

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.44

NO.4

December 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告書 (REPORT OF PARI)

第 44 卷 第 4 号 (Vol. 44, No. 4), 2005 年 12 月 (December 2005)

目 次 (CONTENTS)

1. 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
.....平林丈嗣・山本恭・酒井浩・加藤英夫・横井博志..... 3
(Construction of Teleoperation System with Bilateral Control for Underwater Construction Machine
Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Hideo KATOH, Hiroshi YOKOI)

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

平林文嗣*・山本恭**・酒井浩***・加藤英夫****・横井博志*****

要 旨

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検・診断、維持・補修、あるいは災害復旧も含めて、その多くは水中での作業となるが、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。このため水中作業を一層安全で効率的に行うことができる技術の確立が急がれる。現在、陸上での遠隔操作技術については、主としてTVカメラ等を用いる方法で多くの研究開発が行われており、特に災害復旧現場において実用化されているものも存在する。しかし、水中では視覚情報の欠落という問題点があり、作業機械の遠隔操作の研究はほとんどなされていない。これは、水中では濁りや浮遊物質による光の散乱により対象物の視認が困難であるなどの特殊な環境下にあるため、作業の無人化が容易でないからである。

そこで本研究では、視覚情報が得られない状態でも遠隔操作が可能な水中独自のインタフェースとして、作業機械から得られる接触情報を用いこれをバイラテラル操作系によりオペレータにフィードバックする遠隔操作手法を提案し、水中バックホウによる捨石荒均し作業を対象事例として研究を進め、室内模型実験、陸上実験を経て、平成16年度に実施工現場における実海域実験を行い、その施工精度や施工能力について検討を行った。

この実験の結果、無視界の遠隔操作において施工精度は $+17\text{cm}\pm 8\text{cm}$ 、施工能力は $25.6\text{m}^3/\text{h}$ であり、潜水士が搭乗する施工方法と同等の施工精度、施工能力を有していることが明らかとなった。この遠隔操作システムでは、作業中に生じる濁りにより視覚情報を得られないような状況においてもオペレータは作業を継続することができ、これは当初の目的であった視覚情報に頼らない遠隔操作を実現できたといえる。

キーワード：バイラテラル制御、水中バックホウ、遠隔操作

* 制御技術研究室

** 元制御技術研究室研修生(佐伯建設工業株式会社機材部)

*** 制御技術研究室長

**** 新技術研究官

***** 施工・制御技術部長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail：hirabayashi@pari.go.jp

Construction of Teleoperation System with Bilateral Control for Underwater Construction Machine

Taketsugu HIRABAYASHI*

Takashi YAMAMOTO **

Hiroshi SAKAI ***

Hideo KATOH ****

Hiroshi YOKOI *****

Synopsis

Mechanization of diving operations is necessary for safer and more efficient underwater construction works in port areas. Teleoperated underwater construction machines are at present under developing. The detection system as well as the operation one is required for these machines. One of the problems to be solved is that the conventional TV camera system is useless in water because of turbidity. Haptic information is introduced to help controlling construction machines substituting for visual information.

In 2003, the experiment was carried out of leveling unknown gravel terrain to a certain height using a land model of the teleoperated backhoe. In 2004, we examined the ability of the machine experimentally on a real sea area. Experimental results show that accuracy of leveling are $\pm 17\text{cm} \pm 8\text{cm}$ *in situ*, and the construction efficiency of the system is $25.6 \text{ m}^3/\text{h}$.

It is proved that the concept of authors' proposed system is enough effective for the operation in such turbid water as the visual information is not available, and it has sufficient performance for actual construction works.

Keyword : bilateral control, underwater backhoe, teleoperation

* Reseacher of Control System Division

** Trainee of Control System Division

*** Head of Control System Division

**** Research Coordinator for Advanced Technology

***** Director, Construction and Control system Department

3-1-1, NAGASE, YOKOSUKA, 239-0826, JAPAN

Phone : +81-46-844-5038 Fax : +81-46-844-0575 e-mail : hirabayashi@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
1.1 研究の背景	7
1.2 研究の概要	7
2. 研究目標	7
2.1 水中作業の遠隔操作にあたっての課題	7
2.2 水中作業の遠隔操作システムの基本的な考え方	9
2.3 水中作業の遠隔操作システムの開発目標の設定	10
3. 水中作業の遠隔操作システムの開発	10
3.1 駆動系, 制御系の機構	10
3.2 センサ系の機構	15
3.3 インタフェイスの機構	18
3.4 要素技術の統合	20
4. 油圧動力実験機を用いた陸上での検証実験	20
4.1 油圧動力を用いた実験機の開発	20
4.2 無視覚条件下における均し作業実験	22
4.3 均し作業実験結果	23
4.4 水中作業機械遠隔操作システムの油圧作業機への適応結果	25
5. 実海域実験による遠隔操作システムの有効性の確認	25
5.1 実海域実験装置の開発	25
5.2 実海域実験の実施	26
5.3 実海域実験の結果	31
5.4 遠隔操作システムの有効性に関する考察	32
6. 結論	34
7. おわりに	34
謝辞	34
参考文献	35
付録-A 建設機械の遠隔操作事例	36
付録-B 水中バックホウの現状	37
付録-C 目標値設定の算定プロセス	38
付録-D 作業日誌	40
付録-E 実験時の不具合	49

1. はじめに

1.1 研究の背景

大水深岸壁、廃棄物埋立護岸、海上空港の整備や点検・診断、維持・補修等は、今後ますますその要請が高まるものと考えられ、これらを安全かつ効率的に実施することが求められている。¹⁾しかし、これらの施設の大部分が位置する水中部では、海上から直接的に構造物を見ながら作業することが困難だけでなく、TVカメラ等を用いて遠隔操作を行おうとしても濁りや浮遊物質による光の散乱によって対象物の視認が困難であるなど、陸上とは作業環境が大きく異なるため、作業の無人・遠隔操作は容易でない。

このため、潜水士による作業に大きく依存しているのが現状であるが、水中作業は、視界の悪さや潮流などの海象条件によって、作業能率が低いだけでなく、船舶が多く航行する港内での作業であるなど、危険の察知や回避の困難性から安全性にも課題がある。さらに、長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きい²⁾など、その労働条件は陸上に比べて過酷である。潜水作業における重大事故を表-1に示したが、国土交通省の直轄工事では昭和47年から平成12年までの27年間で38人が事故に遭い、17名が亡くなっている。また死亡事故に至らなくても減圧時の脊椎梗塞や潜水病等、多くの潜水士が生命に関わる事故に遭遇している。

したがって、これらの状況を踏まえれば、水中作業を安全かつ効率的に行うことが可能な、無人・遠隔操作技術の実現が急がれる。

1.2 研究の概要

本研究では、視覚情報が得られない状態でも水中作業の状況を認識しながら遠隔操作を行うことができるインタフェイスとして、作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）をバイラテラル操作系によってオペレータにフィードバックする手法を提案した。³⁾⁴⁾⁵⁾これにより、オペレータは、作業機械と相似形の入力操作を行いながら、それと同時に、操作端にフィードバックされる操作の手応え、接触点から描画される地形等のCG画像などにより作業の状況が認識できる。この手法の有効性を確認するため、水中バックホウによる捨石荒均し作業を本研究の対象事例として、室内における部分模型を用いた実験、陸上における油圧動力実験機を用いた実験⁶⁾⁷⁾、実施工現場における実海域実験を行って、その作業精度や作業能力について検討した。

このうち、実海域実験は佐伯建設工業（株）との共同

表-1 過去の潜水作業における重大事故

	経緯	被災部	被災性質	休業日数	原因	作業
S47		胸部	その他	死亡		調査
S50	10年		窒息	死亡	送気異常	捨石及び均し
S52	10年		窒息	死亡	送気異常	機材等設置
S52	12年		窒息	死亡	潜水器具故障	捨石及び均し
S55			裂傷		はさまれ	捨石及び均し
S58	20年		窒息	死亡	送気異常	機材等設置
S59	09年	胸部	潜水病	8~15	潜水器具故障	調査
S59	13年	頭部	潜水病	16~30	ホース	調査
S59	18年	頭部	骨折	8~15	激突	捨石及び均し
S60	04年		窒息	死亡	送気異常	捨石及び均し
S60	25年	指	切所	31~	はさまれ	調査
S60	13年		窒息	死亡	ホース	捨石及び均し
S62	30年		溺死	死亡	送気異常	調査
S63	20年		溺死	死亡	ホース	捨石及び均し
H2	30年	上肢部	減圧症		減圧	捨石及び均し
H2	25年	指	切所	16~30	はさまれ	捨石及び均し
H3	09年	指	切所	16~30	はさまれ	据え付け
H4	16年	肩、ひじ	関節傷害		減圧	調査
H5	01年	手	創傷		接触	調査
H5	16年	胸部等	内臓破裂	31~	接触	調査
H5	05年	頭部等	骨折	31~	接触	調査
H6	40年	頭部	窒息	4~7	送気異常	据え付け
H6	10年	胸部	肺臓破裂	死亡	送気異常	捨石及び均し
H7	10年		溺死	死亡	送気異常	浚渫
H7	00年	頭部等	潜水病	8~15	送気異常	調査
H7	01年		溺死	死亡	送気異常	浚渫
H8	32年		減圧症	16~30	減圧	調査
H8	15年	上肢部等	切所	16~30	はさまれ	据え付け
H9	07年		窒息	死亡	潮流	捨石及び均し
H9	24年		溺死	死亡	送気異常	据え付け
H10	03年		窒息	死亡	潜水器具故障	調査
H11	30年		脊椎梗塞	31~	減圧	調査
H11		頭蓋部	骨折	死亡	スクリュー	調査
H11	27年		潜水病		減圧	捨石及び均し
H11	03年	手	裂傷	0~3	激突	捨石及び均し
H12	15年		潜水病	0~3	減圧	捨石及び均し
H12			潜水病	0~3	減圧	捨石及び均し
H13	09年	胸部	内臓破裂	死亡	はさまれ	捨石及び均し

研究により行ったものであり、当研究所が遠隔操作システムの開発と実験結果の解析を担当し、佐伯建設工業（株）は、当研究所が開発した遠隔操作システムを艀装した水中バックホウによる捨石均し作業実験の実施を担当した。

本稿は、これら一連の成果を報告するものである。

2. 研究目標

この章では、まず水中作業の無人化・遠隔操作にあたっての技術的課題と、これらを解決するために本研究で提案する遠隔操作システムの基本的な考え方を概説する。そのうえで、本システムの研究開発にあたって設定した基本目標について述べる。

2.1 水中作業の遠隔操作にあたっての課題

(1) 陸上と水中における条件の違い

陸上工事においては、作業区域全体が見渡せる高所カメラや作業個所を詳細に視認する複数のTVカメラを用い、作業状況に応じて視点を切り替えてモニタリングしながら作業機械を遠隔操作するシステムが開発され、既に実用化段階に入っている。⁸⁾⁹⁾詳しくは付録Aを参照

されたい。

一方、水中作業については、陸上と異なり、空気が無い、水圧がある、潮流や波浪は風に比べて外力として大きい、動力源としての内燃機関は水中に持ち込めないなどの事情に加えて、視界が不良な場合が一般的である。

例えば、常陸那珂港（茨城県）では透視度がおおむね0.3～0.5m、良くて1.2m程度であり、このような透視度が不良な条件では光学式の水中TVカメラによる遠隔監視は不可能である。

さらに、水中では電波、光波の減衰が著しいため、陸上で用いられるGPSや光波測量機器等の使用が困難である。このため、水中では超音波を用いた測量、位置計測等が行われるが、電波、光波と比べて精度や分解能に限界があり、機器の取り扱いや測定方法も煩雑である。

以上のことから、陸上作業であれば簡単な遠隔操作であっても水中では困難な場合が多く、小規模の特殊な定型作業や、後述する2、3の試みを除いて、未だ水中作業の遠隔操作は実現していない。

(2) 水中バックホウを用いた遠隔操作の試み

a) 水中バックホウの概要

近年、陸上工事用の汎用作業機械であるバックホウを水中用に改造した水中バックホウ¹⁰⁾が実用化されている。油圧で作動するこの作業機械は、支援船から油圧ホースによって動力を供給し（又は支援船から電力を供給し、機体に搭載した電動油圧ポンプを作動させて）機体を駆動させる。この水中バックホウには潜水士が搭乗し、陸上用のバックホウと同様に作業状況を視認しながら操作するもので、主に防波堤マウンドの捨石均しに使用されている。ただし、潜水士の目視によって作業が行われるため、透明度が高い海域での利用にとどまっている。なお、捨石均し作業は、通常、潜水士が人力で作業を行うが、平成7年に平良港で行われたパイロット工事では、水中バックホウの作業能力は、人力作業の約8倍¹¹⁾と報告されている。水中バックホウに関して、詳しくは付録Bを参照されたい。

b) 遠隔操作の試み

現在までに確認できている水中バックホウの遠隔操作の試みとして、①佐伯建設工業株式会社の技術開発の事例、②国土交通省関東地方整備局において行われた水中施工ロボット技術開発の事例、③東亜建設工業株式会社の技術開発の事例がある。

このうち、①佐伯建設工業株式会社の事例は、陸上での遠隔操作と同様にカメラ映像を用いた遠隔操作を社内でも実験的に行ったものであるが、鳥瞰図の映像、側面からの映像が無いことから、立体感を得ることができず、

マウンド均しといった精度を求められる作業は困難であった。

次に、②国土交通省関東地方整備局が平成12年度に行った水中施工ロボット技術開発の事例は、常陸那珂港のケーソンマウンドを実験現場とし、深浅測量結果を地形画面として表示して、オペレータはこの画面を見ながら水中バックホウを遠隔操作するものであった。しかし、地形画面の更新がされないため、作業によるマウンドの変化を把握することが困難で、作業中の判断の大部分をオペレータの勘に依存していたため、施工能力、施工精度ともに潜水士搭乗による水中バックホウより下回る結果となり、実用化に至っていない。図-1に地形表示画面を示す。

最後に、③東亜建設工業株式会社の事例は、バックホウ前面にカラーイメージングソナーを2器配置して地形の断面表示を行うとともに、マルチナロービームにより地形認識のリアルタイム性を向上させたものである。さらに、運転席にモーションベースを利用し、バックホウが傾斜すると運転席も連動して傾斜することで、機体の姿勢や作業状況が直感的に認識できるようになっている。対象とした工事は発電所の冷却放水口の排砂工であり、アーム先端に設置された掘削装置とサンドポンプにより堆積土砂を除去するものであった。水中バックホウでの無人化施工の可能性を示した興味深い事例であるが、作業条件は比較的単純であり、また、必ずしも高い精度を要求されていない作業であった。図-2にイエローマジック7号を示す。

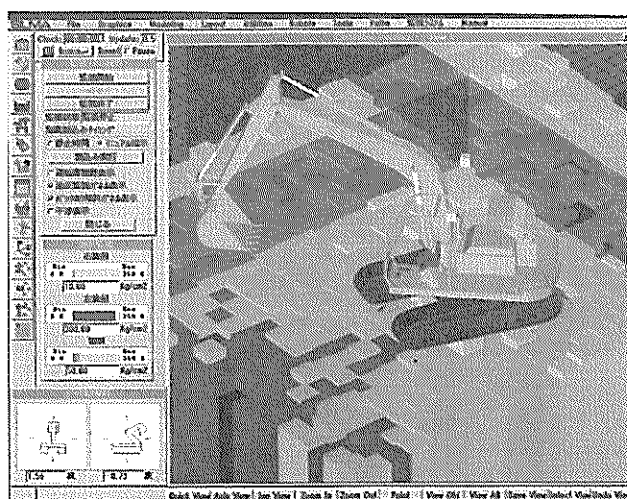


図-1 超音波測量による地形表示画面

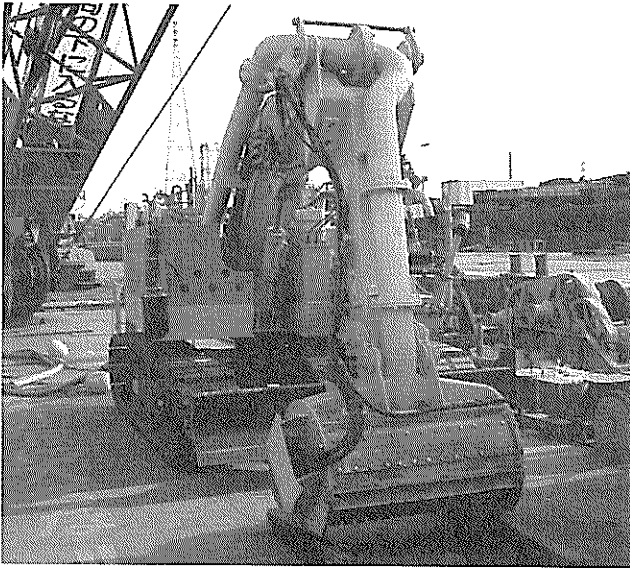


図-2 イエローマジック7号全景

(3) 遠隔操作にあたっての課題

上記(1)(2)から、水中作業の遠隔操作にあたっての課題は次のようにまとめられる。

- ・水中作業では、潜水士が搭乗する水中バックホウが実用化され、従来の人力作業から機械化作業へと前進がみられる。しかし、潜水士の目視によって操作が行われるため、海域の透明度や作業中の土砂の舞い上がりによる濁りなど、水中における視界の良否が作業性に直接的に影響する。
- ・潜水士の目視に代わって陸上作業のようにTVカメラを用いるという方法だけでは、水中作業の遠隔操作を実現することは困難である。
- ・水中では電波、光波の減衰が著しく、陸上で用いられるGPSや光波測量機器等の使用が困難であるため、海底地盤や海中構造物の測量、作業機械の位置計測等においても独自の技術を必要とする。
- ・地形情報を画像表示して水中バックホウを遠隔操作することが試みられたが、地形情報が更新されないシステムでは作業の効率性は低い。
- ・超音波イメージングソナー等を用いて水中バックホウを遠隔操作した事例があるが、施工実績として報告されているのは比較的単純な作業内容に限られており、超音波だけでは精度を要する作業は難しい。

ここで、(2)で紹介した国土交通省関東地方整備局で行われた事例を想起すれば、TVカメラ等の視覚情報に拠らず、水中バックホウの現在の姿勢と事前測量に基づく地形図とを重ね合わせた画面を見て遠隔操作するとい

う着想は評価される。ただし、石が均されたか否かを判別できず、地形変化も表示されないなど、作業中の判断はすべてオペレータの勘と記憶に頼るものであったことが課題であったと考える。

こうした点に着目して、TVカメラ等の直接的な視覚情報に拠らずに、オペレータが水中作業の状況を直感的に認識できる手法を開発するという観点から、次節において遠隔操作手法の提案を行う。

2.2 水中作業の遠隔操作システムの基本的な考え方

前節で述べたとおり、遠隔監視カメラ等に期待できない水中作業においては、視覚情報に依存しなくてもオペレータが作業状況を認識できるインタフェースが必要である。本研究では、水中作業の無人化・遠隔操作を実現するため、次の考え方を導入する。

- ・作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）を活用する。¹²⁾¹³⁾ 水中バックホウの遠隔操作の場合について具体例を挙げれば、バケット部に圧力センサを設置し、バケットが捨石マウンドに接触したか否か、バケットの動作時に捨石マウンドから受ける反力が大きいかなどを検知する。その情報をオペレータが理解しやすいようにフィードバックすれば、作業状況に関するオペレータの認識力が高まる。
- ・オペレータが、作業機械からフィードバックされる接触情報を直感的に理解できるよう、作業機械と相似形の入力操作系にする。¹⁴⁾¹⁵⁾ 水中バックホウの場合で具体例を挙げれば、オペレータが手招きするように操作端を動かせば、その形どおりバックホウのバケットが石をすくう動きをする機構とし、さらに、マウンド石を動かそうとしてバケットに負荷がかかる状態になれば、オペレータの手の動きにも負荷がかかる機構を導入する。こうした機構にすれば、作業機械の動きをオペレータは“手応え”として直感的に理解できる。
- ・上述したフィードバック機構により作業機械と操作端とを制御するにはバイラテラル（Bilateral）制御と呼ばれる方式が適する。
- ・接触情報は、対象物の形状認識にも活用される。¹⁶⁾ 水中バックホウの場合で具体例を挙げれば、どの姿勢でバケットに反力が作用したかといった履歴を蓄積してCG描画することによって、オペレータは、均し作業によって整形されていくマウンド形状を知ることができる。これにより、オペレータは均し作業中の地形画面を見ながら、既述した操作の“手応え”を感じ

ることによって、TV カメラによる視覚情報がなくても水中作業の状況がリアリティをもって認識される。

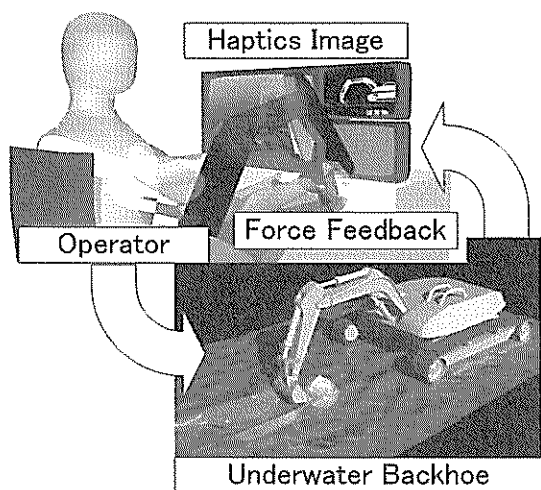


図-3 水中作業に特化したマンマシンインタフェース

2.3 水中作業の遠隔操作システムの開発目標の設定

(1) 基本目標の設定

本研究では、次世代水中作業機械システムの構築に関する基本目標を次のように設定した。

- ① 安全性の向上を図るため、潜水士等の人力に依らない水中作業、すなわち、遠隔操作による水中作業の無人化を実現すること。
- ② 水中作業の無人化システムの構築にあたっては、実用性の観点から、従来の有人による作業と同等の、若しくはそれ以上の有効性・効率性を確保すること。
- ③ 水中作業の無人化システムの今後の発展性を考慮し、汎用性のある技術の構築に努めること。

(2) 研究の対象事例の選定

本研究では、上記(1)③の基本目標に照らし、次世代水中作業機械システムとして、水中バックホウを具体的なベース機の対象とした。これは、

- ・ 既に有人型の水中バックホウの技術開発が進んでいること
- ・ クローラ方式は、海底を移動しながら水中作業を行うにあたっての姿勢安定性が良く、作業時における反力の確保が容易であること
- ・ アーム先端のバケット部を他のアタッチメント（例えばグラブなど）に交換することにより、均し作業以外にも転用できるなど、技術的な汎用性、発展性があること

などによる。

また、遠隔操作型の水中バックホウによる石の荒均し作業を本研究における対象作業とした。なお、その際の開発目標として、施工精度±30cm、時間あたり施工能力26.4 m³の作業を無視界で行う技術を開発することを目標値として設定した。その理由は次項で述べる。

(3) 作業能力に関する目標値の設定について

水中作業の遠隔操作システム（ここでは遠隔操作型の水中バックホウ）の研究開発にあたっては、実用性の観点から、従来技術と同程度の作業能力を有することが求められる。つまり、水中バックホウを遠隔操作型に改造する費用を念頭に置いた実用性の観点から、作業能力の目標値を考察する必要がある。

ここで、潜水士搭乗型（従来技術）の水中バックホウの作業性について考えると、潜水士が目視によって作業を行うため、透明度が低い海域（作業中の土砂の舞上がりを含む）では、作業効率も低くなる。さらに水深によって1日の潜水時間が定められており、作業水深によっては潜水士の交代が必要となる。作業水深による潜水士のべ人数の増加は通常的人力作業の場合に大きく影響するため、現在、潜水士搭乗型のバックホウは、透明度が高く、比較的水深の深い場所で利用されている。

これに対して、遠隔操作型（今回の開発対象）の作業効率は、構造的に透明度に依存せず、潜水士の交代の必要がない。

そこで、水深-15m以上、透明度4m以上の作業海域において、遠隔操作型への改造（2,000万円と仮定）に伴う損料を加算計上しても、潜水士搭乗型と同等のコストで施工が可能な作業能力を研究開発にあたっての目標値とした。その算定プロセスは付録Cに示すが、この結果、遠隔操作型の水中バックホウの施工能力の目標値を26.4 m³/hとした。

3. 水中作業の遠隔操作システムの開発

前章 2.2 で遠隔操作手法の基本的な考え方を述べた。この章では、水中バックホウを適応例として、具体的にシステムを構成する駆動系・制御系の機構、センサ系の機構、インタフェースの機構などに区分して述べる。

3.1 駆動系・制御系の機構

(1) はじめに

バックホウは、機体移動のベースとなるクローラ部と、バケット軸、アーム軸、ブーム軸、旋回軸の4自由度で動く上部旋回体とで構成されるが、ここでは、遠隔操作

において特に重要な上部旋回体の制御方法を中心に論じる。

バケット軸、アーム軸、ブーム軸、旋回軸は、4自由度を持つロボットアームと考えることができる。オペレータの操作によりバックホウ各部が作動し、同時に、各部のストロークやバケットが受ける反力が操作にフィードバックされる機構は、バイラテラル制御系と呼ばれる機構の採用によって実現できる。これは、バックホウの実機 (Slave) と相似形で同じ可動範囲を持つ操作端 (Master) を用意することにより、操作端の動きを実機の指令値とし、この指令に基づく実機の動きを検出して、その値が操作端を制御する指令値にフィードバックされるという制御機構である。これにより、操作端を動かすオペレータの手と、バックホウのアーム・ブーム・バケットとが相似形の動きになり、また、マウンド石を押し動かそうとしてバックホウのバケットに負荷がかかった状態になれば、オペレータの手の動きにも負荷がかかる。

この場合、バケットが受ける圧力そのままを比例的にフィードバックするのではなく、むしろオペレータが状況を理解しやすいように情報を加工する方がよい。これは、バーチャルリアリティ分野で強調現実感または拡張現実感 (Augmented Reality : AR) と呼ばれる。¹⁷⁾

さらに、どのような位置、姿勢でバケットに反力が作用したかの現状と履歴をCG画像として提示することによって、オペレータは、視覚的にもバックホウによる作業状況を理解することができる。

他方、実際の水中バックホウは油圧による動作であり、遠隔操作のためには追従性の低さや大出力を考慮した要素技術を検討する必要がある。ここではバイラテラル制御手法、反力取得機構、触覚情報の視覚化、相似形入力装置の各要素技術を水中バックホウに適応させるため室内模型実験による検討を行い、それらを組み合わせた遠隔操作システムを提案する。

(2) 作業機械への指令の与え方

作業機械の操作方法を大別すれば、ジョイスティックと呼ばれるレバーを動かして作業機械を操作する方法と、Masterと呼ばれる作業機械と同じ形状の入力装置で作業機械 (Slave) を操作する方法とがある。

a) ジョイスティック方式

通常、ジョイスティックと呼ばれるレバーが一つあり、このレバーの指令によって、直動するマニピュレータが前後に移動する。あるいは、左右方向と前後方向に直行した直動関節を持つマニピュレータを2本のレバーにより左右、前後をそれぞれ独立に指令する。これらは、操縦形ロボットへの指令方式の最も基本的な例である。

この方式の特徴は、それぞれの関節への指令値を、対応するレバーにより直接作成することである。つまり、1つのレバーを大きく動かせば1つのアクチュエータの出力を大きくする、という具合である。この方式の具体的な例が通常のバックホウであり、これは何本ものレバーにより、複数の関節を協調して駆動させ、複雑な作業を実現させている。しかし、この方法はロボットアームやハンド等、関節が多くなった場合には操作が複雑になる。

b) Master-Slave 方式

そこで考案されたのが Master-Slave 方式である。これはロボットと同じ形をしたものを1つ用意し、これを操作端として用いる。オペレータが操作用ロボットの先端を動かせば、操作用ロボットの各関節の値自体が作業用ロボットの各関節の指令値となり、作業を各関節の運動に分解するという必要は無い。この Master-Slave 方式をバックホウに適用するとすれば、アーム、ブーム、バケットという関節で構成されたバックホウ実機が“Slave”であり、これと同じ関節の構造を持つ相似形の操作端が“Master”である。この場合、オペレータは操作端に手をかけ、作動させたいアーム、ブーム、バケットの動きと同じ形で腕、手首、掌を動かして実機に指令を与える。例えば、手招きするように操作端を動かせば、その形どおりバックホウのバケットが石をすくう動きになる。

(3) ジョイスティック方式と Master-Slave 方式の比較

ここで、ジョイスティック方式と Master-Slave 方式による遠隔操作型の作業機械 (水中バックホウ) への指令の与え方のメリット・デメリットについて下記のとおり考察した。

- ・通常のバックホウの操縦に用いられるジョイスティック方式は、建設作業に従事するオペレータにとって慣れた操作方式であるが、次のような課題もある。
- ・実機は海底にあるため直接的には視認できない。また、油圧で駆動するため、ジョイスティック操作と実機の動作には時間遅れが生じる。このため、遠隔操作を補助するCG等を用いたとしても、陸上作業時と同様にバックホウの姿勢等の状態を一目で把握できるかどうか疑問が残る。
- ・遠隔監視用のTVカメラの使用が困難な海中において、バックホウ各部が受ける負荷等をオペレータにフィードバックする機構を導入しようとする際、ジョイスティック方式によって“手応え”をオペレータに巧く伝達できるかどうか疑問が残る。
- ・アーム、ブーム、バケットの動きと同じ形で実機に指令を与える Master-Slave 方式は、実機の動作等の情報を操作端にフィードバックすることにより、リアルタ

イムにバックホウ各部の姿勢と、動作時の“手応え”の直感的な把握が期待できる。

以上の理由から、本研究ではMaster-Slave方式による操作方式を用いることとした。

(4) 遠隔操作のための入力インタフェース

実機は海底にあって、遠隔操作による機体の動きがオペレータから全く見えないことを考えれば、入力インタフェースには操作入力のしやすさ、直感的な分かりやすさが重要である。

そこで、まずバックホウ上部の動きをバケット軸、アーム軸、ブーム軸の3自由度の操作と、旋回軸の操作とに分けて、

- ・ 旋回軸の操作はクローラの前進・後進操作と同じ操作系としてまとめ、機体の前進・後進（旋回による進路変更を含む）、機体上部の旋回を一括して司る操作系とする。
- ・ 人間の腕から手首までの動きに相当するバケット軸、アーム軸、ブーム軸の操作は、一つの入力インタフェースとしてまとめ、詳細な動きに適合した分かりやすい操作系とする。

こととした。

この入力インタフェースは、オペレータの手首から先の動きとバケットの動きとを連動させ、バケットを思いどおりに操作することが、直感的で平易な遠隔操作を実現するための要点である。このため、操作インタフェースのうち、バケットに相当する部分を把持するものとした。ただし、バケットの可動範囲は約300度と広く、バケットそのままの形状では操作中に持ち替える必要があるため、本インタフェースでは把持部を棒状とし、ペンを持つように操作することで、オペレータの意思どおりの入力と入力範囲の確保を行うこととした。

また、インタフェースの相似スケールは水中実機の20分の1とした。これは、手元の可動範囲を400mm程度に収めること、実機制御に求められる精度（50 mm程度と想定）に対応して、手元での操作精度2.5 mm程度（実機の操作精度の20分の1）を確保することを考慮したものである。

遠隔操作では一般にSlaveにかかる負荷をフィードバックすることで、遠隔操縦の操作性が向上する。そこで本研究で構築する相似形インタフェースには反力呈示機構を組み入れることとする。なお、実機では割石を対象とした均し作業が主であるため、硬いものに触れた感覚が必要である。硬いものに触った感覚が得られる接触力は、応答が十分速ければ1 kgf程度あればよく、本システ

ムでも任意の方向に1kgf以上出力できることを条件とする。

(5) 本システムに適用するバイラテラル制御方式

バイラテラル制御とは、制御の対象をMasterの位置と力、Slaveの位置と力の4つとし、MasterとSlave間で位置および力どうしを一致させるような制御を指す。つまり動作に指示を与える「Master装置」と実際に作業を行う「Slave装置」を用意し、MasterからSlaveへ姿勢を指示し位置決めを行う制御系と、これとは逆向きに作業に伴う反力などをSlaveからMasterへ伝達する制御系を同時並行して制御する方式をいう。「バイラテラル」とは、「双方向」という意味である。これまでの遠隔操作に多く用いられてきたMaster-Slave位置制御型の系を「ユニラテラル(Unilateral)」と呼ぶのに対して、位置制御に力覚制御を付加してMasterとSlave双方を制御する系をバイラテラル(Bilateral)と呼んでいる。

a) 対象型バイラテラル制御

最も一般的な対称型バイラテラル制御は、Masterの変位にSlaveを追従させるようにMaster, Slave両者のアクチュエータを制御するものである。すなわちMasterに変位が生じると、MasterとSlave間に相対変位が生じるが、その相対変位を0にするようにMasterおよびSlaveを制御し、両者に駆動トルク、拘束トルクを発生させるように制御するものである。これを対称型バイラテラル制御と呼ぶ。この方式ではSlaveに負荷がかかり停止した場合でも、その変位はMasterに拘束力としてフィードバックされる。この方式はSlaveにかかる力を計測する必要が無く、制御が単純で安定性も高い。図-4に対象型バイラテラル制御の模式図を示す。

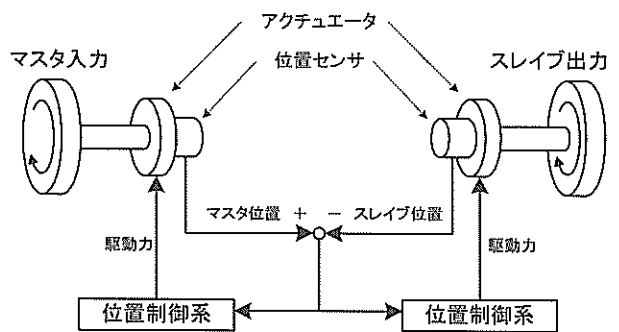


図-4 対象型バイラテラル制御

b) 力逆送型バイラテラル制御

力逆送型バイラテラル制御は、MasterとSlave間の相対変位からSlaveの位置決め制御を行う一方で、Slaveに加わる力を検出して、それをMasterで再生する方式であ

る。前述の対称型バイラテラル制御では、変位と力の間に比例と見なせる関係が成立している必要があり、荷重が与えられても変位しにくい機構には適用できない。力逆送型は、このような不具合を解決するために、直接 Slave 側の荷重を計測して、その力を Master の拘束力に反映させるものである。図-5 に力逆送型バイラテラル制御の模式図を示す。

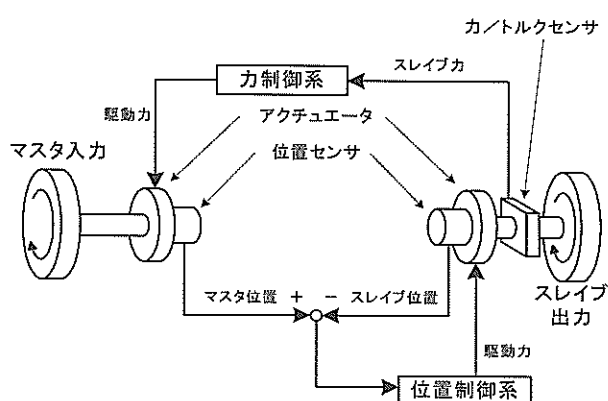


図-5 力逆送型バイラテラル制御

(6) バイラテラル制御を適用するための課題

ここで制御対象である水中バックホウの特徴を考える。

- ・ 水中バックホウの動力は油圧であり、制御対象とする水中バックホウと同等クラスの建設機械のバケット最大掘削力は約 9tonf と非常に大きな出力である。
- ・ また、バックホウの動作は緩慢であり、素早い入力に対する追従性は低いと考えられる。
- ・ 油圧シリンダの速度は作動油の流量に比例するが、流量制御弁を用いておらず、弁開度と作動油流量は比例関係とならない。さらにシリンダ形状では高い分解能を持ったパルスカウンタを設置することが難しいため、速度制御は困難である。

このような特徴を持つバックホウに前述の制御法を適用する場合、それぞれに下記のような問題が発生すると考えられる。

- ・ Slave が負荷によって停止させられることでオペレータが接触を認識するような対称型バイラテラル制御では、このような大出力によるマウンド割石の掘削時、つまり Slave が負荷によって停止しない場合に接触を判断することは困難である。
- ・ 力逆送型バイラテラル制御では、Slave に負荷がかからないかぎり Master には一切の拘束力は出力されず、自由に入力することができる。このため、

Master-Slave の間に位置の相関関係が得られない。つまりバケットが対象物に接触したことを感知しその反力を Master で提示したとしても、位置の相関関係が無いとどの位置で接触したのかが不明となる。

以上のことから、水中バックホウの遠隔操作にバイラテラル制御を実際に適用するためには、いくつかの制御特性を具体的に確認し、対称型と力逆送型の各々の長所を組み合わせたバイラテラル制御の方法を検討することが必要である。そこで、バックホウ遠隔操作への適用性を検証するため、部分模型による操作実験を行うこととした。

(7) バイラテラル制御系を用いた部分模型による操作実験

実機に用いられている油圧シリンダは外力による変位がほとんど無く動作速度が遅いことを考慮し、本模型では関節角の制御をウォームギアによる直動シリンダとした。また、関節角度検出センサとしてポテンショメータを設置し、角度差分を電流出力とする位置制御とし、速度制御は行わない。また、本実験の対象は各関節角度の制御系の検討とその適応性の検証であり、旋回、移動は対象としない。図-6 に部分模型を、図-7 にバックホウのモデルを示す。

モデルは *boom*, *arm*, *bucket* の 3 自由度 ($J_{s1} \sim J_{s3}$) とし、各関節角度は θ で表す。また *bucket* 先端の座標を pos_s とする。添え字は m を指令値、 s を機体実測値とする。

Master は 3 軸 6 自由度を有する HapticMaster を利用し、 x 座標、 z 座標、 y 軸周りの回転角を取得し、これらをバケット先端座標 pos_m 、バケット角 $\theta_{mbucket}$ の指令値として出力する。この指令値を Slave 制御 PC において逆運動学方程式の式 (1) から (4) を解くことで θ_{mboom} 、 θ_{marm} を求めた。

$$L_4 = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (1)$$

$$L_5 = \sqrt{L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \theta_{mbucket}} \quad (2)$$

$$\theta_{mboom} = \cos^{-1}((x^2 + L_4^2 - z^2)/2xL_4) + \cos^{-1}((L_1^2 + L_4^2 - L_5^2)/2L_1L_4) \quad (3)$$

$$\theta_{marm} = \cos^{-1}((L_1^2 + L_5^2 - L_4^2)/2L_1L_5) + \cos^{-1}((L_2^2 + L_5^2 - L_3^2)/2L_2L_3) \quad (4)$$

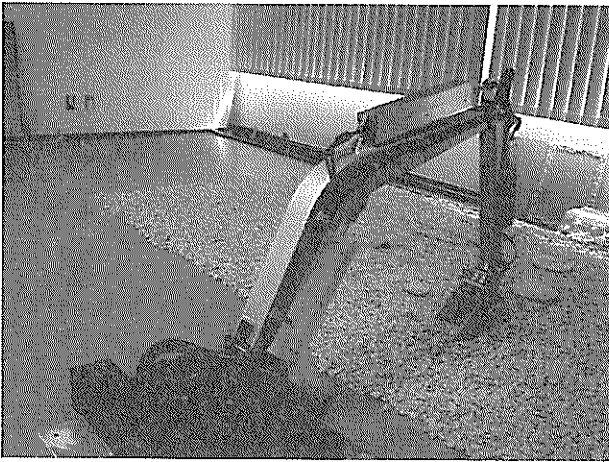


図-6 室内模型実験機

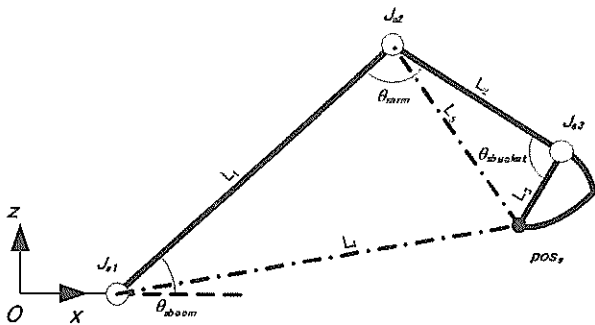


図-7 バックホウモデル

Slave では指令値 $\theta_{mbucket}$, θ_{mboom} , θ_{marm} と現在の関節角度 $\theta_{sbucket}$, θ_{sboom} , θ_{sarm} の差から関節を駆動させる比例制御とした。またバケット軸に力センサを取り付けバケットにかかるトルク pt を計測しており、順運動学により求められたバケット先端座標 pos_s と、バケット角 $\theta_{sbucket}$ と共に Master にフィードバックする。

実験は粒径 30mm の石を対象に本モデルによる掘削、均し作業の実験を行い、対象型バイラテラル制御と力逆送型バイラテラル制御について、操作性と接触の認識を調査した。

a) 対象型バイラテラル制御における操作性

無負荷状態では Master-Slave 間で位置の差分を抑える拘束力が作用し相似の関係が大きく崩れることが無いため、姿勢の認識は容易である。また、Slave が負荷により停止した場合でも同様であり、動作の遅い油圧作業機械の制御に適していると言える。

b) 対象型バイラテラル制御における接触の認識

接触を認識するには Slave が負荷により停止しなくてはならず、対象物が変形するような掘削作業では接触を判断することは困難である。また Master の出力する反力

は位置の差分に比例するため、Slave が急に停止した場合でも Master-Slave の位置差分大きくなるまで入力を継続してしまった。つまり接触の認識にはタイムラグが生じた。

c) 力逆送型バイラテラル制御における操作性

無負荷時には Master に拘束力が作用しないため、動作の遅い油圧作業機械で相似の関係を維持することが難しい。つまり現在の姿勢が把握できず、Slave の先端を任意の位置に制御することが困難であった。

d) 力逆送型バイラテラル制御における接触の認識

接触センサにより小さな負荷でも認識は可能であった。ただし相似関係が維持できていない状態で負荷がかかった場合、その接触した位置を認識することができなかった。

(8) 部分模型による操作実験まとめ

実験の結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 無負荷時には、Master-Slave 間の姿勢変位を抑える「位置対称型バイラテラル制御」が適する。
- ・ しかし、位置対称型バイラテラル制御では、Slave にかかる負荷によって実機の動作が抑制、停止したことをタイムラグ無しに判断することは困難である。このため、力逆送型バイラテラル制御の適用を検討したが、次のような課題がある。
- ・ 追従性能が期待できない油圧機械に力逆送型バイラテラル制御を適応する場合、Master-Slave 間に相似の関係を維持させることが難しい。また負荷のベクトルを検出し、そのベクトルに応じて Master の各関節トルクを出力する必要があるが、バックホウの出力に耐えられる 6 軸分力計は存在しない。
- ・ そのため「力逆送型バイラテラル制御」は Master のバケット関節トルクにのみ適応させる。つまりブーム関節・アーム関節は接触時も位置対称型バイラテラル制御となるが、バケットのトルクに応じてその拘束力のゲインを急激に高めることで、接触時の負荷に応じて手応えを変化させ、負荷の大きさをオペレータが容易に認識できるようにするのがよい。

このような制御法は、比例補償ゲイン及び力伝達ゲインを接触センサの入力に基づいて可変としていることから可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御¹⁸⁾と呼ばれている。位置対称型バイラテラル制御法の欠点を力逆送型によって補った制御法であり、この制御法を用いることで作業中の操作感覚向上を図ることができる。図-8 に部分模型の制御ブロック図を示す。

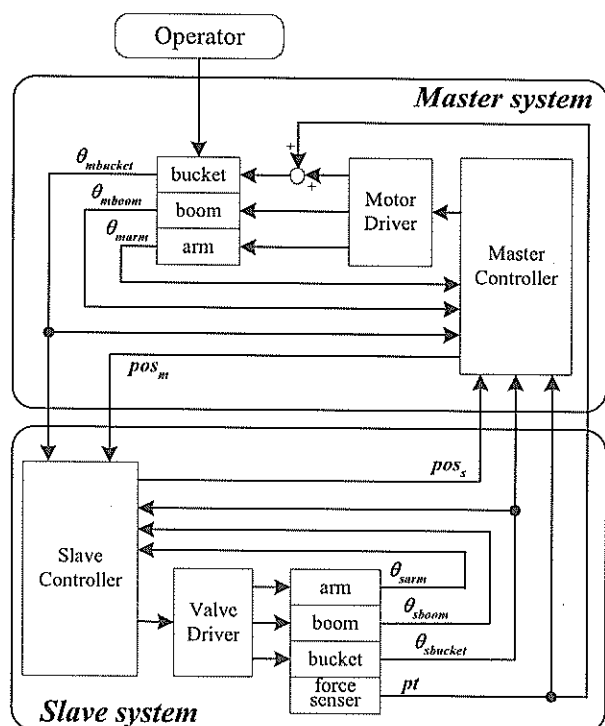


図-8 部分模型制御ブロック図

3.2 センサ系の機構

(1) 水中作業遠隔操作システムで必要とするセンサ

a) 遠隔操作に必要な情報

遠隔操作に伴い水中バックホウに関する情報で必要となるのは次の通りである。

- ・水中バックホウ各部の姿勢に関する情報
- ・機体位置に関する情報
- ・バケットに作用する反力の情報

b) 水中バックホウ各部の姿勢情報に必要なセンサ

水中バックホウ各部の姿勢として、ブーム、アーム、バケットの関節角度、クローラ方位、旋回体方位、機体傾斜を計測する。このうち、機体傾斜については取り付け位置の制限を受けず、防水の密閉容器内に設置することが可能であるが、その他の情報取得のためのセンサは-20m程度の防水性能が必要となる。センサの機構に可動部分がある場合、防水性能は急激に悪化するため、関節角度等の計測センサには回転計ではなく、磁歪式ストローク計を用いる。クローラ部と上部旋回体の回転角度の計測も同様の理由で回転計を用いることができないが、さらに、旋回範囲が限定できないという条件も付加されるため磁歪センサも利用できない。そこで非接触型近接センサを用いることとする。遠隔操作の場合センサの初期化などを行う事が困難であり、さらに電源を入れたと

きからの相対的な値を取得する方式は適していない。そのため旋回体方位については絶対値として計測する必要があり、本システムでは地磁気方位計を用いることとした。この場合、磁性体であるバックホウ機体から可能な限り遠ざける必要がある。

c) 機体位置情報に必要なセンサ

機体位置に関する情報ではバックホウの座標を計測する。水中での座標取得には超音波の伝播時間の差分から座標を計算するSBLが一般的であり、本遠隔操作システムでもSBLを利用する。ただし、SBLの実用的な精度は±30cmであり、高精度の測量には向いていない。そのため、XY座標平面に関してSBLを用い、z座標に関しては高精度な水圧計を用いる。

d) バケットに作用する反力情報取得に必要なセンサ

本遠隔操作システムでは接触情報を利用しており、さらにその時の反力を可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御に利用することから、バケットに作用する反力の大きさを取得する必要がある。ただし、前述の通りバックホウの出力に耐えられる6軸分力計は存在しないため、反力センサの機構については検討する必要がある。そこで高い負荷を計測できるロードセルを用いることを提案し、バックホウ掘削力に耐えられる反力取得機構について検討を行った。

(2) 部分模型を用いた反力取得機構の検討

a) 実験計画

ロボットアームの場合、反力センサはエンドエフェクタ付近に分力計を取り付けることが一般的である。しかし最終年度のバックホウ実機に搭載することを考えると、実機の最大掘削反力に耐えられる分力計は存在しない。また、バックホウの負荷を計測するには油圧経路に油圧計を設置する手法があるが、ブームおよびアームの自重による負荷、シリンダの加減速時の負荷、複数のバルブを同時に開いた場合の圧力の均圧化など影響が想定され、純粋な掘削反力を認識することが困難であると考えられる。

ここでバックホウによる作業を考えると、基本的にはバケットの引き込み掘削動作および払い動作であり、横方向に負荷のかかる利用はされていない。旋回動作による横払い動作に関して建設機械メーカーに質問したところ、旋回用油圧モータの出力がシリンダと比較して小さく、さらに旋回中心軸からバケットまでの距離があるとトルクは非常に小さくなる、ブーム軸にネジレの負荷がかかるということ、土砂などの表面を最後に平らにするといった利用しかされていないとの回答を得た。

そこで本システムにおける反力センサの検出対象を

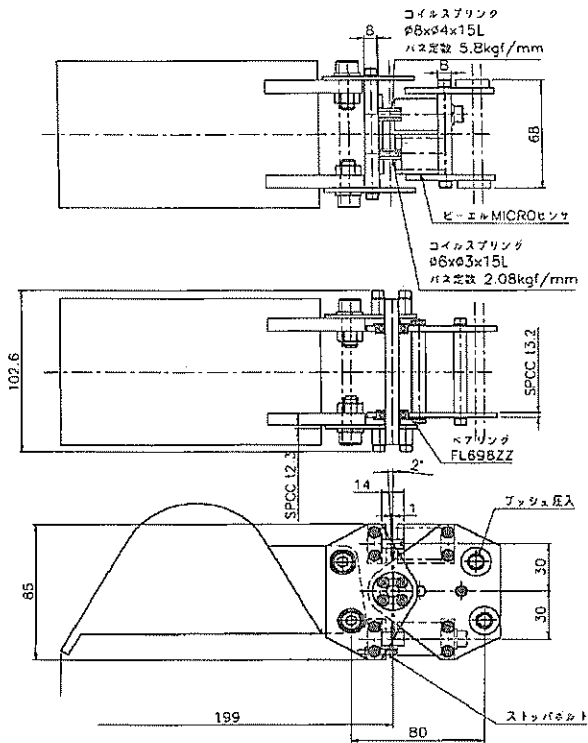


図-9 圧力センサタイプ

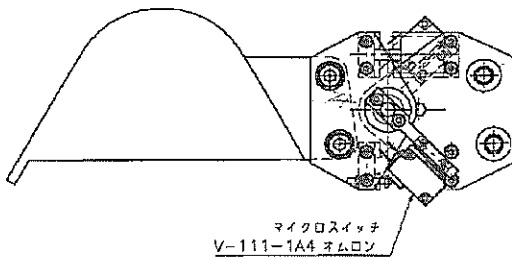


図-10 リミットセンサタイプ

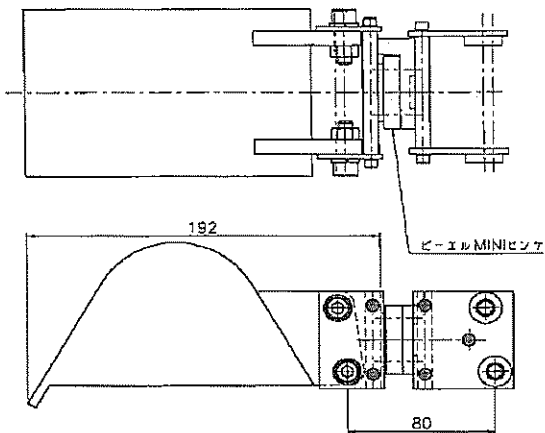


図-11 6軸分力計タイプ

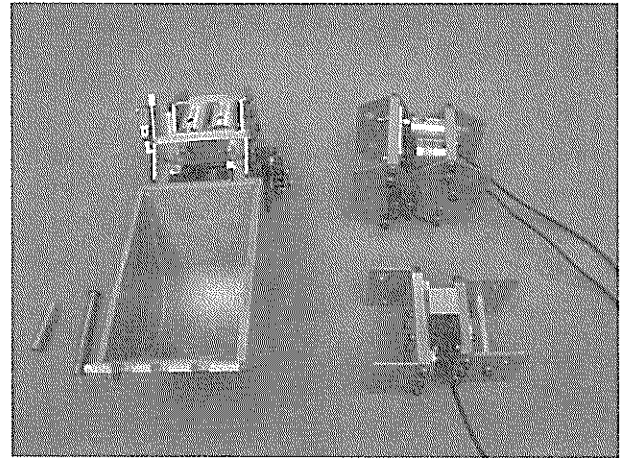


図-12 アタッチメント型センサ

掘削トルクだけに絞る、設置位置をエンドエフェクタであるバケットの軸とした。室内模型ではアタッチメント形式で装着できる形状を考案し、圧力センサタイプとリミットスイッチタイプについて比較を行う。さらにロボットアームで一般的な6軸分力計を取り付けたものと比較し、その検出情報が必要十分であることを確認する。使用したアタッチメント型センサを図-9から図-12に示す。

室内模型実験では掘削動作、払い動作時のアタッチメント型センサから出力される電圧値をADボードによって計測を行う。リミットスイッチタイプは5V電圧のon-offであるが、力センサの場合はアンプから出力された電圧値の値を式(5)の補正式によって変換することで力の大きさを算出する必要がある。

$$F = C \times V \quad (5)$$

ここで

$$F = [F_x \ F_y \ F_z \ T_x \ T_y \ T_z]^t$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{61} & \dots & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$V = [SG_0 \ SG_1 \ SG_2 \ SG_3 \ SG_4 \ SG_5]^t$$

とし、 C_{11} から C_{66} はセンサ固有の補正值、 SG_0 から SG_5

は計測した電圧値を-2048 から 2047 の 12bit で表したものである。

6 軸分力計の各軸周りのモーメントではグラフ y 軸の値を 10 倍し単位は $[kg \cdot cm]$ とした。圧力センサタイプではさらにセンサ位置とその圧力差から機構の回転軸まわりのモーメントを算出する必要があるため、回転軸からの距離を乗算している。単位は 6 軸分力計と同様である。

このような補正で各センサ機構の値を比較することとした。なお値の取得間隔は 0.1sec 毎としている。

b) 実験結果と考察

掘削動作はブーム・アーム・バケットを同時に操作する一般的な操作とした。操作は被験者の手入力で行うが、対象物に接触している時間を 1 秒間と定めできるかぎり同様の軌跡をとるように事前に十分に練習を行った。

掘削動作のイメージ図を図-13 に示す。計測した各センサからの出力をグラフ化したものを図-14 に示す。

圧力センサによる出力特性は多少ばらつきがあり、出力の最大値が異なっているが、これは人の手入力により負荷が同等にならなかったものと考えられる。動作開始時はバックホウのブーム・アーム・バケットを常に同じ姿勢に戻しており、比較的同じ負荷となりやすい掘削初期入力時の特性に注目すると 6 軸分力計による y 軸周りのモーメントと同等であると言える。

リミットスイッチタイプの出力特性は on-off であるため一定の閾値を超えた負荷の認識は容易であるが、負荷の大きさを計測することは困難である。また閾値の調整にはバネ定数を変更するかリミットスイッチの位置を変更するなど機械的に調整を行う必要があり、バケットの角度によっては自重だけでスイッチが入ってしまう可能性があることを考えると実機への搭載は困難であると考えられる。

次に 6 軸分力計により得られた電圧値をグラフ化したものを図-15 に示す。これは掘削動作時の xyz 軸方向の力と各軸周りのモーメントをあらわしたものである。このグラフをみると主に計測されているのは y 軸周りのモーメントであり、掘削時にはバケット軸まわりの負荷がかかっていることがわかる。また掘削動作前半には z 軸の押し込み方向に力が加わっていたが、後半には押し込みの力が抜けていることがわかる。x 軸方向にも多少の負荷が計測されたが、y 軸周りのトルクと比較して非常に小さいため、この値で掘削しているかどうかをソフトウェア上で判断することは困難である。

次に払い動作のイメージ図を図-16 に示す。払い動作はブームを下げバケット先端を地面に突き刺した後にアーム・バケットを開くような制御を行っている。この操

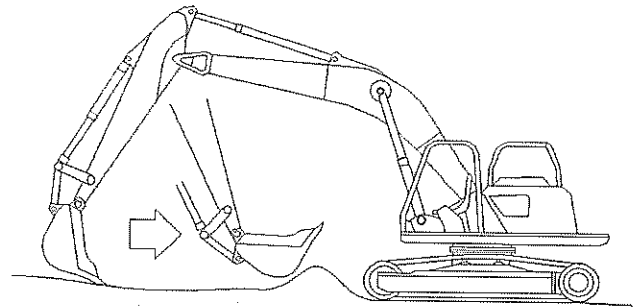


図-13 掘削動作

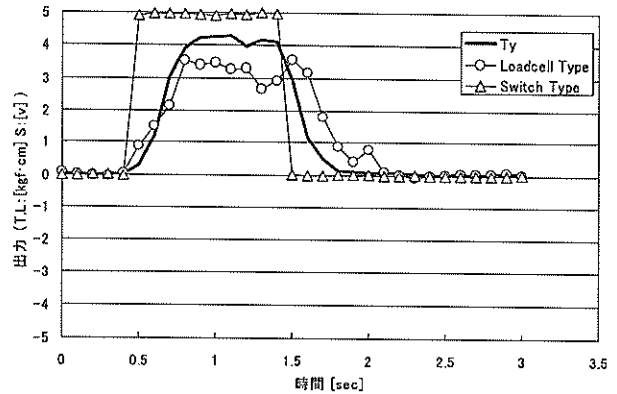


図-14 センサ出力比較

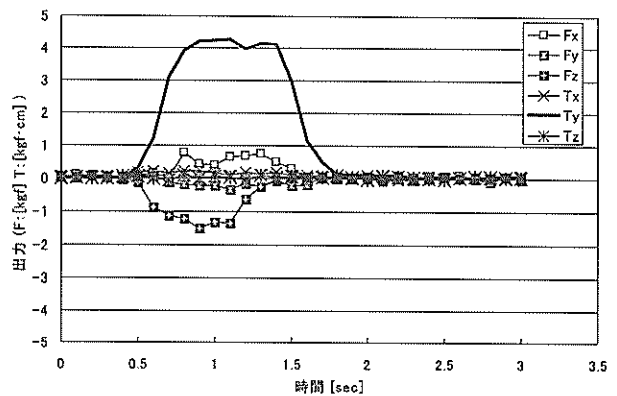


図-15 6 軸分力計出力

作入力も被験者の手入力でおこなっており、対象物に接触している時間も 1 秒間と定めた。計測した各センサからの電圧出力をグラフ化したものを図-17 に示す。

払い動作の場合、y 軸周りのモーメントは掘削時とは逆方向の負荷となるため、マイナスの値が検出されている。払い作業前半ではバケットの先端を押し込んでいる

状態であるため、バケット軸周りに大きなモーメントは発生しておらず、その後バケットを開いている状況においてモーメントが計測されている。これは均し動作と同様に6軸分力計と圧力センサタイプにおいて同じような出力特性であるといえるが、リミットスイッチタイプでは接触認識に乱れがある。これはバケット先端を押し込んだときの負荷が閾値付近であったためであると考えられる。

次に6軸分力計の出力特性をグラフ化したものを図-18に示す。払い作業の初期段階にz軸方向に押し込む力が検出され、バケットを開いた場合にはy軸まわりのモーメントが検出されている。またx軸方向の力も検出されているが、これは大きな特徴を持っておらずx軸の出力で接触を判断することは困難であると考えられる。また、z軸方向の押し付け力については、接触についての検出には有効ではあるが、マウンドを変形させる作業中には特徴ある出力特性とはならなかった。

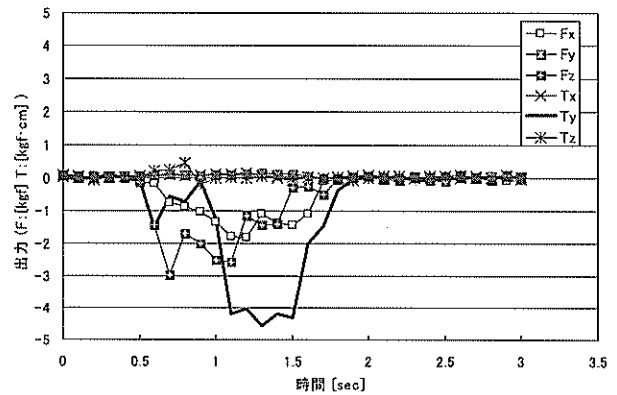


図-18 6軸分力計出力

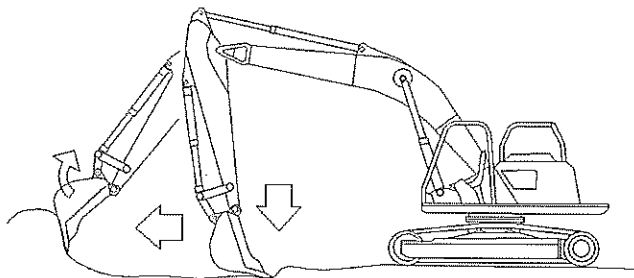


図-16 払い動作

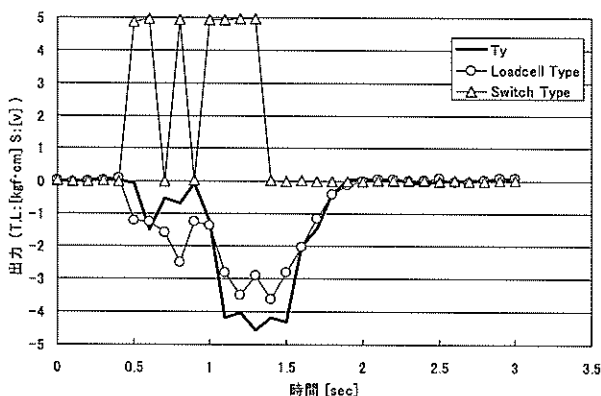


図-17 センサ出力比較

c) 部分模型を用いた実験の結論

バックホウの出力に耐えられる6軸分力計が存在しないため、高い負荷を計測できるロードセルを用いる方法について、部分模型を用いた実験により検討を行った。この結果、実用上、バケット軸まわりのモーメント（ピッチングトルク）の検出によってマウンドとの接触を判定できることが分かった。なお、ピッチングトルクは、2基の引張圧縮型ロードセルの圧力を計測し、その圧力差から求めることができる。

後述する油圧動力実験機を用いた陸上での実験及び実海域実験において、この反力センサを製作、設置して性能試験を行っている。それぞれの章で具体的に述べたので参照されたい。

3.3 インタフェイスの機構

(1) インタフェイス機能の強化

a) AR（強調現実感）手法

インタフェイス面の強化としてAugmented Reality（以下AR）の概念を応用する。ARとはVRの一種で、強調現実感と訳されている。VRが現実感を高めるのに対し、ARは必ずしも現実感を伴う必要はない。必要な情報のみを抽出し、人間の理解しやすい形で提示する手法である。たとえば、人間が作業を行う場合、視覚、聴覚、触覚等、無意識のうちに情報を利用している。特に濁水中での遠隔操作による作業を考えると、何らかの形で作業状況の認識力を高めることは非常に重要である。

b) 手応えによる作業の認識

認識力を高める一つの技法として、前述のバイラテラル制御による力のフィードバックがある。欠落した視覚を補完するため、作業機械の受ける反力情報を手応えとしてオペレータにフィードバックすることで、作業中の状況を把握させている。

c) 反力のプロット画像による作業の認識

さらに、反力情報を力だけではなく映像化することも有効である。バックホウの場合、各関節の角度を取得することで自機とバケット先端の相対座標を算出することが可能である。この相対座標をモニタし、反力を受けた地点だけをPC上のモニタにプロットすることで、オペレータはバケットが接触した場所のマウンド高さを認識することができる。このプロット画像は接触があった場合にリアルタイムに更新されるため、作業によりどのように地形が変化したのかを視覚情報として把握することが可能となる。さらに、そのプロット点をすべて記録することにより、過去に作業を行った範囲について広範囲に画像を表示することができる。この画像は作業中必要に応じて様々な角度から地形を見ることができ、作業範囲の高低差なども認識することが可能となる。この反力プロット画像のように情報を人間の認識しやすい形に変換し提示することでオペレータに感覚的な状況把握をさせ、作業効率の向上をはかる。

(2) CGを用いた支援ツール

a) 施工管理の支援

施工現場においては位置などの基準となる丁張り作業が必要であり、張られた水糸を基に施工を進めてゆくの一般的である。水中施工においても例外ではなく、その丁張り作業は現在のところ潜水士に頼る以外にない。しかし、この丁張り作業は精度が必要なため多大な時間を要しているが、前述したバックホウの接触点座標を利用することで、基準高さとの比較を表示することが可能となる。

その際、事前測量データを予めデータベース化しておき、反力プロット画像による作業途上の地形変化と重ね合わせてCG化するのが有効である。

最終的には絶対位置の情報を既知データである施工図面にマッチングさせプロット画面に重ね合わせることで施工のナビゲーションとしての実用化を目指す。このように他の情報を組み合わせることで視覚のみに頼らない施工基準の認識が可能となると考えられる。

b) 描画アルゴリズム

ここで、反力プロット画像の描画アルゴリズムについて言及しておく。接触した座標のみで地形を描画するためには作業範囲全点を接触する必要がある、現実的ではない。そこで得られた接触情報に基づき順次なめらかな対象物形状を描画することで、すべての点に接触する前にある程度の地形認識を可能とすることとした。たとえば図-19に示すように、2回目の接触が*i+4*の場所であるとした場合、*i+4*の高さは接触点の高さとし、その左隣

の*i+3*は、接触点の高さと2回目接触前の*i+3*の高さの差分の75%だけ上昇させる。2つ左隣の*i+2*は、接触点の高さと2回目接触前の*i+2*の高さの差分の50%だけ上昇させる。右側についても同様である。

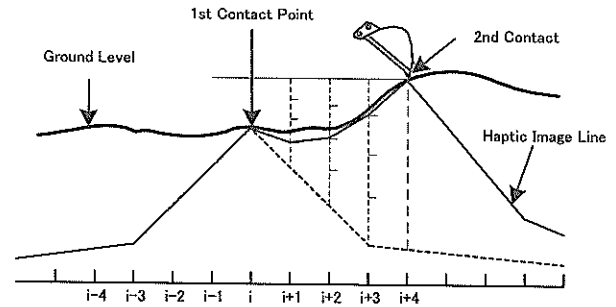


図-19 触覚情報の視覚化

実際に触像を生成している様子を図-20に示す。画面には、相似形入力装置の姿勢を表した青色の機体描画と、角度センサからの情報を基に白色のワイヤーフレームで書かれたバックホウ機体姿勢が側面視点から重畳表示されている。さらに目標高さを予め入力しており、画面では緑の線で表されている。実際のバケット先端が地面と接触が力センサで検出されると、バケット部分が赤く表示され、前述の描画アルゴリズムに基づいて地形情報を描画する。

さらに機体周辺の状況を認識するため、触覚により認識した地形を5度間隔で配置した鳥瞰画像を描画することとした。図-21に鳥瞰画像による地形認識の様子を示す。

またバックホウが広域にわたり移動することを考慮すると、工事範囲全域を範囲とするグローバル座標系をコンピュータ上に蓄積させる必要がある。実施工では数分間のマウンドを一度に均す作業が考えられるため工事範囲は100m×50m程度が必要と考えられるが、その範囲を10cm間隔の行列として記録する場合、その記録点数は5000万点となる。数値の型を浮動小数点7桁のfloat型とすると約200MBのメモリ空間を消費することとなる。これだけの座標データをMaster側を制御するPCに蓄積させるとメモリスワップが発生し、バックホウ制御通信の瞬断や動作の不安定化を招く要因となる。そこで工事範囲全域のデータを記録する機能だけをもたせたDatabasePCを別に用意し、MasterPCは必要な部分の座標データだけをDatabasePCから読み出すこととする。

MasterPCで必要になる地形データはバックホウ正面の断面であり、これはバックホウ旋回軸を中心とした曲

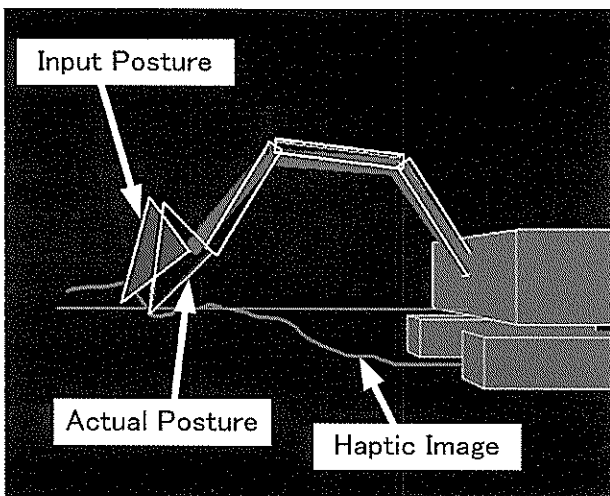


図-20 触像の生成

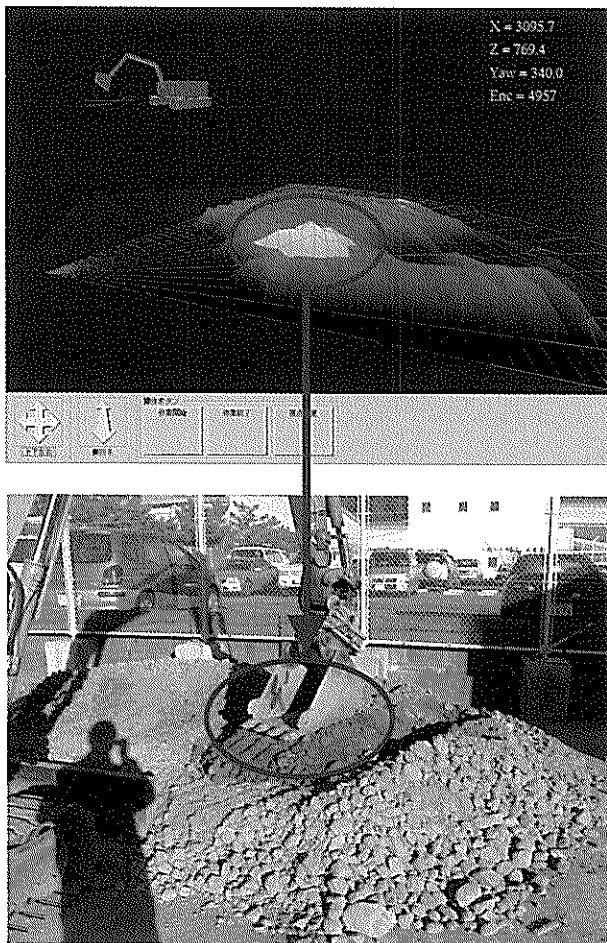


図-21 鳥瞰図による実地形の認識

座標系である。そのため直交座標系である DatabasePC とのデータ通信の際には、これらの座標系の変換を行っている。

また、作業開始前のマウンド形状は超音波測量によっ

て得ることとし、その測量データを予め DatabasePC に入力することにより、作業の効率化を図る。

3.4 要素技術の統合

本遠隔操作システムはこれらの要素技術によって構成されている。駆動系・制御系は反応の遅いバックホウを遠隔制御するのに必要な技術であり、センサ系は高負荷の接触情報を取得するための機構である。インタフェース系は遠隔地の情報をオペレータに提示する技術である。これらの要素技術を用い、水中での難視界状況下において、地形及び施工状況の認識を TV カメラ映像に依存しない遠隔操作の実現を目指す。

4. 油圧動力実験機を用いた陸上での検証実験

油圧を動力源とする作業機械は電動である室内模型と異なり、バルブを開いてから動き始めるまでの遅延、複数のバルブを同時に開いた場合の影響、速度制御の困難性、各関節のガタ、バルブ閉時の急激な停止など、制御に関する問題点が存在し、それらが実作業に及ぼす影響は現在のところ不明である。また接触により取得した地形データと実地形との差、均し作業における施工精度、単位時間あたりの施工面積など、模型実験では明らかにできない項目も存在する。そのため油圧を動力源とした実際の施工機械に本遠隔操作システムを適応させ、無視覚条件下での均し作業実験を行うことで本システムの有効性を検討する。

4.1 油圧動力を用いた実験機の開発

(1) ベースマシン

油圧を動力とする実験機のベースマシンとしてバケット容量 0.09m³ クラスのミニショベルを用いた。図-22 に油圧動力実験機を示す。

主な改造点はブーム・アーム・バケット角度取得センサの設置、比例電磁バルブの設置、比例電磁バルブ制御ボードの設置である。

a) 計測機器

バックホウ各部の姿勢を把握するためブーム・アーム・バケットの関節角度を計測するセンサを設置した。ただし、ここでは、陸上での実験であって防水対策が必要ないことから、設置、計測の容易なポテンシオメータとした。なお、実海域実験のための防水対策を施したセンサについては次章を参照されたい。

機体位置に関するセンサ類に関しては、傾斜角と方位角の取得のための内界センサとして 2 軸傾斜計と磁気方

位計を設置した。また、旋回体とクローラ部の角度検出には近接センサを用いた絶対値型のセンサ機構を考案した。これは実海域実験を想定した場合、回転機構を有するポテンシオメータでは防水化が困難であることが考えられ、また起動時からの相対値しか取得できない機構だとイニシャライズが必要となり、遠隔操作に適さないためである。

本実験機ではクローラフレームにドグパターンレールを固定し、旋回体に6基の近接センサを二列に配置した移動台を設置した。このように6個の近接センサの値を読み取ることで6bitの分解能をもたせており、約5.6度間隔でクローラの方向を取得する。図-23にクローラ旋回角センサの機構図を示す。

b) バケットの反力センサ

本実験機ではバケットにかかるピッチングトルクを計測するための反力センサを製作し取り付けしており、機体本体の改造を少なくするため、バケット軸にとりつけるアタッチメント方式とした。前述の室内模型での実験をふまえ、機構的には平面上に引張圧縮型ロードセルを4基配置したものとし、スラスト方向の応力をキャンセルするためのピンを設置している。図-24にアタッチメント型反力センサを示す。本センサが負荷に対してどのような特性を有しているかを調べるため、バケット先端に一定の錘を吊りしバケットの角度を変化させることで、出力特性を調査した。出力特性をグラフ化したものを図-25に示す。この結果、掘削時のピッチングトルクを認識できることが確認され、同じ角度であった場合、負荷の大きさに対して出力特性が比例することも確認された。ただし、押し込み動作では前後の圧力に差が生じないことから認識することができない。よって本システムによる作業は掘削動作および払い動作を基本とすることとした。表-2に搭載したセンサの一覧を示す。

c) バックホウの制御機構

本実験機の制御については前述の可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御を用いている。Masterからの指令値は座標で与えられるため、逆運動方程式により各関節の角度に分解し、機体に取り付けられたポテンシオメータからの現在の関節角度情報をもとに各シリンダのバルブを制御する。

油圧動力実験機の各関節角度はMasterにフィードバックされ、その姿勢の差分が0になるようにMasterの各関節に取り付けられたアクチュエータを制御する。これによりMaster-Slave間の位相差が少なくなり、入力姿勢と機体姿勢の相関関係を持たせている。

また、バケットにかかるピッチングトルクはMasterPC

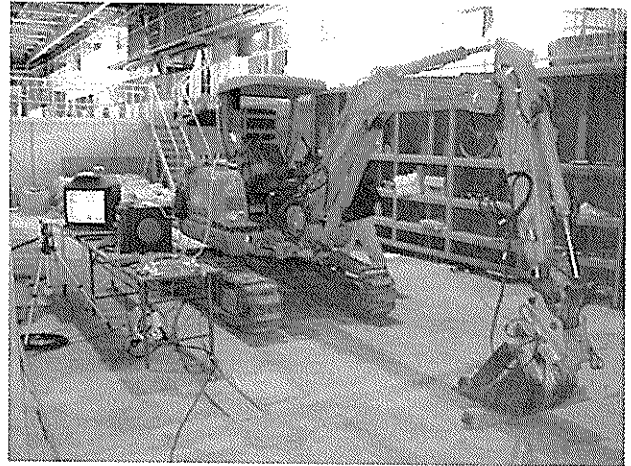


図-22 ベースマシン

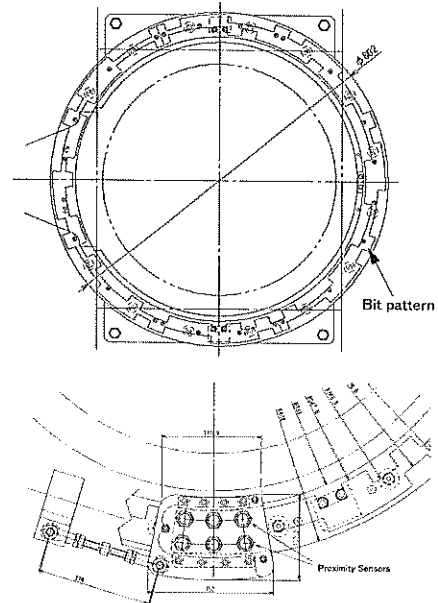


図-23 近接センサによるクローラ旋回角計測

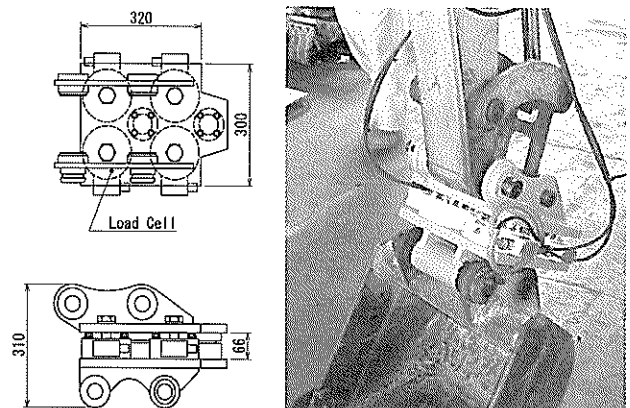


図-24 アタッチメント型反力センサ

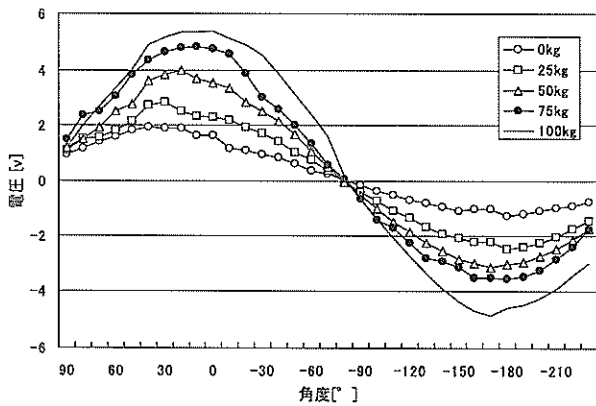


図-25 アタッチメント型反力センサの特性

表-2 油圧動力実験機搭載センサ

名称	型番	精度	備考
SlavePC	IPC-BX/M630-PCI		CONTEC
A/D変換器	PCI-3168C	12bit	Interface
D/A変換器	PCI-3341A	12bit	Interface
バルブドライバ	PD3-100-G-10		TOKIMEC
ポテンショメータ			
近接センサヘッド	EH-114	0~5mm	KEYENCE
近接センサアンプ	ES-M1		KEYENCE
ロードセル	LUK-A-50KNSA1	0.1%RO	KYOWA
計装用コンディショナ	WGA-670B		KYOWA
ジャイロ	JCS-7401A	1%	航空電子
磁気方位計	MODEL-32500	±2°	R.M.YOUNG
2軸サーボ傾斜計	CA-4056	±2°FS	MACOME
UPS	B X 25T X	15min	OMRON

に送られており、この大きさによって Master-Slave 姿勢差分の抑制力を増加させる。それにより無負荷の場合は少ない力で操作し、負荷がかかったときは入力装置を重く感じることでオペレータが接触や抵抗を認識する。さらに力伝達ゲインによって Master のバケット関節に回転力を与えており、均し動作時のバケットトルクの認識が可能となっている。

(2) 相似形入力装置

バイラテラル制御を行うためのバックホウ用相似形入力装置を図-26 に示す。これは今回実験に用いる実験装置のフロント部分と相似の関係を持っており、さらに各関節独立に姿勢拘束力及び力覚フィードバックを出力するアクチュエータと関節角度を認識するロータリエンコーダを有する。これにより関節角度から先端座標を演算し指令値として出力し、また、バックホウから送られてきたフィードバック情報によってオペレータに力覚を提示する。

このインタフェースの操作性を確認するため、TV カメラを用いた遠隔操作によってバケット先端を任意の点に接触させる操作性確認試験を行った。結果、指示動作にかかった時間は搭乗操作の場合と比較して 1.01 倍とほぼ等しい結果であった。

比較として一般に市販されている無線リモコンを用いて同様の操作を行っており、直視によるリモコン操作では搭乗操作の 1.2 倍、TV カメラによるリモコン操作では搭乗操作の 1.84 倍であった。このことから遠隔操作により低下する操作性を相似形入力装置により補うことが可能であったと言える。¹⁹⁾ なお、旋回制御、クローラ制御に関しては相似形入力装置とは別に設けた一般的なレバー操作によるものとした。

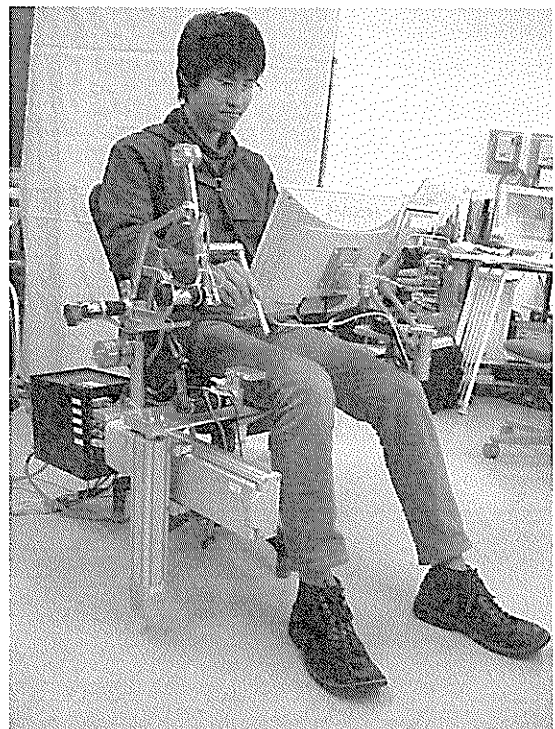


図-26 相似形入力インタフェース

4.2 無視覚条件下における均し作業実験

この油圧を動力源とした実験機を用いて、対象物を見ることなく所定の精度で作業が可能か検証する実験²⁰⁾を行った。クローラは使用せず旋回のみでの評価とした。

作業は任意の高さに石山を均す作業とし、均し面の凹凸精度を評価対象とする。バケットが十分に届く 2.3m から 3.5m の範囲内で左右 30 度の扇状の範囲を実験範囲とし、その範囲内で前後方向に 10cm 間隔、旋回方向に 5 度間隔の計 169 点の高さをトータルステーションにより測定する。作業範囲を図-27 に、実験場の様子を図-28 に示す。

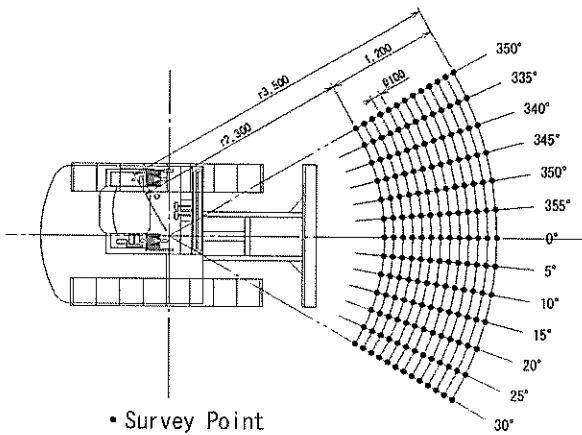


図-27 実験評価範囲



図-28 無視覚遠隔操作実験状況



図-29 制御の状況

地形が施工目標とほぼ一致したと被験者が判断した時点で実験を終了することとした。

被験者は窓が覆われた制御室において遠隔操作を行った。このとき被験者が得ることができる情報はCGによるバックホウ姿勢と、相似形入力装置にフィードバックされる力覚、視覚化された触覚情報のみである。図-29に制御室内での操作状況を示す。

作業を開始するにあたり被験者が最初に行ったのは触覚による形状認識であった。これは対象となる石山の形状を認識する必要があるためであり、この認識によって石材の効率的な移動が可能となる。形状を把握した後に均し作業を開始した。CGには300mmの高さに施工目標ラインを表示しており、オペレータはこのラインを目標に均し作業を行った。比較対象として搭乗操作による均し作業を行い、その精度を比較することとした。

4.3 均し作業実験結果

(1) 施工精度

実験は、未知の形状の石山を+300mmの高さの平面に均す作業とした。作業は搭乗操作及び触覚を用いた遠隔操作を行い、作業前と作業後に評価点の高さを測量した。作業はそれぞれ6回行ったが、遠隔操作の一回目において作業終了直前に接触による再測量を行わなかったため、引き込みライン間に山が残ってしまった。遠隔操作ではそのケースを除いた5回分のデータを、搭乗操作では標準偏差が最も大きかった3回目のデータを除いた集計結果を表-3と表-4に示す。本表はそれぞれの操作法における評価点169点の5回分、計845点の高さの平均とその標準偏差、最大値、最小値を示したものである。

搭乗操作による均し面の平均高さ306mm、標準偏差19mmに対して、触覚情報を用いた遠隔操作による均し面の高さは平均280mm、標準偏差23mmであった。

均し面高さの最大値と最小値は搭乗の場合で391mm,243mmに対し、遠隔操作の場合で384mm,194mmであった。

表-3 搭乗操作による均し精度 (mm)

	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	MAX	MIN
INITIAL FORM	572	106	808	288
WORK RESULT	306	19	391	243

表-4 接触情報を用いた遠隔操作による均し精度 (mm)

	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	MAX	MIN
INITIAL FORM	559	98	839	246
WORK RESULT	280	23	384	194

触覚情報を用いた遠隔操作において目標とした高さ(+300mm)との差の最大値は 106mm であり、ケーソンマウンド築造における捨石荒均しの許容誤差は±300mm と施工基準により定められているため、本実験機ではその基準を満たしていることが確認された。

また搭乗操作と触覚情報を用いた遠隔操作の標準偏差の差は 4mm であることから、搭乗操作の場合とほぼ同等の精度で均すことができたと言える。触覚情報を用いた遠隔操作では TV カメラ等の視覚情報を用いていないため、視覚情報が期待できない水中遠隔操作でも本システムは有効であると考えられる。図-30 に作業前の石山の形状を、図-31 に遠隔操作による均し作業後の様子を示す。

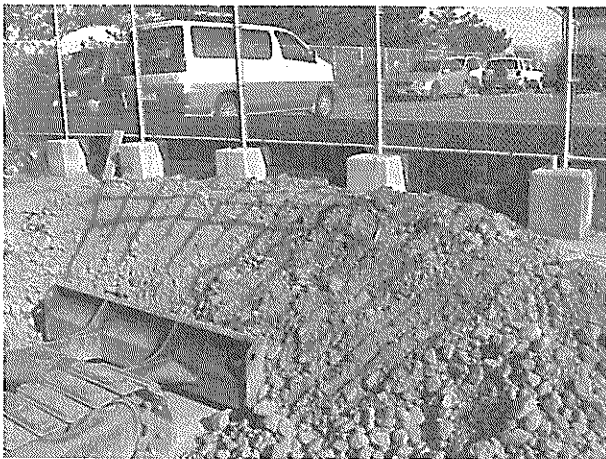


図-30 作業開始前のマウンド形状

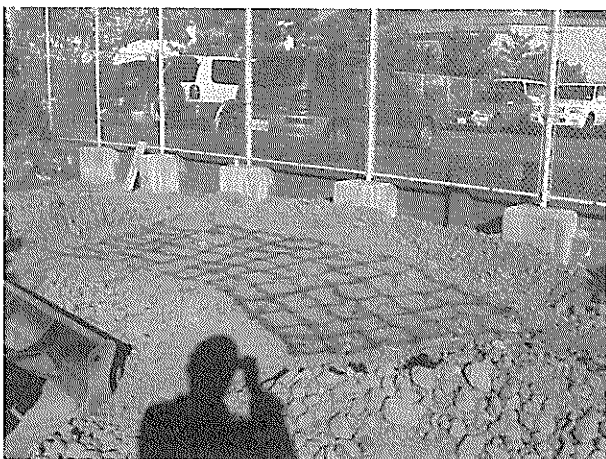


図-31 接触情報を用いた遠隔操作後のマウンド形状

(2) 施工時間

前述の実験において各作業時間の計測を行い、搭乗操作との比較を行った。この施工時間に関する結果も遠隔

操作 1 回目、搭乗操作 3 回目のデータを除いた計 5 回のデータを集計することとした。時間計測は遠隔操作の場合、コンピュータの動作時間を記録したものを利用し、搭乗操作では撮影したビデオ映像から計測した。今回の実験では丁張りとして水系を目標高さより+50cmの高さに張っており、搭乗操作ではその水系を目印に行った。この水系からの高さ確認のため作業中において 3~4 回中断しているが、この中断時間は作業において必要な工程であると判断し、作業時間に含めている。表-5 に操作時間をまとめたものを示す。

遠隔操作時の平均作業面積は約 4.0 m²/h であり、搭乗操作と比較して約 60% 程度の施工能力であった。これは作業後に作業面全面について接触による測量を行ったためである。これは目で見て不陸が判断できる搭乗施工と異なり、引き込み動作に発生した山を CG だけでは認識できなかったため、ほぼ全点について再確認を行ったことが原因である。この確認時間の影響が大きく施工能力に大きく影響した結果となった。

なお、最後に均し結果を再確認しなかった 1 回目の場合を考えると施工能力は 6.2 m²/h であった。このことから最終的な確認時間を短縮させるには、バケットの幅を広げる、引き込み動作のラインをラップさせる、1 ラインを完成させてから次のラインに移動するのではなく広い面積を少しずつ均していく等といった操作法の改良を行うことで解決できると考えられる。

また、搭乗操作では作業前の丁張り作業が必要であり、また作業後の測量は別途行う必要があることを考慮すると、終了後の測量を省略することで搭乗操作と同等以上の施工能力を有していると言える。

(3) 本システムのもつ測量誤差の検討

本システムでは施工と同時に測量を行うことが特徴であるが、その接触による測量がもつ誤差について検討する。作業終了後にトータルステーションにより測量したデータと本システムで計測された地形データから、両者にどれだけの差があるか比較した。両データを比較したものを表-6 に示す。

その結果、実際の地形より平均 26.8mm 下回った値となった。この原因としてバケットのツメによる溝が考えられるが、今回利用した対象物が 150mm の砕石であり、目標とする作業を±300mm の荒均しであることを考慮すると、誤差の範囲内であると言える。

しかし、本システムではバケットの幅より狭い範囲の不陸は認識できない。例えば一箇所だけ突出している石があった場合は、その周辺がすべて同じ高さとして認識してしまう。逆に、一箇所だけ穴があった場合では穴を

認識できないという欠点がある。この欠点はバケットを触診端として利用している限り解決する手段は無く、±50mmの本均しに対応させるには解像度の細かいセンサを別途用いる必要があると考える。

表-5 作業時間と単位時間あたりの作業面積

		1	2	3	4	5	6
搭乗操作	作業時間	0:38:47	0:32:44	0:41:45	0:31:50	0:42:09	0:33:15
	m/h	6.0	7.1	5.6	7.3	5.5	7.0
遠隔操作	作業時間	0:37:41	0:55:04	1:01:52	0:56:46	0:57:00	1:00:42
	m/h	6.2	4.2	3.8	4.1	4.1	3.8

表-6 測量値と触像データの差分(mm)

	1	2	3	4	5	6
差分	-42	-19	-35	-37	-19	-23
標準偏差	39	30	19	19	30	23

4.4 水中作業機械遠隔操作システムの油圧作業機への適応結果

油圧を動力源とする実験機を用いた遠隔操作実験では施工精度に関して搭乗操作と同等という良好な結果を得ており、これに関連して接触による地形認識もその有効性が認められた。追従性に関しては当初から予想していたとおりディレイが存在していたが、位置対称型と力逆送型を組み合わせた制御手法を用いることで安定した制御を行っており、さらに作業反力の提示によりディレイに影響されない施工状況の認識が可能であった。このような結果から、本遠隔操作システムで用いた要素技術が油圧を動力源とする作業機械に適用することができたとと言える。割石の大きさや出力の違いなどの条件は異なるが、制御手法や周辺機器等の基本となる部分は水中実機と同じであり、本遠隔操作システムが実機レベルでも適用可能であると考えられる。

5. 実海域実験による遠隔操作システムの有効性の確認

前章の実験によりバックホウ遠隔操作に接触情報を用いる要素技術は確立した。しかし、前述の実験機のエンジン出力の問題から実際のマウンド築造に用いられる割石より小さい150mm粒径を実験で用いており、実スケールでの均し実験を行う必要がある。そこで平成16年度に荒均し作業を接触情報を用いた遠隔操作で行うこ

ととし、実施工現場における本遠隔操作システムの有効性について実証する。

5.1 実海域実験装置の開発

(1) ベースマシン

実海域実験機は、当研究所と共同研究を行っている佐伯建設工業(株)所有の水中バックホウビッククラブ3号(以下BC3)をベースマシンとした。BC3は過去に水中遠隔操作を考慮した改造を施しており、比例電磁バルブ等基本的な装備が備わっている。水中バックホウBC3の全景を図-32に示す。



図-32 水中バックホウ全景

(2) 主な改造内容

今回の改造では油圧動力実験機と同等のセンサを取り付け、搭載PCおよびセンサアンプ等を入れた制御用密閉容器を設置した。制御用密閉容器は二重構造となっており、フロートスイッチ式の浸水センサを取り付けている。内部には制御機器類のほか、無停電電源装置を設置しており、断線や停電などに備えた。さらにバックホウセンサの生データを台船上から監視するため、モニター、キーボード、マウスを遠隔地で利用できるコンソール延長器を設置しており、これを利用して搭載PCのリブートやプログラム修正が可能である。

角度センサは防水対策から機械的に回転部分のあるポテンショメータをやめ、直動磁歪センサを油圧シリンダ側面に設置し、跳石をガードするフレームを取り付けている。また実海域実験用に追加したセンサとして、水中でのバックホウ位置を測定するためのSBLトランスポンダと水圧計を設置した。水圧計のデータによりバックホウの水深を計測するため、20mの測定レンジにおいて誤差0.15%の高精度な水圧計を利用している。

水圧計を利用した際に発生する潮位による影響はデータベースにその時間の潮位を入力することで補正する。磁気方位センサ, FOG は油圧動力実験機のもを流用しており、磁気方位センサはポリウレタン樹脂による密閉を、FOG は制御用密閉容器内に設置している。

反力センサはバックホウ出力に合わせて±200kN のロードセルに変更したものを新たに製作した。この反力センサは衝撃荷重を考慮し、皿バネを介し力を感知する機構に変更している。設置したセンサに関する情報を図-33 から図-35 に、水密容器内に設置した機器とその系統図を図-36、図-37 に示す。使用した機器の一覧を表-7 に示す。

(3) その他の使用機器および使用船舶

バックホウ投入に使用するため、支援台船には 100 t のクローラクレーンを設置しているものを利用した。

支援台船上には水中のバックホウに油圧を供給するための動力のほか、45kVA 発電機、遠隔操作室、潜水士休憩室、SBL を設置している。また台船舷側には海底面をスキャンするための超音波測量装置 Echo Scope を取り付けている。使用したバックホウ支援台船を図-38 に、各使用機器の配置図を図-39 に示す。また、本実験では比較として有人搭乗施工を行うため、潜水士船や警戒船などを借り上げている。使用した船舶を表-8 に示す。

(4) 水中ケーブル

PC 間の通信は一般のカテゴリ 5 LAN ケーブルを利用しており、水中バックホウに搭載されている PC への通信もポリウレタンシースで保護した複合ケーブルを作成し利用している。複合ケーブルには通信用の LAN ケーブルのほか、SlavePC の状況を把握するためのケーブル、搭載機器に AC100V を供給するための電源ケーブル、SlavePC を再起動するための信号ケーブル、UPS 停止用の信号ケーブルを纏めたものとした。この通信ケーブルはバックホウの油圧供給ホースに這わせて括りつけられており、バックホウの移動時に絡まることのないよう配慮している。また投入時には約 5m 間隔でブイを取り付け、バックホウからほぼ垂直に立ち上がるようにしている。製作した複合ケーブルの断面図を図-40 に示す。

(5) 不具合が生じた場合の対策

本実海域実験機の水中での作業は本実験が初となるため様々な不具合が予想される。特に浸水等の不具合は容易に予想される事項であり、センサや密閉容器は当所の水槽において長時間の防水テストを実施している。しかし作業中の振動による影響が防水性を低下させる可能性があり、万が一の浸水や故障に備え、すべてのセンサにバックアップとなる代替センサを設置している。磁気方

位センサ, FOG の故障には比較的安価な磁気方位センサ, サーボ式傾斜計を代替センサとして設置しており、外部にあるストロークセンサは漏水だけでなく跳石などとの接触により故障する可能性が高いため、バケットシリンダのみストローク計を別に内蔵する改造を行っている。搭載 PC の故障には既存のノートパソコンを流用することとした。また、磁気方位計による方位とジャイロの加速度積分による方位を互いに補正しあうなど、プログラム上での対策も行っている。

5.2 実海域実験の実施

(1) 安全管理基準

本実験は作業現場海域での実施であるため安全管理を徹底した。特に実験に参加した当所職員及び大学関係者は施工時における危険要素の認識や安全に関する知識を有している者が少なく、実験前に安全意識に関する指導を行った。安全対策として作業台船上では常時ヘルメット及びライフジャケットの着用、作業中の作業員には接近しないなどは一般的であるが、本実験ではバックホウ投入・揚収時は当所職員及び大学関係者を遠隔操作室に退避させた。また、水中バックホウの遠隔操作制御時には潜水士を作業台船上に避難させ水中は完全に無人の状態にすることとした。

実験中の指示系統は実験責任者から現場管理者を通じて必要な作業員に指示することとし、作業中に問題が発生した場合や作業員が危険を認識した場合は実験責任者と現場管理者に同時に伝えることとした。このように伝達系統を明確化することで実験中の混乱を避ける。天候等の理由によって実験の実施あるいは中止の判断が必要な際は、現場の海象条件や事務所の判断等を参考に安全の確保を最優先に考えて決定することとした。表-9 は実験現場海域における作業中止基準であり、本実験でもこの基準を参考とした。

本遠隔操作においてオペレータは TV カメラなどの映像を利用しないが、安全対策上水中バックホウの挙動を常に監視することが望ましい。そのため遠隔操作時には吊り下げ式水中カメラによる監視を安全監視員が行うこととした。図-41 に吊り下げ式水中 TV カメラを示す。

(2) 実験計画

期間中の実験工程計画を図-42 に、実験日の時間計画表を表-10 に示す。実験期間は準備・片付けを含め 9 月 29 日から 10 月 12 日までの 2 週間とし、実験自体は 10 月 4 日から 7 日までの 4 日間を予定しており、うち遠隔操作による均し実験は最大 12 時間としている。また 8 日は悪天候による実験中止時の予備日とし、実験が順調

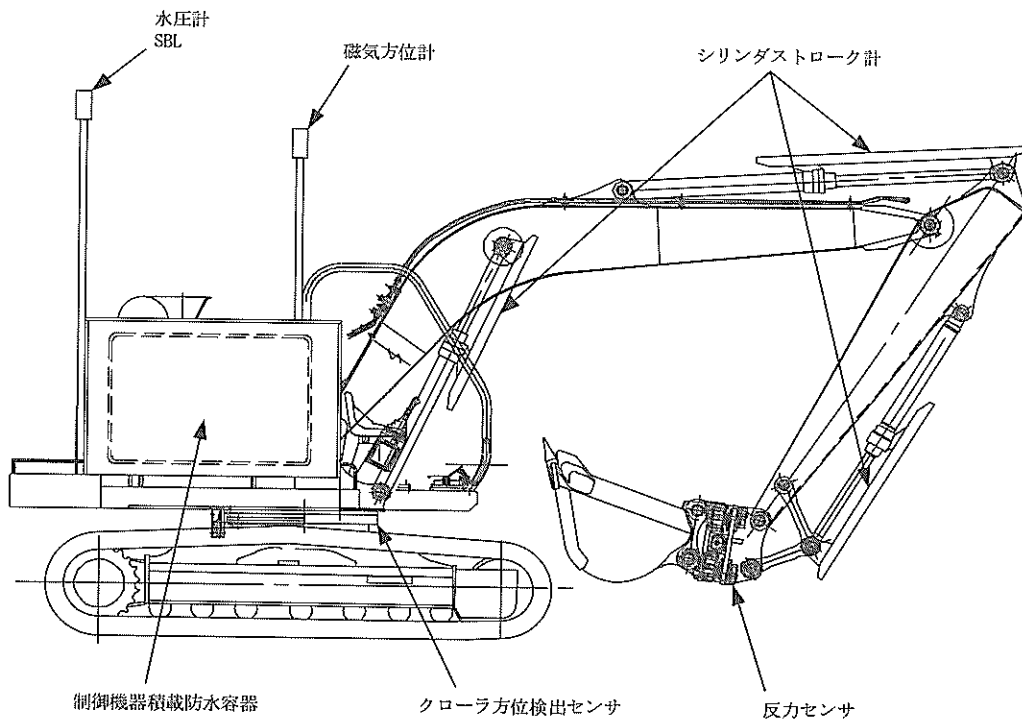


図-33 遠隔操作型水中バックホウのセンサ配置図

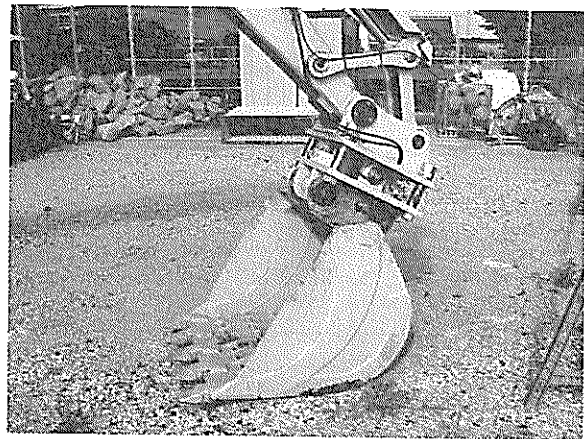
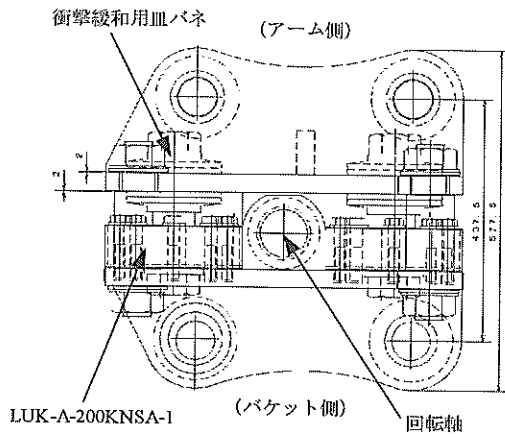


図-34 反力センサ取付状況

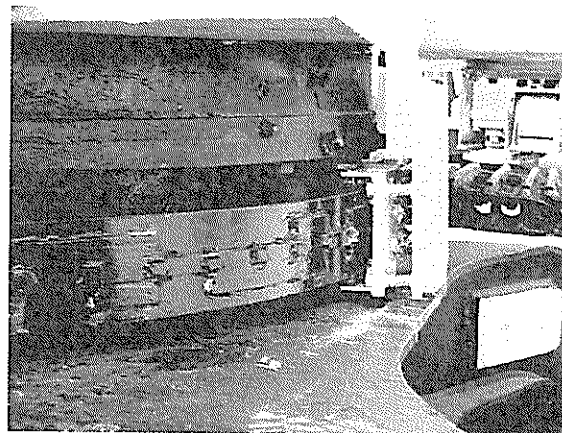


図-35 クローラ方位角検出センサ

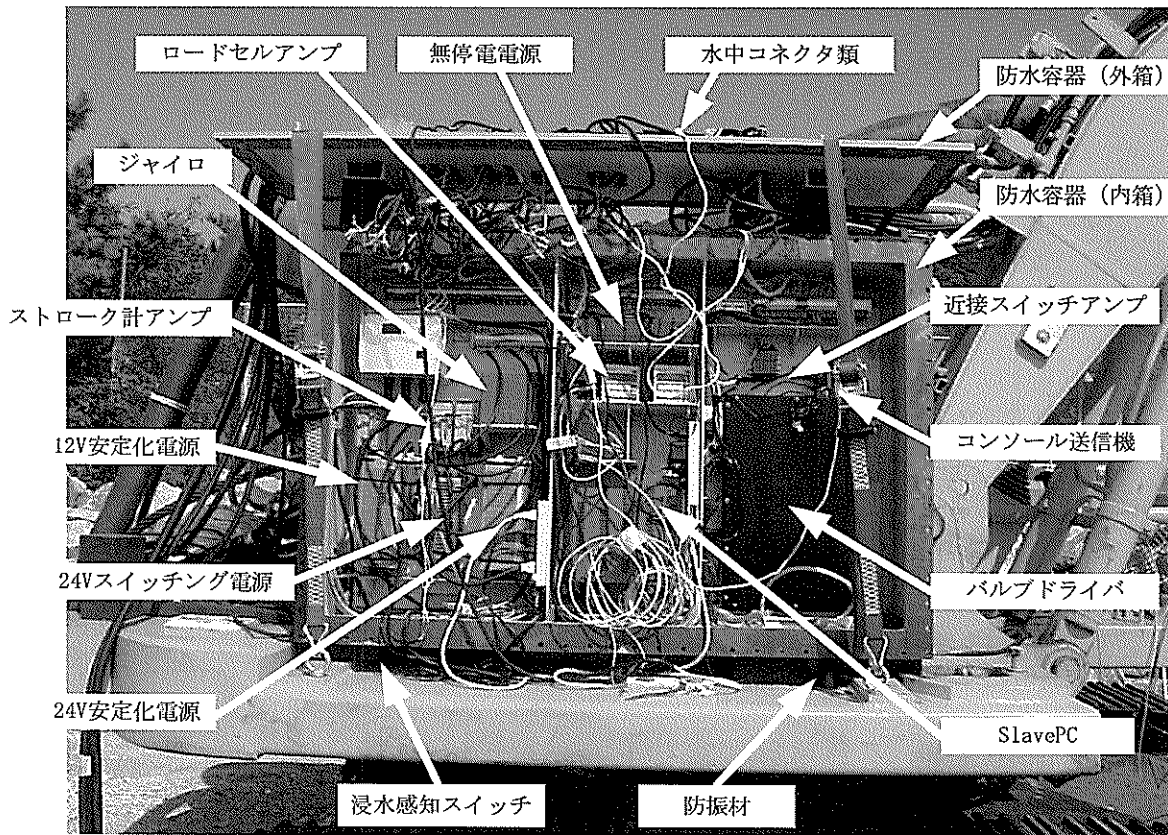


図-36 制御機器積載防水容器内

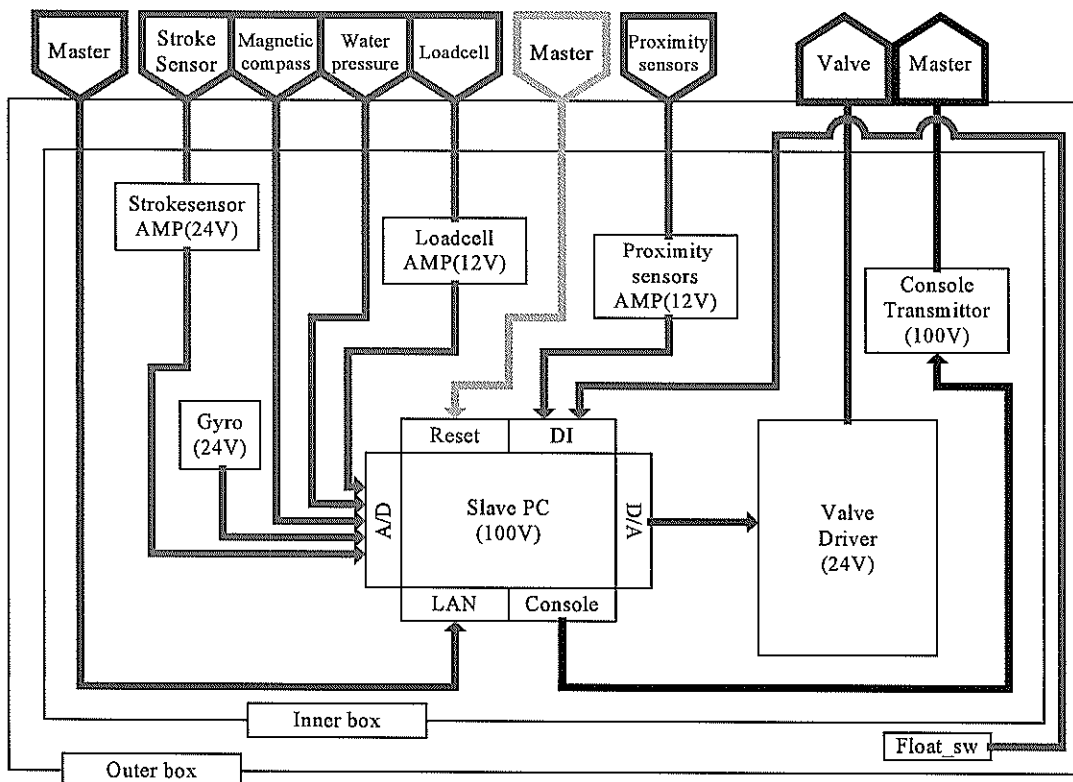


図-37 制御機器接続図

に進めば水中撮影を行うこととした。実験日は8時より作業を開始し、午前中は1時間30分、午後は2時間30分の計4時間の均し作業を行う。

表-7 水中バックホウ搭載機器

名称	型番	精度	備考	追加・変更
SlavePC	IPC-BX/M630-PCI		CONTEC	
A/D変換器	PCI-3168C	12bit	Interface	
D/A変換器	PCI-3341A	12bit	Interface	
バルブドライバ	PD3-100-G-10		TOKIMEC	
ストローク計	GYcRP-1500	0.05%FS	Santest	○
プローブコントローラ	GYFC-R9		Santest	○
近接センサヘッド	EH-114	0~5mm	KEYENCE	
近接センサアンプ	ES-M1		KEYENCE	
ロードセル	LUK-A-200KNSA1	0.1%RO	KYOWA	○
水圧計	BWL-20MET	0.15%RO	KYOWA	○
計装用コンディショナ	WGA-670B		KYOWA	
ジャイロ	JCS-7401A	1%	航空電子	
磁気方位計	MODEL-32500	±2°	R.M.YOUNG	
磁気方位計	TruePoint	±0.5°	Point Research	○
S B L	KSB-150		日本海洋	○
U P S	B X 25 T X	15min	OMRON	

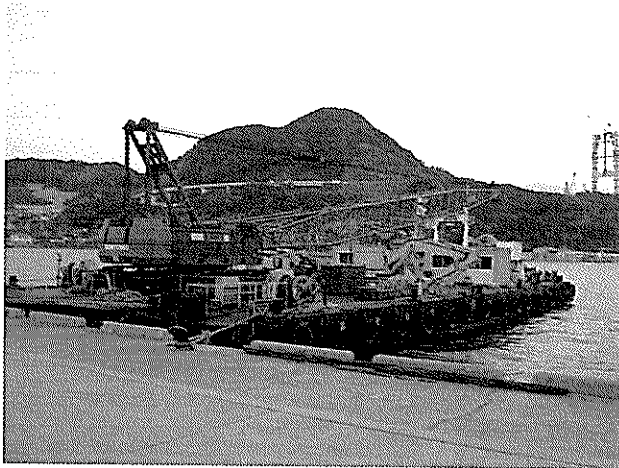


図-38 バックホウ支援台船

表-8 使用船舶一覧

船種	所有者	船名
100tクローラークレーン付台船	崎永建設(株)	第七むさし
曳航船	崎永建設(株)	ひで丸
揚揚船	崎永建設(株)	かえで
潜水士船	石見海事	
警戒船	個人	真幸丸
通船	個人	おしどり

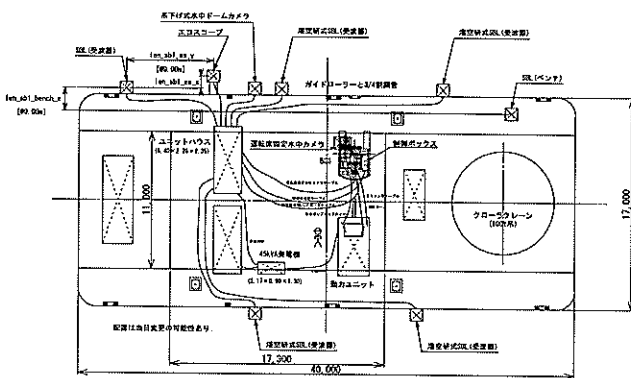


図-39 支援台船上設置機材配置図

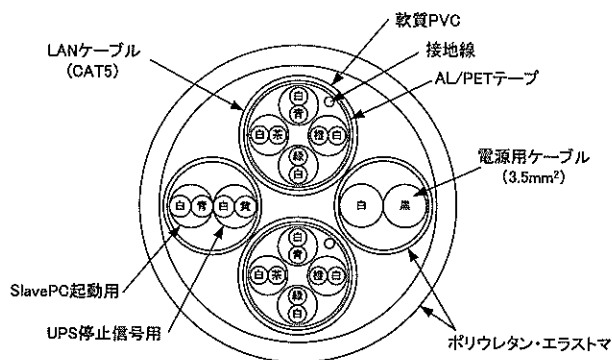


図-40 複合ケーブル断面図

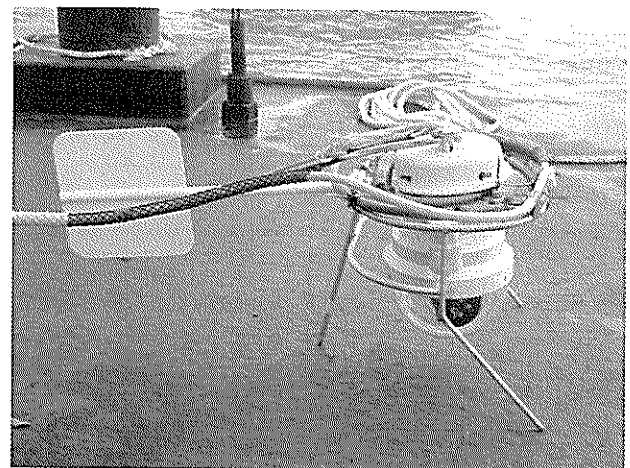


図-41 吊り下げ式水中TVカメラ

(3) 実海域実験海域

実験は長崎県長崎市神ノ島沖防波堤の-16.5m 捨石マウンド上で行った。海象条件は休止日を除いて波高 50cm 以下、透視度 5m、潮流 0~0.3 ノットの非常に穏やかな条件であった。

捨石の大きさは 5~100kg/個、評価範囲は 10m×10m とし、対象とする作業は±30cm の捨石荒均し作業とした。比較として潜水士による搭乗操作による荒均し作業を行う。

実施工での均し高さは-16.0mであるが、本実験では実施工に影響が無いよう、捨石を多めに投入し、-15.5mの高さに均す作業を行うこととした。

図-43 に実海域実験場を、図-44 に実験評価範囲を示す。

(4) 事前測量

実験を行う前の週に不陸の計測を水準測量器を用いて行った。不陸計測は評価範囲の 100 m²を 1m 毎に計測した。前述の通り全体的に多めに捨石投入されており、目標高さを下回った部分は存在しなかった。また投入時の安全のため、バックホウ転倒のおそれのある箇所を潜水士の目視により確認し、投入場所を定めている。図-45 に作業前のマウンド面の状況を示す。+30cm のレベルを示す水系から、約+80cm 程度の不陸が存在することがわかる。

(5) 実験準備

作業台船を実験海域まで曳航後、台船の位置や方位を計測するためトータルステーションにより測量を行った。基準点を既設 No13 ケーソン上に落とし、定められた台船の測量点の距離から位置と方位を算出した。これは台

船に設けられた SBL でバックホウの位置を計測するため、台船の位置をグローバル座標で把握する必要があるためである。この台船を測量する作業は台船を移動させる度に行う。

表-9 作業中止基準

項目	一般標準	作業現場基準
風速	8.0~10.8 m/s	10m/s以上
波高	1m以上	0.5m以上
雨量	10~20 mm/H	10mm/H以上
視界		500m以下
地震	震度3以上	震度4以上
雷	雷鳴が近い場合	雷鳴が近い場合
透視度		1m以下
流速		2ノット以上

表-10 実験日の時間計画

時間	現場作業員作業項目	実験参加者作業項目
8:00	実験準備・曳航	実験機動作確認・機器セッティング
8:30	アンカー固定	トータルステーションによる台船位置測量
9:00	投入	安全場所待機
9:30	水中TVカメラ設置	エコスコープ・SBL設置
10:00		
10:30	実験開始	実験開始
11:00		
11:30		
12:00	昼休み	
12:30		
13:00	実験開始	実験開始
13:30		
14:00		
14:30		
15:00		
15:30	水中カメラ撤収	エコスコープ・SBL撤収
16:00	水中バックホウ揚収・水洗い	データ整理・保存
16:30	曳航・撤収	点検・整備

項目	内容	9/29(水)		9/30(木)		10/1(金)		10/2(土)		10/3(日)		10/4(月)		10/5(火)		10/6(水)		10/7(木)		10/8(金)		10/9(土)		10/10(日)		10/11(月)		10/12(火)		備考
		AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
水中バックホウ 輸送	台船係留地																													水中バックホウ3号機
使用機器 輸送	作業所 台船係留地																													PC、SBL、エコスコープなど 使用機器(急便関係)
捨石マウンド水準測量	天端: 11×21=231点																													事前測量 事後測量 事前測量: 均し前地形測量 事後測量: 均し後地形測量
人員 移動日	研究所 ~ 現場																													①現場入り ②帰館 ③帰館 2班に分かれて現場入り・出
積装・動作確認	台船係留地																													積装・動作確認
オペレータの教習・ 試運転	現場海域																													支援台船上で積装を行い、 動作確認を行う
エコスコープ 海底地形測量	現場海域																													事前測量 随時 アメリム三次元水中音響装置 による海底地形測量
台船位置測量	現場測量員																													台船の位置をトータルステーションで測量
C/G遠隔操作 (10m×10m)	天端 荒均し																													15時間もしくは100m ² で終了
潜水士搭乗操作 (10m×10m)	天端 荒均し																													従来操作方法による 荒均し作業
水中ビデオ・水中写真 撮影	台船吊り下げ式・ BH固定式・潜水士																													作業状況・出来形・石咬合せ 撮影
水中バックホウ位置測定	遠空研式 超音波位置測定装置																													遠空研式超音波位置測定装置 測量結果とSBL上の比較
積装解除・後片付け	台船係留地																													水中バックホウと台船の積装解 除と輸送準備、後片付け

図-42 実験工程計画表

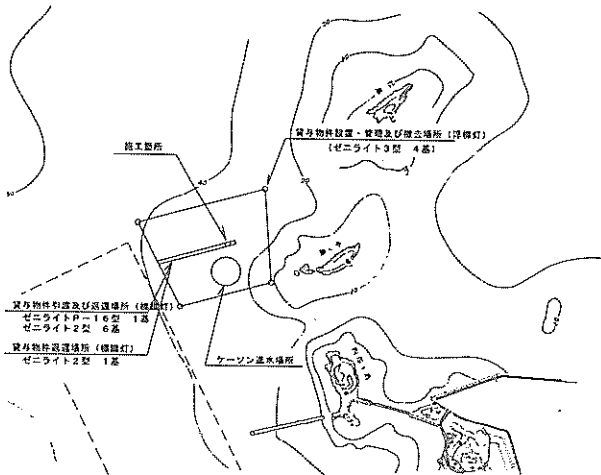


図-43 実海域実験現場海域

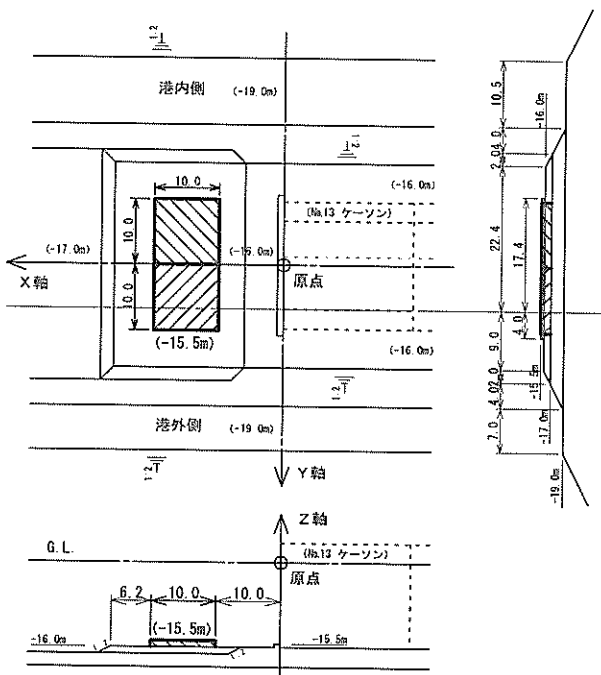


図-44 実海域実験評価範囲



図-45 作業前マウンド状況

台船の位置を測量した後、評価範囲の初期形状を認識するため超音波測量装置による地形測量を行った。これは接触による測量では非常に時間がかかるために行っており、作業中は超音波測量装置を利用せず接触情報により地形を更新する。このデータをデータベースに入力し地形を描画した画面により、オペレータは当日の作業計画を決定した。

バックホウ投入時には、動力油圧ホースに搭載 PC へ電源供給および通信用の制御ケーブルを這わせ、ブイのケーブルで結束しながら投入を行った。

なお、バックホウ着底後のワイヤ玉外し作業及び揚収時の玉掛け作業は潜水土により行った。図-46 にバックホウ投入状況を示す。



図-46 水中バックホウ投入状況

5.3 実海域実験の結果

(1) 遠隔操作による均し作業の実施

水中での動作確認を行った後、無視覚状況下における均し作業実験を行った。今回の実験では水中バックホウの特性を熟知している水中バックホウ作業経験者をオペレータとした。オペレータはTVカメラを用いず、前述のCGのみの情報で作業を行う。

基本的な動作として、必要な高さまで掘削し作業範囲外に捨てる作業を繰り返すこととした。バックホウの平面座標はSBLによる超音波測位を行ったが、鉛直座標はバックホウに取り付けられた水圧計のデータにより取得している。この座標に傾斜角、ブーム/アーム/バケット角度情報を加えることで絶対座標系としてのバケット先端座標を算出する。オペレータはデータベースに入力されている絶対座標系を持つ設計高さ座標と比較することで、丁張りに頼らずに作業を行った。図-47に遠隔操作の様子を示す。

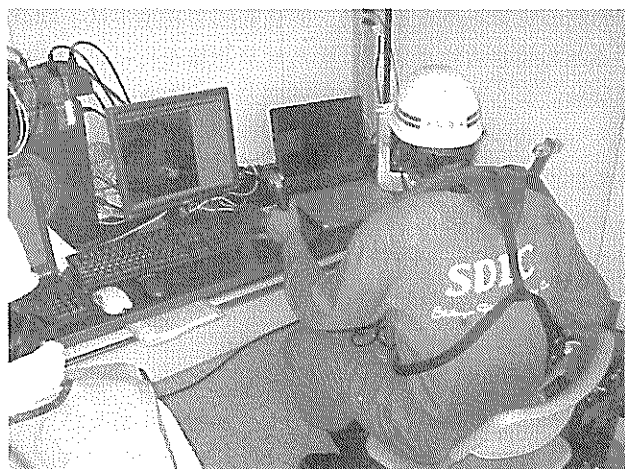


図-47 遠隔操作状況

(2) 実験機器の故障と対応

今回利用した実験機において発生した故障及び問題点は表-11 に示すように多数発生した。しかし搭載センサに発生した故障は、事前に準備していたバックアップシステムへ移行することで復旧することができたが、その移行に伴うプログラム修正でかなりの時間を要し、当初に計画していた均し作業の時間を確保できず、最終日に 32 m²を作業するにとどまっている。この均し作業も旋回モータの故障に悩まされながらの作業であり、この不具合がなければ、さらに施工効率は向上したと考えられる。

付録 D には実験中の作業日誌を、付録 E には実験機器の故障の詳細を参考資料として載せる。

(3) 相似形入力に関する問題点

実験初日に相似形入力装置を制御するコンピュータが故障し予備品に変更した以外はトラブルは無かったが、運用面において連続作業時間がオペレータの疲労により制限されるという問題があった。これは相似形入力装置のペンを握るように把持するという操作姿勢に原因があると考えられる。疲労に関しては陸上実験段階から認識しており、本実験に利用した入力装置にはアームレストを設置している。しかし肘から先は常に持ち上げていなければならない、この点が疲労する原因となった。また、本遠隔操作システムでは安全対策としてオペレータが意識的に操作したことを認識するためのセーフティボタンを把持グリップ部に設置しており、操作するにはこのセーフティボタンを常に押している必要がある。このためオペレータに対するヒアリングでは特に指先の疲労が蓄積されるようであった。

通常の操作レバーでは手のひらをレバー先端に乗せており、実用化に対して疲労を軽減するパームレストの

表-11 故障及び問題点

発生日	故障箇所	内容
9月30日	ベース旋回角度計	旋回体のガタにより近接センサが不安定
9月30日	反力センサ①	コネクタ接触不良により作動せず
10月1日	水中水準測量装置	事前測量中に故障
10月1日	Echoscope①	電源故障
10月2日	走行レバー①	右走行レバーが中立に戻らない
10月2日	Echoscope②	アクチュエータ動作不良
10月2日	Echoscope③	光ファイバに亀裂発生
10月2日	旋回モータ	旋回しない、ブレーキが利かない
10月4日	デマンドバルブ	ダイヤフラム破損によるエア漏れ
10月4日	走行レバー②	機体内部からのエア漏れ
10月4日	反力センサ②	コネクタ内で断線の可能性
10月4日	ストロークセンサ	センサ内部に浸水の可能性
10月4日	Masterプログラム①	軌跡が短い
10月4日	磁気方位計①	センサ内部に浸水の可能性
10月6日	Slaveプログラム	磁気方位計の交換により、0-360度をまたぐ旋回をした場合に値が乱れる
10月6日	SBL①	データが不安定(エア漏れ)
10月6日	磁気方位計②	方位角の誤差が蓄積される
10月7日	発電機故障	燃料ポンプ詰まりで発電機が停止
10月7日	磁気方位計③	予備品取り付け位置が低く機体の影響を受ける
10月7日	SBL②	データが不安定(乱反射)
10月8日	Masterプログラム②	2本レバーによる動作テストで機体表示がされない
10月8日	SBL③	浸水による故障

ようなものを考慮する必要がある。本実験で用いた相似形入力装置では Master-Slave 間で位置-位置制御を行っているが、これを位置-速度制御とし、位相に対して反力をフィードバックすることで、これらの問題を解決できると考えられる。

5.4 遠隔操作システムの有効性に関する考察

作業後に超音波で測量したマウンド面の CG を図-48 に示す。均し面積は時間的な余裕から 32 m²となっており目標である 100 m²には達してはいないが、均し作業を行った部分についてはほぼ平面に均すことができている。作業後に撮影したマウンドの状況を図-49 に示す。作業前の状況では約 80cm 程度の不陸が存在していたが、作業後にはスタッフからわかるようにほぼ平面に均すことができている。

また、作業後に水中水準器による測量を行っており、その測量結果を図-50、及び図-51 に示す。この結果は潜水士搭乗操作及び遠隔操作によって施工された範囲を 1 m 毎に計測したものであり、数値は目標高さとの差である。

潜水士搭乗操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると+27cm であり、その標準偏差は±8.1cm であった。結果を見ると施工管理基準より高かった点が多数存在している。しかし目標高さを下回った点は存在せず、また、標準偏差も±8.1cm であり、全体的に高めではあるが平坦に均せている。潜水士搭乗操作では丁張りを見ながらの作業が可能であるため、潜水士が目測を

誤ったか丁張りの張りが甘かった可能性がある。

遠隔操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると+17cmであり、その標準偏差は±8.1cmであった。また施工管理基準±30cmを超えた点が2箇所あったが、目標高さより下回った点は1箇所であった。半数以上の測量点において+10cm～+20cmの間に入っている。

遠隔操作においても全体的にプラス傾向であるが、その原因としてCG画面の表示方法に問題があったと考えられる。本実験において多くの部分が目標より高く捨石投入されており、掘削作業が中心であった。また一気に掘削すると負荷が大きくなりすぎるため少しずつ削っていくような動作により均しているため、目標値にある程度近づいた段階で均し作業を終了してしまったものと考えられる。特に断面地形を表示する画面では目標範囲を示す±30cmのラインも表示しており、掘削作業中に+30cmのラインを切った段階でオペレータが均し作業を完了したと判断した場合、目標よりも高い位置で作業を終了したことになってしまう。また広域地形を表示する画面においても、目標高さに半透明の緑の面を表示させており、この半透明の面より下回った部分については地形が多少見難くなっている。このためオペレータは目標高さより高い位置であえて作業を終了している可能性がある。

ただし、平坦に均すという作業自体は標準偏差から示されるように十分な性能を有していると言える。

次に単位時間当たりの施工能力について考察を行う。本実験では遠隔操作での作業時間の計測を行っており、32 m³を作業するのに75分の作業時間を必要としていた。これは単位時間あたりに換算すると25.6 m³/hとなる。

ここで第2章で定めた施工能力の目標は26.4 m³/hであり、ほぼ目標を達成することができた。

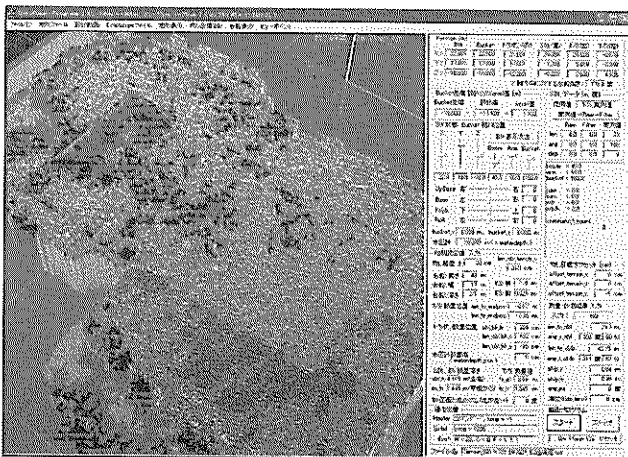


図-48 作業後の状況

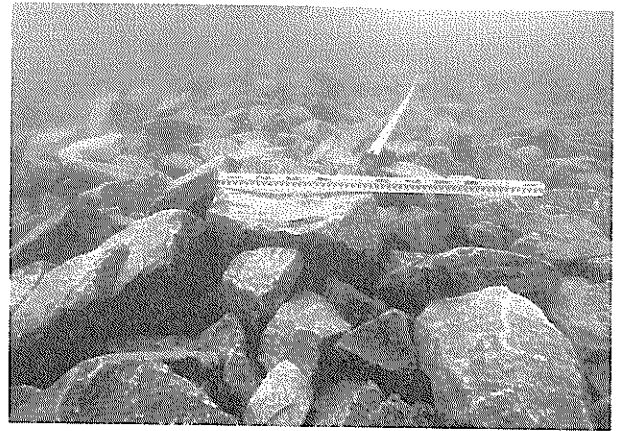


図-49 作業後のマウンド状況

		港内側				
No.		①	②	③	④	⑤
No.1		0.20	0.21	0.29	0.24	0.25
No.2		0.33	0.26	0.12	0.24	0.35
No.3		0.07	0.22	0.33	0.29	0.32
No.4		0.16	0.29	0.35	0.35	0.23
No.5		0.40	0.35	0.35	0.35	0.25
No.6						
No.7						
No.8						
No.9						
No.10						
		港外側				

図-50 マウンド測量結果 (潜水士搭乗操作)

		港内側			
No.		①	②	③	④
No.11					
No.12					
No.13		0.16	0.08	0.19	0.16
No.14		0.15	0.21	0.19	0.21
No.15		0.02	0.18	0.24	0.07
No.16		0.33	0.14	0.34	0.10
No.17		0.26	0.16	0.11	0.06
No.18		0.20	0.12	-0.03	0.19
No.19		0.18	0.14	0.17	0.16
No.20		0.29	0.09	0.20	0.22
		港外側			

図-51 マウンド測量結果 (遠隔操作)

また、本遠隔操作システムは透明度により作業効率が変化しないため、透明度の低い海域での利用について考えると本システムは潜水士搭乗操作より高い施工能力を有すると考えられる。

また、本システムの接触情報により記録した地形データと水準測量器による測量結果との比較を行った。その結果、水準測量による実際の高さより本システムの記録した地形データのほうが平均で4cm上を示しており、その差分の標準偏差は±14cmという結果となった。このばらつきの原因として、本システムではバケットを触診端として利用しており接触時の幅が広いいため、接触による測量座標と水中水準器の測量座標が一致していない可能性があることが考えられる。但し平均すると差は4cmであり、本実験で用いた割石が100kg/個であることを考慮すると、荒均し作業を対象とした場合十分な測量精度をもつものと考えられる。

6. 結論

本研究では、安全で効率的な水中作業の実現を基本目標として、視覚情報が不十分な水中作業の遠隔操作において、作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）をバイラテラル操作系によってオペレータにフィードバックする手法を提案し、その有用性に関して、水中バックホウによる捨石均し作業を研究の対象事例として、部分模型による室内実験、油圧実験機による陸上及び実海域における実験を通じて検証した。

本研究により明らかになった主な事項は次のとおりである。

- ・ 操作端（Master）と水中バックホウ（Slave）が相似形で作動し、これと同時にバケットに作用する反力が操作端にフィードバックされる入力インタフェースは、バケット操作の手応えやバックホウ各部の姿勢をオペレータが直感的に認識でき、無視界でも遠隔操作ができる手法として有効である。また、これを実現する制御機構として、バイラテラル制御系は有効である。
- ・ 上述した操作の手応えとあわせて、フィードバックされた接触情報をもとに均し作業に伴う地形変化などをCG化することにより、オペレータの認識力が高まる。
- ・ この遠隔操作システムを用いた水中バックホウによる捨石均し作業の実海域実験を長崎港で行った結果、施工精度は平均+17cm（標準偏差±8.1cm）、施工能力

は25.6m³/hであった。これは、潜水士がバックホウに搭乗して目視によって作業を行う現在の方法と同等の作業性である。

7. おわりに

水中作業においては、光学映像を用いた遠隔操作が困難であるなど、陸上作業とは異なる様々な技術的障害によって容易に無人化が進まず、潜水士の目視による人力作業に多くを依存してきたが、本研究により、水中バックホウの遠隔操作システムは実用化の途が拓かれたと考えられる。

しかし、今回の研究対象とした捨石均し作業は、所定の施工精度を要求される重作業ではあるが、作業内容としては比較的簡明なものであって、例えば橋樑の点検・補修など、繊細で複雑な水中作業にまで本システムを適用することはできない。

特に、高度成長期に整備された数多くの施設が耐用年数に近づいており、これらを健全な状態に管理し、及び有効に活用することが求められる今日、本研究の成果を水中作業の無人化の第一歩として、今後とも、より高度で実用性の高い水中作業の無人化を目指して研究を進めていく考えである。

(2005年8月10日受付)

謝辞

本研究は港湾空港技術研究所の特別研究テーマとして平成13年度から平成16年度までの4年にわたり実施してきた。この間、水中バックホウに携わっているだけでなく、陸上遠隔操作、建設機械、ロボット制御、災害復旧などに携わる技術者、大学教授など様々な分野の有識者に御指導をいただいたおかげで本研究が無事に終了できたと考えている。特に相似形インタフェースに関する事項は、ハプティックデバイスに関して研究を行っている筑波大学の岩田教授と矢野講師に長年にわたり協力を頂いたおかげで完成したと言える。また、長崎における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・空港整備事務所にも多大な協力を頂き、遠隔操作実験を行う事ができた。実施工現場で行ったという実績は本研究の成果に対して非常に高い価値を与えただけでなく、今後の研究に対しても役立つと確信しており、港湾施工技術に関わる研究者として非常に良い経験ができたと考えている。あらためて関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉江宗生,白井一洋,田中敏成,平林丈嗣: 港湾工事へのロボット技術の導入,第 8 回建設ロボットシンポジウム論文集,2000 年,pp.29-36.
- 2) 中田誠: ダイビングの事故・法的責任と問題, 杏林書院, 2001 年, pp9.
- 3) 平林丈嗣,吉江宗生,内海真: 水中施工ロボットにおける AR を用いた M-M インタフェイスの構築,TECHNO OCEAN2000, 2000 年, pp411-414.
- 4) 平林丈嗣, 酒井浩, 秋園純一, 内海真, 山本恭: バイラテラル制御に対応した遠隔操作型バックホウの開発, 港湾空港技術研究所資料 No.1057, 2003 年
- 5) 秋園純一・平林丈嗣・山本恭・矢野博明・岩崎正揮: バイラテラル制御に対応した遠隔操作型バックホウの開発,第四回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,2003年
- 6) 平林丈嗣・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N0.1065,2003年
- 7) 平林丈嗣,山本恭,秋園純一,矢野博明,岩崎正揮:Experimental Land Model of Tele-operated Underwater Backhoe with AR Technology,the Institute of Electrical and Electronics Engineers / Oceanic Engineering Society International Symposium Underwater Technology 2004,pp.339-344.
- 8) 財団法人先端建設技術センター編: 緊急時の無人化施工ガイドブック, 財団法人先端建設技術センター編,2001 年,pp22-24.
- 9) 藤井政雄: 雲仙普賢岳における無人建設機械の操作実感,建設機械 1 月号,2000 年, pp.40-43.
- 10) 金山裕幸: 水中施工機械「水中バックホウ・ビッグクラブ」による施工コスト削減対策について,第 16 回港湾技術報告会概要集
- 11) 大宮敬治,加藤政徳: 平良港防波堤工事における水中バックホウによる施工,建設の機械化 7 月号,1996 年,pp.17-22.
- 12) 平林丈嗣・山本恭・酒井浩・秋園純一・矢野博明: 水中作業機械遠隔操作における接触情報の有効性に関する研究,日本ロボット学会, ロボティクスシンポジア,2004 年,pp.324-329.
- 13) 平林丈嗣,山本恭,酒井浩,秋園純一,矢野博明:接触情報を用いた水中作業機械遠隔操作に関する研究,第 10回建設ロボットシンポジウム,2004年,pp.253-262.
- 14) 江川栄治, 生田正治, 小関光弘: 油圧ショベルのワンレバー式操縦システムの開発, 第 9 回建設ロボッ
トシンポジウム論文集, 2002 年,pp.241-248
- 15) 岩崎正揮・平林丈嗣・矢野博明・岩田洋夫:水中バックホウ用相似形操作インタフェイスの開発,日本機械学会Robomec2003,2003年
- 16) 平林丈嗣・山本恭・酒井浩・秋園純一・内海真:触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究,港湾空港技術研究所報告第42巻第3号,2003年
- 17) 館暉: バーチャルリアリティと実空間・ロボットから人間を読み解く, 日本放送出版協会, 1999 年, pp.166-179
- 18) 山田宏尚, 武市教児, 武藤高義: 遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御, 日本機械学会論文集(C編)66巻651号, 2000年, pp.140-147
- 19) 平林丈嗣,山本恭,酒井浩,秋園純一,矢野博明: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,(社)日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会,2004年
- 20) 秋園純一,平林丈嗣,山本恭,酒井浩,矢野博明,岩崎正揮:"TELEOPERATION OF CONSTRUCTION MACHINES WITH HAPTIC INFORMATION FOR UNDERWATER APPLICATIONS",International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC),2004年,pp.340-345.

付録-A 陸上建設機械の遠隔操作事例

陸上での無人化施工技術は既に実用段階に入っている。これは1991年6月の雲仙普賢岳噴火災害や2000年3月の有珠山噴火災害など、実施工を伴った長年の技術開発の成果であるといえる。本研究を開始するにあたり、陸上での遠隔操作技術の現状と、実際に遠隔操作施工を行っている施工現場の状況を把握しておく必要があると考え、有珠山での遠隔操作施工現場の現地調査と遠隔操作建設機械オペレータのヒアリング調査を行った。

2000年12月に行った現地調査の時期は、除石工や運搬作業を終えコンクリートブロックの設置により擁壁や導流堤を施工している段階であった。コンクリートブロックの運搬は遠隔操作装置を取り付けた特装運搬車により行い、操作は立入禁止区域外の安全な場所に設置された遠隔操作室において行う。この遠隔操作室は10tトラックに架装されており、万が一の場合には遠隔操作室ごと避難できるようになっている。コンクリートブロックは中央に穴が開いており、バケットの代わりに特殊な把持装置を用いることで玉掛け玉外しを行う。コンクリート

ブロックの設置位置の認識はTVカメラにより行われており、バックホウ運転席上部からの映像で左右位置を合わせ、側面に配置した移動カメラ車により奥行き位置を調整している。

また、バックホウや特装運搬車の位置は、遠隔操作室付近に配置された高所作業車からの鳥瞰図映像により把握する。これら無人機械の操作指令はすべて無線により送信されており、操作入力レバーは市販のものを利用していた。図-A.1から図-A.4に陸上遠隔操作の状況を示す。

さらに遠隔操作時の問題点についてヒアリングを行った。当初、TVカメラによる遠近感の喪失から施工能力が大幅に低下するものと考えていたが、土砂の掘削・積込みなどの単純作業では搭乗操作の8割以上とのことであった。コンクリートブロック設置では運転席カメラ映像での位置決めの後、側面からの映像を見て前後の位置を決めるため、搭乗操作の5割以下との回答を得た。ただし、さらに精度を求める作業はカメラ映像だけでは困難だろうとの回答もあり、作業内容によりその施工能力は大幅に変化する可能性がある。

次に、視覚以外の情報が必要であるかを調査したとこ



図-A.1 遠隔操作による導流堤設置工事



図-A.3 遠隔作業室及び高所カメラ



図-A.2 無人移動カメラ車



図-A.4 オペレータ作業状況

ろ、有珠山災害復旧現場においても初期段階は作業音を伝送したが、特に必要としなかったため現在では利用していないとのことであった。また作業中の手応えや建設機械の振動の情報についても調査したが、これらも特に必要としていないとの意見が多く、その理由として映像のブレなどでだいたいの状況は把握できているとのことであった。

このように陸上遠隔操作では操作状況の把握を映像からの情報に頼っており、逆に映像以外の情報は混乱を招くと考えられていた。遠隔操作では運転席からの映像と側面からの映像でほぼすべての作業を行っており、今後の技術開発はデータの伝送距離や映像情報の明瞭化に進むものと考えられる。

付録-B 水中バックホウの現状

近年における水中施工の機械化の事例として潜水士が搭乗して操作する水中バックホウの実用化が挙げられる。水中バックホウは平成6年に実海域実験においてその性能が実証されてから、港湾構造物の施工において活用されている。対象としているのは主に捨石荒均しであり、平成7年に沖縄開発庁沖縄総合事務局により行われた平良港パイロット工事の実績では、管理基準±30cmの捨石荒均しでの施工能力が 35.4 m³/h であった。同様の条件下において在来の作業方法と比較すれば、潜水士船1隻あたりの標準均し能力は 4.3 m³/h であることから、水中バックホウの施工能力は潜水士の約8倍であり、良好な能力といえる。なお、平良港は特に透明度が高いことに留意する必要がある。図-B.1に平良港パイロット事業における施工場所を、図-B.2に荒均し出来形を示す。

水中バックホウによる均し作業の特徴として、クローラやバケット背面による転圧作業が可能となる点があげられる。この作業は人力による施工では不可能である。また従来捨石投入時に不陸が発生した場合はガット船等のグラブで山崩しを行っていたが、水中バックホウにより石の掘削や移動が容易に行えることから均し作業前の不陸修正にも有効であると言える。また、潮流に対する能力は潜水士の施工限界が1ノットであったのに対し、水中バックホウでは2.2ノットでの施工も可能であった。このように工事の休止率の高い港湾に対しても有効であると言える。

現在実用化されている一般的な水中バックホウの仕様を表-B.1に示す。この水中バックホウは前述した平良港でのパイロット事業のために製造されたもので、バケット容量 0.55m³ 級のバックホウをベースとして水中作業

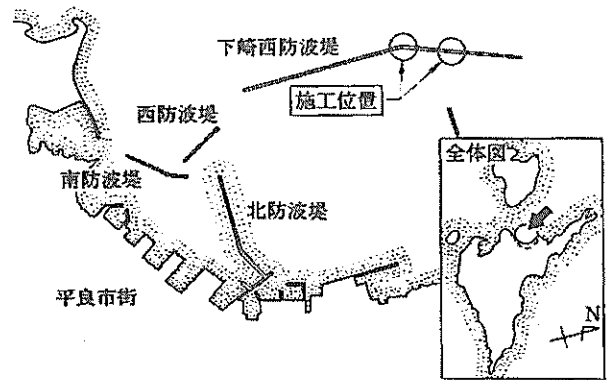


図-B.1 パイロット事業施工位置図

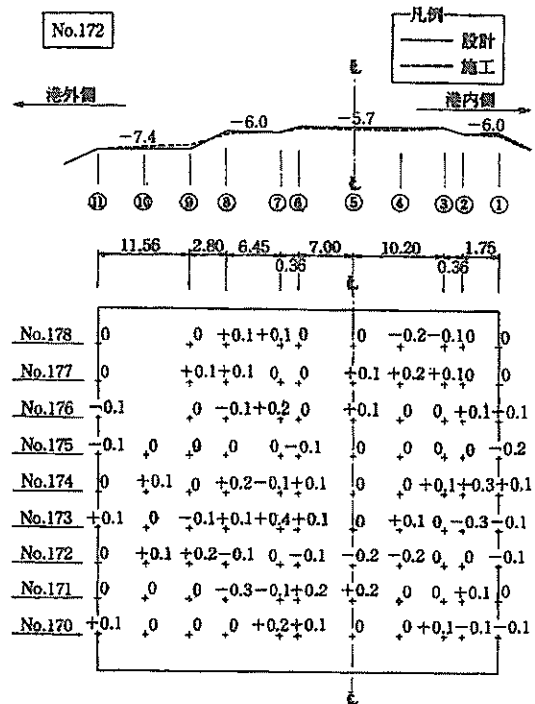


図-B.2 荒均し出来形 (単位: m)

表-B.1 水中バックホウ仕様

駆動方式	エンジン-油圧方式
動力	水冷ディーゼル方式
出力	62.3kW (85PS)
標準バケット	0.55m ³
主要本体寸法 (m)	全長: 7.70 幅: 2.49 高さ: 2.85
機体重量 (気中/水中)	13.2t / 9.0t
最大作業水深	-60m
最大作業半径	8.27m
水中登坂能力	1:2 (約26度)
付属装備品	緊急送気器具

用に改造したものである。水中では内燃機関など動力源の使用が困難であるため、動力源を支援船上に設置し、油圧ホースによって動作に必要な動力を供給している。

この方式は D-H(DIESEL-HYDRAULIC)方式と呼ばれている。機体の構造が単純であるが、油圧ホース長による圧力損失やホース重量が重くなる問題もあり、近年では電動油圧ポンプを機体に搭載し動力として電圧を供給する E-H(ELECTRO-HYDRAULIC)方式も出現している。

フロント軸等の動作機構については陸上機と同様に油圧シリンダを用いており、大幅な改造は必要とされていない。ただし作動油に関しては環境を考慮し生分解性のものを利用している。

ただし、この水中バックホウも操縦席に潜水士が乗り操縦することによって作業が行われている。したがって機械力が導入されたといっても完全に自動化されているわけではない。遠隔操作するためには前述の陸上工事のように作業区域全体を把握するための視点と、作業個所を視認するための視覚情報等をTVカメラによって取得し遠隔地へその情報を伝達することが必要となるが、水中においては濁りの影響でその情報が得られないためである。また有人水中バックホウも同様の視覚に関する問題から沖繩等の水中透明度の高い地域での利用にとどまっている。

付録-C 目標値設定の算定プロセス

C.1 水中作業機械のコスト的な評価

近年では市販の運輸省港湾請負工事積算基準に水中バックホウによる施工歩掛りが参考資料として掲載されている。たとえ参考資料でも基準ができたということで国の発注した工事だけでなく民間が発注する工事においても積算がしやすくなり、機械化の普及の足がかりになると考えられる。

しかし水中施工機械は市場の構築されている陸上機械と違い、施工機械自体の価格の他に防水対策や動力源の分離、それに伴う油圧システムの改造などが必要で陸上機の6.5倍程度の価格になってしまう。さらに遠隔操作を視野に入ればそのための改造費などが必要となるため、初期投資の金額は決して少なくない。だが潜水士作業における作業効率は潜水深度によって大幅に低下するため、潜水作業を伴わない遠隔操作型のバックホウは施工コスト上メリットを有するのではないかと考えた。

ここでは市販の積算基準に掲載されている歩掛りによって、潜水士・潜水士搭乗型水中バックホウの100㎡あたりの積算金額を算出する。また遠隔操作型水中バ

ックホウにおいても積算を行うことにより今後普及を進めるため必要となる目標値を示し、機械化施工のコスト的な面からみた普及の可能性を考察するものである。

C.2 捨石均し工事におけるケーススタディ

積算は市販されている「運輸省港湾土木請負工事積算基準」、「船舶及び機械器具等の損料算定基準」によって算出する。単価については「建設物価（建設物価調査会監修）」、及び一般に公表されている労務単価通達を参照した。

積算するにあたり現場条件を設定する必要があるが、無人化は海象条件の悪い海域での利用が求められているため、海象区分を太平洋沿岸とし、海象条件をやや悪いとした。また工事内容は防波堤設置のためのマウンド築造とした。表-C.1に本ケーススタディで利用する施工条件、海象条件、供用係数を記載する。供用係数とは港の荒天日数を表す係数であり、値が高ければ荒天日数は多くなる。つまり実際に作業を行う日数に加えて天候不順による船舶や船員の拘束日数を考慮するためである。

これらの条件を元に潜水士による作業金額、搭乗型水中バックホウによる作業金額を算出し、その作業金額と同等となる遠隔操作型水中バックホウの施工能力を求めるとした。

C.3 目標能力の設定

使用する機械の運転一日あたりの単価を算出する。使用する船舶及び機械類の供用一日あたりの損料は市販されている船舶及び機械器具等の損料算定基準を用いたが、水中バックホウの損料価格については記載されていないため、ヒアリングした結果を基に類推した。

供用一日あたりの損料率は

$$\left(\left(\frac{\text{償却費率}}{2} \right) / \text{標準使用年数} \right) + \text{年間管理費率} \\ \times (1 / \text{年間供用日数})$$

と定められている。水中バックホウの損料計算条件を表-C.4と仮定し、これらを上式にあてはめると

$$\begin{aligned} \text{損料率} &= (0.86 / (7.2 \times 2) + 0.09) \times (1 / 110) \\ &= (0.05972 + 0.09) / 110 \\ &= 0.001361 \end{aligned}$$

となり、損料率は0.1361%となる。供用一日あたりの損料は市場価格に損料率を乗算したものであるため¥108,889.-となる。

表-C.1 ケーススタディにおける条件

工事現場	A港
工事種類	湾口防波堤基礎マウンド均し
工事対象	外郭施設
均し精度	荒均し(±30cm)
割石質量	200kg/個
施工規模	300㎡~1000㎡
海象区分	太平洋沿岸
海象条件	やや悪い
透視度	~2m/2~4m/4m~
荒天日数	217~240日
船舶供用係数	3.2
船員供用係数	2.15

表-C.2 水中バックホウ損料算出条件

基礎価格	¥80,000,000.-	ヒアリングより
遠隔操作型改造費	¥20,000,000.-	予想価格
標準使用年数	7.2年	陸上機と同等
年間供用日数	110日	陸上機の1/2
維持修理率	45%	陸上機と同等
年間管理費率	9%	〃
償却費率	86%	〃

表-C.3 燃料単価(平成12年度)

名称	単価	備考
重油A	¥38.-	1リッター
軽油	¥73.-	1リッター

表-C.4 労務単価(平成12年度)

名称	労務単価	備考
潜水世話役	¥40,000.-	
潜水士	¥34,100.-	-10mまで
〃	¥35,000.-	-10m以上
連絡員	¥22,400.-	-10mまで
〃	¥24,200.-	-20mまで
〃	¥25,000.-	-30mまで
送気員	¥21,600.-	
船団長	¥26,300.-	
高級船員	¥48,000.-	
普通船員	¥35,820.-	

表-C.5 船舶・機械損料(平成12年度)

名称	損料
潜水士船(潜水士1人)	¥9,170.-
クレーンつき台船(鋼50t)	¥46,700.-
引き船(鋼450ps)	¥28,300.-
水中バックホウ(搭乗型)	¥108,889.-
水中バックホウ(遠隔操作型)	¥68,100.-

表-C.6 船舶・機械単価(運転一日あたり)

名称	単価	備考
潜水士船	¥224,369	-10mまで
〃	¥230,174	-20mまで
〃	¥231,894	-30mまで
クレーン付台船	¥517,468	鋼50t
引き船	¥381,649	鋼450ps
水中バックホウ	¥353,335	潜水士搭乗型
水中バックホウ	¥222,811	遠隔操作型

均し作業に関連する船舶・機械損料を表-C.5に載せる。また労働者に関する単価については「平成12年度三省共通労務単価通達」を、燃料の単価については「建設物価」の値を準用した。

表-C.6は船舶・機械の損料価格に必要な燃料単価や労務単価を加え供用係数を乗算したもので、運転1日あたりの単価である。なお各船舶・機械の単価基準は運輸省港湾請負工事積算基準を用いた。

捨石均しの作業面積は、作業の精度の他に海象条件や透視度、水深などの諸条件によって左右される。これらは補正係数として設定されており、潜水士船による施工の場合、以下の計算式により算出する。

$$A = a_i \times (1.00 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6) \times E_7 \times E_8 \times T$$

A : 一日あたりの作業面積

a_i : $4.30 \text{ m}^2 / \text{h}$ (標準均し面積/精度±30cm)

E_1 : 0.00 (割石質量区分補正係数/200kg未満)

E_2 : 0.00 (海域区分補正係数/太平洋沿岸)

E_3 : 0.00 (施設区分補正係数/外郭施設)

E_4 : -0.05 (海象条件区分補正係数/やや悪い)

E_5 : 0.00 (透視度区分補正係数/約1m)

E_6 : -0.05 (規模補正係数/荒均し300~1000㎡)

E_7 : 1.00 (潮待ち区分能力係数/潮待ち部)

E_8 : 0.86 (水深区分能力係数)

[-10mまで : 0.86]

[-10~-15m : 0.75]

[-15~-20m : 0.67]

[-20~-25m : 0.56]

[-25~-30m : 0.47]

T : 6 h (運転時間)

水中バックホウにおいても潜水士船による施工の場合と同様な計算式が参考資料として存在する。次式は水中バックホウによる施工の場合の捨石均し面積計算式である。

$$A = a_i \times (1.00 + E1 + E2 + E3 + E4) \times T$$

A : 一日あたりの作業面積

a_i : 29.00m²/h (標準均し面積/精度±30cm)

E1 : 0.00 (割石質量区分補正係数/200kg未満)

E2 : -0.05 (海象条件区分補正係数/やや悪い)

E3 : -0.10 (透視度区分補正係数/2m未満)

: 0.00 (2~4m未満)

: 1.00 (4m以上)

E4 : -0.05 (施工規模区分補正係数/2000m²未満)

T : 5h (運転時間)

潜水士船の場合と異なる点は「海域区分」「施設区分」「水深区分能力」に関する係数が存在せず、これは水中バックホウが施工条件や水深によって影響を受けにくいことを示している。しかし透明度区分係数のしきい値が厳しくなっており、悪いと分類されるのが潜水士船の場合視界1m未満となっているのに対し水中バックホウでは2m未満、4m未満では「普通」となっている。

今回のケーススタディでは透視度を2m未満、2~4m, 4m以上とし、潜水士搭乗型水中バックホウの100m²あたりの作業金額を求め、遠隔操作型水中バックホウの一日あたりの作業面積の目標設定は、搭乗型水中バックホウの作業金額と同等になる単位時間当たりの施工面積を逆算することで求めることとした。

表-C.7 は1日あたりの作業面積の比較表、表-C.8 は100m²あたりの作業金額を比較したものである。

潜水士搭乗型水中バックホウでの一日の作業面積は一定であるが、これは積算基準上水深により短縮されるオペレータの潜水時間の影響を人数を増やすことで確保しているためである。

図-C.1に100m²あたりの作業金額をグラフ化したものを示す。この二つの工法は潜水士の作業水深が作業金額に影響しており、水深が大きい場合、潜水士の歩掛りの少ない搭乗型水中バックホウが有利となっている。

次に遠隔操作型水中バックホウの施工能力目標値を定める。現在、潜水士搭乗操作で利用されている状況を考えると、透明度が高く、比較的水深の深い場所で利用されており、普及のためにはその場合と同程度の施工能力が必要であると考えられる。

ここで-15m以深、透明度4m以上の場合の潜水士搭乗操作による作業金額は約120万円である。遠隔操作型へ

表-C.7 一日あたりの作業面積 (m²)

水深	潜水士	潜水士搭乗バックホウ		
	1~2m	~2m	2~4m	4m~
-10m	19.97	116.0	131.5	145.0
-15m	17.42	↑	↑	↑
-20m	15.56	↑	↑	↑
-25m	13.00	↑	↑	↑
-30m	10.91	↑	↑	↑

表-C.8 100m²あたりの作業金額比較 (円)

水深	潜水士	潜水士搭乗バックホウ		
	1~2m	~2m	2~4m	4m~
-10m	1,123,575	1,289,501	1,146,223	1,031,601
-15m	1,321,700	1,492,931	1,327,050	1,194,345
-20m	1,479,515	1,492,931	1,327,050	1,194,345
-25m	1,783,361	1,695,806	1,507,383	1,356,644
-30m	2,124,856	1,695,806	1,507,383	1,356,644

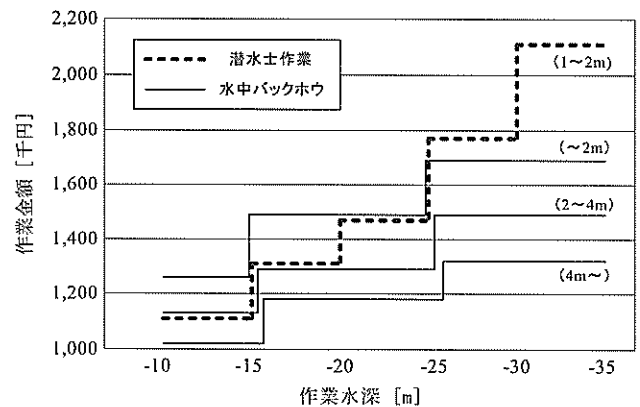


図-C.1 100m²あたりの作業金額比較

の改造費を2,000万円と仮定して損料を算出すると、供用一日あたり損料率は0.1361%、供用一日あたりの損料は¥136,100.-であり、100m²を作業するのに必要な作業金額が120万円となるよう逆算すると、一日あたりの作業面積は132m²となる。また1日の作業時間を5時間とすると、単位時間当たりの作業面積は26.4m²となる。よって遠隔操作型水中バックホウの施工能力の目標値を26.4m²/hと定めた。

H16.9.30

時刻		作業内容		作業場所					
		水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連						
7:30									
8:00			※ 梅本氏 到着が運延で夕方になるため、突発範囲事前測量は明日に延期						
8:30									
9:00									
9:30									
10:00									
10:30									
11:00									
11:30									
12:00									
12:30									
13:00									
13:30									
14:00									
14:30									
15:00									
15:30									
16:00									
16:30									
17:00									
17:30									
18:00									
実験担当要員		使用機械・船舶		作業人員		作業時間 [h.m]		特記事項	
実験担当	港湾空港技術研究所	佐伯-水中BH	ビッグクラブ3号機 (汎用潜水工業)	OP①(船長)	小野	曳航		◎ 遠隔操作機器 不具合	
				OP②	渋谷	丁張り		・ パケットの磁歪センサ(ストロークセンサ)の電圧値が「10V」になっている → 内部の端子台で断線か?	
				送気員	藤井	水中BH投入		⇒ シリンダ内蔵ストロークセンサの値を読み取るように変更 → ロードセル1の不調	
				連絡員	中坪	水中BH揚取		→ 外箱コネクタの接触不良か? ⇒ コネクタの端子をワイヤブラシで磨く	
				第七びきし(橋水建設)船長	蓮津	搭乗均し			
				クレーンOP	1	遠隔均し			
	筑波大学			船員	3	データ入出力			
				船員		出来形計測			
	佐伯建設工業㈱			船員		休止(休憩)	1:00		
				船員		休止(機影)			
				船員		休止(故障)			
				船長	江越	休止(その他)			
				送気員	3	出来形 [m]			
				送気員	3	搭乗均し			
				送気員	3	搭乗均し 累計			
				運転手	1	遠隔均し			
				20t中低床トレーラ		遠隔均し 累計			
				4tアオリ付平臺車	1	遠隔均し 累計			
合計				合計	21	合計			

H16.10.1

時刻	作業内容		作業時間 [h:m]	待記事項
	水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連		
7:30				
8:00				
8:30				
9:00	08:15~12:00 SBL取付架台製作・溶接 EchoScope取付架台製作・溶接 SBL/EchoScope 閉鎖/組立 水圧射設置 掘削機設置 方位射設置 ケーブル取り直し	08:15~12:00 実験範囲事前測量 →水中水準測量装置故障の為、途中まで(7割程度)測量済み 水中水準測量装置故障		
9:30				
10:00				
10:30				
11:00				
11:30				
12:00				
12:30				
13:00				
13:30	13:00~17:00 BC3 炭回廊水中カメラ設置 台船安全対策(バリケード設置/看板設置/ケーブル養生)	13:00~15:00 実験範囲 ビデオ撮影/写真撮影		
14:00				
14:30				
15:00				
15:30				
16:00				
16:30				
17:00				
17:30				
18:00				

実験担当者	使用機材・船舶		作業人員		作業時間 [h:m]	待記事項
	佐伯-水中BH	ビツクワブ3号機 (渋谷潜水工業)	OP①(船長)	OP②		
平林			小野	奥航		◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ EchoScope 本体電源供給Box故障 → リレースイッチが原因 ⇒ スイッチング電源に100V直付け
筑波大学	支援台船	第七むさし(崎永建設)船長	送気員 連絡員	中野 藤井 中野		
佐伯建設工業附	奥航船	ひで丸(崎永建設)	クレーンOP	1		◎ 水中水準測量装置 故障 ⇒ 残りの測量箇所は、測量済み箇所と同様の起伏とする
	揚越船	かえで(崎永建設)	船員	3		
	審判船	真幸丸(個人)	船員		3:45	
	交通船	おしどり(個人)	船員		1:00	
	潜水士船	3隻(石見海事)	船長	江越	2:00	
			送気員	3		
			送気員	3		
			送気員	3		
合計		合計		19		

石材規格	5~100 kg/個	均し精度	± 30 cm

時刻		作業内容		作業場所	
		水中バックホウ 関連	運搬機 関連		
7:30					
8:00		08:00~08:15 朝礼			
8:30					
9:00		08:15~12:00 EchoScope アクチュエータ動作確認 BC3 ステック一掃り付け			
9:30					
10:00		EchoScope アクチュエータ動作不良 右旋回/右クローラ動作不良 コネクタ損傷			
10:30					
11:00					
11:30					
12:00					
12:30		12:00~13:00 昼休み			
13:00					
13:30		13:00~17:00 BC3 運転席水中カメラ設置 追加ケーブルまどか(通達/エアホース/カメラ/真空研式SBL) バックホウ最終動作確認(右旋回・右クローラ不調) 水圧計海水補正(海水に投入1mか55m) 前水Box シリコン材によるシーリング ロードセル保護紙剥がれ			
14:00					
14:30					
15:00					
15:30					
16:00					
16:30					
17:00					
17:30					
18:00					
実験担当者		使用機械・船舶		作業時間 [h:m]	
平林	佐伯・水中BH	ビックラプ3号機 (送金潜水工機)	作業人員	曳航	待記事項
			小野	工張り	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ EchoScope アクチュエータ動作不具合 → アクチュエータ可動電源 容量不足 ⇒ SBL用電源代置えで作動
			渋谷	水中BH投入	・ EchoScope 本体コネクタ損傷 → 亀裂部内部にサビがあった為、元から亀裂が入っていたと考えられる ⇒ エプロンテープ/ビニールテープで養生
			藤井	水中BH揚取	
			中坪	搭乗均し	
			道津	遠隔均し	
			1	データ入出力	
			3	出来形計測	
				休止(休憩)	◎ BC3 不具合 ・ 右旋回/右クローラ動作不良 → 現時点では、原因不明(後に、旋回モータ不良と判明) ⇒ 現状のまま使用
				休止(故障)	
				休止(その他)	
			江越	出来形 [m]	
			3	搭乗均し	
			3	搭乗均し 累計	
			3	搭乗均し 累計	
				遠隔均し	
				遠隔均し 累計	
合計	合計	合計	合計	合計	
4			19		

H16.10.4

時刻		作業内容		作業場所	
		水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連		
7:30	07:30~07:45 朝礼				
8:00	07:50~09:00 岸壁離岸、曳航、現場係船				
9:00	09:00~09:20 BC3投入/構底打合せ		09:00~09:20 SBL/EchoScope 設置		
9:30			09:20~10:30 台船位置 測量 EchoScope マウンド地形計測		
10:00			10:30~12:00 EchoScope マウンド地形計測 (レベルにオフセットが入力されているため、目測でレベルを合わせた)		
10:30					
11:00					
11:30					
12:00					
12:30	12:00~13:00 昼休み				
13:00					
13:30	13:45~14:00 潜水機、BC3投入位置/マウンド地形確認		13:00~14:00 EchoScope マウンド地形計測		
14:00	14:00~14:15 BC3 投入				
14:30	14:15~15:45 BC3 捲揚均し(港内側)・右旋回動作不良 マントバルブからのエア漏れ クローラ動作不良		水圧計の補正 ロードセル基礎 磁気方位計故障		
15:00					
15:30					
16:00	16:00~16:15 BC3捲揚		15:45~16:00 SBL/EchoScope 撤収		
16:15	16:15~16:30 右船捲揚		10:30~21:00 プログラム修正 防水Boxゴムシートがはみ出る(上蓋に5%の水圧)		
16:30			21:00~22:00 磁気方位計及び管の位置修正 防水Boxリコンシール		
17:00	16:30~17:30 BC3水洗い、曳航、着岸、係留				
17:30					
18:00	17:30~18:30 BC3 日立建機修理 → 後日修理				
					石材規格 5~100 kg/個 均し精度 ± 30 cm

実施担当者	実施担当者所属	使用機械・船舶	作業人員	作業時間 [h:m]		特記事項
				乗船	下り	
加藤	港湾港湾技術研究所	佐伯-水中BH ビッククワズ3号機 (渋谷潜水工業)	小野	2:25	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ 各計測機器不良によるプログラム修正 → プログラム修正内容 ⇒ ロードセル1の巻線、磁気方位計を削除しジャイロデータのみの使用。 (ロードセル1故障)	
平林			渋谷	0:15		
田中			藤井	0:15		
内海			中坪	1:30		
白井		支保台船 第七むさし(崎永建設) 船長	連津	3:40		
			クレーンOP 1			
筑波大学			船員 1		◎ BC3 不具合 ・ 右旋回/右クローラ動作不良 → 旋回モータ不良、旋回ギア不良 ⇒ 代替え旋回モータがないため、実験終了後に交換修理、現状のまま使用	
雨谷		曳航船 ひで丸(崎永建設)	船員 1			
熊		揚船船 かえで(崎永建設)	船員 1	1:00		
佐伯建設工業㈱		警戒船 真幸丸(個人)	船員 2			
		交通船 おしどり(個人)	船員 1	4:30		
アドバイザ	海洋工学研究所	第七むさし(石見海軍) 船長	江越			
EchoScope	住友海洋開発					
				出茶形 [m]		
				捲揚均し 75.0 大巻均し		
				捲揚均し 累計 0.0		
				遠隔均し		
				遠隔均し 累計		
合計	12	合計	13	合計	0.0	

H16.10.5

時刻		作業内容		作業場所	
		水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連		
7:30	07:15~08:00	曳船船で現場海域天候確認 → 10:30に再度確認			
8:00	08:00~08:15	朝礼			
8:30	08:15~10:00	BC3 チェンソーバルブ修理	08:30~10:00 防水Boxコンシールド		
9:00					
9:30					
10:00					
10:30	10:30~11:00	交通船で現場海域天候確認 → 中止決定	10:00~10:30 Masterプログラム修正(移動モード時のエラー修正)		
11:00					
11:30					
12:00	12:00~13:00	昼休み	11:00~12:00 実験工程 調整打合せ		
12:30					
13:00	13:00~14:30	BC3 チェンソーバルブ修理			
13:30					
14:00					
14:30					
15:00					
15:30	14:30~17:00		遠隔操作 教習 ハブネット制御で共振あり→デザイン下げ 定期による水平動作		
16:00					
16:30					
17:00					
17:30					
18:00					
実験担当者		使用機材・船舶		作業時間 [h:m]	
加藤	佐伯-水中BH	ビッグクラブ3号機 (渋谷潜水工業)	作業人員	曳船	◎ 荒天のため実験中止
平林			OP①(船長)	丁張り	
田中			OP②	水中BH投入	
内海			送気員	水中BH揚収	
白井			遠隔員	搭乗均し	
			第七むさし(崎永建設)船長	通隔均し	
			クレーンOP	データ入出力	
筑波大学	矢野		船員	出来形計測	
	両谷	ひで丸(崎永建設)	船員	休止(休憩)	1:00
	熊	かえで(崎永建設)	船員	休止(休憩)	
佐伯建設工業㈱	山本	真幸丸(個人)	船員	休止(故障)	3:45
	梅本	おしどり(個人)	船員	休止(その他)	2:30
		第七むさし(石見海事)	船長	出来形 [m]	
				搭乗均し	
				搭乗均し累計	
				通隔均し	
				通隔均し累計	
合計	合計	合計	合計	合計	
	10		13		

時刻		作業内容		作業場所		
		水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連	作業場所		
7:30						
8:00	07:45~08:00	朝礼				
8:30	08:00~08:50	岸壁離岸、曳航、現場探検				
9:00	09:13~09:30	BC3投入				
9:30	09:30~10:50	BC3 搭乗均し(遠隔操作均し用足場整形)	09:00~09:15			SBL/EchoScope 設置
10:00	10:50~10:55	丁張り手直し				
10:30	10:55~11:11	潜水士派遣				
11:00			10:00~11:00			整備事務所 安全バロール
11:30			11:15~11:40			遠隔操作準備
12:00			11:40~12:30			BC3 遠隔均し
12:30						
13:00	12:00~13:15	昼休み				
13:30	13:15~13:20	潜水準備				
13:30	13:20~13:43	潜水作業(丁張り目印設置)				
13:30	13:43~13:45	浮上				
14:00			13:45~14:00	遠隔操作準備		
14:30			14:00~15:45	BC3 遠隔均し		
15:00						
15:30			16:00~16:30	EchoScope マウンド地形計測		
16:00	15:45~16:00	BC3繰取	16:30~16:40	SBL/EchoScope 撤収		
16:30						
17:00	16:40~17:40	BC3水洗い、曳航、着岸、係留				
17:30						
18:00			17:40~19:00	プログラム修正		

実験担当者	実験担当者	実験担当者		使用機材・船舶	作業人員	作業時間 [h:m]	特記事項
		実験担当者	実験担当者				
加藤	平林	佐伯-水中BH	OP①(離基)	ピッグラフ3号機	小野	1:50	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ 各計測機器不良によるプログラム修正 → プログラム修正内容 ・ Truepointの値を見る、旋回体とクローラの方位差はモニタで確認 ・ SBLデータ不良 → トランスポンダ表示位置があらこちらに飛ぶ ⇒ 丁張りに@2mごとにロープは付け、水中カメラで移動距離を判定 ◎ BC3 不具合 ・ プレーキ旋回不良 → 旋回モータ不良で、勝手に右旋回する ⇒ 代替え旋回モータがないため、実験終了後に交換修理、現状のまま使用
	田中		OP②	(渋谷潜水工業)	渋谷	0:28	
	内海		送気員		藤井	0:15	
	白井	支援台船	連絡員	第七むさし(崎永建設)	中坪	0:15	
			隊長		道津	1:20	
			クレーンOP		1	2:35	
	筑波大学		船員		1	0:30	
			船員		1	1:15	
	佐伯建設工業㈱		船員		1	1:15	
			船員		2	1:20	
			船員		1	1:20	
			船員		江越		
			隊長		江越		
						出菜形 [m]	
						搭乗均し 0.0	
						搭乗均し累計 0.0	
						遠隔均し 4.0 出菜形?	
						遠隔均し累計 0.0	
						合計 0.0	
合計	10			合計	13		

H16.10.7

時刻	作業内容		作業場所
	水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連	
7:30	07:45~08:00 朝礼		
8:00			
8:30	08:00~09:00 岸壁掘削, 曳航, 現場係船		
9:00	09:00~09:30 発電機故障 → エア投入 ⇒ エア抜き		
9:30		09:00~09:10 SBL/EchoScope 設置 09:10~09:30 SBL トラポイント④でテスト → トラポイント④で位置計測 09:40~10:45 EchoScope マウンド地形計測	
10:30			
11:00	10:45~10:50 台船移動		
11:30	10:50~11:00 BC3 投入		
12:00	11:00~11:22 BC3 搭乗操作により遠隔均し位置に移動	11:25~11:50 遠隔操作準備 11:50~12:20 BC3 遠隔均し	
12:30	12:20~13:15 昼休み		
13:30		13:15~13:35 BC3 遠隔均し 13:35~14:20 プログラム修正 14:20~14:40 BC3 遠隔均し	
14:00			
14:30			
15:00	14:49~14:56 潜水士 マウンド地形確認	15:00~15:30 社内 安全小ロール	
15:30		15:00~15:30 BC3 遠隔均し 15:30~15:40 プログラム修正 15:40~15:50 BC3 遠隔均し 15:50~15:57 SBL/EchoScope 撤収	
16:00			
16:30	16:00~16:20 BC3搭収/水洗い		
17:00	16:20~17:25 曳航, 荷役, 係留	16:30~17:00 防水Boxシリコンシール	
17:30			
18:00			

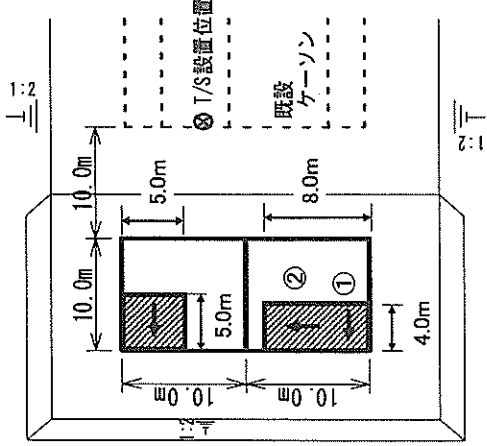
実験担当者	実験担当者		作業人員	作業時間 [h:m]	特記事項
	実験担当者	実験担当者			
加藤	平林	OP①(船長)	小野	2:05	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ 方位針(TP)の値が180度付近で飛ぶ → 平均化ルーチン削除 ・ TPの値が不安定(ブームの影響?) → サブルーチン復帰, サブルーチン修正 ・ 方位針(TP)の値が飛ぶ現象が収まらず → マイナスの値の場合で条件分け ・ 巡回操作方法を改善 → 巡回動作がスムーズに → 作業が可能に ・ SBL トランスポンダとTrue Pointの設置位置を変更 ・ 水位計を水圧を抽出しやすい箇所に変更した。(トランスポンダの下) ・ SBL トランスポンダ表示位置が明らかに飛ぶ → トランスポンダ②&④ 浸水によりショート → 吊下げ式カメラと遠隔操作カメラにより, 水中位置を推移 ◎ BC3 不具合 ・ プレーキ旋回不良 → 旋回モータ不良で, 勝手に右旋回する ⇒ 代替え旋回モータがないため, 実験終了後に交換修理, 現状のまま使用 ◎ その他 白井氏, 本日で実験終了。明日は事務所で実験機器発送準備し, 発送後帰路。
平林	田中	OP②	渋谷		
田中	内海	送風員	藤井		
内海	白井	運船員	中塚		
白井		第七むさし(崎永建設)船長	道津		
		クレーン-OP	1		
筑波大学		船員	1		
		船員	1		
佐伯建設工業㈱		船員	1		
		船員	2		
		船員	1		
		船長	江越		
		合計	13		

実験担当者	使用機材, 船舶		作業時間 [h:m]	特記事項
	佐伯-水中BH	ビッグクラブ3号機 (渋谷潜水工業)		
加藤	身航船	ひで丸(崎永建設)	2:05	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ 方位針(TP)の値が180度付近で飛ぶ → 平均化ルーチン削除 ・ TPの値が不安定(ブームの影響?) → サブルーチン復帰, サブルーチン修正 ・ 方位針(TP)の値が飛ぶ現象が収まらず → マイナスの値の場合で条件分け ・ 巡回操作方法を改善 → 巡回動作がスムーズに → 作業が可能に ・ SBL トランスポンダとTrue Pointの設置位置を変更 ・ 水位計を水圧を抽出しやすい箇所に変更した。(トランスポンダの下) ・ SBL トランスポンダ表示位置が明らかに飛ぶ → トランスポンダ②&④ 浸水によりショート → 吊下げ式カメラと遠隔操作カメラにより, 水中位置を推移 ◎ BC3 不具合 ・ プレーキ旋回不良 → 旋回モータ不良で, 勝手に右旋回する ⇒ 代替え旋回モータがないため, 実験終了後に交換修理, 現状のまま使用 ◎ その他 白井氏, 本日で実験終了。明日は事務所で実験機器発送準備し, 発送後帰路。
平林	身航船	ひで丸(崎永建設)		
田中	身航船	ひで丸(崎永建設)		
内海	身航船	ひで丸(崎永建設)		
白井	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
筑波大学	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
佐伯建設工業㈱	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
	身航船	ひで丸(崎永建設)		
合計	8	合計	13	

時刻		作業内容	
		水中バックホウ 関連	遠隔操作 関連
7:30	07:15~07:30	朝礼	
8:00	07:30~08:20	岸壁離岸、曳航、現場係船	
8:30			08:20~08:30 SBL/EchoScope 設置 08:30~09:15 EchoScope マウンド地形計測
9:00			
9:30	09:15~09:25	BC3 投入	
10:00	09:25~09:45	BC3 搭載操作により遠隔均し位置に移動、扇型状況確認	
10:30	09:45~09:48	潜水士着圧	
11:00			10:00~10:35 遠隔操作 ピチオ撮影 10:35~11:15 遠隔操作 ジョイスティック実験 Master描画されず
11:30	11:15~11:35	BC3 搭載均し(港内側:5m×5m)	
12:00	11:35~12:05	BC3 搭載操作により遠隔均し位置に移動、足場整形	
12:30	12:05~12:20	潜水士着圧	
13:00	12:20~13:35	昼休み	
13:30			
14:00			13:35~14:10 BC3 遠隔均し 14:10~14:30 プログラム修正 潮位データの更新がMaster画面に更新されないトラブル
14:30			14:30~15:30 BC3 遠隔均し
15:00			
15:30	15:30~15:55	BC3揚取/水洗い	
16:00			15:55~16:25 EchoScope マウンド地形計測 16:25~16:30 SBL/EchoScope 撤収 16:30~17:15 水中ポンプ/通信などのケーブルを油圧ホースから分岐
16:30			
17:00	16:30~17:35	曳航、着岸、係留	
17:30			
18:00			

夜 長崎市内 実験終了打ち上げ

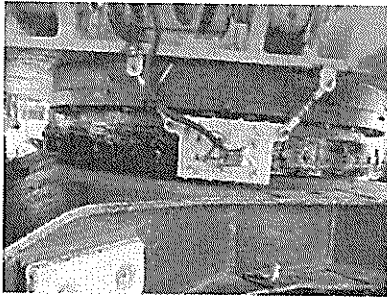
作業場所

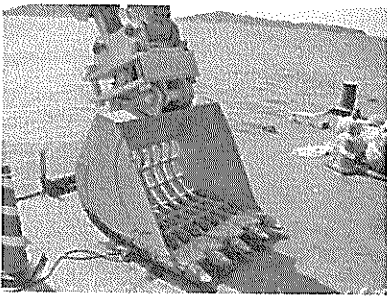


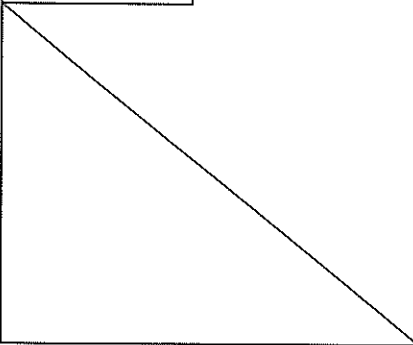
石材規格 5~100 kg/個 均し精度 ± 30 cm


実験担当者	実験担当者所属	使用機材・船舶	作業人員	作業時間 [h:m]	特記事項	
					乗務員	乗務員
加藤 平林	港湾空港技術研究所	佐伯-水中BH ビッグクラブ3号機 (渋谷潜水工業)	OP①(船長)	小野	乗航 1:55	◎ 遠隔操作機器 不具合 ・ ジョイスティック実験時、Master 描画されない → プログラム修正方法が不明 ⇒ Database モニタを見て操作 ・ 潮位データの変更がMaster画面に更新されないトラブル → int型とfloat型によるものか? ⇒ Slave側で水圧計データ固定(潮位データによる修正無し)
			OP②	渋谷	丁張り	
			送気員	藤井	水中BH投入 0:10	
			運船員	中坪	水中BH揚収 0:25	
			第七むさし(船永建設)船長	連津	搭載均し 0:20	
			クレーンOP	1	遠隔均し 1:35	
			船員	1	データ入出力 1:15	
			船員	1	出来形計測	
			船員	1	休止(休憩) 1:15	
			真幸丸(個人)	2	休止(撮影) 1:15	
			おしどり(個人)	1	休止(故障) 0:20	
			第七むさし(石見海軍)船長	江越	休止(その他)	
			合計	5	合計	

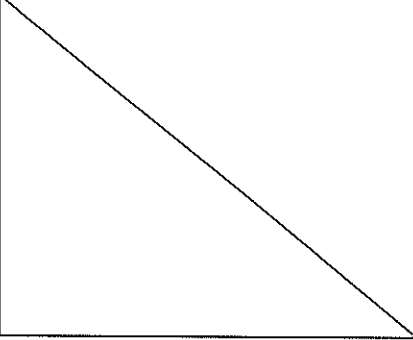
付録 E 実験時の不具合

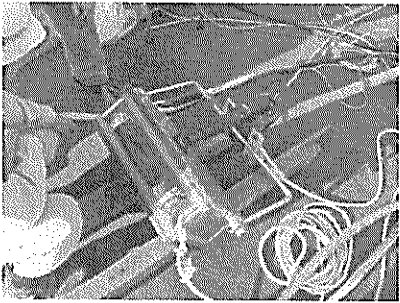
9月30日		発生箇所	水中バックホウ
写 真 	機材名称	クローラ方位計測装置	
	内 容	クローラ方位角のデータが不安定	
	原 因	旋回体のガタ, ドグレールの取り付け不良	
	対 策	カメラによる角度認識	

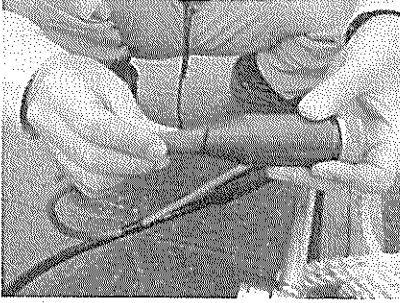
9月30日		発生箇所	水中バックホウ
写 真 	機材名称	反力センサ(1)	
	内 容	反応無し	
	原 因	水中コネクタ部の接触不良	
	対 策	コンタクト部の清掃	

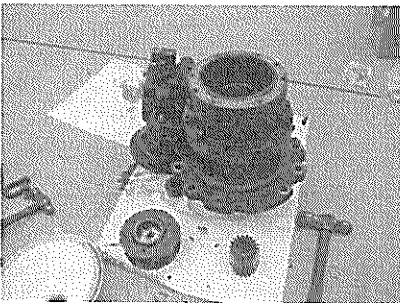
10月 1日		発生箇所	潜水土士船
写 真 	機材名称	水中水準測量器	
	内 容	測量データが表示されない	
	原 因	故障	
	対 策	メーカー修理	

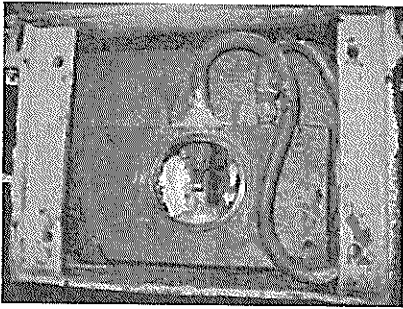
10月 1日		発生箇所	作業台船
写 真 	機材名称	EchoScope(1)	
	内 容	起動しない	
	原 因	電源故障	
	対 策	検査したところスイッチ部の故障が判明. 分解し電源とEchoscopeの配線を直結した.	

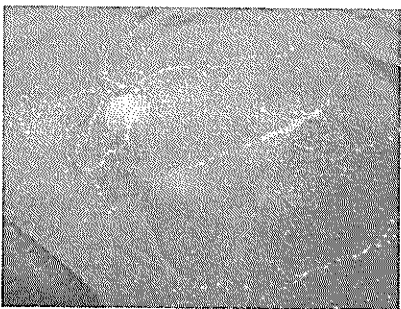
10月 2日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	走行レバー(1)
		内 容	右走行レバーが中立に戻らない
		原 因	軸部分の作動不良
		対 策	分解・整備


10月 2日		発生箇所	作業台船
写 真		機材名称	EchoScope(2)
		内 容	首振り用アクチュエータの動作不良
		原 因	アクチュエータ用電源の容量不足
		対 策	別電源から供給

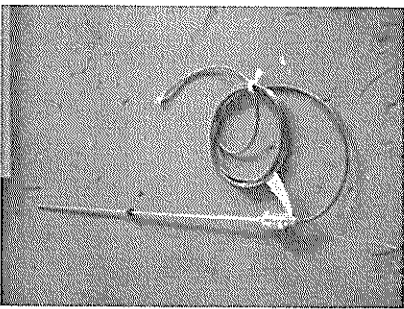
10月 2日		発生箇所	作業台船
写 真		機材名称	EchoScope(3)
		内 容	光ファイバコネクタPVC部の亀裂
		原 因	劣化, および, 無理な荷重
		対 策	データは取得できたためプチルテープ補修のみ

10月 2日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	旋回油圧モータ
		内 容	旋回しにくい, ブレーキが利かない
		原 因	原因不明
		対 策	分解検査したが, 原因箇所は特定できず. 現地での修理は不可能と判断し, そのまま実験続行.

10月 4日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	デマンドバルブ
		内 容	大量のエア漏れにより超音波機器のデータが不安定になる
		原 因	ダイアフラム部の破損
		対 策	パテによる補修

10月 4日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	走行レバー(2)
		内 容	大量のエア漏れにより超音波機器のデータが不安定になる
		原 因	均圧室からのエア漏れ
		対 策	不具合箇所を特定し、パテによる補修

10月 4日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	反力センサ(2)
		内 容	反応無し
		原 因	コネクタ内部での断線の可能性あり (コンタクト部を清掃したが、反応しない)
		対 策	反対側のLoadcellデータのみを利用するようプログラム修正

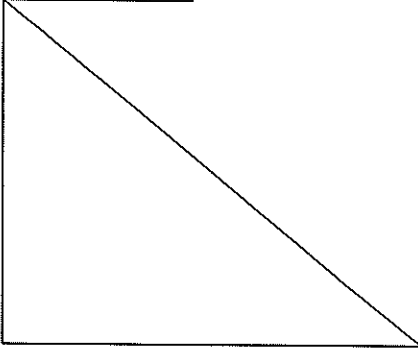
10月 4日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	バケットストロークセンサ
		内 容	反応無し
		原 因	センサ内部に浸水の可能性
		対 策	予備のストロークセンサに変更

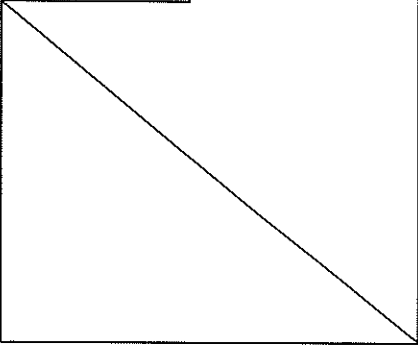
10月 4日		発生箇所	制御室
写 真	/	機材名称	Masterプログラム (CG描画)
		内 容	
		軌跡表示が短い	
		原 因	
		無し	
		対 策	30秒間の軌跡を表示するようプログラム修正

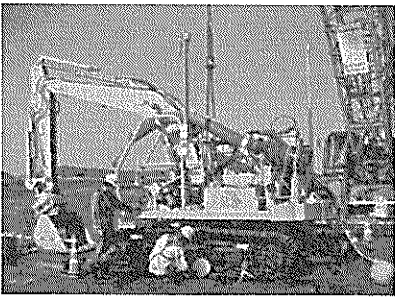
10月 4日		発生箇所	水中バックホウ
写 真	/	機材名称	磁気方位計(1)
		内 容	
		反応無し	
		原 因	
		センサ内部に浸水の可能性	
		対 策	ジャイロデータを利用するようプログラム修正

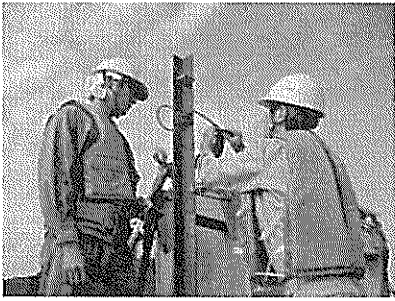
10月 4日		発生箇所	制御室
写 真	/	機材名称	MasterPC
		内 容	
		サスペンド状態から復旧せず	
		原 因	
		PCI-DA出力中に電源が落ちたためOSにダメージ	
		対 策	予備品に交換


10月 6日		発生箇所	作業台船上
写 真	/	機材名称	SBL(1)
		内 容	
		位置データが不安定	
		原 因	
		バックホウからのエア漏れ	
		対 策	特異点を削除し、30秒間の平均を表示するようプログラム修正

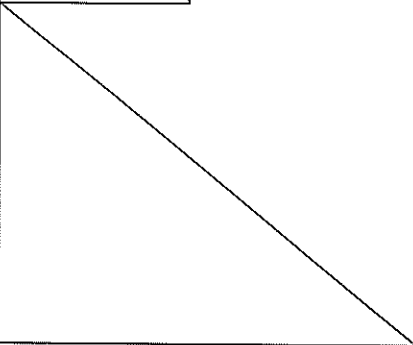
10月 6日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	磁気方位計(2)
		内 容	
		無視できない累積誤差が発生	
		原 因	
		ジャイロデータを利用したため	
対 策		予備の磁気方位計を設置	

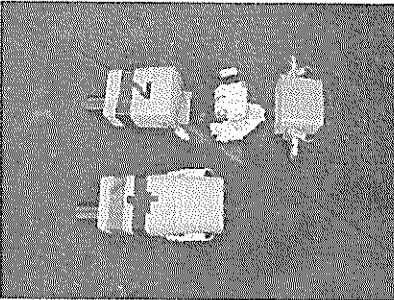
10月 6日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	Slaveプログラム (データ取得)
		内 容	
		0度をまたぐと値が乱れる	
		原 因	
		予備の磁気方位計が同じものでは無かったため、出力特性が異なっていた。	
対 策		データ平均化プログラムの削除	

10月 7日		発生箇所	水中バックホウ
写 真		機材名称	磁気方位計(3)
		内 容	
		データが不安定	
		原 因	
		予備の磁気方位計取り付け位置が低く、磁性体であるブームにより方位データに影響が発生	
対 策		取り付け位置の変更	

10月 7日		発生箇所	作業台船上
写 真		機材名称	SBL(2)
		内 容	
		位置データが不安定	
		原 因	
		乱反射の影響の可能性	
対 策		取り付け位置の変更	

10月 7日		発生箇所	作業台船上	
写 真 	写 真	機材名称	発電機	
		内 容	発電機のエンジンが停止	
		原 因	燃料ポンプの詰まりorエア噛み	
		対 策	分解整備	

10月 8日		発生箇所	制御室	
写 真 	写 真	機材名称	Masterプログラム (制御部)	
		内 容	二本レバー制御 (テスト用) で異常終了発生	
		原 因	プログラムのバグ	
		対 策	テスト用のため特に対策を行わない	

10月 8日		発生箇所	作業台船上	
写 真 	写 真	機材名称	SBL(3)	
		内 容	反応無し	
		原 因	振動により浸水の可能性	
		対 策	安全監視員がモニタを見て機体位置を手入力	

港湾空港技術研究所報告 第44巻 第4号

2005・12

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2005) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。