U.D.C. 550. 82. 08(204) : 629. 115. 8-822-519

水中調査ロボット システムの開発

Development of Survey and Inspection Robot System for Underwater Construction Work

泉　　久* *Hisashi Izumi*
河内政隆* *Masataka Kawauchi*
米田福男* *Tomio Yoneda*
寺山孝男* *Takao Terayama*

海中で土木建設作業を行なう場合には，事前に海底の地形や土質の調査を安全，且つ正確に行なうことが必要であるが，従来，潜水病や海中事故を恐れながら潜水夫の力に頼っていたのが実状であった。今回，このような海中作業の際の安全性と作業精度及び作業能率を高めるため，水中調査ロボット システムを開発した。このシステムは，船上より遠隔操縦を行ないながら，水深70m，潮流3ktまでの海底で，地形と土質の調査，及び他の水中作業機の監視，並びに施工結果の検査を行なうことが可能である。水中調査ロボットは，重量約5.3tの装軌車両で，水中テレビカメラや，水中カメラ，土質試験機，その他各種の計測機器を搭載し，海底を自由に走行することができる。2回にわたる海中実験の結果，このシステムが水中土木建設作業用の調査システムとして十分な性能をもっていること，また種々の計測表示装置が遠隔操縦を行なう場合に極めて有効であることを確認した。

1 緒　　言

近年，海洋空間の有効活用が叫ばれ，我が国でも港湾における航路の拡張や浚渫作業，橋脚の基礎工事や人工漁礁の建設など，多くの水中土木工事が実施されるようになった。

しかし，これらの水中土木工事の多くは，潜水夫が水中工具を用いて実施しているのが現状であり，従来から作業には常に潜水病や水中事故などの危険が伴い，潜水夫の安全確保と作業能率の向上とが望まれていた。

日立製作所では，このような問題を解決するために，これまでに浅海型，及び深海型と呼ばれる水深5～60mまでの海底で土木工事が可能な水中ブルドーザ システムを開発し[1]，水中工事でその威力を発揮してきたが，今回，新しく水中ブルドーザ システムなどの補助システムとして，工事前に海底の地形や土質を調査し，工事中には他の水中作業機の監視を行ない，また工事後には施工結果の検査を目的とする無人遠隔操作による水中調査ロボット システムを開発した。

このシステムは，日立製作所が財団法人機械振興協会の委託により海底土木建設作業システム（Seabed Engineering Workシステム：SEWシステム）のサブ システムとして開発したもので，水中テレビカメラや水中カメラ，土質試験機などの計測装置を搭載して，海底を自由に走行できる水中調査ロボット（以下，ロボットと略す）と，これを船上より遠隔操縦する種々の制御装置，及び調査作業を支援する機械装置から構成され，水深70mまでの海底を調査することが可能である。

2回にわたる海中試験の結果，所定の仕様を満たし，良好な成果を挙げることができた。

2 システムの構成と機能

前述したように水中調査ロボット システムは，工事区域内の海底地形と土質を詳細に調査し，工事中には他の水中作業機械の作業状況をも監視し，更に工事後には施工結果を検査することを目的としており，**表1**にその仕様を示す。

このシステムは**図1**に示すように，その基本構成は海底を走行し調査活動を行なうロボットと呼ばれる海底走行部と制御部，水中ケーブル及び機械部の四つの部分で構成される。

ロボットは，潜函工事に使用される電気油圧駆動方式の走軌式車両（日立TSE-2トラクターショベル）をベース マシンとし，これを水中用に改造したものに種々の計測装置，土質試験機，信号伝送装置，及び制御装置などを搭載したもので，海底を自由に走行移動することができる。制御部は，電力制御盤と調査ロボット制御盤より構成され，ロボットの遠隔操作や信号の多重伝送，計測情報の表示，電力の給配及び機械部の操縦などの機能をもち，支援母船（以下，母船と略す）の船内から全システムを遠隔操縦し監視することができる。また機械部は，海底のロボットと船上の制御部とを水中ケーブルとワイヤ ロープを用いて電気的・機械的に結合するためのもので，これらの巻取装置と緩衝装置とで構成され，母船の甲板上に装備される。

海底を調査する場合には，まず母船甲板上からクレーンによりロボットを海面までつり出したのち，機械部の巻取装置によって海底までロボットをつり降ろす。ロボットが着底すると，巻取装置の張力制御装置が作動して適当な長さのワイ

表1　水中調査ロボット システムの仕様　財団法人機械振興協会の海底土木建設作業システムの目標性能である。

項　　目	仕　　様
最大作業水深	70m
環境条件	作業可能潮流限度　3kt 作業休止時潮流限度　6kt
海底土質	ヘドロを除く海底土質
作業対象面積	1区域　100m×100m
対象作業内容	地形調査，土質調査，作業監視，検査
操作方式	遠隔操作

* 日立製作所機械研究所

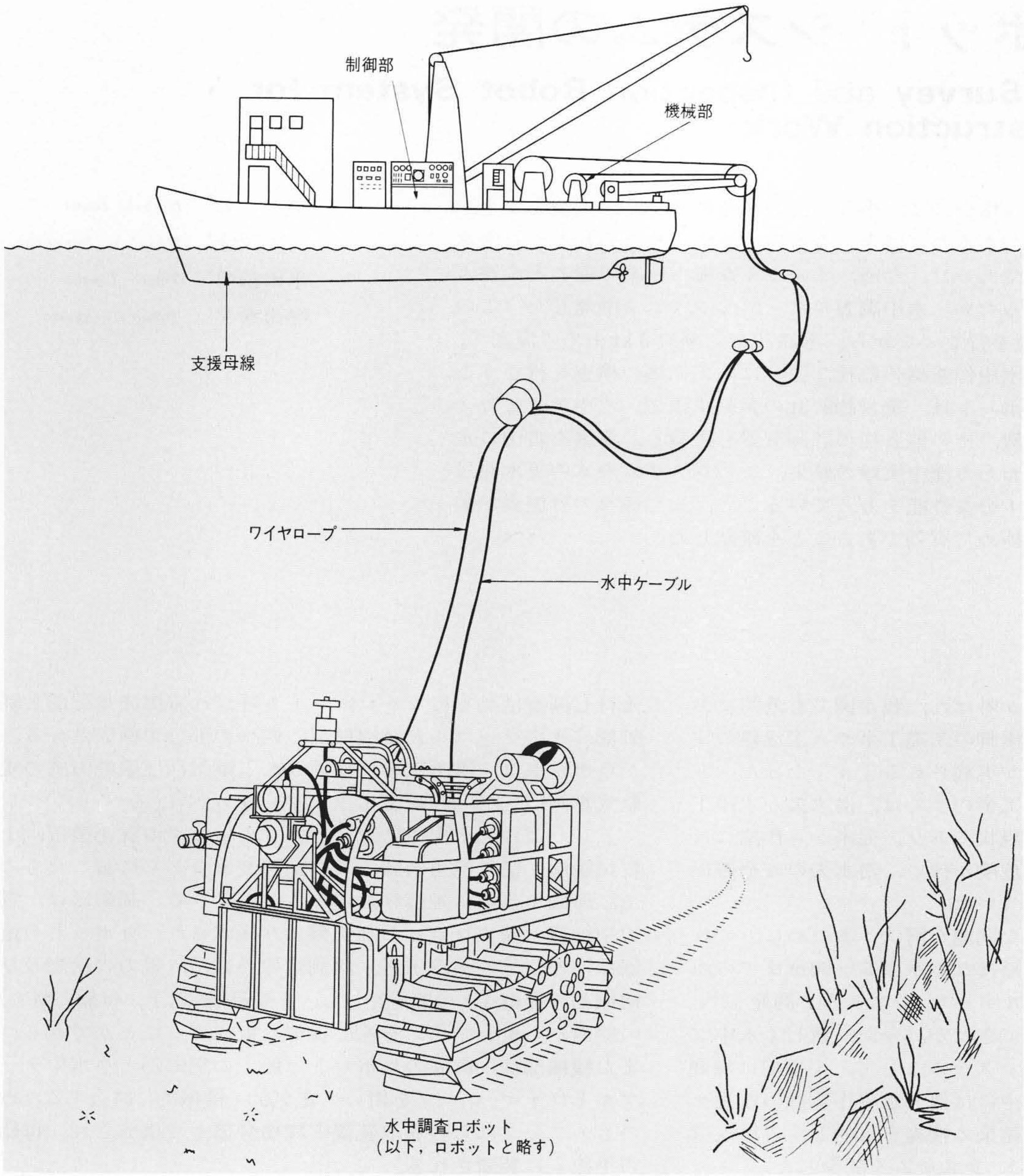

図1 水中調査ロボット システムの基本構成 母船上からの遠隔操作により，水深70mの海底を走行しながら調査する。

ヤ ロープと水中ケーブルとが繰り出され，ロボットは海底を自由に走行し，調査・監視・検査の水中作業を行なう。海底で岩礁や絶壁，あるいはヘドロのような軟弱な地盤に遭遇して走行が不可能となった場合には，ワイヤ ロープによってロボットを海底からつり上げ，母船がロボットの走行可能な地域まで移動したのち再び着底させ，作業を再開する。

2.1 ロボット(海底走行部)

(1) 走行装置

ロボットが海底で調査活動を行なう場合，海底走行部には次に述べるような性能が要求される。

(a) 微少距離の移動，及び方向の転換が容易であること。

(b) 3 ktの潮流がある海底でも，安全に所望の水中地点に移動到達できること。

(c) 土質試験をするうえに十分な反力を得ることができること。

3 ktの潮流中で作業しなければならないため，動作が安定であり遠隔操作も容易な装軌式車両を選定し，**図2**に示すような空中重量が約5.3t(水中約4.2t)の走行体とした。また，軟弱地の走行を考慮し，接地圧は0.28kg/cm^{2}とした。母船上から三相交流440V 60Hzの電力が，全長200 mの水中ケーブルを通して15kW水中誘導電動機に供給され，油圧に変換されたうえで水中調査ロボットを1.4km/hの一定速度で移動させることができる。

機械装置の特徴を次に述べる。

(a) 油圧装置を小形化するため，2連のギヤポンプと定容積形プランジャ モータを組み合わせ，左右のクローラを独立に駆動する。

(b) 油圧機器はすべて海水に直接露出して取り付け，ダイアフラムを用いて油タンクの作動油圧力を周囲海水圧とバランスさせる。

(c) 終減速機を海水の浸入から保護するために，スプロケット軸部の水密シールは二重構造とし，ギヤケース内にはオイルを充満してその油圧を海水圧とバランスさせる。

(d) 水中電動機と油圧ポンプ，油圧モータと終減速歯車軸などの軸継手部分はすべてケースで覆い，海水圧と等しい圧力の作動油を充満する。

操縦者は，ロボット制御盤上の棒状のハンドル(ジョイ スティック)を用いて，前進・後進，左右・前後のピボット ター

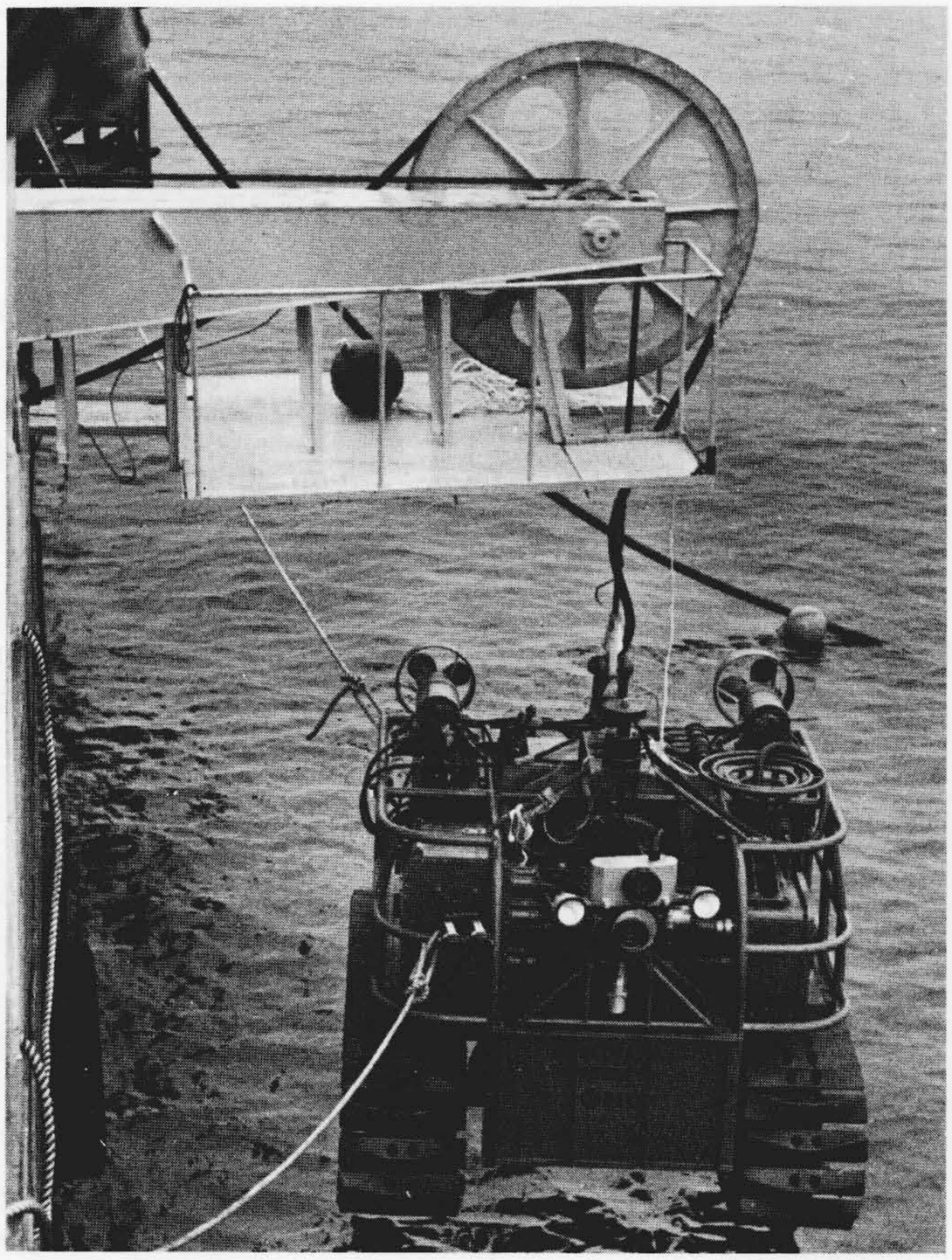

図2 ロボット 海面につり出されたロボットを示すもので，水中テレビカメラなどいろいろの調査用計器を搭載している。

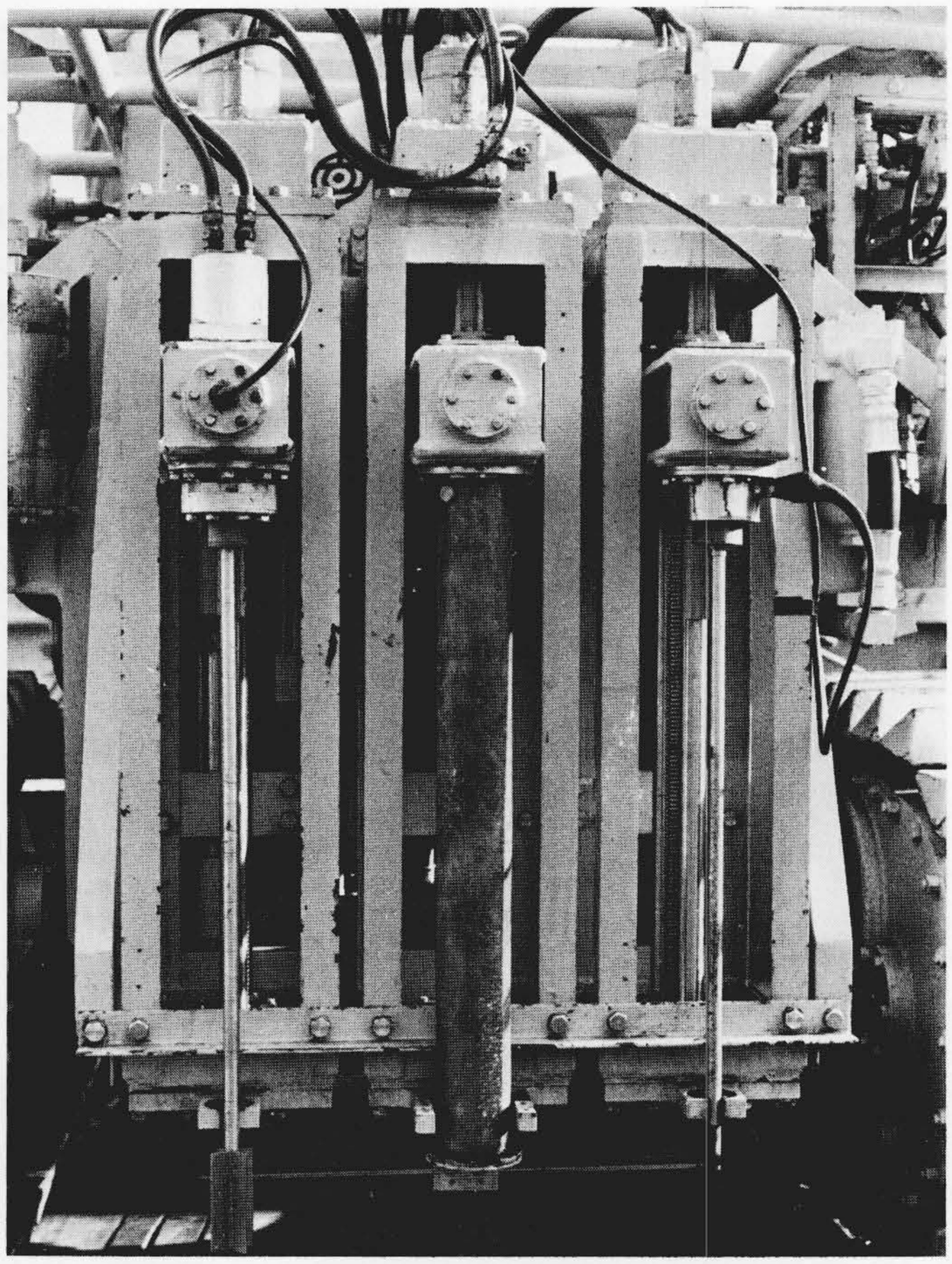

図3 土質試験機 海底表層土の性質を調べることができる。右からコーン貫入試験機，土質標本採取機，ベーンせん断試験機を示す。

ン，左右のスピン ターンと8通りに操縦することができる。試験の結果，直進性は良好であり，油圧駆動系のむだ時間は0.3秒以下であった。

(2) 計測装置

ロボットには，走行装置本体フレームの上部に次に示すような各種の計測試験装置，信号伝送装置，及び制御装置を搭載している。

(a) 超音波水中位置計測装置と方位計

ロボットに取り付けた送波器から超音波信号を出し，あらかじめ海底に設置しておいた2台の受波器によってその信号を受信し，受波器の位置を基準として水中ロボットの位置を計測する。母船上で演算処理装置によって求められたロボットのX-Y座標値は，ロボット制御盤上にディジタル値として表示すると同時に，位置方位複合表示装置のCathode Ray Tube（以下，ＣＲＴと略す）に輝点として表示した。

また，方位は小形の磁気コンパス形方位計で検出し，アナログメータで表示すると同時に，位置方位複合装置のＣＲＴには，ロボットの位置を示す輝点の回りに回転する直線で表示した。このため，ロボットの位置と方位は，ＣＲＴの画面上で感嘆符(!)の形に合成して表示され，位置と方位とを同時に読み取ることができる。この表示装置を用いた結果，従来の二つの計器を監視する方式に比べて，ロボットの位置と方位との認識が非常に容易となり，遠隔操縦しやすくなった。

(b) 深 度 計

深度の検出には，高精度のひずみ計形圧力変換器を用い，ロボット上のセンサ取付け位置と海底面との高さの差を補正したうえでディジタル メータとアナログ メータに深度を表示した。また，海底を調査している間に潮位が変化する場合に備えて，潮位の補正ができるようにした。

(c) 走行距離計

走行距離を測定するため，クローラのフロント アイドラの側面に水密処理を施した近接スイッチを取り付けた。短距離を走行させる場合，時時刻刻に走行距離が分かる点で操縦上非常に便利な情報を得ることができた。

(d) 対地距離計

ロボットが水中の障害物に衝突したり，険しい凹地に落ち込むことを防ぐため，一対の超音波送受波器を車体前面に一組み，また，海面からつり降ろすときに海底までの距離を測定するために車体下面に一組みをそれぞれ取り付けた。計測信号は母船上でアナログ表示され，許容値を超えて危険状態に近づいた場合には警報音が発せられるようにした。

(e) 水中観察装置

ロボットの主要な役割の一つは，海底の状態や作業機の状態を観察することであるが，この目的のために水中テレビカメラ，水中カメラ，及び水中ライトを使用し，観察範囲を拡大するため，これらを前後・左右に動かす揺動装置上に搭載した。

水中テレビカメラには，工業用テレビ（ＩＴＶ）カメラを，水中カメラには250枚撮りのモータドライブ カメラを，それぞれ水密ケースに収納して使用した。また，水中ライトには250Wハロゲン ランプを2燈使用した。揺動装置は水平から下方に60度，左右にそれぞれ45度揺動することが可能で，海底の観察には極めて効果的であることを確認した。

(f) 土質試験機

海底表層土の性質を調べるため，**図3**に示すように右からコーン貫入試験機，土質標本採取機，及びベーンせん断試験機を装備してある。

各試験機は，油圧モータと送りねじ機構によって，地中50cmまで押し込まれ，原位置試験を行なう。貫入速度や貫入力は，流量制御弁と圧力制御弁を用いて調整することができる。

貫入抵抗とせん断トルクはひずみ計により，貫入深度は水密ポテンショメータにより検出し，それぞれアナログメータに表示するとともに，X-Y記録計に記録することができる。土質標本採取機には，内径75mmの薄肉チューブを使用し，土砂の落下を防止するためコア キャッチャと逆止弁などを取り付けた。

(g) その他

以上の計測・試験装置のほかに，水中聴音器，漏水検出器，傾斜計，圧力計，プロペラ推進機，その他種々の装置・検出器を搭載し，安全運転のための安全回路，警報回路を備えた。

2.2 制御部

制御部は，システム各部への電力の給配を制御する電力制御盤とロボットなどシステム全体の運転監視を行なうロボット制御盤及び信号伝送装置とで構成される。

図4にロボット制御盤を示す。操縦者はロボットの位置，深度，方位，傾斜，油圧，走行距離，対地距離，水中テレビ，水中音，及びワイヤロープと水中ケーブルの繰出し長などを監視しながら，母船上から遠隔操縦する。走行運転操作と水中テレビの揺動操作は，それぞれ専用のジョイ スティックで行ない，また土質試験中には走行指令を出せないようにするなど種々安全性に留意した。

潮流の抵抗を減らして操縦を容易にするため，数多くの信号をできるだけ細いケーブルで伝送する目的で，信号多重伝送装置を採用した。この装置は，パルス符号変調回路と振幅変調回路などの組合せにより，1本の同軸線でオンオフ信号は52，アナログ信号は18，音声信号は2回路，ビデオ信号は1回路をそれぞれ伝送することができる。

2.3 水中ケーブル

水中ケーブルは直径40mm，全長200mで，その中央に破断強度2tのテンション メンバーをもち，導体部は6本のケーブルで構成される。このうちの3本は，電力供給用であり，その他は多重信号伝送用と超音波用の同軸線各1本，及び制御装置の単相電源用である。この水中ケーブルの一端は水中コネクタを介してロボットに結合され，船上側の端末はケーブル巻取装置用のスリップリングに結合される。

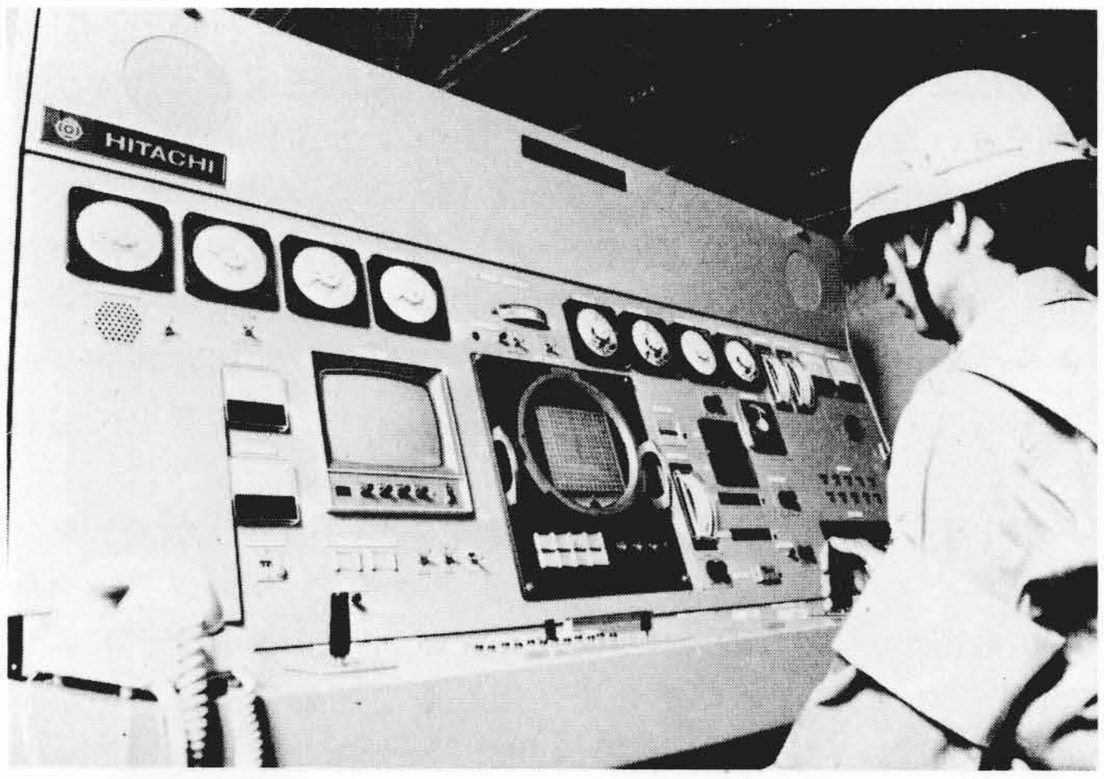

図4 ロボット制御盤 ロボットを遠隔操縦することができ，位置，方位，深度，水中画像など種々の情報を表示する。

2.4 機械部

機械部は，水中ケーブルとワイヤ ロープの繰り出しと巻き取りを行なう巻取装置と，緩衝装置とで構成される。

ケーブル及びワイヤ ロープ巻取装置は，水中ケーブル用とワイヤ ロープ用にそれぞれ油圧で駆動される独立した巻取装置をもち，張力の自動制御や通常の手動運転操作などを選択することが可能である。両巻取装置用の張力制御装置は，それぞれ独立に作動し，両者を張力制御の状態にすると，設定した一定の張力で巻き取るような力が働き，常に必要最小限の長さだけ水中ケーブルとワイヤロープが繰り出されることになる。

緩衝装置は，ロボットをつり降ろすための支持アームと油圧緩衝装置とで構成され，波浪などによって母船が揺れた場合にもワイヤロープに加わる衝撃を吸収することができる。

3 海中実験

昭和48年秋に水中調査ロボット システムの性能確認のため久里浜港沖と福浦港沖とで2回にわたり海中実験を行なった。福浦港沖の実験はSEWシステムの海中総合実験であり，この実験によりシステムの性能は十分に発揮され，財団法人機械振興協会より成果を確認された。

(1) 走行試験

走行距離計を見ながら30m前進し，いったん停止したのち30m後退して出発点とのずれを測定したところ，ずれは約1mであり，海底調査に十分な直進性をもっていることを確認した。次に，走行距離計と方位計だけを見て，一辺10mの正方形のコースに沿って走行する試験を行なった。出発点と到着点とのずれは約2mであり，狭い区域であれば水中位置計測装置を使用しなくても十分調査が可能であることを確認した。

(2) 地形調査

30m四方の海底について，10mごとに位置，深度，方位，及び傾斜を測定し，**図5**に示すような海底地形図を作成した。この調査に要した時間は30分であった。調査区域の平均水深は25mで，海岸から沖合に向かってほぼ2.5度の一様な傾斜のあることが分かった。この結果は，予備調査のデータとよく一致しており，従来の潜水夫による測量の場合と比較して，能率良く測量できることを確認した。

(3) 水中観察実験

水中の観察能力は海底の海水透明度に左右されるが，実験中透明度が良いときには前方約10mの物体を水中テレビで観察することが可能で，鮮明な水中写真を撮影することができた。**図6**は，ロボットが走行したあとに海底に残された履帯の軌跡を撮影したものである。このほか，海底を調査中，他の水中機械によって切断された水中ケーブルを発見したり，海底に設定した観察対象物に接近してその詳細を調査したりして，船上からの遠隔操縦により長時間にわたり連続して十分な観察が行なえることを確認した。また，水中テレビカメラなどの水中観察装置は，水中作業に不可欠であることが明確となった。

(4) 土質試験

コーン貫入試験を5m間隔で8回実施し，貫入深度と貫入抵抗の関係をX-Y記録計で記録した。**図7**はコーン貫入試験の一例で，貫入抵抗は貫入量に比例して緩やかに増加するが，20～25cm付近から平衡状態に近づく傾向を示した。ピークの抵抗は約6～8kgであり，実験海域の海底は許容反力が約2～

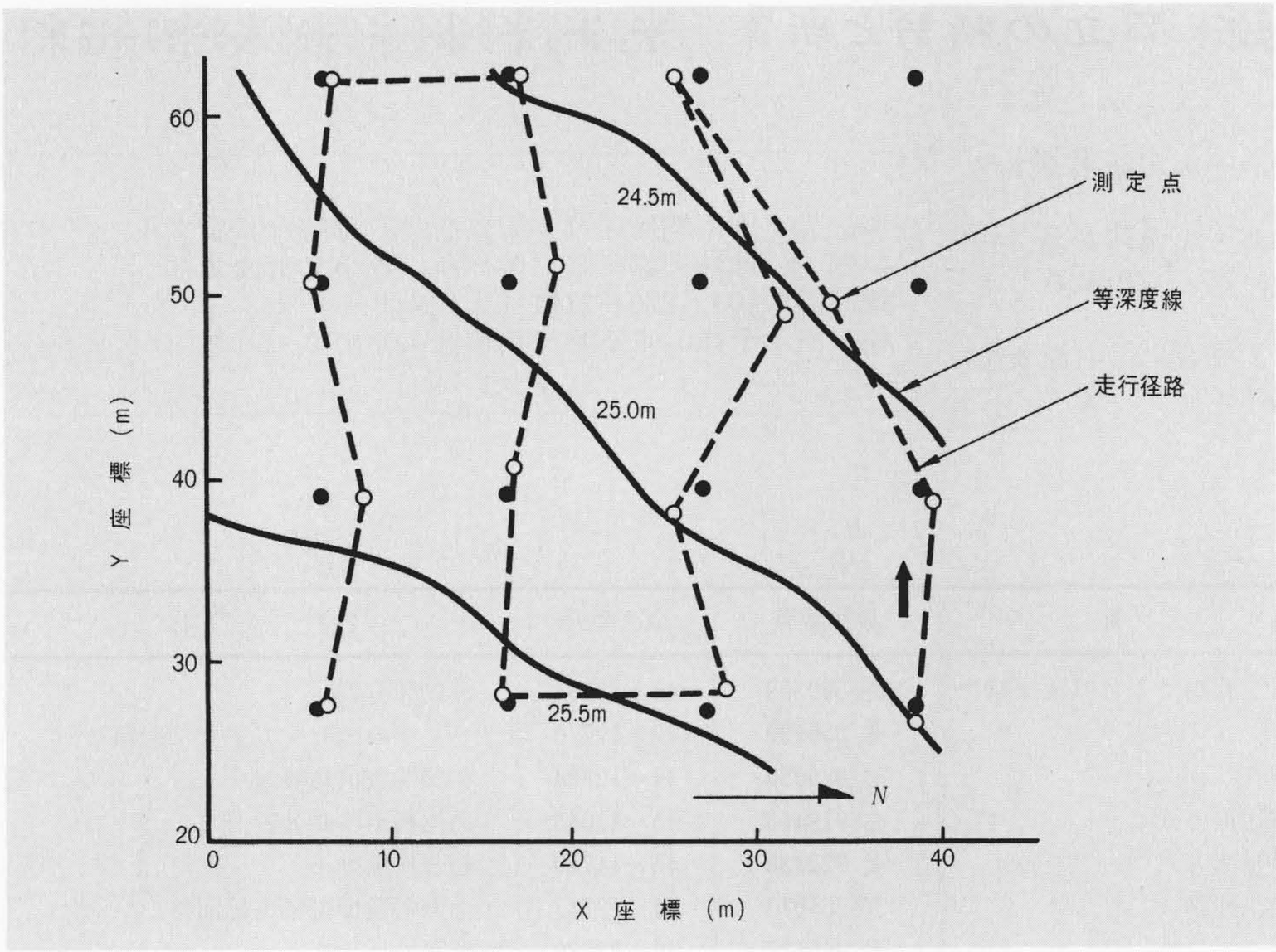

図5　海底地形測量図　水深25mの海底の地形調査データを示したもので，10m間隔で位置，深度，傾斜，方位をそれぞれ測定した。調査の所要時間は30分である。

図6　海底に残されたロボットの走行軌跡　水深18mの海底下で撮影したロボットの走行軌跡を示すもので，水中カメラは250枚まで撮影ができる。

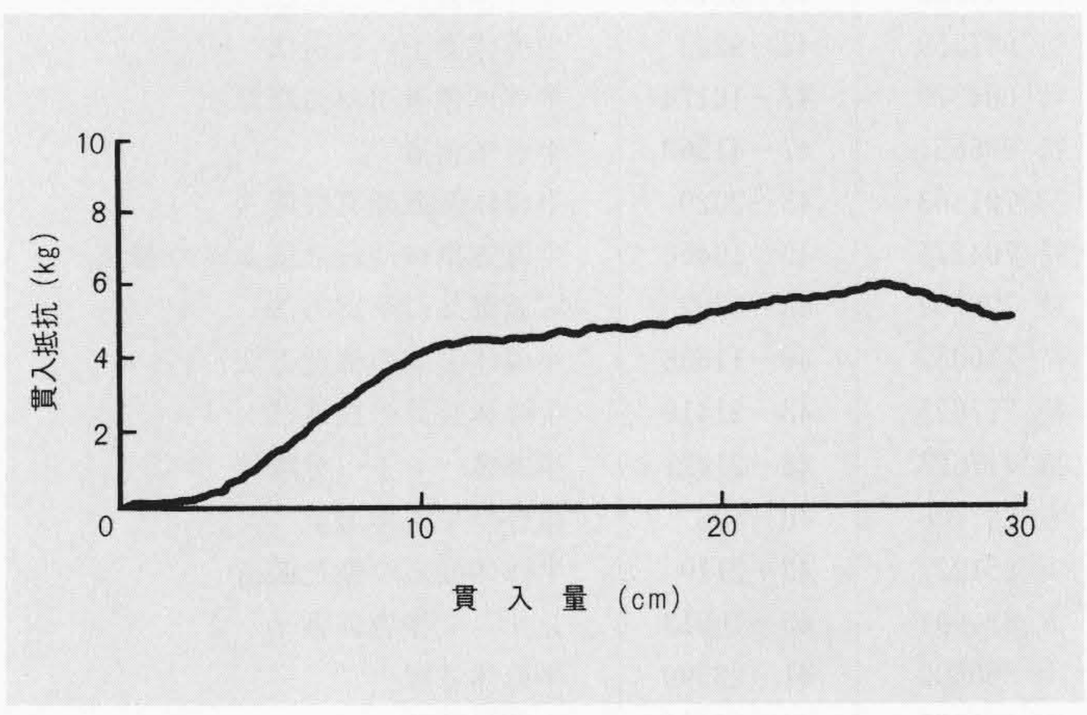

図7　コーン貫入試験　水深25mの砂質土の海底で行なったコーン貫入試験を示すもので，データは多重化して母船上に伝送され自動的に記録される。

$3\,t/m^2$程度あることが分かった。試験所要時間は約40分であった。

ベーンせん断試験は，5m間隔で4回実施した。所要時間は約30分で，せん断強さは$0.22\sim0.25kg/cm^2$程度あることが分かった。また，土質標本採取試験では，1回の貫入で1～2lの細砂，あるいは粗砂を採取し，海底表層土の試料を収集することができた。

4 結　言

水中土木建設工事用の水中調査ロボット システムを開発し海中実験を行ない種々の性能を確認した。その結果，このシステムは海底を走行して地形，土質を調査し，水中を観察するうえで十分な性能をもち，所定の仕様を十分満足するものであること，水中テレビや位置方位複合表示装置をはじめ，走行距離計，対地距離計など新しい計測器，表示装置が遠隔操縦を行なううえで非常に効果的であることなどを確認した。

今後は，更に過酷な条件の下で海中実験を行ない，その性能と耐久性，及び実作業下でのこのシステムの効果的な運用方法などを検討していく必要があるものと思われる。

終わりに，この水中調査ロボット システムの開発を委託された財団法人機械振興協会並びにＳＥＷシステムの関係各位に対し深く謝意を表わすとともに，走行装置を製作し助言をいただいた日立建機株式会社，水中ケーブルを開発した日立電線株式会社，制御装置を製作した日立電子エンジニアリング株式会社をはじめ，日立製作所習志野工場，同戸塚工場，同中央研究所，同日立研究所など一連の日立グループの協力をいただいたことに併せて謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) 須之部，泉ほか「深海形水中ブルドーザシステムの開発」日立評論　**54**，1097（昭47-12）　水中ブルドーザの構造と機能並びに海中実験について報告してある。

(2) 「水中調査ロボット登場」日立**36**，1（1974）