

# 水中バックホウの遠隔施工技術

熊 天 幸

昨今、機械化施工の各分野において、施工技術の安全性向上や効率化を目指した技術開発が活発に行われている。佐伯建設工業(株)は水中バックホウの開発を通じ、捨石均しなどの港湾工事における水中作業の機械化に取り組んできたが、更なる安全性向上や省力化には潜水作業に頼らない水面上からの遠隔施工が不可欠なものと考え、水中バックホウ遠隔施工技術の開発を行っている。これまでに各要素技術の検証や陸上実験を経て、実海域での機能確認を行っている。本技術は水中視界のない難視界域での遠隔施工を想定しており、視認不可能な水域で機械の触覚を利用した触像技術による状況認識を特徴とする。これにより陸上の遠隔操作技術のように目視やカメラ映像などの視覚情報に頼らずに施工することを可能としている。

キーワード：油圧ショベル、水中作業、遠隔操作、安全性向上、大水深

## 1. はじめに

水中バックホウは、水中作業における安全性向上や省力化施工を目指し開発されたもので、その活躍の場は年々広がっている。しかしながら、水中の濁りにより対象物の視認が困難な場合や、作業水深により潜水士の潜水時間が制限される作業では、作業効率や安全性の面で課題があった。

水中バックホウの遠隔施工技術は(独)港湾空港技術研究所、筑波大学岩田・矢野研究室と共同で開発を進めてきたものである。本技術ではオペレーターは陸上あるいは支援台船上で作業を行うため、潜水時間の制限もなくなる。また、これまで潜水士では施工が困難であった難視界水域での施工も可能となっている。本稿では遠隔操作技術の概要と実証実験の結果について述べる。

## 2. 研究開発の経緯

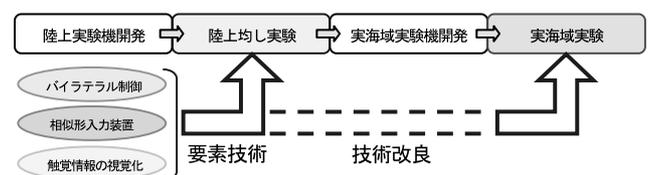
港湾工事における水中作業は、従来から潜水士による手作業に依存してきた。しかし水中での作業環境は陸上に比べると劣悪であり、このような水中作業を、より安全で効率的に行うことができる技術の確立が急がれていた。このような中、当社では水中バックホウについて、平成6年の実証実験を端緒とし、捨石マウンドの均し作業をはじめとする港湾域での水中作業に活用してきた。水中作業のうちで捨石均し作業に限定

すると、潜水士と比較して作業能力が6～8倍であり、安全性向上・省力化を実現している(写真—1)。しかし透明度の低い海域では著しく作業能力が低下するという問題点があり、濁りや浮遊物質により対象物の視認が困難な海域では、視界を補うための技術が必要であった。そこで、視覚情報が得られない状況でも機体の触覚情報を感知してバイラテラル制御によりフィードバックする遠隔操作システムを開発した。

共同開発(平成13～16年度)ではこれらの技術を用いて室内模型実験、小型バックホウによる陸上実験を行った。その後、長崎港において実海域実験を行い、その性能を確認した(図—1)。



写真—1 捨石均し (左：潜水士 右：水中バックホウ)



図—1 技術開発実験フロー

### 3. 陸上実験機の製作

水中での操作を前提に、遠隔操作に用いる要素技術や操作効率を確認するため、陸上実験機を製作した(写真—2)。実験機への改造に伴う搭載機器を表—1に示す。この実験機は、遠隔操作の他に通常の搭乗操作が可能で、遠隔操作と搭乗操作における作業効率や入力装置の比較を行った。

表—1 陸上実験機搭載機器

主要機器	パソコン	比例電磁弁	比例電磁弁制御モード	リモコン用ドライバ
計測機器	ポテンショメータ	姿勢計測装置	ロードセル	磁気方位計
	関節角度計測用	本体傾斜角計測用	地面接触負荷計測用	方位角計測用



写真—2 陸上実験機 (0.09 m³ 級バックホウ)

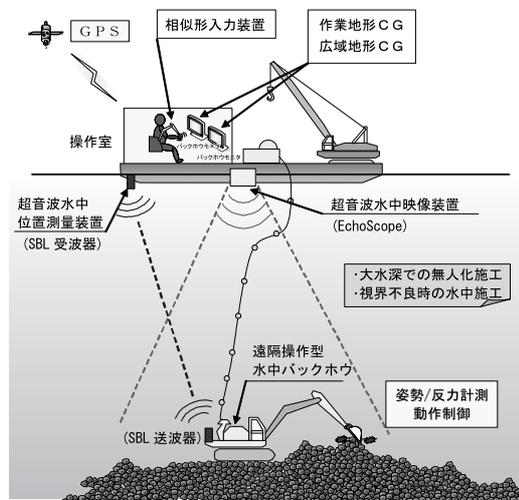
### 4. 遠隔施工技術の概要

透視度の悪い海域での作業や、作業中に濁りが発生する場合は、視界が遮られる問題が生じる。このような視覚情報の得難い水中環境においては、視覚に頼らずに周辺の地形状況や作業状況を確認し、機体の位置や姿勢を把握・認識できる技術が必要と考えた。

今回開発した遠隔施工技術は、以下に紹介するバイラテラル(双方向)制御技術、触像技術などと機体の姿勢や状態を計測する各種センサ及びGPSや水中超音波機器などの測量機器を組み合わせたシステムである(図—2)。

#### (1) バイラテラル制御

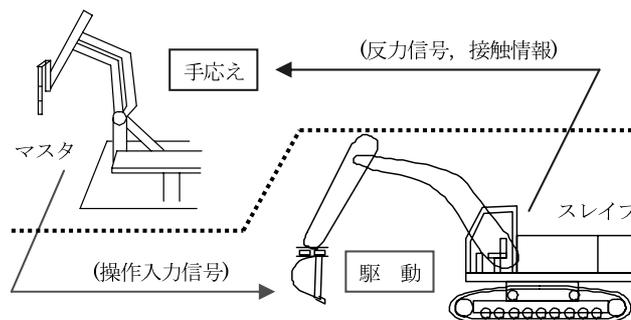
バイラテラル制御とは双方向で制御を行うことを意味しており、操作を指示するマスタ装置(入力装置)と、実機として作業を行うスレイブ装置(水中バックホウ)から構成され、マスタからの入力情報を伝達する制御系と、これとは逆向きに機体の動作に伴う反力などをスレイブからマスタへ伝達する制御系を同時並



図—2 水中バックホウ遠隔施工概念図

行に使用する制御方式をいう。

具体的には、マスタから位置制御の情報を操作入力信号としてスレイブへ与え、この信号により水中バックホウは駆動する。一方で作業中にバケットが地面へ接触した場合、アームとバケットの間に取り付けられた反力センサ(ロードセル)により接触を感知する。そして、この力の信号は操作入力装置に取り付けられたアクチュエータを介して操作員へ手応えとして伝達される。これにより操作員は離れた操作室に居ても現場の臨場感を体感でき、より現実的な操作が可能となる(図—3)。



図—3 バイラテラル制御概念図

#### (2) 相似形入力装置

写真—3に示す相似形入力装置は、バックホウのブーム・アーム・バケットといったフロント部を相似的に小さくした形状となっている。また、ブーム・アーム・バケットに対応した3つの関節を有し、オペレーターは先端のバケットに対応したペン状の把持部を持って操作する。各関節にはロータリーエンコーダが取り付けられており、入力装置(マスタ)の関節角度を計測している。マスタとスレイブに搭載しているパソコンでは、この関節角度を実機(スレイブ)のストロ

ークセンサから取得した角度と比較し、その差分に対応した制御電圧により比例電磁弁に指令を与えスレイブを駆動させている。

通常のバックホウのような2本のジョイスティックによるレバー方式の操作では、ブームやアームを視認し状態を把握していなければ自由に操作することは困難である。これに対し、相似形入力装置はブーム・アーム・バケットと相似形であるため、視覚情報の得られない環境下で作業するバックホウの姿勢を、直感的に把握できる利点がある。さらに各関節には反力を伝えるためのアクチュエータが取り付けられており、バックホウからフィードバックされた力覚を手応えとしてオペレーターに伝達する。



写真一 3 相似形入力装置

### (3) 各種センサ

濁り等により視覚情報の得られない環境で、水中バックホウの状況を把握するためには、センサが重要な役割を担っている。遠隔操作に必要な情報には、主に水中バックホウの位置情報と姿勢情報、そして反力信号を受け取るための接触情報がある。これらをセンサにより計測することによって、演算で求めた施工位置や高さをリアルタイムで船上のモニターへ表示する。

#### (a) 位置情報

水中バックホウの位置情報は、GPS等によりその位置座標が明らかになっている台船上の超音波位置測量装置（SBL受波器）と、水中バックホウに取り付けた超音波水中位置測量装置（SBL送波器）との関係で機体の位置座標を決定する。この位置座標は潮位データおよび台船動揺データにより補正している。

#### (b) 姿勢情報

姿勢情報は、以下のセンサを用いて得られる。

##### ①水中バックホウの関節角度

シリンダストロークセンサによる計測

##### ②上部旋回体方向

磁気方位計による計測

##### ③下部走行体方向

近接センサによる計測（上部旋回体との差）

##### ④水中バックホウの傾斜

姿勢計測装置による計測（制御機器密閉ボックスに搭載）

#### (c) 接触情報

接触情報は、バケットとアームの間に取付けたロードセルによって地面と接触した場合の荷重を検知することで得られる。この情報は相似形入力装置へ反力としてフィードバックされ、相似形入力装置を操作するオペレーターは手応えとして認識することができる。

### (4) 触像技術

触像技術とは前述の接触情報を姿勢情報、位置情報とあわせて船上のモニターにCGで表示（図化）する技術である。

#### (a) 触覚情報の視覚化

水中作業において周辺状況や作業機械の状態などの確認は、潜水士による目視または水中テレビカメラ等の光学機器による映像を使用するのが一般的である。しかし本技術では、「見えない状況」を前提とし、光学機器には頼らず機械の触覚を用いて周辺状況を視覚化する技術を考案した。

これは Augmented Reality 技術（以下 AR）を用いたもので Virtual Reality（以下 VR）の一種である。ARとは強調現実感と訳され、VRが現実感を高めるのに対してARは必要な情報のみ抽出し、人間に理解しやすい形状で提示するという意味である。

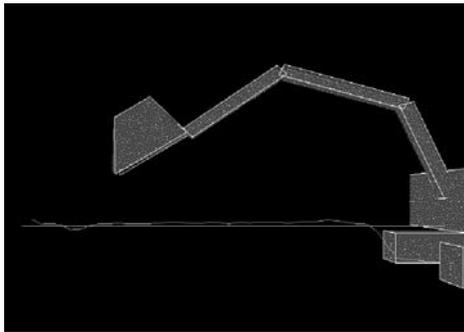
つまり、暗闇で人が手探りで周囲の物や状況を把握するように、バケットが接触した情報（触覚）の積み重ねをCGとして図化し、人が視覚で理解できる形に変換して作業状況等を認識しやすいようにした。

#### (b) 技術概要

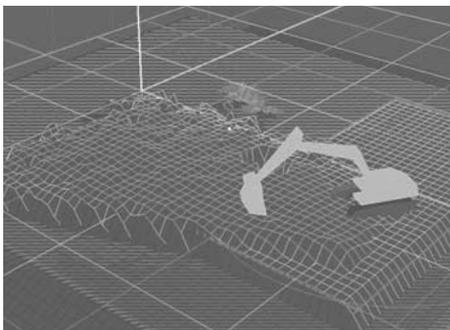
GPSやSBLなどの測量機器から得た水中バックホウの位置情報と、方位計、姿勢計測装置及びシリンダストロークセンサからバックホウの状態をCGで船上のモニターに表示し、同時にバケット先端の3次元座標を演算する。そして、バケットとアームの間に取付けたロードセルにより、バケット先端が地盤や作業対象物に接触したことを感知し、このときのバケット先端座標をCGとして表示する。この繰り返しと蓄積により、船上のモニターで触覚によって得た地形が確認できるようになる。これにより、オペレーターは船上のモニター画面をみながら地盤状況をリアルタイムで確認することができ、映像で視認不可能な環境下でも施工断面や周囲の状況を確認しながら遠隔施工ができ

る。

また、更新されたデータは作業終了時には出来形データとなるため、従来の捨石均し前に行う丁張り作業や、均し作業終了後に行う出来形測量も不要となる。図一4に機体前方の施工断面CG画像を、図一5にバックホウ周辺地形CG画像を示す。オペレーターはこの2つのCG画像を見ながら操作を行う。



図一4 モニター画面1 (施工断面)



図一5 モニター画面2 (3次元鳥瞰図)

## 5. 陸上実験

### (1) 実験条件

陸上実験機と前述した各要素技術を組み合わせて遠隔操作における石均し作業実験を陸上で行った。実験はバックホウのバケットが十分に届く2.3 mから3.5 mの範囲内で行い、旋回範囲左右30°内で均し作業を行った。オペレーターは作業場所を直接目視不可能な制御室から操作を行い、CGによる施工断面が設計断面とほぼ一致したと判断できた時点まで均し作業を行った。

実験では相似形入力装置を使用し触像によるCG画面を視覚情報とした遠隔施工システムを用いた石均し結果と、オペレーターが搭乗して操作する通常の施工結果を比較した。実験では任意の形状に盛った碎石の山を、目標高さを設定して均し、施工精度・施工に要した時間を計測した。

表一2 陸上実験結果

		単位：mm			
		平均高	標準偏差	最大	最小
搭乗操作	施工前	+ 272	± 106	+ 508	- 12
	施工後	+ 6	± 19	+ 91	- 57
遠隔操作	施工前	+ 259	± 98	+ 539	- 54
	施工後	- 20	± 23	+ 84	- 106



写真一4 遠隔均し実験 (左：施工前 右：施工後)

### (2) 実験結果

均し作業は各5回ずつ行い、 $13 \times 13 = 169$ 点について平均高さと標準偏差および最大値、最小値により評価した。表一2に目標高さを±0とした結果を示す。

触像を用いた遠隔操作において凹凸の最大差は106 mmとなり、実海域における捨石荒均しの許容誤差±300 mmの基準内での施工ができた。また、標準偏差は搭乗操作と比較して4 mmの差であり、本システムは搭乗操作と同等の施工精度を有していることが確認できた。

また施工に要した時間から施工能力を算出したところ、遠隔操作では平均約4.0 m<sup>2</sup>/hとなり、搭乗操作の約60%の能力となった。この理由として均し作業完了後に均し面全面においてバケットの接触情報から3次元座標を取得し、出来形の確認を行った施工手順が影響しているものと考えられる。遠隔操作ではこの接触情報により測量作業が完了しており、搭乗操作のように事前の丁張り作業や作業終了後の出来形測量が必要なくなることから、遠隔操作による施工能力においても、搭乗操作とほぼ同等の能力を有していることが確認できた (写真一4)。

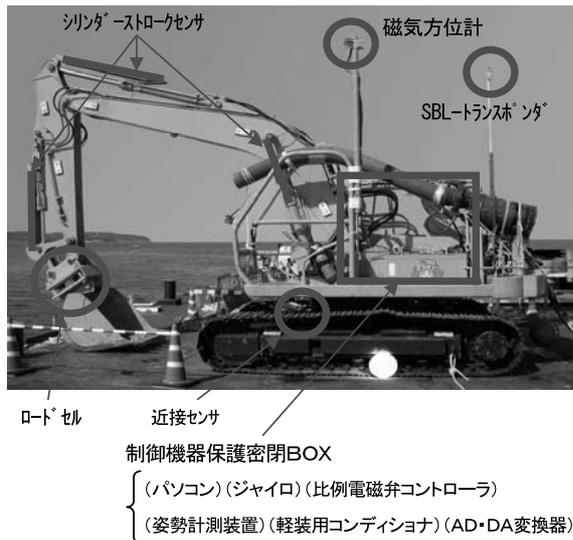
## 6. 実海域実験

### (1) 水中実験機

陸上実験の結果から遠隔施工システムの有効性を確認することができ、触像による地形認識の有効性が確認された。しかし実施工での捨石均し作業とスケールが異なるため、実海域における均し実験によりその効果を確認する必要がある。そのため実海域における

有効性の確認を目的として、水中実験機を製作した。実験機は当社の所有する水中バックホウ「ビッグクラブ3号」(0.5 m<sup>3</sup> 級) を遠隔操作型に改造することで対応した。

主な搭載機器を写真—5に示す。



写真—5 実海域実験機「ビッグクラブ3号」

### (2) 実験条件

実験は長崎県長崎市神ノ島沖防波堤の-16.5 mの捨石マウンド上で行った。透視度5 m、潮流0~0.3ノットの非常に穏やかな海域で行った。捨石の大きさは5~100 kg/個である。実験範囲は10 m × 10 mの100 m<sup>2</sup>を施工目標とし、バイラテラル制御による遠隔操作と潜水士搭乗操作を比較した。

### (3) 実験結果

均し作業は搭乗操作において25 m<sup>2</sup>、遠隔操作においては32 m<sup>2</sup>の施工を行った。遠隔操作では平均基準高+17 cm、標準偏差は±8.1 cmとなった。出来型ではほとんどが+10 cm~+20 cmの間に入っており、さらに基準高±0 cmを下回った点は1箇所だけだった。このように平坦に均すという作業に関しては標準偏差からも分かるように十分な能力を有していると言える。また搭乗操作と比較しても同等の能力となった。

表—3 実海域実験結果

	平均値	標準偏差	施工能力
遠隔操作	+17 cm	±8.1 cm	25.6 m <sup>2</sup> /h

時間当たりの施工能力は遠隔操作で25.6 m<sup>2</sup>/hであり、本実験海域における潜水士搭乗型水中バックホウの積算基準から算出した施工能力27.6 m<sup>2</sup>/hと比較し

ても見劣りのない数値となった(表—3)。

このように本実験により、テレビカメラ等による視覚情報が得られない透視度の低い海域や、大水深の施工条件において、この遠隔操作システムが有効であるということが実証された(写真—6)。



写真—6 実海域実験(左:作業状況 右:出来形)

## 7. おわりに

水中バックホウの遠隔施工技術は、現場周辺の海底地形情報などを作業中に機体を通じてリアルタイムに把握することで、視覚情報の得られない水域でも的確な遠隔操作、水中作業の省力化、安全性の向上が図れる。また、これまで潜水士では施工が困難であった大水深作業においても、遠隔操作により施工可能となる。当社では今回開発した要素技術を応用して、災害時における危険地帯での遠隔施工や、大水深での潜水時間に制限されない長時間施工など個別のニーズに対応しながら実用化に向けた技術改良を進めたいと考えている。

本技術の開発にあたって共同研究を実施した(独)港湾空港技術研究所並びに筑波大学岩田・矢野研究室には多大なご指導をいただき、また実海域実験においては、国土交通省九州地方整備局 長崎港湾・空港整備事務所にご協力をいただいた。文末ながらこれら関係各位の方々に感謝申し上げる次第である。

#### 《参考文献》

- 1) 平林文嗣, 山本 恭, 酒井 浩, 秋園純一, 内海 真: 相似形入力装置を用いた遠隔操作型バックホウの操作効率, 港湾空港技術研究所資料, No.1065 2003年12月
- 2) 平林文嗣, 山本 恭, 酒井 浩, 加藤英夫, 横井 博: バイラテラル操作系を用いた次世代水中作業機械システムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44 No.4 2005年12月



#### 【筆者紹介】

熊 天幸(くま たかゆき)  
佐伯建設工業(株)  
建設本部  
土木部  
課長代理

