ 容器の大きさから、削り出しは困難なので溶接構造とする。
- ④ 材質は、軽量なアルミ合金とし、安価で入手しやすく溶接性の良いA5081系とする。
- ⑤ 充電や機器調整で頻繁に容器を開閉する必要があるため容器は中央部で二分割とし、O-リングを挟んでV-バンドカップリングで締結する。
- ⑥ 容器内部には、動力用蓄電池を格納、固定する格納台を取り付ける。
- ⑦ 容器外面には、水平四方向にスラスト用の取付台を、下面にPSD用容器取付台を設けると同時に、必要箇所には各種センサ用の開口を施す。

以上の仕様を考慮して設計した結果、主容器の形状及びスカントリングは下記の通りである。

上部端水平面直径 (De) :	570mm ϕ
中央部水平面直径 (Dc) :	860mm ϕ
中央部嵌合面直径 (Db) :	850mm ϕ
高 さ (H) :	570mm
上下端水平面板厚 (Te) :	9.0mm
側 板 板 厚 (Ts) :	5.0mm
耐 圧 (P) :	1.0kg/cm ²
空 中 重 量 (Wa) :	47.8kg
水 中 重 量 (Wa) :	-184.0kg

3.2 PSD用容器

運動制御装置の主たるセンサであるPSDを格納するPSD用容器については、以下の仕様を設定する。

- ① PSD2基で三角測量の原理を用いて、水中光源

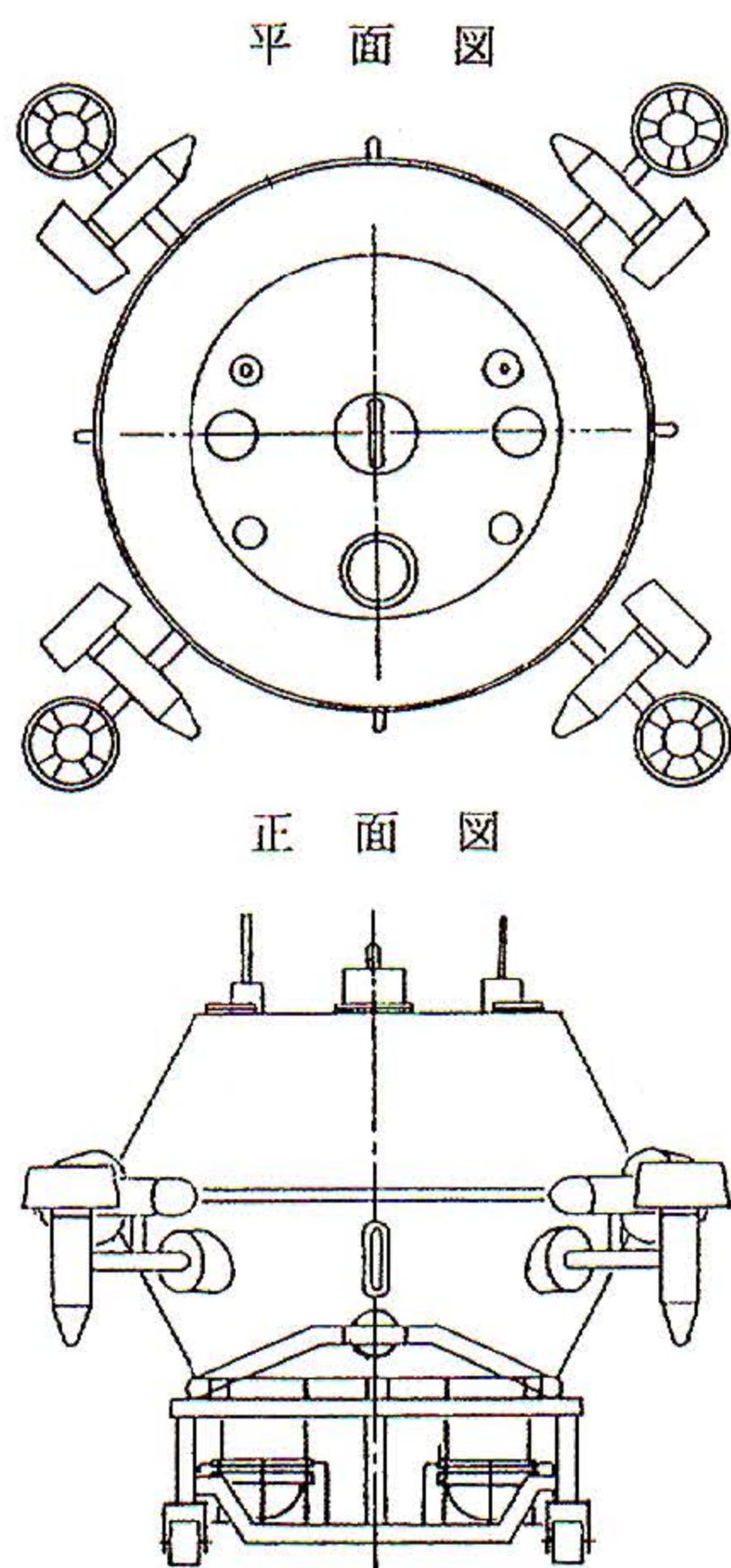


図 2 ビークル外観図
Fig. 2 Vehicle shape



写真 1 ビークル外観
Photo 1 Profile of the vehicle

表 1 ビークル主要目

Table 1 Principal demensions of the vehicle

1. 形状	
最大水平直径	: 1, 500 mm
最大深さ (除くアンテナ)	: 980 mm
垂直スラスト取付半径	: 680 mm
水平スラスト取付半径	: 530 mm
主容器水平直径	: 860 mm
“ 深さ	: 570 mm
2. 重量	
機体空中重量	: 255 kg
水中重量	: 1 kg
重心浮心垂直距離	: 40 mm
3. スラスト推力	
水平最大推力	: 15.8 kg
垂直下降最大推力	: 27.2 kg
垂直上昇最大推力	: 17.6 kg

との相対位置及び方位を計測するため、PSD間距離を自由に設定できるようにPSDを各々1個ずつ容器に格納する。

- ② 容器への取付けに関しても、2個のPSDを平行にできるように光軸調整機構を設ける。
- ③ 容器形状は円筒形とし、一端で固定する。他端には採光ポートを設ける。
- ④ 容器の採光ポートには半球形のアクリルポートを採用し、V-バンドカップリングとO-リングを用いて容器に固定する。
- ⑤ 耐圧が $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ と小さいため、電源及び信号ケーブルの接続には水中コネクタは用いず、ケーブルは主容器と接続されたゴムホース内を通す。

上記仕様を考慮して設計した結果、PSD容器の形状及びスカントリングは下記の通りである。

容器外径	(Do) :	130mmφ
容器長	(L) :	149mm
ポート嵌合部直径	(Db) :	160mmφ
アクリルポート半径	(Rp) :	65mmR
容器板厚	(Ts) :	3.5mm
耐圧	(P) :	$1.0\text{kg}/\text{cm}^2$
空中重量	(Wa) :	$1.25\text{kg}/\text{個}$
水中重量	(Ww) :	$-1.2\text{kg}/\text{個}$

3.3 スラスタアーム

上下、水平推進用としてカプラン型スラスタを各々4基ずつ配置し、上下推進用は上下進、ロール及びピッチ運動を、水平推進用は前後進、左右進及び旋回運動を担当するように計画されている。

スラスタ取付要領を決定するにはスラスタ配置が必要であるので、まずスラスタ配置から検討する。上下推進用については、ロール、ピッチ運動に対し同一の性能を持たせるため、ロール及びピッチモーメントを同等にする必要があり、そのためスラスタは重心を中心として水平面内正方形の四隅に1基ずつ配置する。また、水平推進用については、前進、後進、左進及び右進時の運動性能を同一にするため、四方向に同等の推進力を発生させる必要がある。後述するが、使用するスラスタは正転時と逆転時では最大推進力が異なることも考慮して、4基のスラスタはビークル前後軸と 45°

ずらした正方形の四隅に水平に配置して、各スラスタの発生推力を合成して前後、左右方向の推力を得るようにした。次に、スラスタアームの形状と構造は、 $24\text{mm}\square$ のアルミ合金製角棒の先端に上下推進用の、その内側には水平推進用のスラスタをホースバンドを使って取り付けるものとした。また、基部にはフランジを設け、図2を見ると判るように、ビークル前後軸を $\pm 45^\circ$ 水平面内で回転させた方向に、ボルトで主容器のスラスタ取付台に固定している。スラスタアームの要目は下記の通りである。

基部—上下推進用

スラスタ中心間距離 : 240mm

基部—水平推進用

スラスタ中心間距離 : 90mm

空中重量 : $1.2\text{kg}/\text{基}$

水中重量 : $0.5\text{kg}/\text{基}$

3.4 脚部

脚部は、水中ではビークル下部をガードするとともに、陸上ではビークル格納台として使用される。水中での試験中に不意のトラブルで下方に暴走して水底に衝突したり、陸上での格納時及び移動時のビークル重量による荷重が作用しても十分耐えられる強度を有している。また、脚部には移動のためのキャスターも4基取り付けられている。

構造は、外径 $27\text{mm}\phi$ のSUSパイプ製で、六面体形状のフレーム構造に溶接で組み上げられている。また、パイプはできるだけ多くの浮力を得るため、中空構造となっている。脚部の要目は以下の通りである。

高	さ :	300mm
長	さ :	約600mm
幅	:	約600mm
空中重量	:	27.0kg
水中重量	:	20.0kg

4 構造機器

第3章では、ビークルを形成する主たる構造を説明したが、ここではビークルを構成する各種機器について述べる。この各種機器はビークルに搭

載される運動制御装置、動力源及びスラストと陸上に設置される運動制御装置に大きく分類される。

4.1 運動制御装置（ビークル搭載部）

運動制御装置関係の搭載機器には、運動データを計測するセンサとデータを処理する演算処理部、通信装置及びスラストドライバがあり、ビークルの中枢部を構成している。

(1) センサ

センサには、PSD、磁方位センサ、三軸加速度センサ、三軸レートセンサ、圧力センサ及び近接センサがある。

(a) PSD

正式には、Position Sensitive Deviceと称し、半導体撮像素子上に照射された入射光の位置を検出するセンサである。この運動制御装置に使用したものは、二次元画素を走査して光スポットの位置を検出するタイプではなく、半導体表面におけるLateral Photo Effectを利用して光スポットの位置をX-Y座標電圧に変換し出力するタイプである。以下にPSDの要目を記す。

メーカ： 浜松ホトニクス (株)
製品型番： C1454Z-03
有効受光面サイズ： 10mm×10mm
出力信号： -5～+5V (X, Y)
電源： DC±15V
外形寸法： 90mmφ×55mm
重量： 300 g

(b) 磁方位センサ

このセンサは、ビークルの向いている方位を計測するもので、リングコアにコイルを巻いて外部磁界を検出するフラックスゲート方式のセンサ部と、センサ部からの出力信号を演算処理する信号処理回路、電源部、データ出力部及び表示部からなる信号変換器で構成されている。以下に、磁方位センサの要目を記す。

メーカ： 東京計器 (株)
製品型番： MASS-50
方位精度： ±1.5°
分解能： 0.1°
出力： RS232C シリアル出力

方位角表示： KED 3桁表示

電源： DC24V

外形寸法： 50mmφ×50mm (センサ)
154mmL×100mmB×
60mmH (信号変換器)

重量： 0.35kg (センサ)
1.00kg (信号変換器)

(c) 加速度センサ

これは、ビークルのXYZ軸方向の運動加速度を検出するもので、この運動制御装置ではサーボ付きで増幅器を内蔵したタイプを使用している。また、三軸方向が互いに直行状態を保持できるように、慣性センサブロックに三軸とも固定されて一体となっている。以下に加速度センサの要目を示す。

メーカ： 日本航空電子 (株)
製品型番： JA-5VB2
方位精度： ±1G
感度： 10V/G ±3%
直線性： 0.01%F. S.
分解能： 1×10⁻⁶G以下
周波数応答： DC～500Hz
電源： DC±12V～±18V
外形寸法： 30mmφ×43mm
重量： 80 g 以下/基

(d) レートセンサ

これは、ビークルのXYZ軸回りの運動角速度を検出するもので、この運動制御装置ではガスレートセンサを使用している。このセンサも加速度センサが取り付けられている慣性センサブロックに固定されている。以下に、レートセンサの要目を示す。

メーカ： 多摩川精機 (株)
製品型番： TA7033N1
最大測定範囲： ±100°/S
感度： 50±5mV/°/S 以内
直線性： F. S. ±1% 以内
電源： DC±15V
重量： 80 g 以下

(e) 圧力センサ

これはビークルの深度を検出するもので、歪ゲージ式の圧力センサを使用している。以下に、圧力センサの要目を示す。

メーカー： 共和電業 (株)
製品型番： PGM-2KC
最大測定範囲： 2kg/cm²
定格出力： 0.6mV/V以上
(1200×10⁻⁶ひずみ)
非直線性： 1.5%RO
印加電圧： 2V
重量： 約140g

(f) 近接センサ

これは、演算処理部のメモリーボードのメモリーを開放する時に用いられる。物体を検知部に近付くとスイッチが入り、遠ざけると切れる型式のものである。以下に、その要目を印す。

メーカー： オムロン (株)
方式： 電磁タイプ
検知距離： 2mm
形状寸法： 12mmφ×25mm

2) 演算処理部

これは、ビークルの頭脳にあたる部分で、各々、マスター、スレーブと称される二個のCPUを中心に、各種センサー、通信装置及びスラストドライバとのインターフェースを行うフィルタ、増幅器、A/D変換器、D/A変換器、割り込みコントローラ、シリアル及びパラレルインターフェイスと、メモリーボードで構成され、制御ボックスと呼ばれる一つの筐体にまとめて格納されている。信号系統については、次の第5章で説明し、ここでは総称している制御ボックスについて、以下にその要目を記す。

外形寸法： 300mmL×400mmB×200mmH
重量： 11.1kg

3) 通信装置

ビークル搭載の運動制御装置と陸上の運動制御

装置間のデータ通信を担当しており、制御ボックスに格納された無線モデムとアンテナで構成される。制御ボックス内のシリアルインターフェイスより出力される信号を電波に乗せて発信し、陸上から送られる電波を受信してデータに変換しシリアルインターフェイスに入力する処理を行っている。以下に、その要目を記す。

型式： 双方向無線モデム
送受信周波数： 130MHz
伝送データ形式： RS232C
伝送速度： 9600BAUD

(4) スラストドライバ

スラストに供給される電力を運動制御部の司令に基づいて制御し、スラスト推力をコントロールする電気回路である。動力用蓄電池から供給される電力をマスターCPUから与えられるPWMの信号によりスラストに供給される電力を制御するFETアンプと極性を正逆切り変えるリレーユニットで構成され、スラストの数だけ計8組設けられる。

4.2 運動制御装置（陸上設置部）

陸上に設置される運動制御装置は、運動制御を行うパーソナルコンピュータ、運動制御プログラムを格納するハードディスク、制御指令を与えるジョイスティックとその指令デジタル信号に変換するA/D変換器、ファイル操作時や表示操作に用いるキーボード、ビークルの運動状況や制御指令値を表示するカラーディスプレイ及び通信装置の無線モデムとアンテナから構成されている。

(1) パーソナルコンピュータ

ビークルから送られてくる各種のセンサデータと制御指令値に基づいてスラスト制御データを作成し無線モデムに出力する作業を主として行っている。

本機には、16ビットCPUを使った市販品の日本電気(株)製PC9801VX21を使用している。

(2) ハードディスク装置

運動制御装置の外部記憶装置で、運動制御プログラムを常に格納しており、運動制御装置の機動時にこの装置から陸上及びビークルの運動制御装置にロードされる。また、機器単体試験時の取得

データ等の格納にも用いられている。本装置の容量は40MBである。

(3) ジョイスティックとA/D変換器

運動制御装置に体し、六自由度の位置姿勢制御指令を与えるマンマシンインターフェイスユニットである。このジョイスティックから出力された指令データは次にA/D変換器によりアナログ信号から12ビットデジタル信号に変換され、運動制御装置に出力される。

(3) キーボード

運動制御装置を起ち上げる時やプログラム等を操作するときに使用するマンマシンインターフェイスユニットであり、パーソナルコンピュータに付属しているものを使用している。

(4) カラーディスプレイ

ビークルの運動状況や制御指令値等を図示または表示する装置である。

(5) 通信装置

ビークルの通信装置に用いられているものと同じもので、ビークルとのデータの送受信を行っている。

4.3 動力源

ビークルが運動するために必要なエネルギーとしてビークル内に動力源を持っており、スラスタを駆動する動力用と運動制御装置に供給される制御用に大きく分けられる。ここでは、蓄電池容量については、スラスタ稼働率を15%と仮定して連続8時間ビークルを運動させ得ることを考慮して決定した。以下に、使用した蓄電池の要目を記す。

メーカー : 松下電池工業 (株)
製品型番 : LCR12V24
容量 : DC12V×24Ah
外形寸法 : 175mmL×165mmB×125mmH
重量 : 8.5kg/個

(1) 動力用電源

スラスタ駆動用のため出力電圧はスラスタの仕様に合わせる必要があり、上記蓄電池を直列に8個接続してDC96Vを得ている。また、各蓄電池の+端子には回路の短絡時の保護用に20Aのヒューズを取り付けている。

(2) 制御用電源

運動制御装置用として上記蓄電池を直列に2個接続し、DC24V×24Ahの電源を確保している。また、蓄電池の保護のため、動力用電源と同様に+端子に20Aのヒューズを設けている。

4.3 スラスタ

前述したように、スラスタは、上下推進用、水平推進用に各々4基ずつ計8基使用されており、専用スラスタとして新たに開発せず市販品を購入した。以下に、その要目を示す。

メーカー : 三井造船 (株)
モータ形式 : 希土類永久磁石直流電動機
軸シール形式 : メカニカルシール
推力 : 5kg以上(ボラードプル状態)
プロペラ径 : 120mmφ
モータ出力 : 170W
モータ回転数 : -2000~+2000rpm(可逆)

入力電圧 : DC±95V
入力電流 : 2.5A
外形寸法 : 146.8mmφ (ノズル外径)
57.0mmφ (モータ部外径)
空中重量 : 1.93kg
水中重量 : 1.17kg

5 電気系統

運動制御装置関連の信号の流れを示す制御系統のビークル搭載部及び陸上部を各々図3、図4に示す。運動制御装置のデータは以下の要領で処理される。

まず、ビークルを運動させる前に陸上のハードディスクに記録されているプログラムをパーソナルコンピュータにロードし、さらにその一部を無線モデムでビークルへ送信する。ビークル側は、これを受信してマスターCPUにロードし起動させる。これで準備が完了する。プログラムが起動すると、まずビークルのセンサ(PSD、磁方位センサ、加速度センサ、レートセンサ及び圧力センサ)の検知したデータが制御ボックスへ送られる。制御ボックスでは、圧力センサのデータは増幅器で定格値まで増幅され、他のセンサのデータはローパスフィルタにかけられてA/D変換器に送られ、アナログデータからデジタルデータに変換されて

マスターCPUに出力される。マスターCPUでは、これらのデータをプログラムで演算処理し、スレーブCPU、シリアルインターフェイス、無線モデムを介して陸上へ送信する。陸上では、コンピュータで受信したデータを基に、ジョイスティックにより予め与えられている指令値と比較演算して、各スラスタの制御データを作成し、無線モデムを

介して送信する。ビークルでは、無線モデム、シリアルインターフェイス、スレーブCPUを介して受信されたスラスタ制御データを、マスターCPUでPWM信号に変換し、パラレルインターフェイスを介してスラスタドライバに出力する。最後にスラスタが制御データに基づき推力を発生させる。運動制御の1ループには約0.3秒かかり、このル

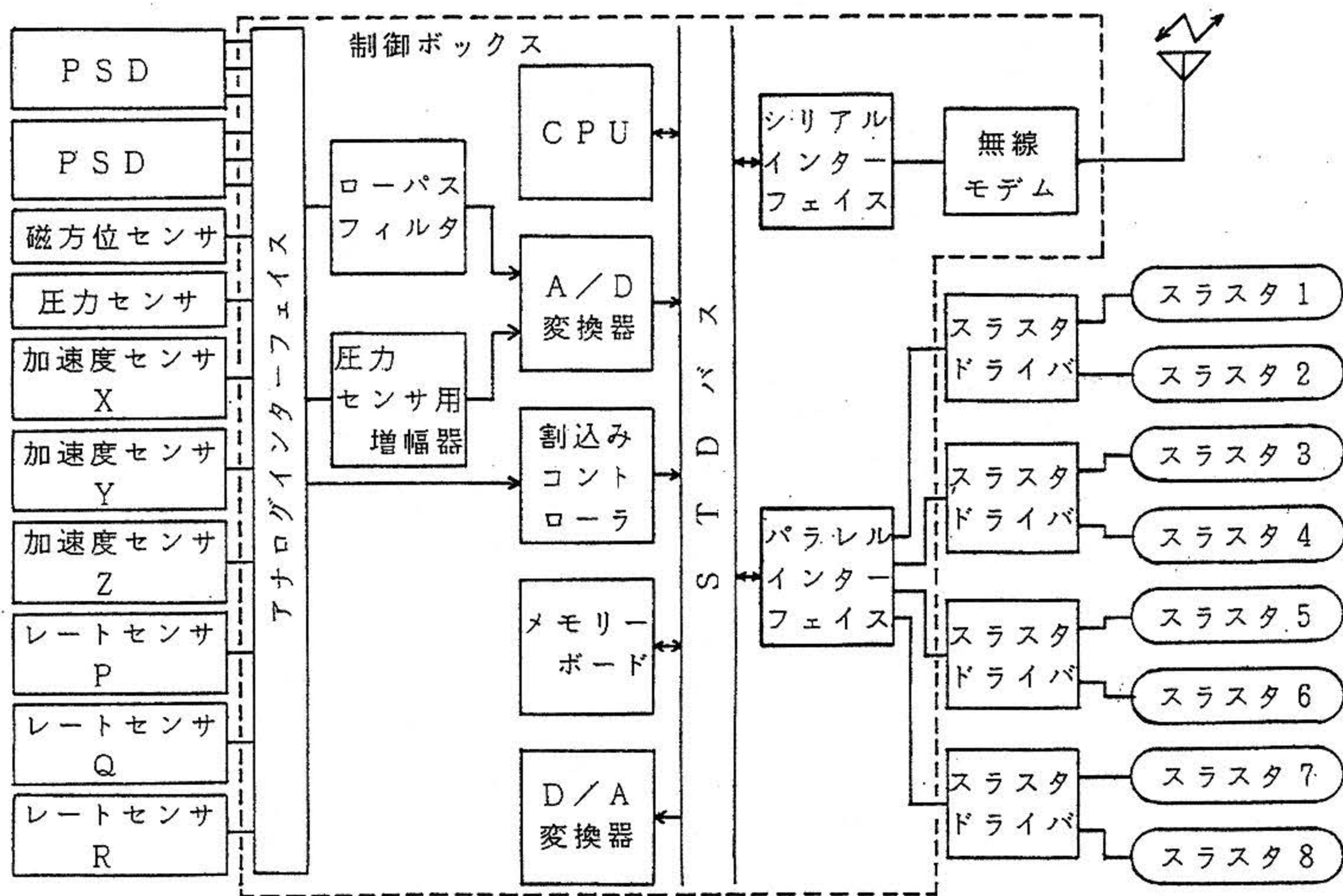


図 3 制御系統図 (ビークル搭載部)
Fig. 3 Electric diagram of the motion control system (in vehicle)

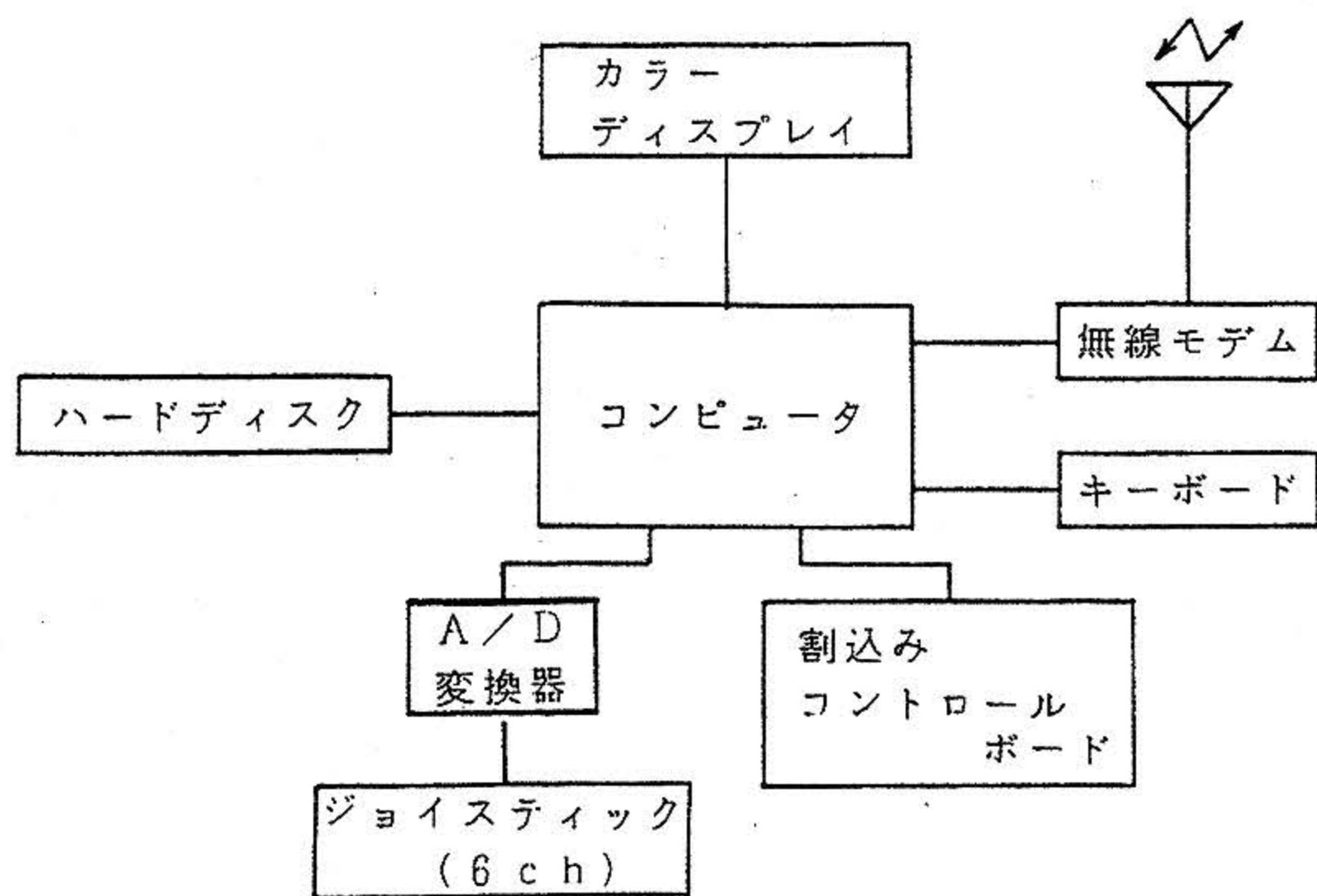


図 4 制御系統図 (陸上部)
Fig. 4 Electric diagram of the motion control system (at pool side)

プが繰り返されて、実際のビークル運動制御が行われる。

5.2 動力系統

スラスト、運動制御装置に供給される動力系統を図5に示す。

スラスト駆動用動力源はDC96Vの直流電源で、蓄電池から直接スラストドライバに送られ、スラスト制御指令に基づき動力制御されてスラストへ供給される。

制御用動力源はDC24Vの直流電源で、近接センサを使ったスイッチを介して直接制御ボックスへ送られる。制御ボックスでは、DC24V以外に

DC-DコンバータでDC±15V、DC±5V及びDC±2Vの各種電源がつくられ、各センサや演算処理部及び通信装置へ供給される。

6 機器配置、取付防水要領と保守性

6.1 機器配置と取付防水要領

次に、各種機器をビークルに搭載する際に、ほとんどの機器が非防水性のため主容器またはPSD容器内に配置する必要がある。機器配置を分かりやすく示すために、主容器断面図を図6に示す。

まず、配置に対する基本的な方針としては、各センサはセンサの性能が十分発揮できる位置に優

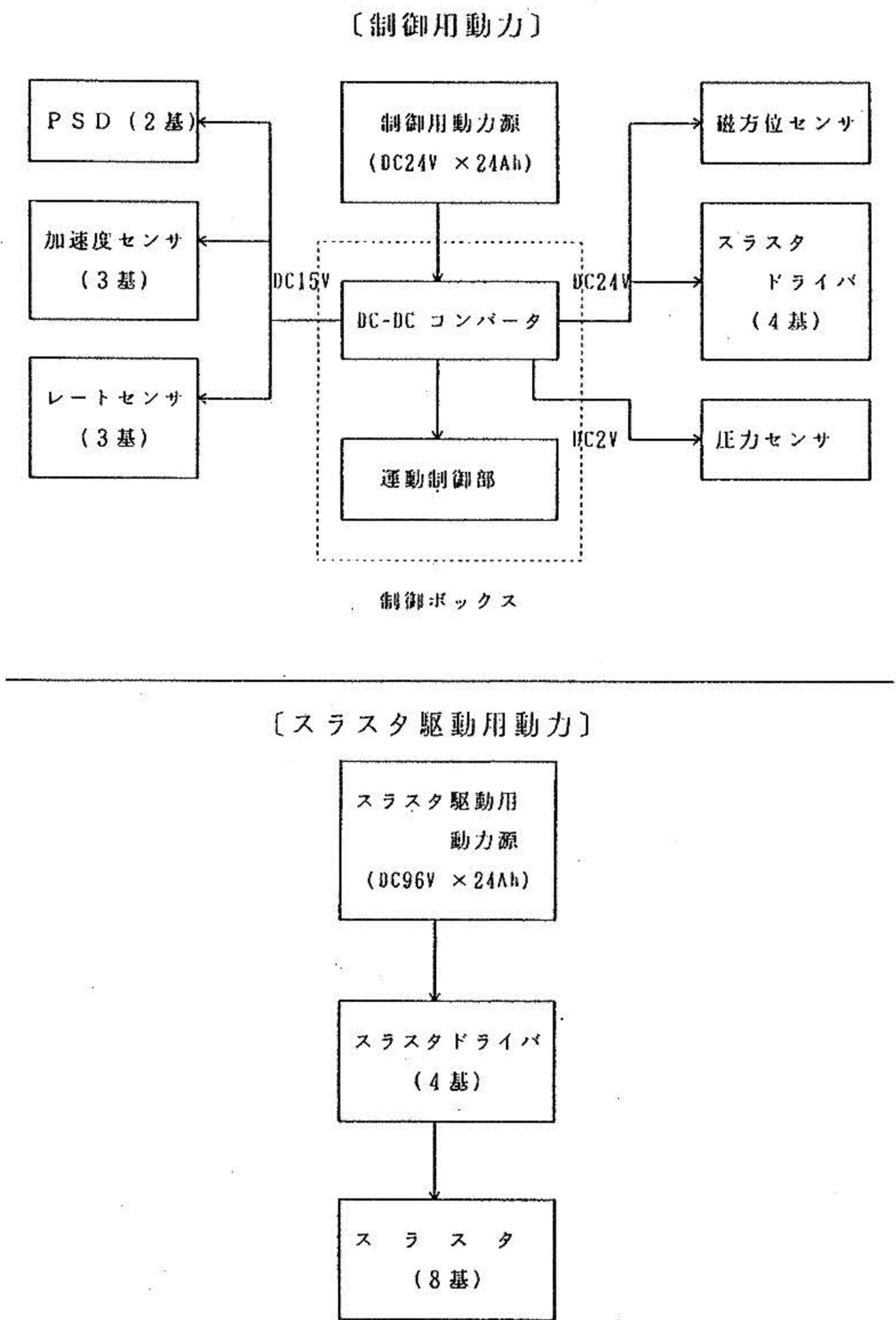


図 5 動力系統図

Fig. 5 Electric diagram of the power source

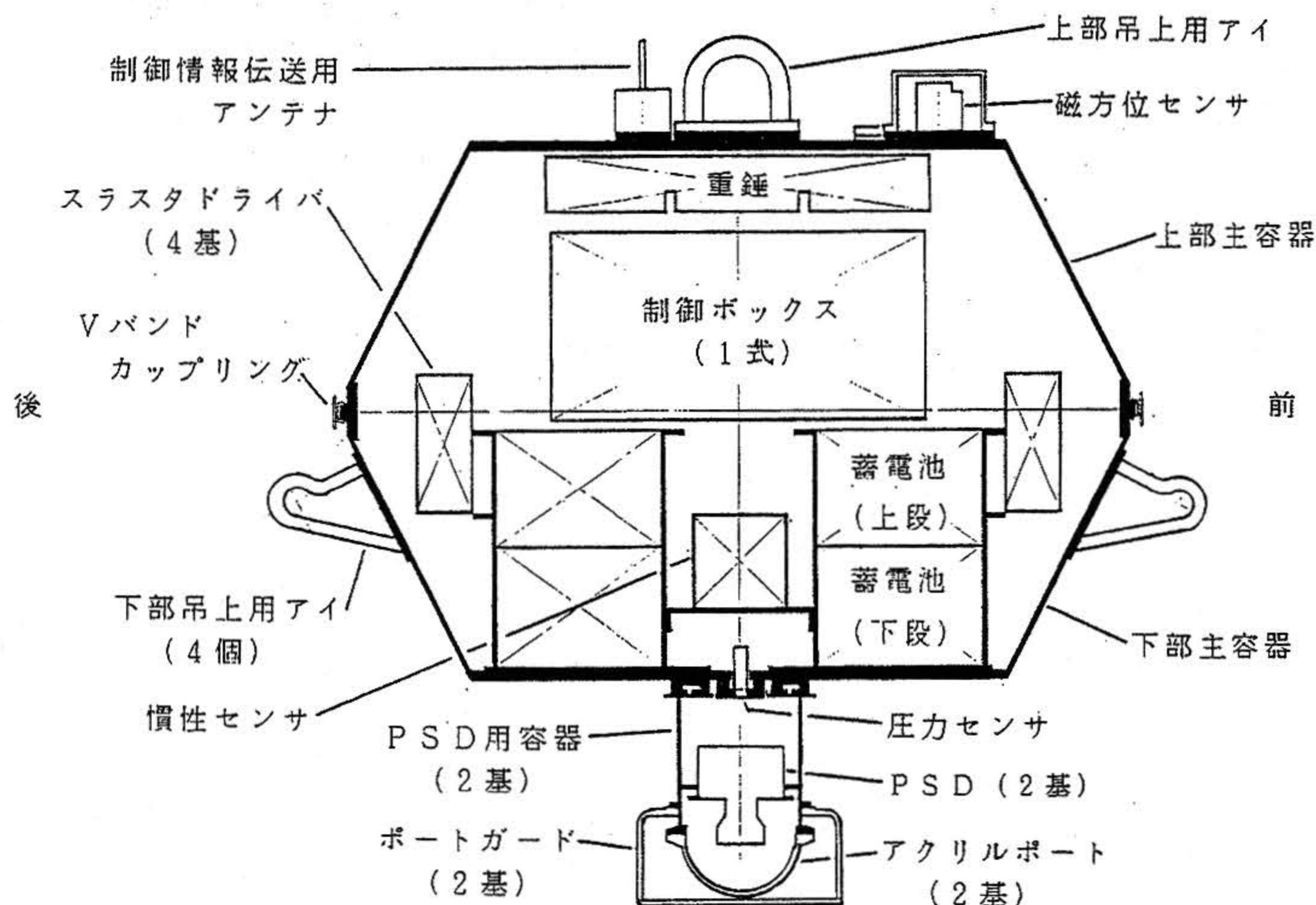


図 6 主容器断面図

Fig. 6 Section of the body

先しておかれる。蓄電池、制御ボックス及びスラストドライバ等の取付位置に制限を受けないものは保守作業性をよくするため下部主容器にスペース効率を考慮して配置するように考える。

次に、具体的な配置については図6に示されるように、主容器下端部下面には、水中光源を捕捉するPSDを下方に向けて左右に2基並べて配置し、その中間の主容器下面中心に圧力センサを取り付けている。次に、上端部外面には磁性体や電気回路による磁界の影響を受け易い磁方位センサを前端に配置し、その後部両サイドにメモリーリセット用及び制御電源スイッチ用近接スイッチを各々1個ずつ配している。中央部両サイドには、55mmφの防水蓋付き外部接続用開口を各々1個ずつ、上端面後部両サイドには、左側に後日搭載予定のテレビカメラ用画像伝送用アンテナを、右側に制御情報用アンテナを設けている。

これらの機器の防水及び取付要領については、まず磁方位センサに対してはビークルにねじ止めされた本体にOリング付きの防水型アクリル容器を被せてビークルにボルト止めする。アンテナについてはロッド部を覆う先端を塞いだゴムチュー

ブを取り付けたアルミ合金製容器を基部コネクタに被せ、平パッキンを挟んでビークルにボルト止めしている。その他の機器についてはドーナツ形アルミ合金円板に本体をねじ類で取り付け、さらに平パッキンを挟んで円板をビークルにボルト止めしている。

次に、制御ボックス、蓄電池、スラストドライバ、慣性センサブロック及び重錘は、主容器内に格納している。主容器最下部には、最も重い10個の蓄電池を格納する。蓄電池は主容器形状が鍋状であることから、下層に4個、上層に6個の二段積みとした。積み重ねると電池は崩れ易いので、主容器下面に溶接にて取り付けられたアルミ合金製フレーム構造の格納台に押さえ金物で締め付けられて収納されている。また、この格納台には、蓄電池の重心位置を考慮して、中央部に100mm×100mmの空間が設けられており、この空間を利用して慣性センサブロック取付台を蓄電池格納台に溶接付けし、慣性センサブロックを取り付けている。次に、4個のスラストドライバについては、上段の蓄電池外側の主容器との隙間に蓄電池格納台から腕を出し、その上にスラストドライバを載せて、

上からアルミ合金製バンドで固定している。以上の機器ではほぼ下部主容器内はいっぱいになっており、制御ボックスについては、蓄電池格納台の上に載せゴムバンドで固縛して上部主容器内の位置に格納している。以上で、搭載機器はすべてビークルに取り付けられた状態となる。

6.1 保守性

ビークルの保守作業については、蓄電池の充電と機器のメンテナンスに分けられる。

(1) 蓄電池の充電

充電作業を簡便にするために、前述の5.2動力系統に説明されていない工夫をしている。各蓄電池に結線された二芯線は4台のスラストドライバを収めたボックスの内の1台にすべて導かれる。ボックス内では蓄電池2個が直列状態となるように結線されて、DC24V×5組に整理され、ボックス外面に取り付けられた5個の3ピン凹型コネクタに各々結線されている。放電時はDC24Vの制御用動力をその5個のコネクタの一つから取り、残りの4個のコネクタの内の3個にジャンパーを差し込んで、動力用二芯線を残ったコネクタに接続し、DC96Vのスラスト駆動用動力を得ている。10個の蓄電池を2個直列の5組に整理しているのは、DC24V用の充電器しか所有していないためである。次に、充電時は動力系統のコネクタに差し込まれているジャンパーを含めたすべての凸形コネクタを取り外し、充電器の出力に接続された凸形コネクタを差し込み充電作業を開始する。

充電方法には、自動車等のバッテリーの充電に用いられている要領と同じ定電圧充電を採用している。この方法では、DC24Vに対し約DC28Vを印加して電流がほぼ零になれば蓄電池がほぼ飽和状態となり、充電開始時に印加電圧を一度セットすれば終了するまで何も調整する必要もなく、誰でも充電作業ができるので非常に簡便である。充電所要時間は、ほぼ完全放電状態から飽和状態まで1組約6時間である。

(2) 機器のメンテナンス

搭載機器の取り付け取り外しをできるだけ容易にするために、制御ボックス、蓄電池、慣性センサブロック及びスラストドライバ以外の機器はすべて主容器の外部から取り外せるようになっている。接続ケーブルも制御ボックスからコネクタ

を抜けばコネクタ付きのまま一体で取付用開口から抜き出せる。主容器内部では、制御ボックスとスラストドライバについては接続ケーブルのコネクタをすべて外し、固定用ゴムまたはアルミ合金製バンドを取れば簡単に取り外せる。蓄電池については先に制御ボックスを取り外し、離脱防止用押さえ金物を取れば、1個ずつ取り外せ、慣性センサブロックはさらに上層の6個の蓄電池を外すと取り出せる。

7 ビークル重量重心

ビークルが水中で十分運動できるように、重量調整用の重錘を搭載して水中重量や重心浮心位置を調整する必要がある。調整方針は、以下の条件を考えた。

- ① 水中重量は0.0～-1.0kgとする。
- ② 静的状態は、アップライト状態とする。
- ③ 運動制御試験用ビークルであるので、ビークルの固有安定性を極力押さえ、宙返りも可能にする。

この条件から、水中重量調整用重錘重量は39kgとし、重心浮心間垂直距離をできるだけ小さくするため、重錘を主容器内上端面に釣り下げた状態で取り付けられている。重量重心及び浮量浮心位置計算結果を表2に示す。

8 機器単体試験

機器の性能を確認するため、PSD及び磁方位センサに対しては性能確認試験を、スラストについては特性試験を実施した。

8.1 PSD性能確認試験

PSDをビークルに2個取り付け水中光源を検知する本来の使用状態におけるPSDの性能を確認するため、波動水槽で光源を水底に沈め、PSDを移動台車に搭載して試験を実施した。試験は2個のPSDの midpoint 直下に光源を配置し、この位置を基準に水槽の長さ方向に0, ±20cm, ±40cm, ±80cm, ±150cm離れた9点で台車を固定し、それぞれの台車固定位置に対し水槽幅方向にPSDを移動させて、0, ±20cm, ±40cm, ±80cm, ±150cmの9点の計81点でPSDデータを計測した。その結果を図7に示す。

ビークルの運動制御プログラムでは、PSDで光

表 2 重量浮量, トリム計算結果

Fig. 2 Weight, buoyancy and trim of the vehicle

シ ュリヨウ	ケイサン	ケツカ
--------	------	-----

1. IN-AIR CONDITION

NAME	WEIGHT (kg)	MOMENT (kg-mm)			CENTER OF WEIGHT (mm)		
		X-AXIS	Y-AXIS	Z-AXIS	X-AXIS	Y-AXIS	Z-AXIS
FITTINGS	+216.385	+314.35	-584.50	+25649.60	+1.453	-2.701	+118.537
BALLAST	+39.000	+0.00	+191.00	-9559.00	+0.000	+4.897	-245.103
TOTAL	+255.385	+314.35	-393.50	+16090.60	+1.231	-1.541	+63.005

2. BUOYANCY

NAME	BUOYCY (kg)	MOMENT (kg-mm)			CENTER OF BUOYCY (mm)		
		X-AXIS	Y-AXIS	Z-AXIS	X-AXIS	Y-AXIS	Z-AXIS
FITTINGS	+255.850	+134.80	-18.00	+5512.42	+0.527	-0.070	+21.546
BALLAST	+0.000	+0.00	+0.00	+0.00	+0.000	+0.000	+0.000
TOTAL	+255.850	+134.80	-18.00	+5512.42	+0.527	-0.070	+21.546

トリム , ヒール	ケイサン	ケツカ
-----------	------	-----

BG	X	Y	Z
	+0.70 (mm)	-1.47 (mm)	+41.46 (mm)
WEIGHT IN WATER	-0.46 (kg) (-) --- BUOYANCY > WEIGHT		
HEEL	ANGLE	DOWN-SIDE	UP-SIDE
	2.0 (deg)	PORT	STBD
TRIM	ANGLE	DOWN-SIDE	UP-SIDE
	1.0 (deg)	FORE	AFT
			UNBALANCE MOMENT
			375.5 (kg-mm)
			179.8 (kg-mm)

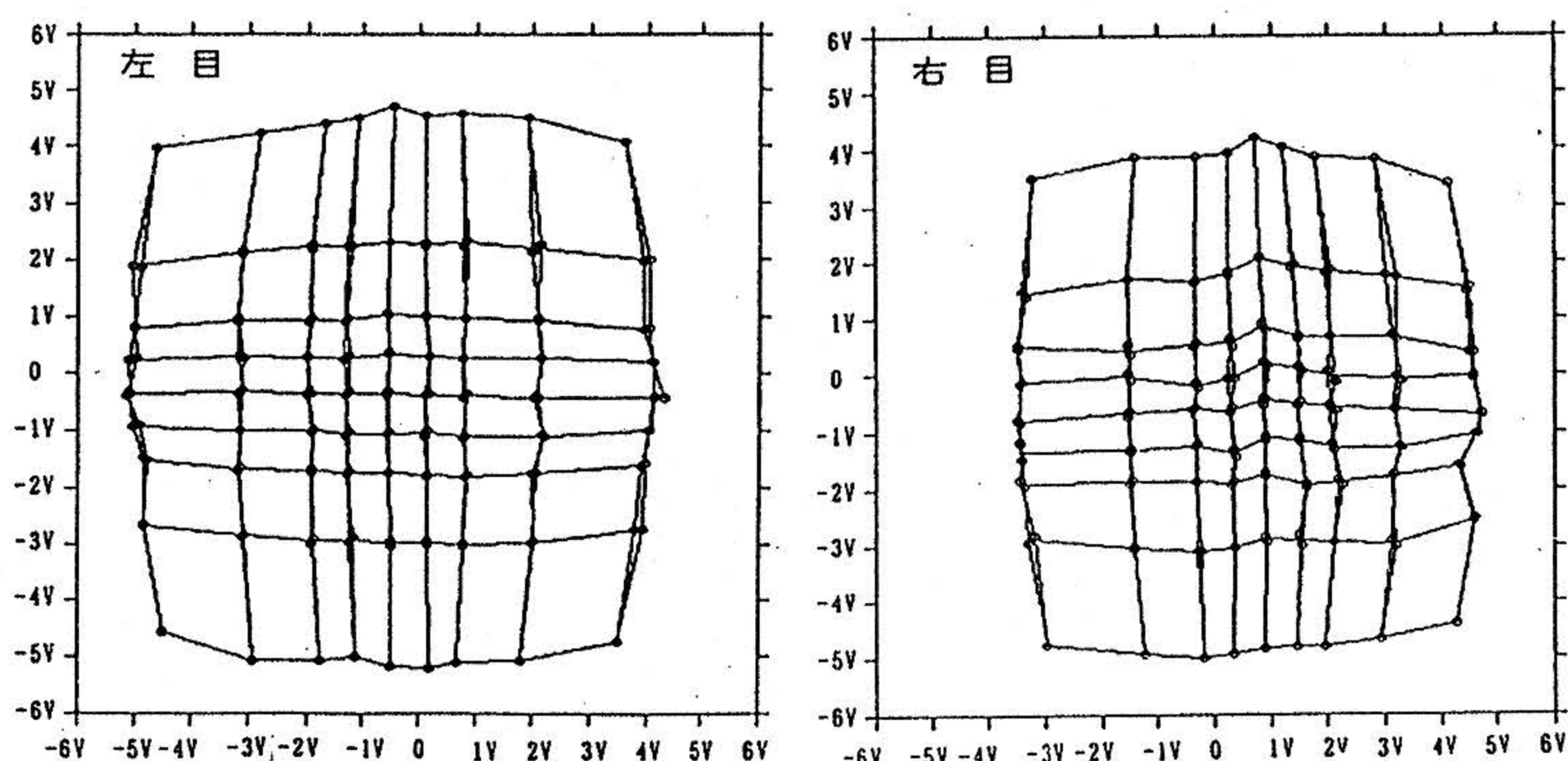


図7 PSD性能確認試験結果

Fig. 7 Characteristics of the PSD

源を検知し送られてくるデータに対しこの性能確認試験データに基づいて演算処理し、ビークルと水中光源の距離、水中光源の方位を得て、運動制御に用いている。

8.2 スラスト特性試験

スラストのボラードプル状態のスラスト及びトルク特性を求めるために、回流水槽でスラスト特性試験を実施した。

まず、試験時のスラスト駆動はビークルで実際に用いられるスラストドライバを使って、正逆転それぞれ127段階に変化させられるPWMにて供給電力を制御して行った。

計測は四面に歪ゲージを張り付けたアルミ合金製角棒の先端にスラストを直角に取り付け、駆動時にスラスト及びトルクが作り出すモーメントによる角棒の歪を検出して両者を計測する方法を用いた。計測結果を図8の上図に示す。この図から判るように、最大スラストは正転時6.8kgf、逆転時4.4kgfであり、フル状態でも逆転時は正転時の65%しかスラストを発生しない。次に、ビークルの運動制御にはPID制御を使っているため、スラストをリニアに選択する必要があり、正転逆転時のスラストデータを最小自乗近似して二次の近似関数を求めた。この結果を図8の下図に示す。この関数を運動制御のスラストコントロールに用いている。運動制御に関する議論は別報に譲る。

8.3 磁方位センサ性能確認試験

磁方位センサは前述したようにセンサ近傍に磁性体或いは磁界が存在すると、地磁気の磁界が乱され、方位を正確に計測しなくなる。従って、ビークルに搭載した状態でビークルに搭載された制御装置を使って性能確認を実施した。その結果、正確に方位を計測することが確認できた。

9 運動制御試験と今後の課題

以上の機器単体試験を実施し必要なデータを取得した後、このデータを運動制御装置に組み込み、運動制御試験を開始した。潜水プールにおける運動制御試験中の状況を写真2に示す。プールの水底に設置された写真下部の水中光源を検知して写真中央のビークルが運動制御を行っている様子を撮影している。運動制御試験は約1年でまだ延べ50時間程度しか行っていないがこの試験中にいくつかの不具合点の改善や機能の追加等の必要性が指摘された。

① 制御周期の短縮化

現在の制御周期は、約0.3秒である。これは、RS232Cの9600BAUD双方向データ通信で各々80バイトのデータの送受信と陸上及びビークル内の演算処理装置でのデータ処理に費やしている時間である。一方、運動制御の観点から考えると、制御周期0.3秒では長く、ビークルが制御されて行う運動がぎくしゃくし、連続して同じ位置姿勢を保

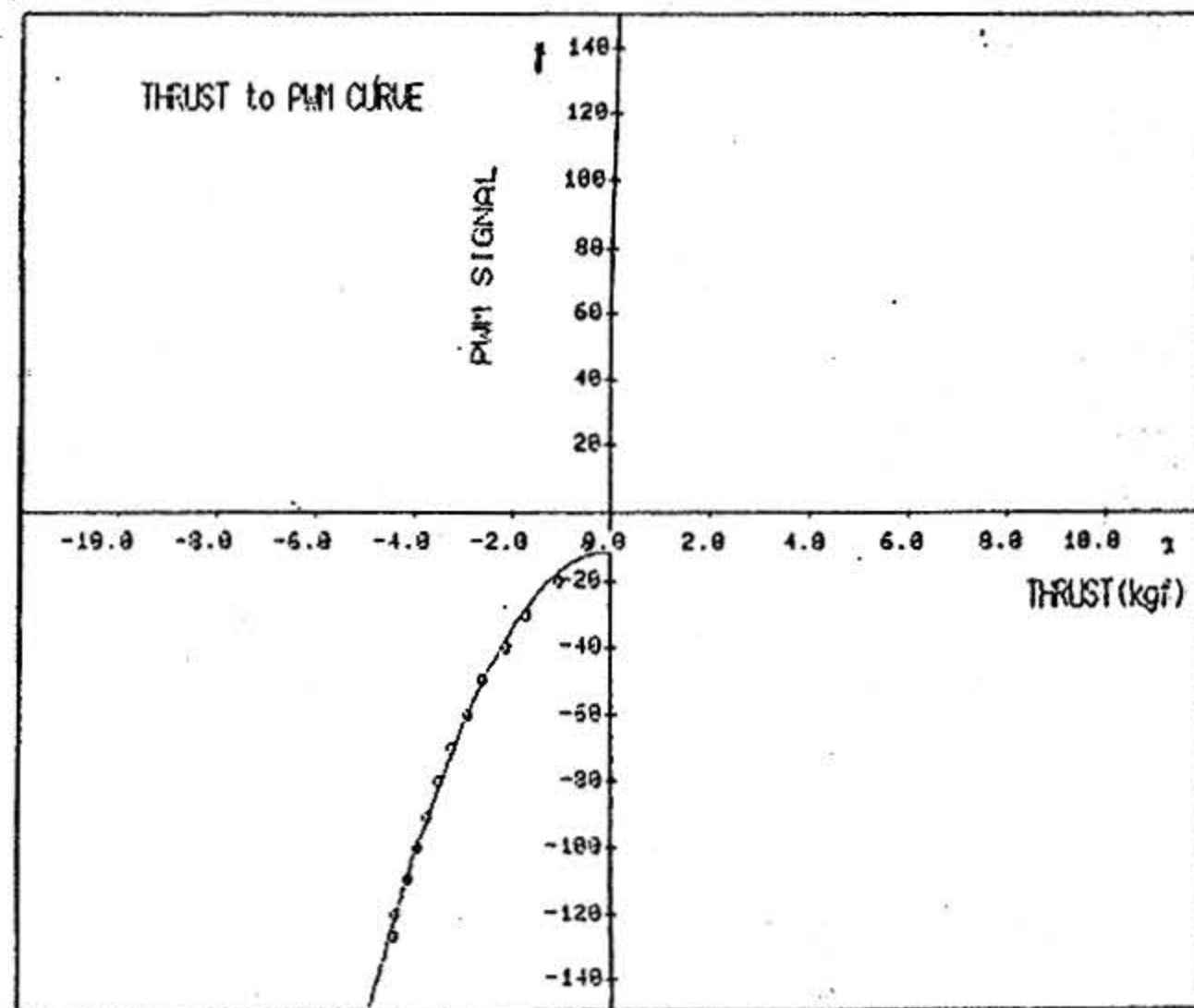
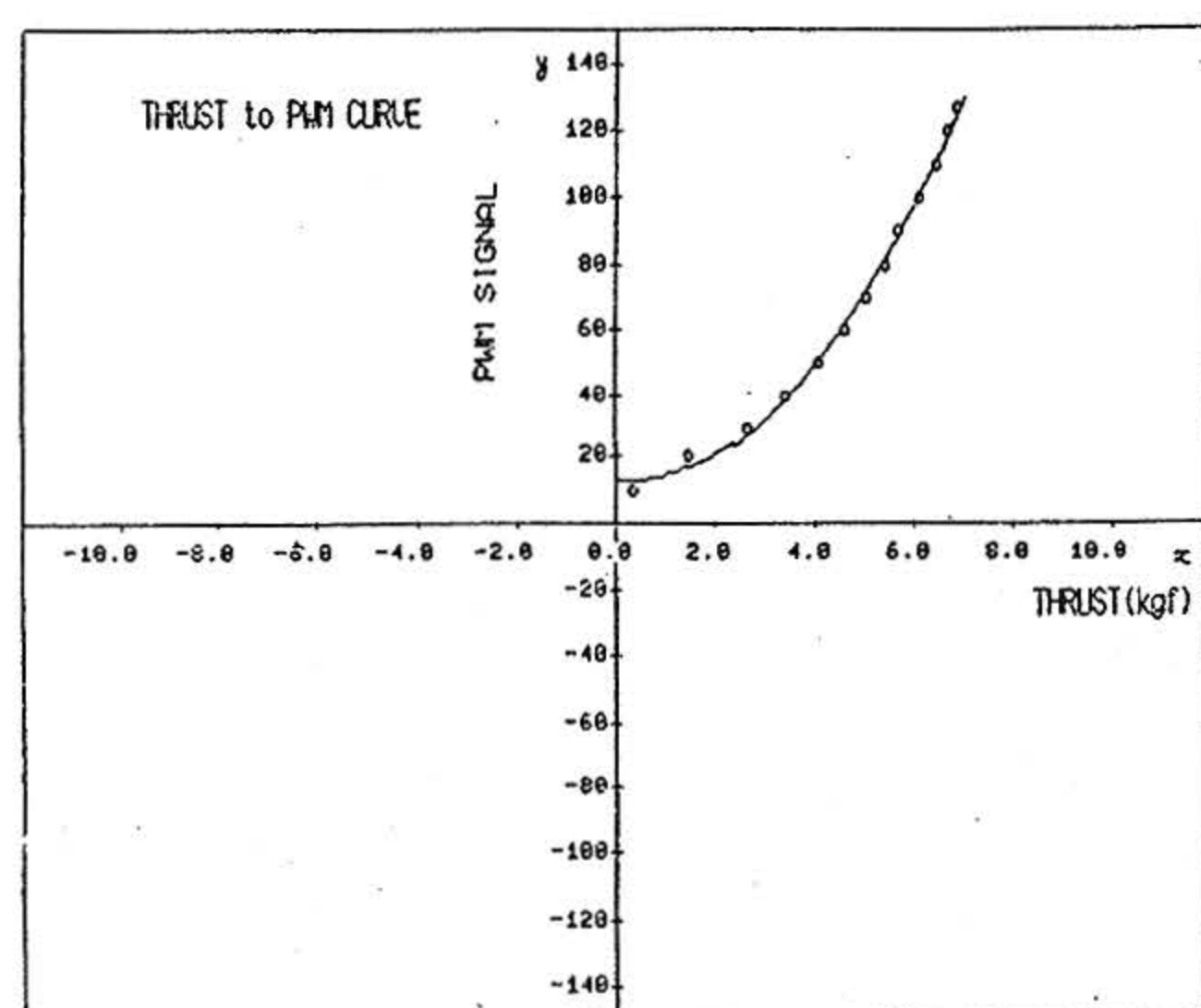
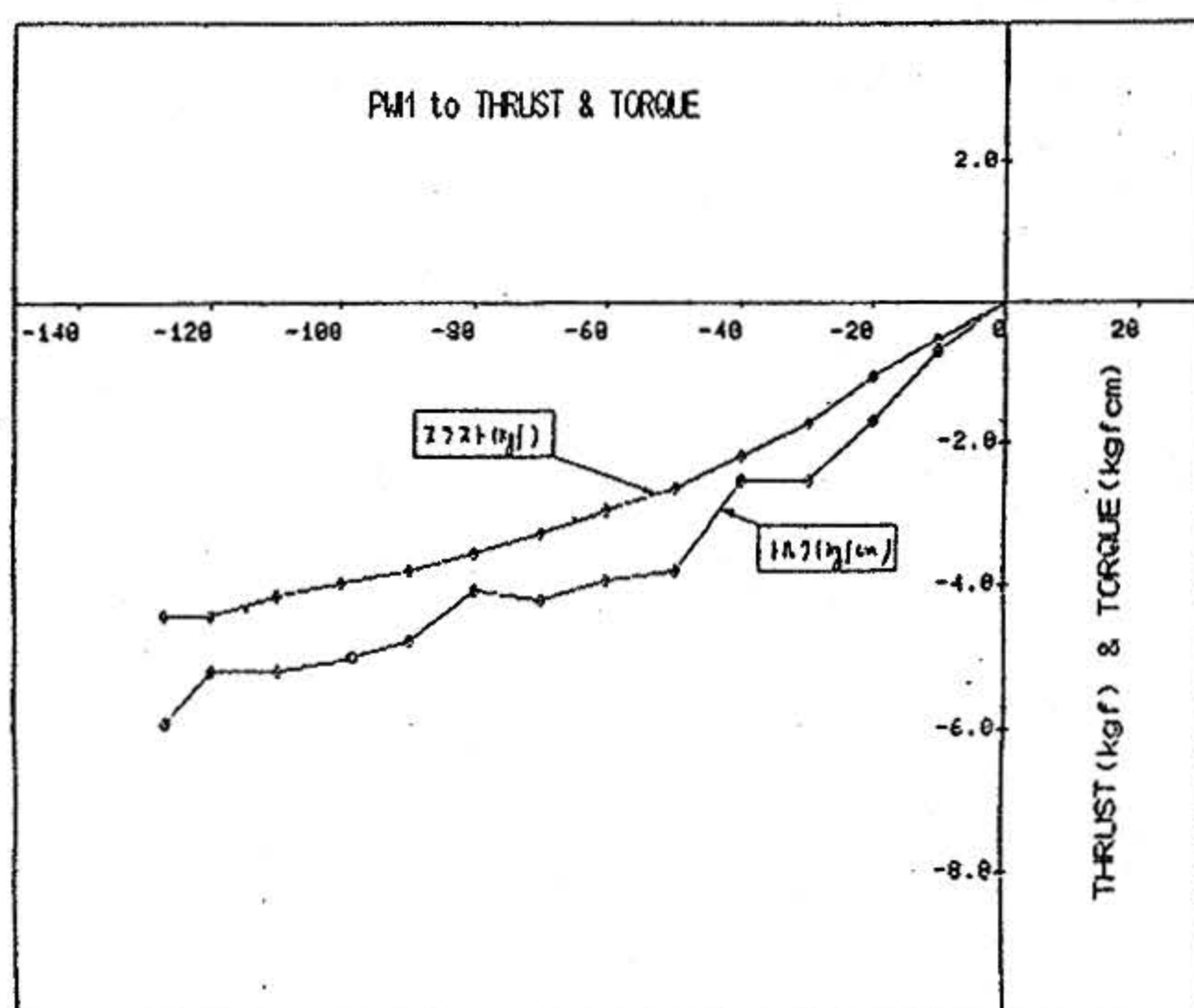
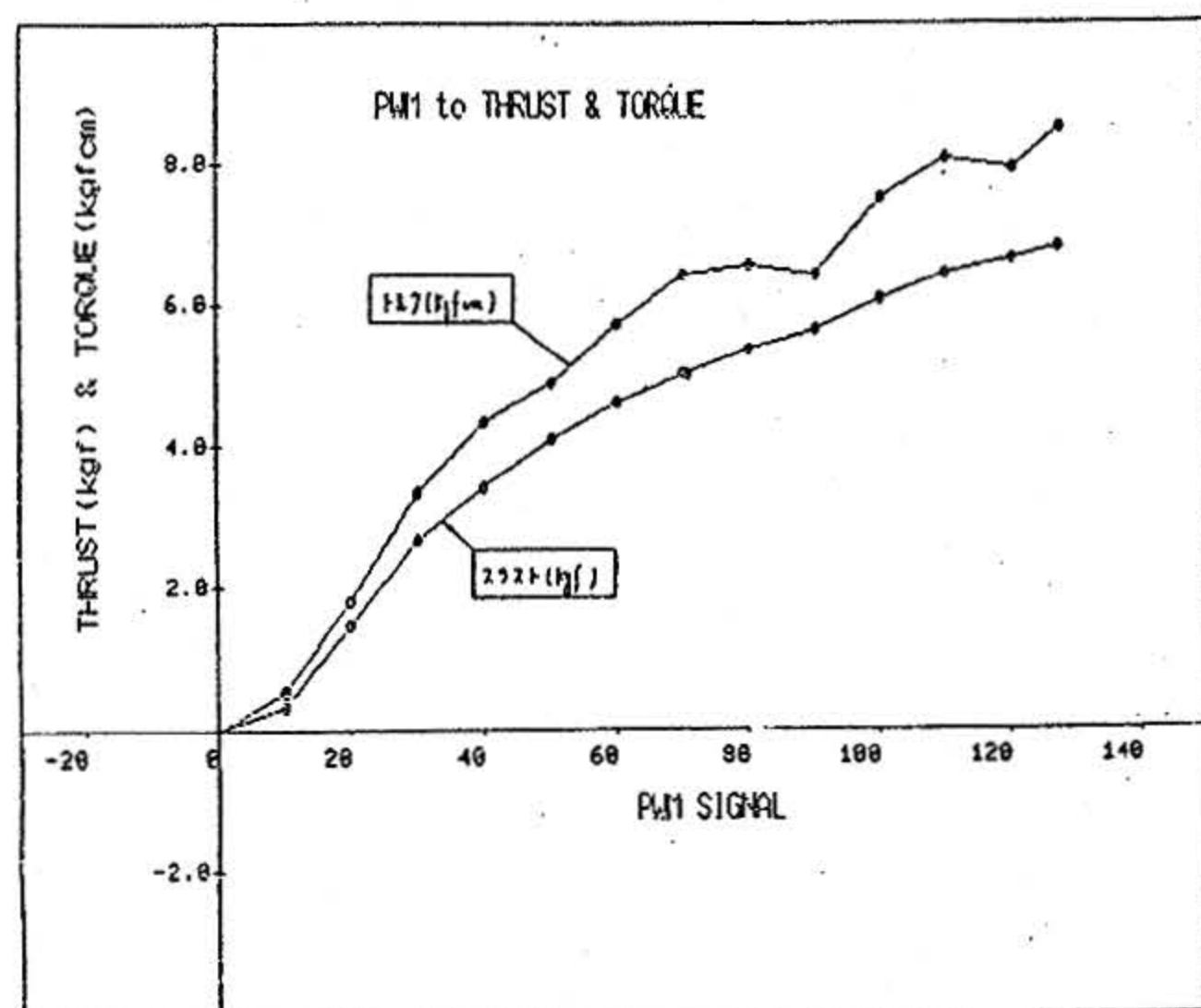


図 8 スラスト特性試験結果

Fig. 8 Characteristics of the thruster

持するのが困難となる。従って、この問題を解決するために制御周期を0.1秒以下に短くするのが望ましいと考えられる。

ハードウェアで解決するには、一つは現在使っているRS232Cデータ通信の伝送速度9600BAUDをもっと速くし、演算処理装置のCPUをもっと処理速度の速いものに替えることが考えられ、もう一つは伝送方法をかえて、ビークル内で演算処理せずにアナログ型の生データを直接FM変調し電波で多重通信を行うことが考えられる。今後、もっ

と検討を加え決定したいと考える。

② 蓄電池搭載量の適正化

現在は12V-24Ahの小型シール鉛蓄電池が、制御用動力源として2個、スラスト駆動用動力源として8個搭載されているが、今までの運動制御試験の状況から制御用の蓄電池は約8時間で放電してしまい、スラスト駆動用はその2倍以上の時間使用できる状態である。従って、将来の搭載機器の追加等を考慮し、スラスト駆動用も制御用と同時間放電できればよいと考え、制御用は現在のま

ま12V-24Ahの蓄電池を2個とし、スラスト駆動用は12V-12Ahの小型シール鉛蓄電池を8個にすることを検討している。

③ 重心浮心間垂直距離の微小化

第7章でものべているが、ビークルのロール及びピッチ運動の固有安定性をなくすために重心浮心間垂直距離をできるだけゼロに近付ける必要があるが、現在はこの距離が約40mmあり、もっとロール及びピッチ運動制御を行い易くするためにさらにこの距離を小さくすることを考えている。このためには、ビークル下部の水中重量を減らし上部を増す必要があるので、現在SUS製の脚部をアルミ合金製の脚に変更し、重心浮心間距離を20mm程度に減少させることを計画している。

④ 光点位置検知方式の検討

光点位置を検知するのに現在はPSDを使用しているが、データの欠測が時々あり、水中光源を検知してビークル運動を制御するシステムにとっては光源データの欠測は制御性能を大きく悪化させるものである。これを改善するために、2基のPSDをTVカメラに置換し、画像処理によって光源位置データを計測するシステムを検討している。また、遠くから光源を探す、あるいはビークルの運動により光源が死角に入らないように、2基のTVカメラにパンチルト装置を設けることも検討している。

10 動力源に関する考察

ビークルの空中重量255kgに対し、動力源である小型シール鉛蓄電池の重量は85kgあり、ビークル重量の3分の1を占めている。このように大きな電池の重量比にもかかわらずフルパワーでの使用時間は8時間程度である。そこで機体重量と運用時間の関係を調べてみた。

まず、ビークル運動時のスラスト、機体の運動加速度と消費電力の関係は、 P をスラストによる消費電力、 T_h をボラードプル状態のスラスト推力、 m を機体質量、 α_0 を運動加速度とすると、

$$P \approx C \times T_h = C \times m \times \alpha_0$$

この時の電力消費量 E_{req} は、 P_0 をスラスト以外の

機器による消費電力、 t を運用時間とすると次式で与えられる。

$$E_{req} = (P + P_0) \times t = (C \times m \times \alpha_0 \times P_0) \times t$$

一方、蓄電池からの電力供給量 E_{sup} は、 w_0 を機体の単位質量当たりの蓄電池の利用可能エネルギー密度とすると、

$$E_{sup} = w_0 \times m$$

であり、電力消費量と電力供給量が等しいことから、機体質量と運用時間の関係は上の2つの式より次式となる。

$$m = -\frac{P_0}{C \times \alpha_0} - \frac{(P_0 \times w_0) / (C^2 \times \alpha_0^2)}{t - w_0 / (C \times \alpha_0)}$$

この式から判るように、この関数は、

$$m = -P_0 / (C \times \alpha_0), \quad t = w_0 / (C \times \alpha_0)$$

を漸近線とする双曲線関数である。図9にこの関数を図示する。この図に対し $t \geq 0.0$ かつ $m \geq 0.0$ であることから、運用時間を長くしようと考えると単純に蓄電池を増加させても、運用時間を $w_0 / (C \times \alpha_0)$ 以上にできないことがわかる。

参考に、極端であるが、機体重量を蓄電池重量と等しくスラストの効率を本ビークルのスラストと同等でかつ稼働率を100%と仮定すると、この上限は以下の条件下で、約1時間となる。

$$C = 34 \text{ W} \cdot \text{sec}^2 / \text{kgw} \cdot \text{m} \quad (P = 170 \text{ W}, T_h = 5 \text{ kgf})$$

$$\alpha_0 = 0.1 \text{ G} = 0.98 \text{ m} / \text{sec}^2 \quad (\text{運動制御するには、加速度は} 0.01 \text{ G 必要})$$

$$w_0 = 30 \text{ Wh} / \text{kgw} \quad (\text{鉛蓄電池の場合})$$

11 おわりに

運動制御試験はまだ継続して行っており、今後第9章で述べた一連の課題を検討し結果をビークルに反映させて、運動制御装置をもっと精度の良いものに改良していくと同時に、マニピュレータを搭載し水中での作業試験を実施して実機に使用できることも確認する予定である。さらに、次の段階では自律型の実海域用ビークルを開発し、運動制御装置の実用化を図ることを計画している。

(原稿受理：1990年6月11日)

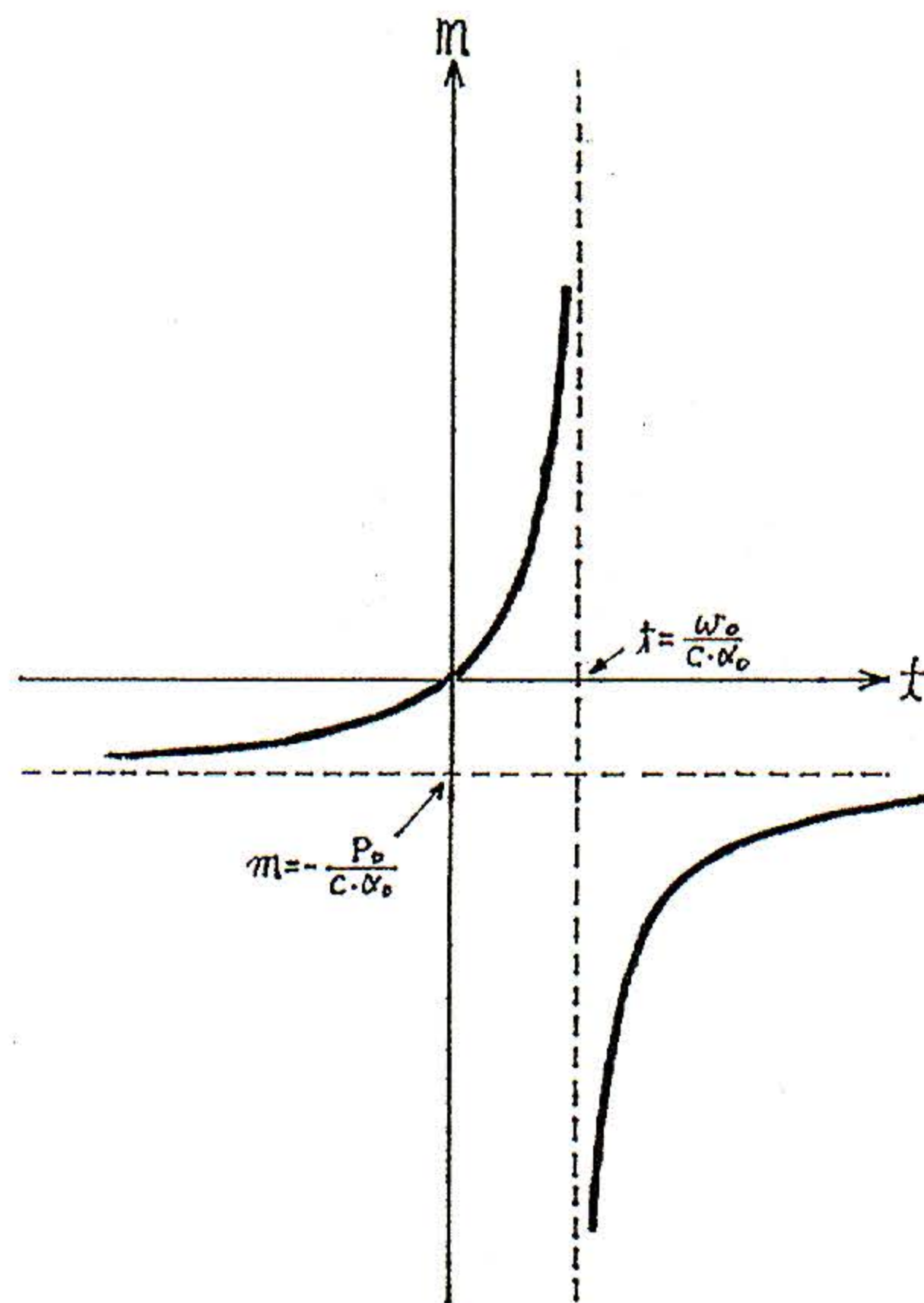


図 9 運用時間と機体重量の関係
Fig. 9 The diving time curve

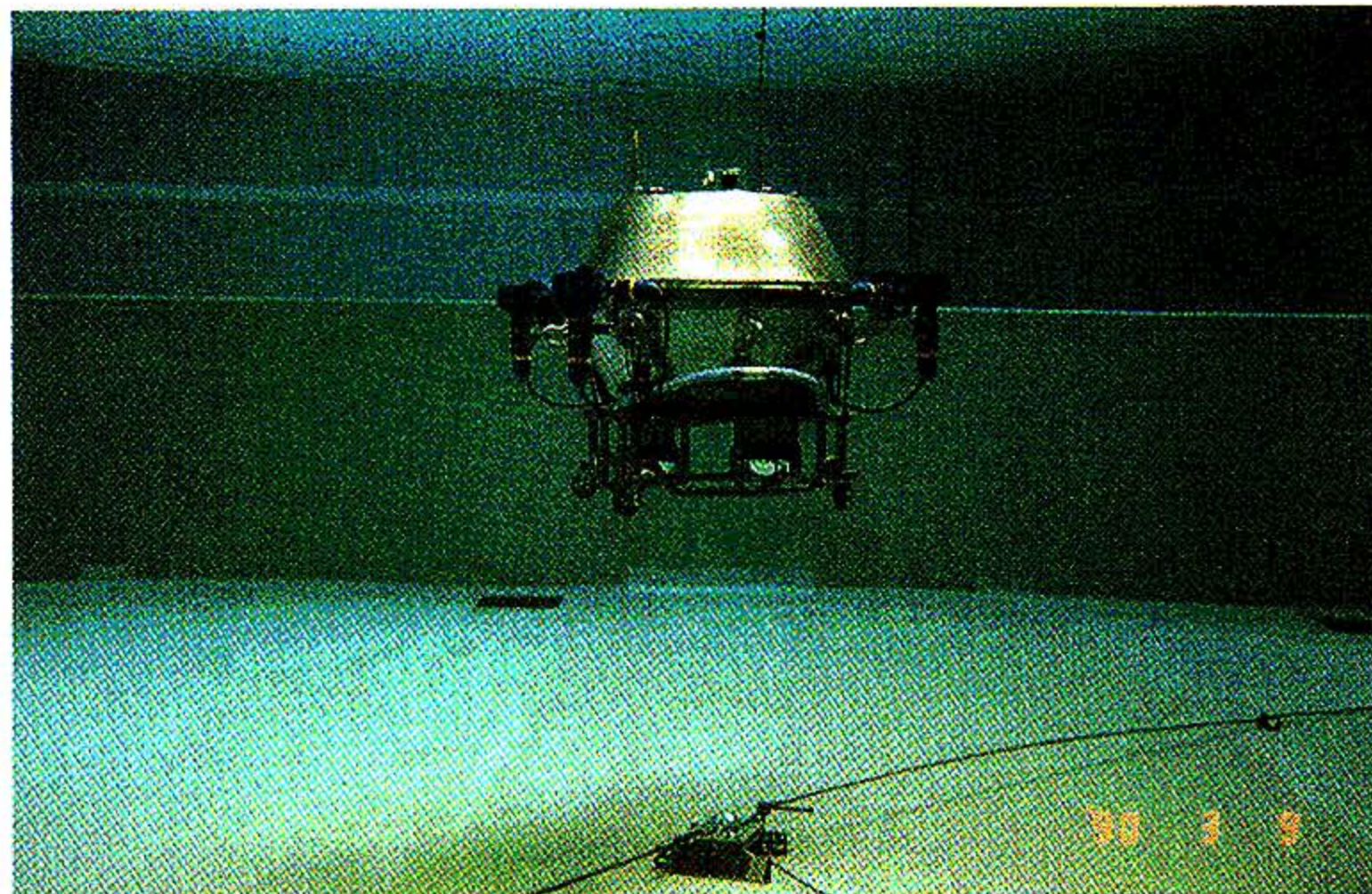


写真 2 運動制御試験状況
Photo 2 Scene of the motion control test