

水中建設機械を対象とした 作業情報呈示システムの検討

平 林 丈 嗣・喜 彦 司

港湾工事等における水中作業については、基本的に潜水士の手作業に依存しているが、海中透明度の高い沖縄では、潜水士搭乗型水中バックホウが実用化されており、潜水士作業の肉体的負担の軽減、安全性向上に役立てられている。本検討は、潜水士搭乗型水中バックホウを対象に、さらなる作業効率の向上を目的とし、情報化施工技術の適応を検討するものである。本システムの検討として、水中建設機械に適応可能なセンサを選定し、構築した作業情報呈示システムによる地形認識に関する水中実験を行った。さらに実海域における試験を実施し、運用面における課題点抽出を行った。

キーワード：水中建設機械、情報化施工、水中センサ

1. 背景

沖縄管内の海洋工事については、高い透明度により直接目視での状況認識が可能であることから、潜水士搭乗型水中バックホウが古くから導入されてきた。しかし水中バックホウ近傍での作業も発生することとなり、また、潜水時間の制約や波浪潮流等による作業中止基準は、潜水士の安全確保のため必要である。そこで、さらなる安全性及び生産性向上に寄与すべく、ICT (Information and Communication Technology) 施工を港湾施工現場に適用するため、従来陸上施工で活用されてきたマシンガイダンス技術を水中バックホウに適用できるよう検討を行う。

2. センサ選定

気中と水中におけるセンシングの違いとして、水中では電波の減衰が著しく、また光学については砂泥等の微小粒子による濁りに大きく影響される点が挙げられる。そのため、陸上のマシンガイダンスに一般的に用いられるセンサをそのまま水中用として適応することは困難である。例えば、陸上マシンガイダンスにおいて、GPSにより機体座標（平面位置・高さ）と機体方位を検出する事が一般的であるが、水中においてGPSは使用できないため、代替として音響測位装置 (USBL) を使用する。方位については、地磁気方位計を用いる。しかし音響測位装置は経験上、10 cm 以上の計測誤差が発生することが考えられる。そのため高

表—1 選定センサ

名称	型番 (メーカー)	仕様	計測対象
傾斜センサ	JCS7402A (日本航空電子)	± 0.15 度以下	機体傾斜
地磁気センサ	HMR-3000 (HoneyWell)	0.1 度 (但し分解能)	機体方位
水圧計	BWL-10MET (共和電業)	± 0.15% RO 以内	機体水深
水圧計	BWL-20MET (共和電業)	± 0.15% RO 以内	基準水深
水中モニタ	LCD10000VH5 (Century)	WXGA1280 × 800 (但し解像度)	運転席用
USBL	TrackLink (LinkQuest)		平面座標
ストローク センサ	GYcRS (サンテテスト)	± 0.025% FS 以下	シリンダ長

さ方向の機体計測は高精度水圧計を用いることとした。

機体の関節角度については、ブーム・アーム・バケットリンクに重力加速度計を設置し角度検出する方式が一般的であるが、今後の遠隔操作化を考慮した場合、振動の影響を受けにくく静定時間が短い方式が適していると考えられる。そのため、油圧シリンダのストローク量を計測する磁歪式リニアセンサを用いることとした。さらに故障時の交換修理の容易性を考慮し、一般に市販されているセンサを用いることとした。

表—1 に本システムで選定したセンサと公表精度 (又は分解能) を示す。

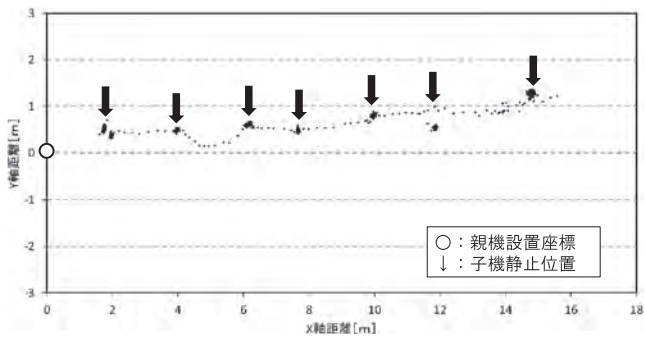
(1) USBL

水中の場合、電波が減衰するためGPSが使用できない。また濁りなどにより光学測量器も使用が制限さ

れる。そこで機体の水平位置を検出するセンサとして、複数箇所への音波の伝達時間を計測し、その時間差から位置を計算する音響測位装置（以下 USBL）を使用する。

ただし音の伝搬時間を用いているため、既設構造物からの反射・回折・散乱による影響や、実海域作業現場において常態的に存在する環境ノイズの影響も考えられる。そこで、実際に水中建設機械が稼働している現場において、環境ノイズの影響について確認した。

図一1は台船側面から吊り降ろした子機の移動経路である。この図からわかるように、親機から15mまでは、移動経路および停止時の位置データの誤差が少なく、安定して計測が可能であった。



図一1 USBL 移動経路の記録

(2) 水圧計

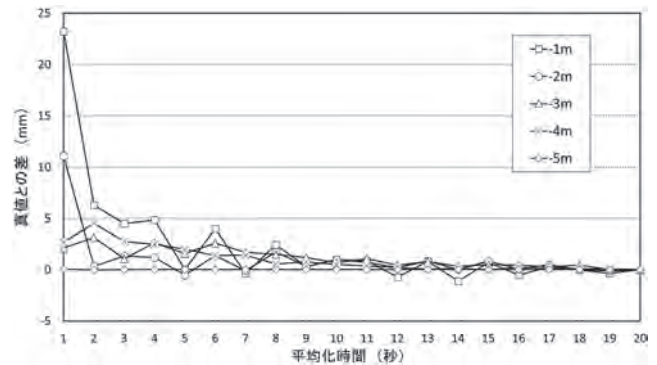
水圧センサはバックホウの高さ方向の位置を検出するため、バケット先端の計測精度に重要となる。そのため仕様±0.15% RO (Rated Output: 定格出力) の高精度水圧計を使用する。ここで測定レンジが10mのものについて、その計測精度を検証する。

計測は表面が十分に静定した状態の水槽（最大水深-6m）で行い、水圧センサ（BWL-10MET）を1m間隔で-5mまで吊り下げ、各水深におけるデータを記録した。計測時間は20秒とし、約870点の計測を平均する。表一2に計測結果を示す。結果として誤差5mm以内の計測精度を有することがわかった。

また波浪に対する影響についても検討する必要がある。同水槽において波高150mm、周期2.4秒の造波を行い同様の計測を行った。平均化する時間幅を1秒~20秒とし、表一2で示した水圧計数値との差を示

表一2 静定水槽における水圧計計測結果

水深 (m)	1	2	3	4	5
水圧計数値	1.0049	2.0047	3.0049	3.9996	5.0000
差	0.0049	0.0047	0.0049	-0.0004	0.0000
標準偏差	0.0010	0.0010	0.0012	0.0021	0.0014

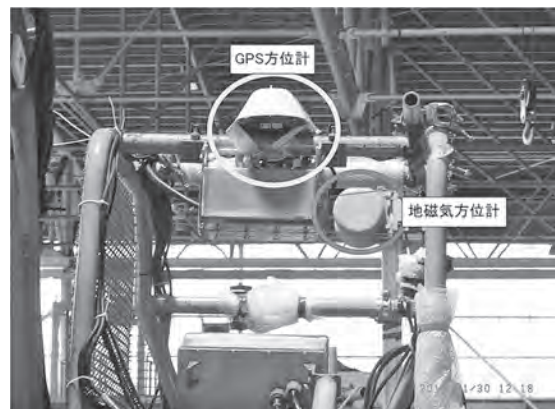


図一2 平均化時間幅を変更した場合の計測誤差

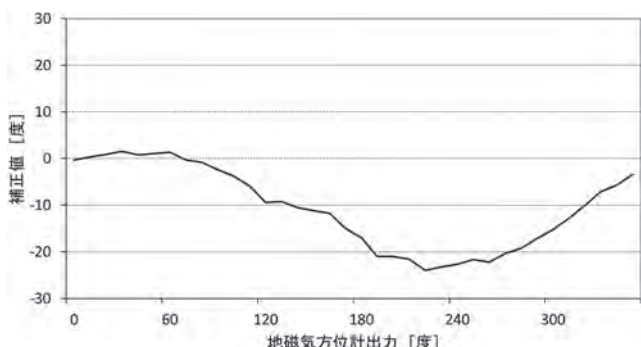
した図を図一2に示す。本水槽実験においては、10秒以上（約3波以上）のデータを平均することで、差が1mm以下となった。実海域においても複数回の波をまたぐ時間平滑化は有効であるものと考えられる。ただし、潮位変化や長周期うねりに対し時間平均を行う事は困難である。そのため高さが既知である基準点を作業現場近傍に設け、基準点に別途設置する水圧計との差分により補正を行うこととした。

(3) 地磁気方位計

方位の検出について、FOG (Fiber Optical Gyro) ではドリフト（誤差が蓄積される状態）の発生や絶対値方位の検出が困難であるため、地磁気方位計（Honeywell社 HMR-3000）を用いることとした。しかし、バックホウ本体が磁性体である事や、鋼矢板等の現場環境により誤差が発生することが考えられる。そこで地磁気方位計をバックホウ機体に設置した状態で、GPS方位計を真値とした方位誤差について計測する。なお、本計測は地磁気センサの特性を計測することを目的とし、真北と磁北の差は考慮しない。計測は、キャビン上部にGPS方位計を設置し、GPS方位計の出力値で10度間隔に旋回を行い、その時の地磁気方位計の値をサンプリングする。図一3にGPS方位計と地磁気



図一3 地磁気方位計とGPS方位計



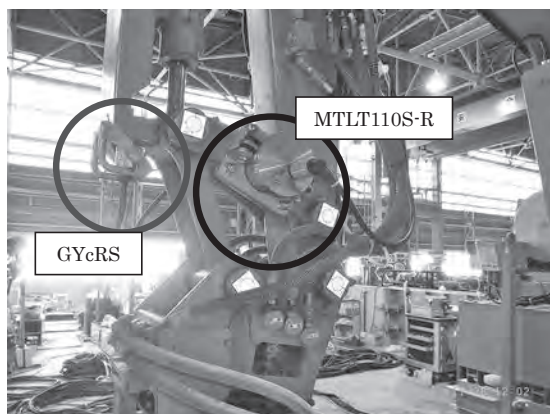
図一四 地磁気方位計と GPS 方位計の計測差分

方位計の設置状況を示す。図一四に GPS 方位計出力値に対する地磁気方位計出力の差を示す。結果として、最大 23 度の誤差が計測されたほか、方位によって誤差量が変動することが明らかとなった。そこで、今回計測した誤差を補正值とし、ルックアップテーブル方式による方位補正を行うこととした。

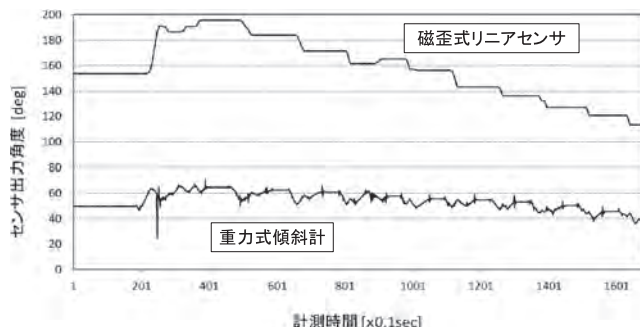
(4) ストロークセンサ

ブーム・アーム・バケット角度の計測について、重力式傾斜計を用いた場合、掘削施工時の衝撃についても加速度として検知してしまうため、時間平均等の安定させるための静定時間が必要となることが予想される。そこで重力式傾斜計 (Memsic 社製 MTLT110S-R) と磁歪式リニアストローク計 (Santest 社 GYcRS) によるバケット角度検出の比較実験を行った。設置状況を図一五に示す。図一六は重力式傾斜計と磁歪式リニアストローク計のデータを比較したものである。なお重力式傾斜計の値は I リンクに設置した状態の生データであるため、バケット角度の絶対値としての比較では無い。

記録開始から 19 秒の間の静止状態では、ほとんど振動は無く安定している。しかし動作時は磁歪式リニアストローク計と比較して重力式傾斜計のデータには



図一五 ストロークセンサと重力式傾斜計



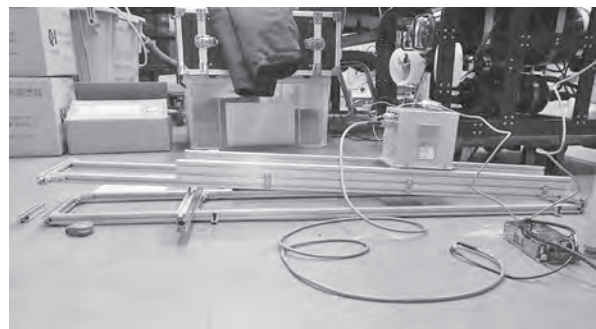
図一六 バケット軸角度の計測結果

パルス的な振動が発生している。また磁歪式リニアストローク計で角度の変化が無い状態でも、重力式傾斜計では振動が残っている。対応策として時間平滑化を行う事も考えられるが、常に入力操作を行うバケットに対して平滑化を行う事は、モニタに表示するバックホウ姿勢に遅延が発生する可能性があり、今後、モニタ画面を見ながら操作する遠隔操作において作業効率に影響があるものと考えられるため、本システムでは磁歪式リニアストローク計を採用する。

(5) 傾斜センサ

バケット先端座標の高さは、機体の傾斜により大きく変化し、その比率は旋回中心からの距離に依存する。つまり作業半径が大きくなる場合、傾斜の計測精度は高精度なものが要求される。本システムでは日本航空電子製の FOG (Fiber Optical Gyro : JCS7402A) を選定し、その誤差について実測を行った。

計測では任意の傾斜とする治具を製作した。水平を確保したベースフレーム上に蝶番により角度をもたせる傾斜フレームを配置し、FOG を固定した。この傾斜フレーム端部の高さを調整することで、任意の傾斜を発生させている。計測中の写真を図一七に示す。傾斜センサ精度試験の条件として、水平から ± 3 度までを 0.5 度間隔で計測した。計測点数は 0.1 秒間隔で 5 秒間 (50 点) とし、その平均と標準偏差を計測した。



図一七 傾斜計試験状況 (JCS 7402A)

表一3 傾斜計測試験結果

		俯角						
治具傾斜		-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0
FOG 傾斜 (50点平均)		-3.050	-2.545	-2.056	-1.567	-1.028	-0.511	-0.012
差		-0.050	-0.045	-0.056	-0.067	-0.028	-0.011	-0.012
標準偏差		0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.002

		仰角						
治具傾斜		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
FOG 傾斜 (50点平均)		0.015	0.483	0.983	1.461	1.978	2.488	2.983
差		0.015	0.017	0.017	0.039	0.022	0.012	0.017
標準偏差		0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001



図一9 刃先座標精度試験状況

表一3は計測結果である。治具の形状から、センサに対し仰角と俯角を計測する際に再設置を行ったため、仰角俯角それぞれに0度が存在する。

仕様±0.15度の精度に対し、実測では俯角-0.038度、仰角0.02度と非常に高い精度で計測が可能であった。また5秒間50点の標準偏差も最大0.003度であり、安定した計測が可能であると言える。

(6) 作業情報表示モニタの検討

水中基礎マウンド均し作業において必要となる情報は、マウンド形状、目標高さ、バックホウ姿勢、周辺状況（既設構造物等）が考えられる。そこで、本システムでは鳥瞰表示、上面表示、側面表示の表示方式を任意に切り替えて表示する事とした。また、モニタ上には既存施設を表示させ、機体位置との位置関係を認識できるようにしている（図一8）。

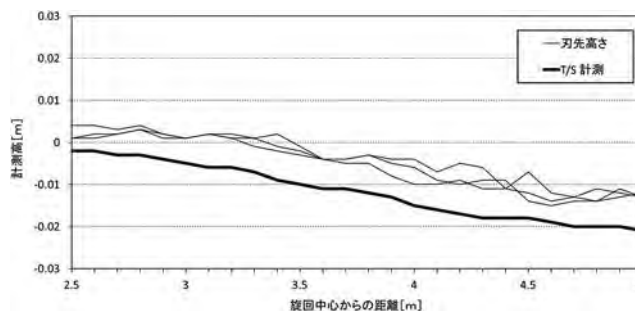


図一8 作業情報表示モニタ

3. システム試験

(1) 陸上試験

本システムのバケット刃先座標について、その計測精度を確認する試験を行った。本試験は気中で行うため、磁歪式リニアストローク計、FOG ジャイロ、地磁気方位計の内界センサによる試験となる。計測は平坦なコンクリート面に10cm間隔で印をつけた直線（A測線）を対象とする。10cm間隔でバケット刃先



図一10 計測結果 (A-Line)

を接触させ、刃先座標をシステムで記録した値と、別途光学測量器（T/S）で計測した値との比較を行うこととした。バケット刃先座標誤差計測状況を図一9に示す。図一10に計測誤差を比較したグラフを示す。

搭載したシステムでは、刃先座標の計測誤差（高さ方向）は、すべての点においてほぼ±10mmの範囲（最大誤差+12mm、平均誤差+3.6mm、標準偏差±4.3mm）に収まっている事が確認された。

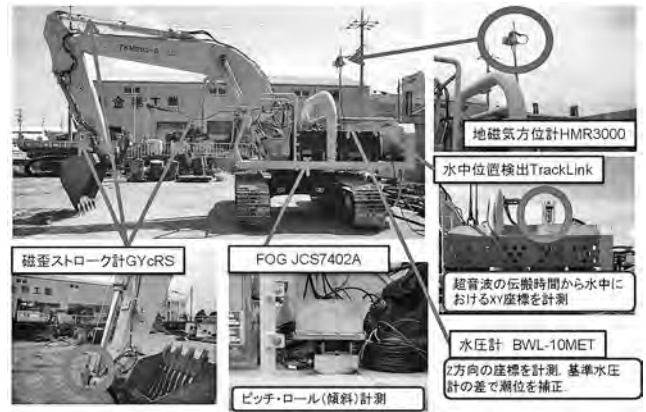
(2) 水中試験

水中作業情報呈示システムの実用化に向け、関東地方整備局所管のケーソン製作ドック（図一11）において水中実験を行った。ドック底盤には、既知形状の碎石マウンド模型（粒径約150mm）を設置しており、陸上試験と同様にバケット刃先を接触させて地盤高さを計測する実験を行った。図一12に碎石マウンドと計測ラインを示す。本試験は前述の内界センサのほか、水圧計による機体高さ計測を含めた試験とした。なお、音響測位装置がドック壁面からの多重反射の影響により計測値にバラツキが多く見られたため、平面位置については搭乗潜水士による目視誘導を行った。なお対象とする測線は事前に光学測量器による計測を行っている。一例としてDラインを計測した結果を図一13に示す。

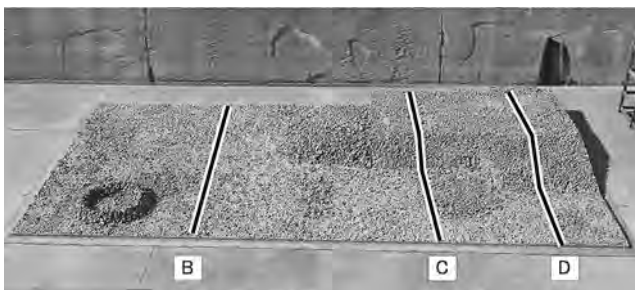
以下に各測線におけるトータルステーション計測値



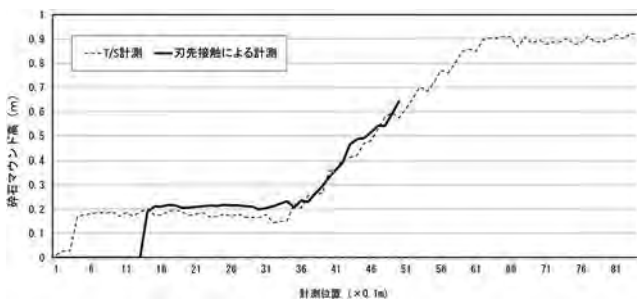
図一 11 京浜港ドックヤードにおける水中試験



図一 14 実機へのセンサ搭載



図一 12 碎石マウンドと計測ライン



図一 13 計測結果 (D-Line)

を真値としたとマシンガイダンス計測の差分を示す。

- B 測線 平均誤差 +31mm 偏差 ± 17 mm
- C 測線 平均誤差 +29mm 偏差 ± 28 mm
- D 測線 平均誤差 +27mm 偏差 ± 29 mm

(3) 実工事適応試験

構築した水中作業情報呈示システムを実工事で試用し、課題点・改良点、および、遠隔操作化に向けた機能付加を抽出することを目的として、実工事適応試験を実施した。試験に用いる水中バックホウ (TKM200-9) は実工事で使用されている 0.8 立米クラスであり、工種は基礎捨石マウンド均し作業とした。図一 14 に前項で選定したセンサの配置図を示す。

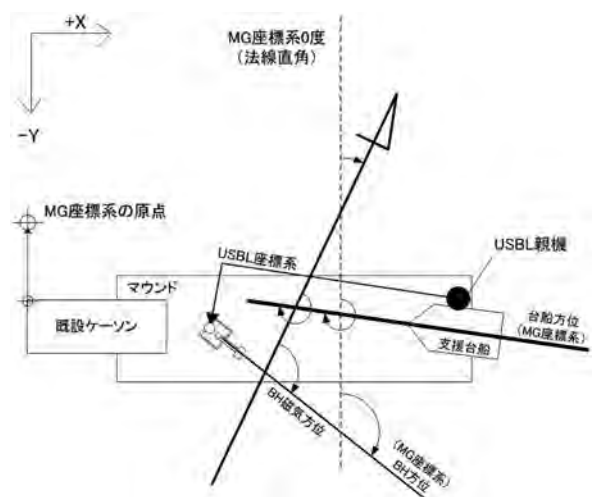
ただし実工事中の試験であるため、施工スケジュールや施工精度に影響を与えないよう通常の施工方法・

施工手順を基本としており、事前の丁張り作業や別潜水士による誘導を実施している。

本試験の実施にあたり、設計図面をシステムデータに変換する必要がある。GPS 等で一般的に用いられるのは、緯度経度による世界座標系であるが、施工一般図では主に法線方向を基準とした直交座標系となる。また、水中 MG で採用している座標系も法線直角方向を +Y 軸とした直交座標であり、既設防波堤の任意の位置を原点とする MG システムローカル座標系 (図一 15) としている。

また、機体位置 (XY 平面) を検出する USBL (水中位置検出) は、親機を設置している作業台船の船首方向を 0 度としたローカル座標系であり、また TKM200-9 の方位は地磁気方位計により検出するため、磁北を 0 度とした方位が出力される。そのためバックホウ座標については、台船方位と法線直角方向の角度差分による座標変換 (回転) を行う事とし、バックホウ方位については磁北と法線直角方向の差分を補正することでシステムローカル座標系に変換する。

またバックホウの高さ (水深方向) については、機



図一 15 システムローカル座標系

体に設置した水圧計により検出している。さらに潮位に対して補正を行うため、別途既知の水深に設置した潮位補正用水圧計とバックホウ水圧計の差分によって補正を行う。今回、潮位補正用水圧計は安定した設置のため既設防波堤港内側のフーチング部に設置することとした。図-16に水圧計配置を示す。これらの条件を基に、設計図面から座標変換等を行い、システムで使用するデータを作成した。図-17に表示画面を示す。

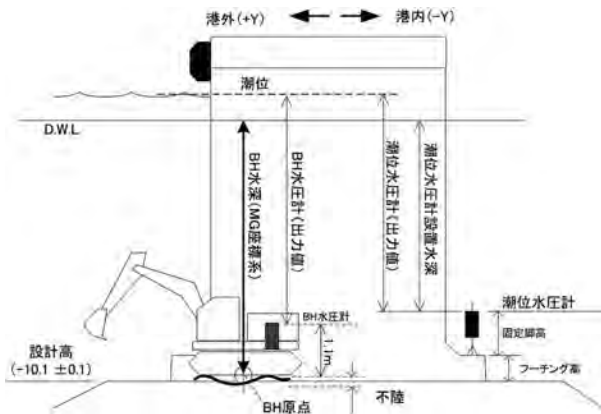


図-16 水圧計配置図

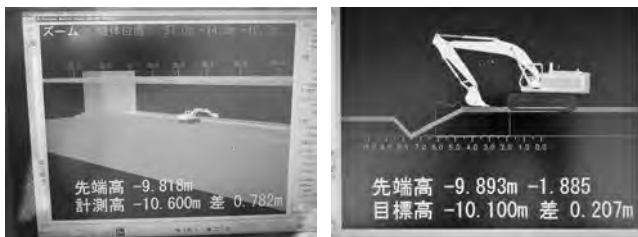


図-17 作業情報表示画面

実工事適応試験は1回目の捨石投入直後に実施しており、その際の設置作業やPC操作は港湾空港技術研究所が主体となって行った。その後、3回目の捨石投入後に、水中バックホウを所有する共同研究者単独で試験を行った(図-18)。その際の設置解体については共同研究者単独で作業を行っており、本システムが実運用時において大きな問題が無いと考える。さらに本試験において搭乗潜水士から機能拡充に関する要望を聴取しており、今後の遠隔操作化に向けた取組みに反映する予定である。

4. おわりに

本稿は、ICTを港湾施工現場に適用するため、陸上施工で活用されてきたマシンガイダンス技術を、水中バックホウに適応するための検討について報告するものである。水中施工において使用可能な市販センサ



図-18 実工事適応試験状況

を選定および精度確認のための要素試験を実施した。さらに、水中作業状況呈示システムを構築し、刃先接触による地形計測試験を陸上および水中において実施した。さらに本システムを水中作業機械実機に搭載し、実際の海洋港湾工事現場において適応試験を実施し、大きなトラブル無く稼働することを確認した。

今後は、外界計測センサの高精度化と水中ブレーカ等を応用した起震均しアタッチメントの要素技術を加え、遠隔操作施工を目的とした研究を実施する予定である。これらの成果は、いままで潜水士による人力作業に多くを依存してきた港湾工事において、施工の安全性と生産性の向上に資するものと期待する。

なお本研究は、内閣府沖縄総合事務局の委託研究「水中作業の機械化施工におけるマシンガイダンス技術高度化研究委託」により実施した成果である。

JCMA

[筆者紹介]

平林 丈嗣 (ひらばやし たけつぐ)
 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所
 港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域



喜多 司 (きた つかさ)
 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所
 港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域

