

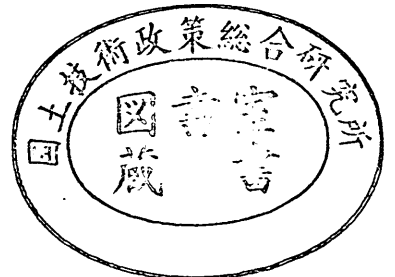
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 2(1) JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters
in the Surf Zone using Field Data Yoshiaki KURIYAMA 13
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討
..... 平石 哲也・本城 智 59
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション
..... 細川 恭史・古川 恵太 155
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 211
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 229
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析
..... 小林 正樹 275
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 305
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with
High Replacement)
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

歩行式水中調査ロボットの開発

— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —

朝 倉 修*
秋 園 純一**
岩 崎 峯 夫***
根 本 孝 志****

要 旨

港湾工事にともなう水中調査作業は潜水士によって行われているが、海中という特殊条件のため効率率が下がり危険がともなう。さらに、潜水士数の減少や港湾工事の大水深化による作業条件の悪化により水中調査作業のロボット化が要請されている。

以上のような状況に対応するため、港湾工事に用いる水中調査ロボットとして、水中テレビによる海中観察と歩行による海底面凹凸測定を主要機能とする軸対称6脚昆虫型ソフトウェア制御歩行ロボット「アクアロボ」を開発している。

昭和59年度(1984年度)に脚長1/2で空中重量約250kgfの陸上用実験機(1号機)、昭和62年度(1987年度)に空中重量約700kgfの防水型実験機(2号機)を製作し実海域実験を行っている。母船の小型化と取扱いの容易さへの要請が大きいため、昭和62~63年度(1987~1988年度)に軽量防水型実験機(3号機)の設計・製作を行った。

この軽量防水型実験機は、①関節の小型軽量化②防水区画の減少③全関節同一構造化を特長としており、アクチュエータ、および減速機の配置、各種配線の取り回しを見直して、関節を小型軽量化し脚部を細くしたものである。

これにより同一脚長であっても従来方式よりも重量・流体抵抗を小さくできるのでロボットの歩行性能を向上でき取扱いも容易になる。

その結果、軽量防水型実験機(3号機)は防水型実験機(2号機)と同一脚長でありながら空中重量は278kgfで、水槽実験では平面上で毎分8m以上の歩行速度を達成した。

キーワード：歩行ロボット、水中調査、軽量化、防水設計

* 前機械技術部 ロボティクス研究室(第一港湾建設局新潟機械室(事務所))
** 機械技術部 計測施工研究室長
*** 機械技術部 ロボティクス研究室長
**** 機械技術部 計測施工研究室

Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection

— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —

Osamu ASAKURA^{*}
Jun'ichi AKIZONO^{**}
Mineo IWASAKI^{***}
Takashi NEMOTO^{****}

Synopsis

To answer the demand for smaller mother ship and easy operation, light-weight type was designed and manufactured during 1987-1988.

The light-weight type has unique points such as, ① Articulations are smaller and lighter than prototype. ② The number of water-tight space is reduced. ③ Every joints has the same structure.

The layout of the actuators, reduction gears, electric cables were renewed for the reduction of weight and volume of the robot.

Because of new design mentioned above, even it has the same leg length as the prototype, the weight and hydraulic resistance can be reduced, and it means that walking performances can be improved and operation will be easier.

As a result, the light-weight type weighs only 280kgf in the air and the maximum walking speed exceeding 8m/min. has been achieved on the flat terrain in the test pool.

Key Words : Walking Robot, Underwater Inspection, light-weight design, watertight design

-
- ^{*} Ex-member of Robotics Laboratory, Machinery Division (1st District Port Construction Bureau)
 - ^{**} Chief of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division
 - ^{***} Chief of Robotics Laboratory, Machinery Division
 - ^{****} Member of Instrumental Construction Control Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	483
1. ま え が き	487
2. 水中調査ロボットの基本設計	487
2.1 ロボットの形式選定	487
2.2 設計思想	489
2.3 ハードウェア	490
2.4 ソフトウェア	492
3. 軽量防水型実験機の基本設計	493
3.1 目標性能	493
3.2 基本設計思想	493
3.3 軽量型防水構造脚の試作	496
4. 軽量防水型実験機の詳細設計	497
4.1 胴体	497
4.2 脚	498
4.3 足部	499
4.4 架台	501
4.5 塗装	501
5. 軽量防水型実験機の製作と実験結果	501
5.1 製作	501
5.2 水槽実験結果	503
6. 考 察	503
6.1 小型軽量化の効果	503
6.2 実用機設計上の注意事項	505
6.3 マニピュレータについて	511
7. 技術上のアイデア	511
7.1 センサーの信頼性向上	511
7.2 光電変換装置の分散配置	511
7.3 関節の片持ち構造	511
7.4 分解組立方式	511
7.5 浮力変化方式	512
8. あとがき	512
参 考 文 献	512
付録1 軽量防水型実験機設計資料一覧表	513
付録2 軽量防水型実験機全設計図	515

歩行式水中調査ロボットの開発 －(第2報)軽量防水型実験機の設計－

1. まえがき

港湾工事、海洋土木工事には、必然的に海中での潜水士作業が伴う。これを分類すると施工者が行う工事そのものための潜水士作業と、発注者が行う工事の指揮・監督や検査のための潜水士作業に分けられる。潜水士作業には以下のような問題点が存在する。

① 潜水士の不足

労働省令に基づくわが国の潜水士資格の取得者数は、約3万人と言われており、そのうち職業ダイバーは約7000人である。その半数が漁業潜水とされており、港湾潜水は約3000人程度とみられている。年齢構成が高齢化していることから潜水士の老齢化が進むとともに、将来潜水士が不足することが予想されている。

② 作業効率の低下

最近の港湾工事では、釜石港の津波防波堤建設工事のように水深60mの海域での捨石マウンド築造工事が出現している。労働省令によると、一日の潜水作業時間は、水深10mの場合の8時間に対して、20mで4時間、50mで75分に低下する。また、大水深での潜水作業経験者は非常に少ないのが現状である。このため、港湾工事が大規模化し作業地点が大水深化するにつれて、光量の減少や海象条件の悪化も手伝って、作業の効率が悪くなる。

③ 安全性

潜水士作業が危険であることは海中という特殊条件から直感的にも明白であり、事故発生件数もそれを示している。潜水士の事故死確率は陸上建設産業の約4倍、交通事故死の約20倍とも報告されている。作業地点の大水深化にともない危険性はさらに増大するものと考えられる。

④ 信頼性

公共事業の発注者である国や港湾管理者の行う調査・監督業務は潜水士を通しての間接的データによって行われているのが現状である。技術的判断を正しく行うためには潜水士の感覚を介さない客観的なデータの入手が望まれている。

以上の理由により、港湾建設の安全性と効率性の確保、危険作業や繰り返し作業等の苦痛からの人間の解放、さらに、港湾工事の精度や品質の向上を目的として、水中調査ロボットの開発に着手することとなった。

こうして港湾技術研究所ではアクアロボと名付けた実験機の開発に着手し、昭和59年度(1984年度)に陸上用実験機(1号機)、昭和61年度(1986年度)に防水型実験機(2号機)を製作し、海中歩行実験に成功するなど

成果を上げてきた。

この防水型実験機(2号機)は当初の目標より重量が大きくなり、製作当時には空中重量689kgf、改造の結果平成2年度には空中重量902kgfとなった。

ロボットの安定性を考えると潮流のある海域では必ずしも軽量の方が適しているとは限らないが、実際の使用状態を考えると潮流の問題がない場合には、取扱いが容易で母船が小さくて済む小型軽量のロボットの必要性は大きいと考えられる。

また、一般に小型軽量化しようとする小型小出力のアクチュエータを用いなければならず歩行速度は遅くなってしまふように考えられるが、軽量化により慣性質量の影響が軽減でき、小型化によって流体抵抗を軽減できるため、かえってロボットの歩行速度を高速化できる可能性もある。

そこで、港湾技術研究所では、水中調査ロボットの小型軽量化技術の研究を開始し、昭和62～63年度(1987～1988年度)に軽量防水型実験機(3号機)を設計、製作した。この軽量防水型実験機(3号機)は、軽量化設計の技術的可能性を検証するためのもので極限的な設計を行っている。

なお、本研究は昭和59～63年度(1984～1988年度)の特別研究「水中調査ロボットに関する研究」の一環として行ったものである。

2. 水中調査ロボットの基本設計

2.1 ロボットの形式選定

海洋ロボットの分類を表-1に示す。既存の海洋ロボットは無索式と有索式に2分される。無索式は研究段階であり複雑な制御が難しい。有索式には吊り下げ式、曳航式、遊泳式、海底走行式がある。

港湾工事に伴う調査作業において潜水士の作業の代わりとなる水中調査ロボットは移動機能と海底に着座して位置を保持する機能が必要である。既存の海洋ロボットの形式のうち、以上の条件を満足するものには吊下げ式、遊泳式、海底走行式がある。

水中調査ロボットが運輸省の各港湾建設局の工事事務所で使用されるために必要な条件を調査したところ水中調査ロボットは、

- ①工事事務所で保有する監督測量船に搭載可能な形状・寸法・重量であること
- ②捨石マウンド等の凹凸面上を移動できること
- ③移動が各方向に容易に行えること
- ④位置精度が高く安定していること
- ⑤水中TVカメラの使用に適していること

歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

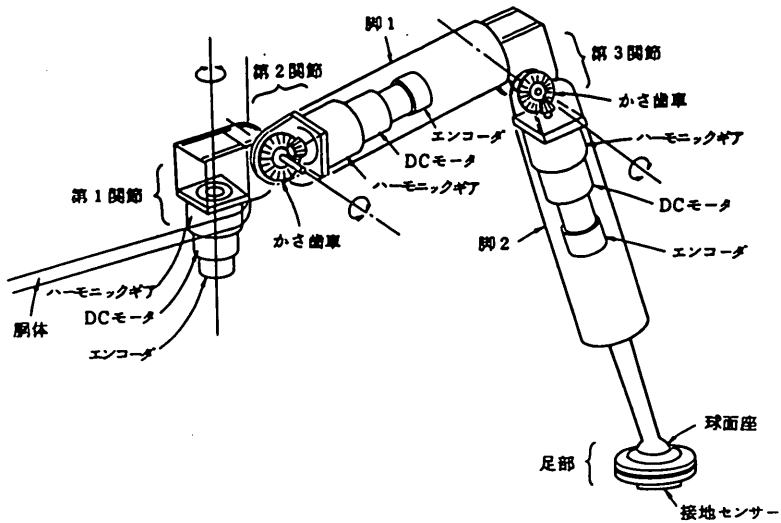


図-3 陸上用実験機(1号機)の脚の構造図

制御用コンピュータは、サーボドライバとパラレル入出力ポートを介して接続している。

(4) トルク配分

各関節の必要トルクについては、足裏摩擦力を考慮した考え方をを用いて計算を行い、トルク配分を行った。図-4~5にこの概念図を示す。これは港湾技術研究所で開発した設計法である。

ロボットが立っている場合、図-4のように足裏に作用する力 F により関節 A にはモーメント $M = aF$ が作

用する。M がアクチュエータの最大出力 (サーボ剛性) より小さい場合はこの状態が維持される。

ロボットの重量が重くなり F が増加して、M がアクチュエータの最大出力 (サーボ剛性) を越えると、関節は角度を保持できないので足先は滑ろうとする。足先が滑ろうとすると図-5のように足裏には滑りと逆の方向に摩擦力 F_s が生じ、関節 A に生じるモーメントは $M = aF - bT_s$ に減少する。

これは、摩擦係数が極端に小さい氷の上では人間が足

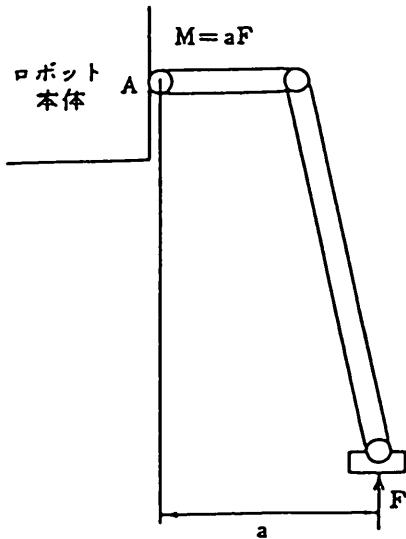


図-4 足裏の摩擦力を無視した場合

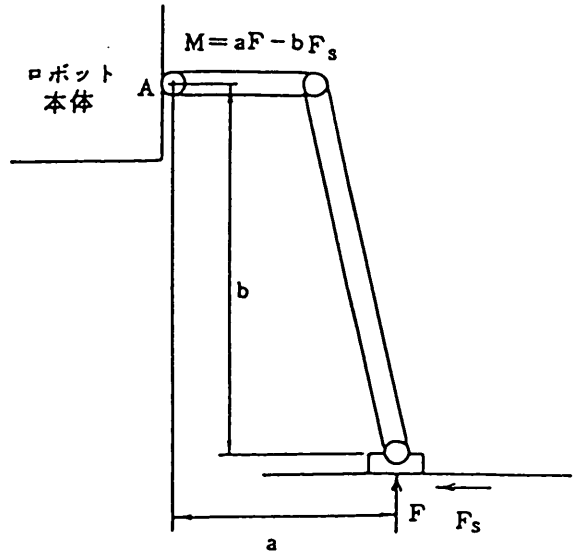


図-5 足裏の摩擦力を考慮した場合

を開いて立つことは困難であるが、一般の地面上では可能なことを考えると理解できる。

2.4 ソフトウェア

本水中調査ロボット実験機では歩行運動はすべてソフトウェアによって行われる。このため制御プログラムの性能がロボットの性能を大きく左右する。

ロボット制御プログラムを大きく分けると制御システムプログラムと歩行アルゴリズムプログラムになる。このような階層構造とすることにより、プログラム開発の効率が上がり保守も容易となる。プログラム開発に用いたコンパイラは、BASIC コンパイラとアセンブラである。

(1) 制御システムプログラム

このプログラムは、歩行アルゴリズムプログラムから脚先の移動目標点の座標値 (PTP) を受け取り、その情報からモータの制御に必要な細かい動作指令 (CP) をリアルタイムで作成しモータを制御するものである。この方式を採用したのは、本実験機は任意の凹凸面に対応する必要があり、一步ごとにセンサ情報をフィードバックさせるので地形により脚の動作が変化するため、産業用ロボットのように事前に動作経路を決定することができないからである。このプログラムは歩行アルゴリズムプログラムとのインターフェースとして、いわゆる“ロボット言語”を含んでいる。

a) ロボット言語

水中調査ロボットの脚は関節式であるため、制御用の座標系が関節の軸を中心とした極座標となっているのに対して、歩行運動の際の脚の動作に必要な座標系は直角座標であり複雑な座標変換が必要となる。この問題をソフトウェアでカバーし、脚の動作を直角座標系で与えられるようにしたものがロボット言語である。この座標変換は直線補間とパルス同期出力プログラムを開発することにより達成された。

b) 直線補間

今、1本の脚について考える。歩行運動を行うためには脚先が現在の位置から移動目標点に移動するとき、脚先の現在の位置と移動目標点を結ぶ直線上を脚先が移動する必要がある。このためには、この2点を結ぶ直線上に無数の補間点を考え、この各点をロボットの脚先が順次通過するようにすればよい。すなわち、この各点の位置に脚先があるときの3個の関節の角度を計算で求め、順次その計算された角度になるように3個の関節を同期して回転させれば、脚先は2点を結ぶ直線上を移動する。この方法は、絶対位置による直線補間を用いる方法である。本プログラムにおけるこの補間点の数は、歩行に支

障をきたさない程度に数点に減らしている。

c) 協調動作

歩行運動時には接地脚の脚先が同期して動作しないと、各脚がつっぱりあい、モータの負荷が増えるばかりか歩行がスムーズに行えなくなる。また、この同期を正しく行くと、上述の補間点の数を減らすこともできる。

一般に、6本の脚先がある補間点から次の補間点に同時に移動する場合、合計18個のモータが動作するので出力パルス数は18個計算される。これらのパルス数は一般にはすべて異なっている。したがって、脚先を同期して動作させるためには、これらのパルス数に比例した速度でサーボドライバにパルスを同期して出力する必要がある。こうするとパルス出力開始時刻と終了時刻が全関節で一致し、脚先が同期して動作する。

このパルス同期出力プログラムは、ロボットの移動速度に直接影響するため、特殊なアルゴリズムを考案し、アセンブラ言語を用いて開発した。

d) グラフィック表示とシミュレータ機能

本プログラムは、CRTにロボット姿勢のグラフィック表示とロボットの位置、方位データを脚の動作に合わせてリアルタイムで表示している。これは、直接見ることができない海中で水中調査ロボットを操作するために必要な機能である。また、脚の機構上の動作範囲を越えた命令が出されていないかチェックを行っている。このため、歩行アルゴリズムプログラムのデバッグ用にも利用している。

(2) 歩行アルゴリズムプログラム

このプログラムは、オペレータからの命令を解釈し、その命令を実行するために必要な脚先の動作目標点の座標値 (PTP) を作成するのが主要な仕事である。

a) 歩行アルゴリズム

基本的な歩行アルゴリズムは、6脚のうち1本おきの3脚を1組とし、片方の組の脚を接地させ、もう一方の組の脚を空中に上げる交互踏変え歩行パターンを用いるものである。

この交互踏変え歩行パターンは6脚使用3脚接地の歩行パターンであるが、これ以外に、使用脚数と接地脚数の組み合わせを変化させて、6脚使用4脚接地、6脚使用5脚接地、5脚使用3脚接地、5脚使用4脚接地、4脚使用3脚接地の各歩行パターンで歩行することもできる。これは静的歩行に必要な脚の最小本数が4本であるのに対し、本機は6本の脚を持っているためである。このように脚の本数に冗長度があるため、歩行中に歩行に使用していない脚をマニピュレータとして用いたり、1~2本の脚が故障した場合でも歩行を続行するこ

歩行式水中調査ロボットの開発
-(第2報)軽量防水型実験機の設計-

本来、摩擦の小さい軟弱地盤上や水上での使用のために開発された形式であり、摩擦の大きい岩盤上の走行には適していない。

以上に対して歩行式は、本体寸法の割に凹凸面適応性が大きく、接地面積が小さくできるので濁りの発生も少ない。また、方向転換も容易である。さらに、本体を常に水平に保持することが可能で各種調査機器の使用に適している。

このような理由により技術的問題を考えなければ水中調査ロボットの形式として歩行式がもっとも適している。

以上の考察から、水中調査ロボットの形式は歩行式ロボットとすることにした。

2.2 設計思想

(1) 足の本数

歩行式は脚の本数が問題となる。現在研究されているものには1本、2本、3本、4本、6本、8本等がある。

1本のものは、動的制御の研究用であり、実用化を目指したものではない。

2本、3本のものは、動的制御が必要であり、実用化するには安定性に問題がある。

4本のものは、静的に安定な歩行も可能であるが、常に重心位置をモニターする必要がある、1回に上げる脚が1本であるので歩行速度は遅い。

6本、8本のものは、重心位置をモニターせずに静的な歩行が可能である。この場合、脚の少ない6本の方が制御は簡単であり、重量も軽くなる。また、脚が干渉しにくいので脚の動作範囲を広くとることができる。交互踏変え歩行パターンでは8本のものの方が接地本数が多く安定性が良いが、ソフトウェア制御方式であれば6本のものでも4脚接地歩行や5脚接地歩行が可能であるの

で接地脚数をふやすために8本にする必要はない。また、静的歩行速度と安定余裕は6本までは急速に増加するが8本にしてもほとんど変化しない。

以上により歩行式ロボットとしては6脚のものが最も実用化に適していると考えられることができる。

(2) 脚の配置

6脚歩行式には胴体の両側に3本ずつ脚を有している面対称型のもの、60度ごとに脚を有する軸対称型のものがある。図-1に面対称型と軸対称型の概念図を示す。

軸対称型のもは方向性がないので、各方向への移動が同等に行えることと、その場での方向転換が容易であり、海底の地形に応じて機敏に移動できる。

よって、水中調査ロボットには軸対称型のもが適している。

(3) 脚の形状

歩行式ロボットを脚の形状で分類すると、脚が常にほぼ垂直方向に向いているほ乳類型と、脚が胴体から張り出していて関節の動作角度の大きい昆虫型がある。図-2に昆虫型とは乳類型の概念図を示す。一般に昆虫型の方が本体寸法に比べて脚の動作範囲が大きいため、同一寸法であればほ乳類型に比べて歩行可能な凹凸は大きい。

このため小型の監督測量船に搭載するためには昆虫型が適している。

(4) 制御方式

歩行式ロボットを制御方式で分類すると、メカニカル制御方式とソフトウェア制御方式に分けられる。メカニカル制御方式はリンク機構等を用いて機構学的に脚の歩行運動を行うものであり、ソフトウェア制御方式は各脚の各関節は機械的には独立しており、コンピュータのプ

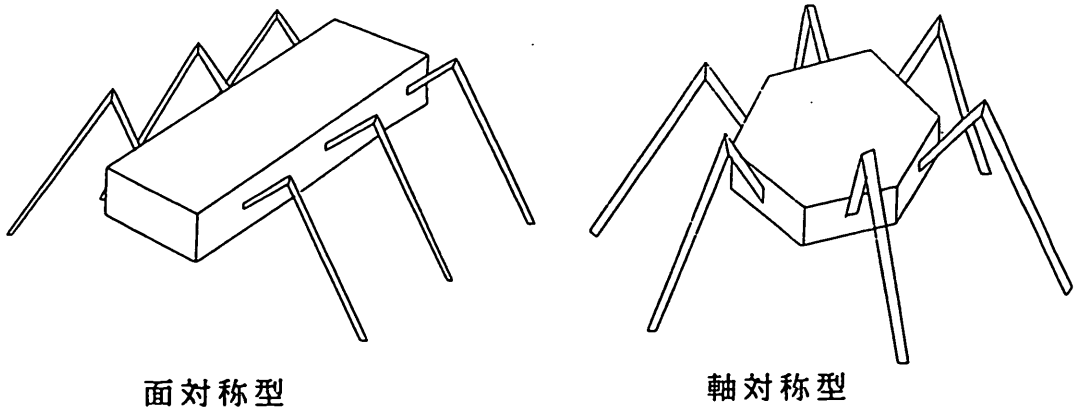
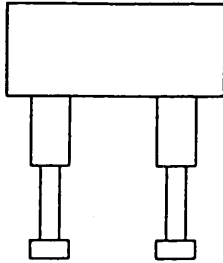
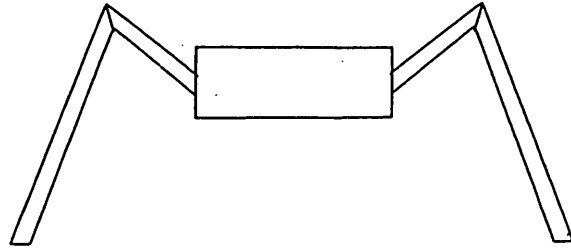


図-1 面対称型と軸対称型の概念図



ほ乳類型



昆虫型

図-2 昆虫型とは乳類型の概念図

プログラムにより各脚を協調制御して歩行運動を行うものである。

メカニカル制御方式は運動の自由度を下げて制御用コンピュータの負担を小さくするので、高速化が可能となる反面、歩行の自由度が小さく凹凸面上歩行は困難である。また、組となる脚の相互位置を変えることができないので危険領域を避けて選択的に接地する歩行は不可能である。

ソフトウェア制御方式は脚の可動範囲内であれば運動の制限はなく各脚を別々に独立して動かせるので、選択的に接地する歩行が可能であるが、制御に必要な計算量が膨大でプログラムが複雑になるため制御用コンピュータの負担が大きく歩行速度が遅くなりがちである。しかし、最近のコンピュータ技術の発展により小型で高速大容量のコンピュータが利用できるようになってきている。また、この方式では凹凸地形に適応するため常に脚の位置を計算して制御するので、脚の接地地点の軌跡から地形の凹凸を測量することができるという利点がある。

以上の理由により、ソフトウェア制御方式を採用することにした。

(5) 動力源

動力源としては、油圧式は出力は大きい動力ユニットも含めると重量が大きくなるため、コンピュータ制御に適した電動式を採用することにした。

(6) アクチュエータの配置

一般に歩行式ロボットは胴体にアクチュエータを搭載しているものが多いが、水中調査ロボットでは駆動トルクを軽減するためにアクチュエータを脚部に配置することにした。

これは、産業用ロボットは可搬重量を大きくするためにアクチュエータを基部に集中させているものが多いのに対して、歩行式ロボットは足先を支点として本体を支

えるため胴体よりも足先に近い脚部に重量を配分した方が関節に生じるモーメントを小さくできるためである。

この方式を採用することにより、胴体には各種調査機器用のスペースを確保することができ、また、防水化の容易な構造とすることができるという利点も生じる。

2.3 ハードウェア

(1) 構成

水中調査ロボット実験機はロボット本体、駆動盤、制御装置から成る。本体の主材質は耐食アルミニウムである。制御用コンピュータとしては16ビットのパーソナルコンピュータを用いた。ロボット本体と母船上に置かれる制御装置はケーブルで接続される。

(2) 脚の構造

図-3に陸上用実験機(1号機)の脚の構造図を示す。脚の構造は、脚部へ重量を分散し、また、防水構造化を容易にするために、脚の内部にモータを有し、各関節は減速機のみを介してモータで駆動されるセミダイレクトドライブ方式を採用した。

各脚は、脚先を任意の位置へ動かすには3自由度が必要なために3個の関節を有している。本体側から第1番目の関節の回転軸は垂直で、第2、第3番目の関節の回転軸は水平である。歩行装置部は全体で6脚分、計18台のモータを有している。脚先部には、地面の傾斜に従動する球面座を介して足部が取付けられている。また、脚の先端には接地センサが装備されており、地面に接触しているかどうかを検出できる。これにより凹凸地形に適応することができる。

(3) モータの制御方式

モータの制御は、制御用コンピュータからのパルス発生を制御するのみで正確な制御ができるサーボドライブを用いる方式とした。この方式は脚の位置情報をフィードバックするエンコーダ信号を制御用コンピュータで処理する必要がないため、歩行の高速化に寄与している。

歩行式水中調査ロボットの開発 -(第2報)軽量防水型実験機の設計-

とができる。

b) マンマシンインターフェース

このプログラムは対話式になっており、オペレータはメニューにより機能を選び必要な情報を入力するだけで良く、自動的に動作に必要な脚先座標値が順次計算され、即時に動作が行われる。

誘導なしの場合は歩行方向(絶対方位、歩行区域座標系、ロボット座標系のどれでも選択できる)と歩行距離、誘導ありの場合は歩行目標点のXY座標を与えるだけでよい。また、凹凸測定を行いたい区域の頂点の座標と測定の幅を与えると、測線を自動的に生成し、測線に沿って順次歩行を行う機能も持っている。これを面走歩行機能と称している。また、その場回転の場合は回転角を入力する

歩行はロボットが各センサーからの情報をリアルタイムで判断して自動的に行われる。歩行の際の歩幅、足を上げる高さは機構上許される範囲内で自由に設定できる。

c) 凹凸測定機能

凹凸面上でも常に胴体は水平または任意の角度に保たれる。脚の位置は制御用コンピュータで常に把握しているので脚先の軌跡を図化することにより、歩行した地面の凹凸を表示することができる。このように、歩行運動により単に移動機能だけではなく歩行した地面の凹凸計測機能をも実現した点が、本ロボットの大きな特徴である。

3. 軽量防水型実験機の基本設計

3.1 目標性能

防水型実験機(2号機)の寸法・重量では母船として200tクラスの調査観測船程度の船が必要である。これは防水型実験機(2号機)の重量が大きいため大型の投入揚収用クレーンが必要なことと、ケーブル巻取装置の寸法が大きいためである。これらが解決すれば小型船に搭載できる可能性がある。

このため小型船に搭載できることを念頭に、軽量防水型実験機(3号機)の目標性能を、寸法・重量、揚収装置、所要電力について考察し、防水型実験機(2号機)での経験をもとに参考値を以下のように設定した。

ロボットの投入揚収を1t吊程度のクレーンで可能とするため、ロボット本体重量は空中320kgf、水中150kgf程度とする。防水型実験機(2号機)と同等の凹凸面を歩行できるように脚長は1.5mとするが、保管時寸法はL1250×W1000×H1100(mm)程度とする。

複合ケーブルによりロボットを吊り下げることができ

るように、ケーブル空中重量は1.7kgf/m、ケーブル許容張力は1500kgf、ケーブル取付金具引留強度は1000kgfとする。ただし、巻き上げのためにはケーブル・トラクション装置が別途必要である。

ケーブル巻取装置は、現状では小型化は難しいので当面は使用せず、ケーブルを8の字に巻いて置いておき人力で取り扱うものとする。

電源は電圧100Vの交流電源とし、ロボットの定格出力状態で容量3kw以内とする。

制御装置は新規に製作すれば、技術的な困難なしに体積で防水型実験機(2号機)のもの3/5程度の小形化が可能であるが、当面は防水型実験機(2号機)と共用することにする。

3.2 基本設計思想

(1) 関節構造

水中調査ロボットの軽量化を行うために最も重要な要素は主要メカニズムである関節の小型軽量化である。このため改良型関節構造を考案した。

従来型関節構造を図-6、改良型関節構造を図-7に示す。

改良型関節構造は、従来は多数の単純な形状の部品から構成されていた関節部を、内部部品に合わせた少数の複雑な形状の部品で構成することにより、関節部のデッドスペースを少くして小型化したものである。

また、従来型関節構造はモータと減速機が一体化したフランジ付きのアクチュエータを脚内に収納していたが、改良型関節構造ではモータと減速機をそれぞれ別個に関節の中に組み込むため、フランジがないので脚を細くすることが可能である。

(2) モータ

モータの選定は、関節構造を小型軽量化する場合、重要な要素である。小出力のモータを採用すると関節トルクの絶対値は減少する。しかし、ロボットの小型軽量化に大きく寄与するので、関節トルクの減少以上にロボットの水中重量、慣性質量、流体抵抗が軽減できれば、かえってロボットの歩行速度を高速化できる可能性もある。このため防水型実験機(2号機)より小出力のモータを採用することにした。

また、防水型実験機(2号機)と制御装置を共用するため、軽量防水型実験機(3号機)に採用するモータは、ハーモニックドライブ社製のものを採用することとした。

(3) 減速機

各種の減速機について、小型軽量化にはどの方式が適しているかを以下の組合せについて、改良型関節構造の試設計を行い図面上などで検討を行った。

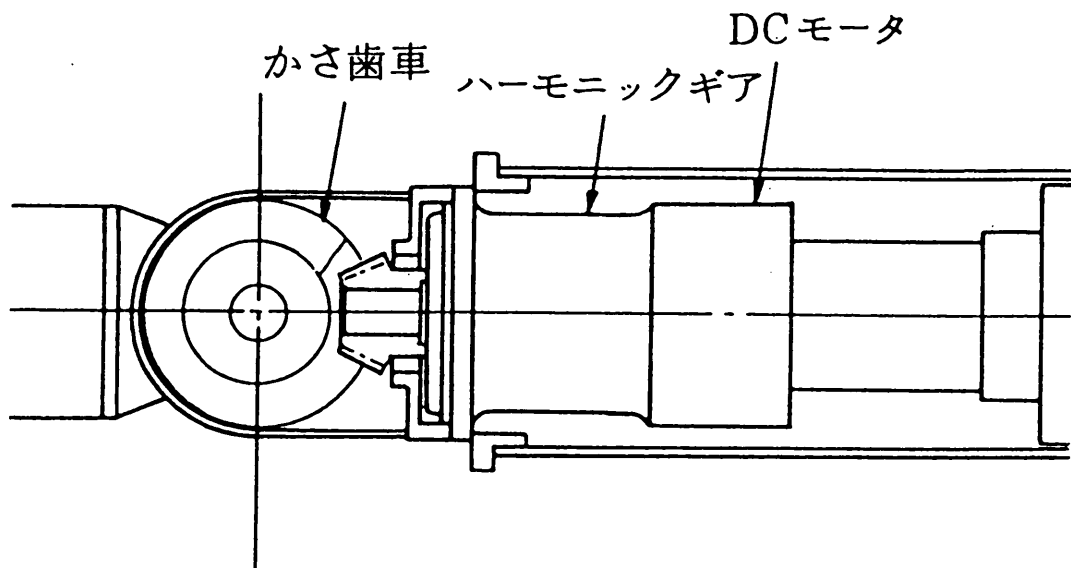


図-6 従来型の関節構造

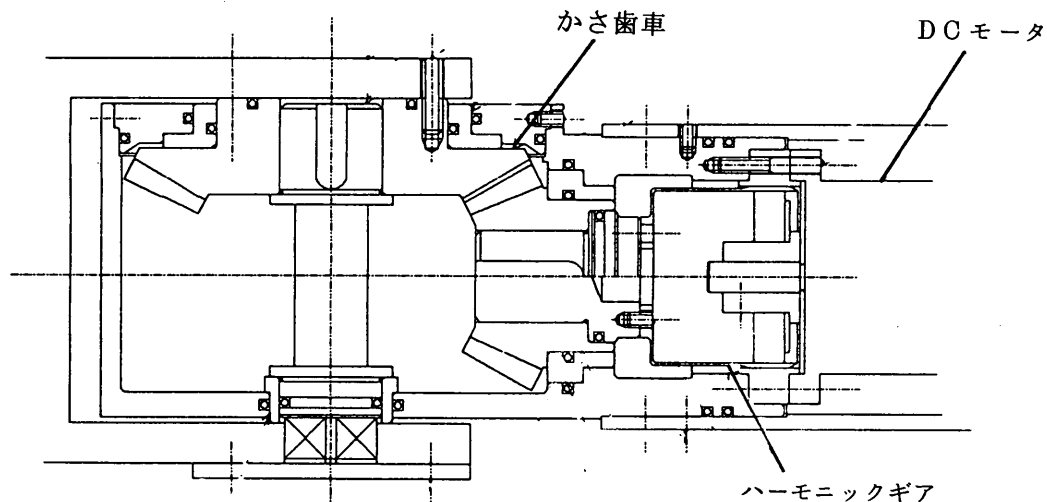


図-7 改良型の関節構造

- ①ハーモニックギヤと傘歯車（現行の組合せ）
- ②ハーモニックギヤとウォームホイールギヤ
- ③ウォームホイールギヤ単体
- ④ウォームホイールギヤとその他のギヤの組合せ
- ⑤遊星ギヤなどの各種ギヤの組合せ

設計条件は以下のようなものである。

a) 関節全体の合成減速比は、1：200～1：800であること。

これは、モータの最大出力トルク発生時に回転数が800

rpmであるのに対して、歩行速度を速くするためには各関節について1rpm以上の回転速度が必要であるからである。

また、減速比が小さすぎると、関節トルクが小さくなるだけでなく、エンコーダの分解能が1/100回転程度であるため関節角度の制御精度が悪くなるからである。

b) 関節単体として、より小型軽量のものであること。

これは、水中調査ロボットは脚関節を18個有するため、

歩行式水中調査ロボットの開発
－(第2報) 軽量防水型実験機の設計－

1個の関節の重量増はその重量増にともなう補強などを含めると全体として18倍以上の重量増になってしまうからである。

c) 関節内にケーブルを通すことが可能であること。

これの必要性については(5)で後述する。ただし関節内にケーブルを通せるように設計することによる関節の重量増加が少ないことが必要である。

d) 関節可動角度が最小で $\pm 90^\circ$ であること。

これは、水中調査ロボットは昆虫型の脚を有するため、関節の可動角度がより大きいほうが運動の制限が小さく凹凸適応能力が上がるからである。ただし、歩行動作のためには $\pm 90^\circ$ 以上の関節可動角度は必要ない。

e) 回転軸方向を 90° 変換できること。

これは、水中調査ロボットは脚の内部にアクチュエータを内蔵させるため回転軸方向を 90° 変換できないと関節の軸方向(関節の左右外側)にモータがはみ出すので、他の脚との干渉により動作範囲が制限されるからである。

f) 市販の規格品であること。

これは、市販の規格品を使用せずに特注した場合、製作期間が長期化し、また、補修部品の入手が困難になるからである。

以上の観点から考察した結果は以下のとおりである。

①の組合せは、a)～f)について問題点は存在しない。特に、b)については、小型軽量の設計が可能である。

②の組合せは①の組合せに比べて以下の理由により重量が重くなりb)を満足しない。

・ウォームホイールギヤは、ウォームギヤのスラスト方向にかかる荷重を受けるためにギヤケース(関節本体)に高い剛性が要求されること。

・ウォームホイールギヤは軸が交差していないためd)を満足するために可動角度を大きく取ろうとすると関節保持部を大型化しなければならない。このため関節可動角度の割に大きなデッドスペースが生じ、関節保持部の大型化により剛性が必要となるため重量が増加すること。

③では、上記②の問題点に加えて、減速比が最大で1:100程度と小さくa)を満足できない。また、伝達効率も悪いため関節トルクが不足する。

④の組合せは、基本的に②と同様の問題点があげられる。

⑤は、1段ではa)を満足する減速比を得ることは難しい。減速機を多段にした場合は重量、体積が著しく増加する。

以上の考察により、改良型関節構造は、一次減速にハー

モニックギヤを用いて減速を行い、二次減速に傘歯車を用いて減速と回転方向の変換を行う防水型実験機(2号機)と同一の方式を採用するものとする。

(4) 組立て

各部品の組立ては、ナットを使用せず、部材にメネジを切ってヘリサートを用いて補強する手法を取るものとする。

(5) 関節内ケーブル方式

防水型実験機(2号機)では関節と胴体を接続するケーブルが外部に露出している。関節内にケーブルを通すことができれば、防水コネクタ、耐圧ケーブルを使用しなくてよいので軽量化ができ、また、ケーブルが外部に露出していないため、障害物と接触した場合にケーブルが破損するなどの事故を回避できる。さらに、外部の凹凸が減るため流体抵抗が減少し、歩行速度の向上に寄与する。

よって、可能な限り関節内部にケーブルを通す設計を行う。

(6) 全関節同一構造

従来方式では第1関節は傘歯車を使用していないため第2、3関節に比べて出力トルクが小さかった。これは、胴体を水平に保って歩行する場合は大きな第1関節出力トルクは必要としないからである。しかし、登坂能力を高めるため胴体を傾けた状態で歩行する場合はより大きい第1関節出力トルクが必要となる。よって、第1関節も第2、3関節と同一構造にして同じ出力トルクとする。これにより、登坂能力が増大する。

また、第1関節と、第2、3関節の構造を共通にできるので、設計、製作の時間が減少し、部品の調達、予備部品の準備も容易になる。

(7) 防水区画の減少

防水区画を減らすために、第1関節のモータ部分を胴体内に収納するものとする。これにより防水用の部品が減るので軽量化できる。

(8) テレビカメラ

ロボット本体に水中テレビ用マニピュレータは搭載せず、テレビカメラを胴体に内蔵し、胴体内部でテレビカメラのパンチルトを行うものとする。

これは、防水型実験機(2号機)のマニピュレータが空中重量約70kgfと重く、かつ、マニピュレータの存在によりケーブル取付金具の設計に制限が生じているからである。また、防水設計された水中テレビカメラを用いるよりも、防水区画である胴体内に一般のテレビカメラを内蔵する方が軽量化に有利であるからである。

マニピュレータがないとテレビカメラの向きが制限さ

れるという問題があるが、ロボットのその場回転機能と傾斜変更機能で補えるので、ロボット本体の軽量化を優先するものとする。

3.3 軽量型防水構造脚の試作

昭和61年度（1986年度）には軽量型防水構造脚を設計・製作した。外観を写真-1（右）、主要寸法形状を図-8、仕様を表-3に示す。これは、小出力のモータを用いて改良型関節構造を採用することにより、関節を小型軽量化し脚部を細くしたもので、全関節同一構造になっている。関節内ケーブル方式にはなっていない。

改良型関節構造を評価するための試作装置であるので極端な軽量設計をしてある。重量は10.9kgfである。

写真-1（左）に比較のため防水型実験機（2号機）の製作に先立ち昭和60年度（1985年度）に試作した防水構造脚を示す。

防水構造脚は空中重量が71kgfであるので、軽量型防水構造脚は防水構造脚と比較して同一脚長でありながら1/6.5に軽量化されている。

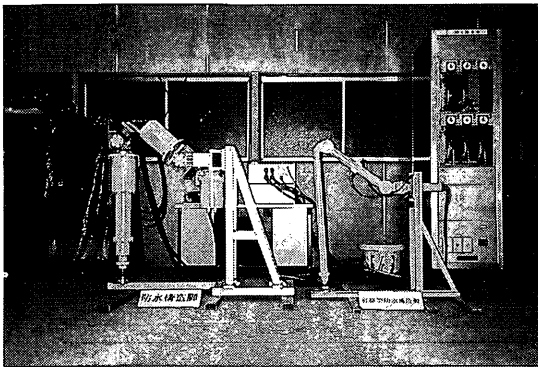


写真-1 軽量型防水構造脚(右)と防水構造脚(左)

軽量型防水構造脚の試作により、改良型関節構造の設計法における問題点を発見した。

まず、過度の小型化を行ったため関節内にケーブルを通せなくなった。1ランク、もしくは、2ランク大型のモータを用いて設計すれば、関節内にケーブルを通すことは可能である。

また、関節のガタが防水型実験機（2号機）に比べて大きくなった。これは、小型化したため全体に対して加工精度による寸法誤差の割合が大きくなったためである。また、小型化のためバックラッシュ防止設計を省略したためである。

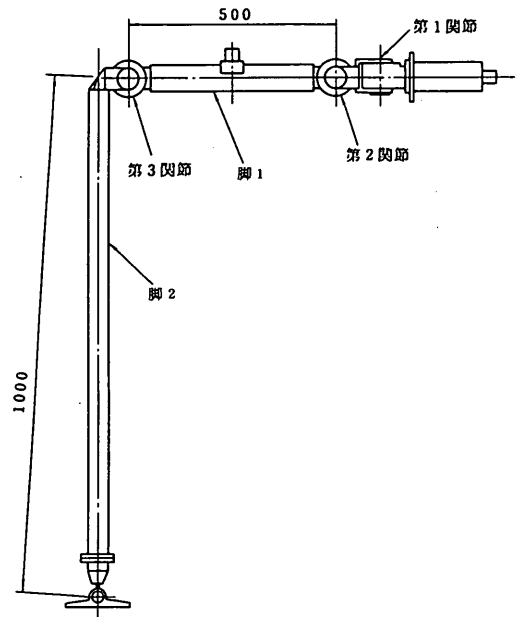


図-8 軽量型防水構造脚の主要寸法形状

表-3 軽量型防水構造脚仕様

関節数	3個（垂直1個，水平軸2個）	
脚長	胴体側50cm，足先側100cm	
重量	10.8kgf	
関節構造	全関節同一構造	
防水	Oリング（航空機用規格）	
関節トルク	3kgf・m	
アクチュエータ形式	DCサーボモータ＋ハーモニックドライブ減速機	
アクチュエータ出力	定格18w	
モータのトルク	定格1.0kgf・cm，最大5.7kgf・cm	
アクチュエータのトルク	定格65kgf・cm，最大200kgf・cm	
減速機	ハーモニックドライブ	減速比1/110
	傘歯車	減速比1/2

歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

小出力のモータを採用することにより全長が短いモータを使用できたので、軸間距離50cmの第2関節と第3関節の間の防水区画にそれぞれの関節のモータを入れることができた。

部品組立上の細かい問題点もいくつか明らかになったが、設計時に留意すれば解決できるものであった。

4. 軽量防水型実験機の詳細設計

軽量型防水構造脚の成果をもとに、軽量防水型実験機(3号機)の詳細設計を行った。この詳細設計はパーソナルコンピュータ上で簡易CADを用いて行った。

4.1 胴体

図-9に胴体の構造を示す。

防水型実験機(2号機)では光電変換装置を収納した直方体を円筒形の胴体内に収納していた。軽量防水型実験機(3号機)ではデッドスペースを減少させるために、光電変換装置の基板の形状を胴体の形状に合わせて隅を切り落とした正方形に設計し、胴体を直接光電変換装置の容器として用いた。

また、ケーブル引き留め部の強度を上げて、ロボットの重量を支えられるようにした。これは、マニピュレータを搭載していないため胴体上面に十分な強度を持つケーブル引き留め部を配置できたためである。

ケーブル引き留め部は交換が容易ではない部分であるため、引張り強度は詳細設計時の予想空中重量約290kgfの3倍以上の1000kgfとした。ケーブル引留部自体の空中重量は35kgfである。

防水型実験機(2号機)では胴体下部に防水コネクタを配置していたため、胴体内底部には水深計のみを配置し、傾斜計、方位計は光電変換装置と胴体殻のすき間に配置したので、センサー配置に自由度がなかった。このことにより、その場回転時の方位測定に加速度の影響が生じるという問題があった。

軽量防水型実験機(3号機)では関節内ケーブル方式の採用により防水コネクタが不必要になったので、胴体内底部をすべてセンサーの設置場所とした。このためセンサーの配置の自由度が大きくなり、胴体中心部に方位計を設置できたので、その場回転時の加速度の影響をな

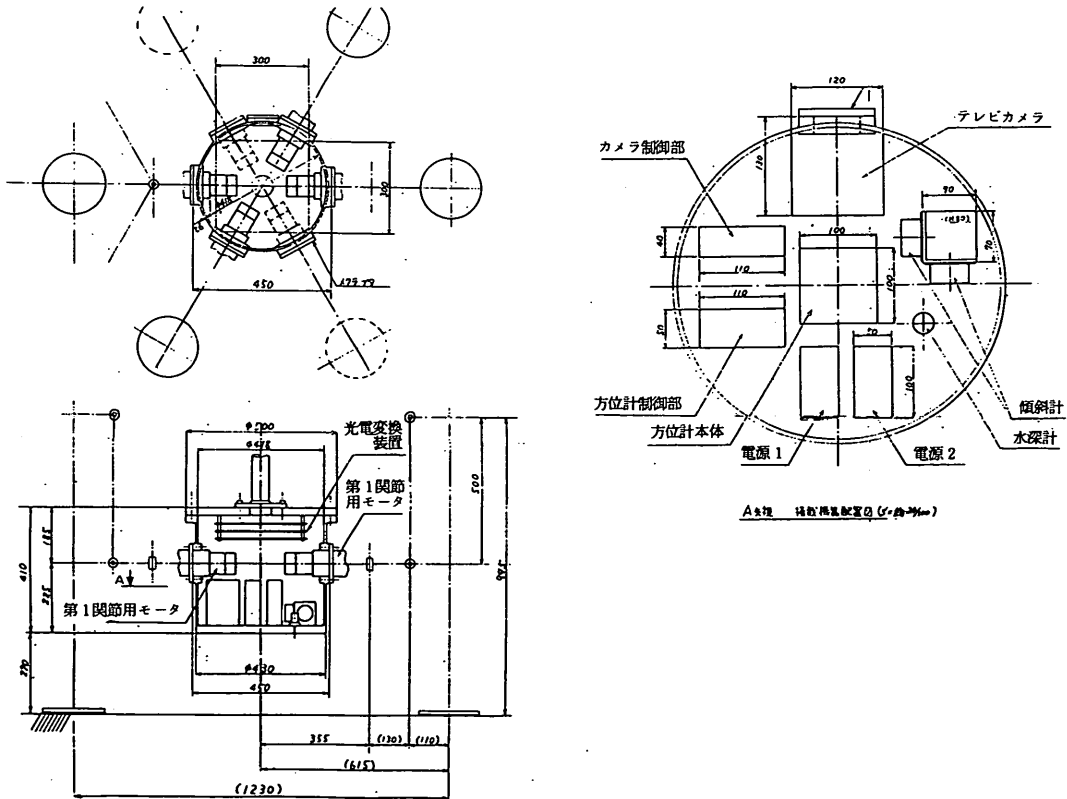


図 - 9 胴体の構造

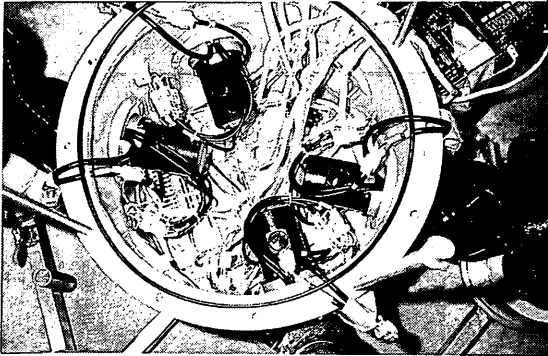


写真-2 胴体内部（光電変換装置の基盤をはずした状態）

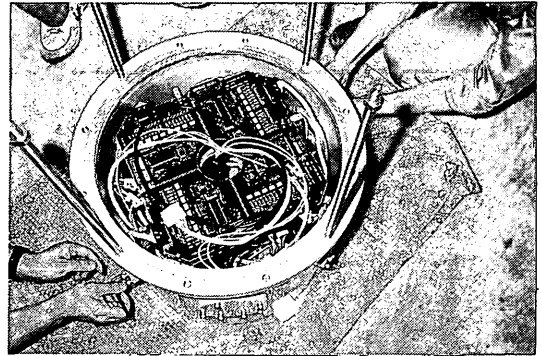


写真-3 胴体内部（光電変換装置の基盤を取り付けた状態）

くすることができる。

また、超小型テレビカメラを胴体内に内蔵し、アクリルドームを通して外部を観察するようにした。胴体内部にはテレビカメラ用のパンチルト装置を設置することにした。

関節内ケーブル方式を用いたことと光電変換装置を直接胴体内に収納したことにより、テレビカメラと第1関節用アクチュエータを内蔵したにも関わらず、防水型実験機（2号機）に比べて胴体を小型軽量化することができた。

胴体内部を写真-2、3に示す。写真-2は4本の脚を取り付けた状態で、第1関節用アクチュエータが見えるよう光電変換装置の基板をはずしてある。写真-3は光電変換装置の基板を取り付けた状態である。

写真-4にテレビカメラを示す。パンチルト装置としてとりあえずチルト装置のみを設置する予定である。

4.2 脚

図-10に脚の主要寸法形状、図-11に関節構造を示す。また、図-12に関節の部品のうち最も複雑な形状を持つギヤケースを示す。

1) 関節内ケーブル方式

胴体と、脚内部のアクチュエータ、接地センサーを結ぶケーブルを外部に露出させずに関節の内部を通して配線した。この関節内ケーブル方式の採用によって、防水ケーブル、貫通金物、防水コネクタが不要となったので、軽量化でき信頼性が向上した。

関節内でのケーブルの取り回しを考え、以下の点を考慮して設計を行った。

- ・全体の組立工程
- ・ギヤに接触、噛みこみをしないこと
- ・ケーブルの太さ、数量、最小曲げ半径、繰り返し曲げ

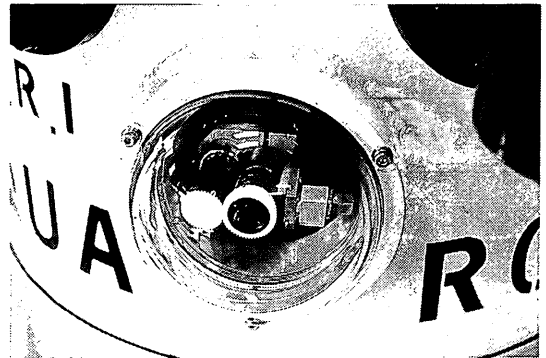


写真-4 胴体内蔵テレビカメラ

に対する強度

- ・関節の動作によるケーブルの運動
- ・断線時の予備線の数量
- ・電磁ノイズ対策のためのシールド
- ・関節分解・組立時の作業性
- ・コネクタの配置、接続スペース、接続に必要なケーブルの余裕長の収納スペース
- ・軸から取り出した後のケーブルの処理

これらの各事項と直接関係する部品は各事項につき数個であるが、その数個の設計変更によって部品の干渉、組立時の作業性、Oリングの規格による寸法の制限などのため、連鎖的に他の多くの部品の設計変更が要求されるため、設計はかなり複雑であった。

2) 全関節同一構造と防水区画の減少

防水区画を減らすために、第1関節のモータ部を胴体内部に配置した。これにより、全関節の同一構造が実現し、かつ、関節内にケーブルを通すことにより防水コネクタが不要となった。

歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

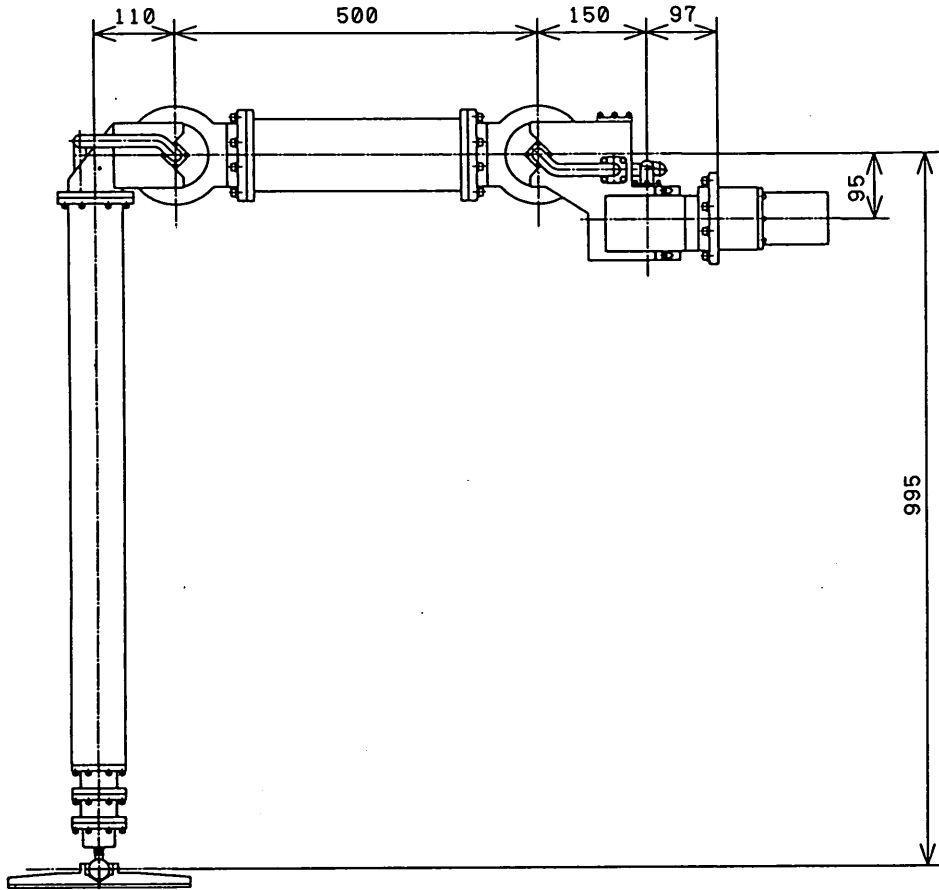


図 - 10 脚の主要寸法形状

全関節の同一構造を採用したことにより、各部品製作、調達が容易になり、また、予備部品が共通化されることによって、保守性が向上した。

軽量防水型実験機（3号機）と防水型実験機（2号機）の関節の比較を写真5～8に示す。写真-5, 6は第1関節、及び、第2関節、写真-7, 8は第3関節である。

3) 接地センサー部

リミットスイッチの選択・配置の自由度の増大、信頼性の確保、接地センサー部の小型化のため、接地センサー部の設計を変更した。

防水型実験機（2号機）では水圧の変化による影響をなくすため、水の入る部分に防水型のリミットスイッチを設置していた。

軽量防水型実験機（3号機）では、防水区画内に防水型でないリミットスイッチを設置することとし、貫通部

の断面積を非常に小さくすることにより水圧の影響を減少させる方式とした。

4.3 足部

防水型実験機（2号機）製作時の足部の可動角度は陸上用実験機と同じく±45度であった。防水型実験機（2号機）は昭和62年度（1987年度）の横須賀港実海域実験で足部が捨石のすきまに入り込む現象が見られたので、軽量防水型実験機（3号機）の足部可動角度は±25度とし、それ以上動かないようにストッパを設けた。改造以前の防水型実験機（2号機）の足部を図-13、写真-9、軽量防水型実験機（3号機）の足部を図-14、写真-10に示す。

この軽量防水型実験機（3号機）の足部構造は、防水型実験機（2号機）の平成元年度（1989年度）改造時に採用しており、平成元年度（1989年度）の釜石港実海域実験にて有効性が確認されている。ただし、足部の寸法

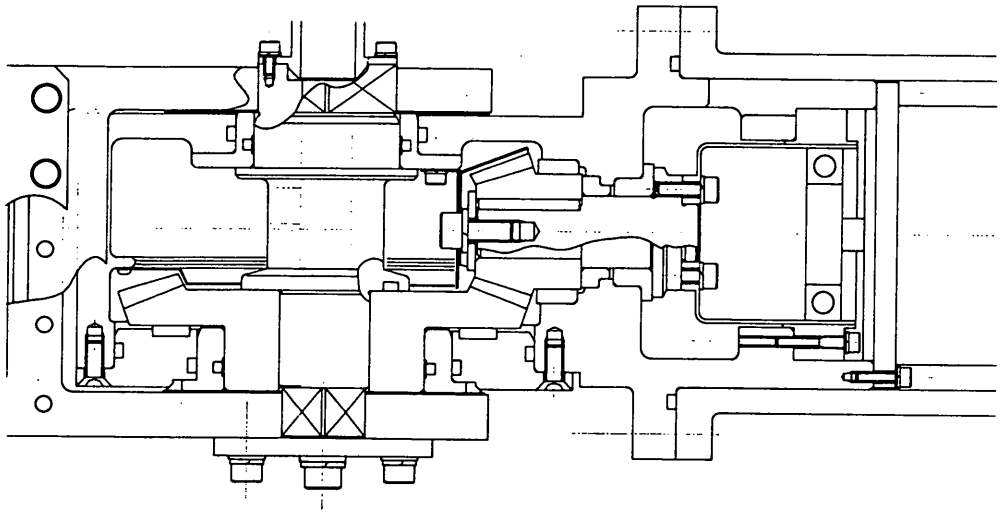


図-11 関節構造

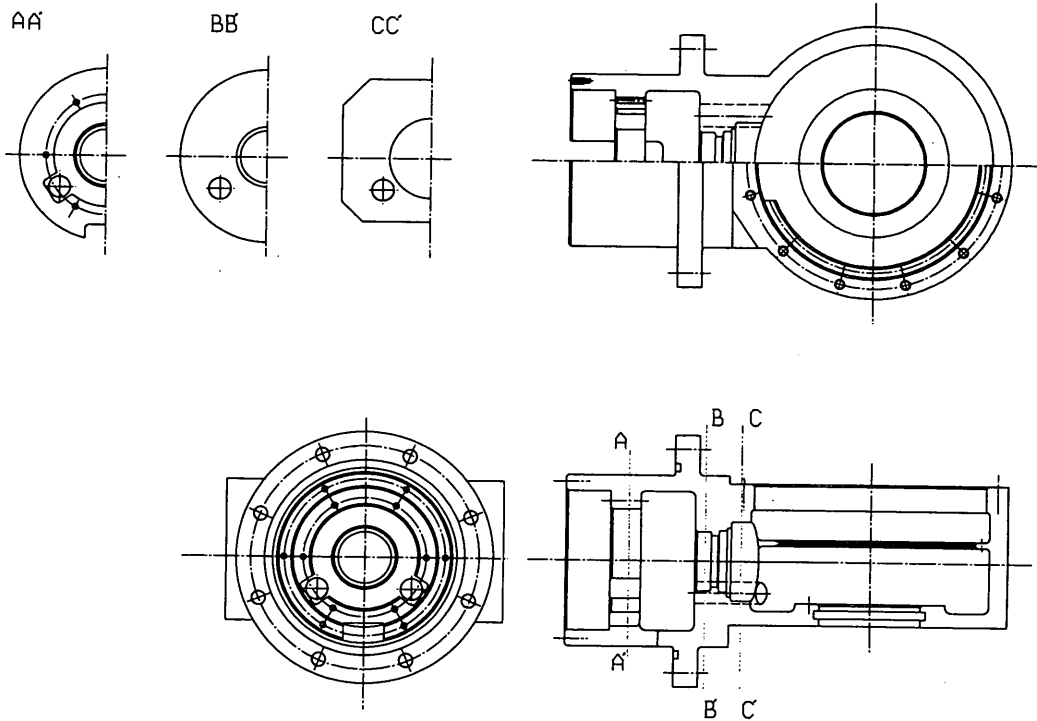


図-12 ギヤケース



図-5 改造以前の防水型実験機(2号機)の第1関節と第2関節

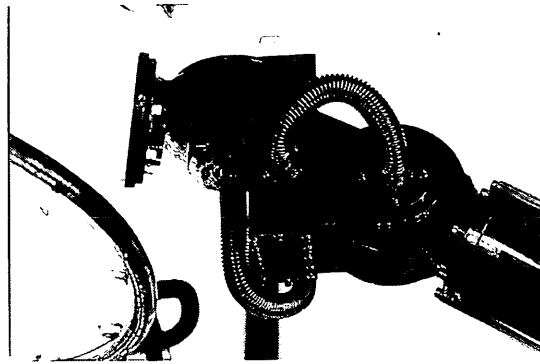


図-6 軽量防水型実験機(3号機)の第1関節と第2関節



図-7 改造以前の防水型実験機(2号機)の第3関節

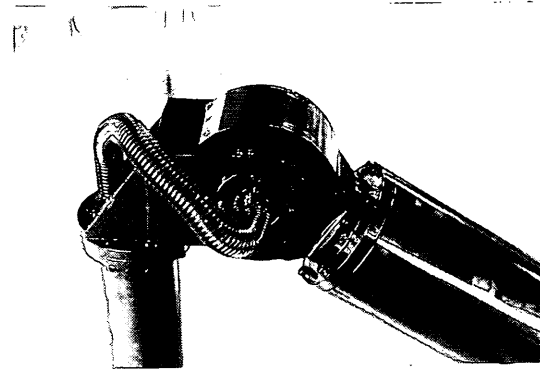


図-8 軽量防水型実験機(3号機)の第3関節

は、軽量防水型実験機(3号機)は直径25cm厚さ2cmであるのに対して、平成元年度(1989年度)改造後の防水型実験機(2号機)は直径45cm厚さ8.5cmである。

4.4 架台

軽量防水型実験機(3号機)の保管・輸送・初期位置設定用の架台を図-15に示す。脚を折り曲げて架台に着座することにより保管時のスペースを小さくしている。また、架台には足部の固定装置、吊上げ金具の取付穴、大型のキャスター、架台移動防止装置等を備え、輸送時の取扱いを容易にした。写真-11に架台着座状態の軽量防水型実験機(3号機)を示す。比較のため写真-12に架台着座状態の防水型実験機(2号機)を示す。

4.5 塗装

テレビカメラを胴体に内蔵したため脚の間から撮影することになるので、ハレーション防止のため脚は黒色に塗装することにした。足部と胴体は水中での視認性の確保のため黄色に塗装することにした。

5. 軽量防水型実験機の製作と実験結果

昭和62~63年度(1987~1988年度)に軽量防水型実験機(3号機)を製作し水槽実験を行った。

5.1 製作

製作した軽量防水型実験機(3号機)の仕様を表-4、主要寸法形状を図-16に示す。胴体内テレビカメラのチルト装置はまだ装備されていない。

防水型実験機(2号機)と軽量防水型実験機(3号機)の比較を写真-13, 14及び表-5に示す。防水型実験機(2号機)は平成2年度(1990年度)改造後の仕様である。表-5には参考のため昭和59年度(1984年度)に製作した陸上用実験機(1号機)も示してある。

軽量防水型実験機(3号機)は防水型実験機(2号機)に比べ空中重量で約1/3、水中重量で約2/5に軽量化できた。

防水型実験機(2号機)には水中重量を調整するために浮力125kgfの直付け浮体を取り付けられている。こ

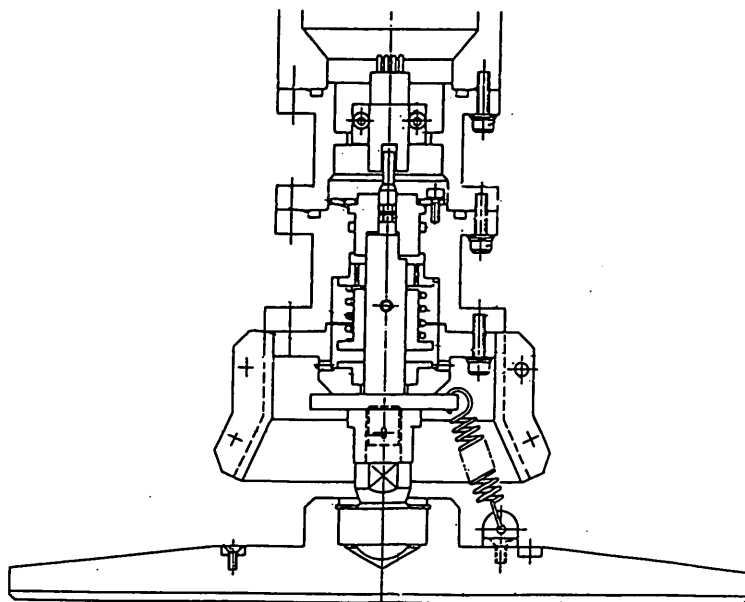


図-13 改造以前の防水型実験機（2号機）の足部

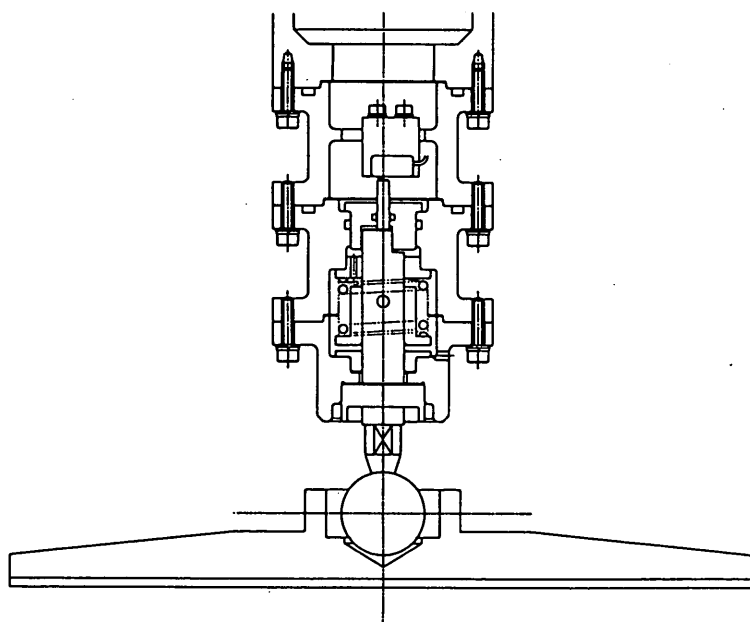


図-14 改良防水型実験機（3号機）の足部

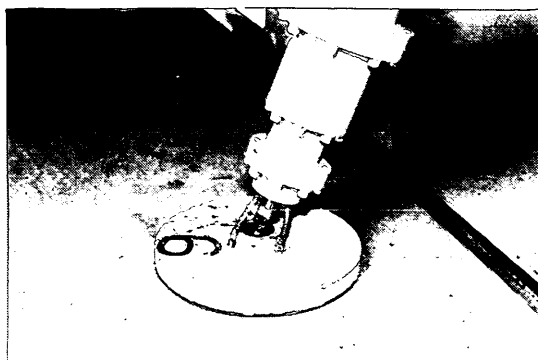


写真-9 改造以前の防水型実験機（2号機）の足部

の直付け浮体を取り外した状態で比較すると、水中重量で約1/4に軽量化できたことになる。

防水型実験機（2号機）と共用の制御装置を写真-15、仕様を表-6に示す。

5.2 水槽実験結果

軽量防水型実験機（3号機）の水槽実験の状況を写真-16、実験結果を表-7に示す。表-7には比較のため防水型実験機（2号機）の実験結果も示してある。実験は水槽内平面上で平面歩行専用プログラムを用いて行い、センサー情報のフィードバックは行っていない。水槽の寸法は幅4×長さ12×深さ3(m)である。水槽実験は清水で行った。

軽量防水型実験機（3号機）の最大歩行速度は、直進で毎分8.7m、その場回転で毎分635度であった。防水型実験機（2号機）の最大歩行速度は直進で毎分6.5m、その場回転で毎分216度であるので、軽量防水型実験機（3号機）は防水型実験機（2号機）よりも小出力のモータを使用したにもかかわらず直進歩行速度は約1.3倍、その場回転速度は約3倍に向上した。

これはモータの出力減少以上に慣性質量と流体抵抗の減少の影響が大きいためであると考えられる。表-5で防水型実験機（2号機）と軽量防水型実験機（3号機）の「関節トルク/水中重量」を比較すると、第2、3関節はあまり変わらないのに対して第1関節は5倍になっている。その場回転速度の向上が大きいのはこのためであると考えられる。

水槽内では歩行距離を長くできないため歩行時間が短い。このため歩行時間の測定誤差が大きくなる。平面歩行専用プログラムはセンサー情報のフィードバックを行っていないので、実際にロボットを作動させてもさせなくても作動時間は変化しない。そこで、実際に行った歩行実験と同じ歩行パラメータでロボット制御用パーソナル

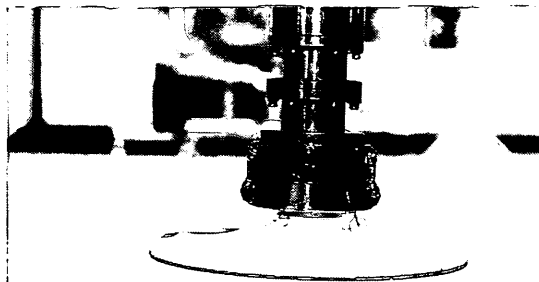


写真-10 軽量防水型実験機（3号機）の足部

コンピュータのみを動作させ、長い指令歩行距離を入力して歩行時間を測定した。

歩行時間の測定は以下の点に注意して行った。

平面歩行専用プログラムは最初の1歩は胴体を移動させずに脚を踏み出すだけになっているのでこの時間は除いて2歩目から測定した。

また、平面歩行専用プログラムは歩行終了時に脚を揃える動作をする。この影響は歩行距離によって相対的に変化する。この影響をなくし定常歩行状態での歩行速度を測定するために、2歩目から残り歩行距離または角度が0になるまでの時間を測定した。

軽量防水型実験機（3号機）の場合は、さらに精度を上げるため、歩行距離1200cmを指令して200cmから1200cmまでにかかった時間を測定し、1000cmを歩行するのに要する歩行時間とした。

歩行速度は、以上のようにして測定した歩行時間と指令した歩行距離から算出した。

6. 考察

軽量防水型実験機（3号機）は軽量化を最優先に設計した試作機であり、開発の過程で小型軽量化の効果と実用機設計上の注意事項を明らかにすることができた。

また、マニピュレータについても考察を行った。

6.1 小型軽量化の効果

1) 歩行能力

小型軽量化による慣性質量と流体抵抗の減少によって小出力のアクチュエータで歩行が可能となっただけでなく、歩行速度はかえって速くなった。

防水型実験機（2号機）に比べて軽量防水型実験機（3号機）はアクチュエータの最大トルクが第1関節で約2/3、第2、3関節で約1/3であるにもかかわらず、平面上の歩行速度が直進で約1.3倍、その場回転で約3

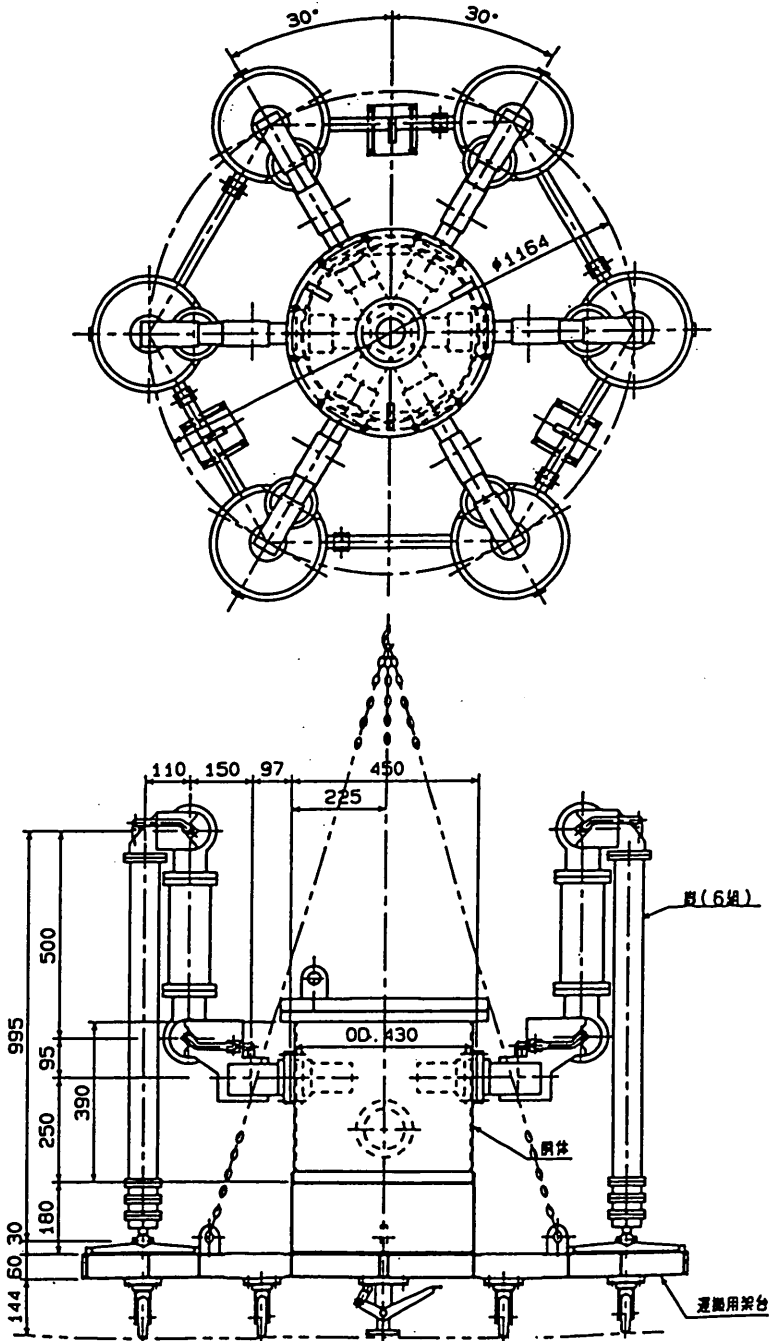


图-15 架 台

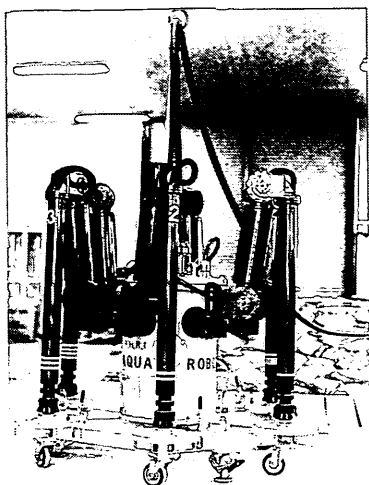


写真-11 架台着座状態の軽量防水型実験機(3号機)

倍に向上した。

これはアクチュエータの出力減少以上に慣性質量と流体抵抗を減少させることができたからである。

2) 消費電力

小型軽量化により消費電力が小さくなった。

最大出力時の消費電力は、防水型実験機(2号機)が75V 136Aであるのに対して軽量防水型実験機(3号機)は75V 90Aで、約2/3となった。これは、小型軽量化により関節駆動用のモータとして出力の小さいものを採用できたからである。

3) 取扱い

小型軽量化により取扱いが容易になった。

架台着座状態の軽量防水型実験機(3号機)は1人で移動させることができる。これは、ロボットの軽量化とともに、大型キャスター付きの架台の効果大きい。防水型実験機(2号機)は移動のために2~3人が必要であった。

また、軽量化により3箇所の架台移動防止装置として、ロック及びロック解除を足で踏む方式のものを採用することができた。防水型実験機(2号機)の架台はしゃがんだ姿勢で工具を用いて作業しなければならなかった。

6.2 実用機設計上の注意事項

軽量防水型実験機(3号機)の設計手法を用いて実用機を設計する上での注意事項が明らかになった。注意事項は、小型軽量化そのものに伴う注意事項と軽量防水型実験機(3号機)の設計手法に関する注意事項に分けられる。

1) 小型軽量化そのものに伴う注意事項

(a) 水中での安定性

ロボット本体を軽量化することにより水中重量が小さくなるので、ロボット本体及びロボットのケーブルに加わる潮流力の影響が相対的に増大する。このため、足裏

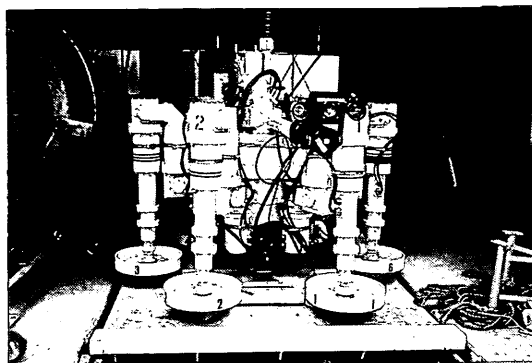


写真-12 架台着座状態の防水型実験機(2号機)

の接地圧が低下して接地センサーの作動が不安定になったり、ロボットの安定性が減少する可能性がある。

実際の安定性については軽量防水型実験機(3号機)の実海域実験で確認する必要があるが、対策としてはロボットのケーブルを細くして流体抵抗を減少させること、及び、ロボットのデッドスペースをさらに減らして空中重量を増加させずに水中重量のみを増加させることが考えられる。しかし、この方法による改善効果は比較的小さいものと考えられる。なぜなら、ロボットのケーブルは内部構造から考えると直径で現状の2割減程度が限界であると考えられ、また、軽量防水型実験機(3号機)のデッドスペースは既に少なくさらに減少させる余地は小さいと考えられるからである。

このため、別の対策としてロボット本体の転倒モーメントを大きくするために重量を脚先へ分散させることが考えられる。具体的には、軽量防水型実験機(3号機)では第2関節と第3関節の間(脚1)にある第3関節用モータを、防水型実験機(2号機)と同様に第3関節の足部側(脚2)へ移動させること、及び、足部に歩行の妨げにならない程度の重量物を付加することが考えられる。これらの方法は軽量防水型実験機(3号機)の防水区画が少なく重量が軽いという特徴を損なうので、水中安定性と小型軽量化のどちらが重要かを考慮して採用する必要がある。

(b) 強度・耐久性

軽量化設計によって一般的には強度・耐久性の低下が生じる可能性がある。

このため強度設計を十分に行う必要があるが重量が増加しがちである。設計時に部品交換の容易な構造としておき、寿命が短くても軽量化した部品を交換して使うことにより軽量化のメリットを生かすという考え方もある。

表-4 軽量防水型実験機(3号機)仕様

型 式	軸対称6脚歩行式昆虫型(各脚3関節)
関節駆動方式	DCサーボモータによるセミダイレクトドライブ
制 御 方 式	パーソナルコンピュータによるソフトウェア制御
歩行可能凹凸	±35cm
防 水 性 能	水深50m
主要材質	耐食アルミニウム
重 量	約280kgf(空中), 約100kgf(水中)
寸 法	胴体 直径43cm 高さ45cmの円筒形, 脚長 胴体側50cm 足先側100cm, 足部直径 25cm, 足部球面軸受可動角度 ±25度(全周)
関 節 数	脚18(3関節×6脚)
アクチュエータ	直流電動モータ
歩行用アクチュエータ出力	定格出力80W(全関節同一)
使用センサー	接地センサー6(脚先端) 傾斜計2, 方位1, 水深計1(胴体内)
そ の 他	関節部のケーブルを内部収納
テレビカメラ仕様	
型 式	チルト装置付き(予定)超小型カメラをロボットの胴体内に蔵し, アクリルドームから撮影
製 品 名	松下通信工業 WV-CD2
撮 像 素 子	CCDカラー(1/2インチ)
水平解像度	330本
最低被写体照度	19ルクス(F1.8)
レ ン ズ	焦点距離7.5mm, F1.8, 最短撮影距離7cm, 画角 水平46度, 垂直35度(空中)
カメラヘッド寸法・重量	直径20×長さ67(mm) 40g
制御装置寸法・重量	幅138×高さ44×奥行き169(mm) 950g
水中投光器	ハロゲン300W×2
方位計仕様	
形 式	ジャイロコンパス
製 品 名	東京計器 TSG-10X
静止点誤差	±1度×SEC(λ)(λは, 緯度)
標準誤差(変動誤差)	0.2度×SEC(λ)
静 定 時 間	2時間
最大追従速度	80度/秒
方位分解能	0.1度
許 容 傾 斜	±30度
使用速度	5 km/時間以下
ロータ回転数	24,000rpm
使用温度範囲	-10~60℃
電 源	AC100V ±10%
消費電力	MAX 20W
本体寸法・重量	直径100×高140(mm)の円筒型1.2kg
制御部寸法・重量	幅150×高50×奥行100(mm) 1.5kg
接地センサー仕様	
形 式	光学式リミットスイッチによるストローク検出
リミットスイッチ製品名	立石電機 フォトマイクロセンサ EE-SX670
ストローク	検出ストローク0.5mm 指示ストローク3mm
傾斜計仕様	
形 式	静電容量形重力式(可動部なし)
製 品 名	米国シャピッツ社 アークユスター・クリノメーター PN02338-03
寸 法	φ48.4×27(mm) フランジ径66mm
重 量	70g
傾 斜 角 度	線形範囲±45度 測定範囲±60度
直 線 性	±0.1度(0~10度), 1%(10~45度)
分 解 能	0.001度
時 定 数	0.3秒
水深計仕様	
形 式	拡散形半導体圧力センサー
製 品 名	コバル電子 PA-500-502G-10
寸 法	φ28×51(mm)
重 量	70g
圧力範囲	0~5 kgf/cm
直線性/ヒステリシス	0.5%max
温度ドリフト	0.1%/℃max

歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機的设计 -

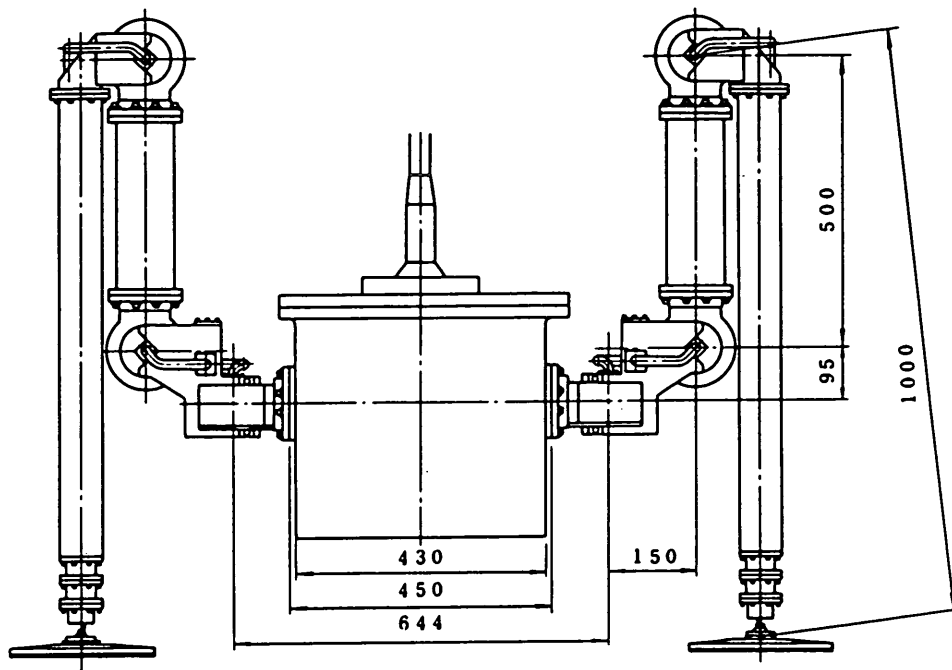


図-16 軽量防水型実験機(3号機)の主要寸法形状

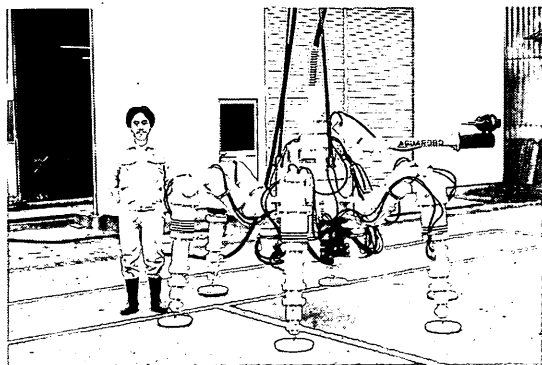


写真-13 防水型実験機(2号機)

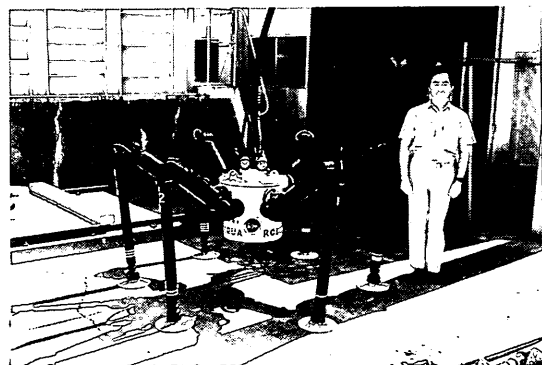


写真-14 軽量防水型実験機(3号機)

2) 設計手法に関する注意事項

(a) 改良型関節構造

改良型関節構造はデッドスペースを減らしてあるため脚内のモータ収納部の空間的余裕が少なく、組立・分解が容易ではない。この部分を分解して、第2、第3関節のモータ、ハーモニックギヤの取付けを行うので実用機ではメンテナンスを考慮した設計が必要である。また、この部分にモータ配線のコネクタが収納されるので組立時にコネクタがはずれないよう注意する必要がある。

(b) 関節内ケーブル方式

関節内ケーブル方式は外部からのトラブルに対しては強いが、ケーブルの交換は容易ではない。

実用機では、繰り返し曲げ強度の高い電線を使用するだけでなく、関節の分解とケーブルの交換を考慮した設計が必要である。

(c) ケーブル処理

軽量防水型実験機(3号機)は関節内ケーブルを採用したことに伴い関節のケーブル出口を強度部材であるパ

表-5 水中調査ロボット実験機比較表

	陸上用実験機 (アクアロボ1号機)	防水型実験機 (アクアロボ2号機)	軽量防水型実験機 (アクアロボ3号機)
製作年度	昭和59年度 (1984年度) 製作 昭和60年度 (1985年度) 改良	昭和61年度 (1986年度) 製作 昭和63年度・平成1～2年度 (1988～1990年度) 改造	昭和62～63年度 (1987～1988年度) 製作
重量	280kgf (空中)	902kgf (空中)262kgf (水中)通常型テレビカメラ込み	280kgf (空中) 100kgf (水中)
寸法	胴体 一辺25cm高さ16cmの6角柱 脚長 胴体側25cm 足先側50, 55, 60cmの3種類 脚断面 一辺13cmの四角形 足部直径16cm 足部球面軸受可動角度±45度 (全周) ±17.5cm	胴体 直径50cm高さ77cmの円筒形 脚長 胴体側50cm 足先側100cm 脚断面 直径18cmの円形 足部直径 45cm 足部球面軸受可動角度±25度 (全周) ±35cm	胴体 直径43cm高さ45cmの円筒形 脚長 胴体側50cm 足先側100cm 脚断面 直径13cmの円形 足部直径 25cm 足部球面軸受可動角度±25度 (全周) ±35cm
歩行可能凹凸	—	水深50m	水深50m
防水性能	—	—	—
歩行用アクチュエータ出力	第1関節 定格出力 80W 第2・第3関節 定格出力120W	第1関節 定格出力120W 第2・第3関節 定格出力250W	第1・第2・第3関節 定格出力80W (全関節同一)
関節構造	第1関節は傘歯車なし, 第2・第3関節は傘歯車使用 第2・第3関節の傘歯車の減速比1/3	第1関節は傘歯車なし, 第2・第3関節は傘歯車使用 第2関節傘歯車減速比1/3, 第3関節傘歯車減速比1/2	第1・第2・第3関節すべて傘歯車使用 (全関節同一構造) 第2・第3関節の傘歯車の減速比1/3
アクチュエータ位置	第1関節用アクチュエータを胴体上部に取付け 第2関節用アクチュエータを胴体側に収納 第3関節用アクチュエータを脚部足先側に収納	第1関節用アクチュエータを脚部胴体側に収納 第2関節用アクチュエータを脚部胴体側に収納 第3関節用アクチュエータを脚部足先側に収納	第1関節用アクチュエータを胴体内に収納 第2・第3関節用アクチュエータを脚部胴体側に収納 脚部足先側は空洞
アクチュエータトルク	第1関節用定格トルク1.7kgf・m, 最大トルク7.4kgf・m 第2関節用定格トルク4.3kgf・m, 最大トルク16kgf・m 第3関節用定格トルク4.3kgf・m, 最大トルク16kgf・m	第1関節用定格トルク2.6kgf・m, 最大トルク10.5kgf・m 第2関節用定格トルク6.5kgf・m, 最大トルク24.0kgf・m 第3関節用定格トルク6.5kgf・m, 最大トルク24.0kgf・m	定格トルク1.7kgf・m, 最大トルク7.4kgf・m
関節トルク	第1関節用定格トルク 1.7kgf・m, 最大トルク7.4kgf・m 第2関節用定格トルク12.9kgf・m, 最大トルク48kgf・m 第3関節用定格トルク12.9kgf・m, 最大トルク48kgf・m	第1関節用定格トルク2.6kgf・m, 最大トルク10.5kgf・m 第2関節用定格トルク19.4kgf・m, 最大トルク72.0kgf・m 第3関節用定格トルク13.0kgf・m, 最大トルク48.0kgf・m	定格トルク5.1 _{gr} ・m, 最大トルク22kgf・m (全関節同一)
関節トルク / 空中重量	第1関節用定格トルク時4.61cm, 最大トルク時17.1cm 第2関節用定格トルク時4.61cm, 最大トルク時17.1cm 第3関節用定格トルク時4.61cm, 最大トルク時17.1cm	第1関節用定格トルク時0.29cm, 最大トルク時1.16cm 第2関節用定格トルク時2.15cm, 最大トルク時7.98cm 第3関節用定格トルク時1.44cm, 最大トルク時5.32cm	定格トルク時1.8cm, 最大トルク時7.6cm
関節トルク / 水中重量	—	第1関節用定格トルク時0.99cm, 最大トルク時4.0cm 第2関節用定格トルク時7.40cm, 最大トルク時27.5cm 第3関節用定格トルク時4.96cm, 最大トルク時18.3cm	定格トルク時5.1cm, 最大トルク時22cm (全関節同一)
関節数	脚 18 アーム 1 (1自由度のアーム)	脚 18 マニピュレータ 3 合計 21 あり (3自由度)	脚 18 (全関節同一)
テレビカメラ位置	—	マニピュレータに搭載	胴体内蔵
可動角度	—	上90度, 下40度, 左右±180度 マニピュレータの3自由度による	上下±45度, 胴体内チルト装置による (予定) 左右は固定であるがロボットのその場回転により調節可能
照明	—	650W×2	300W×2
関節ケーブ	外部露出	外部露出	内部収納
最大歩行速度	毎分7.5m (陸上平面上) 毎分1.7m (陸上凹凸面上)	毎分6.5m (水槽内平面上) 毎分1.4m (美海城凹凸面上)	毎分8.7m (水槽内平面上)
使用センサー	接地センサー6 (脚先端) 傾斜センサー2, 方位センサー1 (胴体上部) 障害物センサー1	接地センサー6 (脚先端) 傾斜センサー2, 方位センサー1 (胴体内部) 水深センサー1 (胴体底部) ジャイロ式	接地センサー6 (脚先端) 傾斜センサー2, 方位センサー1 (胴体内部) 水深センサー1 (胴体底部) ジャイロ式
方位センサー	磁気式 (フラックスゲート式)	ジャイロ式	ジャイロ式
接地センサー	機械式リミットスイッチによるストローク検出 (ストローク長35mm)	水中に露出した防水型磁気式リミットスイッチによるストローク検出 (ストローク長2.5mm)	防水区画内の光学式非接触リミットスイッチによるストローク検出 (ストローク長3.5mm)

歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

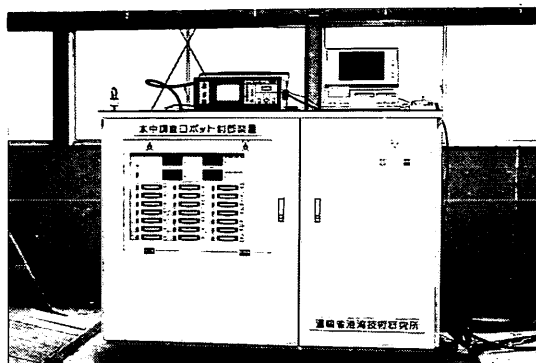


写真-15 制御装置

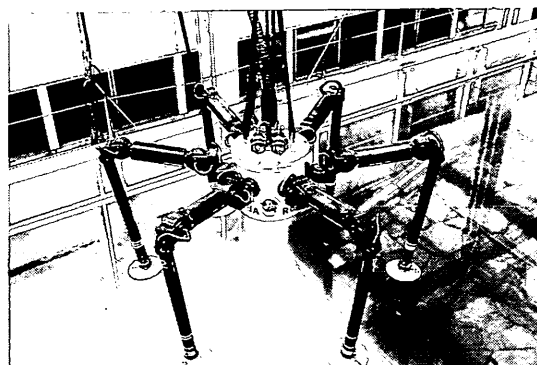


写真-16 軽量防水型実験機 (3号機) の水槽実験

表-6 制御装置仕様

駆動盤	寸法	12×1600×800 (mm)	
	重量	250kgf	
	前面パネル表示	関節電流, 傾斜計, 方位計, 胴体内水深計の値 FINISH 信号	
計算機	モータードライバー数	21個 (脚用18個, マニピュレータ用3個)	
	形式	16bit パソコン (CPUi80286)	
光電変換装置	機種名	エプソン PC-286-LS40	
	変換信号, 及び光ファイバーの本数	TV 信号	1本
		エンコーダ信号	5本 (1本あたり 5 kHz 以下の, 5個のエンコーダ信号を多重通信)
		センサー信号	1本 (アナログ信号4, 16接点信号1)
付属品	予備	1本	
		輸送用防滴カバー及び吊り具一式	

イプで覆っている。現在の形状では外部から水圧以外の力が加かったときにパイプの根元に力が集中する恐れがある。

実用機では関節保持部の内部に空間を設けてケーブルを通すか、もしくは、関節保持部外部にケーブルを張り付けてカバーをかぶせるなどの方法が考えられる。

(d) バックラッシュ

軽量防水型実験機 (3号機) はバックラッシュ調整機構を省略したため各関節ともバックラッシュが多めである。このことは歩行精度, 凹凸測定精度に対しては不利であるが, 歩行時の脚の位置制御誤差に対してはかえっ

て有利である。バックラッシュ調整機構の導入は重量増加につながるので以上の点から必要性を考慮する必要がある。

(e) 防水

軽量防水型実験機 (3号機) の各防水部は一重のOリングで防水している。実用機では信頼性向上のため、特に摺動部は二重に防水した方がよい。

(f) ノイズ対策

軽量防水型実験機 (3号機) は胴体内にノイズ源となりうる第1関節用モータが入っている。現在は特に問題はないが、モータやセンサーを変更した場合、仕様によってはセンサー信号, テレビ画像信号にノイズが入る潜在的な可能性がないとは言えない。

実用機では胴体の形状, 胴体内での部品の配置などを検討し、ノイズの入る可能性を少なくしておく方がよい。たとえば、胴体最下部に第1関節をすべて集め、その上部に蓋をしてシールドする方法などが考えられる。

(g) 設計変更

防水型実験機 (2号機) に比べて軽量防水型実験機 (3号機) の各部品は相互の関係が複雑であるため、設計変更は容易ではない。実用機はこの点に注意して設計を行う必要がある。

たとえば、脚長を変えずにモータを大型のものに変更する場合は以下の点を考慮する必要がある。

- ・脚の変更だけではなく、第1関節用モータが胴体内にあるため胴体の設計も変更しなければならない。

- ・第2関節と第3関節の間 (脚1) には現在より長いモータは収納できないので、第3関節用モータを第3関節の足部側 (脚2) へ移動しなければならない。

- ・モータの出力トルクの変更により、ハーモニックギヤ, 傘歯車の変更が必要となる。これにともなって、脚1の直径から決定されている第3関節の脚2からのオフセット

表-7

表-7 歩行速度測定結果

実験機の種類	プログラム名 CPU種類 (クロック)	パルス 出力 速度	背の 高さ (cm)	脚の 幅 (cm)	歩高 (cm)	歩幅 (cm)	一歩 の回 転角 (度)	歩行指令	所要時間	歩行速度	測定方法
防水型実験機 (2号機)	USL-F5 i8086 (8MHZ)	1/1	80	80	10	40	-	直進 90度 距離記録なし	記録なし	6.5m/分	2歩目から残り歩行距離が0になるまで測定
		1/2	80	80	10	-	18	回転 90度	24秒83	216度/分	2歩目から残り歩行角度が0になるまで測定
軽量防水型実験機 (3号機)	UR3-F7B i80286 (12MHZ)	1/1	100	70	10	50	30	直進 90度 1200 cm	*1分09秒	8.7m/分	*200cmから1200cmまでの時間を測定
								回転 360度	34秒	635度/分	歩行開始から残り歩行角度が0になるまで測定

歩幅は全振幅で表示

歩行式水中調査ロボットの開発 —(第2報)軽量防水型実験機の設計—

ト量を変更しなければならない。

6.3 マニピュレータについて

水中テレビカメラ用マニピュレータは、歩行しながら各方向を観察したい場合などロボットの運用状態によっては必要性が大きい。マニピュレータを軽量防水型実験機(3号機)に搭載する場合の問題点、及び、解決法を考察した。

1) 寸法・重量

防水型実験機(2号機)のマニピュレータは軽量防水型実験機(3号機)に搭載するには重量、寸法が大きい。これは2つの理由による。ひとつは、マニピュレータ第1関節の可動角度を±180度以上としたので、マニピュレータがロボットのケーブルと干渉しないようにマニピュレータ第1関節を中心に穴のあるドーナツ形の構造としたためである。もうひとつは空中重量12kgf水中重量6kgfの水中テレビカメラを保持しなければならないので、出力が大きいモータを使用したためである。

軽量の水中テレビカメラを搭載すること、及び、ロボットのその場回転機能を併用することを前提として、マニピュレータの第1関節可動角度を小さくすれば、軽量防水型実験機(3号機)の脚1本程度の寸法・重量にできると考えられるので、空中重量35kgf、水中重量10kgf以下にすることが可能である。

2) 自由度

防水型実験機(2号機)に搭載したマニピュレータは3自由度であるが、これは先端に取り付けられるテレビカメラを脚の間などの任意の位置に保持するためのもので、その位置からテレビカメラを任意の方向に向けるためにはさらに2自由度のパンチルト装置が必要である。パンチルト装置もマニピュレータに含めると全部で5自由度となる。協調動作を考えなければパンチルト装置の駆動は単なる直流モータのON-OFF制御でもよい。

3) 操作

現在のシステムでは、歩行中にマニピュレータの操作はできない。ソフトウェアの改良で可能であるが、マニピュレータの関節へのパルス出力を脚の関節へのパルス出力と同時に行うことになるので歩行速度が低下する。

制御装置の配線を変更して、脚の制御と独立したマニピュレータ用のパルス出力回路を組み込めば歩行速度を低下させずに歩行中のマニピュレータの操作が可能である。

テレビカメラの方向を保ったままで被写体に近づけるような操作にはマニピュレータ各関節の協調動作が有効である。しかし、どのような協調動作が最適であるか、脚との相対位置関係における干渉チェックをどうするか

を検討する必要がある。

7. 技術上のアイデア

将来的に実現可能性がある水中調査ロボットの技術上のアイデアとしては次のようなものがある。

7.7 センサーの信頼性向上

水中調査ロボットのセンサーは情報を収集するだけでなく、センサー情報をロボットの制御にフィードバックしているため、非常に重要な役割を持っている。

現在、水中調査ロボットには各センサーとも1系統を搭載している。このためセンサーに故障、誤動作などが起こった場合、正常な歩行が行われなくなる。

各センサーの信頼性を向上するためには、2系統のセンサーを搭載することが考えられる。特に接地センサーは、凹凸面上歩行のために最も重要なセンサーであるので、数系統を搭載し多数決回路を用いて接地の判断を下すようにすればより複雑な地形上でも確実な歩行が可能になる。

以上の考えに基づき防水型実験機(2号機)は平成2年度(1990年度)の改造で2系統の水深計を搭載した。

7.2 光電変換装置の分散配置

胴体内部に収納している光電変換装置を脚内に分散して配置できればデッドスペースはより少なくなる。

各脚内へ光電変換基板を分散配置するためには、関節内に光ファイバーケーブルを通さなければならない。関節内部の空間的余裕は小さいため、関節の動作によって光ファイバーケーブルの最小曲げ半径以下に曲がることのないよう注意が必要である。

7.3 関節の片持ち構造

現在は関節軸の両端を支持しているため防水箇所は2箇所ある。関節を片持ち構造とすれば、防水箇所が減少するため保守性と信頼性が向上し、部品点数が減るため組立でも容易になる。

ただし、片持ち構造は関節トルクの出力が片側のみになるので、関節の剛性を上げる必要があり、軽量化という点では不利になる場合も考えられる。

7.4 分解組立方式

水中調査ロボットは脚の機構がそれぞれ独立しているので、ロボットを数個のユニットに分解・組立ができるように設計しておくことが可能である。これにより簡単に輸送して現場で組立てることができ、輸送用に大型のトラックを使う必要性がなくなる。また、このような設計を行えば、故障した場合にも故障部分のみを交換することにより現場でも対応できるので保守も容易になる。

海中での使用が主目的であるので、使用後の洗浄、

点検のためにも分解組立方式は有効である。

7.5 浮力変化方式

水中調査ロボットに浮体を組み合わせることにより、水中重量を調節することができ接地圧を変えることができる。これは防水型実験機（2号機）で既に実施している。

さらに、浮体の浮力を変化できるようにしてロボット本体を完全に水中で浮かせることができるようにすれば、いちいちクレーンで吊り上げることなく投入位置を変えることができる。また、ロボット本体を浮かせたままで曳航するようにすれば母船のクレーンが不必要となる。

大型の水中施工機械にはこの方式を採用しているものがあるが、浮力を変化させるのに時間がかかるという問題点がある。このため急速に浮力を変化させることができる方法を考案する必要がある。

8. あとがき

歩行ロボットの研究の数は増加してきているが研究段階のものも多く、今までに製作された陸上用歩行ロボットの性能は実用には不十分のように見える。しかし、水中調査ロボットは防水型実験機（2号機）の平成元年～2年度（1989～1990年度）の釜石港と大阪港における実海域実験で実用的な歩行性能を持つことが確認された。特に釜石湾口という海象条件の厳しい実際の現場での機械均し面を実働状態で歩行できた。これは、水中調査ロボットは実用に耐えうる初めての歩行式ロボットであることを示している。

軽量防水型実験機（3号機）の開発により、小型軽量化による歩行の高速化が実証され、また、技術的改良点が明らかとなるなど、水中調査ロボット実用機設計に対して多くの知見が得られた。

なお、今後の技術課題としては、本軽量型ロボットの實用機としての普及を図っていくため、現状の潜水士による測量費用に充分対抗できるよう、製作コスト、運用コストの低減をめざす技術の開発などが考えられる。

その他水中調査ロボットで確立したこれらの歩行技術は、水中以外にも宇宙、放射線などの悪環境下にも適用できると考えられる。

最後に軽量防水型実験機（3号機）の設計、開発にあたり御協力をいただいた関係者各位に対しここに感謝の意を表するものである。

(1991年3月31日受付)

参考文献

1) 岩崎峯夫：水中調査ロボットの開発，昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集，1985年，pp.261～292

- 2) Mineo IWASAKI et al., Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection, Report of the Port and Harbour Research Institute Vol.26 No.5, Dec.1987, pp.393～422
- 3) 秋園純一他：歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の水中実験について，第4回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集，1988年，pp.21～26
- 4) 秋園純一：歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の現地実験，平成2年度港湾技術研究所講演会講演集，1990年，pp.137～192

歩行式水中調査ロボットの開発
-(第2報)軽量防水型実験機の設計-

付録1 軽量防水型実験機設計資料一覧表

1. 寸法

1.1 架台着座時

高さ	1297mm (地面から、ケーブル除く)
最大幅	1460mm
最小幅	1288mm

1.2 各部寸法

胴体直径	430mm (フランジ部500mm)
最大第1関節間距離	644mm
脚長	1500mm (第2・3関節間距離500mm, 第3関節・足部球面軸受間距離1000mm)
第1, 2関節間水平距離	150mm
第1, 2関節間垂直距離	95mm
脚1直径	126mm
脚2直径	75mm
足部直径	250mm
接地センサーストローク	
検出前	0.5mm
検出後	3mm

2. 重量

仕様決定時計算重量

全体 (空中重量)	280kgf
脚1本 (空中重量)	40kgf

完成時実測重量

全体 (空中重量)	280kgf
全体 (水中重量)	100kgf
脚1本 (空中重量)	33.8kgf

3. 部品

3.1 モーター

形式	DC サーボモーター
メーカー	(株)ハーモニックドライブシステムズ
型番	REM04S2-SP (取付フランジ部特注品)
定格出力	100W
定格トルク	3.2kgf・cm
定格回転数	3000rpm
瞬間最大出力	675W
瞬間最大トルク	18kgf・m
作動電圧	DC75 V

3.2 減速機 (ハーモニックギヤ)

形式	ハーモニックギヤ
メーカー	(株)ハーモニックドライブシステムズ
型番	CS-20-160-2A-GR-SP

減速比	1 : 160
許容定格トルク	4.1kgf・m
許容瞬間最大トルク	8.8kgf・m
伝達効率	約60% (温度20°時)

3.3 減速機 (傘歯車)

形式	まがり歯傘歯車
メーカー	小原歯車工業(株)
型番	MBSB2.5-4515R MBSB2.5-1545L
減速比	1 : 3
許容伝達出力	380W

4. ケーブル

形式	光電力複合ケーブル (光ファイバー線, メタル線)
メーカー	古河電工(株)

内部構成

アクチュエータ用動力線	0.75mm ² ×20対
AC100V 動力線	5.5mm ² ×3心
水中テレビカメラ制御線	0.75mm ² ×9心
予備心	0.75mm ² ×4心
光ファイバー	GI 50/125×8心
テンションメンバー	ケブラー繊維
浮力材	発泡 PE ヒモ

長さ	100m
仕上げ外径	標準41mm 最大42mm
単位長さ重量	1700g/m (空中) 400g/m (水中)
比重	約1.3
許容張力	1500kgf
最小曲げ半径	40cm
ケーブル引留部材質	ステンレス製
ケーブル引留部強度	1500kgf

5. 関節可動角度

- 第1関節 左右60°以上
- 第2関節 ±90°以上 (水平状態を基準)
- 第3関節 ±90°以上 (第2関節水平状態, 第3関節垂直状態を基準)

6. 材質

主要部	耐食アルミニウム (A5052-H34)
軸	鋼 (S45C)
軸受	オイレスメタル
ボルト・ワッシャ類	ステンレス鋼 (SUS316)

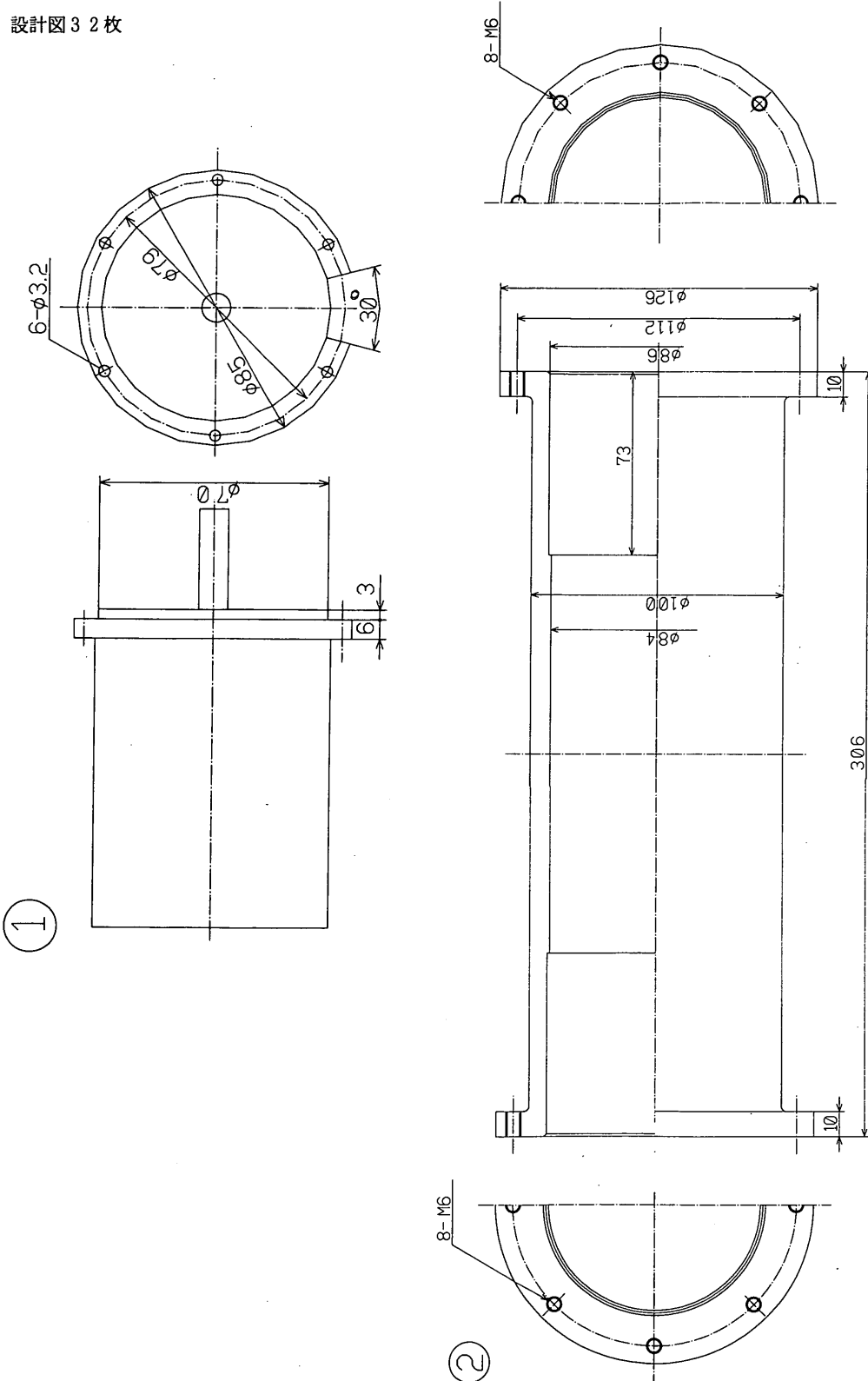
歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

付録2 軽量防水型実験機全設計図

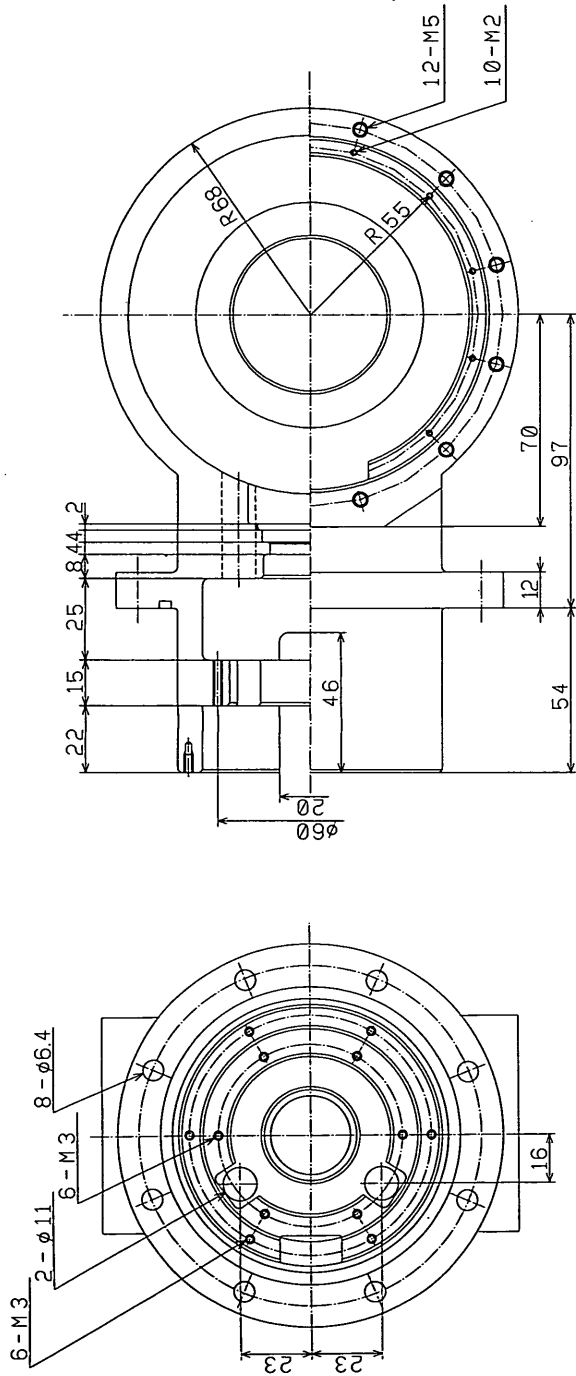
軽量防水型実験機部品一覧表 (脚1本分)

品番	図面	品名	材質	個数	備考
1	有り	モータ	(購入品)	3	RH-20相当直流DCサーボモータ
2	有り	脚カバー	耐食アルミ	1	
3		ボルトM3*18	ステンレス	24	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
4	有り	ケーシング	耐食アルミ	3	
5		ハーモニックギア	(購入品)	3	RH-20相当ハーモニックドライブ減速機
6		ボルトM3*30	ステンレス	18	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
7		ボルトM6*24	ステンレス	24	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
8	有り	軸受(入力軸)	オイルレスメタル	3	
9	有り	入力軸	SS41	3	
10		ボルトM4*18	ステンレス	18	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
11	有り	軸受(小歯スラスト)	オイルレスメタル	3	
12	有り	軸受(小歯ラシアル)	オイルレスメタル	3	
13	有り	関節蓋	耐食アルミ	3	
14		皿ネジM5*14	ステンレス	36	
15		ボルトM5*26	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
16		ボルトM6*32	ステンレス	3	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
17	有り	軸引板	耐食アルミ	3	
18		傘歯車(小)	(購入品)	3	全面浸炭焼入
19		キー(入力軸)	SS41	3	
20		傘歯車(大)	(購入品)	3	全面浸炭焼入
21	有り	出力軸	SS41	3	
22		キー(出力軸)	SS41	3	
23	有り	軸受(大歯ラシアル)	オイルレスメタル	3	
24	有り	軸受(大歯スラスト)	オイルレスメタル	3	
25	有り	大歯車カバー	SUS鋼板	3	
26		なべネジM2*6	ステンレス	24	
27		ボルトM6*24	ステンレス	3	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
28	有り	小歯車カバー	SUS鋼板	3	
29		なべネジM3*6	ステンレス	6	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
30	有り	軸受(出力軸)	オイルレスメタル	3	
31	有り	軸受摺動受板	SUS鋼板	6	
32		ボルトM3*10	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
33	有り	アーム	耐食アルミ	1	ケーブル接続用スペースの蓋も含む
34	有り	軸端押え(大)	耐食アルミ	1	ケーブル接続用スペースの蓋も含む
35	有り	軸端押え(小)	耐食アルミ	1	ケーブル接続用スペースの蓋も含む
36		ボルトM4*20	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
37	有り	箱蓋	耐食アルミ	1	
38		ボルトM4*20	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
39	有り	接続管(1-箱)	SS41	1	
40		接続管(箱-2)	SS41	1	
41	有り	接続管(2-3)	SS41	1	
42		ボルトM3*10	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
43		ボルトM4*15	ステンレス	12	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
44	有り	第3関節継手	耐食アルミ	1	
45		ボルトM4*25	ステンレス	8	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
46	有り	脚長アタッチメント	耐食アルミ	1	
47		ボルトM4*25	ステンレス	6	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
48	有り	接地センサーカバー	耐食アルミ	1	
49		マイクロスイッチホルダ	SS41	1	
50		ボルトM3*15	ステンレス	2	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
51		マイクロスイッチ	(購入品)	1	
52		ボルトM4*25	ステンレス	6	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
53		脚先カバー	耐食アルミ	1	
54	有り	Oリングホルダ	オイルレスメタル	1	
55	有り	足軸受け(上)	オイルレスメタル	1	
56		スプリング	ばね鋼	1	
57		ボルトM4*25	ステンレス	6	スプリングワッシャー, ワッシャー付き
58	有り	足先カバー	耐食アルミ	1	
59	有り	足軸受け(下)	オイルレスメタル	1	
60	有り	足軸	ステンレス	1	
61	有り	スプリングホルダ	ステンレス	1	
62		ピン	ステンレス	1	
63		球面軸受	(購入品)	1	
64		止めネジ	ステンレス	3	
65	有り	足部	耐食アルミ	1	
66		ゴムシート	合成ゴム	1	
67		ケーブル類	シールド線等		繰返しの曲げに強い耐久性を持つもの
68		グリス等	シリコングリス		

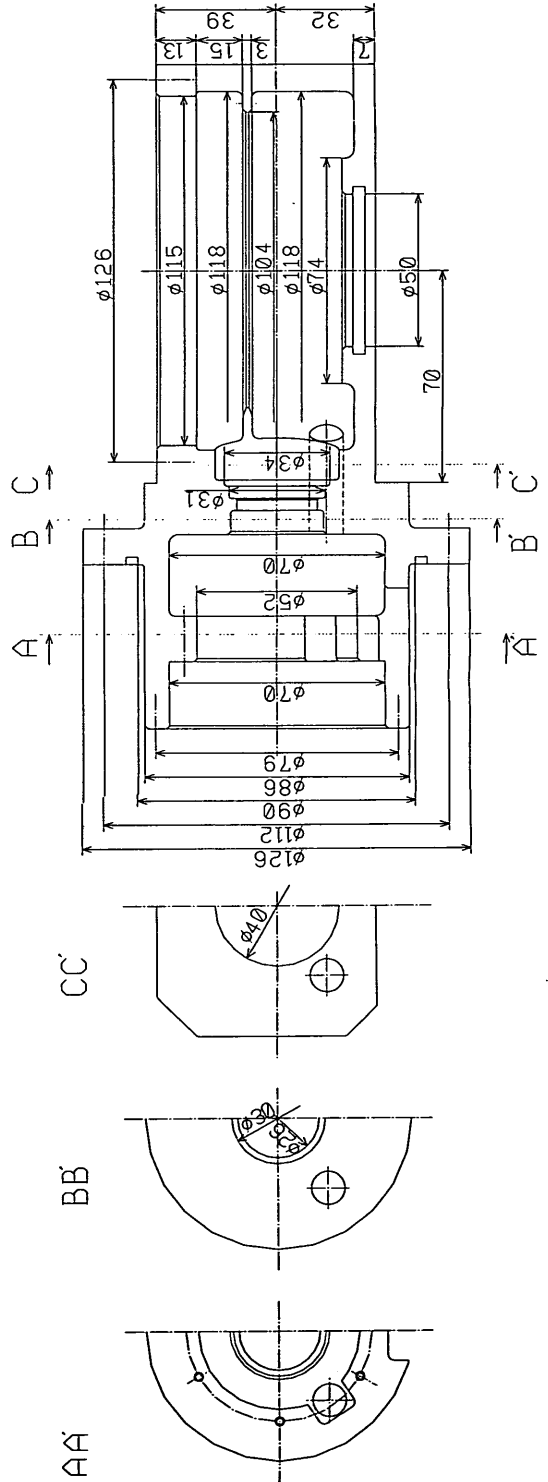
設計図 3 2 枚

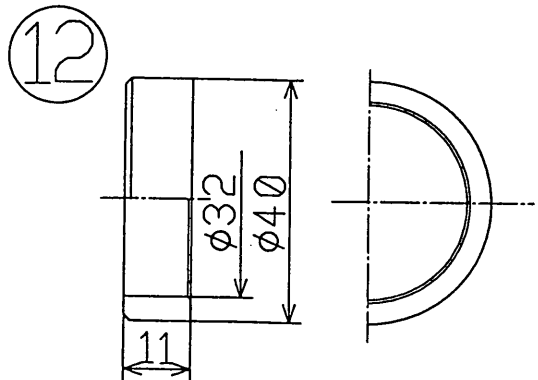
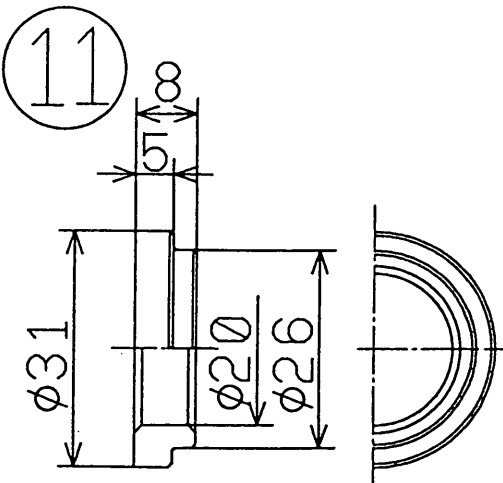
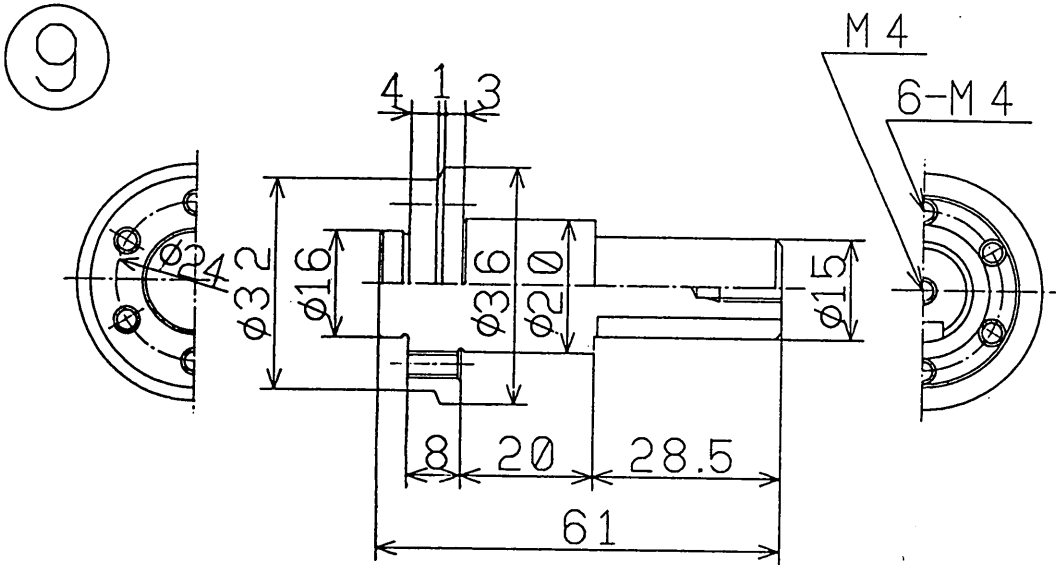
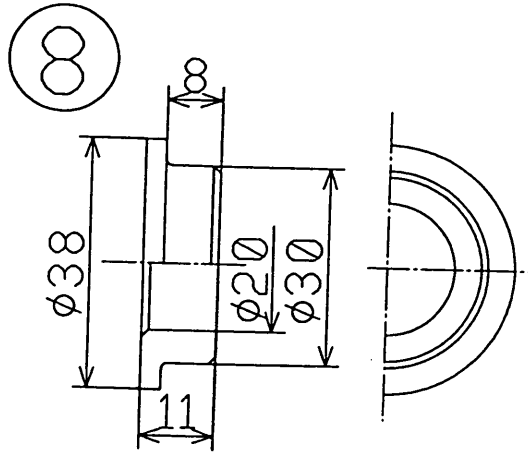


歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機的设计 -

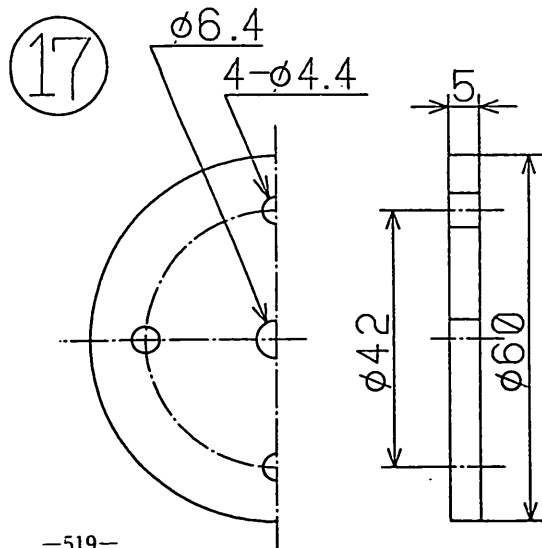
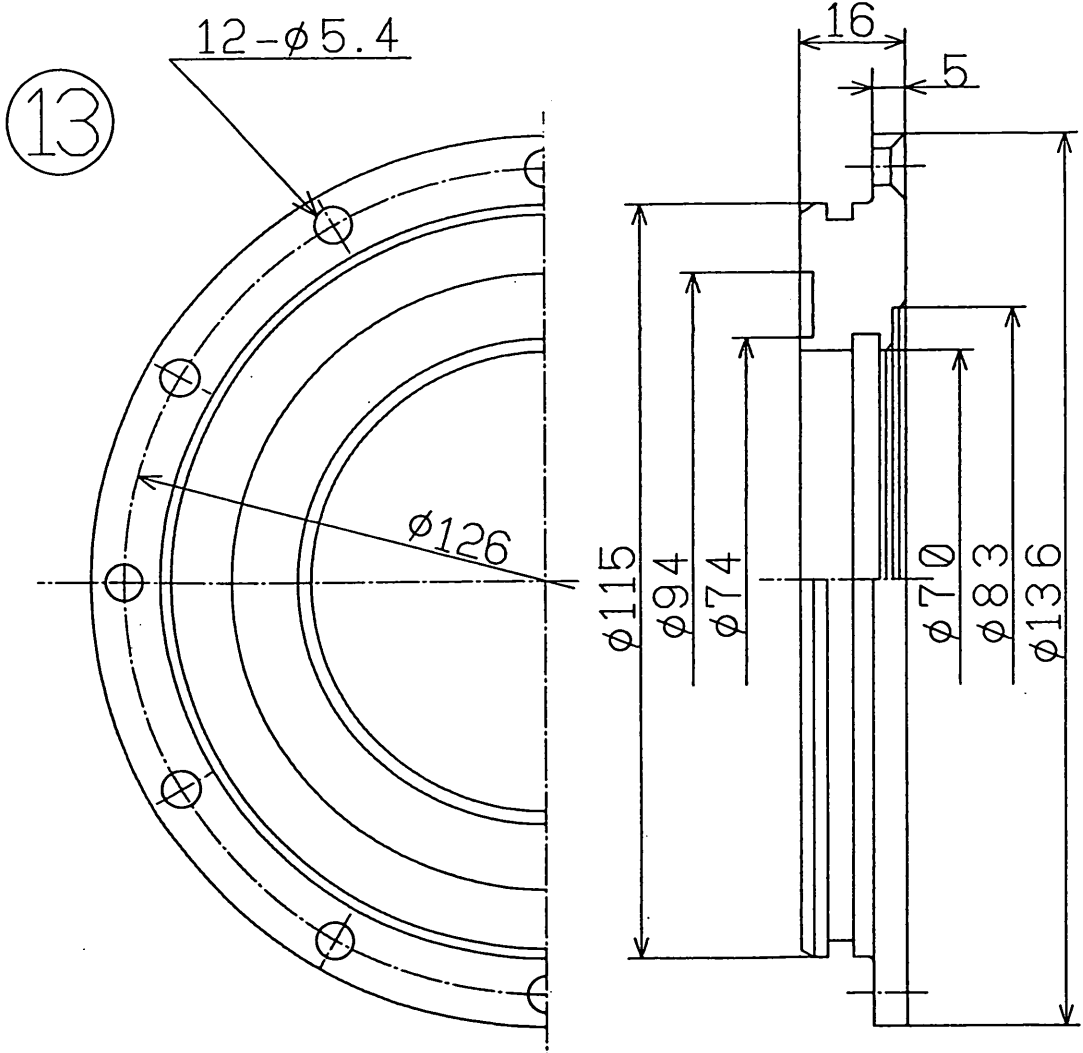


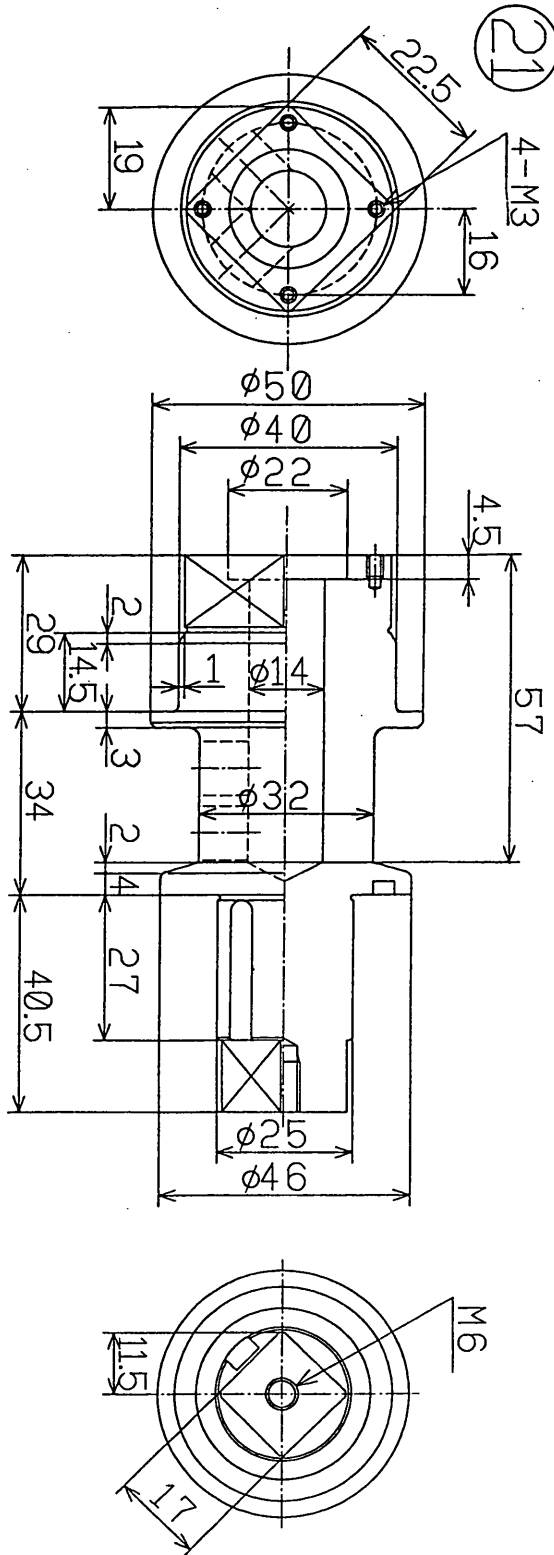
④





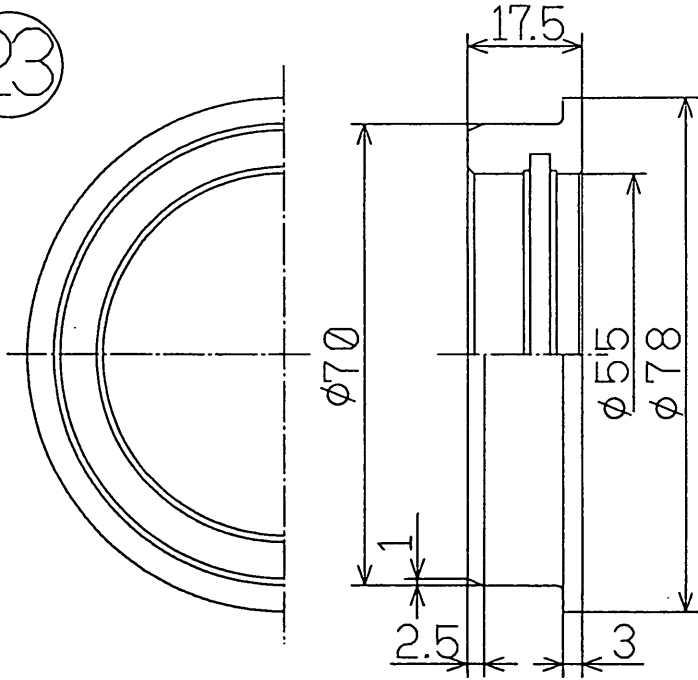
歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -



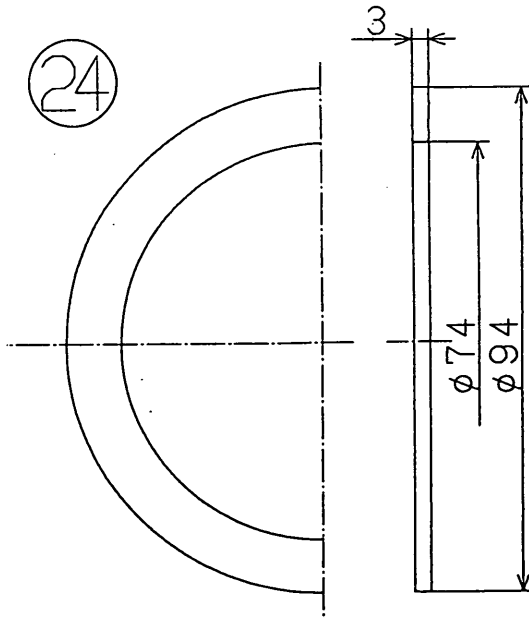


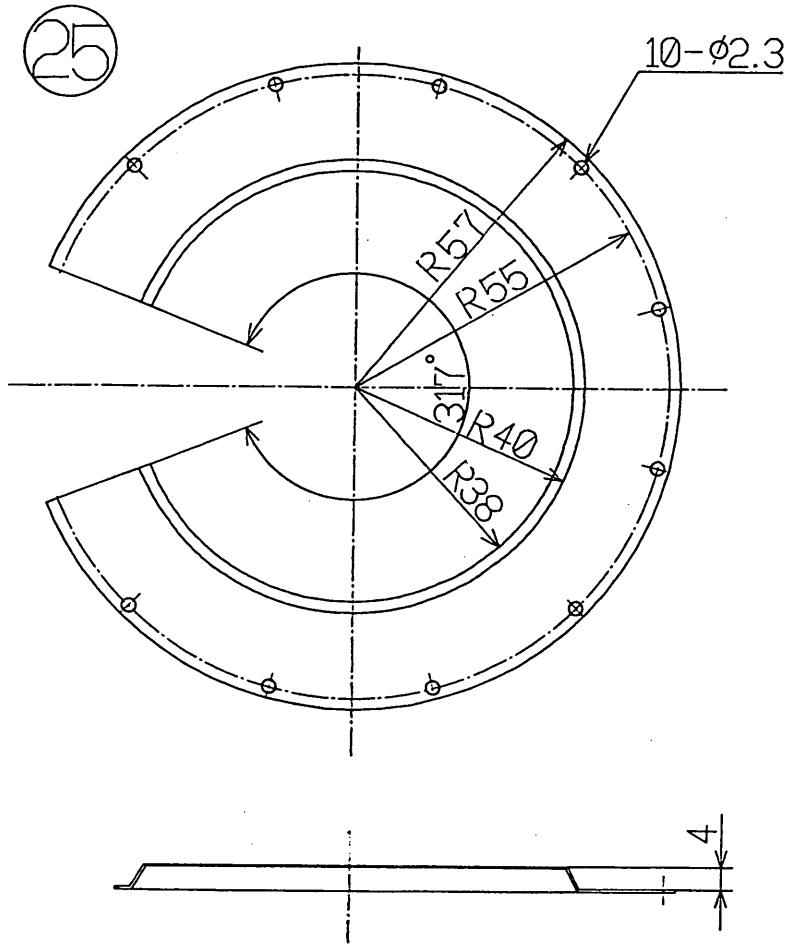
歩行式水中調査ロボットの開発
- (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

23



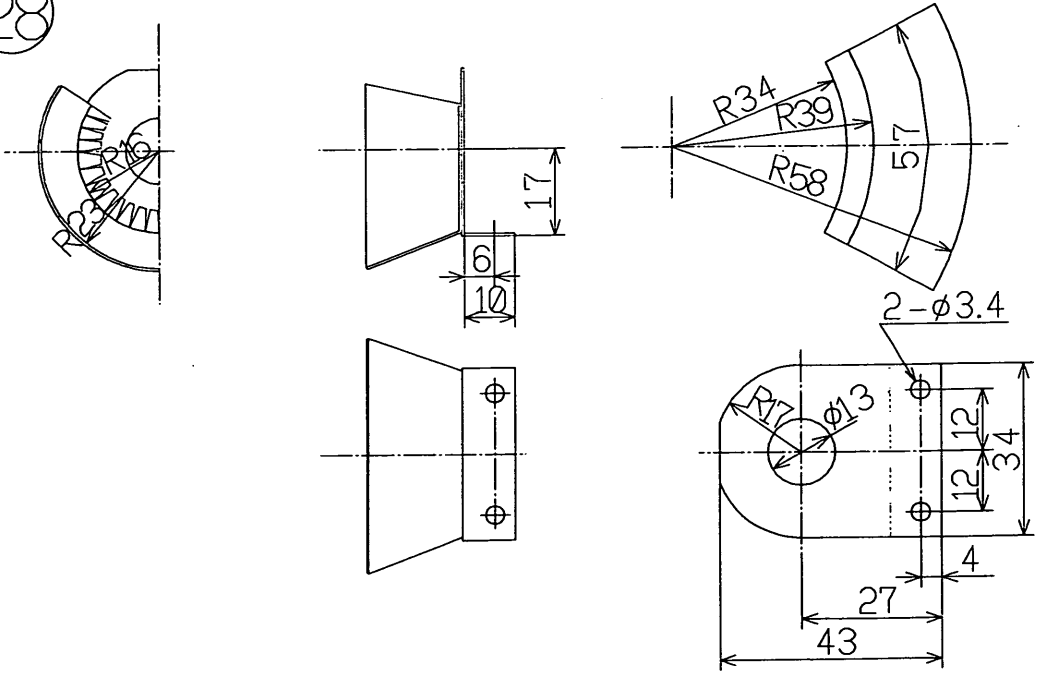
24



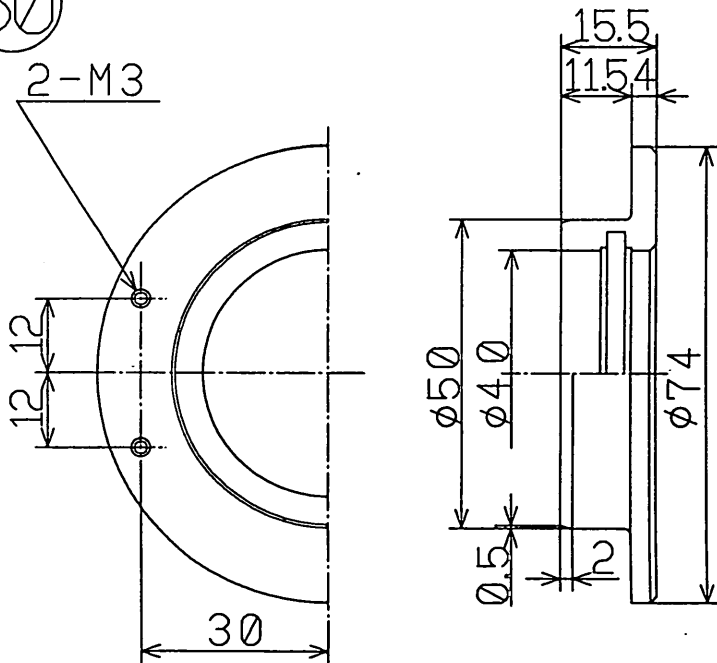


歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

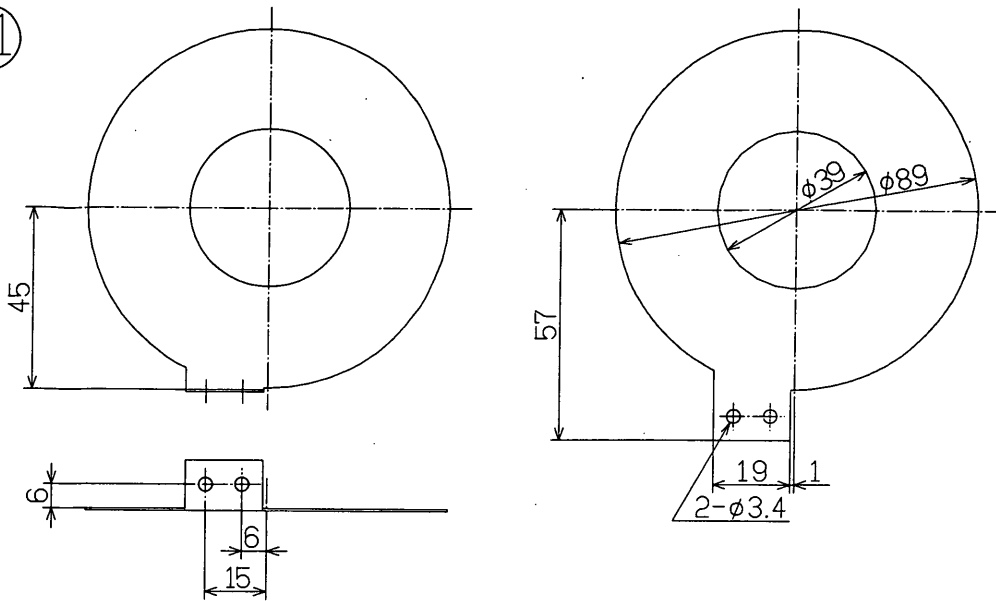
28



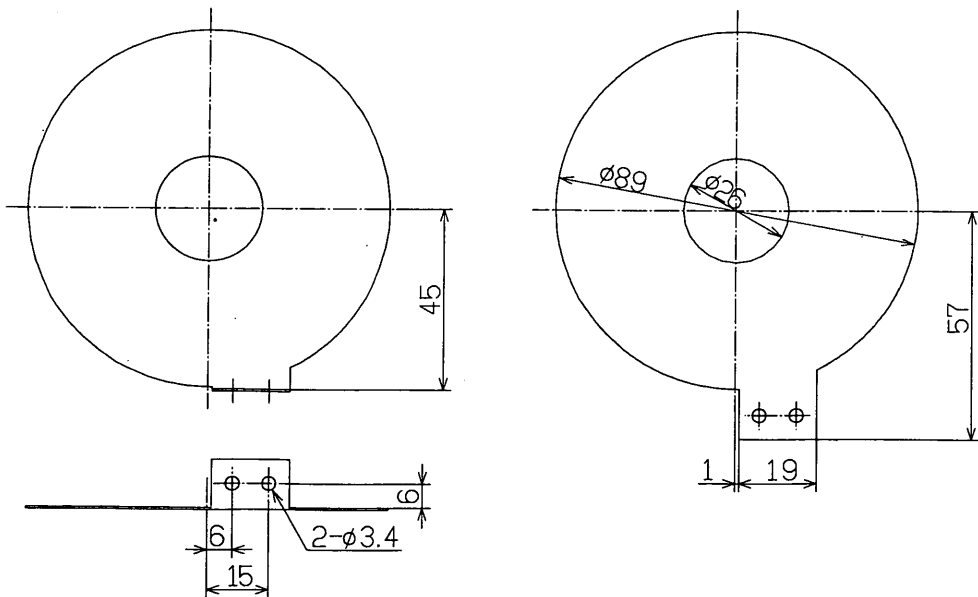
30

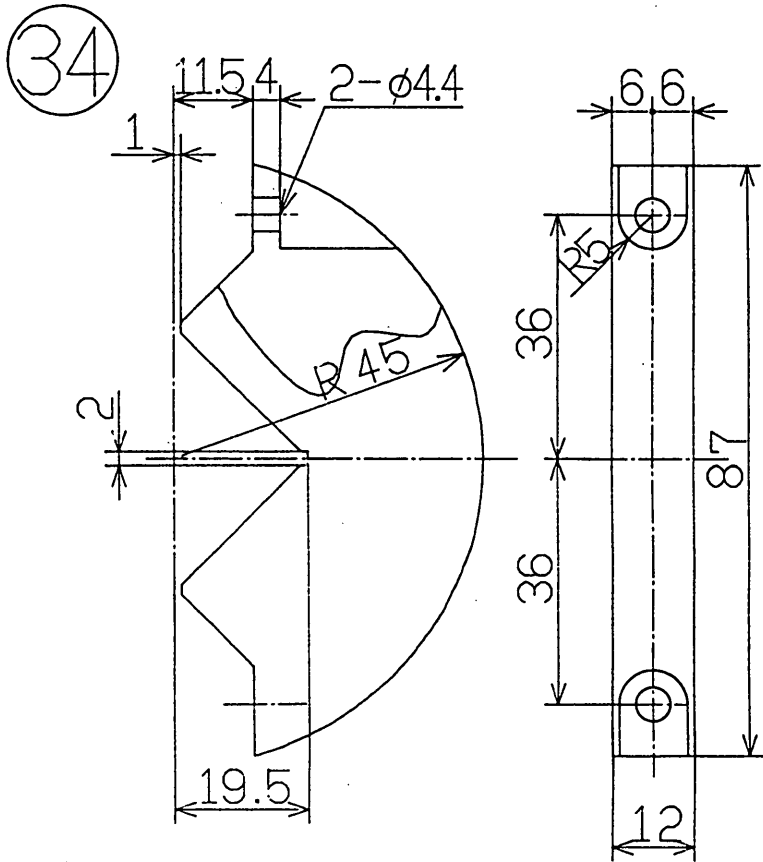


31

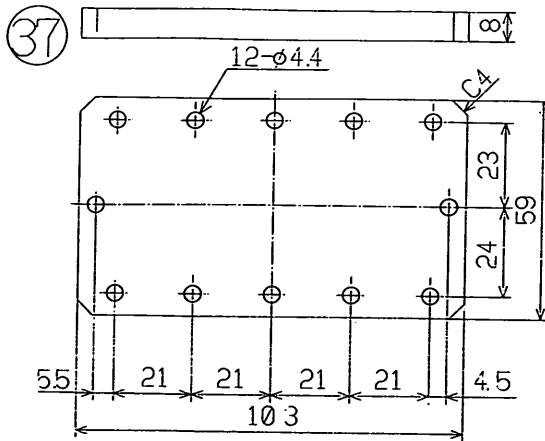
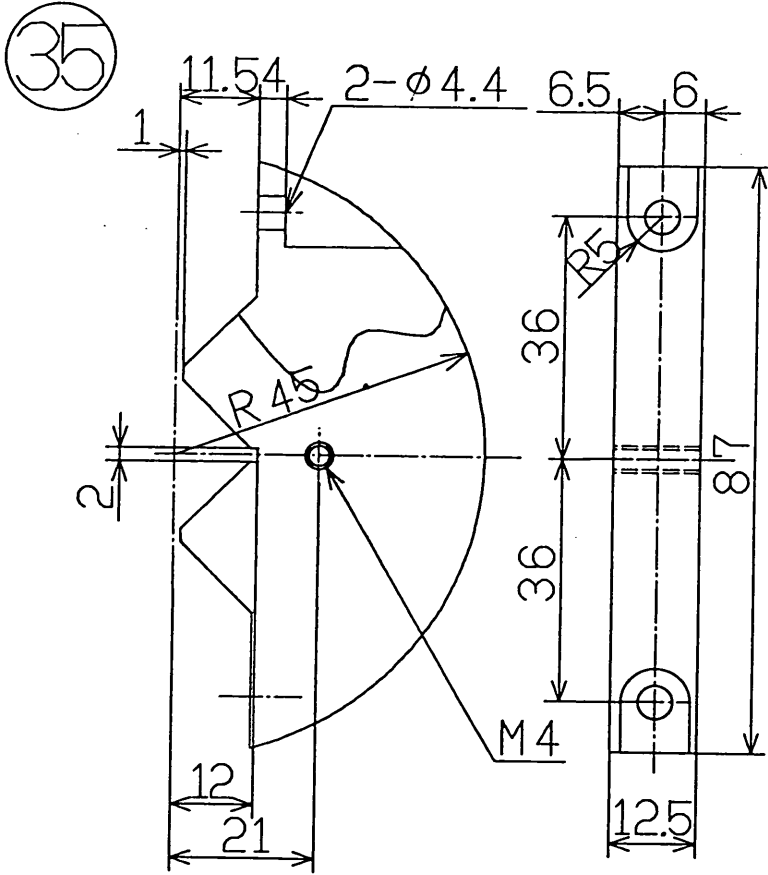


31

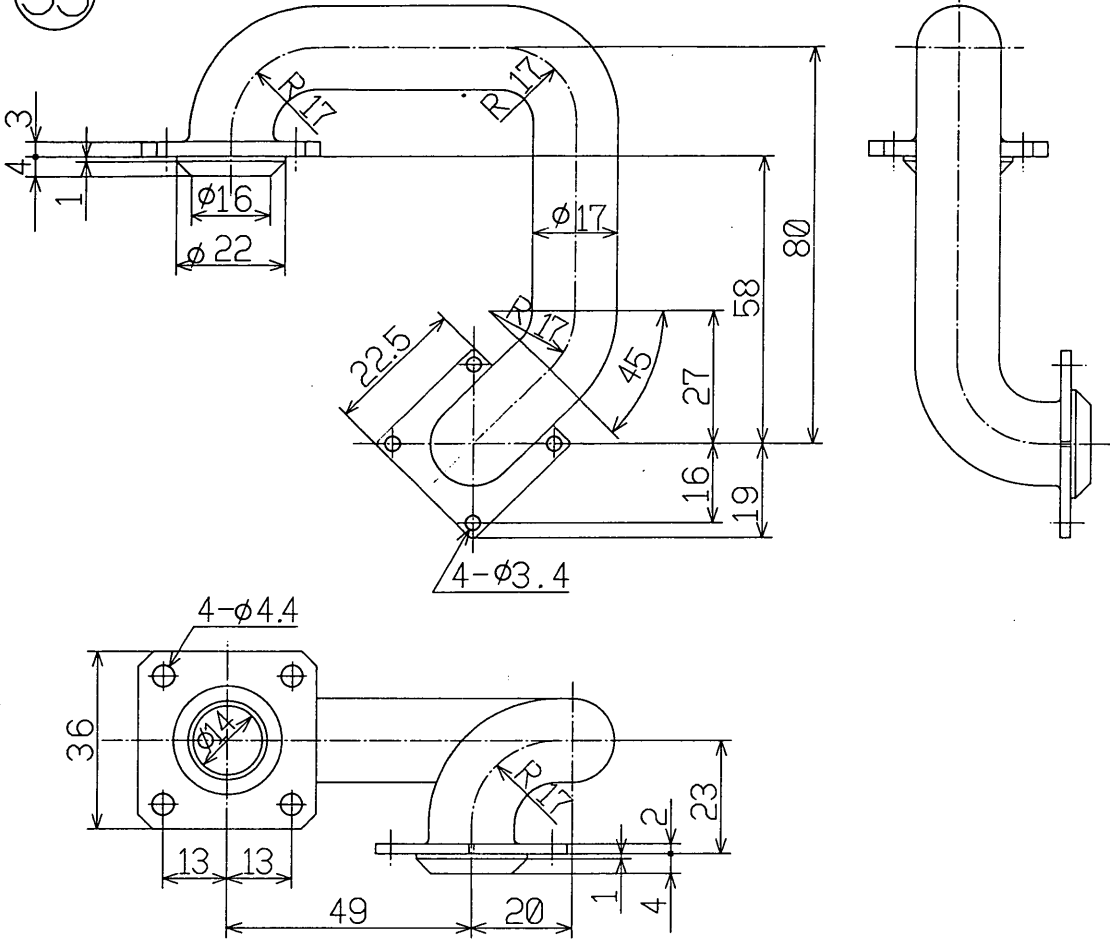




歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

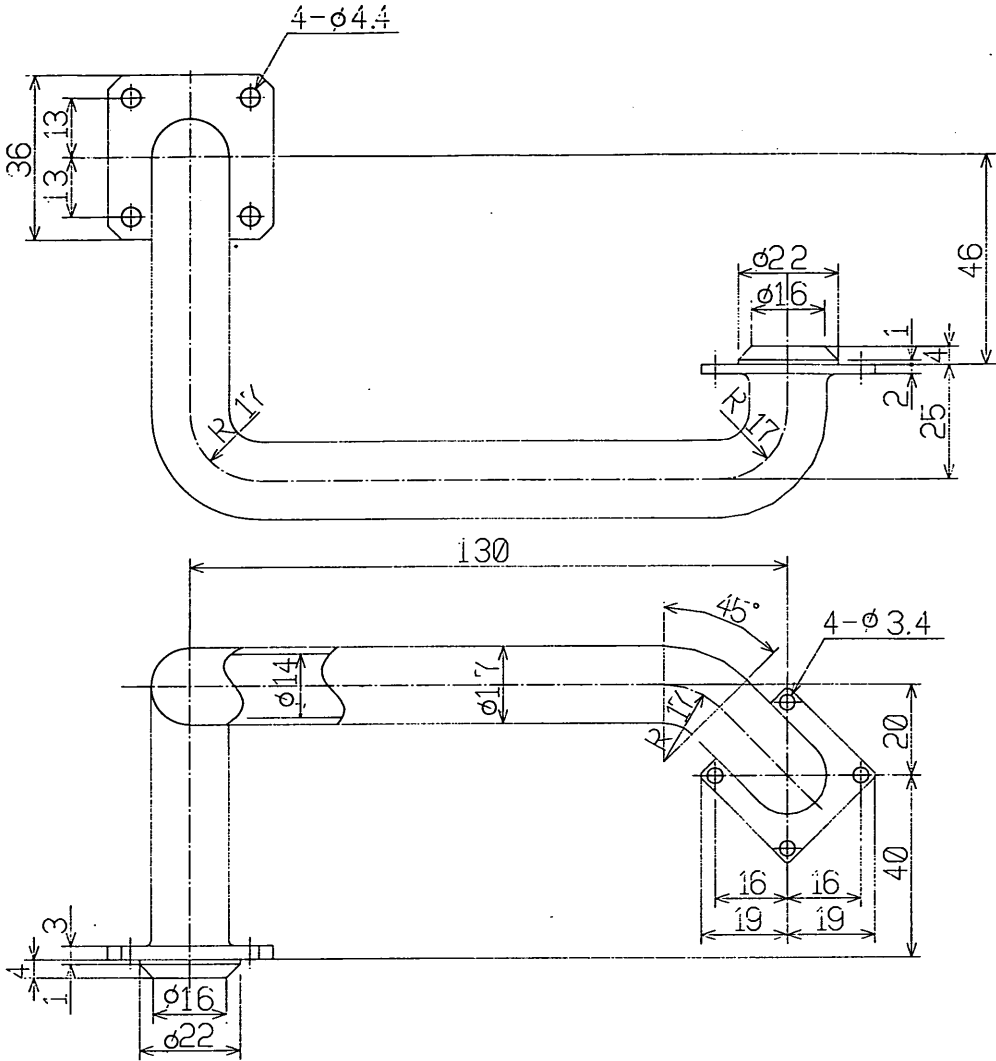


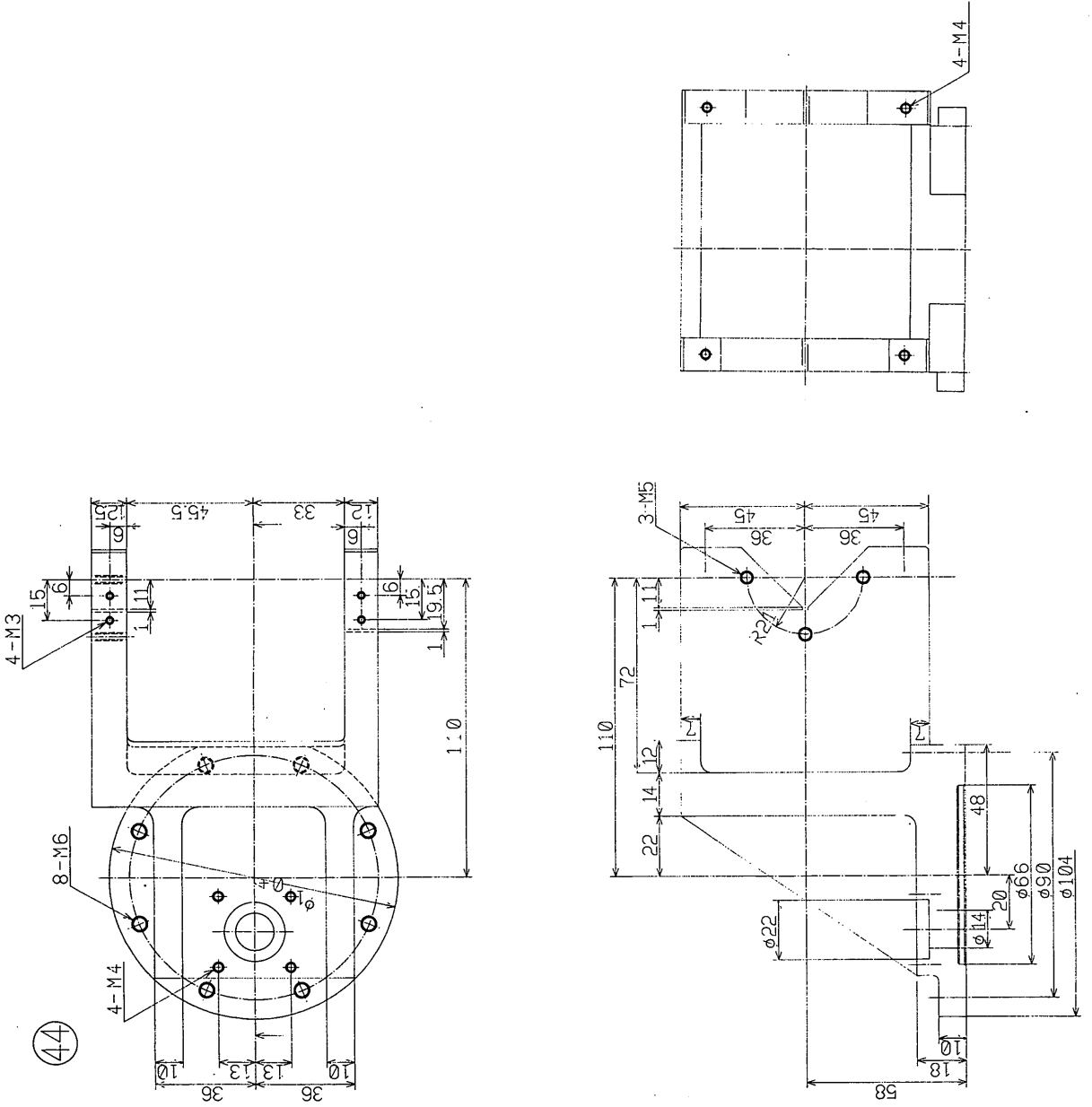
39



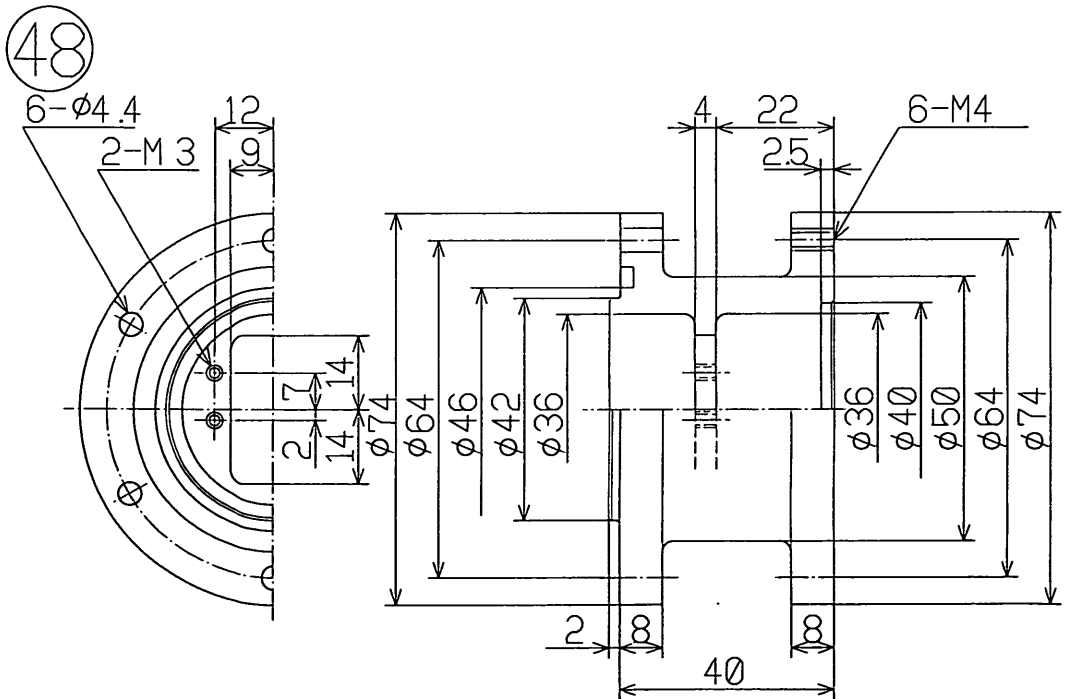
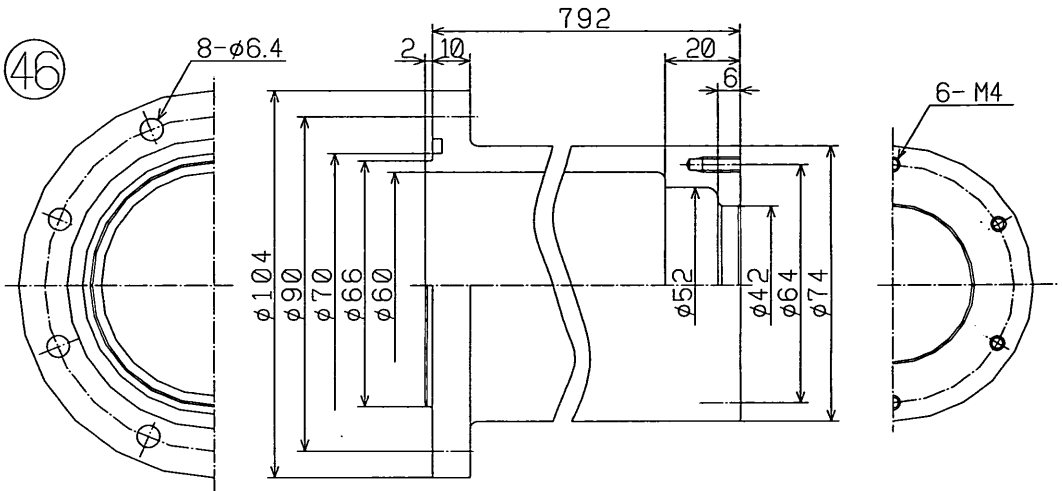
歩行式水中調査ロボットの開発
- (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -

41

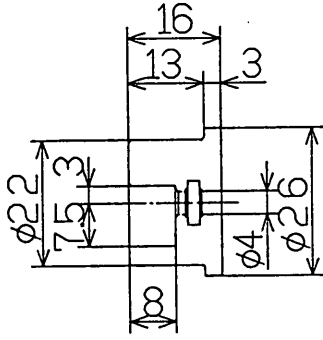
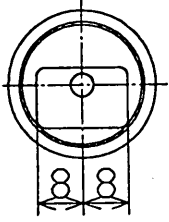




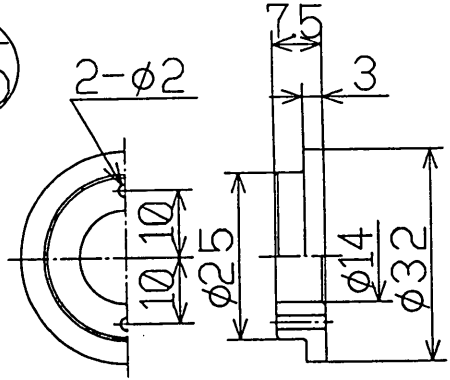
歩行式水中調査ロボットの開発
 - (第2報) 軽量防水型実験機の設計 -



54



55



58

6-φ4.4

