〔解 説〕

水中作業ロボット*

石 野 好 胤**

成 瀬 俊 久***

1. はじめに

石油・天然ガスなどの海底資源開発や港湾・渡海橋などの海洋土木工事の大水深化に伴い、悪環境下での生命の安全の確保や作業の能率化を図るため、潜水夫や有人潜水艇に代わって海中の調査や作業をする無人の水中作業機器、すなわち水中ロボットが近年エレクトロニクスの技術を取入れて目覚ましい発展をしている。特に欧米では北海を中心とする海底石油開発の分野で多くの成果を上げ、数年前から定着し始めていることから、今後も種々の水中ロボットが開発され、使用されていくであろう。

水中ロボットをその形態によって分類すると表1のようになる。水中作業用としては、有索自航式が最も数多く使用されているが、高い作業精度・大きな作業出力を要求される場合には海底に接して移動する海底走行式が使用されている。本稿で紹介する8脚歩行式水中ロボットは、8本の伸縮する脚をもつ世界でも初の海底歩行式水中ロボットで、クローラ式では走行不能な大きな凹凸を跨いで自由に移動することができ、従来の海底走行式の適用範囲を広げたユニークな形態のものとして注目されている。

本稿では、このタイプのロボットとしてこれまでに実用化された海底調査潜水機「リーカス」(ReCuS; Remote Controlled Underwater Surveyer)と捨石ならしロボットの2機種を取り上げ、海洋という自然環境に適したロボットの例として紹介したい。

2. 海底調査潜水機「リーカス」

2.1 開発の経緯

「リーカス」は、本四架橋工事において海底地盤や地形状況を精密に調査する目的で作られた水中ロボットで、本州四国連絡橋公団と当社が共同で開発したものである。

本四連絡橋の架橋工事は、水深が深いうえ潮流が速く、

原稿受付 1986年3月13日

* Under Water Robot

** (株)小松製作所電子機器センタ

*** 同技術研究所

厳しい自然条件のもとで行われるが、特に吊り橋を支える橋脚基盤は入念に施工することが要求されるため、基礎の位置確認、掘削前後の岩盤露出状況、海底地形、施工状況などを詳細に把握する調査システムが必要となる。このため本州四国連絡橋公団では、昭和46年以来水中エレベータや水中ブルドーザを利用した有人調査方式を検討してきたが、人命の安全性や観測精度、さらに海底の凹凸条件などの点から、無人歩行式潜水調査システムを採用することになり、昭和54年3月「リーカス」が完成した(写真1、写真2参照)。

2.2 システムの構成および機器

「リーカス」システムは、観察装置ならびに計測器を搭載し海底を移動する潜水機本体と、制御卓、観察卓、受電盤、ケーブルウインチ、テンションコントローラ、吊金具の海上支援機器と、本体と海上をつなぐ給電ケーブルのほかに、位置計測用の2基のトランスポンダで構成される(図1参照)。

潜水機本体(図2参照)は油圧シリンダで伸縮する8本の脚を有し、本体脚と移動脚のそれぞれ4本の脚を交互に着地し、本体脚と移動脚を相互に前後方向にスライドさせて、尺取り虫のように歩行移動する。また本体脚と移動脚は相互に回転でき、方向転換のための旋回歩行もできる(図3参照)。

本体には、カラーテレビカメラ、スチールカメラ、クリアサイト、照明装置からなる観察装置、ならびに地形測量装置、水深計、潮流速向計、前方監視テレビなどの計測器を搭載し、船上からの遠隔操作で海底を移動しながら、テレビ画像や観測データを給電ケーブルを通じて船上に送る。

船上の観察卓には、海底の映像を映すそれぞれ3台のテレビモニタとビデオレコーダ、カメラ操作パネルが装備されている。制御卓には本体の姿勢および作動状況を

表1 水中ロボットの形態別分類

水中ロボット	—有 索 式—	—自 航 式—
		—海底走行式—
	—無 索 式—	—曳 航 式—
		—自 航 式—

図 1 「リーカス」全体システム図

表示するグラフィックパネルと本体の運転操作を行うための操作パネルが装備されている。卓内には、運転の自動制御と観測データの処理・表示を司るコンピュータを内蔵している。

ケーブルウィンチおよびテンションコントローラは、給電ケーブルの巻取り、繰出し、およびケーブル張力の自動調節を行う。受電盤は、発電機からの電力の受電、各機器への配電、電圧調整のほか、漏電時や過負荷時の緊急遮断、ならびに本体の水中電動機の起動を行う(図4参照)。

給電ケーブルは動力線および信号線を複合した1本のケーブルで、本体の揚収のために吊金具を本体に自動ドッキングするときのガイド索としても利用される。

トランスポンダは海底に設置し、本体の位置を計測するための位置基準点の超音波送受波器である。

表2に本システムの性能・仕様を示す。

2.3 作業方法

(1) 観察および地形測量

潜水機の運転は、本体の歩行移動と観察、ならびに地形測量である。本体の歩行移動は直進前後進と方向転換の組合せで行われ、その操作方法には手動操作と、連続歩行などの動作ができる自動制御がある。自動制御には、凹凸地でも脚の伸縮長を調節して、常に本体の姿勢を水平に保持する機能を有している。歩行と観察ならびに地形測量の基本動作の要領を図5に示す。

(2) 本体の沈設・揚収

支援母船として通常、支援機器を甲板上に搭載したクレーン船が使用される。本体の海底への沈設は、専用の吊金具を用いてクレーンで吊下げ、着底後卓からの遠隔操作で吊金具と本体を切離す。揚収は、吊金具をケーブ

写真 1 「リーカス」本体

写真 2 「リーカス」制御卓

図 2 「リーカス」本体構造図

ルをガイドにして降ろし、吊金具の自重で本体のドッキング装置に自動ドッキングさせ、クレーンで吊上げるダイバーレス方式である。

2.4 性能・特長

写真3は、リーカスで撮影した海底岩盤のモザイク写真である。橋脚基礎を設置するために掘削された海底岩盤を1~2mの高さから連続撮影したスチール写真をつなぎ合わせたもので、ダイバーによる方法に比べ、撮影画角が大きく、かつ一定の高さから整然と連続した画面

が得られるので、能率良く精度の高い観察が可能である。

図6は、リーカスで計測した海底の超音波地形測量データであり、海底面の詳細な凹凸状況を10本の断面地形として知ることができる。

これまでの海底調査結果によると、歩行一地形測量一観察・写真撮影の1サイクル当り調査時間は約6分であり、調査能力は120 m²/h が得られている。

3. 捨石ならしロボット

3.1 開発の経緯

最近の各種新工法、新機械の開発によって、海洋土木工事の機械化が進む中で、港湾防波堤の捨石基礎マウンド(図7参照)の捨石ならし作業は、旧態依然とした潜水夫人力による手作業で行われている(図8参照)。

ところが近年、潜水夫の高齢化による人手不足が進む一方、港湾工事の大規模化・沖合化に伴って工事が大水深化し、また海象条件の厳しい海域での作業が増大してきているため、これまでの潜水夫人力工法では大量急速

a) 直進歩行

b) 旋回歩行

図 3 歩 行 動 作 図

写真3 「リーカス」で撮影した海底モザイク写真

施工・安全施工という工事の要求に対応できなくなっており、潜水夫に代わる安全で能率の良い捨石ならし機の開発が強く要請されていた。

当社は約十年前から捨石ならし機の開発に取り組んできたが、水中ブルドーザや「リーカス」の開発で得た技術を生かして海底歩行式の捨石ならしロボットを開発、昭和57年、その実用化に成功した。今年8月には第2号機がユーザに納入される予定である。

3.2 システムの構成および機器

水中捨石ならしロボットの全体システムは、海底で作業するならし機本体と、海上支援台船上の支援装置、これらを結ぶ給電ケーブル、レーザ測距器・レベルなどの位置計測装置で構成され、「リーカス」とほぼ同様のシ

表2 「リーカス」の主仕様

〔使用条件〕	
(1) 最大水深	70m
(2) 最大潮流	作業時 3ノット (1.5m/sec) 待避時 6ノット (3m/sec)
(3) 行動範囲	支援船を中心として半径100m以内
(4) 地盤凹凸	最大 2m
(5) 海底土質	岩盤または砂礫
〔性能〕	
(1) 本体重量	気中 29 ton 水中 22 ton
(2) 走行速度	平坦地 200m/H 1m 凹凸地 100m/H
(3) 登坂能力	30度
(4) 歩行1回の移動量	2.5m
(5) 旋回角度	22.5度
(6) 本体水平保持精度	±1度以内
(7) テレビカメラ撮影画角	1.1×4.5m (3台分)
(8) スチールカメラ撮影画角	1.5×4.5m (3台分)
(9) 地形測深精度	±6mm 以内
(10) 位置計測精度	±50cm 以内
(11) 潜水機の運転	自動および手動操作
〔構造〕	
(1) 本体寸法	全長 8.2m, 全幅 5.4m, 全高 6.4m
(2) 主電動機	三相交流水中電動機37kW, 440V
(3) 主な搭載機器	・カラーテレビカメラ (3台) ・スチールカメラ (3台) ・水中ライト (500W, ハロゲンランプ 44灯) ・超音波地形測量器 (400kHz, 10断面) ・超音波位置計測器 (60kHz) ・前方監視用テレビカメラ (2台)

図4 動力系統図

図5 歩行・観察要領

図 6 海底地形測量データ

システム構成である (図 9 参照)。

ならし機本体 (図 10 参照) も同じく 8 脚歩行式であるが、フレーム構造が「リーカス」と一部異なり、前後方向歩行と方向転換歩行のほかに、ならし作業に適するよう左右方向歩行も可能なように設計された。本体脚フレーム内を前後に水平に歩行する作業機台車に取り付け

図 8 捨石ならし旧工法図

図 7 防波堤断面図

られたならしレーキを水平送りにして捨石の凹凸をならしたあと、転圧ローラで仕上げ、前後左右に歩行移動してならしをくりかえす。またならし面の凹凸状況を計測する超音波地形測量器が台車下面に取りつけられている (図 11 参照)。本体上部には、フロートタンクが装備され、タンク内の空気量を調節することによって自力浮上・沈設が可能である (写真 4 参照)。

海底の本体を遠隔で運転操作する操作卓は、支援台船上に設置され、制御信号と駆動電力は 1 本の給電ケーブルを通して本体に供給される (写真 5 参照)。

レーザー測距器およびレベルは、既設ケーソンあるいは陸上の基準点上に設置され、本体から海面上に突出したスタッフを視準して、本体の位置・方位・水深を計測する。

表 3 に本システムの性能・仕様を示す。

3.3 作業方法

捨石ならし作業は図 12 に示す作業手順で行う。図 13 は連続してならしを行うときのならし面と歩行軌跡を示したもので、ならし面をオーバーラップさせて、段差が残らないようにくりかえしてならしていく。

(1) 本体沈設……本体を浮かして現場海域まで曳航して行き、フロートタンク内のエアを排出して捨石マウンド上に沈設着地させる。

(2) 歩行移動……レーザー測距器で本体の位置と方位を計測し、歩行させてならし地点へ誘導する。

図 9 捨石ならしロボット
全体システム図

(3) レベル調整……レベルで本体の水深を計測し、ならし高が施工計画と一致するように着地脚を伸縮させて、本体のレベルを調整する。

(4) 精密水平……ならし作業に先立ち、脚を伸縮させて本体を精密水平姿勢 (± 0.14 度以内) に自動調整する。

(5) 地形計測……作業機台車を走行させ、台車に搭載した地形測量器で捨石マウンドのならし前およびならし後の凹凸状況を計測し、XY レコーダ上に記録する。

(6) レーキならし……レーキを、ならし計画高まで下げて 20 トンの力で水平送りして、捨石を押しならす。

(7) ローラ転圧……レーキならし後、計画高より上に突出している石を転圧力 20 トンのローラで転圧し、均一に仕上げる。

(8) 浮上……所定の区域のならし作業が完了したら、フロートタンクにエアを供給し本体を浮上させ、次の現場まで曳航する。

3.4 性能・特長

この捨石ならしロボットは、これまでに多くの海中実験工事および実用工事を実施した結果、凹凸の激しい捨石マウンド上でも機動性の良い 8 脚歩行機構で歩行移動し、作業時には強力な脚で本体を支持してレーキで捨石

写真 4 捨石ならしロボット本体外観

写真 5 操作卓

図 10 捨石ならしロボット本体全体図

図 11 作業機台車構造図

を一気に押しならすので、潜水夫人力作業の 20~40 倍の高い作業能力をもち、大量急速施工が可能であることが確認された。

捨石ならしロボットの実用化により、これまで困難とされていた大水深下での捨石ならし作業が可能になったばかりでなく、通常水深でも大幅な省力化がはかられ、安全性と経済性の向上が見込まれることとなった。

4. ま と め

以上、8 脚歩行式水中ロボットとして「リーカス」として捨石ならしロボットを紹介した。8 脚歩行式水中ロボットの特長をまとめてみると、次のようになる。

(1) 着地脚の長さを調節しながら歩行するので、クローラ式では歩行できない凹凸の大きな海底でも移動が可能である。

(2) 常に 4 脚で本体を水平に保持できるので、潮流や大きな作業反力に対してきわめて安定であり、また 3 脚ずつ着地する 6 脚歩行式と比べても、足元が不安定な転石上でも安定して姿勢を保持できる。

(3) 一定ピッチで規則正しい歩行移動ができるので、正確な連続作業が可能である。

海洋土木工事は今後ますます環境条件の厳しい現場が増加し、ロボット化施工の必要性が高まると予測され、一方 8 脚歩行式水中ロボットは、上記特長を生かして広く水中作業ロボットに応用できると考えられる。

このため今後もこの技術を生かして、さらに海洋土木

図 12 捨石ならし作業手順

図 13 ならし作業と歩行順序

表 3 捨石ならしロボットの主仕様

本 体	気中重量	72 ton
	水中重量	58 ton
	全長	17 m
	全幅	10 m
	全高	7.7 m
	脚伸縮ストローク	1.5 m
	前後スライドストローク	1.25 m
	左右スライドストローク	1.25 m
	歩行速度	25 m/h
	ならしストローク	10 m
操 作 卓	レーキ	幅 5.0 m ピッチ 0.2 m
	ローラ	幅 4.0 m 外径 1.0 m
	水平制御精度	ならし時 歩行時
		±0.14 度以内 ±1.0 度以内
	主電動機	出力 55 kW
	操作方式	有線遠隔操縦
	操作項目	自動歩行 自動水平制御 自動レベル調整 レーキ・ローラ操作

工事のロボット化を推進すべく研究開発を継続する所存である。

石野好胤 (Yoshitane ISHINO)

昭和 19 年 3 月 16 日生れ。41 年名古屋大学工学部機械工学科卒業。43 年同大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月(株)小松製作所入社。技術研究所において水中ロボットなどの研究開発に従事したのち、現在電子機器センター所長。電気学会、電子通信学会、計測自動制御学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)

成瀬俊久 (Toshihisa NARUSE)

昭和 22 年 10 月 4 日生れ。45 年東京大学工学部機械工学科卒業。47 年同大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月(株)小松製作所入社。技術研究所において水中ロボットなどの研究開発に従事。現在同機構制御研究室副室長。日本機械学会、バイオメカニズム学会、日本人間工学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)