

スライド式曳航体の研究開発 (第1報); 研究開発経過

野本 昌夫^{*1} 辻 義人^{*2} 江村 富男^{*2}

海中の水溫，塩分等を迅速かつ高空間分解能で計測することを目的として，昭和52年度から開発が進められているスライド式曳航体が実用試験段階に入った。ここで，これまでに得られた研究開発の成果を報告する。第1報にあたる本報では現在に至る開発の経過について述べる。なお本研究は昭和52年度から昭和54年度までは経常研究として，昭和55年度以後はプロジェクト研究「新海洋観測システム」の中の高速曳航体として開発されているものである。

Development of Underwater Sliding Vehicle for Oceanographic Research (Part I); Review of the Development

Masao Nomoto^{*3} Yoshito Tsuji^{*4} Tomio Emura^{*4}

Development of an Underwater Sliding Vehicle (USV) for oceanographic research has now reached its final stage. The sea trials were carried out in Sagami Bay in September of this year. The vehicle is equipped with conductivity, temperature and depth sensors, and measures the distributions of these parameters in the vertical plane down to 200 m depth. Data are sent via cable to an onboard unit through the use of an inductive coupling system, and then, these informations are displayed on a CRT showing the parameter distributions as a color image in which the differences in color correspond to the differences of the values of the various parameters. This paper reviews the development of USV since 1977.

*1 海洋利用技術部

*2 海洋保全技術部

*3 Marine Exploitation Technology Department

*4 Marine Environment Department

1. まえがき

水温、塩分などを測定する海洋観測において、従来の採水方式に代る電氣的計測手法が登場してすでに久しく、現在すでに多数の計測機が各分野の海洋観測で使用されている。中でも海水の温度、電気伝導度、深度（圧力）の計測に関しては、計測センサー、電子回路などのハードウェアおよび機器較正方法、データ処理等のソフトウェア両面に関し、研究も多く、着実にその使用実績を伸ばしている。一方、これらの測定機器の、従来にない特長を積極的に生かし、海洋観測をより能率よくすることができれば、従来不可能であった種類の海洋計測を可能とし、これまで見逃されていた海洋現象をとらえることも可能になるであろう。

ここに紹介するスライド式曳航体は、単純なオペレーションにより、海洋の鉛直断面内の水温、塩分などの分布状態を迅速かつ高い空間分解能で計測することを目的として、現在海洋科学技術センターで開発が進められているものである。開発は昭和52年度に開始され、現在すでに実用試験段階に入っている。

本報ではこれまでの開発経過について報告する。ただし、曳航体に搭載する計測センサーの開発については別報^{1), 2), 3), 4)}に譲り、ここでは触れない。

2. 海洋観測用曳航体

ケーブル等により海洋観測用の機器を曳航して使用すれば、これは広い意味で海洋観測用曳航体と呼ぶことができる。しかしながらここで用いる“曳航体”という呼称は、良好な曳航性能を得るために、もっと積極的な工夫をこらしたものを意味するものとする。

海洋観測用曳航体は世界各国において、これまでに数多く開発されている。使用目的によりその形状もさまざまであるが、その海中での運動形態から次のように分類することができる。

- (1) 一定深度を保持し、動揺なく曳航されるもの
- (2) 海底地形の起伏に応じて海底からの高度を一定に保って曳航されるもの
- (3) 海中を昇降し、海洋における鉛直断面を走査するもの

(1)は主にサイドスキャンソナー、測深儀などの音響機器を搭載したもので、音響計測機器メーカーにより数多く開発されている。(2)はTVカメラ、スティルカメラ等を搭載して海底鉱物資源、生物資源、海底地質などの調査に主として使用される。(1)、(2)が海底を対象としているのに対し、(3)は海水の調査に使用されるものである。海底が大まかには2次元的な広がりを持つのに対し、海水は水平、鉛直の3次元的な広がりを持つ。また、海水に関する調査では水平、鉛直の両方向に関する変化を同時にとらえることが重要な場合が多い。したがって(3)に属する曳航体には鉛直方向の運動能力が要求される。カナダのベッドフォード海洋研究所で開発されたバットフィッシュ⁵⁾はこのグループに属する曳航体として代表的なものである。

スライド式曳航体も水温、塩分など海水の諸量についての空間分布を能率良く計測することを目的としており、上記の分類では(3)に属するものである。

3. スライド式曳航体

3.1 従来の曳航方式

海洋科学技術センターでは昭和49年度から昭和51年度にかけて、曳航速度4 kts, 最大使用水深200 mの海洋観測用曳航体を開発した^{6), 7), 8)}。これは写真1に示すように航空機に近い形状を持ち、水平尾翼後縁の昇降舵の角度を変更することにより機体の迎角を変え、主翼の発生する揚力の大きさと方向（上下）を調節して海中を昇降するものである。曳航体は曳航索の先端につけられており、海中を昇降する際には図1に示すように曳航索の先端を引きずっていかねばならない。この間、昇降運動に伴い曳航索のカテナリが刻々変化し、曳航索に作用する流体力が変化する。したがって、曳航体の発生する昇降力の変動量と上述のカテナリ変化による曳航索先端での張力変化量が等しくなるような深度幅で、海中を昇降することが可能である。バットフィッシュも同様の方式であるが、このような曳航方式では曳航体の設計の上で以下のような制約を逃れることができない。

- (1) 曳航体の昇降振幅を大きくするには、大きい昇降力が必要であり、このために曳航体は大型になる。

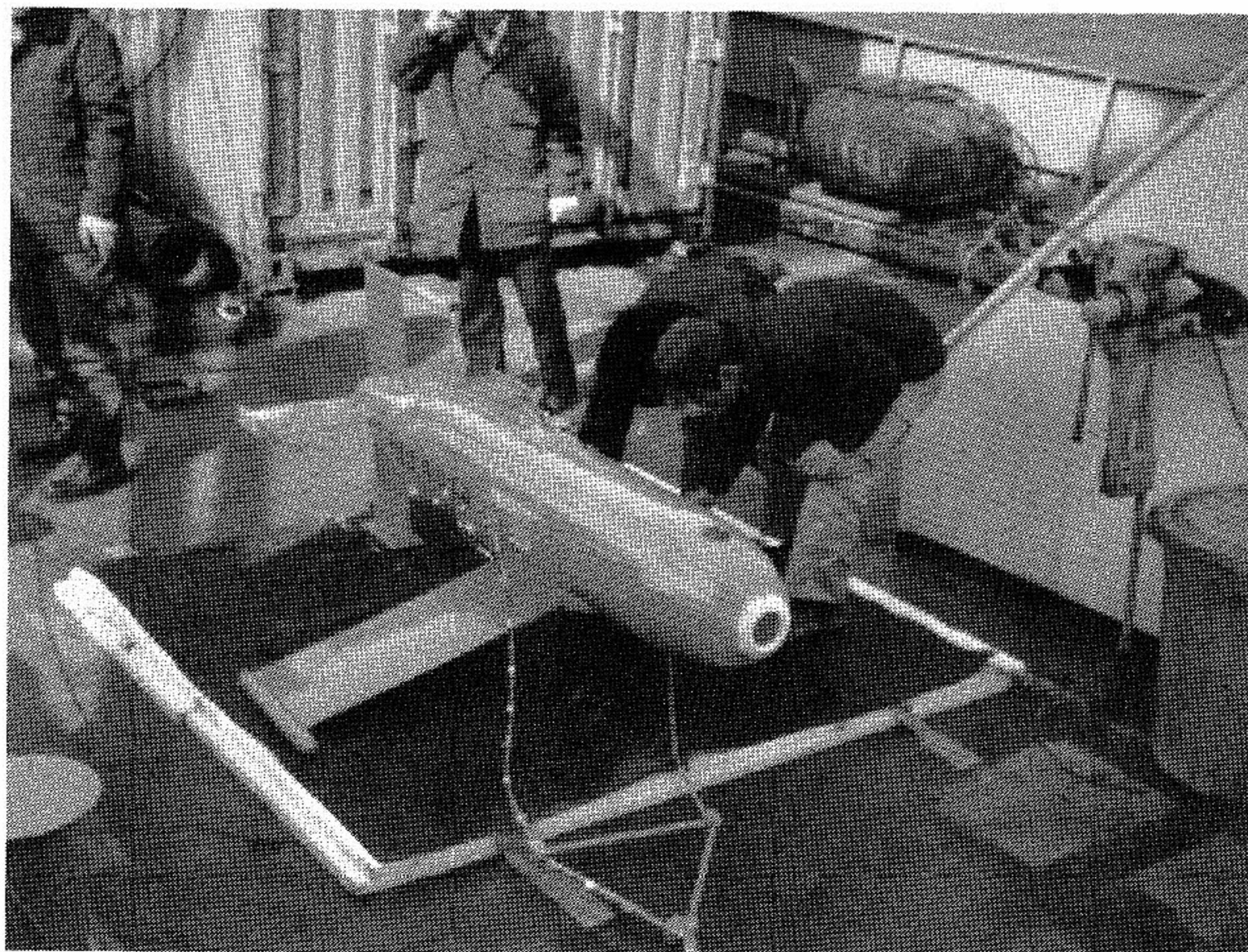


写真1 海洋科学技術センターが昭和49～51
年度に開発した4 kts 用曳航体

Conventional towed vehicle
(developed at JAMSTEC 1974
- 1976)

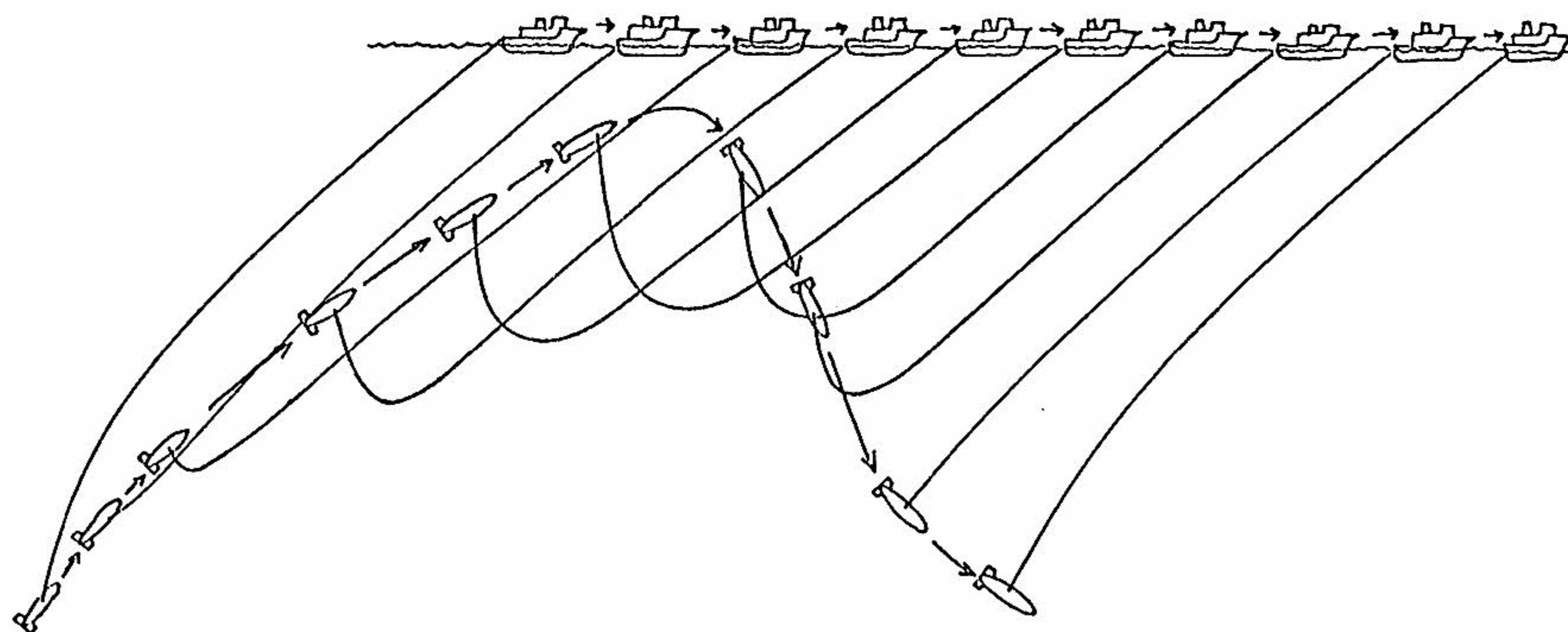


図1 従来方式の曳航体の海中での昇降

Undulating motion of a conventional towed vehicle

(2) 昇降運動に曳航索の昇降を伴うために、昇降速度はあまり大きくすることができない。

(3) 昇降運動中、曳航体はローリングについて自由である。したがって、曳航体の安定を保つためにロール制御が必要である。

昭和52年度に開発が開始された高速曳航体は、当初従来どおりの曳航方式で検討が進められたが、上述の制約により、最大使用深度200mに対して全長約2m、重量120kgとなった。

スライド式曳航体は、このような設計上の制約を受けない曳航方式を目指したものであり、「高速曳航体の研究開発」の中で行っていた新曳航方式の検討の中で生まれたものである。

3.2 スライド式曳航体

スライド式曳航体という名称は、曳航体が曳航索に沿ってスライドすることによっている。図-2に示すように、スライド式曳航体は曳航索の先端につけられたディプレッサーにより、安定に保たれた曳航索に沿って海中を昇降する。主翼の揚力によって昇降する点は、従来の方式と同様であるが、ケーブルのカテナリを変えずに曳航体のみが海中を昇降するので、昇降に必要な力は曳航体自身の昇降に必要な分で済み、その大きさは昇降振幅の大きさと無関係である。この結果、曳航体を小型にすることができ、昇降速度も従来より大きくすることができる。⁹⁾ また、曳航体のロール方向の運動は曳航索によって拘束されるので、ロール安定は問題とならない。さらに、このスライド式曳航体方式では、原理的には昇降深度振幅に限界がない。図3は、フェアリングをしない裸のケーブルを使用して、曳航速度2ktsで曳航した場合の昇降運動の計算例であるが、実際に深海曳航装置などと同時使用すれば、太平洋底と海表面の間を走査することも実現可能である。

スライド式曳航体のもつこれらの特長は、曳航体が曳航索に固定されていないことによるものである。しかしながら、この特長は、データ通信に関して新たな技術的問題をもたらした。すなわち、曳航体が曳航ケーブル内の導線と電氣的に接触することができないため、実時間で曳航体と船上装置間のデータ通信を行うには、何らかの非接触通信技術が必要であるということである。これについては、光通信、音響通信など各種の方式が検討

された¹⁰⁾結果、誘導通信方式が最も有望であるとの結論に達した。そこで海中における誘導通信について独立の課題で経常研究を開始することとなった。

4. 開発の経過

4.1 小型の模型による検討

スライド式曳航体の開発は、昭和52年度半ばより経常研究「海洋調査手法の能率化実用化に関する試験研究」の中で開始された。昭和52年度には動作原理の確認用に小型の模型を製作し、曳航水槽を用いた実験により原理通りの動作を確認した。また小型船による実海域での曳航も行った。この最初の試作模型は写真2に示すような双胴型で、全長は約40cmである。この模型の昇降切り換えは機械的に行っている。図4に示すように、曳航索上の2カ所につけられたリミッターに昇降体が当たると、曳航体の舵角が機械的に切り換わり、上昇下降の運動方向が逆転するものである。この切り換え方式は、昭和57年度にサーボモーターによる方式に変更されるまで用いられた。

写真3は昭和53年度に製作した模型である。この模型では、昇降力を発生するための主翼とその方向を切り換えるための昇降舵を一体にした部分と、計測センサー部分を分離し、おのおの独立にケーブルガイドの支点を中心に回転自由につけられている。これは昭和53年の時点ではまだ曳航体用の誘導通信技術が実用レベルに達していなかったために、計測データは曳航体内蔵の記録装置に貯え、計測終了後に出力する方法を想定しており、そのために計測記録部が容易に取りはずせる必要があったことによる。この模型を用いて回流水槽による試験を行い分離形でも昇降能力に問題を生じないことを確認した。そこで、次に述べる最初の実海域試験用機体は翼、センサー分離形とした。

4.2 第1号試作機

昭和54年度に製作したもので、実海域における本格的昇降動作試験を目的とした最初の機体である(写真4)。全長約1mで、胴体内に曳航体の昇降運動を計測するための深度(圧力)計と記録用テープレコーダーを内蔵している。機体は分離形で、昇降切り換えは機械的な方式をとって

る。昭和55年1月に曳航水槽による基本動作試験を行った¹¹⁾のち若干の改造を施し、同年5月に最初の実海域での昇降試験を行った。¹²⁾ 図5はこのときの曳航体の昇降運動の記録である。昇降振幅は約20mであった。この試験により予想どおりの運動性能を確認することはできたが、一方で、昇降舵角切り換え時の衝撃、および切り換えの安定性などいくつかの問題点が指摘された。翌昭和56年度には第7号機に大幅な改造を加え、深度センサーを変更するとともに水温測定機能を追加した。センサーの小型化により、機体全長も大幅に短縮された(写真5)。

改造により、曳航体の昇降運動とともに水温の分布を計測することが可能となった。実験は昭和56年12月に相模湾で行われた。¹³⁾ また、昭和57年3月には、同機により初めてフェアリングのつけられた曳航索に沿っての昇降運動が試験され、問題ないことが確認された。

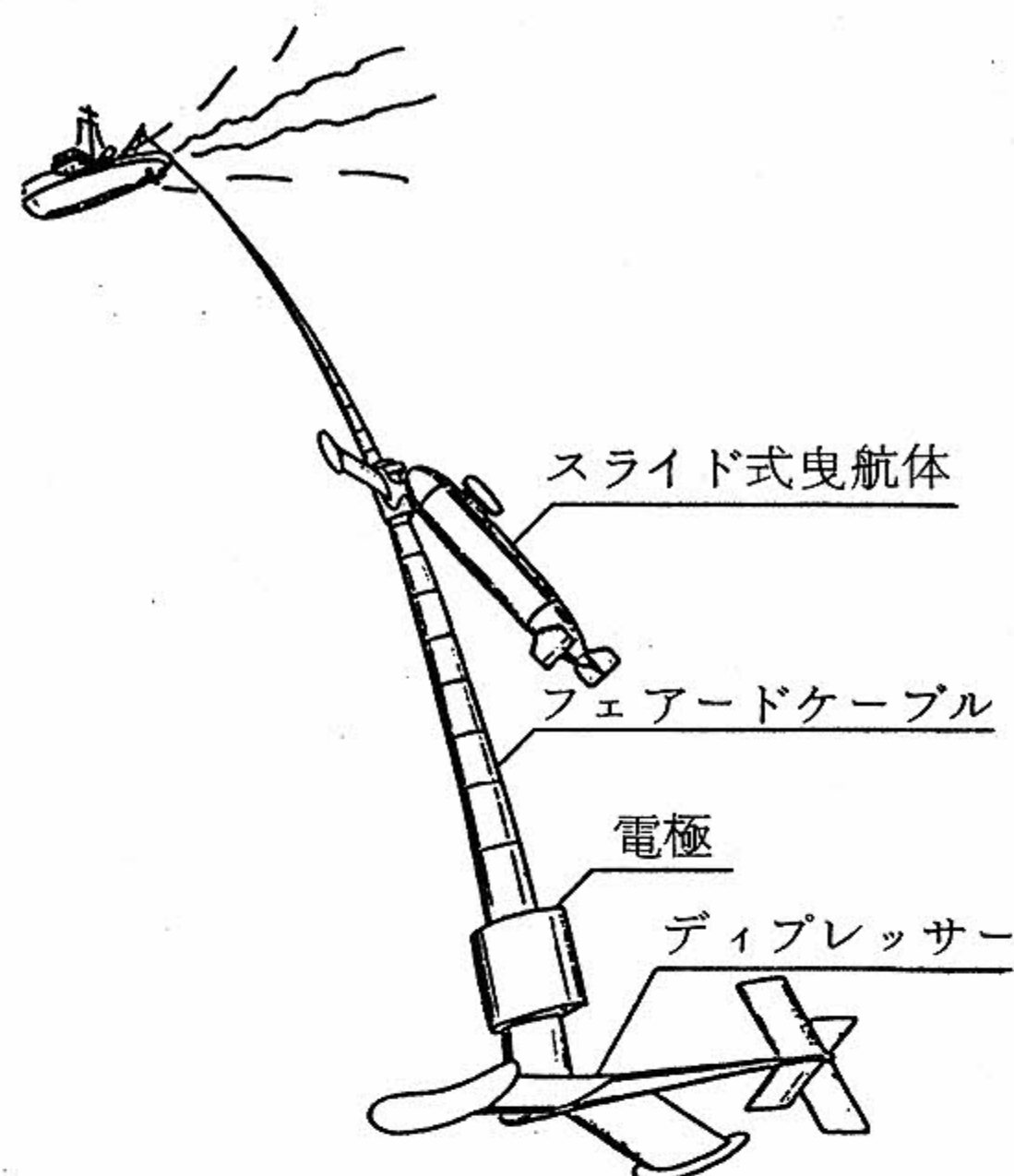


図2 スライド式曳航体概念図
Underwater sliding vehicle system

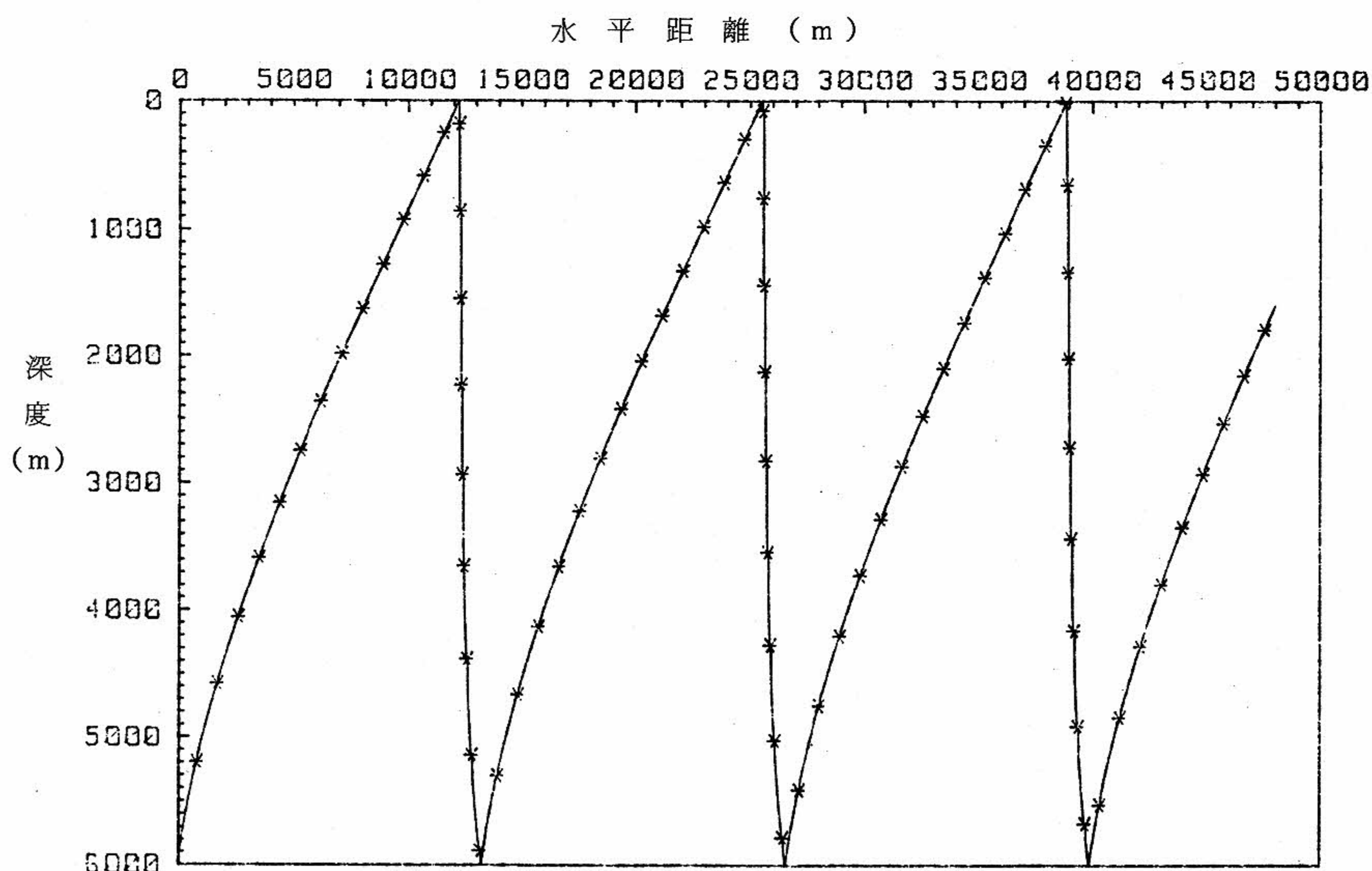


図3 6000mの昇降計算例(曳航速度2 kts. 直径20mmの裸ケーブル使用；
*印は10分毎の曳航体の位置)

Computer simulation of scanning motion of underwater sliding vehicle between ocean surface and 6000m depth

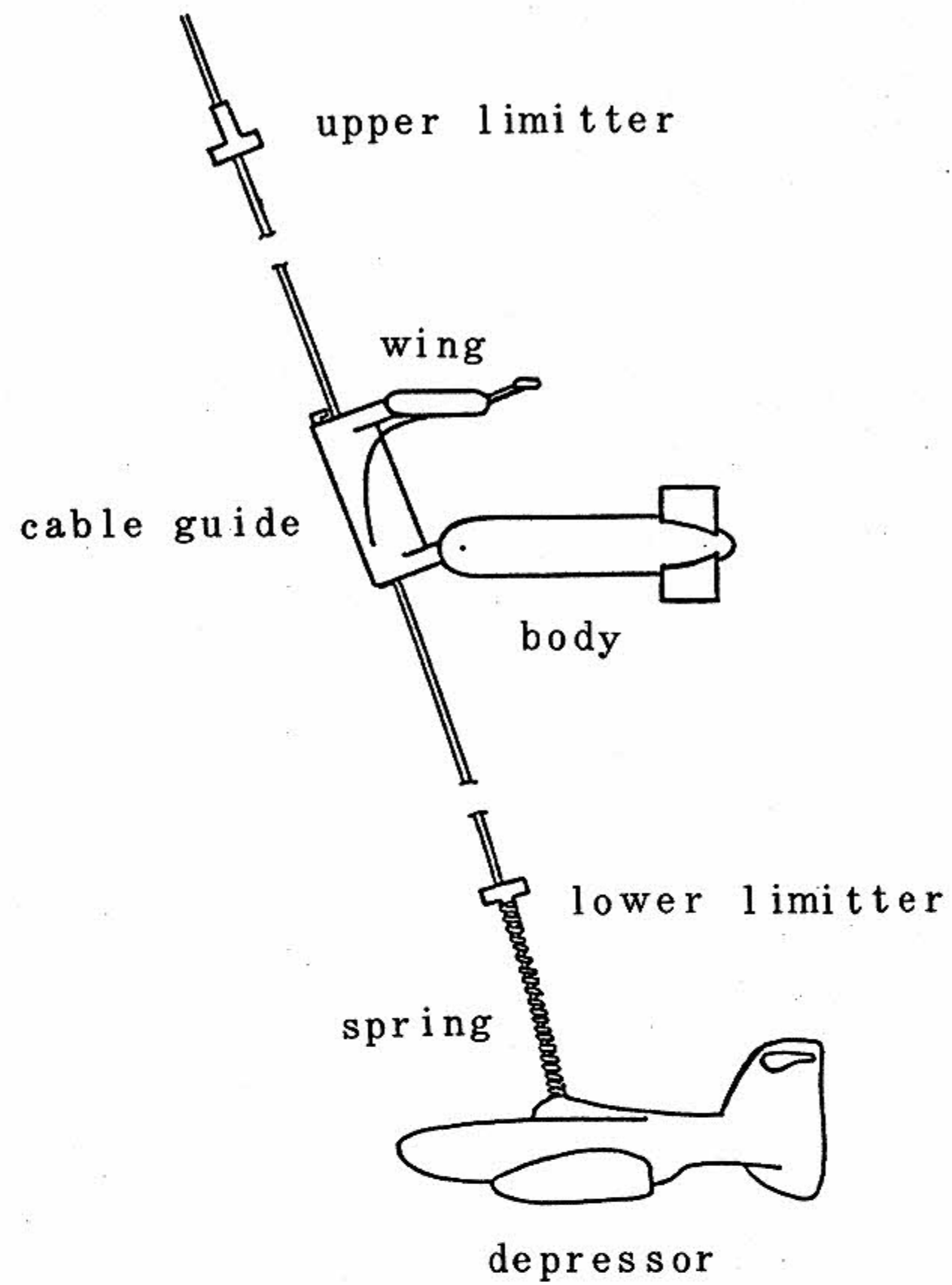


図4 機械的昇降切り換え
Mechanical switching of
the vehicle motion

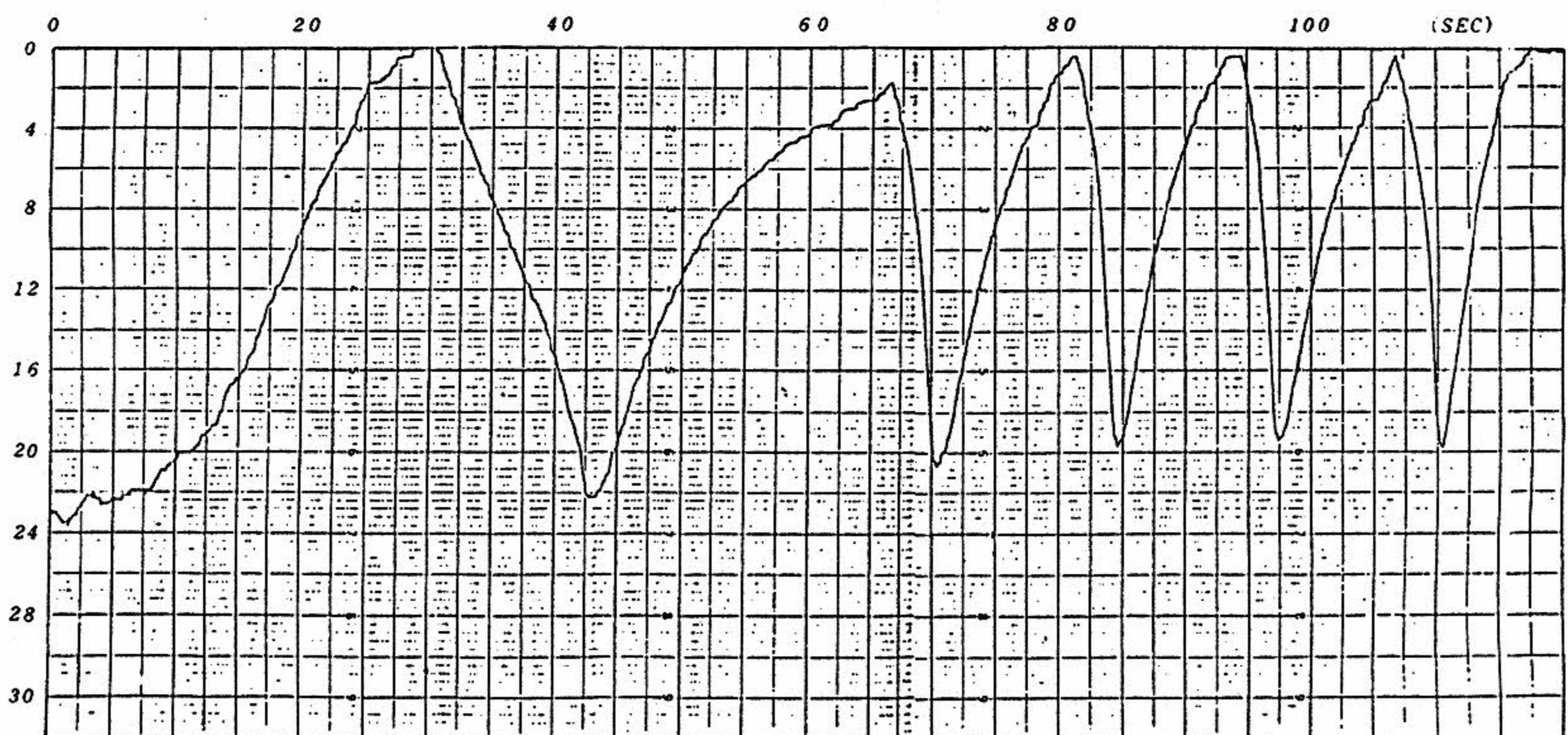


図5 1号試作機による昇降実験データ
Underwater motion data of the 1st
test vehicle

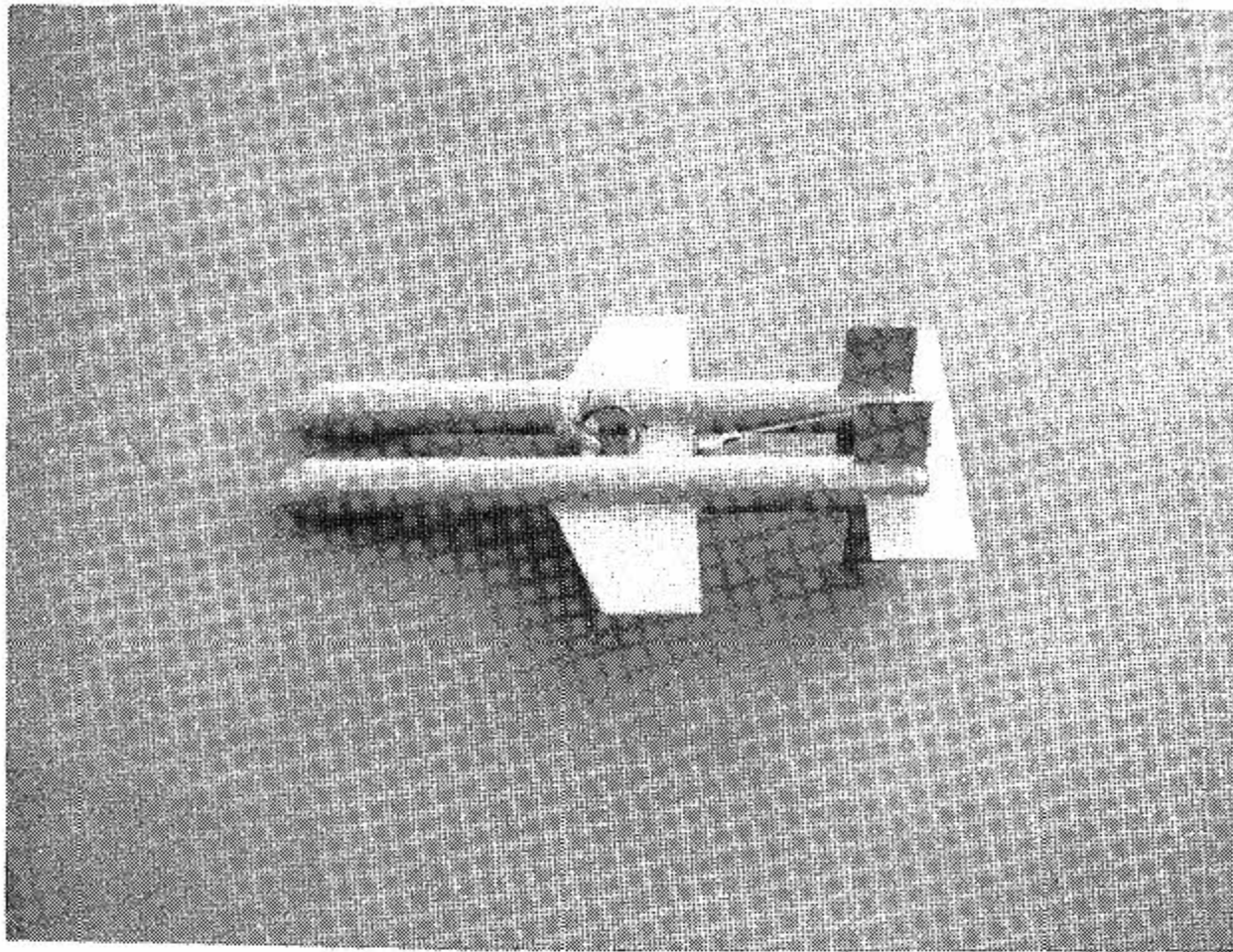


写真2 スライド式曳航体の最初のモデル
The 1st model of underwater
sliding vehicle

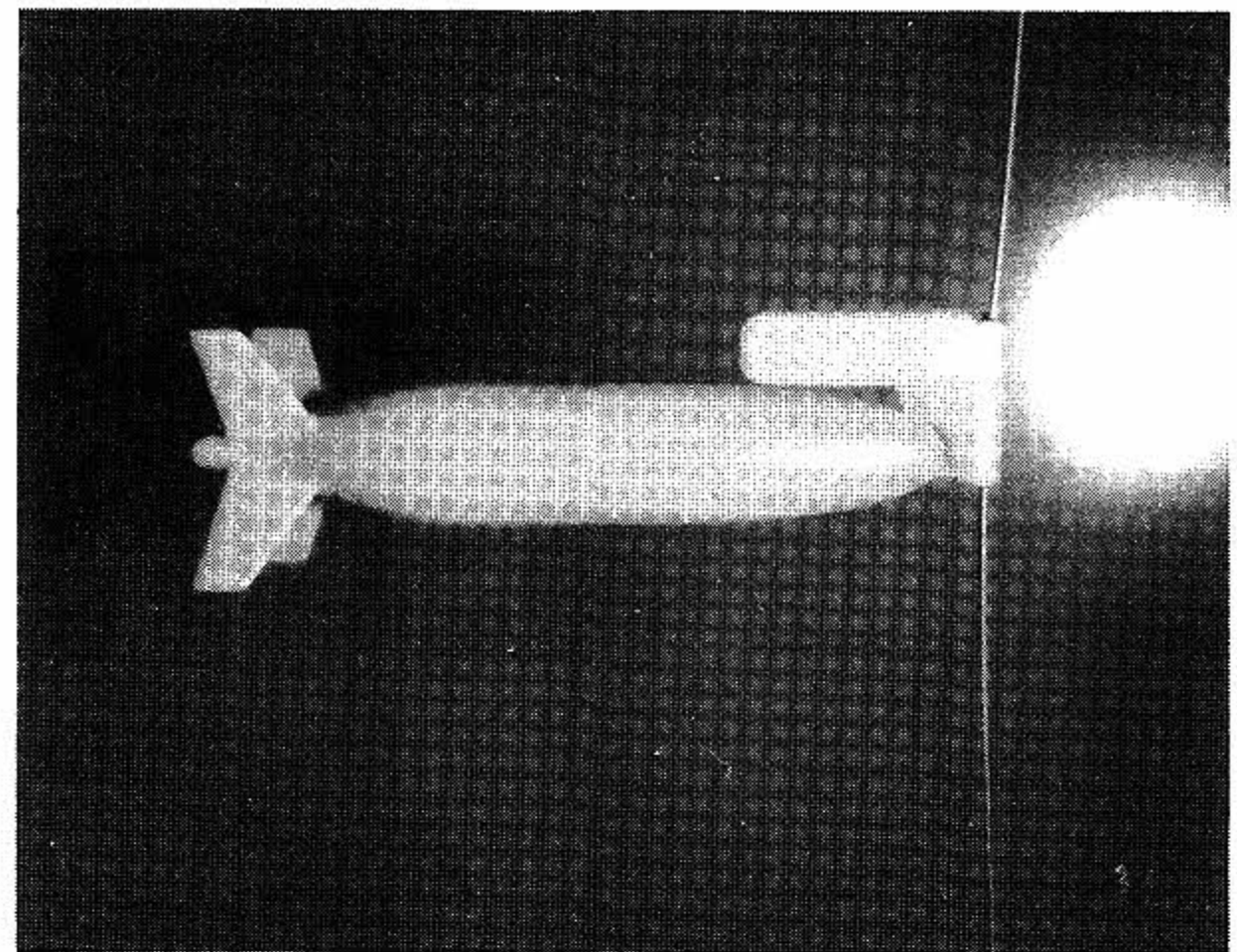


写真3 主翼－センサー分離型の水槽試験用模型
The 2nd vehicle model
(separate type)

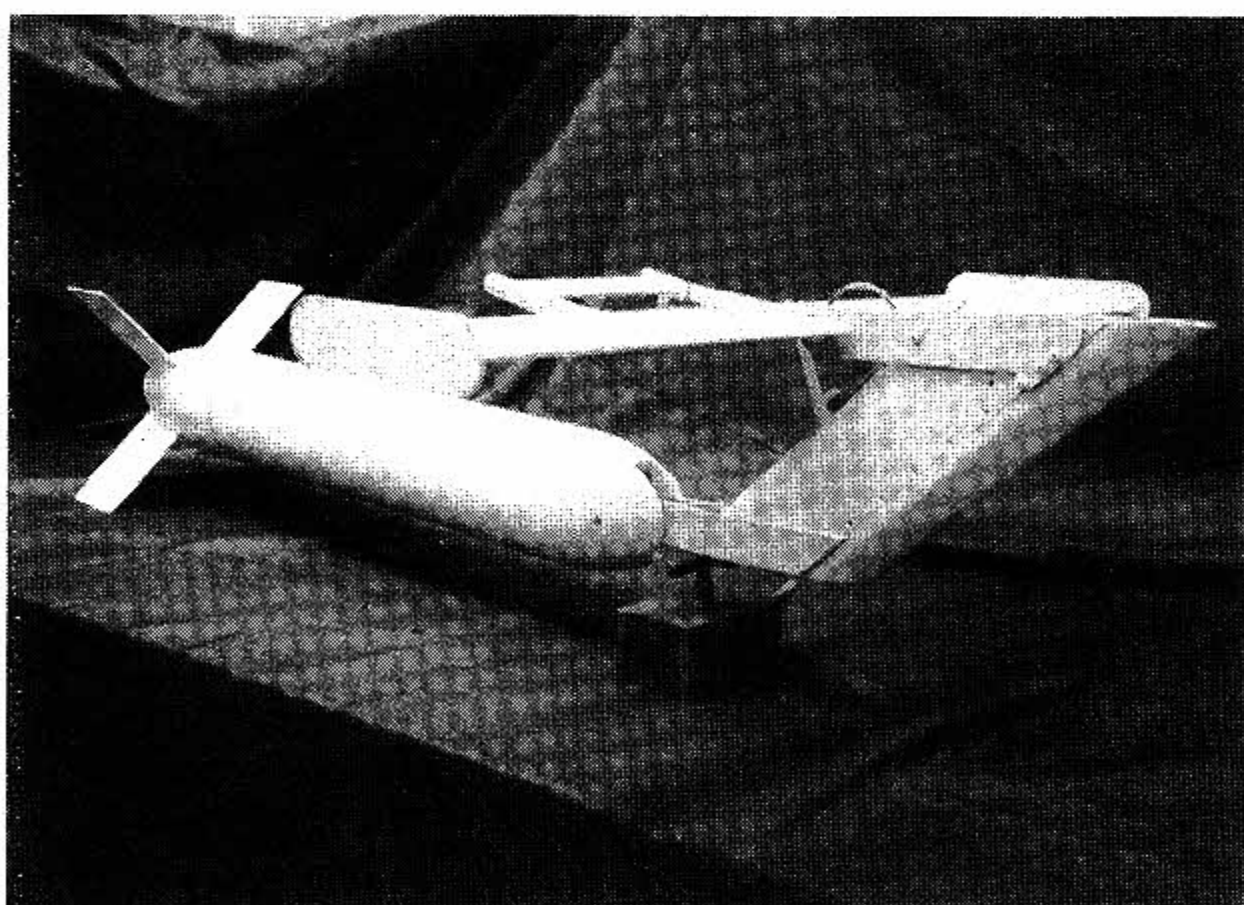


写真4 第1号機。実海域で試験された最初の
機体
The 1st test vehicle for
field trials

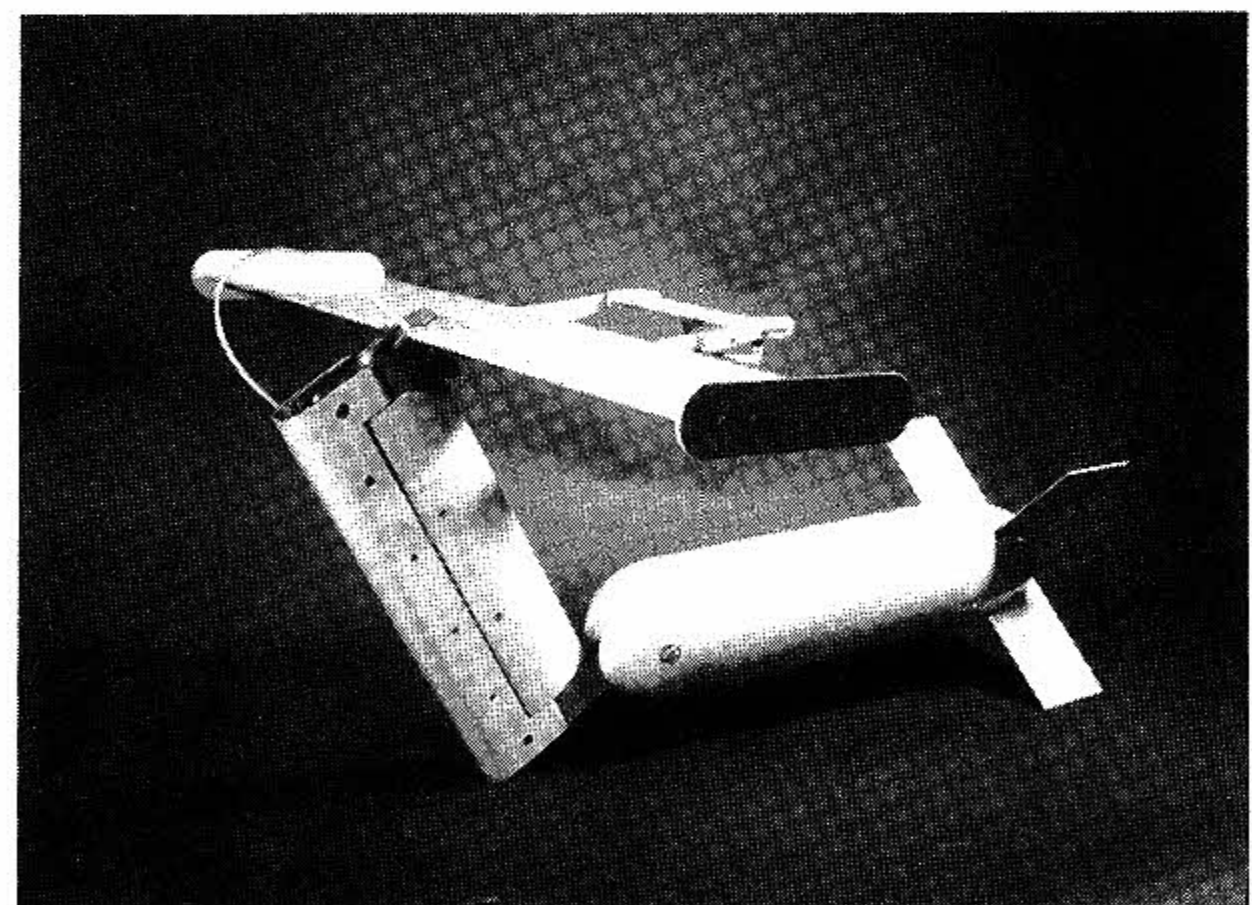


写真5 改造により胴体が短縮され、温度セン
サーも搭載された1号機
Modified 1st vehicle. Body
length is reduced and water
temperature sensor (thermi-
ster) is added

4.3 第2号試作機

昭和56年度には1号機の改造と並行して2号機の試作を行った。2号機は、誘導通信方式のスライド式曳航体への応用に関する実験を目的としたものである。誘導通信に関しては、すでに述べたように経常研究として別に海中への応用研究を実施していた。^{14),15)} 2号機は水温と圧力の計測センサーを持ち、これらのセンサーによる計測データを2進のデジタル値に変換し、9.6 KHz と 19.2 KHz の2周波を用いてF S K変調し、船上

に送信する(図6)。写真6と写真7に2号機の機体とその内部を示す。2号機による海域実験は昭和57年7月と9月に相模湾で行われ、誘導通信方式の有効性が実証され、曳航体と船上間の実時間データ通信が可能となった。図7は昭和57年7月の実験における計測データの1例である。また、1号機で指摘されていた昇降切り換え機構の作動安定性について若干の改良を試みたが、期待した成果は得られなかった。

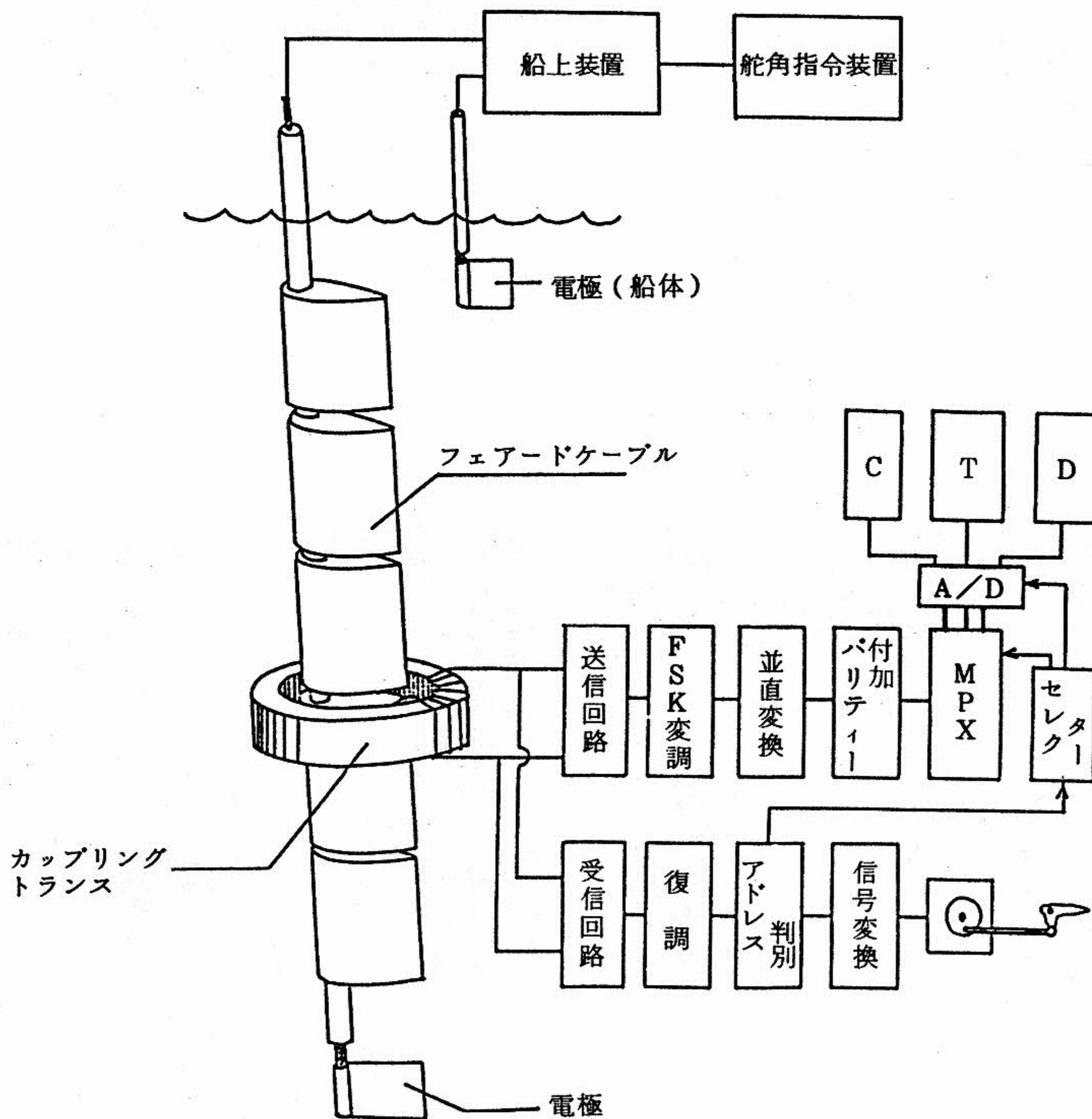


図6 スライド式曳航体に使われている誘導通信方式概念図(実用試験機に使われている最新のもの)

Inductive coupling system used in underwater sliding vehicle

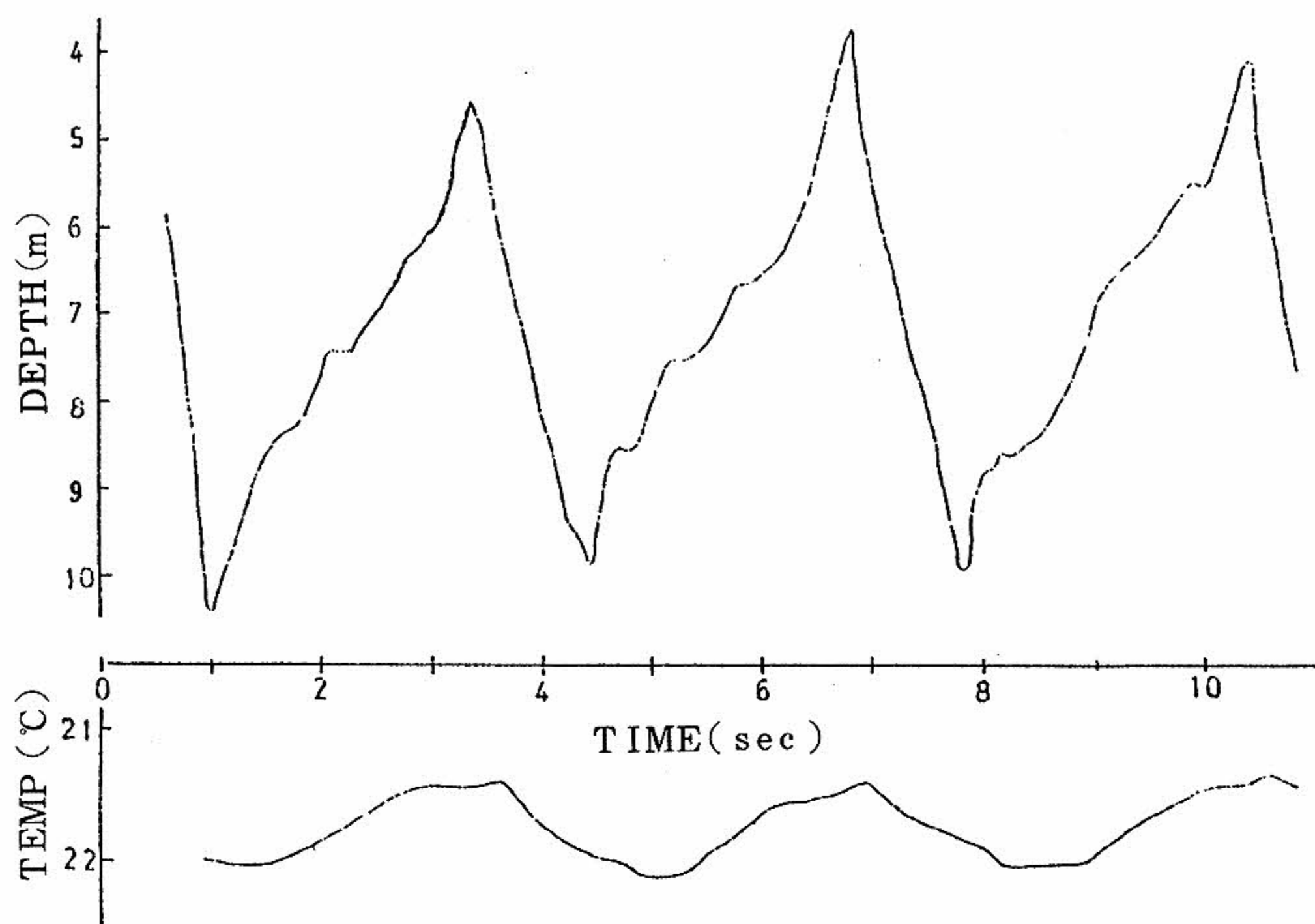


図7 2号試作機による計測試験データ(データは誘導通信により
実時間で船上へ伝送される)

Motion and water temperature data measured
by the 2nd test vehicle (Inductive coupling
is used for data transmission)

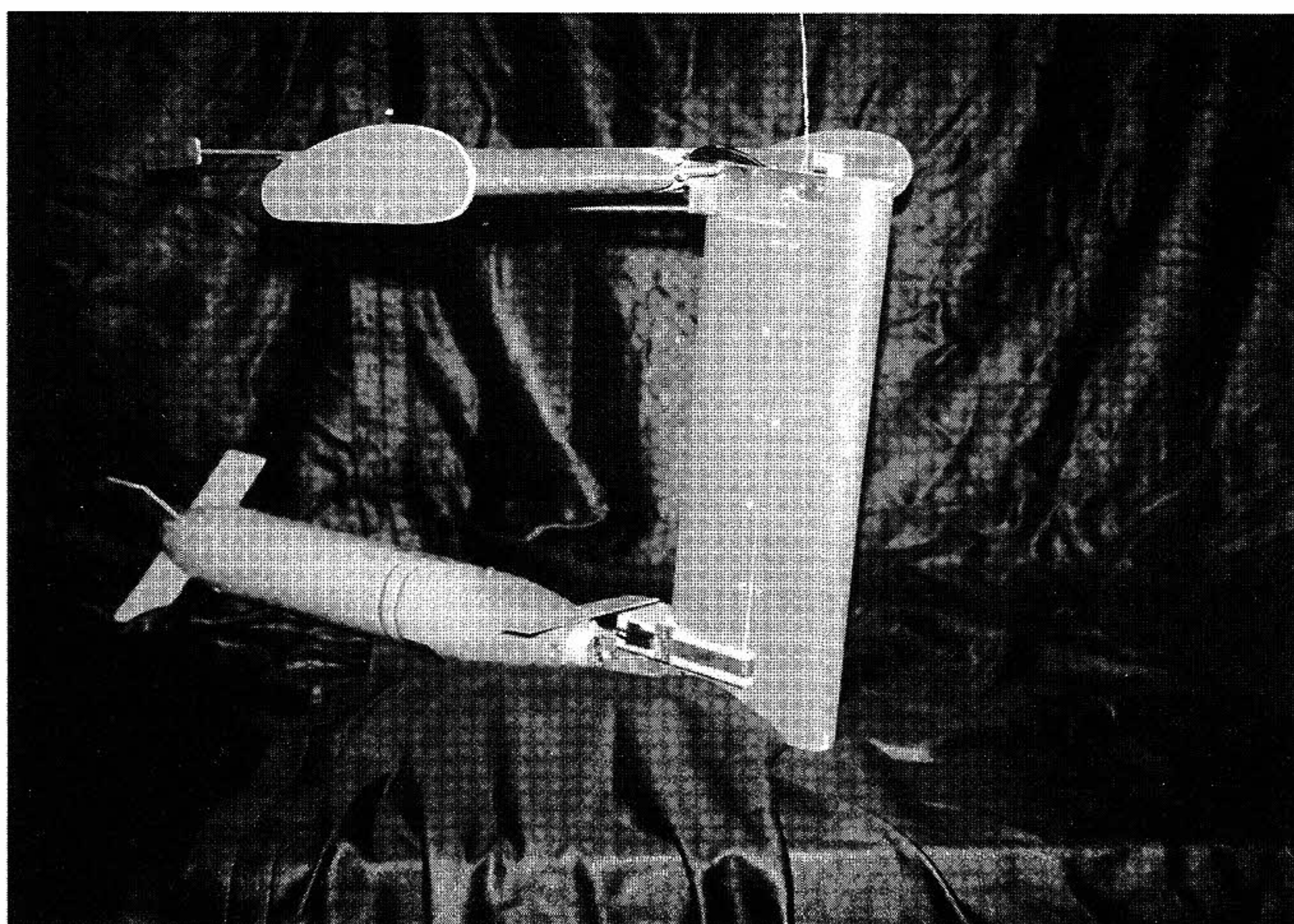


写真6 誘導通信試験のために試作された2号
試験機

2nd vehicle for data Commu-
nication test

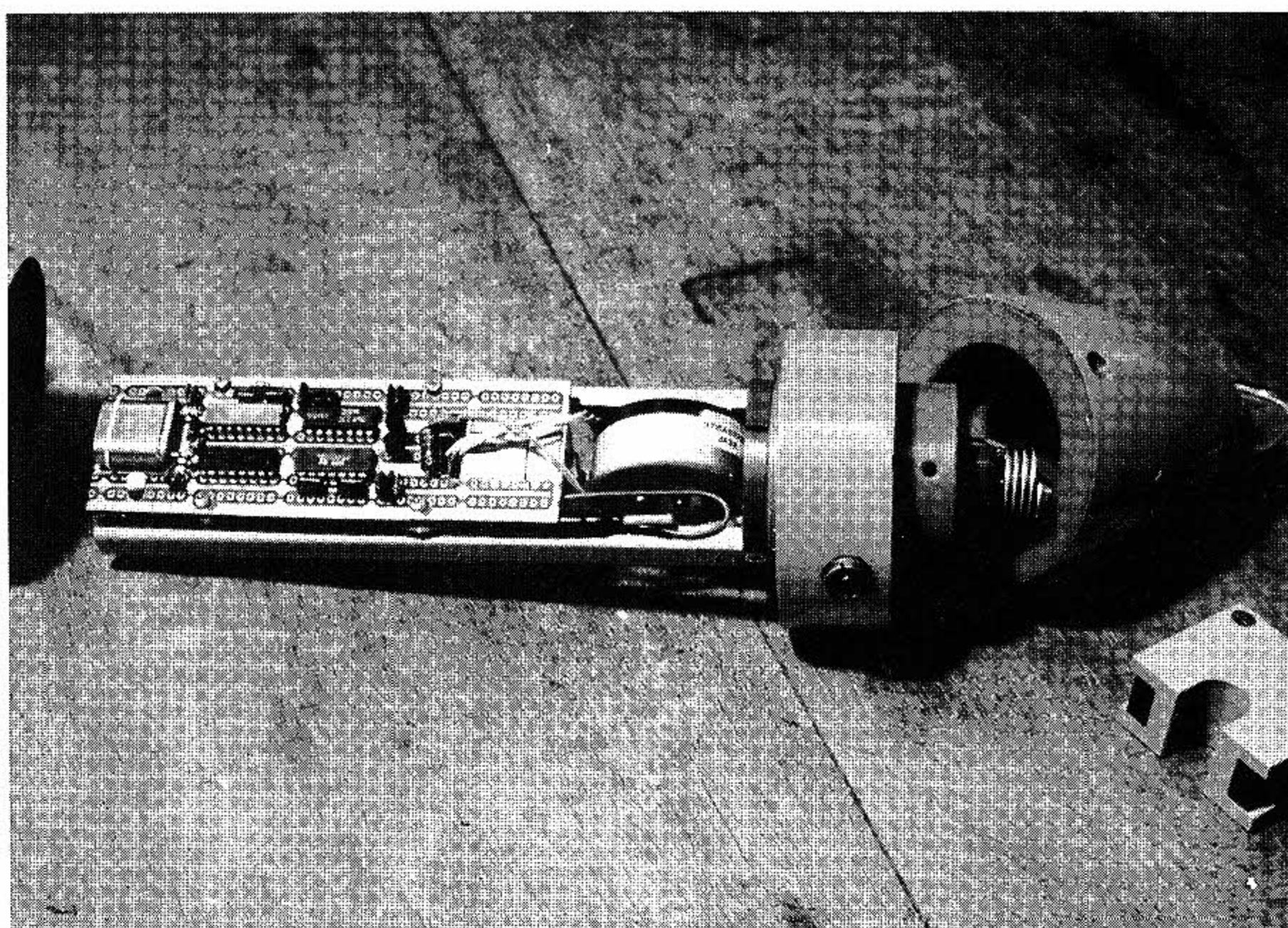


写真7 2号試験機の内部と計測センサー

Sensors and electric circuits
of the 2nd test vehicle

4.4 第3号試作機

2号機によりデータ通信の問題が解決した。しかしながら昇降切り換え機構の問題は、相変わらず残った。一方、将来曳航体の深度を一定に保ったり、計測状況に応じてコンピューターが曳航体の運動を精密に制御するなど、スライド式曳航体の長を生かした高度の計測に対応するための機能付加が必要と考えられるに至った。この両者を満足させる方法として、これまでの機械式の昇降切り換えをやめ、サーボモーターによる舵角の制御を採用することとした。曳航体と船上間の通信問題が解決されているので、サーボモーターによる制御ができれば、海中の曳航体の刻々の運動を船上から自由に制御することができるようになり、また舵角切り換え時の衝撃の問題も一挙に解決される。そこで、3号機ではサーボモーターによる舵角切り換え機構の試作と試験が主要な課題となった。機体の形状は、この方式変更に伴ない写真8に示されるように大幅に変わった。なお、予算上の問題から計測通信系は2号機のをそのまま流用し、舵角切り換えは内蔵タイマーにより行うこととした。3号機による海域実験は昭和58年3月に実施され、フェアリングの施された曳航索

に沿っての期待通りの昇降運動を確認した。3号機の主翼と尾翼および舵角切り換え機構部はそのまま次の小型実用試験機に使用された。3号機の全長は約1mである。

4.5 CTD計測用小型実用試験機

小型の模型と3機の試験機の試作を通じて、スライド式曳航体の開発における要素技術の開発を行ってきた。そのうち主な課題は次のとおりである。

- (1) 基本的な動作原理の確認
- (2) フェアードケーブルに沿っての昇降
- (3) 水温、塩分の連続計測
- (4) 誘導通信による実時間データ伝送
- (5) サーボモーターによる昇降舵角制御

これらの実績を基に、昭和58年度に最初の本格的海洋計測をめざした実用試験機を試作した(写真9)。実用試験機には、これまでの開発成果が全て盛り込まれているほかに、新たに以下の機能が付加されている。

- (1) 塩分計測用電気伝導度センサーを搭載する。
- (2) 誘導通信を双方向式とし、曳航体から船上へは計測データを、船上から曳航体へは運動制御指令を伝送する。

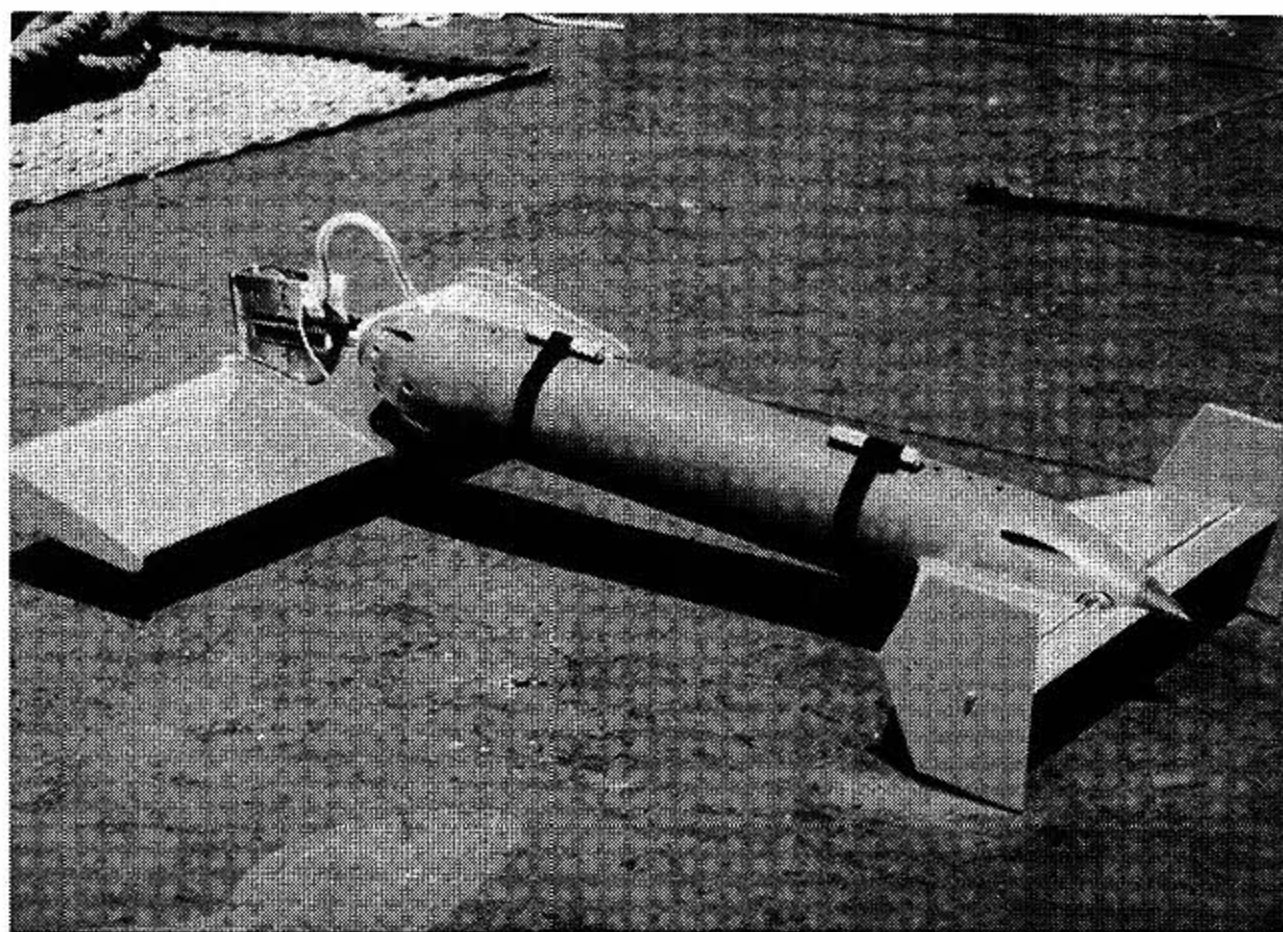


写真8 サーボモーターによる舵角制御試験用3号試験機。主翼と尾翼および舵角制御機構部はそのまま次の実用試験機に使用されている

The 3rd test vehicle. Elevators are controlled by a servomotor in this vehicle

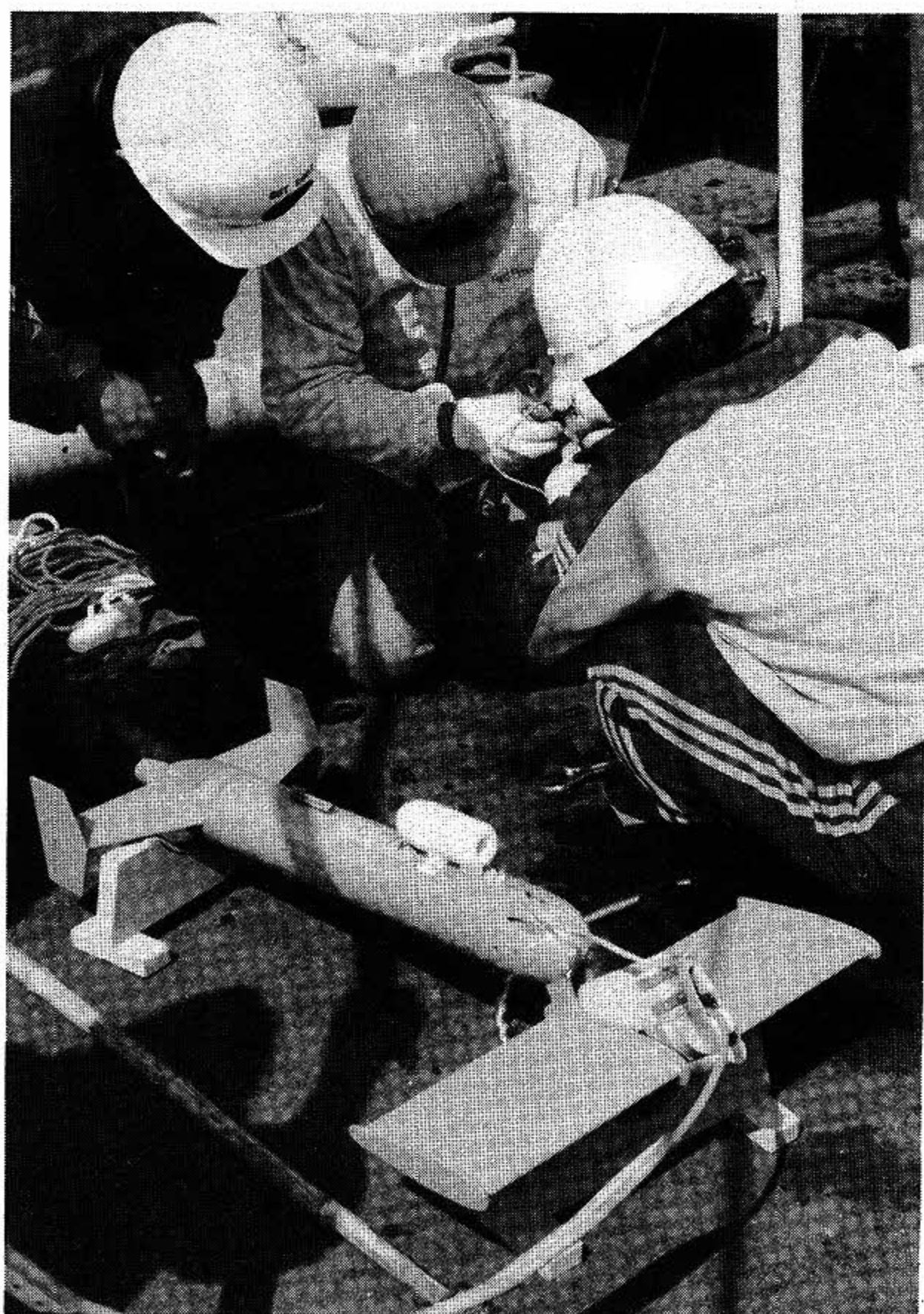


写真9 CTDセンサーを搭載した小型実用試験機

The small vehicle for oceanographic measurement tests. The vehicle carries conductivity, temperature and depth sensors.

(3) カラーCRTを用いて水温、電気伝導度などの鉛直面内における分布状況をカラーの鉛直断面画像として表示する。

以上によりスライド式曳航体の目標であった、海洋鉛直面内を高速で走査することにより空間分解能の高い観測を行う、計測データを実時間で船上に伝送し、CRTにより計測データをモニターするとともに記録装置にデジタル値で記録する、および船上から曳航体の運動を制御する、という基本的な機能は達成された。写真10～写真13に現在のシステムを示す。昭和59年9月の相模湾における海域実験では、約200mのフェアードケーブルを用いて最大曳航速度8.5 kts で海面と深度170mの間を自動昇降し、水温と電気伝導度の空間分布を計測した。この実験での連続計測時間は最高約5時間であった。写真14はCR

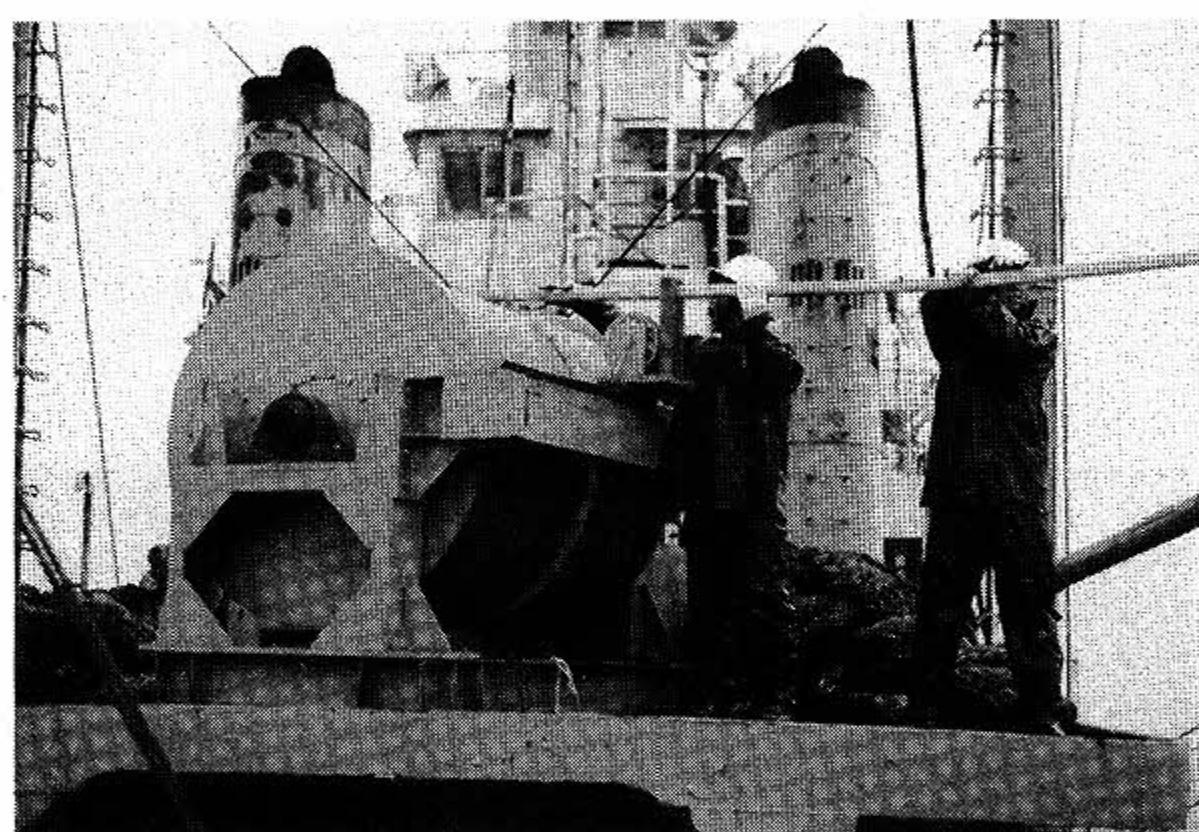


写真10 ケーブルウィンチ
Cable winch

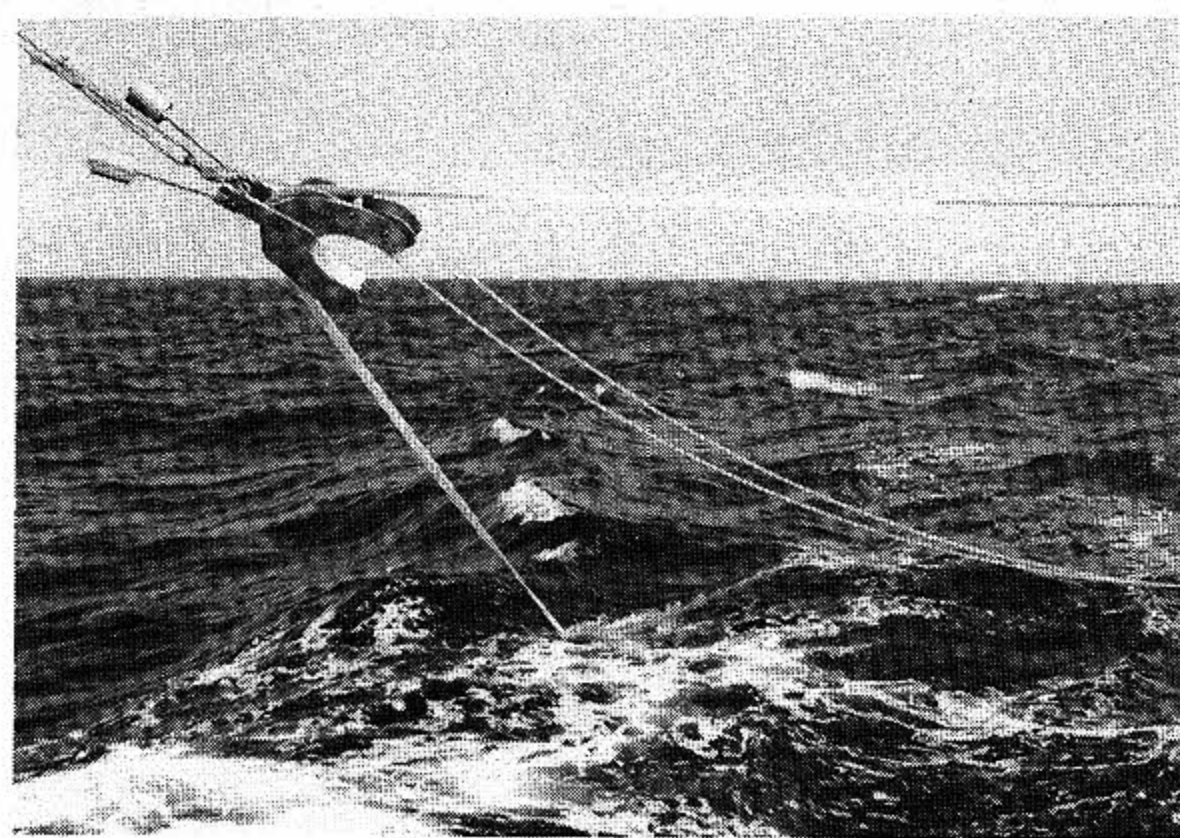


写真11 フェアードケーブル用曳航ジープ
Special towing cable for faired cables



写真12 船上装置。右上から船上ユニット，カートリッジMT，カートリッジMT用インターフェース，中央に昇降運動制御のための指令装置，左にデータモニター用パーソナルコンピュータ
Onboard equipments.
Right; deck unit, cartridge MT and its interface
Center; vehicle motion controller Left; desk top computer for data monitor

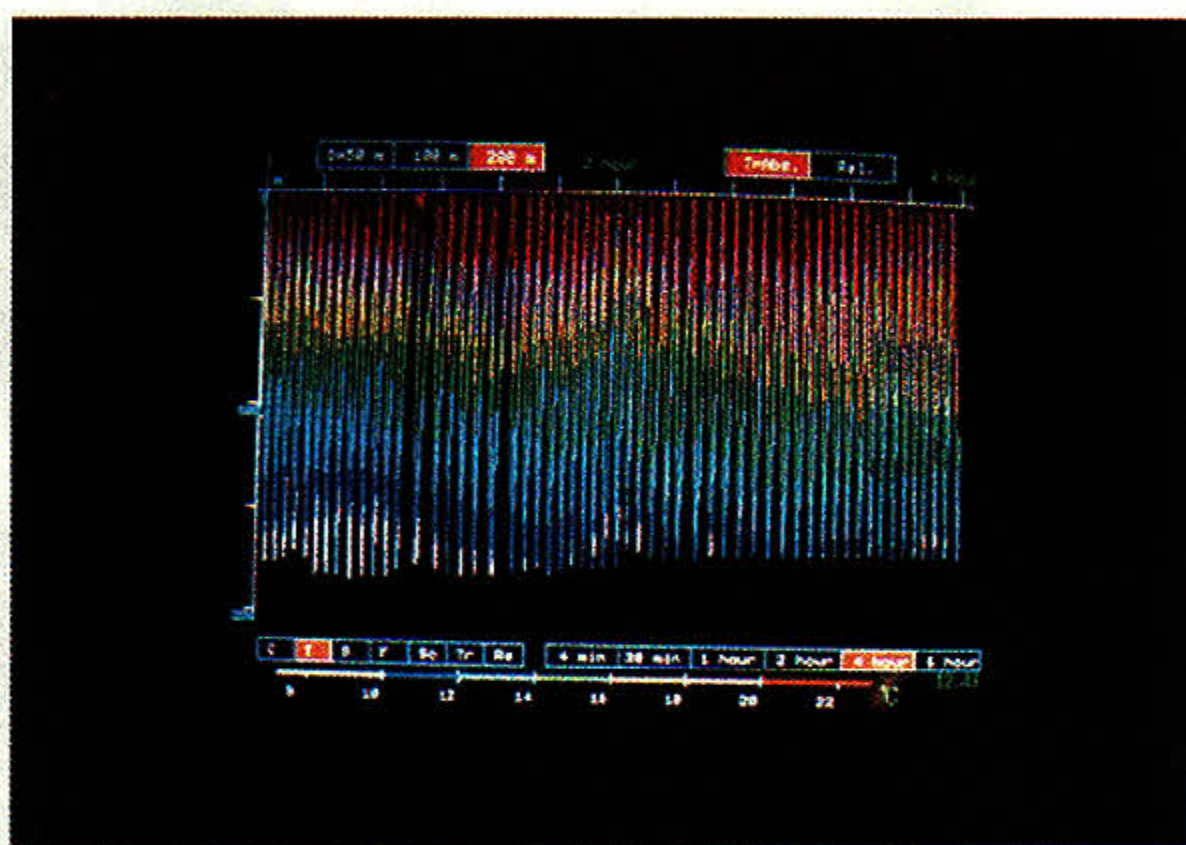


写真13 1984年9月の実験で得られた水温分布計測記録，水温に応じて変化するカラーの線により描かれている。
Water temperature distribution obtained in the sea trial performed in late September 1984. This graph is drawn in 8 colors corresponding to the water temperature.



写真14 植物プランクトン等の海中浮遊粒子からの蛍光，散乱光を計測するための光センサーを搭載した大型実用試験機
The large vehicle which carries CTD and optical sensors for biological measurement

T画面に水温の分布を鉛直断層画像としてカラー表示したもので，実験中に撮影したものである。この画像から水温分布，特に等温線の変動の様子が明確にとらえられる。この小型実用試験機の諸元は以下のとおりである。

寸法： $1\text{ m}^L \times 0.6\text{ m}^W \times 0.25\text{ m}^H$

重量：約8 kg（空中）

搭載センサー：電気伝導度（誘導型），水温（サーミスタ），深度（圧力；半導体）

最大使用深度：200 m

最大連続使用時間：10時間

4.6 光センサー搭載用大型実用試験機

CTD センサ搭載用小型機と並行して試作されたもので，昭和57年度に試作したCTDセンサーと昭和58年度に試作した蛍光散乱センサー第3

号機を搭載している。小型と異なり水温センサーに白金抵抗、電気伝導度センサーには4電極式が用いられている。光センサは光源に熱陰極放電管を用い、海中の植物プランクトンその他の浮遊粒子からの蛍光と散乱光をフォトダイオードで受けることにより、海中の植物プランクトンその他の分布を計測するものである。大型機については現在調整段階にあるが、昭和59年9月の海域実験において計測、通信系の作動チェックと基本的な昇降実験が行われた。大型機の諸元は以下のとおりである。

寸法：約 $1.3 \text{ m}^L \times 1 \text{ m}^W \times 0.3 \text{ m}^H$

重量：約 30 kg (空中、光センサーを含む)

搭載センサー：深度(圧力)、水温(白金抵抗)
電気伝導度(電極式)、蛍光、
散乱

最大使用深度：200 m

5. あとがき

昭和55年度から、スライド式曳航体はプロジェクト研究「新海洋観測システムの研究」の中で、高速曳航体として開発されている。この研究は昭和60年度で終了する。それまでに、この新しい海洋観測装置が実用システムとしてあらゆるバグ(BUG)の取りつくされた、いわゆる“枯れた”システムになっているとは考えにくい、現在すでにシステム実用化における最大の山は越えることができたものと確信する。今後の開発におけるシステム完成への最短路は、できるだけ多く運用の機会を持つことであろう。

文 献

- 1) Tsuji, Y., et al., "In Situ Optical Sensor for Fluorescence, Scattering and Transmittance", Proc. Oceans '81, Boston, 1981-9, 575~579
- 2) 辻義人ほか, 1982, "蛍光, 散乱, 透過率センサーI型の試作", JAMSTECTR(8), 43~64
- 3) 辻義人ほか, 1983, "CTD, 蛍光, 散乱, 透過率センサー用データ伝送, 記録, 処理システム", JAMSTECTR(10), 147~160
- 4) 辻義人ほか, 1983, "相模湾における多要素同時測定(第1報), 水平方向", JAMSTECTR(11), 101~114
- 5) Dessureault, J.G., 1976, "BATFISH" A Depth Controllable Towed Body for Collecting Oceanographic Data, Ocean Engineering, 13 99-111
- 6) 江村富男ほか, 1977, "曳航式海洋観測システムの設計について", JAMSTECTR(1), 50~60
- 7) 佐々木 建ほか, 1978, "曳航体の運動に関する実験と解析", JAMSTECTR(2), 75~82
- 8) 野本昌夫ほか, "海洋計測用曳航体", 第4回国際海洋開発会議プレプリント, 東京, 1976-9, B95-104
- 9) Nomoto, M., Sasaki, K., "Development of Underwater Sliding Vehicle for Oceanographic Measurement", Proc. Oceans '81 Boston, 1981-9, 1150-1154
- 10) 海洋科学技術センター, "スライド式曳航体における計測系概念設計書A, B"(1979)
- 11) 斉藤哲治, "スライド式曳航体の運動性能に関する研究", 東海大学海洋学部, 1980, 卒業研究論文
- 12) 岡野大介, "スライド式曳航体の運動性能に関する研究", 東海大学海洋学部, 1981, 卒業研究論文
- 13) 宮崎恵之助, 信耕靖, "スライド式曳航体の開発, 設計", 東海大学海洋学部, 1982, 卒業研究論文
- 14) 原俊明ほか, 1982, "電磁誘導伝送法による水温計測器の試作試験", JAMSTECTR(9), 112~121
- 15) 原俊明ほか, 1984, "多層観測用電磁誘導伝送式簡易センサの試作と海域実験", JAMSTECTR(12), 77~86

(原稿受理：1984年10月2日)