港湾空港技術研究所報告
第63巻第3号(2024. 9)

浮上式音響測位装置を用いた水中建設機械の測位と水中遠隔操作実験報告

平林丈嗣*・佐藤智夫**

要　旨

透明度の高い沖縄での海洋工事においては，潜水士搭乗型の水中バックホウが既に導入されており，水中作業の機械化による施工効率向上や潜水士の肉体的負担軽減に大きく寄与している．さらに近年，安全性及び生産性の一層の向上を図るべく，水中バックホウを対象として，ICT(Information and Communication Technology)として，マシンガイダンス技術や遠隔操作技術について研究開発が行われている．水中における建設機械の管理や遠隔操作には，水中における高精度な測位技術が必要であるが，浅海域かつ，構造物の存在する港湾域では，音の多重反射により正確な測位が困難であった．筆者らはこのような課題に対し，基線長を長くとることが可能な衛星測位を活用した浮上式音響測位装置を開発し，水中建設機械の位置を検出する実験を行った．京浜港ドックにおける実験では，提案する浮上式音響測位装置の計測値と光学測量器による計測値との差は 34mm～188mm，標準偏差は，11mm～33mm の結果を得た．

また同一工区に存在する複数の作業機械の情報をリアルタイムに管理する水中作業情報管理システムを提案し，京浜港ドックにおける実験では，濁水中でも複数の操作者が水中の作業状況を共有認識することが可能であることを確認した．

さらに，今後の ICT 型水中バックホウの普及を目的に，衛星測位を活用した浮上式音響測位技術および ICT 型水中バックホウ技術に関連する技術情報を整理し，京浜港ドック実験時の作業手順，運用方法を,「衛星測位を活用した高精度音響測位技術と ICT 型水中バックホウ技術の技術開発事例（案)」として取りまとめ，巻末付録とした．

キーワード：水中バックホウ，音響測位技術，水中機械化施工

* インフラDX研究領域　サイバーフィジカル研究グループ長
** 港湾空港生産性向上技術センター　専任研究員（現あおみ建設株式会社）
〒239-0826　横須賀市長瀬3−1−1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5062　Fax：046-844-0575　　E-mail:hirabayashi@p.mpat.go.jp

REPORT OF THE PORT AND
AIRPORT RESEARCH INSTITUTE
Vol.63, No.3 (Sep. 2024)

Report on Experimental Positioning of Underwater Construction Machinery Using a Floating Acoustic Positioning System

Taketsugu HIRABAYASHI*
Tomoo SATOH**

Synopsis

In recent years, research and development of machine guidance technology and remote control technology for underwater backhoes has been conducted to improve safety and productivity.

However, in shallow water conditions with structures, it is difficult to accurately measure the position of the backhoe due to acoustic multiple reflections.

To solve this problem, we have developed a floating acoustic positioning system and conducted experiments to detect the position of underwater construction machinery.

Experiments conducted at the Keihin Port Dock showed that the difference between the measurements by the proposed floating positioning system and those by an optical surveyor ranged from 34 mm to 188 mm, and the standard deviation ranged from 11 mm to 33 mm.

Furthermore, we proposed an underwater work information management system for multiple work machines in the same construction area in real-time.

In an experiment at the Keihin Port Dock, multiple operators were able to share and recognize the underwater work status even in muddy water.

In addition, to promote the use of the underwater backhoe, the work procedures and operation methods during the experiment at the Keihin Port Dock are summarized in the Appendix.

Key Words: Underwater Backhoe, Acoustic positioning, Underwater Mechanization

* Head of Group, Cyber physical Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
** Postdoctoral Researcher, Productivity Improvement Research Center (AOMI CONSTRUCTION Co.,Ltd.)
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 E-mail:hirabayashi@p.mpat.go.jp

目　　次

要　　旨…… 77

1. はじめに…… 80

2. 水中バックホウに関する現状技術と課題…… 80
2.1 現状の技術…… 81
2.2 現状の技術における課題…… 82

3. 衛星測位を活用した浮上式音響測位装置の開発…… 85
3.1 浮上式音響測位装置の開発経緯…… 85
3.2 浮上式音響測位装置の概要と運用…… 86
3.3 測定精度の検討…… 89

4. 水中作業情報管理システムの提案…… 96
4.1 水中バックホウの高度な遠隔操作への対応…… 97
4.2 水槽での門型クレーンのデータ出力…… 100
4.3 水中作業情報管理システムの構築…… 101
4.4 連携作業実験…… 105

5. 京浜港ドックにおける模擬作業実験…… 106
5.1 実験目的…… 106
5.2 使用機材…… 107
5.3 浮上式音響測位装置の精度…… 109
5.4 水中連携作業実験…… 112
5.5 水中連携作業実験結果…… 113
5.6 実験まとめ…… 114

6. 普及に向けた検討…… 115

7. おわりに…… 115

謝辞…… 116
参考文献…… 117
記号表…… 117

付録　「衛星測位を活用した高精度水中測位技術とICT型水中バックホウ技術の技術開発事例（案）」

1. はじめに

我が国では，港湾をはじめとした水中工事においては，潜水士の手作業に依存してきた．その作業内容は，重量物の移動など，負荷の大きな作業が多く，また水流や水圧により安全確保が難しいことも課題となっている．そこで，施工の機械化が要望されてきた．一部の工種では，作業船からの施工が行われているものの，コスト，正確性，暗渠内等の作業条件の問題から潜水士作業を無くすまでには至っていない．

そのような環境下での作業のために，水中建設機械が開発され，透明度の高い一部の海域ではすでに実用化している[1，2)]．

例えば水中バックホウは，1985年に6トンクラスの水中バックホウ初号機が与那国島の防波堤工事において初施工を行っている．当時の水中バックホウは船上で油圧源を発生させ，水中に油圧ホースを接続する方式で稼働しており，操縦方式も水中にある運転席に潜水士が搭乗して操縦している（**写真-1.1**，**写真-1.2**）．

この水中バックホウは，海中透明度の高い沖縄県において広く利用されており，1997年から2021年の施工実績は288件となっている．

現在，水中バックホウの施工能力は港湾請負工事積算基準の参考資料として記載されており，捨石荒均し（±30㎝）の標準歩掛は潜水士4.3㎥毎時と比較して29.0㎥毎時と高い能力を有している．当然，人力施工と比較して肉体的負担が少なく，アタッチメントの交換により様々な作業に対応可能[3～5)]であることから，潜水士からの評価も高い．

しかし透明度の低い港湾域においては，目視による状況の認識は困難である．特に位置情報の誤差は，近接する既設防波堤との接触，法肩からの転落など重大な事故につながる可能性が高い[6)]．また，現在は各機械が独立して作業しているが，将来的には陸上施工[7)]のように複数の作業機械が近傍で連携作業を行うことで，作業効率をさらに向上させる可能性がある．

このため，「港湾域に特化した水中測位」と「水中作業の情報共有」が必要であると筆者らは考える．

本資料は，現状の課題点である水中測位技術と水中における作業状況の共有に関し検討を行い，京浜港ドックにおける模擬的な連携作業実験をとりまとめることで，将来の水中機械化施工の普及と発展，海洋工事への機械化施工の普及に役立てる事を目的とする．

写真-1.1　製作中の水中バックホウ初号機

写真-1.2　水中バックホウ初号機による作業

2. 水中バックホウに関する現状技術と課題

沖縄で既に実用化され，適用例の多い水中バックホウにマシンガイダンス等の情報化施工技術[8)]を適用することで，安全で効率的な水中施工を目指した技術開発は既に行われている．作業目標となる設計図面や機体姿勢，周辺のマウンド形状など，作業に必要な情報をグラフィカルに呈示するもので，操作者の認識を補助する水中マシンガイダンス技術（**図-2.1**）が，実現場で使用されつつある[9，10)]．また，水中マシンガイダンスで使用される情報呈示を用いた遠隔操作技術も開発されている．目視による作業状況の認識が困難となる水中作業では，このような情報呈示は非常に有効といえる．

本章では，水中バックホウに関する現状技術と，実現場適用に対する課題についてとりまとめる．

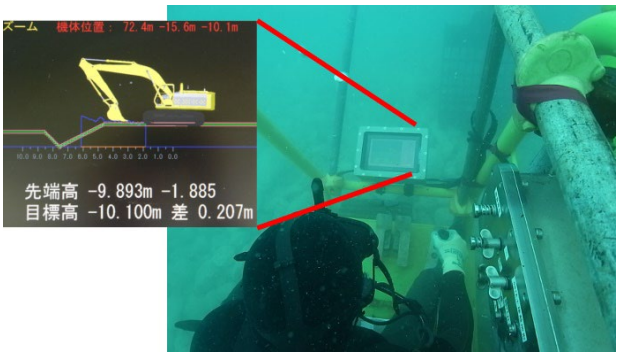


図-2.1　運転席の水中マシンガイダンスモニタ

2.1 現状の技術

（1）水中バックホウを対象としたマシンガイダンス

水中におけるセンシングでは，気中と異なり電波の減衰が著しく，また光学的には砂泥等の微小粒子による濁りに大きく影響される．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用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はGNSS(Global Navigation Satellite System)により機体座標（平面位置・高さ）と機体方位を検出することが一般的であるが，水中においては代替として音響測位装置（USBL:Ultra Short Base Line）を使用し，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一般に，電波や光学機器と比較して大きな計測誤差が発生することが考えられ，捨石均し作業など水深方向の高い計測精度が必要となる計測には使用できない．そのため水深方向の機体計測は高精度水圧計を用いるなど，水中独自のセンサへ変更する必要がある．

また，作業中に発生する濁りなどによって視覚情報がほとんど得られなくなる水中作業において，設計断面（目標高）と現状のマウンド形状とを重畳表示し，その差分を呈示することは効率的な作業に重要な情報となる．そこで現状のマウンド形状を計測するため，プロファイルソナーによる外界計測[11)]を行う必要がある．**図-2.2**は国土交通省関東地方整備局京浜港湾事務所のケーソン製作ドック（以下，京浜港ドック）で試験した際の画像である．バックホウ前方に張り出した場所にプロファイルソナーを下向きに設置し，バックホウの旋回運動により機体周辺のマウンド面をスキャンしている．この計測データは計測後遅延無くマシンガイダンス画面上（**図-2.3**）に表示され，作業状況の認識の補助として利用するものである．

このような水中マシンガイダンスは実現場で適用されつつある．内閣府沖縄総合事務局が発注したある防波堤築造工事では，ICT（基礎工）の全面的活用を図るため，起工測量，設計図書の照査，工事完成図及び施工管理の記録，関係書類について三次元データを活用するICT活用工事（発注者指定型）とすることが特記仕様書に記載されており，捨石均し機の位置と目標均し高さをリアルタイムで可視化する技術である水中マシンガイダンスを用いた施工が行われた．

その他，ダム排水口における水中ミニショベル作業でも利用される等，水中における機械化作業の適用に有効と言える．

図-2.2　京浜港ドックにおける外界計測実験

図-2.3　プロファイルソナーによる計測

（2）遠隔操作支援システム

前述の水中版マシンガイダンスで呈示する機体の情報や，マウンド形状の三次元計測データは，遠隔操作においても有用な情報である．琉球大学と港湾空港技術研究所が共同で開発した「作業支援アタッチメント」を加え，ケーソン仮置きマウンドを対象とした模擬試験により，遠隔操作で均し作業が可能である事を実証している．

試験は荒均し程度の不陸状態から開始しており，バックホウ支援台船上に設置した遠隔操作室（**図-2.4**）から操作を行った．プロファイルソナーで計測したマウンド形状はマシンガイダンス上に表示（**図-2.5**）され，操作者は目標より高い部分に支援アタッチメントを誘導し，叩いて均す操作入力を繰り返す．目標高さになったかどうかの判断は，マシンガイダンスモニタに表示される機

体姿勢と転圧板の高さにより判断しており，試験終了後に測量した結果，ほぼすべての点で基準範囲に入っており，本遠隔操作支援システムの有効性は示されたと考える．

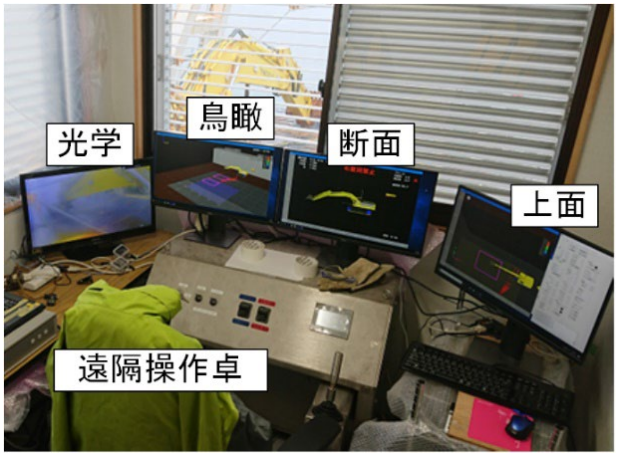


図-2.4　遠隔操作室

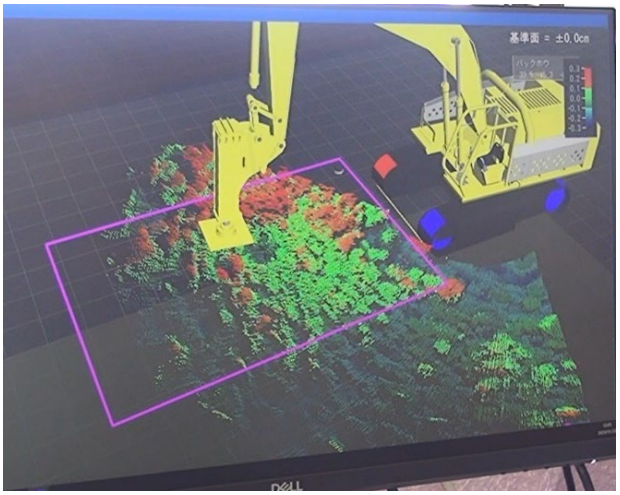


図-2.5　割石マウンドの表示

2.2 現状の技術における課題

（1）浅海域での位置計測

水中では陸上と異なりGNSSによる測位が使用できないため，超音波の伝搬時間を利用した音響測位[12～14]が一般的である．ただし，一般に市販されている音響測位装置は深海でのROV(Remotely Operated Vehicle)の位置を計測するために設計されたものが多く，港湾域など-10m程度の浅海域では，うまく計測できない場合があった．これは，浅海域ではトランスデューサー（受波器）の指向角を外れるような運用になりやすく，欠測となることが多くなるためである．さらに，海面と海底の間で信号音のマルチパス（多重反射）が発生し，計測に影響が出ることが原因とされている．また同一工区に存在する作業船からのエンジン音や，近傍の防波堤等の構造物からの反射波も環境ノイズの一つとなる．

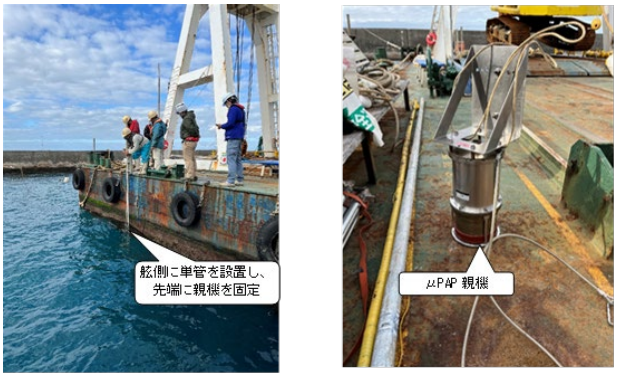


図-2.6　台船舷側に設置したトランスデューサ

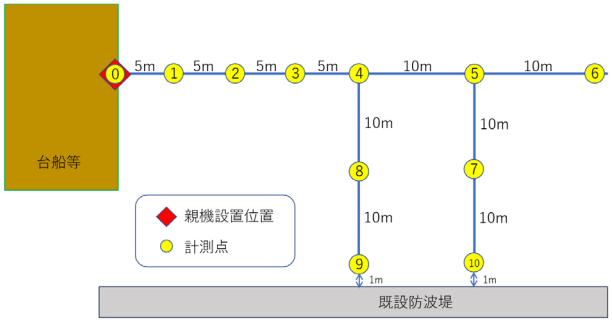


図-2.7　計測点

このような港湾域独自の環境ノイズに対し，市販の測位装置を用いて実海域での計測精度試験を実施した．

使用した機材はKongsberg社製のμPAPとし，トランスデューサ（以下，親機）を台船側面（**図-2.6**）から降ろし，トランスポンダ（以下，子機）を**図-2.7**に示す計測点に固定し計測を行う．**写真-2.1**は子機の固定治具であり，子機の高さをマウンド面から1mの高さに固定した．

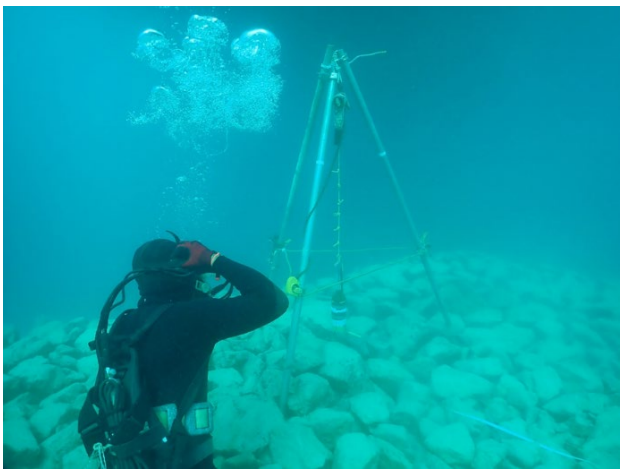


写真-2.1 トランスポンダの固定状況

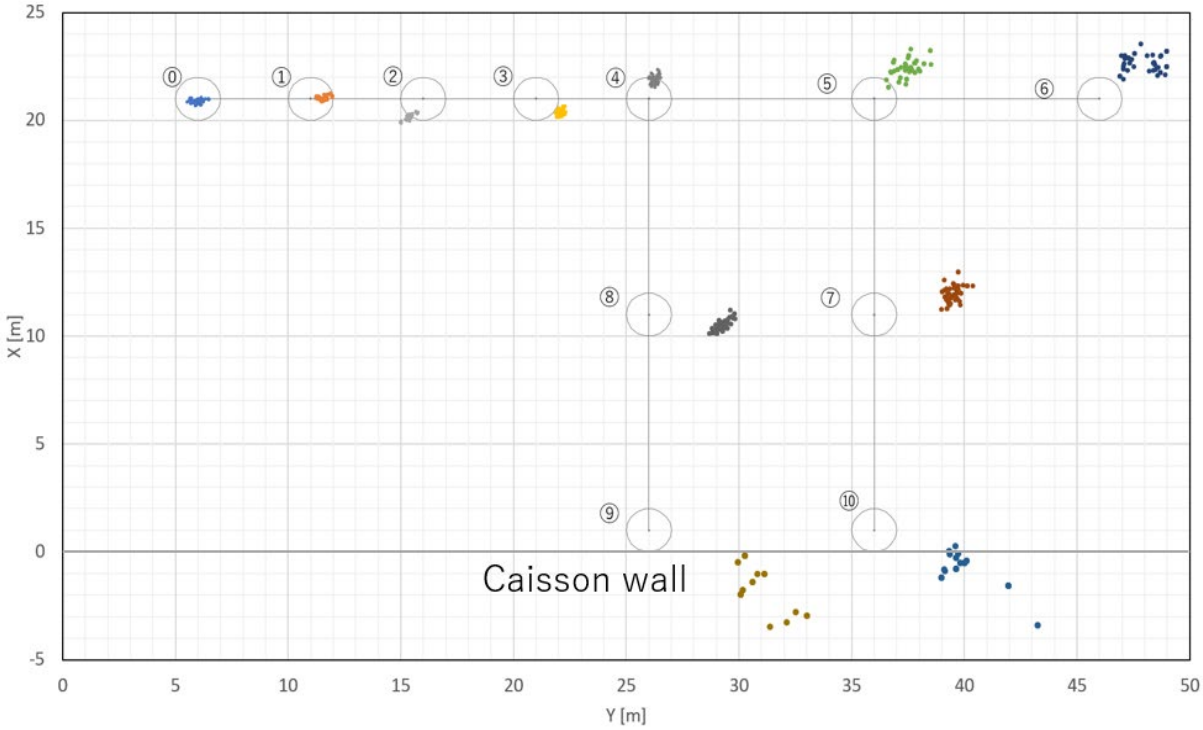


図-2.8　水中計測点の測位結果

図-2.8は，μPAPによる水中測位結果をプロットしたものである．計測点0から計測点4までは比較的安定した結果となったが，距離が20mを超えたあたりからバラツキが大きくなる傾向が出ている．また，既設防波堤の直近である計測点9は，平均値が大きく外れており正確な値が出ていないことがわかる．

このように水深が浅く障害物の多い港湾域において，広域に移動する建設機械の測位を市販のUSBL型測位装置で計測することは難しいと考えられる[15~16]．

このような港湾域の環境条件を対象とした測位方法に対し，当所では広域の水中測位を目的とした浮上式音響測位装置（図-2.9，図-2.10）を提案し，研究開発を行っている．

この方式では，複数の浮上局としてブイに設置した受

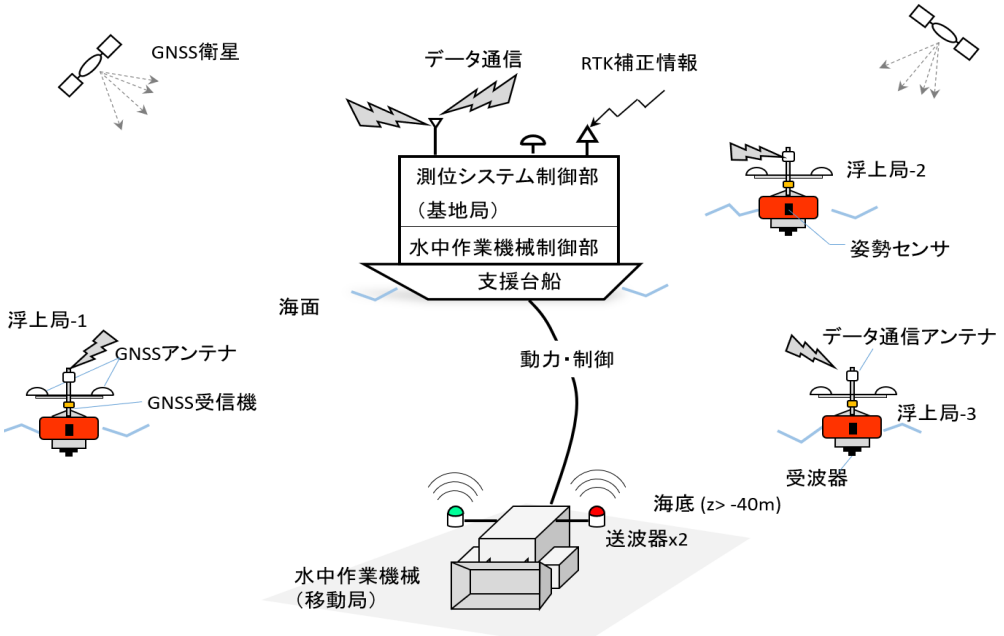


図-2.9　浮上式測位装置の概念図

波器と，移動局としてバックホウ側に取り付けた送波器から構成されており，浮上局の位置はGNSS測位により計測している[17]．受信した信号やGNSS測位の位置情報は電波により基地局に送信されるため，ケーブル等の接続が不要となっており，計測範囲を広く確保することが可能である．さらに浮上局の配置の自由度が高いため，作業船舶や既設構造物等の障害物が多数存在する港湾工事において有効であると言える．

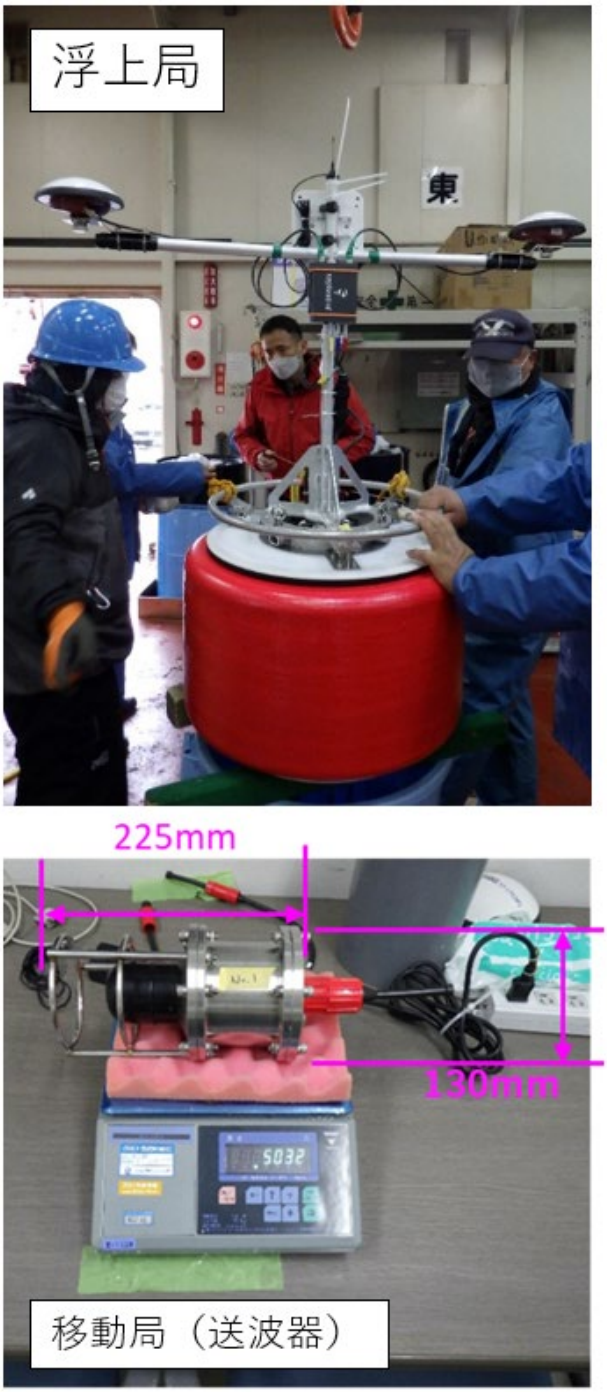


図-2.10　浮上式測位装置（上：浮上局／下：移動局）

また浮上局間の距離は数百m程度あり，基線長が長くとれるため，環境ノイズや多重反射波の影響をキャンセルしやすいという特徴も有することから，水中機械の位置計測に大きく役立つものと期待できる．

提案する浮上式音響測位装置は3.において詳細を述べる．

（2）水中作業の情報共有

水中部での施工や状況確認，誘導は潜水士の目視に依存していることが一般的である．これは海面上から水中部の視認がほぼ不可能であるほか，作業状況を確認するには対象に近接する潜水士が必要であるためである．また，一般に作業中は透明度が低いため光学映像を利用することが困難であり，潜水士の音声による誘導となる．

図-2.11に示すように，複数の作業機械や作業船による施工が近傍で実施される場合があるが，お互いの水中での作業状況は共有されていないため，それぞれが独立して作業しているのが現状である．そのため，陸上施工のような複数の建設機械での協調的な作業は実現されていない．

図-2.11　同一工区に存在する作業船舶

このような課題に対し「水中作業の見える化（**図-2.12**)」が必要であると考える．

前述のとおり，水中版マシンガイダンスなどICT建機では，機体に設置したセンサで様々な情報を取得している．また起重機船でも吊り荷やグラブバケットの誘導システムや，ROVや潜水士の水中位置を計測する音響測位システム等，目視がきかない水中での作業状況把握に対し，様々な技術開発が進められている．また，現状では，これらの情報は各操作者が使用するのみであり，情報の共有はされていない．

ここで，工区に存在する様々な施工機械や船舶，作業者等の情報を一元的に管理し，かつ，それらの情報を様々

な場所で呈示する情報共有システムを構築することで，いわば「箱庭」のように複数の作業者が水中での作業状況をリアルタイムに認識可能となり，様々な作業船が近接する現場条件での安全性向上や複数機械の連携作業による効率性の向上が実現できるものと考えられる．

そこで，港湾工事区域に存在する様々な作業機械，船舶のほか，潜水士やROVなどの情報をリアルタイムで収集・管理し，かつ，それらの情報をCG画面として各作業者へ呈示する「水中作業情報管理システム」を提案する．これら水中作業情報の集中管理により，作業状況が共有されるほか，近接する複数の作業機械の安全確保や，事故が発生した時の記録として解析することが可能となり，将来的な安全面の監視に使用できることが期待できる．さらに機械の動作記録から，作業能力等の評価に利用することが考えられる．

提案する水中作業情報管理システムは4．において詳細を述べる．

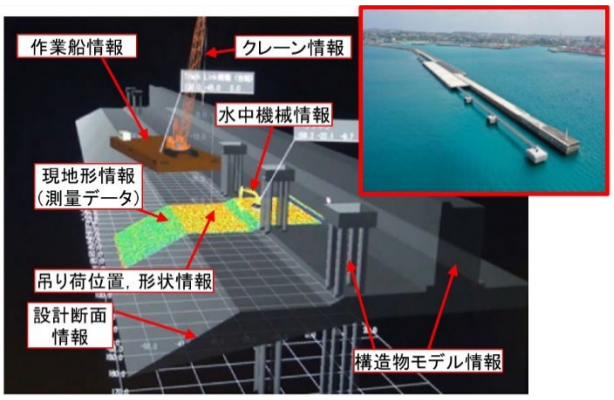


図-2.12　水中作業の見える化のイメージ

3. 衛星測位を活用した浮上式音響測位装置の開発

水中の建設機械等を計測する手段として，超音波の伝搬時間の差から対象となる位置を算出する方式によるものが多く存在する．その場合，受波器間の距離である基線長によってLBL(Long Base Line)，SBL(Short Base Line)，USBL(Ultra Short Base Line)に分類されている．

一般に市販されている水中測位装置は，トランスデューサ側の機器がコンパクトであり船上に設置することが容易なUSBLが多い．しかし，計測可能な角度が120度～150度程度に制限される機器が多く，港湾など浅海域での計測には適しているとは言えない．

広域な計測には基線長を長くとることが可能なLBLが適していると考えられるが，従来のLBLでは海底に設置されたトランスデューサ機器の位置座標を正確に把握することが必要であり，準備等にかかる労力やコストが大きいため，港湾領域の音響測位としてLBLが利用されることは稀である．

そこで，従来海底に設置していたLBLの計測点を海面に配置し，海面の計測点の位置をGNSSにより測位することにより，浅い港湾域で広範囲の計測エリアを確保する「浮上式音響測位装置」を提案する．本章では本装置の特徴や開発経緯について述べる．

3.1 浮上式音響測位装置の開発経緯

浮上式音響測位装置は，港湾・海岸工事における水中作業の効率性及び安全性を向上し，現場の生産性向上を図るため，準天頂衛星を含む衛星測位と水中音波による測位技術と水中施工機械の遠隔操作技術を組み合わせることで，海象条件によらず利用可能な高精度の遠隔操作・自動化水中施工システムを開発することを目的として，2021年度より開発を開始した．

測位の方式としては，浅海域における測位範囲の拡大のためにLBL方式を選択しており，ブイの位置をGNSS衛星測位により計測し，水中部は音響測位とするリレー式測位とした．この方式はGIB（GPS Intelligent Buoy）と呼ばれており，LBL測位の展開コストを下げる試みとして1990年代後半には既に行われていたものである．従来のLBL方式のように海底の定点から測距するのに比べ，動きが伴う海面の計測点からの測距となるため，浮体の動きをキャンセルできるかが技術課題となる．この技術課題に対して，初期のGIB方式には搭載されていなかった動揺センサを用いることにした．また測位に使用できる衛星数の増加，RTK法の普及により衛星測位自体の性能が向上しており，以前のGIB方式と比較して高精度化が期待できる．

浮上式音響測位装置の全体イメージを図-3.1に，2021～2023年度の研究実施内容を以下に示す．

（2021年度）

音響測位装置の実海域設置上の技術課題の整理や現地実証試験計画の策定等を行う「令和３年度　水中施工機器のための音響測位装置導入検討委員会」を開催し，開発する測位装置の仕様の妥当性，運用に必要な諸手続き，性能試験方法を検討した．

装置開発としては，浮上局1基，移動局，基地局を製作し，新本牧沖において測距機能の動作確認を行った．

（2022年度）

浮上局2基の追加製作と，基地局に測位機能を付与し，横浜港新本牧沖で移動局を着底させて測位試験を行った．

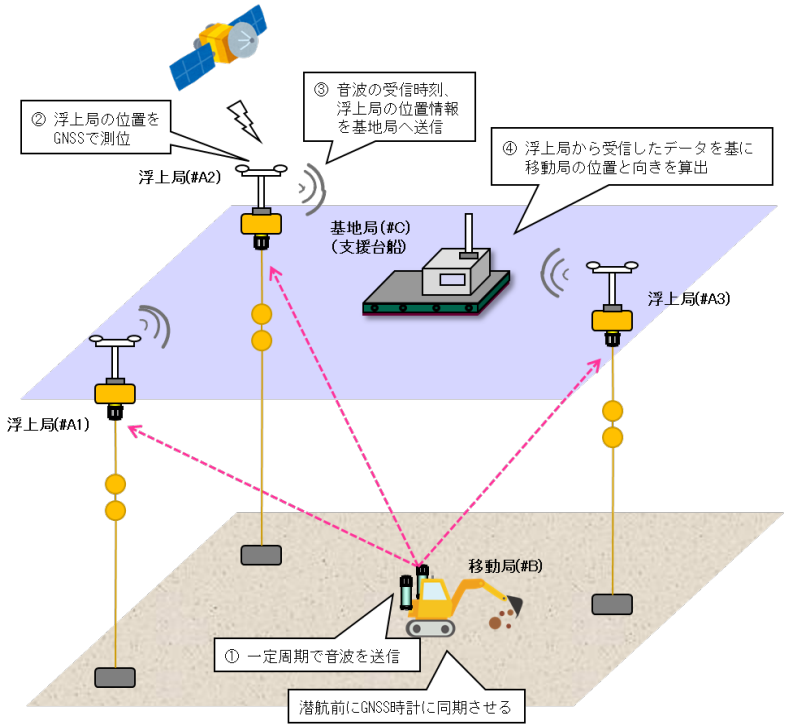


図-3.1　浮上式音響測位装置の計測手順（概要図）

そこで，実験に使用したクレーン付き台船の船底の反射に由来する考えられるマルチパスを確認した．測位性能の評価は，実験海域の水深が20mを超すため丁張が出来ず，移動局を吊り下げるクレーントップに取り付けたGNSS受信機の座標を真値と仮定したが，GNSS受信機の位置と吊芯の位置が異なること，移動局が潮流で流されたため絶対的な測位精度の評価は行えなかったものの，ばらつきについては非常に小さいことが確認された．

（2023年度）

京浜港ドックにて水中バックホウとの接続試験を実施するために，マルチパス対策を実施した．また無線データ通信を改良した．京浜港ドックにおける実験では，接続試験，測位性能評価ともに大きな問題は見られず，水中バックホウの高精度の測位が可能であることを示した．

また，2022年度新本牧での実験において発生した測位精度検証方法の課題については，マルチビームソナーにより移動局が着底している座標を計測し，真値と仮定した．結果として，今回の実海域実験においては，浮上式音響測位装置の精度は0.5m以内を満たしていた．

3.2 浮上式音響測位装置の概要と運用

（1）浮上式音響測位装置の概要

浮上式音響測位装置（以下，本装置）は，海上に設置した浮上局を用いて，海中を移動する移動局の位置を計測するシステムである．

本装置は，「浮上局3基」「移動局」「基地局」のほか，浮上局バッテリを充電する「充電ユニット」と，移動局内部タイマとGNSS時計とを同期するための「同期装置」により構成される．**表-3.1**にその寸法を示す．**図-3.2～図-3.5**にその形状を示す．

表-3.1　浮上式音響測位装置の寸法重量

番号	名称	寸法・重量
1	浮上局	
1.1	アンテナマスト　＋ ブイ本体	寸法：1000(W)×1688(L)×φ600 [mm] 空中重量：51 [kg] （ブライドルまでの重量。係留系を除く）
1.2	錘	空中重量：100 [kg] 水中重量：87 [kg]
2	移動局	
2.1	送信ユニット	寸法：φ190×550 [mm]（突起部除く） 空中重量：12 [kg]
2.2	バッテリーユニット	寸法：φ190×375 [mm]（突起部除く） 空中重量：10 [kg]
2.3	送波器ユニット	寸法：φ130×225 [mm]（突起部除く） 空中重量：5 [kg]
2.4	送波器用接続ケーブル	長さ：3 [m]
2.5	移動局電源ケーブル	長さ：3 [m]
2.6	メンテナンス用ケーブル	長さ：1 [m]
3	基地局	
3.1	基地局	寸法：476×373×180 [mm]（突起部除く） 重量：6.4 [kg]
3.2	基地局無線ユニット	寸法：424×342×172 [mm]（突起部除く） 空中重量：5.0 [kg]
3.3	電源ケーブル	長さ：3 [m]
3.4	無線機用 ルールトップアンテナ	ケーブル長さ：2.5 [m]
4	充電ユニット	
4.1	充電ユニット	寸法：350×260×130 [mm]（突起部除く） 空中重量：5.4 [kg]
4.2	電源ケーブル	長さ：3 [m]
4.3	浮上局用充電ケーブル	長さ：10 [m]
4.4	移動局用充電ケーブル	長さ：3 [m]
4.5	移動局充電用延長ケーブル	長さ：10 [m]
5	同期装置	
5.1	同期装置	寸法：194×135×86 [mm]（突起部除く） 空中重量：1.3 [kg]
5.2	同期ケーブル	長さ：3 [m]

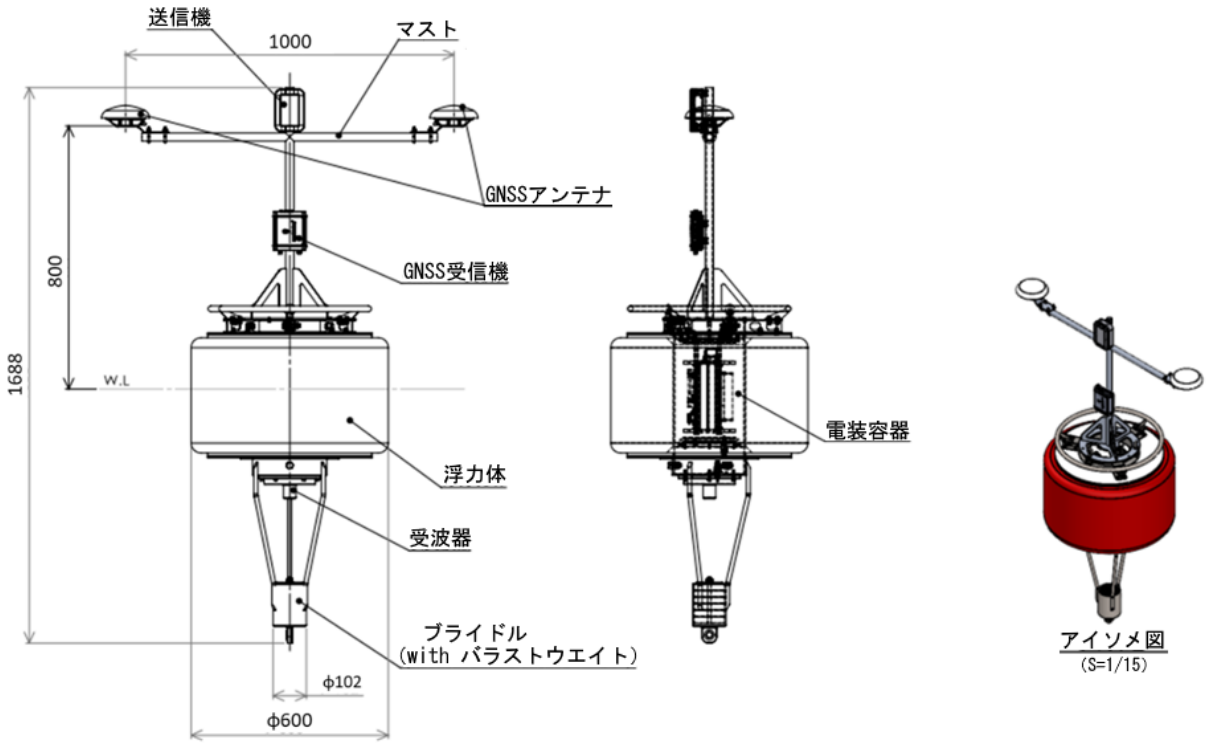


図-3.2　浮上局

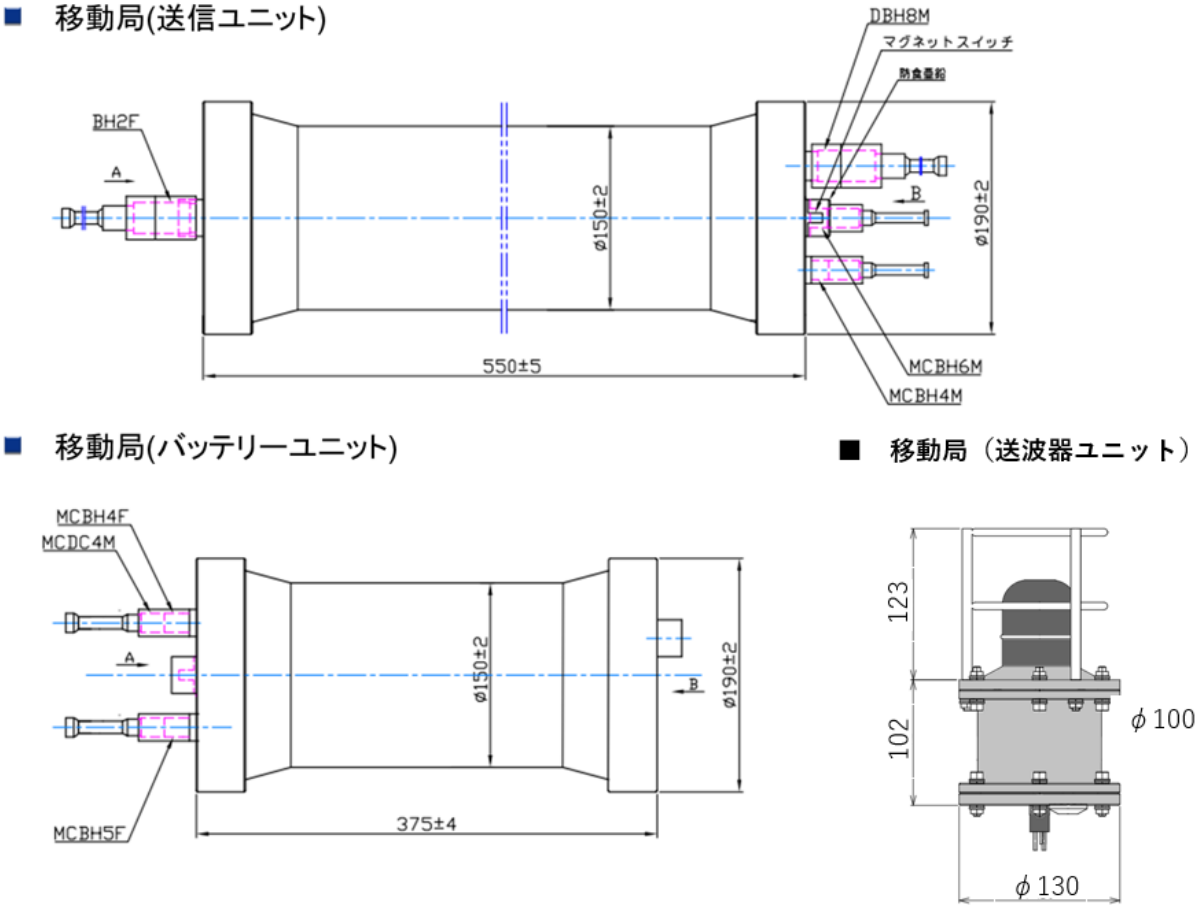


図-3.3　移動局

■ 基地局

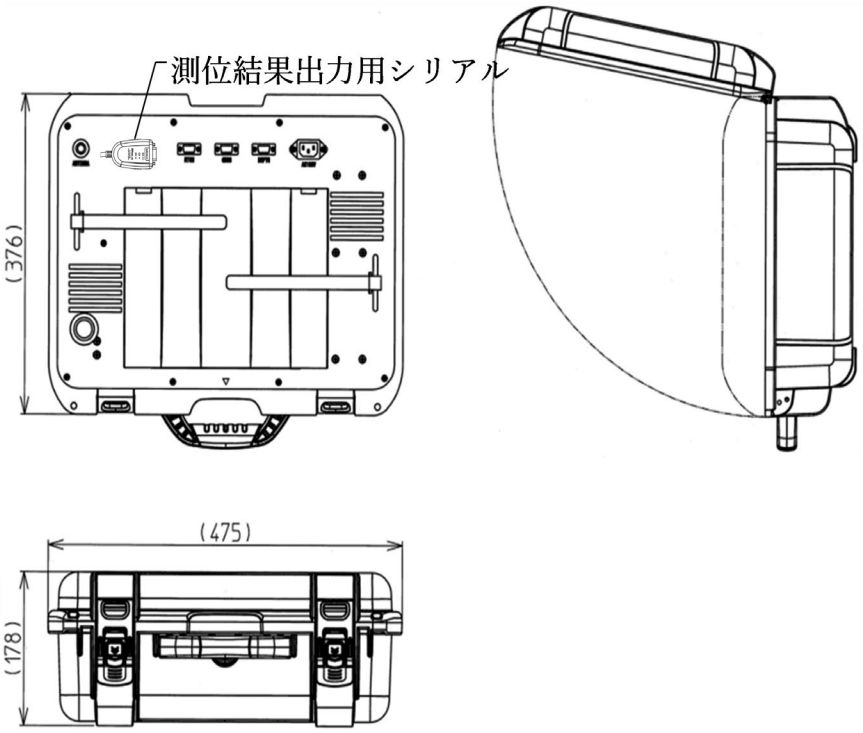


図-3.4　基地局

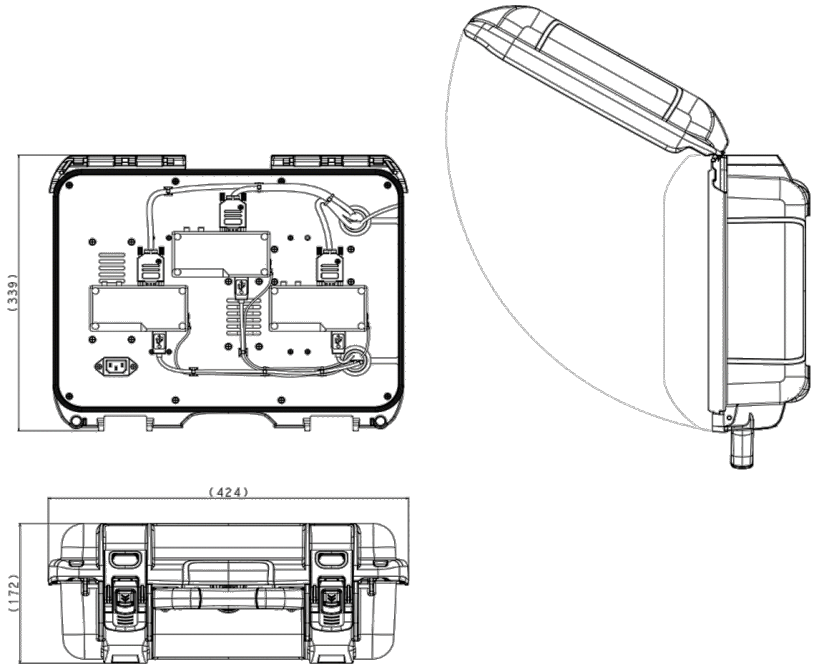


図-3.5　同期装置

(2) 浮上式音響装置の主な仕様（測位関連）

本装置の測位に関連する仕様を**表-3.2**に示す．想定する利用状態を**図-3.6**に示す．原点を中心とした100m×100mのサービスエリアに対して，ベースライン200mで浮上局を正三角形に配置することを想定した．

外部機器への測位データ出力は前述の基地局（**図-3.4**）の測位結果出力用シリアルポートを介し，RS232C準拠のプロトコルにより出力され，データの出力は測位を実行中の場合にのみ行われる．**表-3.3**に通信プロトコルを，**表-3.4**に出力フォーマットを示す．

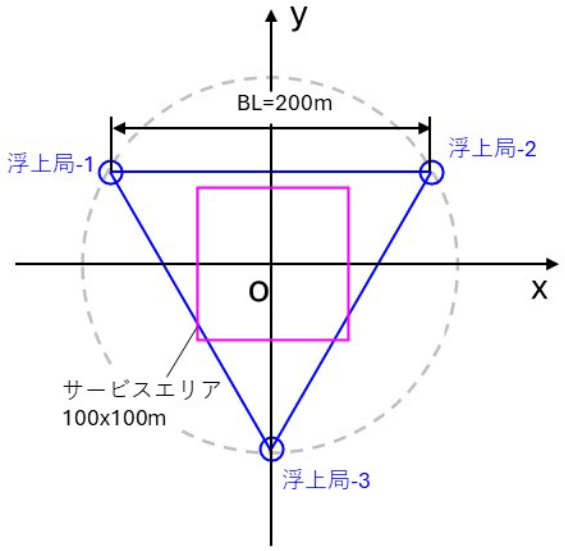


図-3.6　想定利用状態における浮上局の配置

表-3.2　開発仕様

性能			
	項目		概要
1	測位性能	分解能	15mm以下
		誤差（正確度）	0.5m以内（水平方向）
		ばらつき（精密度）	0.5m以内（水平方向）
		測位周期	毎秒1回以上の測位が行えること。 移動局より最遠方の浮上局が受信してから、測位用信号の送信繰り返し間隔時間以内に、測位結果が表示できること。
2	稼働時間		8時間以上
3	ヘディング分解能		1° 以内
4	音速補正		0.5m毎に水深40mまでの範囲で音速を補正できること。
5	移動局のクロック同期		GNSS受信機の1pps信号を用いて、移動局のクロックをUTC時刻に同期させたあと1pps信号を切断し、8時間後経過した時点において、移動局の内部時計とUTC時刻の差が±15・s以内であること。
6	浮上局の制御		(1) 浮上局ハードウェアの各種設定が行えること。 (2) 浮上局で動作するソフトウェアの各種設定が行えること。 (3) 浮上局ごとに個別の設定が行えること。

表3.3　通信プロトコル

	項目	仕様
1	ビットレート	115200 bps
2	データビット	8 bit
3	パリティ	なし
4	ストップビット	1 bit
5	フロー制御	なし

表-3.4　出力フォーマット

	項目	例	説明
1	ヘッダー	$POS	固定のヘッダ文字
2	ステータス	3	0：送波器１・２ともに無効 1：送波器１有効、送波器２無効 2：送波器１無効、送波器２有効 3：送波器１・２ともに有効
3	送波器１_X	1.234	座標系はマシンガイダンスの座標系（X→Y↑）とする 無効時はデータ無し（カンマのみ）
4	送波器１_Y	1.234	
5	送波器１_Z	1.234	
6	送波器２_X	1.234	
7	送波器２_Y	1.234	
8	送波器２_Z	1.234	
9	ヘディング	123.4	方位角0～359.9　ステータス=3のみ有効 無効時はデータ無し（カンマのみ）
10	終端文字	<LF>	<LF>のみ

カンマ区切りの可変長アスキーデータ（終端文字の前はカンマ無し）

(3) 浮上式音響測位装置の基本的な運用方法

本装置は以下の動作で測位を行う．

①移動局は一定周期で音波を送信する同期ピンガである．移動局のクロックは，設置前にGNSS時計と同期し，設置後は内蔵された高精度クロックにより，時刻同期された状態を長期間保持する．

②移動局から送信された音波を，3基の浮上局で検出する．浮上局はGNSSにより常に自身の位置を測位している．

③浮上局は音波を検出した時刻，その時の浮上局の位置情報などを無線により基地局へ送信する．

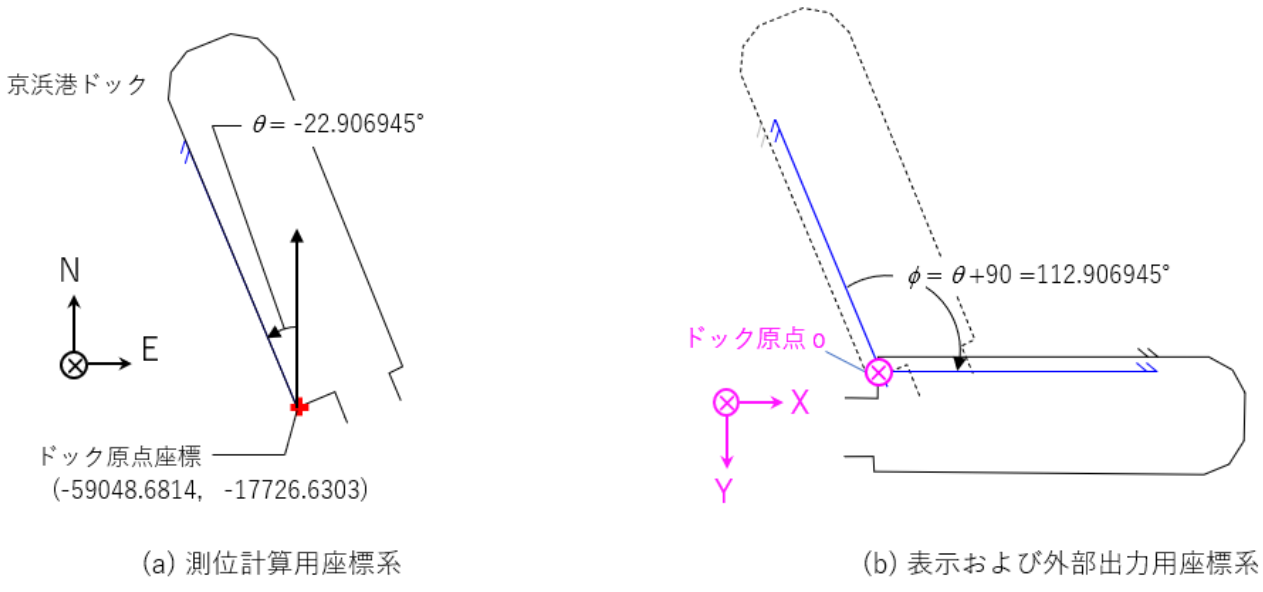
④基地局は，3基の浮上局から受信したデータを基に，移動局の位置と向きを算出する．

移動局の位置を求める計算は，平面直角座標系を用いて行われる． また，計算に用いる音速は音速プロファイルを事前に計測し，浮上局の受波器深度より移動局の送波器深度までの平均音速を用いる．

位置の表示および外部出力は，表示領域内の1点を中心として回転させ，構造物の長手方向をx方向に設定できるようになっている．京浜港ドックにおける実験で用いた座標系を**図-3.7**に示す．

3.3 測定精度の検討

本装置の測位精度について，誤差モデルを立案し，そこで使用する誤差成分を見積もることで，測位のばらつきを検討する．



(a) 測位計算用座標系　　(b) 表示および外部出力用座標系

図-3.7　京浜港ドックにおける実験で用いた座標系

(1) 誤差モデルの立案

測位対象の座標を求めるための方程式を示し，誤差を含む測定量を明らかにし，誤差を考量したモデルを作成する．この時，誤差をバイアス（系統的誤差）とばらつき（偶然誤差）に分類する．**表-3.5**に検討対象の一覧を示す．

表-3.5　測定精度検討の対象項目

測定量	バイアス	ばらつき	備考
音速　c	b_c	σ_c	
伝搬時間 τ	b_τ	σ_τ	
受波器位置 ε ρ_{XYZ}	b_{XYZ}	σ_{XYZ}	斜距離に換算し扱う

測位対象の座標を(x,y,z)，浮上局iの受波器の座標を(X_i,Y_i,Z_i)，測定対象と浮上局iの受波器の斜距離をρ_iとすると，以下の方程式が成り立つ．

$$\rho_i = \sqrt{(x-X_i)^2+(y-Y_i)^2+(z-Z_i)^2} \quad (1)$$

（ただし，i=1，2，3）

さらに斜距離は音速 c と測位用音波の伝搬時間τ_iの積で与えられるので，式(1)は

$$c\cdot\tau_i = \sqrt{(x-X_i)^2+(y-Y_i)^2+(z-Z_i)^2} \quad (2)$$

なお，受波器位置座標(X_i,Y_i,Z_i)に関する直接の測定量は，GNSS測位で得られる緯度，経度と姿勢センサ（IMU:Inertial Measurement Unit）から得られる3軸の傾き，ヘディングから構成されるが，ここではそれらを用いて直角平面座標系の座標に変換した値として検討することにする．また，その誤差に関しては斜距離の測定誤差として扱うものとする．

音速と伝搬時間について，それぞれの観測量mは，真値m_0，バイアスb_m，ばらつきσ_mから構成され，$m = m_0 + b_m + \sigma_m$と考える．さらに受波器位置座標のバイアスとばらつきを左辺に加えると式(2)は式(3)となる．なお，以降では各浮上局を示すiを省略する．

$$(c_0+b_c+\sigma_c)\cdot(\tau_0+b_\tau+\sigma_\tau)+(b_{XYZ}+\sigma_{XYZ}) = \sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+(z-Z)^2} \quad (3)$$

(2) 誤差成分の見積もり

本装置の仕様，及び実海域での実験結果より各測定量のバイアスとばらつきを見積もる．なお，浮上局の配置等の条件については，実海域における測位実験時（2023年3月上旬，新本牧工事エリア）の浮上局と移動局（測位対象）の配置を用いて検討した．浮上局の配置は基線長BL=200mの正三角形配置である（**図-3.6**参照）．浮上局は原点oを中心とした半径$R = \frac{200}{\sqrt{3}}$ =115.5mの円周上に配置した．測位のサービスエリアは原点oを中心とした100m×100mの範囲であり，移動局は水深25mを移動するものとした．

なお，本装置の測位性能の仕様が水平方向のみであるので，水平方向（平面図内）の誤差のみを検討した．

a）音速バイアス

本装置が測位演算に用いる装置音速 $c_{machine}$と実際の音速c_{true}に乖離があった場合に生じるバイアスについて検討した．

①音速度計で検出可能な速度差

使用経験のある音速度計の仕様より，0.5m/sの音速差であれば検出可能と考えた．

②音速度の測定

移動局の送波器と浮上局の受波器の間の経路上の音速をリアルタイムに測定し，装置音速 $c_{machine}$とすることが理想であるが，実際の運用では作業開始前にサービスエリアの1か所で測定した音速プロファイルが用いられることが多い．ここで測定時刻と測定場所によって，どの程度音速プロファイルに差があるかを検討し，音速の誤差成分として見積もることとした．**図-3.8**(a)，(b)，(c)に浮上局の周辺と移動局を設置した場所で測定した音速プロファイルを示す．

場所を変えての測定は，作業船で計測場所まで移動し，投げ込み式の音速度計を投入し，引き上げるため，40分程度の時間差があった．気温が低い日，すなわち**図-3.8**(a)の音速プロファイルは，場所によらず良く一致している．一方，**図-3.8** (b)は，気温が高い日に同時刻に場所を変えて音速度を測定した結果である．サービスエリア内で音速プロファイルに差が見られる．また**図-3.8** (c)は，場所を固定し，時間を変えて音速度を測定した結果である．

図-3.8(b)，(c)より，音速度の測定時刻と測定場所の違いによって，投げ込み式音速度系で計測された音速$c_{machine}$と実際の音速 c_{true}に1m/s程度の乖離があると言える．さらに**図-3.8**(b)に示す通り，水深10 mまでは水中音速が大きく変化しているほか，前述の音速度計の検出可能な速度差が0.5m/sであることを考慮して音速のバイアスの影響を大きめに見積もることとし，$|c_{machine} - c_{true}| \leq$ 2m/sとする．

③音速バイアスの測位結果への影響

次に音速バイアスが±2m/sの場合，測位誤差はどの程度になるかについて検討を行う．ここでは以下の手順で平面内の誤差を求めた．以下では，浮上局を示す添え字を略す．

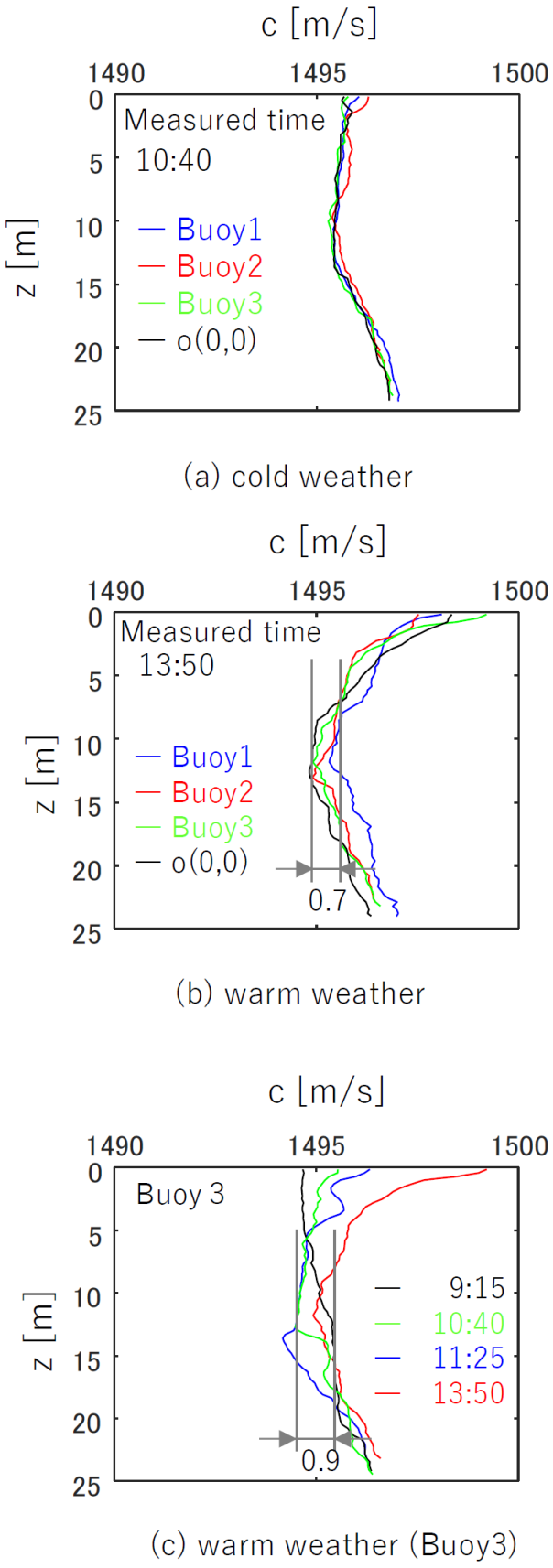


図-3.8　実測した音速プロファイル

(イ)移動局(x, y, z)と浮上局（X, Y, Z）の距離

$\rho_{true} = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2}$を求め，

測定される伝搬時間$\tau_{true} = \frac{\rho_{true}}{c_{true}}$を求める．

(ロ)装置で計測された音速$c_{machine}$より，斜距離

$\rho_{machine} = c_{machine} \cdot \frac{\rho_{true}}{c_{true}}$ を求める．

(ハ) $\rho_{machine}$を用いて，移動局の座標を求め，音速バイアスが乗った場合の移動局の座標(x', y', z')とする．

(ニ)測位の仕様はx-y平面内のみであるので

$$\varepsilon_{xy} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (4)$$

を誤差として評価する．

図-3.9に結果を示す．**図-3.9(a)**は，ε_{xy}の平面内分布（z=25m）を示す等値線図（単位：m）である．但し，c_{true} = 1500m/s，$c_{machine}$ = 1510m/sと音速バイアスを大きく設定したものである．**図-3.9(a)**より，サービスエリアの中心o(0，0)では誤差は生じていない．これは各浮上局からの距離が等しいためである．x-y平面内ではサービスエリアの辺縁に行くほど，誤差が大きくなり，音速バイアスが10m/sではサービスエリアの辺縁では仕様を超えることが分かる．

次に**図-3.9(a)**内の●(-50，-50)において，1490m/s ≤ $c_{machine}$ ≤1510m/sの場合のε_{xy}を**図-3.9(b)**に示す．②で見積もった音速バイアスb_c= ±2m/sの場合，測位誤差ε_{xy}=0.2m程度になることがわかる．

なお他の誤差要因を無視した場合，浮上式音響測位装置の仕様である計測誤差0.5m以内を満たすためには，$|b_c|$ ≤5m/sが必要である．

b) 音速のばらつき

同一箇所で音速のプロファイルを計測した**図-3.8(b)**，(c)を同一条件での繰り返し測定と考え，そのばらつきが正規分布であり，ばらつく値のPeak to Peak（約1m/s）を2×3σ（σ：ばらつきの標準偏差）に対応していると仮定すると，音速ばらつきσ_c= 0.166 ≒ 0.2m/sと考える．

c) 斜距離バイアスと測位誤差の関係

まず，検出時刻に関するバイアスb_τ，及び受波器位置のバイアスb_{XYZ}の検討を単純化するために，各測定量のばらつきを無視し（σ=0），音速バイアスb_c=0（$c_{machine} = c_{true}$）とする．

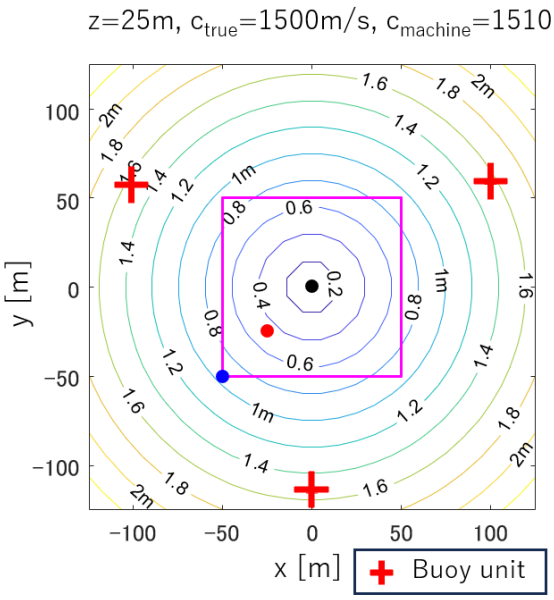


図-3.9 (a) 音速による誤差の平面分布

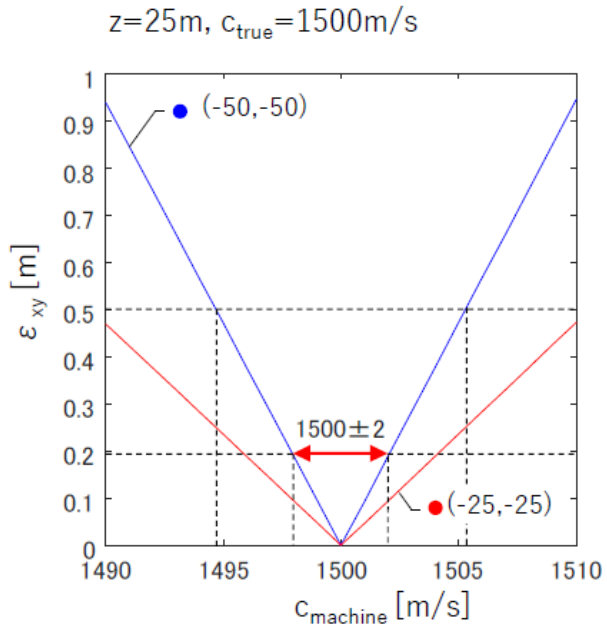


図-3.9 (b) サービスエリアの辺縁における誤差

次に以下の手順で斜距離バイアスが平面における測位誤差にどのような影響を与えるか検討を行った．

（イ）移動局(x, y, z)と浮上局の斜距離

$\rho_i = \sqrt{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2}$を求める．

（ロ）斜距離にバイアスρ'を加えて斜距離に同一のバイアスが加わった場合の測位誤差（平面内）

$$\rho_i + \rho' = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \quad (1')$$

を解き，斜距離バイアスが乗った場合の移動局の座標(x', y', z')を求める．

（ハ）x-y平面内誤差$\varepsilon_{xy} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$を評価する．

計算結果を**図-3.10**に示す．ε_{xy}の等値線の単位は[mm]である．サービスエリアの隅(-50，50)あるいは(50，50)において誤差最大となり，ρ'=50mmでε_{xy} =30mm，ρ'=100mmでε_{xy}=60mm程度あり，音速バイアスによる測位誤差に比べ小さくなることがわかる．ここでは斜距離誤差 ρ'=10mmあたり平面測位誤差ε_{xy}=6mmと見積もる．

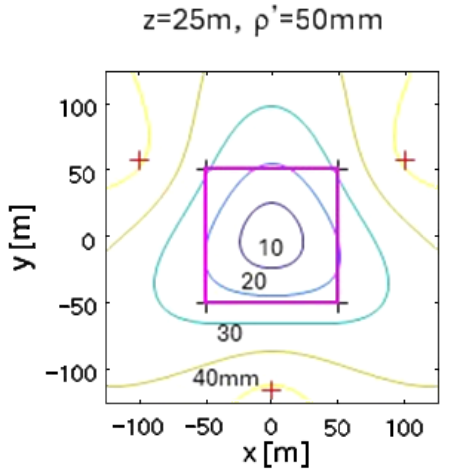


図-3.10（a） 斜距離バイアスと測位誤差の関係
（ρ'＝50㎜）

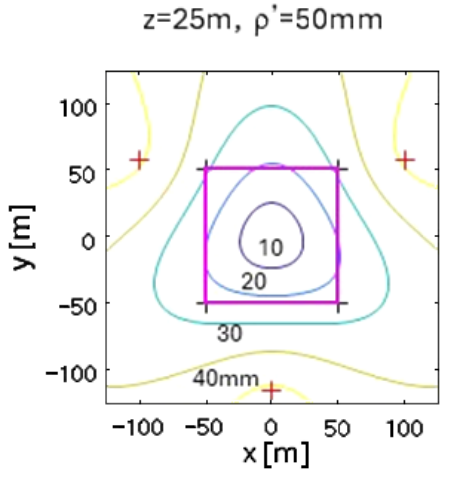


図-3.10（b） 斜距離バイアスと測位誤差の関係
（ρ'＝100㎜）

d）伝搬時間バイアス

伝搬時間に関するバイアスは，移動局のクロックの誤差により生じるものが主である．移動局のクロックの性能から，GNSSに同期後8時間で$b\tau$＝±15μsの誤差が発生する可能性がある．これは斜距離に換算するとρ'=1500 m/s×（±15μs）=±22.5mmの誤差となる．

前述の c）斜距離バイアスと測位誤差の関係で求めた考え方（斜距離誤差ρ'=10mmあたり測位誤差ε_{xy}=6mm）に従い，この値を測位誤差に換算すると0.6×22.5mm ＝13.5mmとなり，約15mmと見積もる．

e）伝搬時間ばらつき

信号検出時に雑音により生じる時間軸上のばらつきを検討する．

信号波到着時刻を検出に必要とするSNR（Signal-Noise Ratio）は，信号検出確率Pd，誤警報確率Pfaよ りROC（Receiver Operating Characteristic）曲線を用いて求まる．Pd≧0.98，Pfa≦10^{-6}ではSNR=17dB（真数は約50，無単位）となる．

信号検出時に雑音により生じる時間軸上のばらつきは次式で与えられ

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sqrt{SNR}} \frac{T}{2} \quad (5)$$

測位用音響信号の帯域が$\frac{1}{T} = \Delta f = 8kHz$より，

σ_τ= 8.83μs ≒ 10μs と見積もる．

f）受波器位置座標誤差の影響

仕様によると受波器位置座標に関する精度は，いずれもRMS（Root Mean Square）値で，水平方向に20mm+2ppm（RTK），ヒーブ方向に50mmである．

$(RMS)^2 = b^2 + \sigma^2$なので，b, σ各々の最大値は$b = RMS$, $\sigma = RMS$と考える．仕様の値を斜距離に投影し，最大となるのは水平面内で，移動局と浮上局が最も近接した場合であり，その時斜距離は40mm程度変化する．よってb_{XYZ}≦40㎜，σ_{XYZ}≦40mmと見積もる．

以上，導き出した誤差成分の見積もり結果を**表-3.6**に示す．

（3）測位ばらつきの検討

測定量のばらつきの見積もりより，DOP（Dilution of precision）を介し測位のばらつきを求める．実測結果と比較し，見積もった測定量のばらつきの大きさの妥当性を検討する．

表-3.6　誤差成分の見積もり（まとめ）

測定量	バイアス	要因、条件等	ばらつき	要因、条件等
音速　c	$\lvert b_c \rvert \leqq$ 2 m/s	音速分布モデル 深さ方向の分布のみ考慮（水平方向は均一） 屈折は無視 音速時計の精度/実測の実績を考慮（３月上旬、新本牧にて実測）	σ_c = 0.2 m/s	実測の実績（３月上旬、新本牧）
伝搬時間 τ	$\lvert b_\tau \rvert \leqq 15\,\mu$s 斜距離換算　≦22.5mm	クロック精度	$\sigma_\tau \leqq 10\,\mu$s	帯域幅、SNRより
受波器位置 $\varepsilon_{\rho XY}$	$\lvert b_{XY} \rvert \leqq$ 40 mm	受波器位置に関する装置仕様を斜距離に換算（最悪値）	$\sigma_{XYZ} \leqq$ 40 mm	受波器位置に関する装置仕様を斜距離に換算（最悪値）

測位のばらつきと測距のばらつきの間には以下の関係がある．

測位のばらつき　＝　DOP　×　測距のばらつき

σ_c，σ_τ，σ_{XYZ}より斜距離ρに関するばらつきσ_ρを求め，DOPを介して測位のばらつきを求め，実際の測位ばらつきと比較することによりσ_c，σ_τ，σ_{XYZ}の妥当性を検討する．この検討を水平方向（平面内）に行うので用いるDOPはHDOP (Horizontal DOP)である．

a）HDOPと測位ばらつきの実測値

前述の**図-3.6**のように浮上局が正三角形に配置されたときの中心位置におけるHDOPは，西の論文[18]を参考としてHDOP＝1.16とした．

図-3.11に2023年度に新本牧において実測した結果を示す．浮上局間の距離は約200mとし，三角形の中央付近に水中局を吊り下げて計測を行ったものである．

移動局は左右に2つの送波器を有するので，左右送波器単体の測位結果と左右の送波器の測位結果を用いて求めた送波器間の中点に関するデータが示されている．**図-3.11**の赤枠に示すように水平面内の送波器1の測位ばらつきは50mm，送波器2の測位ばらつきは42mmであった．

b）測距ばらつき

σ_c, σ_τ, σ_{XYZ}より斜距離ρに関するばらつきσ_ρを求める．斜距離は音速と伝搬時間の積なので，音速と伝搬時間による斜距離のばらつき$\sigma_{\rho c\tau}$は，音速と伝搬時間の平均値をμ_c，μ_τとして

$$\sigma_{\rho c\tau} = \sqrt{(\mu_c\sigma_\tau)^2 + (\sigma_c\mu_\tau)^2}$$

で与えられる．ここで μ_c=1500m/s，浮上局が半径115.5mの円周上に配置され，移動局が水深25mの座標原点に設置されているので

$$\mu_\tau = \frac{\sqrt{115.5^2+25^2}}{1500} = 78.8\text{ms}$$

σ_c，σ_τ，は**表-3.6**よりσ_c=0.2m/s，σ_τ=10μs　である．これを代入すると，

$$\sigma_{\rho_{c\tau}} = \sqrt{(\mu_c\sigma_\tau)^2 + (\sigma_c\mu_\tau)^2}$$
$$= \sqrt{(1500\cdot 10\times 10^{-6})^2 + (0.2\cdot 78.8\times 10^{-3})^2}$$
$$= \sqrt{(15\times 10^{-3})^2 + (15.8\times 10^{-3})^2} = 21.8\times 10^{-3}$$

また，σ_{XYZ}=40mmなので，斜距離のばらつき

σ_ρ=$\sqrt{{\sigma_{\rho_{c\tau}}}^2 + {\sigma_{XYZ}}^2}$　は，

σ_ρ=$\sqrt{(21.8\times 10^{-3})^2 + (40\times 10^{-3})^2} = 45.6\times 10^{-3}$m

となる．

c）観測値のばらつきの妥当性検討

σ_c，σ_τ，σ_{XYZ}より予想される測位ばらつきは

HDOP　×　σ_ρ　＝　1.16×45.6mm　＝　52.9mm

となる．

ここで送波器1と送波器2の水平距離ばらつきの実測値はそれぞれ50mmと42mmであり，ほぼ同程度の値であった．検討では伝搬時間と受波器位置のばらつきσ_τ, σ_{XYZ}を大きめに見積もっているものの，開発した浮上式音響測位装置は仕様であるばらつき（精密度）0.5m以内を満たしていると考える．

	移動局中心				送波器 1				送波器 2			
	X	Y	Z	水平距離	X	Y	Z	水平距離	X	Y	Z	水平距離
標準偏差	0.025	0.028	0.094	0.037	0.034	0.037	0.122	0.050	0.029	0.029	0.101	0.042
平均値	1.220	−0.087	24.804		2.041	−1.350	24.778		0.399	1.177	24.830	

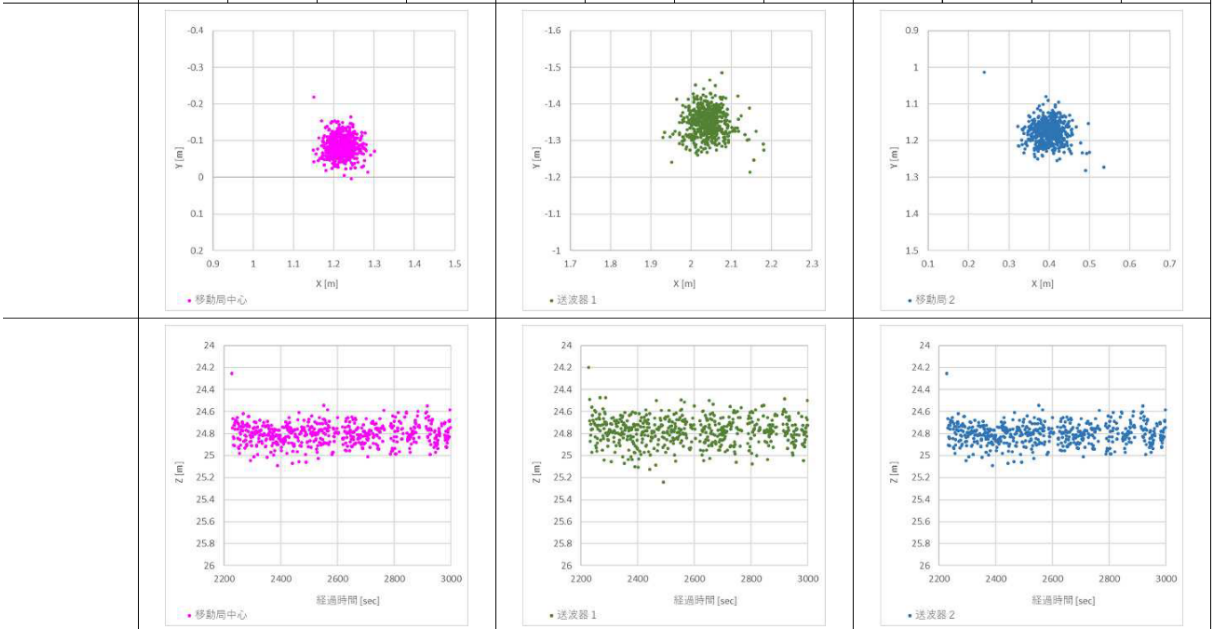


図-3.11　新本牧における測位実験結果（2023年）

（4）測位バイアスの検討

測位バイアス（誤差）について，**表-3.6**で示したバイアス値から考察を行う．

まず音速バイアスb_cは，-2（m/s）≦ b_c ≦ +2（m/s）であり，**図-3.9(b)**より計測範囲（-50，-50）における計測誤差 ε_{xy} ≒ 0.2（m） となる．

次に伝搬時間バイアスb_τは移動局内部時計の誤差として±15μｓと見積もっており，音速を1500m/sとした場合の斜距離誤差は±0.0225（m）となる．ここで前述の音速のばらつきで求めた考え方（斜距離誤差 ρ' =10mmあたり測位誤差ε_{xy} = 6mm）に従い，この値を測位誤差に換算すると$\varepsilon_{\tau xy}$ ＝ $0.6 \times 0.0225 = 0.0135$（m）となる．

また浮上局の位置誤差は，$\varepsilon_{\rho xy}$ ≦ 0.04（m）と見積もっている．

測位誤差の最大値はこれらの誤差要因の絶対値を加算したものであると考え，

$$\varepsilon_{xy} \leqq 0.2 + 0.0135 + 0.04 \fallingdotseq 0.2535 \text{ (m)}$$

となる．

2023年度に実施した新本牧での実海域試験では，**図-3.12**に示すように10トンの方塊ブロックに設置した水中移動局をクレーン付き台船で海底面に設置した．このとき，着底位置の座標はマルチビームソナーにより別途計測を行った．**図-3.13**に浮上局と移動局の位置関係を示す．

表-3.7は，浮上式音響測位装置による測位データとマルチビームソナーによる設置座標を比較したものである．

②の座標が，前述の検討で行った計測範囲（-50，-50）に対応する点であり，その差は0.16（m）であった．また，3機の浮上局を通る円のほぼ中心位置である計測点③においては0.077（m）と非常に高精度に測位できている．なお，計測点①については，測位方法が計測点②，③と異なるため，参考値ではあるが，誤差0.42（m）であった．

以上の結果より，開発した浮上式音響測位装置は仕様である誤差（正確度）0.5m以内を満たしていると考える．

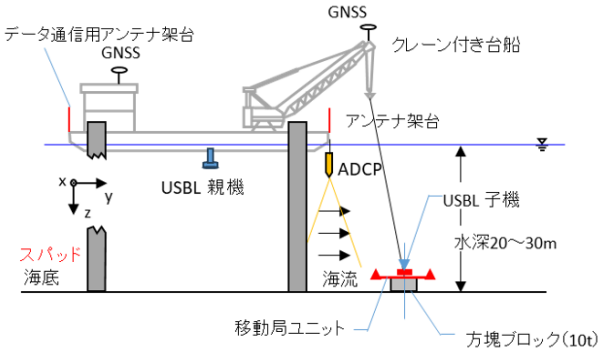


図-3.12　クレーン台船による移動局の設置

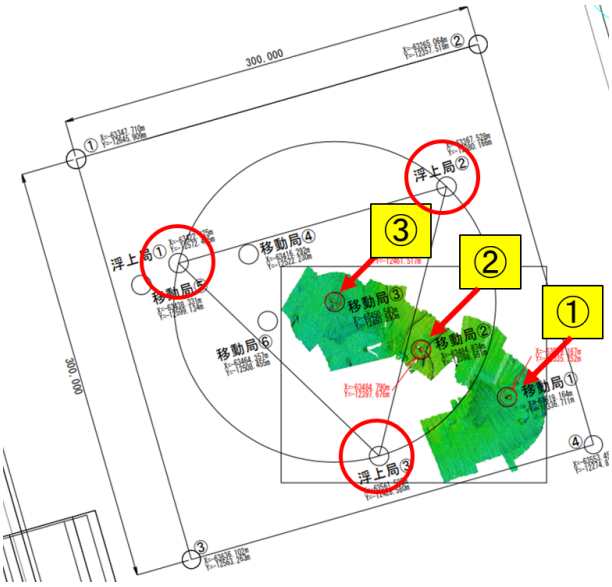


図-3.13　マルチビームソナーによる移動局座標の計測

表-3.7　測位計測結果（m）

	浮上式測位装置		マルチビームソナー		計測誤差		
	X	Y	X	Y	X軸誤差	Y軸誤差	斜距離
①	101.310	-100.423	100.920	-100.266	0.390	-0.157	0.420
②	50.982	-50.052	50.864	-50.160	0.118	0.108	0.160
③	-1.014	0.819	-0.951	0.774	-0.063	0.045	0.077

4. 水中作業情報管理システムの提案

「2.2 現状技術における課題」で述べたとおり，水中マシンガイダンスを活用した遠隔操作による捨石均し作業は既に実海域で実証実験を行っており，運用面におけるブラッシュアップを行っている段階である．しかしこの実験は透明度の高い海域での試験であり，その作業も割石を叩いて均す操作に単純化したものである．今後，こういった水中建設機械を普及させるためには，単純な均し作業だけでなく，さらに複雑な作業に適用させる必要があると考えられ，高度な遠隔操作を実現する必要がある．

ここで高度な遠隔操作の作業として，把持作業への適用を想定する．これは建設機械をハンドリングマニピュレータ（ロボットアーム）として利用することで，被覆石均しや吊り荷の高精度な位置決め，障害物撤去，荷の搬送など，様々な重作業に適用できる可能性がある．例えば**写真-4.1**は災害復旧現場で無人建機により導流堤の被覆ブロックを積んでいる状況である．また，このブロックは無人運搬車により移動させており，荷台に積まれたブロックをバックホウでつかむといった連携作業を実現している．このような作業タスクは，水中作業における被覆ブロックの設置に応用できるものと考えられる．

ここで無人運搬車とバックホウの連携作業について考えると，無人運搬車の操作者はバックホウの位置や現在のアームの状況，旋回範囲を認識し，安全な位置へ走行する運転操作を行う．バックホウの操作者は無人運搬車の位置や方向を認識し，荷台に存在する被覆ブロックを把持する．陸上施工では，光学カメラ映像によりこれらの情報や機体位置の関係性を目視で確認することが可能であるが，水中では濁りにより詳細な光学映像を得ることが困難である．水中での複数作業機械の連携作業のためには，これらの情報を光学映像以外の情報で補う必要があると考えられる．そこで，港湾工事区域に存在する様々な作業機械，船舶のほか，潜水士やROVなどの情報をリアルタイムで収集・管理し，かつ，それらの情報をCG画面として各作業者へ呈示する「水中作業情報管理システム」を提案するものである．

本章では，高度な遠隔操作を実現するための水中バックホウ改造と，水中作業情報管理システムの構築について述べる．

写真-4.1　無人遠隔操作による導流堤ブロックの設置

4.1 水中バックホウの高度な遠隔操作への対応

(1) 水中マシンガイダンスの改良

水中マシンガイダンスについては，浮上式音響測位装置からの信号入力，および，水中バックホウ機体情報を出力するためのシリアルポートを追加した．

また，過去の実海域試験時に，アームストロークセンサの脱落（**写真-4.2**）やバケットストロークセンサの破断（**写真-4.3**）が発生した．この対策として角度センサの2系統化を行っており，既存のストロークセンサのほかに，重力加速度計による傾斜計を，ブーム・アーム・バケットに設置した．この重力加速度計は既存ストロークセンサと比較して，衝撃荷重がかかった際に計測データが静定するための時間が必要となり応答性が低い．また検出分解能もストロークセンサと比較して低いなど性能面で劣るが，物理的な可動部分が無いため，故障率は低いと考えた．この傾斜計とストロークセンサによる関節角度を比較し，角度差が一定時間連続して発生した場合にエラー警告を表示することで，センサの故障を認識することが可能となると考える．

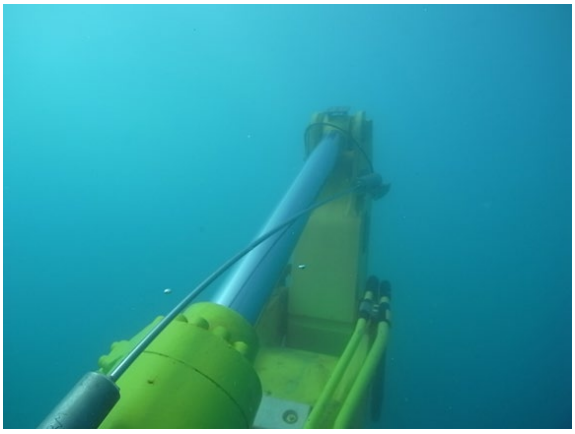


写真-4.2 ストロークセンサの脱落

写真-4.3 ストロークセンサの破断

また，クローラと上部旋回体の角度を検出するためのエンコーダと，方位角のリセットを行うための近接センサを新たに設置している（**写真-4.4**）．

その他，後述するフォークグラブの姿勢計測のためのストロークセンサ，エンコーダなどを接続するため，信号中継防水容器のポートを増設している．

写真-4.5に信号中継防水容器を，**図-4.1**に水中マシンガイダンスのセンサ接続図を示す．

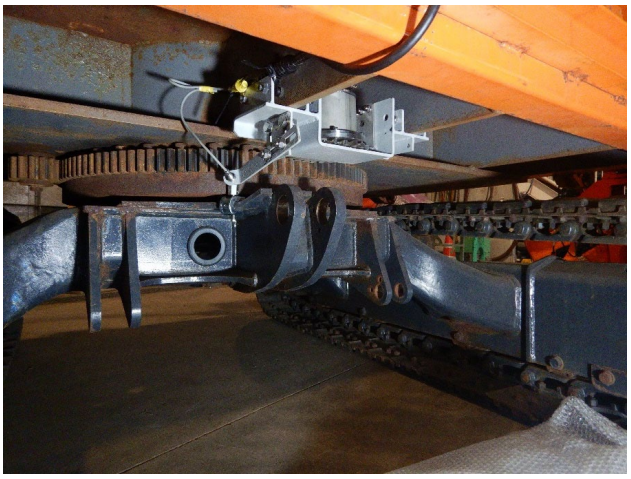


写真-4.4 旋回角検出のエンコーダ

写真-4.5 信号中継防水容器

(2) 把持装置（フォークグラブ）の機構検討

本研究では，今後様々な作業に水中バックホウを適用することを考え，高度な遠隔操作として水中での把持作業を想定している．現状の水中バックホウは，「ロックバケット（**写真-4.6**）」と呼ばれる爪付のバケットで被覆石を掴む作業を行っているが，この形式では手先の自由度が少なく，被覆石を均すためには石を転がすなどの付加作業が必要である．そこで横傾斜と回転の自由度を持つチルトローテータフォークグラブ（**図-4.2**）を提案する．

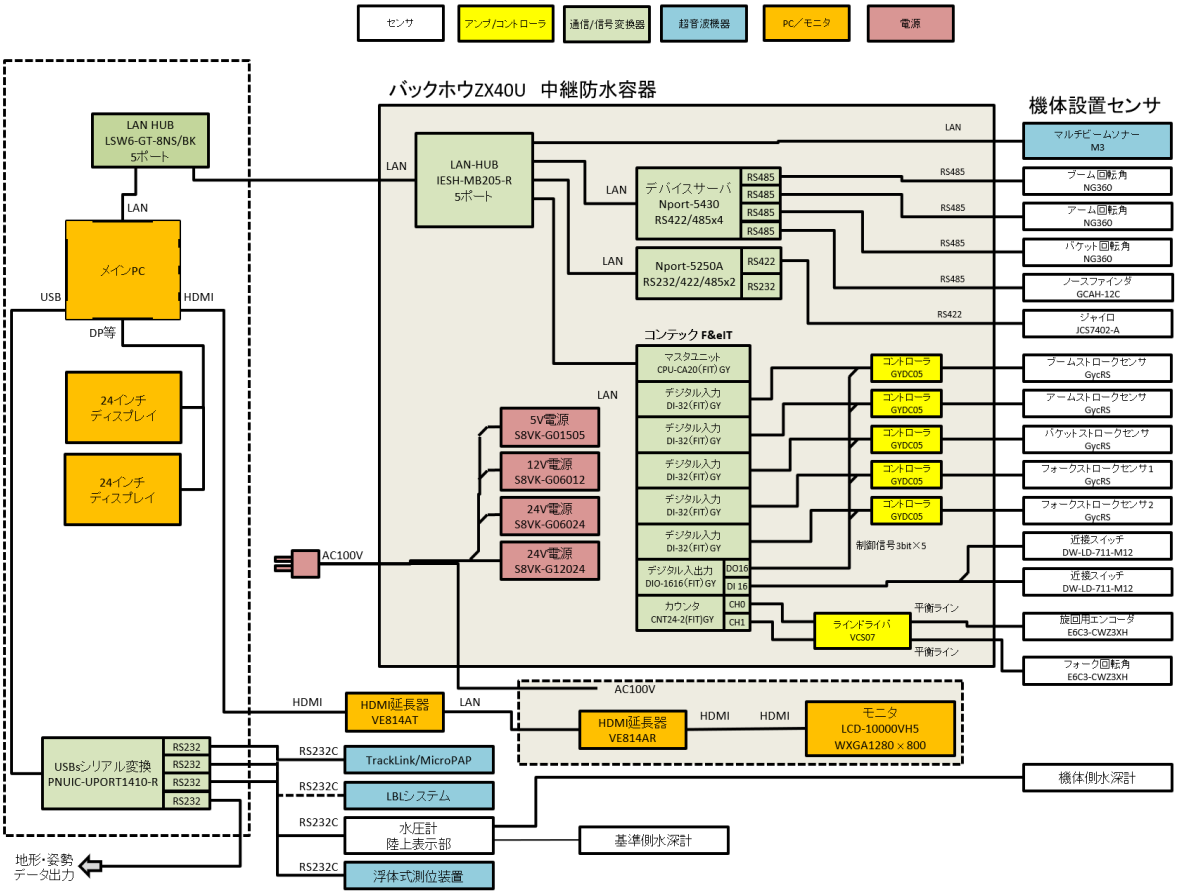


図-4.1　水中マシンガイダンスで使用するセンサの接続図

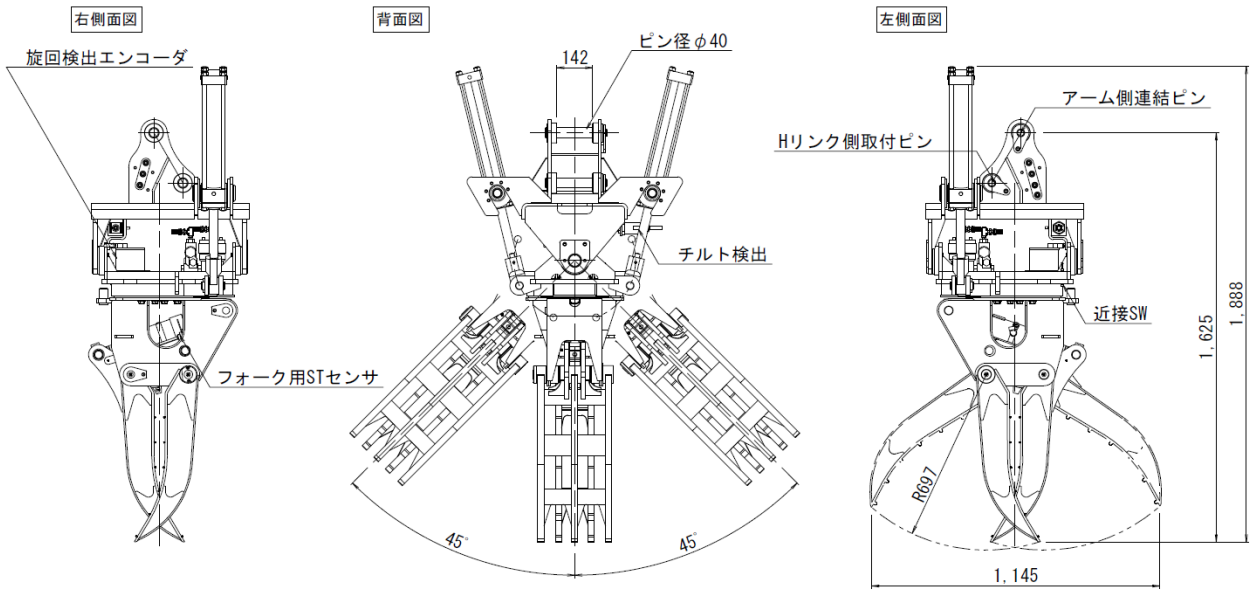


図-4.2　チルトローテータフォークグラブ

バケット操作による前後角度（ピッチング）に加え，左右チルトシリンダにより±45度の横傾斜（ロール）を加えることで，把持対象物の姿勢を任意に定めることが可能と考える．さらに回転（ヨー）を加えることで，対象物の方向も制御可能となり，被覆石や被覆ブロックの設置に有効だと考える．また，マシンガイダンスでの姿勢表示や水中作業情報呈示システムへのデータ送信のため，フォーク開閉，チルト，ローテートにセンサを設置している．これらのセンサ情報により遅延なくフォークグラブの姿勢を表示可能となっている．**図-4.3**にセンサ位置を，**図-4.4**にマシンガイダンスに表示させたCG画面を示す．

(3) 操作インタフェース

チルトローテータフォークグラブを用いた把持作業を考えた場合，一般的な機体操作である「ブーム」「アーム」「バケット」「旋回」「走行」のほか，「フォーク開閉」「フォーク回転」「フォーク左右傾斜」の3自由度の制御入力を追加する必要がある．

写真-4.6　ロックバケットによる被覆石均し

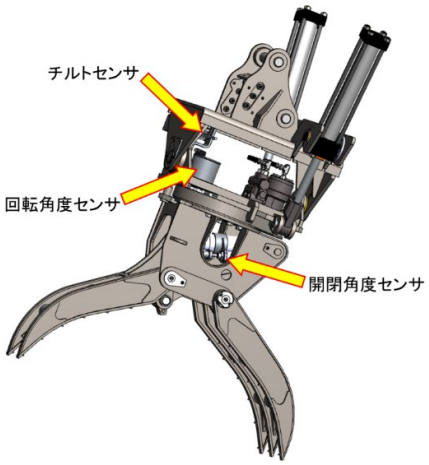


図-4.3　センサ設置位置

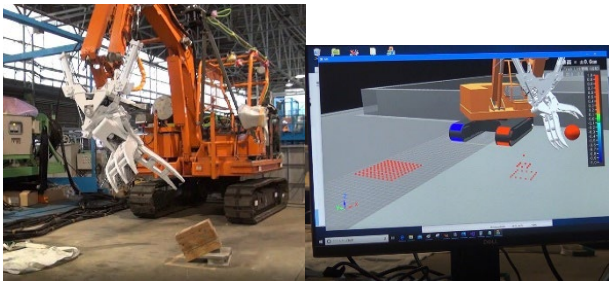


図-4.4　チルトローテータフォークグラブの姿勢表示

チルトローテータフォークグラブによる把持作業と，「ブーム」「アーム」「バケット」の関節姿勢は動作に密接に関連するため，操作入力を別系統にすることは効率低下につながるものと考えられる．また，先端座標を直線的に動かす場合，レバー操作量に応じてブームシリンダ，アームシリンダ，バケットシリンダの速度を変化させるアナログ入力が必要であるが，フォークグラブの場合は他の操作と連動して動かす必要が無いため，オンオフ制御でも十分使用可能と考える．そのため，チルトローテータフォークグラブの制御入力はボタンによるものとした．**図-4.5**に標準操作方式におけるチルトローテータフォークグラブの入力方法を示す．

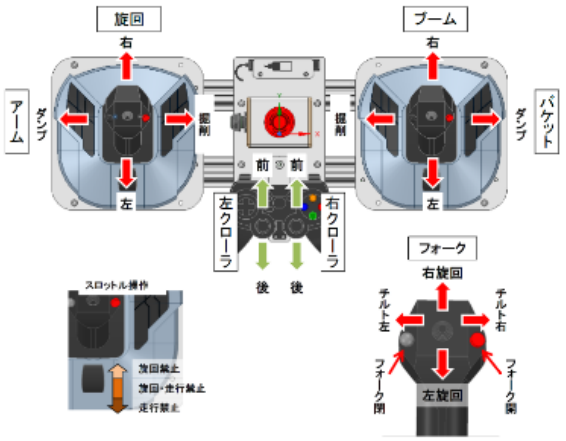


図-4.5　チルトローテータ用入力装置

4.2 水槽での門型クレーンのデータ出力

提案する水中作業状況管理システムでは，複数の作業機械の動作情報を取得し，リアルタイムに管理することで各作業者が情報を共有するものである．このシステムの具現化として，港湾空港技術研究所が所有する水中作業環境再現水槽を対象としてシステムの構築を行うこととした．実海域において管理する機械情報の一つとしてクレーン台船が挙げられるが，システムの開発にあたっては水槽施設である10トン門型クレーンをその代替とした．

この門型クレーンの情報として，「走行位置」，「横行位置」，「クレーンフックの巻下げ量」が必要であり，これらの情報を計測するセンサを設置した．**図-4.6**にクレーンへのセンサ設置位置を示す．

(1) 走行位置

クレーンの走行位置を計測するため，レーザー距離計を躯体下部に設置している．また安定した計測のため，2基のレーザー距離計によりクレーンからの東西方向の距離を計測することとした．たとえば作業員が横切った場合，距離が急激に変化したほうのレーザー距離計のデータを参照しないようにしている．**写真-4.7**に走行用レーザー距離計の設置状況を示す．

(2) 横行位置

トロリーの横行位置を検出するため，クレーン躯体上部にレーザー距離計を設置している．この横行用レーザー距離計も，2基のセンサにより計測データの安定性を確保している．

(3) クレーンフック巻出し量

クレーンフックの位置については，ワイヤ巻取りドラムの回転量を計測するロータリーエンコーダを設置した．このエンコーダはインクリメント方式であり，電源を入れた位置がゼロ点となる．そのため，電源投入後は，フックを上端まで巻き上げて原点を設定する必要がある．**写真-4.8**に巻出し量検出エンコーダの設置状況を示す．

写真-4.7　走行位置検出レーザー距離計

写真-4.8　巻き出し量検出エンコーダ

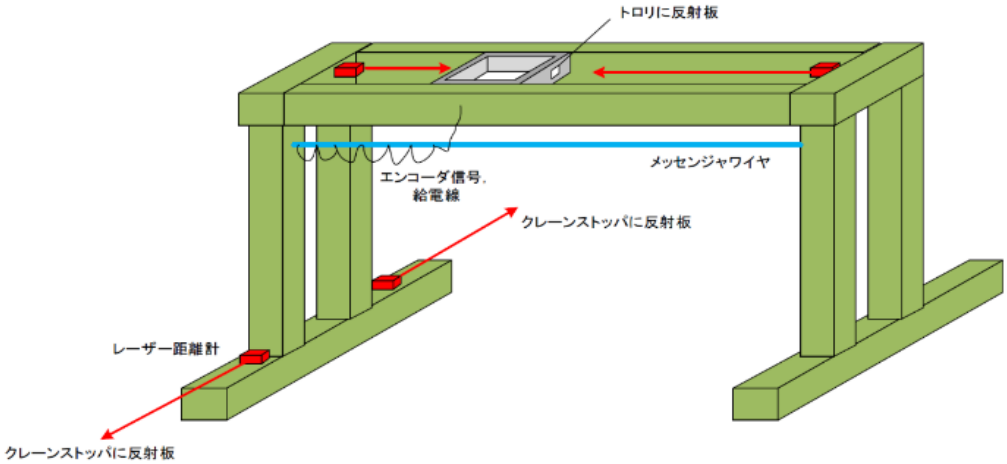


図-4.6　門型クレーンのセンサ設置位置

（4）センサ制御盤

走行位置，横行位置，巻出し量の検出センサをコントロールする制御盤，および，制御用PCをクレーン躯体に設置した．この制御用PCから，機器情報データを出力している．センサ等への電源供給については，クレーン配線の改造を行わず，ポータブルバッテリーからの給電としている．**図-4.7**に制御ソフトウェアの画面を示す．

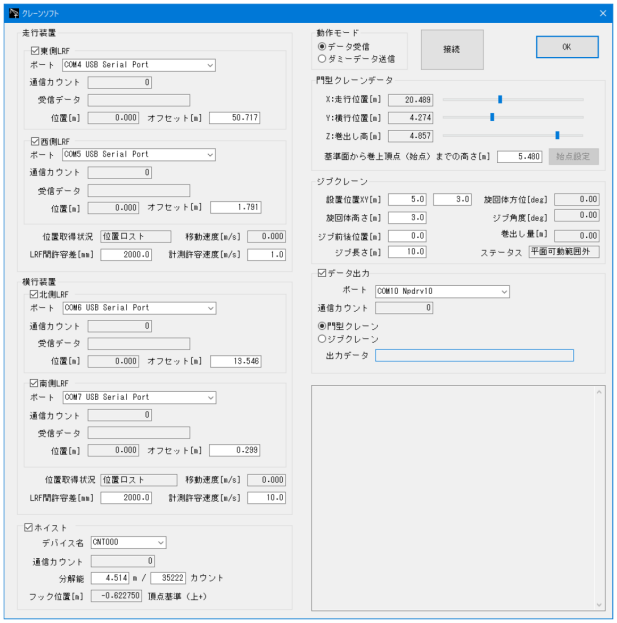


図-4.7　クレーンセンサ出力ソフトウェア

4.3 水中作業情報管理システムの構築

図-4.8に水中作業環境再現水槽を対象とした，水中作業情報管理システムの関係図を示す．

この水中作業情報管理システムでは，水中作業環境再現水槽内に存在する作業機械（水中バックホウ，クレーン，ROV）を対象とした情報を収集するネットワーク部，情報を管理する情報サーバー部，情報をビジュアル化し表示するビューア部から構成されている．

（1）ネットワーク部

各作業機械は異なる船舶に操作者が乗船することを想定し，無線LANによる接続を行った．また，遠隔地の作業事務所等にも情報を送れるよう，リモートデスクトップ等でビューアPCを操作可能にしている．

図-4.9に機器のネットワーク接続図を示す．**写真-4.9**にクレーン用無線機器を示す．なお使用する無線機器は，屋外利用可能な無指向性アンテナを選定している．

（2）情報サーバー部

情報サーバーPCは高速な処理を必要とするため，デスクトップPCを選択している．現場での使用を想定し，機材１式を防塵キャビネットに設置している．この情報サーバー内に，機体形状，船舶形状，地形，既設構造物形状といった既知情報を入力しており，レンダリング等の描画にかかる処理もサーバー側で行っている．

写真-4.10にサーバーPCを示す．

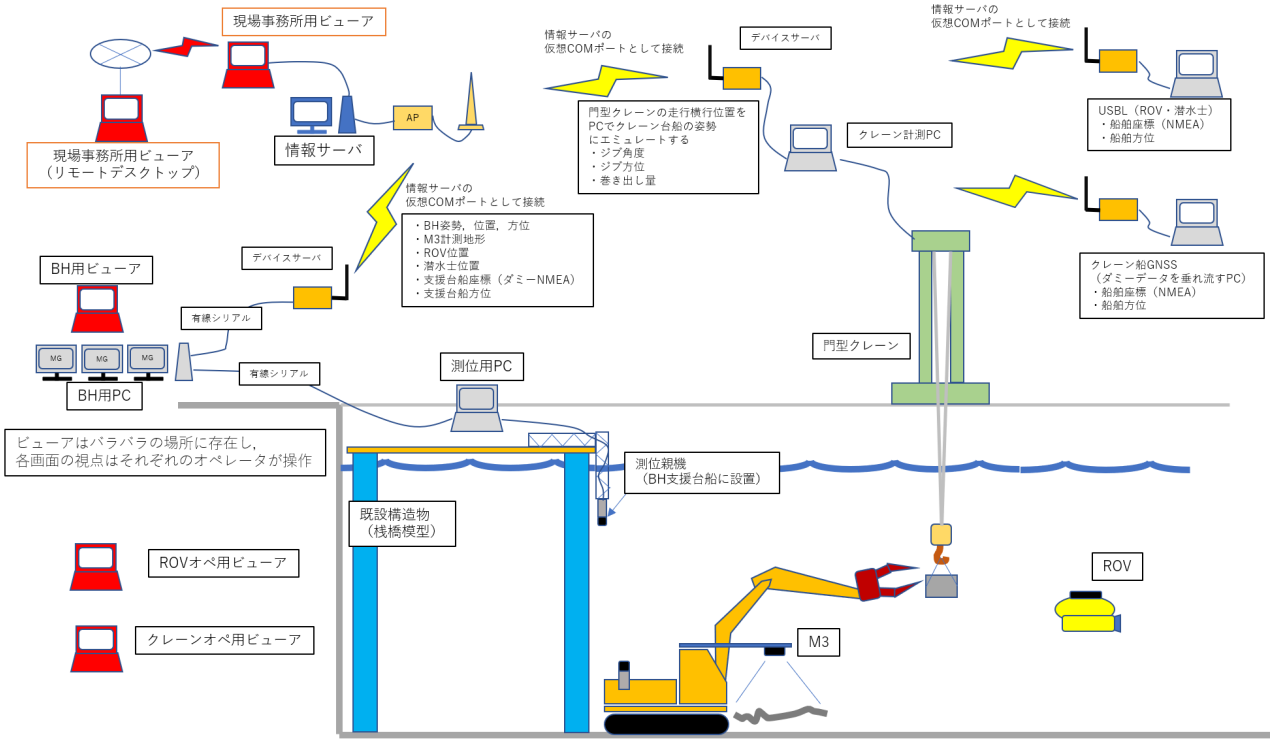


図-4.8　水中作業情報管理システム概念図

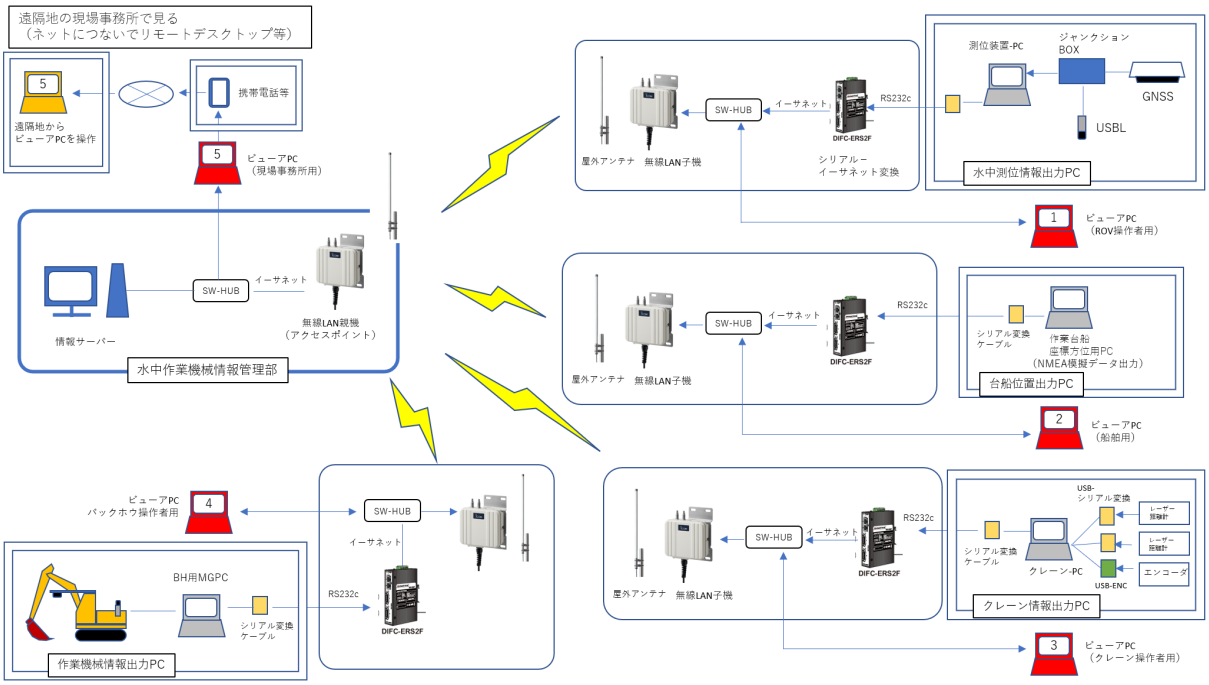


図-4.9　水中作業情報管理システムの機器接続図

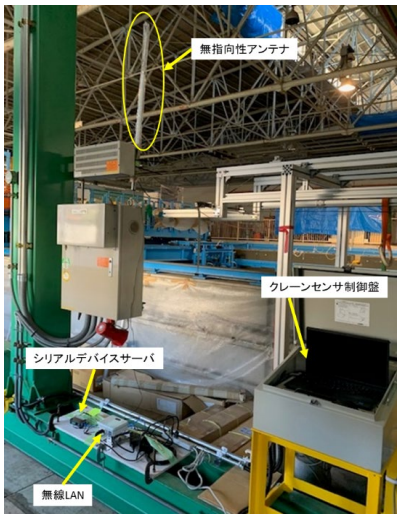


写真-4.9　無線通信機器（クレーン）

写真-4.10　サーバーPC

(3) ビューア部

情報サーバーに接続したビューアPCでは，水中作業環境再現水槽における機器の状況をリアルタイムに表示する．このビューアPCは，各作業者の直近に設置する必要があるため，可搬性の高いノート型PCとしている．

写真-4.11は陸上接続テストの状況である．クレーンフックの下にバックホウの腕がある状況となっている．水中バックホウのマシンガイダンス画面では，水中バックホウ機体と周辺構造物（水槽形状）の情報しか管理できないが，ビューアPC画面（**図-4.10**）では，水中バックホウ姿勢とクレーンの位置，フック位置，水槽形状が表示され，それぞれの位置関係が認識可能である．

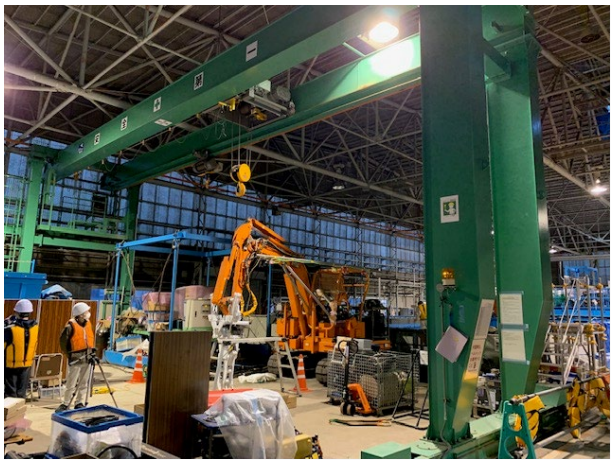


写真-4.11　通信試験状況（陸上実験場）

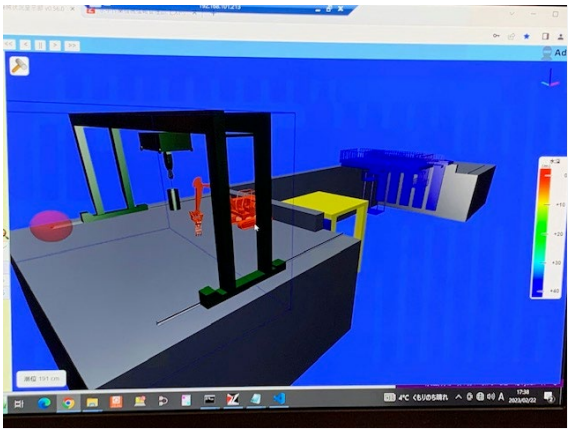


図-4.10 ビューアPC画面

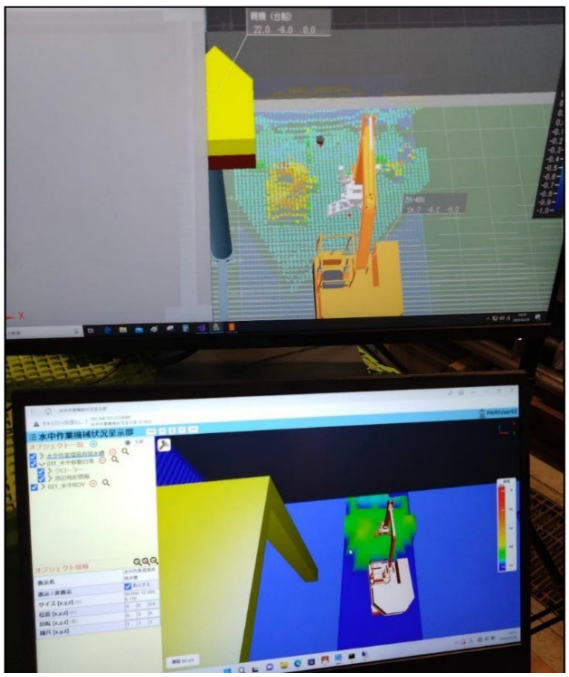


図-4.11 マシンガイダンス計測地形の共有

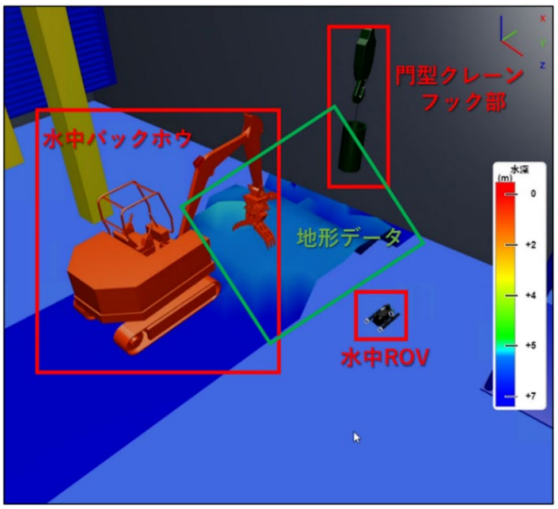


図-4.12 水中バックホウ，クレーン，ROVの位置表示

また水中マシンガイダンスで計測した地形データを，ビューアPCでも共有表示することが可能である．ただしネットワーク負荷の問題から，地形情報は50cm間隔のメッシュデータに間引いて送信しており，マウンド割石の個別形状のような詳細な情報は表示できていない．**図-4.11**にマシンガイダンスの地形情報とビューアPCの地形情報の比較を示す．

図-4.12は，水中バックホウとクレーンのほか，さらにROVの位置情報を加えてビューアPCで表示させたものである．このように水中に存在する各機械の位置・姿勢，作業状況等を，各作業者が共有できるものである．

(4) 通信プロトコル

水中作業情報管理システムで収集・管理する対象として，**表-4.1**に示す機器を想定している．

水中作業機械情報管理システムで管理する機械は様々であり，また，その形状や大きさも機体や船舶によって異なる．ここで情報として必要なのは，機体や船舶の位置方位や姿勢であることから，船舶や台船等については，一般的な形状の三次元モデルを基本とし，そのサイズを変更することとした．

さらに水中バックホウやクレーンなど関節自由度を持つ機械については，形状だけでなく，関節軸の位置等の情報も必要となる．このような自由度を持つ機体については，情報パラメータとして関節軸の位置を設定することとした．これらの情報は事前にサーバー側で保有し，機体からの情報は，位置情報や姿勢角度情報のみとすることで，シリアルデータの通信量を下げることとした．以下に送信する機体情報の項目を示す．

表-4.1 水中作業状況管理システムの管理対象

	管理対象機械	最大数	割り振るID（想定）
1)	門型クレーン	1	ID：000
2)	ジブクレーン	5	ID：001～005
3)	水中移動台車	5	ID：011～015
4)	水上ROV	5	ID：016～020
5)	水中移動体	20	ID：021～040
6)	水中測位装置設置船舶	5	ID：041～045
7)	BH支援台船	5	ID：051～055
8)	クレーン台船	5	ID：056～060
9)	土運船	10	ID：061～070
10)	平台船	10	ID：071～080
11)	小型船舶（潜水士船、警戒船等、交通船等を想定）	20	ID：081～100

1）門型クレーン情報

水中座標環境再現水槽付帯設備である10t門型クレーンを想定しており， PCから，クレーン走行距離，クレーン横行距離，巻き出し量の情報をRS232C準拠のシリアル通信で送信する．

2）ジブクレーン情報

一般的な形状のクレーン台船を想定しており，PCからは，ジブクレーンの情報として，ジブ傾斜，ジブ方位，巻き出し量の情報をRS232C準拠のシリアル通信で送信する．本情報はクレーン台船に搭載されたクレーン情報を想定したものでるが，クレーンを搭載する台船の情報は別に送信するものとした．

3）水中移動台車情報

水中マシンガイダンスを搭載した水中移動台車を想定しており，PCからは，機体姿勢や機体座標，周辺地形の情報をRS232C準拠のシリアル通信で送信する．

4）水上ROV

港湾空港技術研究所が所有する桟橋点検用ROVを想定しており，PCからは，ROVの情報として，位置，方位，機体姿勢，水深の情報をRS232C準拠のシリアル通信で送信する．その送信フォーマットはGNSS方位計のNMEA0183センテンス（$GPGGA，$HCHDG，$PRDID，$DBS）に準拠する．

5）水中移動体測位情報

潜水士，ROV等の複数の水中部移動体の座標であり，その通信フォーマットは水中測位システムに依存する．

なお，水中マシンガイダンスシステムでは「LinkQuest社製TrackLink1500」，「Evologics社製 S2C」，「Kongsberg社製μPAP200-NEL」を想定しており，それらに準拠した通信フォーマットを使用することとした．

水中移動体の管理番号（ユニークID）は，通信フォーマット中のTarget numberから取得することとし，管理番号の範囲はID021からID40の20機とする．

6）水中測位装置設置船舶情報

前項「5）水中移動体測位情報」で使用するUSBL等を設置した船舶の座標であり，その送信フォーマットはGNSS方位計のNMEA0183センテンス（$GPGGA，$HCHDG）に準拠させている．

但しNMEA0183センテンスにはユニークIDを定める項目が存在しないため，情報サーバーPCと接続するイーサネット／シリアルコンバータの静的IPアドレス，または，情報サーバーPC上で設定する仮想COMポート番号と管理IDを関連付けることとする．

7）～11）船舶測位情報（水中BH支援台船，クレーン台船，土運船，平台船，小型船舶）

水中BH支援台船，クレーン台船，土運船，平台船，潜水士船，警戒船等の海上移動体の座標，および，方位であり，データは各船舶に設置したGNSS方位計のNMEA0183センテンス（$GPGGA，$HCHDG）に準拠する．但しNMEA0183センテンスにはユニークIDを定める項目が存在しないため，情報サーバーPCと接続するイーサネット／シリアルコンバータの静的IPアドレス，または，

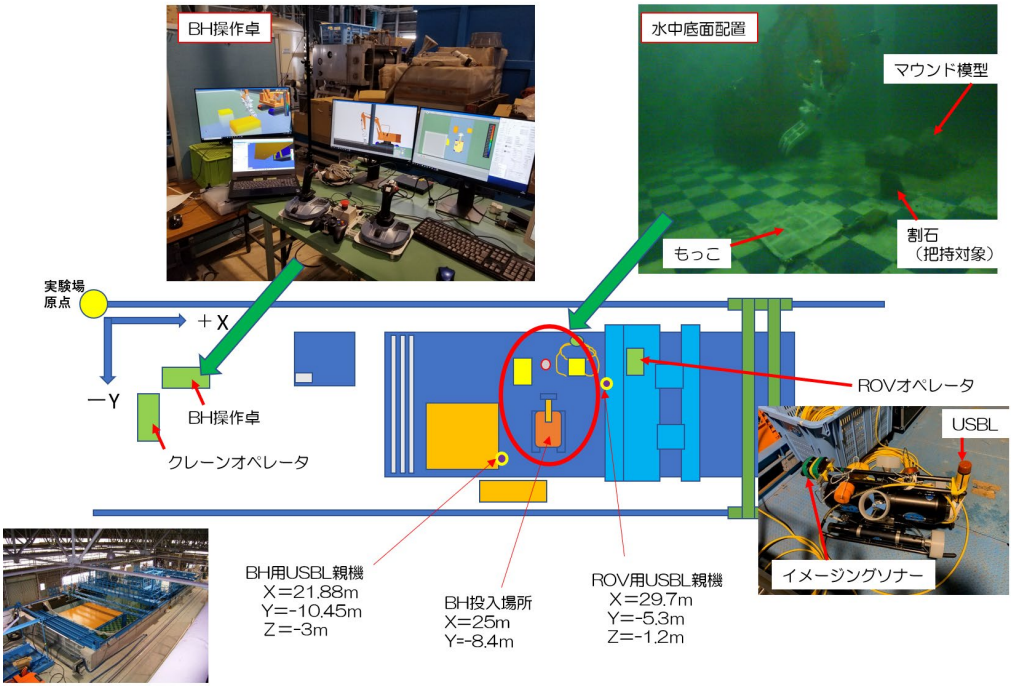


図-4.13　水槽実験時の機器配置図

情報サーバーPC上で設定する仮想COMポート番号と管理IDを関連づけることとした．

4.4 連携作業実験

構築した水中作業情報管理システムを用い，当所水中作業環境再現水槽における協調作業の実験を行った．作業タスクとしては，水中での遠隔操作把持作業を想定し，以下の作業手順を行う．

①水中部の状況を水中バックホウ(以下，BH)に設置したM3ソナーで計測する．
②BH操作者は把持対象の割石の位置を認識し，把持する
③BH操作者は把持した割石を，既知の位置のモッコ（ネット状スリング）の上に置く
④ROV操作者はモッコの上に割石が置かれたことを確認し，クレーン操作者に伝える
⑤クレーン操作者はビューアPCにより，バックホウ先端にモッコを誘導する
⑥BH操作者はビューアPCにより，クレーン吊り荷の位置に把持措置を誘導する
⑦BH操作者は，手先カメラによりクレーン吊り荷を確認し把持する
⑧BH操作者は，M3ソナーで計測したマウンド模型の上に，掴んだ吊り荷を置く

このタスクは，水中の情報をマシンガイダンスやビューアPCの情報により認識・共有し，目視に依存せず作業の連携が可能であることを確認するものである．**図-4.13**に水中作業環境再現水槽での配置図を示す．

なお，3.で示した衛星測位を活用した浮上式音響測位装置は，実験水槽建屋に屋根がありGNSS測位ができないため本実験では使用しない．バックホウの位置は「Evologics社製 S2C」，ROVの位置は「Kongsberg社製 μPAP200-NEL」により計測した．

バックホウ操作者，クレーン操作者は水槽から離れたそれぞれ別の作業卓におり，各ビューアPCで状況を認識している．**写真-4.12**にバックホウ操作者の操作卓を示す．

ROV操作者は水槽上のデッキに配置しており，このROV操作者のみ安全監視として水槽内の状況を目視確認している．このROVには，状況を確認するための水中カメラのほか，水中位置を測位するUSBL（μPAP子機）と，濁った場所での認識を目的としたイメージングソナーを付加している．**図-4.14**にイメージングソナーによる音響映像を示す．

この音響映像はほぼ遅延なく表示されており，水槽壁面やクローラ，マウンド模型などの平面位置関係が認識できていることがわかる．ただし，この映像情報には高さ情報が入っていないため，立体的な認識には適しておらず，安全確保の目的で各機械の位置関係を認識するために使用したものである．

写真-4.12　遠隔操作席のモニタ配置

図-4.14　ROVに設置したイメージングソナー映像

写真-4.13～写真-4.18は，ROVのカメラで撮影した水中の作業状況である．ROVの機材は水槽上部ブリッジに設置しており，バックホウ操作者，クレーン操作者はこれら水中の映像を見ずに操作を行った．

クレーン操作者はビューアPCで水中のバックホウの動作状況をリアルタイムに認識し，ネット状スリングに石を置き，バックホウアームが安全な位置に移動したことを確認して，巻き上げ動作を開始した（手順③）．

さらに，バックホウのチルトローテータフォークグラブの位置にクレーンフックを移動する際，操作者は水槽を見ることなくビューアPC画面で位置関係を認識し，ネット状スリングを把持した（手順⑤～⑦）．

このように，水中での作業機械やクレーンフックの位置を共有することで，吊り荷の把持誘導といった連携作業を行うことが実現できており，提案する水中作業情報管理システムによる情報共有は，目視に依存できない水中での連携作業に有効であることが示された．

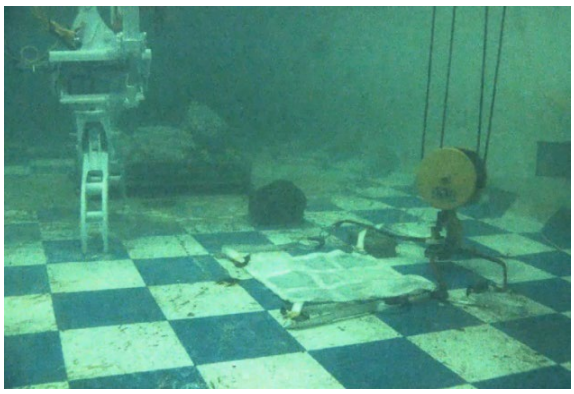


写真-4.13　初期位置

写真-4.14　割石の認識と把持（手順 ②）

写真-4.15　スリング位置に置く（手順 ③）

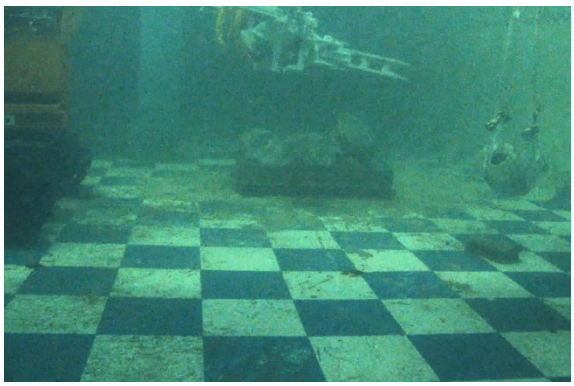


写真-4.16　クレーン作業による割石移動（手順 ⑤）

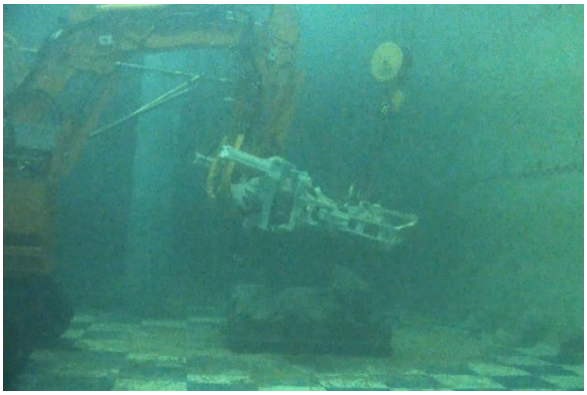


写真-4.17　吊り荷を把持（手順 ⑦）

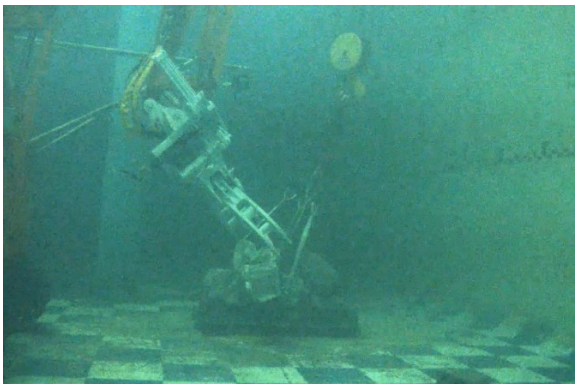


写真-4.18　荷を掴んで誘導（手順 ⑧）

5. 京浜港ドックにおける模擬作業実験

5.1 実験目的

ICT型水中バックホウの高度な遠隔操作を実現するにあたり，水中マシンガイダンス等の機体情報を計測し，ビジュアル的に表示することは必要な技術である．特に水中の機体位置については，既設構造物との接触や法肩からの転落などの事故に直結する重要な情報である．また，水中部での施工や状況確認，誘導は潜水士の目視に依存していることが一般的であるが，水中版マシンガイダンス等を装備したICT型水中バックホウでは，機体に設置したセンサで様々な情報を取得している．また起重機船でも吊り荷やグラブバケットの誘導システムや，ROVや潜水士の水中位置を計測する音響測位システム等，目視がきかない水中での作業状況把握に対し，様々な技術開発が進められている．しかしながら，これらの情報は各操作者が使用するのみであり，情報の共有はされていないのが現状である．

ここで，工区に存在する様々な施工機械や船舶，作業者等の情報を一元的に管理し，かつ，それらの情報を様々な場所で呈示する情報共有システムを構築することで，いわば「箱庭」のように複数の作業者が水中での作業状

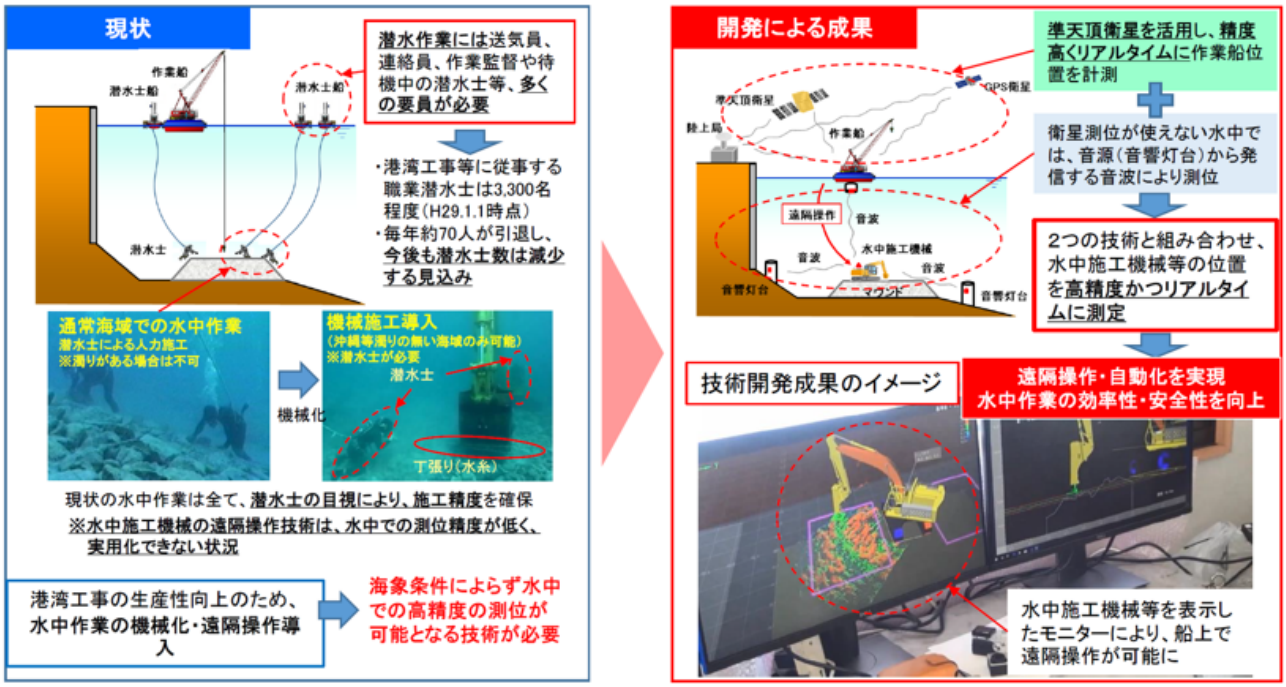


図-5.1　ICT型水中バックホウの高度な遠隔操作の概念図

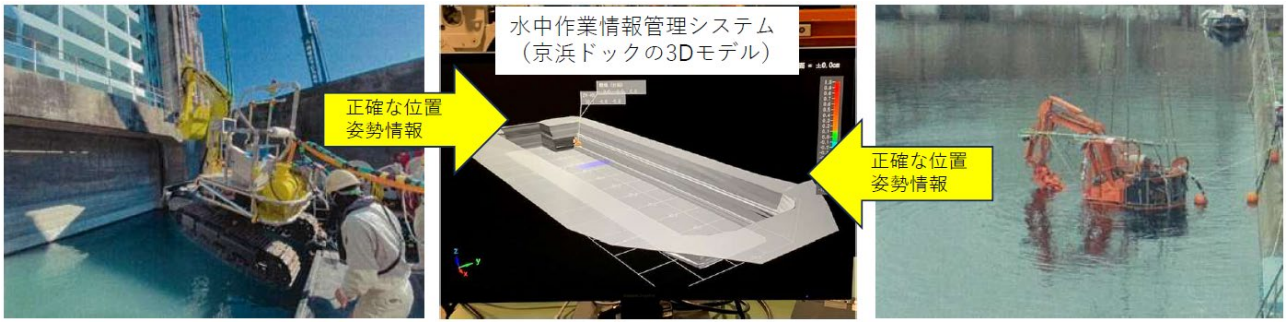


図-5.2　複数の建設機械を用いた協調作業実験のイメージ

況をリアルタイムに認識可能（水中作業の見える化）となり，様々な作業船が近接する現場条件での安全性向上や複数機械の連携作業が実現できるものと考えられる（図-5.1）．そこで，港湾工事区域に存在する様々な作業機械，船舶のほか，潜水士やROVなどの情報をリアルタイムで収集・管理し，かつ，それらの情報をCG画面として各作業者へ呈示する「水中機械化施工管理システム」により，これら水中作業情報の集中管理を行うことで，作業状況が共有されるほか，近接する複数の作業機械の安全確保や，事故が発生した時の記録として解析することが可能となり，将来的な安全面の監視に使用できることが期待できる．さらに機械の動作記録から，作業能力等の評価に利用することが考えられる．

本章では，「衛星測位技術を用いた浮上式音響測位装置」と「水中機械化施工管理システム」をICT型水中バックホウに適用し，いままで困難であった水中作業の見える化と協調作業の実証実験（図-5.2）についてとりまとめるものである．

5.2 使用機材

(1)　浮上式音響測位装置

京浜港ドックにおける実験に使用した浮上式音響測位装置及び周辺機材について仕様及び写真を示す．

開発中の浮上式音響測位措置は前述の図-2.9に示すように，3基の浮上局，1つの移動局，1つの基地局より構成される．

図-5.3に浮上式音響測位装置のブロック図を示す．

港湾航空技術研究所が所有する水中バックホウ（ZX40）への水中移動局の搭載状況について写真-5.1に示す．

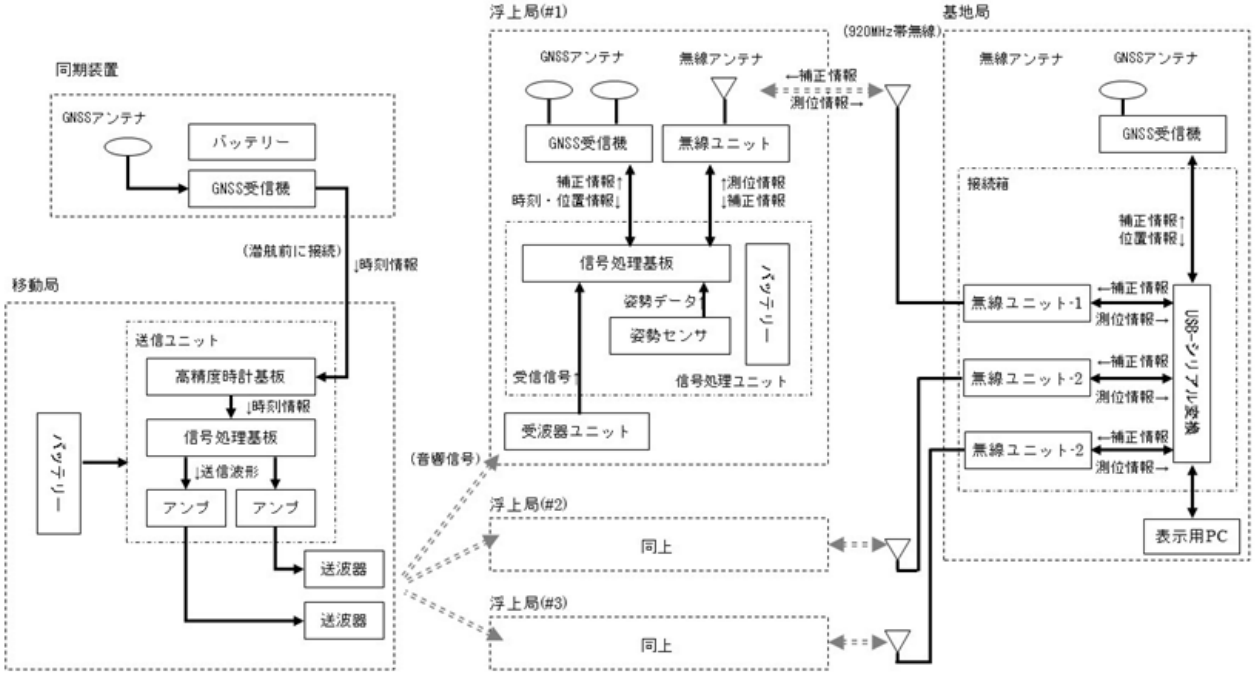
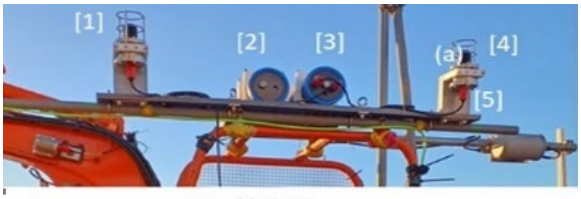


図-5.3　浮上式音響測位装置の接続ブロック図



(a) 拡大図

[1]送波器-2，[2]バッテリーユニット，
[3]送信回路ユニット，[4]送波器-1，
[5]バックホウ用架台

写真-5.1　水中バックホウに設置した移動局

(2) ICT型水中バックホウZX40（遠隔操作型）

京浜港ドックにおける実験に使用したICT型水中バックホウとして，当所が所有するZX40を使用する．本機体には遠隔操作を行うための電磁比例弁を搭載しており，高度な把持作業を行うためのチルトローテータフォークグラブを装備したものである．**表-5.1**に水中バックホウZX40の仕様を示す．

表-5.1　水中バックホウZX40の仕様

ベースモデル	日立建機社製0.13立米級ミニショベル　ZX40
実重量	6トン（ベースモデルは4ｔクラス）
動力	三相220V　22kW水中モーターに変更
マシンガイダンスセンサ	装備済
遠隔操作	可（アタッチメント制御用にエクストラポートを9個口追加）
アタッチメント	デムエ業社製チルトローテータフォークグラブ

(3) ICT型水中バックホウTKM30（水中マシンガイダンス対応）

京浜港ドックにおける実験では，2台の水中バックホウによる連携作業を行うこととしている．そのため，もう1台の水中バックホウとして，極東建設株式会社が所有するTKM30（**写真-5.2**）を使用する．本機体には，電磁比例弁が装備されていないため潜水士が搭乗して操作を行う必要がある．ただし，機体姿勢情報等を表示するマシンガイダンスに対応した機体である．**表-5.2**に水中バックホウTKM30の仕様を示す．

写真-5.2　TKM30（水中マシンガイダンス搭載）

表-5.2　水中バックホウTKM30の仕様

ベースモデル	クボタ製0.09立米級ミニショベルU30s
機体質量	3トン以下
動力	三相440V　22kW水中モーターに変更
マシンガイダンスセンサ	マシンガイダンスセンサ：装備済
遠隔操作	不可
アタッチメント	デム工業社製チルトローテータフォークグラプ

（4）　潜水士測位装置

潜水士の位置を計測するため，市販のUSBL測位装置である「Kongsberg社製μPAP」を使用する．親機は救命環により水面下約80cmの位置に設置し，ロープによりドック中央付近に固定した．また設置後の位置は光学測量器により座標を計測している．μPAP設置状況を**写真-5.3**に示す．

潜水士には背中に子機を取り付けている．潜水士への子機設置状況を**写真-5.4**に示す．

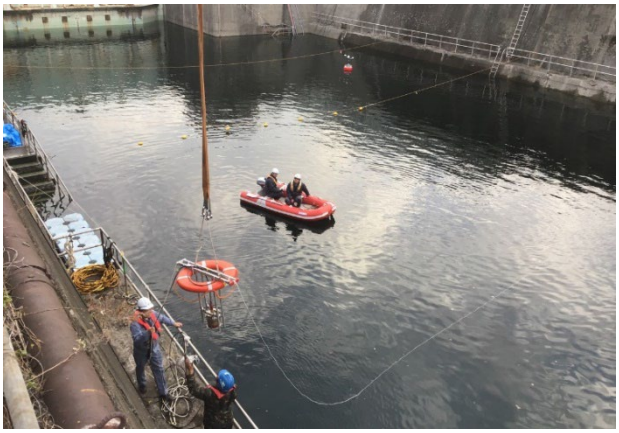


写真-5.3　トランスデューサの設置(μPAP)

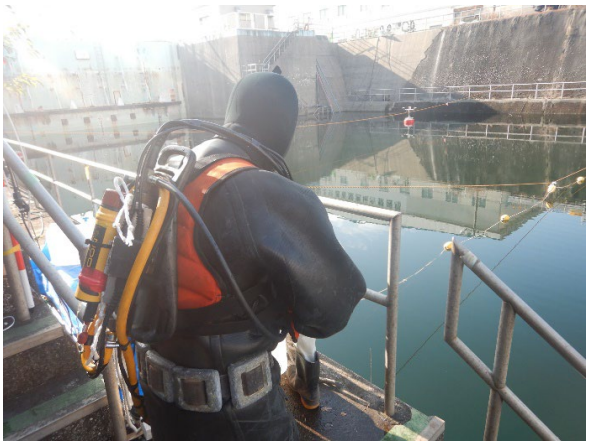


写真-5.4　潜水士に設置したトランスデューサ

（5）　京浜港ドックにおける機材配置

京浜港ドックにおける実験では，「浮上式音響測位装置」「ICT型水中バックホウ」「水中作業状況管理システム」を用いて，複数台の水中バックホウによる模擬作業実験を行う．本実験での接続関係図について**図-5.4**に示す．

また，仮設ハウス内に計測室を設置し水中バックホウの遠隔操作用，マシンガイダンス用の各種機器，浮上式音響測位装置基地局，水中作業状況管理サーバーなどの機器を設置しており，計測室の機器配置や接続関係図を**図-5.5**に示す．

5.3 浮上式音響測位装置の精度

浮上式音響測位装置の計測精度について，実際の使用環境を模擬した条件で実験を行った．水中バックホウZX40にポールを立て気中に露出したプリズムをT/S（トータルステーション：光学測量機）により測量した座標を真値（**表-5.3**）と仮定し，水中測位装置移動局による計測データとを比較する．なお，実験機器の配置とZX40の移動経路を**図-5.6**に示す．

表-5.3　測位点の座標（T/S　①～⑦）

測位ポイント	X座標(m)	Y座標(m)
①	58.049	21.457
②	55.552	16.142
③	58.159	16.184
④	60.947	16.233
⑤	59.879	16.860
⑥	59.965	19.423
⑦	60.056	21.540

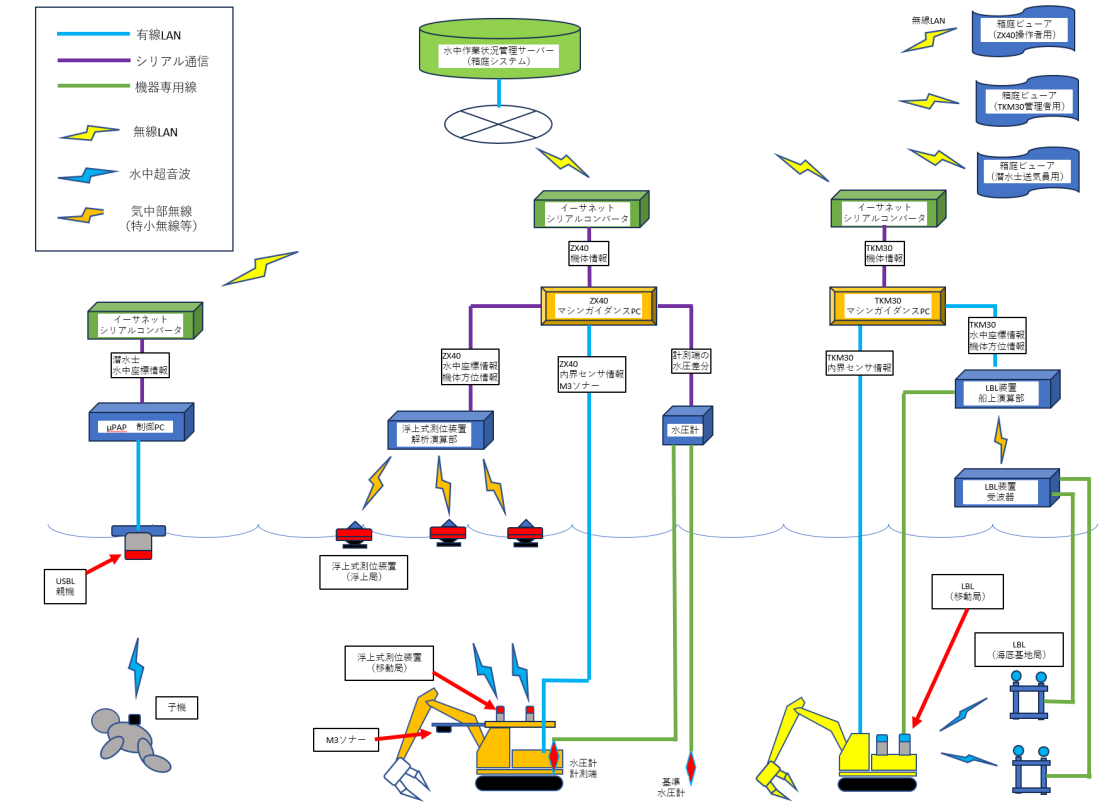


図-5.4　測位装置の接続関係図

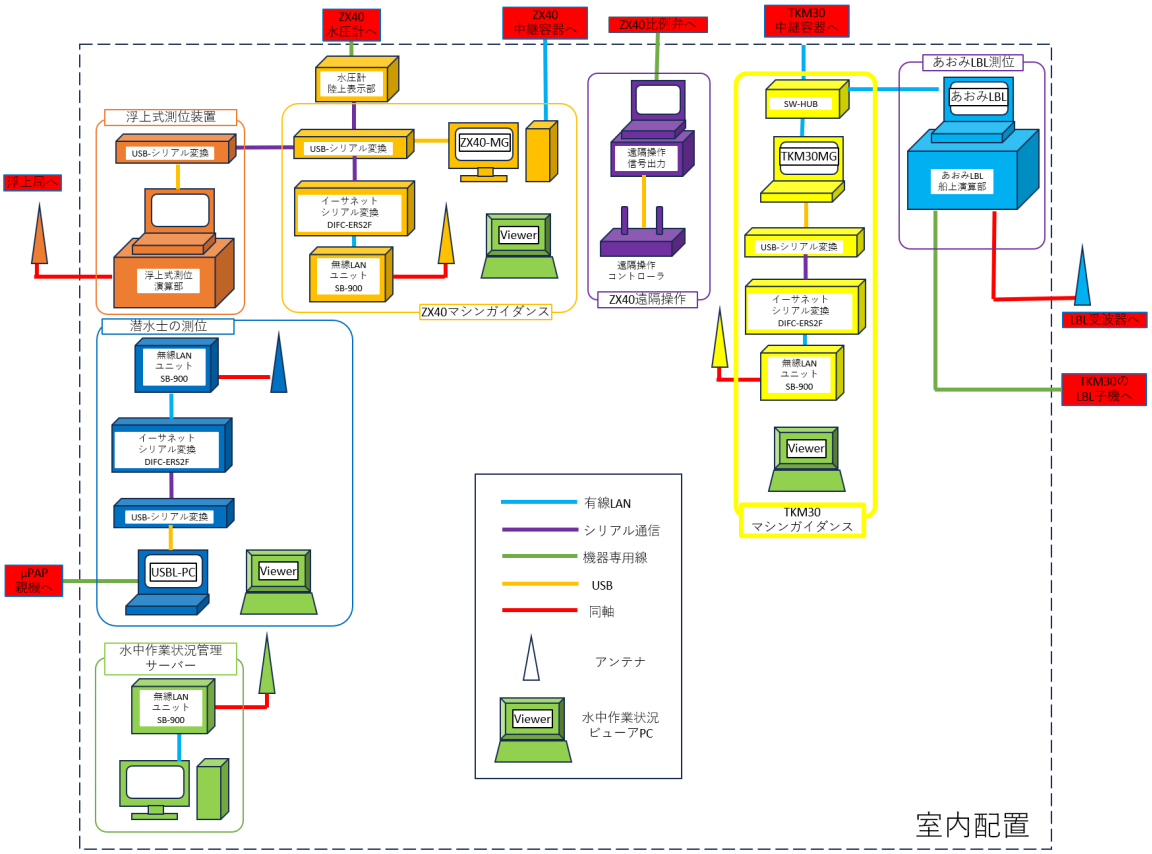


図-5.5　計測室の配置

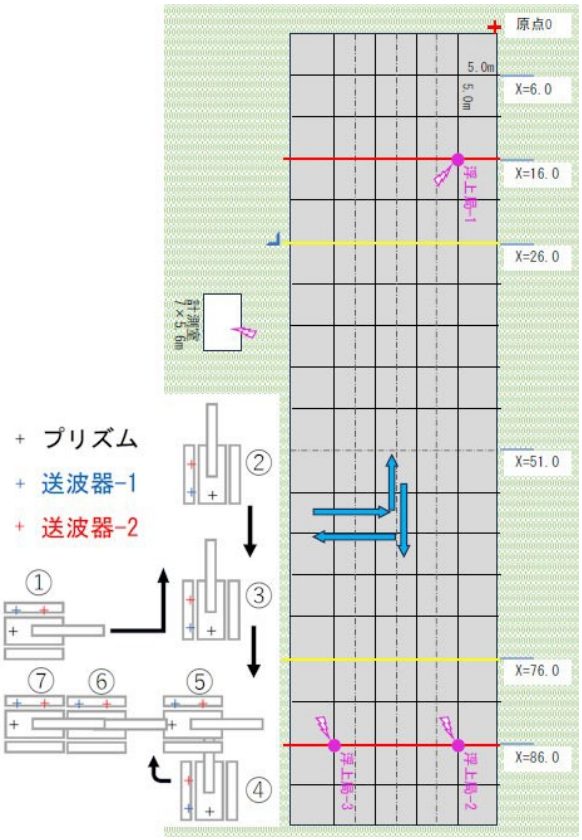


図-5.6　京浜港ドックにおける配置と移動経路

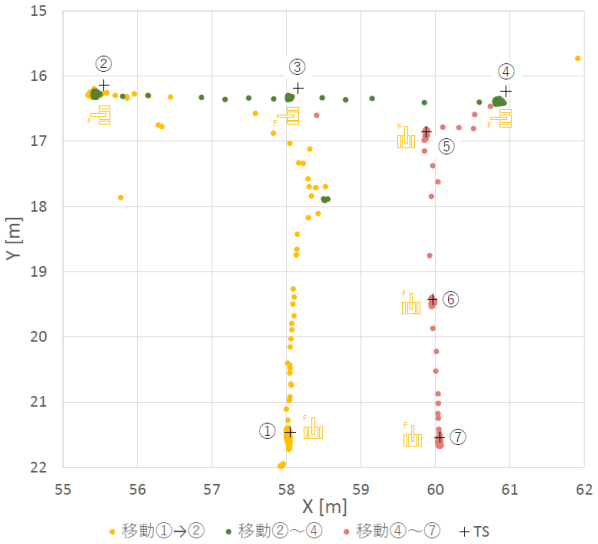


図-5.7　ZX40の移動経路

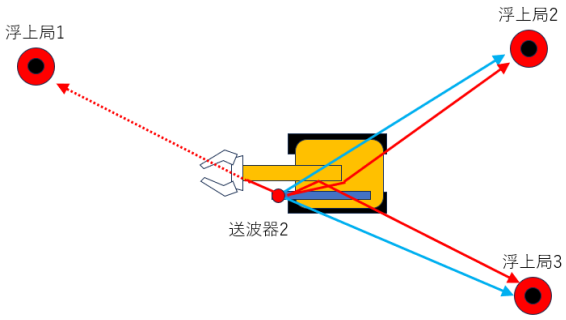


図-5.8　浮上局-送波器とバックホウアームの干渉

表-5.4　測位誤差とばらつき

測位ポイント	BHの正面方向	T/S計測真値からの平均斜距離（測位誤差）	浮上局が成す三角形との位置	計測座標の中心座標からの標準偏差（ばらつき）
②	X軸方向	0.1656	内側	0.012
③		0.1870		0.016
④		0.1884		0.016
⑤	Y軸方向	0.0227		0.011
①		0.0794	外側	0.023
⑥		0.0349		0.020
⑦		0.0510		0.033

(1)　移動時の測位精度

水中に存在するZX40を移動させたときの，浮上式音響測位装置の計測結果を図-5.7に示す．

測位ポイント②③④間では点間の間隔が広くなっており欠測がみられるが，前述の図-2.8と比較して，極端に誤差やばらつきが大きくなっている点が存在せず機械の移動経路が認識できていることがわかる．②③④付近の欠測要因としては，バックホウの方向によるブームの反射が考えられる．図-5.8に示す通り，送波器2の近傍にブームが存在するため，浮上局1や3の方向の遮蔽物・反射物となったのではないかと考えられる．送波器の高さには十分考慮する必要があると言える．

(2)　静止時の測位精度

停止時の測位精度について，測位ポイント①②における約60秒間の測位結果を図-5.9に示す．①に対し②のほうがばらつきを少なく計測できていることがわかる．①における送波器-1と送波器-2の測位点群の標準偏差はそれぞれ0.030m，0.032mに対し，②での測位点群の標準偏差はそれぞれ0.014m，0.020mであった．①と②の違いとして，①は3基の浮上局の設置位置を結ぶ三角形の外側での計測となっており，②は内側となっている．

表-5.4に①～⑦の測位ポイントごとの測位誤差の平均とばらつきを示す．測位誤差は光学測量器で計測した真値座標からの平均斜距離，ばらつきは浮上式音響測位装置で計測した点群の標準偏差である．測位ポイント②③④については，測位誤差が大きい結果となった．

同じ浮上局三角形の内側で距離が近い測位ポイント④⑤で比較すると，測位ポイント⑤のほうが測位誤差が小さいことから，この2点で誤差が大きく異なる要因はバッ

クホウの方向によるものであると考えられる．さらに**図-5.7**から，測位ポイント②③④はT/S真値よりバックホウ方向を基準として左前方側に存在するように計測されている．このような位置となるためには，移動局と浮上局2，3との距離が実際より長く計測されたものであり，前述の**図-5.8**と同様にバックホウのアームにより音が反射し，移動局と浮上局の伝搬時間に誤差が生じたものと考えられる．具体的には，移動局と浮上局2はアーム付近の音の回折により，移動局と浮上局3はアーム側面の反射により，斜距離が長く計測されたものと予想する．

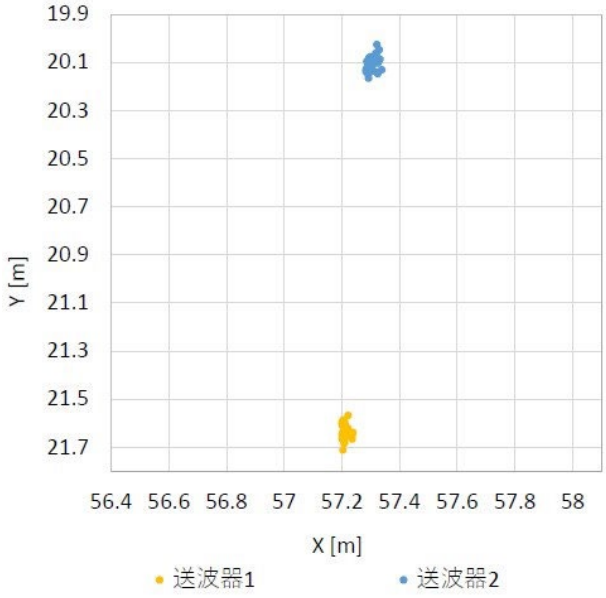


図-5.9 (a)　測位結果（point：①）

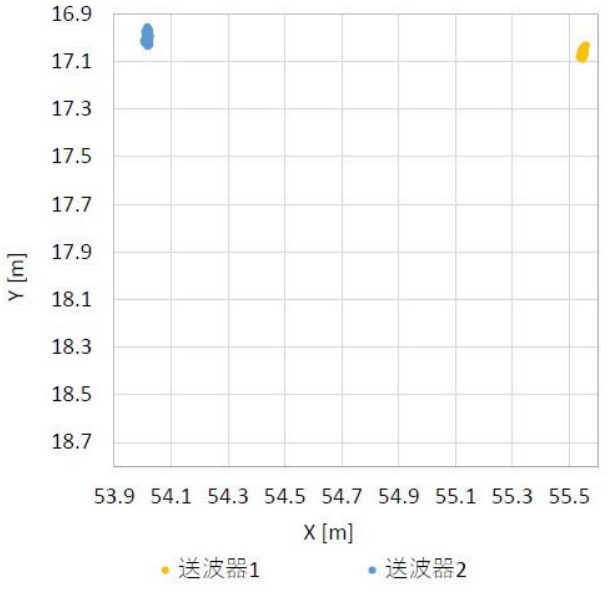


図-5.9 (b)　測位結果（point：②）

次に三角形の内側である②③④⑤と，外側である①⑥⑦について比較したところ，ばらつきは内側が10mm程度小さくなっており，安定して計測できていることがわかる．浮上式音響測位装置は複数の浮上局の内側の範囲で計測することが基本的な運用方法として開発されており，高精度な計測を必要とする場合，移動局の移動範囲が浮上局の位置を結ぶ三角形の内側となるよう配置する必要があると言える．

5.4 水中連携作業実験

浮上式音響測位装置を用い水中バックホウの高精度な測位が可能となったことで，4．水中作業情報管理システムの提案で述べた複数機体の連携が可能であることを実証するため水中連携作業実験を行う．水中連携作業実験では2台の水中バックホウの位置姿勢のほか，潜水士の位置を計測し，それらの位置関係を3DCGでグラフィカルに表示することで，各操作者が水中の状況を共有するものである．作業は水中バックホウ1（TKM30）で割石をつかみ水中バックホウ2（ZX40）の作業範囲に移動させ，水中バックホウ2がベッセルを模した枠内に積み込む連携作業を行うものとした．この際，2台の旋回範囲は一部重複させることとして，両機が接触しないよう水中作業情報管理システムで水中の作業情報を共有するものである．水中連携作業実験の器材配置と動作手順を**図-5.10**に示す．なお安全確保のため，陸上の潜水士連絡員が作業情報管理システムを常時確認し，TKM30を操作する潜水士に指示を送っている．

図-5.11は水中作業情報管理システムの表示画面と水中部の位置図関係を示したものである．ZX40の操作者は計測室から遠隔操作を行っている（**写真-5.5**）．操作者は水中マシンガイダンスのほか，作業情報共有システムの情報を取得しており，直接目視に頼らずTKM30の姿勢や潜水士の位置を認識することが可能であった．この情報により自機となるZX40の操作のほか，近傍に存在するTKM30の位置や姿勢を認識し，お互いのアーム等が干渉しない安全な運転操作が可能であることを実証した．

図-5.12は，ZX40に搭載された水中マシンガイダンスによる外界計測の様子である．機体の旋回範囲に割石とベッセルが表示されており，透明度の低い条件においても機体との位置関係を認識することが可能であった．

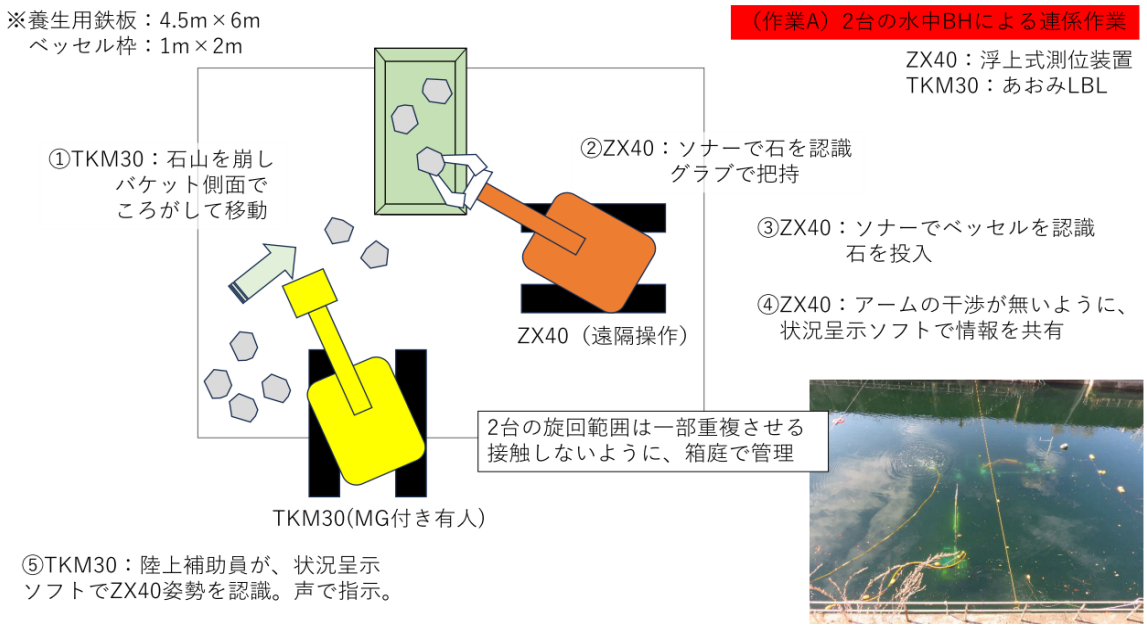


図-5.10　2台の水中バックホウによる連携作業実験手順

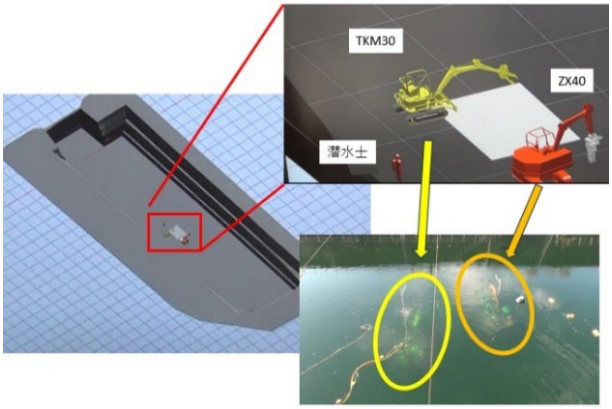


図-5.11　水中作業情報管理システム表示と実機位置

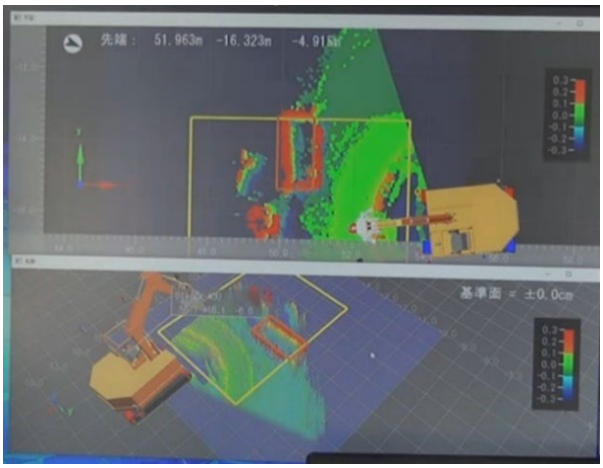


図-5.12　水中マシンガイダンスによる水中状況認識

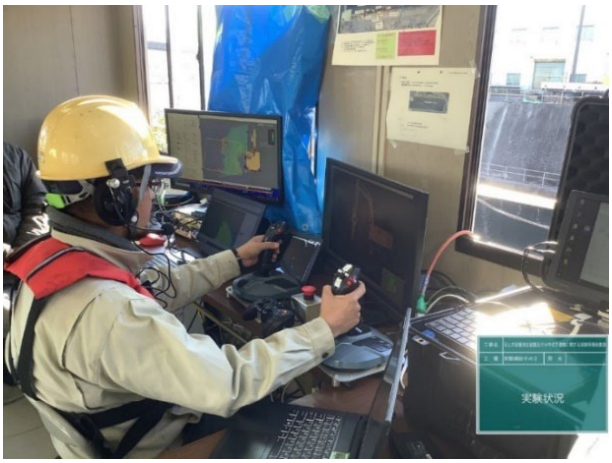


写真-5.5　遠隔操作室

5.5 水中連携作業実験結果

写真-5.5に示すように操作者は計測室から遠隔操作をしており，実機の位置関係や姿勢状況を目視できない条件であるが，前述の情報を利用することで特に問題無くTKM30との連携作業を実施することができた．これは提案する浮上式音響測位装置により水中バックホウの正確な位置関係が認識可能となることで，水中における安全確認が可能となったためと考える．それら水中機械等の情報を統合し表示する作業情報共有システムは，複数台の水中バックホウが存在する工事に有効であると考える．

また潜水士搭乗操作であるTKM30には，水中マシンガイダンスが搭載されているが，その情報は機体姿勢や既存構造物の表示のみであるため，もう一台のZX40の情報

は表示されていない．そのため，陸上にいる潜水士連絡員が「作業情報共有システム」のビューアPCを用いて監視しており，ZX40の位置や方位などを確認し安全を確認，水中の潜水士に水中電話による通話により伝達した．搭乗操作用に運転席に表示する作業情報管理システムビューア画面の表示と，水中での画面操作方法の検討が必要であると考える．

ただし，潜水士の水中測位については課題が残る結果であった．ZX40の水中測位で使用した浮上式音響測位装置は，浅い港湾域で近傍に港湾構造物が存在する場所での使用を目的として開発されており，京浜港ドックの閉鎖された環境でもほぼ正確な値を取得することが可能であった．潜水士の位置を計測する機器は市販のUSBL測位装置を使用した．これは子機が小型で一体化された機構であるため選定したものだが，ドック壁面や海面・地面からの音の多重反射による影響が非常に強く出た結果となった．

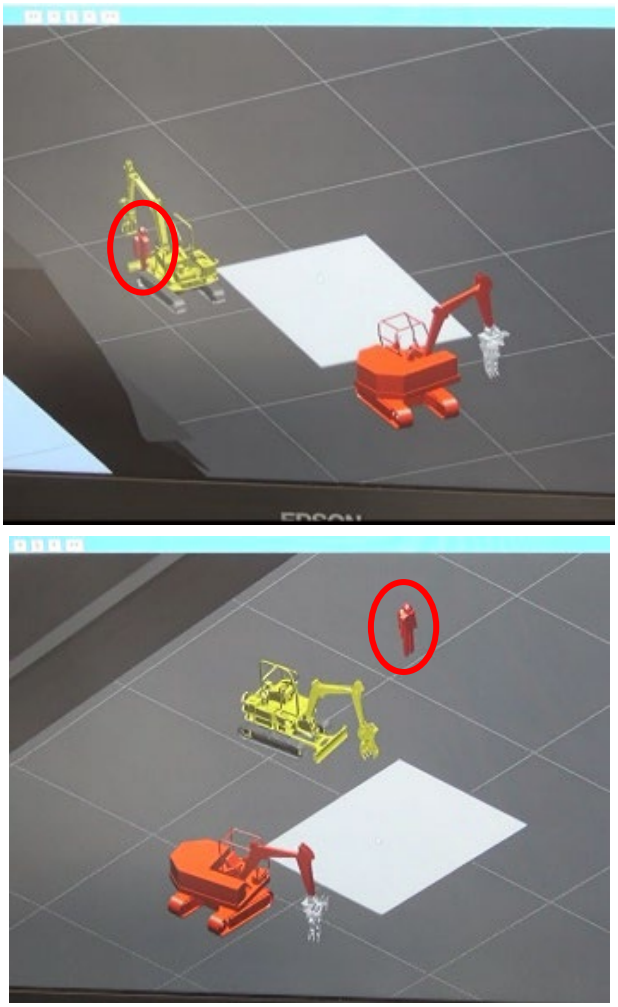


図-5.13　USBL測位では潜水士の位置が安定しない

図-5.13はTKM30に潜水士が搭乗している状態のビューア画面である．搭乗操作しているためTKM30と同じ位置に存在する潜水士（**図-5.13**上）が，様々な位置に飛ぶような状況（**図-5.13**下）が発生した．これは市販のUSBLではドック壁面等からの音の反射や残響により測位が安定しないためであると考える．また水深方向についても安定した測位ができておらず，少なくとも京浜港ドックにおいて建設機械と潜水士の位置関係を認識するための計測機器として市販USBLを使用するのは困難であった．浮上式音響測位装置の移動局について，潜水士や小型ROVに搭載可能な小型化の開発が望まれる．

5.6 実験まとめ

京浜港ドックにおいて実施した実験の結果をまとめると以下のとおりである．

1）提案する浮上式音響測位装置による計測は，前述**図-2.8**で示した市販の測位装置（USBL）と比較して安定した計測が可能であった．浮上局間の距離60mの京浜港ドックの実験では，水深-6mの浅い条件でも正確に水中バックホウの位置を計測できており，港湾域での水中工事において有効な測位手段であると考える．

2）提案する浮上式音響測位装置の計測値のばらつきは，11mm～33mmであった．ばらつきが少ないため，機体の位置を安定して認識可能であると考える．

3）提案する浮上式音響測位装置の計測値と光学測量器による計測値との差は，34mm～188mmであった．このうち，バックホウが法線方向に向いた時の誤差が大きく，これはバックホウのアームによる音の干渉があったものと考えられるため，取り付け位置に注意する必要があると考える．

4）2台のバックホウによる連携作業実験では，協調してターゲットの割石を任意の位置に移動することができた．提案する水中作業情報管理システムにより，実機の位置関係や姿勢状況を目視できない条件下でも互いの機械の作業状況を認識することが可能となるものと考える．

5）浮上式音響測位装置により，水中バックホウの位置関係を正確に計測することと，水中機械等の情報を統合し表示する水中作業情報管理システムにより，目視確認が期待できない水中において安全確認が可能となった．至近距離で複数台の水中バックホウを稼働させる場合，提案する浮上式音響測位装置と水中作業情報管理システムは有効であると考える．

6. 普及に向けた検討

本稿で提案する「浮上式音響測位装置」「ICT型水中バックホウ」は，京浜港ドックでの実験結果から技術としては一定の成立をみており，水中施工の機械化による効率性，安全性の向上に資するものと考える．今後これらの技術を普及させるにあたり，発注者の視点，最新の技術動向を把握する業界団体の視点，実際の使用者である民間企業の視点，実際の技術開発を担当する技術者の視点など，様々な立場からの意見を収集した．

質問は下記の（A）～（G）とし，自由形式の文章として回答を頂いた．**表-6.1**に，主なヒアリング結果を示す．

（A）新技術導入により工事価格が高額になってしまう場合の対策や考え方
（B）技術開発成果の取り扱いについて，自由に使える部分と囲い込みたい部分を，どう管理するか
（C）新技術導入によるメリットや評価などへの反映
（D）水中部の機械化が進んでいない原因や要因
（E）「衛星測位を用いた浮上式音響測位装置」に不足する技術項目
（F）「ICT 型水中バックホウ」に不足する技術項目
（G）積算基準の改訂要望など

本ヒアリング結果から，「浮上式音響測位装置」「ICT型水中バックホウ」の普及のためには，今後以下の点を留意した技術開発・検討・整理が必要であると考える．

①ICT型水中バックホウの経済性を，様々な視点で整理しておく
- 新技術を実現場に適用するためには，金額的な根拠だけでなく，地域性，現場条件や調達性から評価できるような根拠データも揃えて置くべきである．
- 水中施工の機械化の課題は，技術の困難性だけでなく専門スタッフやメンテナンス等が必要となることも大きな要因である．
- 新技術導入による追加コストとメリットを整理する必要がある．

②平等な技術開発競争と協調すべき範囲の設定
- 現状では水中バックホウ自体を所有する会社が非常に少ない．技術的に競争する部分と協調する部分を検討しておく必要がある．
- 平等な競争が可能なように，基本的な規格やフォーマット等は統一すべきである．

③実現場でのブラッシュアップの必要性
- 新しい技術が普及するには，現場での使用とブラッシュアップが必要である．技術の過渡期においては発注者と施工者の協力関係が必要である．

④浮上式音響測位装置の信頼性向上
- 水中バックホウの安全な遠隔操作には，測位の信頼性が非常に重要である．実現場でのテストを実施し，測位中/欠測中の判断や誤差範囲の表示など，操作者が安心できる判断材料を提示すべきである．
- 実現場において毎日の展開や撤収に時間がかかるのであれば，現場に残置できるような運用方法や技術開発を行う必要がある．
- 実海域における設置・撤収等の作業コストを検証すべきである．

⑤ICT型水中バックホウの信頼性向上
- 実機による遠隔操作事例が少ない．民間会社が導入するには安全に操縦できるという安心感・信頼感が必要なため，試験的な施工で実現場での使用実績を増やすべきである．

7. おわりに

現状の水中作業では水中における視認距離が陸上に比べて非常に短いため，他の作業機械の状況を把握・認識できない問題がある．そのため複数の作業機械による連携作業は行われず，基本的に各機械がスタンドアロンで作業することが一般的である．ここで，水中作業機械等のセンサ情報を利用し情報をグラフィカルに共有することで，水中の状況を複数の作業機械操作者が認識できる「水中作業の見える化」を提案し，研究開発を行ってきた．しかし，その実現のためには水深の浅い港湾域で正確な位置を測位することが重要である．

海中では陸上と異なりGNSSによる測位が使用できないため，超音波の伝搬時間を利用した音響測位が一般的である．ただし，一般に市販されている音響測位装置は深海でのROVの位置を計測するために設計されたものが多く，水深が浅く障害物の多い港湾域において，広域に移動する建設機械の測位を市販のUSBL型測位装置で計測することは困難である．そこで港湾空港技術研究所では港湾域での利用を想定した浮上式音響測位装置を提案，開発を行った．

本稿では，港湾空港技術研究所で研究開発中の浮上式音響測位装置を水中建設機械の測位に利用し，それらの位置姿勢情報を複数の操作者が共有する実験について報告した．京浜港ドックにおける実験では，複数台の建設

表-6.1　普及に関する課題（ヒアリング結果）

（A）新技術導入により工事価格が高額になってしまう場合の対策や考え方	
①	従来技術と比較して新技術の経済性が劣る場合は、従来技術の適用が不可能であり、当該新技術を使用しなければならない必要性を、明確に説明する必要があると思う。
②	潜水士に限らず、作業員不足に対してコストへどのように反映するかの議論が進んでいないように感じる。従来の積算の考え方が通用しなくなりつつあるのかもしれない。
③	③新技術導入によって工程短縮が図れるといったわかりやすい図式が成り立てばよいが、システム系ではなかなかそうはならない事象が多い。手戻りの防止などはコストに表すことが難しい。
（B）技術開発成果の取り扱いについて、各社が自由に使える部分と囲い込みたい部分を、どう管理するか	
①	陸上建機の自動化・自律化でも検討されていると思うが、競争する領域と協調する領域を設定することが有効であると思う。
②	基本は、各社の考え方に任せればよいと考える。
③	他の技術と連携する部分はあるはずなので、基本となる枠組みとやり取りする規格やデータフォーマットの統一は、国が主導してもらえるとありがたい。
④	民間業者は統一規格の中で開発し、使用するハードウェアやソフトウェアは、市販品や他社製品を使うのか、自社開発品を使うのか、自由選択できるのがよい。
（C）新技術導入によるメリットや評価などへの反映	
①	プレキャスト導入検討では、各工事の現場条件においてコスト以外の評価項目も選定して点数化し、評価点の合計で採用を決めるという手順としている。
②	これは複雑な手順に見えるが、水中ICTの適用条件や地域性、調達性などを調査して整理していくと案外、評価の項目・内容は揃ってきて、手順も単純化できると思う。発注者としては水中ICT導入を検討するための根拠がまず第一に欲しいと考えられるので、オーソライズされたものがあれば水中ICT普及の後押しになるのではないか。
③	1社しかできない技術だから公平性が担保できないという考え方が問題。技術開発行為は、公正な競争であるという認識が定着してほしい。
（D）水中部の機械化が進んでいない原因や要因	
①	専門メンテナンス要員や体制が必要であること。
（E）「衛星測位を用いた浮上式音響測位装置」に不足する技術項目	
①	浮上局の運用コストに対する検証が不足しているように思う。設置撤去の手間が想像以上に必要となりそうな印象。
②	水中バックホウを安全に遠隔操縦するための測位技術としては、測位結果のばらつきが大きい印象。マルチパス対策など、ノイズ除去が不十分では。
（F）「ICT 型水中バックホウ」に不足する技術項目	
①	安全に操縦できるという安心感・信頼感が必要。システムを信頼できるのか？もっと経験を積んでいく必要があるが、実施工レベルでの運用となるとコストや工期の問題が発生するため、発注者の理解と協力が望まれる。
（G）積算基準の改訂要望など	
①	水中バックホウは現在0.8㎥（20トン）の電動油圧式が主流である。積算基準の参考として記載されている歩掛は古く、0.5㎥（12トン）の油圧ホースで送るタイプである。この場合、クレーン付き台船を大きくする必要があり、また、発動発電機を、現地でレンタルする必要があるため、金額に差が出てしまう。ICT化で使用するセンサや機材の条件もアップデートしていくべきと思う。

機械が存在する環境で安全な作業が実現可能であることを確認した．

また，今後のICT型水中バックホウの普及を目的に，衛星測位を活用した浮上式音響測位技術およびICT型水中バックホウ技術に関連する技術情報を整理し，京浜港ドック実験時の作業手順，運用方法を，「衛星測位を活用した高精度水中測位技術とICT型水中バックホウ技術の技術開発事例（案）」として取りまとめ，巻末付録とした．

本付録により，水中部のi-Construction施工技術の導入促進と民間技術者による技術開発を促し，効率的かつ効果的な水中部施工の実現に資することを期待する．

筆者らは，視覚情報が劣化する水中施工にこそ，DXやICT技術が必要であると考える．水中施工のDX化，ICT化により水中作業機械の適応範囲が広がれば，機械力による生産性の向上だけでなく，「水中作業の見える化」による安全性確保も期待でき，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．

（2024年8月8日受付）

謝辞

本研究は，国土交通省港湾局の委託研究「衛星測位を活用した高精度の遠隔操作・自動化水中施工システムの開発に係る研究委託」により実施した成果である．

使用した実験装置の一部である遠隔操作装置は，（一財）港湾空港総合技術センターとの共同研究「港湾・海洋における建設現場の生産性向上のための研究開発」に

おける水中建機遠隔操作支援システムの現場適用の確立に向けた研究開発の成果を含むものである．

水中試験における京浜港ドックの使用は，国土交通省関東地方整備局との共同研究「港湾・海洋空間における生産性向上に資する効率的な施工技術に関する共同研究」によるものである．

本稿で使用した水中バックホウの写真（**写真-1.1，1.2**）は，極東建設株式会社から提供いただいたものである．

浮上式音響測位装置の実海域実験の実施において港湾空港生産性向上技術センターの松本さゆり副センター長に実験計画の策定や調整を実施して頂いた．

浮上式音響測位装置，ICT型水中バックホウの研究実施において，和田匡央特別研究主幹（現 株式会社IHIインフラシステムズ顧問），松本英雄特別研究主幹に他機関との調整のほか非常に有益な御助言御指摘を頂いた．

付録「衛星測位を活用した高精度水中測位技術とICT型水中バックホウ技術の技術開発事例（案）」の取り纏めに際し，「衛星測位を活用した浮上式音響測位装置及び水中ICT 施工技術の導入検討委員会」（委員長：岩波光保 東京工業大学環境・社会理工学院教授）において，非常に有益な御助言御指摘を頂いた．

ここに明記するとともに，岩波教授をはじめとする関係各位に感謝申し上げる次第である．

参考文献

1）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 1996 年 7 月号，pp.17-22，（1996）

2）NETIS「水中バックホウ スーパー ビッグクラブ」登録番号 KTK-210012-A

3）田場大貴，金城寛，大城尚紀，鈴木正己，平林丈嗣，吉江宗生，上山淳，“振動式締固め機の水中モデリング” 第 37 回計測自動制御学会九州支部学術講演会，（2018）

4）金城寛，大城尚紀，平林丈嗣，喜夛，上山，“マウンド均し専用油圧ブレーカの運動解析”，油空圧技術 第 60 号，No.3，pp.24-29，（2021）

5）喜夛他，“水中バックホウの遠隔操作化に向けた取り組み～ 支援機構 ～“，第 19 回建設ロボットシンポジウム（CD-R），（2019）

6）平林，玉城，喜夛，髙尾，上山：「水中機械化施工における作業情報共有システムの提案」，第 21 回建設ロボットシンポジウム，（2023）

7）古賀康正，“雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工”，砂防学会誌，Vol.52，No. 4，pp. 64-68，（1999）

8）国土交通省近畿地方整備局：「マシンコントロール／マシンガイダンス技術（バックホウ編）の手引書【施工者用】」，
https://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/kensetsu/inf_support/bcu0ke0000002x3l-att/h3002-04.pdf（参照 2024-07-30）

9）平林，喜夛，吉江，上山，鈴木，金城，大城：「水中建設機械を対象とした作業情報呈示システムの適応検討」，第 18 回建設ロボットシンポジウム（CD-R），（2018）

10）Tsukasa KITA，他，“Sea Experiment on Tele-operation System of Underwater Excavator” Proceedings of the 37th ISARC, PP.118-125（2020）

11）平林，喜夛，吉江，上山，鈴木，金城，大城 ：「水中建設機械用作業情報呈示システムにおける音響センサの適応検討」，第 27 回海洋工学シンポジウム，（2018）

12）海洋音響学会編，“海洋音響の基礎と応用“，(2004)

13）飯森，“水中測位・音響航法装置”，Techno marine 日本造船学会誌 第 823 巻 (1998)

14）尾崎，“水中における位置の計測(1)“，https://sensait.jp/11834/（参照 2024-07-30）

15）吉原 他，“耐マルチパス水中音響測位技術の開発と水中バックホウの水中測位への応用”, 海洋音響学会誌，第 50 号，pp.123-133，(2023)

16）高田 他，“水中音源到来方向推定におけるマルチパス干渉に強い到達時間差測定アルゴリズム”，Journal of Signal Processing， Vol.25 No.1，pp.33-42 (2021)

17）Keith Vickery，“ACOUSTIC POSITIONING SYSTEMS NEW CONCEPTS – THE FUTURE”，Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles，(1998)

18）西周次，"フェイズ ll GPS の利用可能時間と測位精度の解析", 日本航海学会第65回講演会,pp.57-65（1981）

記号表

c：音速

c_{true}：音速の真値

$c_{machine}$：投げ込み式音速度計で計測した音速

τ：水中移動局と浮上局間の伝搬時間

ρ：水中移動局と浮上局間の斜距離

ε_{xy}：水中移動局の座標誤差

$\varepsilon_{\rho xyz}$：浮上局の座標誤差

b_c：音速のバイアス（正確度）

b_{τ}：伝搬時間のバイアス（正確度）
b_{xyz}：浮上局位置のバイアス（正確度）
σ_{c}：音速のばらつき（精密度）
σ_{τ}：伝搬時間のばらつき（精密度）
σ_{xyz}：浮上局位置のばらつき（精密度）
μ_{c}：音速の平均値
μ_{τ}：伝搬時間の平均値

付録：令和６年度　衛星測位を活用した高精度水中測位
技術とICT型水中バックホウ技術の技術開発事例
（案）

令和６年度

衛星測位を活用した高精度水中測位技術と ICT 型水中バックホウ技術の技術開発事例（案）

国立研究開発法人　海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所

港湾空港生産性向上技術センター／インフラＤＸ研究領域

【序】

四方を海に囲まれた我が国において、港湾施設は重要なインフラであり、その整備や維持管理等は将来にわたり、重要な公共事業である。

しかし、今後、港湾等の施設整備を担う民間事業者の技術者・技能者の減少が危惧されるとともに、長時間労働の抑制等の働き方改革が求められている。このため、港湾工事における生産性を大幅に向上させる必要がある。

生産性の向上のためには、近年、急速に発展しているデジタル技術、ロボット技術や情報通信技術を積極的に活用することで、港湾等の施設整備や維持管理業務を抜本的に効率化することが有効であると考えられる。

そのような情勢に応えるため、国土交通省及び港湾空港技術研究所では、従来潜水士の高い技能に大きく依存してきた水中施工分野においても ICT 技術の導入が不可欠であると判断し、その基盤技術として、「衛星測位を活用した浮上式音響測位装置」による水中の測位技術、及び、その適用事例としての「ICT 型水中バックホウ技術」について研究を実施してきた。

本資料は、これまでの研究開発、実験施設、実海域における実証実験によって、技術の成立性に一定の目処が立ったことから、民間事業者の現地適用、技術開発に資することを目的として、今までの知見を取りまとめ公表するものである。

なお、本資料は以下のような構成としている。

第１章　本資料の目的を記すとともに用語を解説している。

第２章　ICT 型水中バックホウの運用および作業事例（京浜港ドック）では、港湾空港技術研究所が 2023 年度に国土交通省関東地方整備局京浜港湾事務所が所有するドック（以下、京浜港ドック）で実施した実海域を模擬した実験について使用機材の紹介や計画準備、使用時の展開設置手順、撤去までを時系列にとりまとめることで、実運用に関する資料とする。

第３章　衛星測位を活用した水中測位技術の開発では、第２章で使用した「浮上式音響測位装置」を運用する際の参考資料として、仕様やセンサ機材、使用方法、周辺機器などを技術的資料としてとりまとめている。

第４章　ICT 型水中バックホウ技術では、第２章で使用した「ICT 型水中バックホウ」を運用する際の参考資料として、仕様やセンサ機材、使用方法、周辺機器などを技術的資料としてとりまとめている。

第５章　水中バックホウ運用の基本事項では、既存技術である水中バックホウを全国的に

展開することを目的として、水中バックホウの適用事例、周辺機材、安全性確保に関する知見のほか、全国的な需要等に関する検討についてとりまとめている。

第６章　衛星測位を活用した高度な遠隔操作・水中 ICT 施工の将来展望では、ICT 型水中バックホウに望まれている工種のヒアリング調査を行い、その要望に対する技術開発項目や普及に向けた技術開発に関する検討についてとりまとめている。

第１章　総論

1.1　本資料の目的

本資料は衛星測位を活用した浮上式音響測位技術および ICT 型水中バックホウ技術に関連する技術情報を整理し、京浜港ドックにおける作業実験時の運用手順を取りまとめることにより、水中部の i-Construction 施工技術の導入促進と民間技術者による技術開発を促し、効率的かつ効果的な水中部施工の実現に資することを目的とする。

現状の水中測位装置では、近傍に存在する港湾構造物や浅海域による多重反射等により測位が不安定となることが多く、陸上施工における GNSS 測位のような容易で高精度な測位機器の要望が多く存在した。そのため港湾工事に特化した測位技術として、海面に設置した複数のブイ型の受波器の位置を GNSS 測位によりリアルタイムに取得し、かつ、ブイ間の距離（基線長）を長くとることで、水中の送波器の位置を安定して計測する「浮上式音響測位」を提案し技術開発を行った。

本技術は汎用的な測位装置として開発したものであり、様々な水中部施工への応用が期待される。

なお本資料では、水中バックホウが使用可能な工種を主な対象として、その作業効率の向上に関する知見や情報化施工への対応方法について述べるものとしており、水中バックホウを施工機械として使用する技術者が利用することを想定している。

現状、水中バックホウは、基本的に目視による運転操作であるため、透明度の高い海域でしか使用されていない。この水中バックホウによる施工を普及するためには、従来の目視情報だけでなく、水中部で得られる様々な情報やセンシングデータを組み合わせることで、操作者に作業状況を認識させることが重要である。このため、本資料では水中施工機械で使用可能なセンサやソナーに関する仕様の一例をとりまとめている。

また、水中バックホウは、先端のアタッチメントを交換することで複数の工種に対応する汎用機械であり、将来的な技術開発により多様な工種に適用する可能性についても示している。

1.2　用語の解説

本資料において使用する技術用語を定義・解説する。

(1) 水中バックホウ

水中で運転可能な汎用型油圧建設機械とする。陸上機で一般的な動力源であるディーゼル発動機の代わりに水中電動モータによる油圧ポンプ回転または船上からホースで油圧を供給するタイプが存在する。

(2) ICT（Information and Communication　Technology）型水中バックホウ

機体情報（姿勢・傾斜・方位・位置）を検出するセンサや、周辺の状況を計測する外界計測センサ等を設置し、かつ、取得した情報を有効的な情報形式に変換して操作者と船上管理者に提示する機能を有する水中バックホウのこととする。

(3) 水中版マシンガイダンス

ICT 型水中バックホウの機能の 1 つとして、操作に有益な情報を操作者に提示する機能。水中モニタを運転席に配置し、機体姿勢や位置、設計図面等をグラフィカルに表示する。

(4) 遠隔操作

本資料では水中バックホウを対象とする。船上操作室の操作卓または水中バックホウ付近からリモコンにより操作が可能な機能とする。

(5) 水中作業情報管理システム

ICT 型水中バックホウの機体情報、船舶位置方位、潜水士位置、クレーン位置等、港湾施工区域に存在する情報を情報サーバーに集約し、かつ、それらの情報をビューア PC でグラフィカルに表示することで、水中の状況を複数の作業者が共有可能とするシステム。情報サーバーは支援台船に設置することを想定し、情報サーバーとビューア PC とは屋外型無線 LAN アンテナにより通信を行う。

(6) ビューア PC

水中作業情報管理システムで管理している機械船舶情報を参照し、グラフィカルに表示するための PC。複数の同時接続が可能であり、各作業者の手元に置く。

(7) 内界計測センサ

水中バックホウ機体の状況を計測するためのセンサ。シリンダストローク、関節角度、機体傾斜、上部旋回体の方位、クローラ相対方位、水中位置、水深を計測する。

(8) 外界計測センサ

水中バックホウ周辺の状況を計測するためのセンサ。ICT 型水中バックホウでは、イメージングソナー、プロファイルソナー、光学カメラ等を使用する。

(9) 水中バックホウ支援台船

水中バックホウを工事区域に輸送するための台船。水中バックホウに電力を供給するための発電機、動力線を巻取るドラムを搭載する。また、潜水士船を兼用している。一般台船にクローラクレーンを搭載したもののほか、投入・揚収にウインチを使用する専用台船型がある。

(10) 音響測位装置

音波を利用して船舶及び水中の移動体の位置を測定する装置。市販されている装置は、基線の長さにより、LBL（LongBaseLine、基線長数 10m～数 100m、海底などに敷設するイメージ)、SBL（ShortBaseLine、基線長数m～30m程度、船舶台船の周囲に複数固定するイメージ)、USBL（UltraShortBaseLine、基線長数 cm、1 つの親機の中で完結するイメージ）の 3 種類に大別される。現状では、取り扱いの容易な USBL が用いられることが多い。

(11) 浮上式音響測位装置

水中に存在する計測対象（移動局）から発信される音波を海面に設置したブイ型の受波器（浮上局）により計測することで測位を行う形式。海底敷設型の LBL と比較して設置・回収が容易で配置の自由度が高く、既設構造物や作業船舶などの障害物の多い港湾域での運用を考えると利点が多い。なお本資料では港湾空港技術研究所が開発した浮上局の正確な位置と傾斜を計測するための GNSS 受信機と傾斜計を用いたものを対象とする。

(12) 基線長

測位に用いる受波器の間隔。

(13) ダイレクトパス

音源より送波された音波が海底や海面で反射することなく、受波器に直接到達する経路。

(14) マルチパス伝搬

音源より送波された音波が受波器に到達する際に、その経路が 2 つ以上存在すること。

(15) 環境ノイズ

場所に依存した不要な信号成分。主たる要因は、波浪により発生する成分、海水の熱的な振動による成分、船舶、水中作業機械の動作音、生物由来の成分があげられる。

(16) イメージングソナー

探知あるいは位置計測のみならず、対象物の形状、形状変化の動態を映像として観察するソナー。

(17) トランスポンダ

水中移動体や海底に設置され、計測点（親機）からの音響信号（問合信号）に対して、予め設定された音響信号（応答信号）を返信する装置（子機）。送受波器、送受信回路、バッテリなどが 1 つの筐体にまとめられていることが多く取扱いが容易である。

なお、基地局や親機と有線接続された場合はレスポンダと呼ばれる。

(18) ピンガ

一定周期で送波する装置。問合信号を受信する必要がないため簡便な構成となるが、送信時刻が不明なため、測距が出来ない。

(19) 同期ピンガ

送波のタイミングが受波器のクロックに同期しているピンガ。親機の送波時刻が既知のため、子機の受波時刻との時間差を用いて測距が可能となる。設置の前に受波器のクロックと同期を取る。浮上式音響測位装置はこの方式を用いている。

(20) 音速プロファイル

海中の鉛直方向の音速分布。水温によって音速が変化するため、高精度な測位のためには音速プロファイルによる補正が必要となる。

(21) トランスデューサ

電気音響変換器（Electroacoustical transducer）と訳され、音響振動を電気量に変換、あるいは、その逆に変換する装置である。目的により、送波器、受波器、送受波器が存在する。

(22) 測位方式（$\rho-\theta$）

1 点で設置された親機と水中移動局との距離（ρ）と、親機から見た子機の方向（θ）により測位する方式。主に USBL 等で使用されている。

(23) 測位方式（$\rho-\rho$）

既知の場所に設置された複数の親機間の距離（ρ）と、複数の親機と水中移動局の距離（ρ）により測位する方式。主に SBL や LBL で使用されている。

第２章　ICT 型水中バックホウの運用および作業事例（京浜港ドック）

2.1　実験目的

ICT 型水中バックホウの高度な遠隔操作を実現するにあたり、水中マシンガイダンス等の機体情報を計測し、ビジュアル的に表示することは必須技術である。特に水中の機体位置については、既設構造物との接触や法肩からの転落などの事故に直結する重要な情報である。ただし、過去の実海域試験において得られた経験では、-10m程度の浅海域における高精度位置計測は困難であった。

海中では陸上と異なり GNSS による測位が使用できないため、音波の伝搬時間を利用した音響測位が一般的である。ただし、一般に市販されている音響測位装置は-1000m以深のような深海での ROV の位置を計測するために設計されたものが多く、港湾域など-10m程度の浅海域では、うまく計測できない場合があった。これは、海面と海底の間で信号音のマルチパス（多重反射）が発生し、計測に影響が出ることが原因と考えられる。また、防波堤のような近傍の構造物からの反射波もノイズとして影響する。

さらに浅海域では、受波器の指向角を外れるような運用になりやすく、機体が水平方向に離れた場合、欠測となることが多くなる。

このような港湾域の環境を対象とした測位方法の１つとして、衛星測位を活用した浮上式音響測位装置（**図 2.2**）が挙げられる。この方式では、複数の浮上局としてブイに設置した受波器と移動局としてバックホウ側に取り付けた送波器から構成されており、浮上局の位置は GNSS 測位により計測される。受信した信号や GNSS 測位の位置情報は無線により基地局に送信されるため、ケーブル等の接続が不要となる。このように計測範囲を広く確保し、配置の自由度が高いことは、自在に移動する水中移動体の測位を行うために有効である。また複数の浮上局の距離は数百m程度あり、基線長を長くとれるため、測位精度の向上に加え、ノイズや多重反射波の影響をキャンセルしやすいという特徴を有する。この装置により、水中機械の測位が正確にできるようになれば、将来的な ICT 型水中バックホウの遠隔操作化（**図 2.3**）に大きく役立つものと期待される。

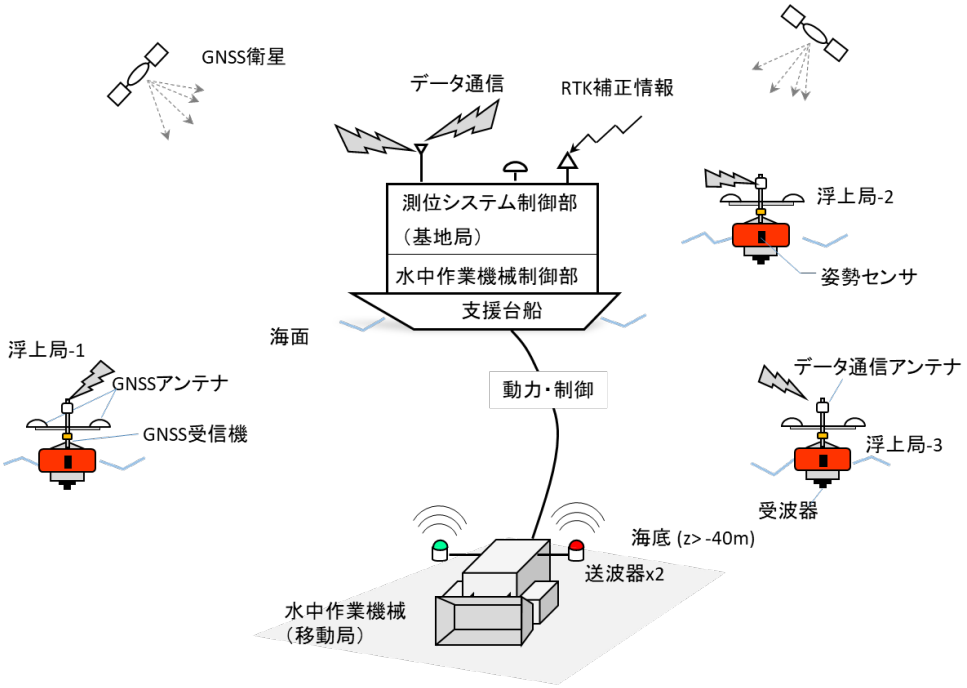


図 2.1　衛星測位を活用した浮上式音響測位装置のイメージ図

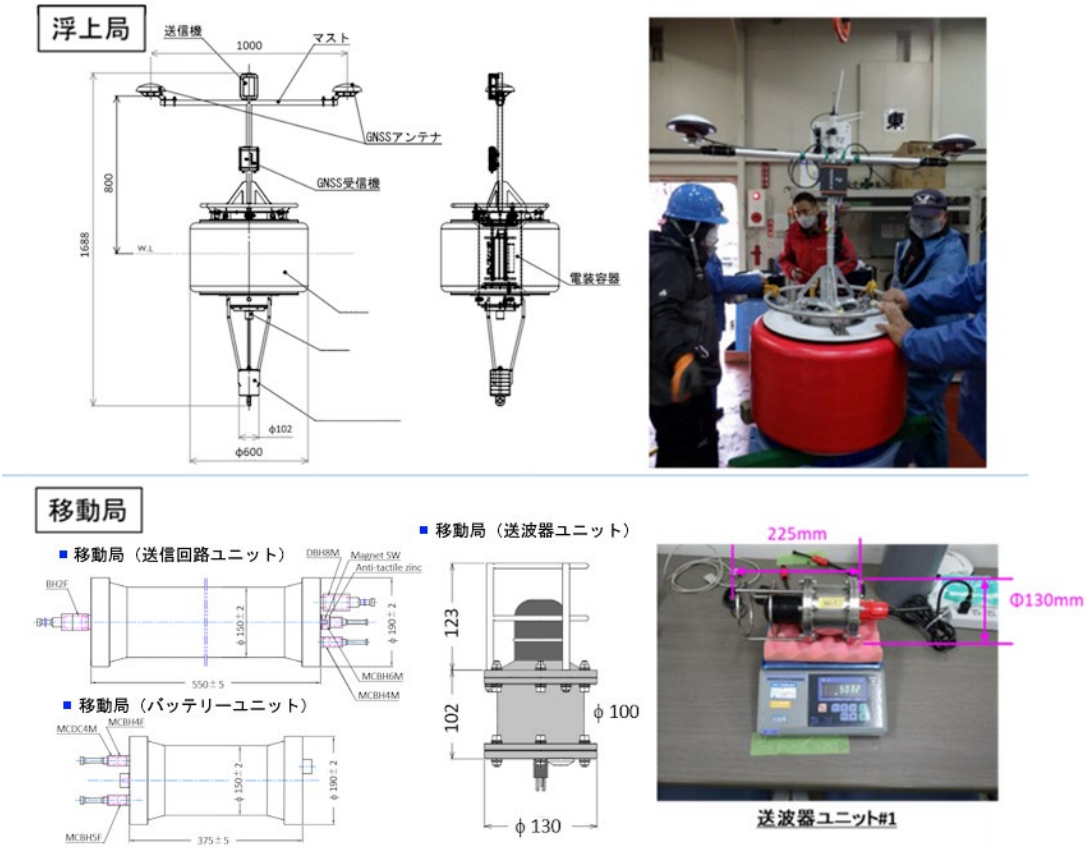


図 2.2　浮上式音響測位装置の外観図

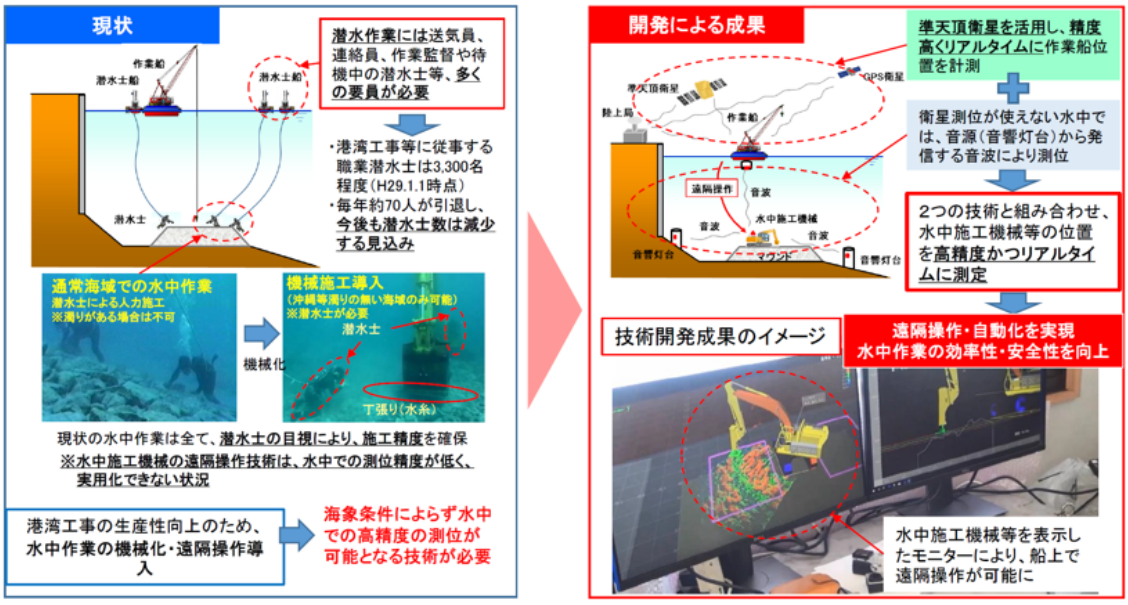


図 2.3　ICT 型水中バックホウの遠隔操作化のイメージ

現状では水中部での施工や状況確認、誘導は潜水士の目視に依存していることが一般的である。これは海面上から水中部の視認は、透明度が低いために光学映像を利用することが困難であることからほぼ不可能であり、作業中は対象に近接する潜水士による目視確認及び音声での誘導が必要となるためである。

これに対し、現在、開発が進みつつある「ICT 型水中バックホウ」では、機体に設置した様々なセンサ情報から機体の姿勢や外界の状況を取得し、操作者にわかりやすい形式で状況を表示する水中版マシンガイダンスを搭載している。また、設計図面や既設構造物を 3D モデルとして画面上に表示することで、目標とするマウンドの高さや既設構造物との位置関係をビジュアル的に認識することができるため、濁水中での安全かつ効率的な機械化施工に役立つ技術として期待されている。

図 2.4　ICT 型水中バックホウの搭載センサの例

このように水中版マシンガイダンス等を装備した ICT 型水中バックホウは、機体に設置したセンサ（**図 2.4**）で様々なデジタル情報を取得している。また起重機船でも吊り荷やグラブバケットの誘導システムや、ROV や潜水士の水中位置を計測する音響測位システム等、目視がきかない水中での作業状況把握に対し、様々な技術開発が進められている。しかしながら、これらの情報は各装置ごとに操作者が使用するのみであり、情報の共有はされていないのが現状である。

ここで、工事区域に存在する様々な施工機械、船舶、潜水士や ROV 等の情報を一元的に管理し、かつ、それらの情報を様々な場所で提示する「水中作業情報管理システム」を提案する。これは ICT 型水中バックホウ等で取得するデジタル情報を用い、いわば「箱庭」のように複数の作業者が水中での作業状況をリアルタイムに共有認識するものである。

「水中作業情報管理システム」により、普段目に見えない水中での作業状況が共有されるほか、近接する複数の作業機械の安全確保や、複数機械の連携作業が実現できるものと考えられる。

また事故が発生した時の記録として解析することが可能となり、安全対策の改善、工事区域の監視に使用できることが期待できる。さらに機械の動作記録から、作業能力等の評価に利用することも考えられる。

本章では、「衛星測位を活用した浮上式音響測位装置」と「水中作業情報管理システム」を「ICT 型水中バックホウ」に適用し、水中作業の見える化の有効性と協調作業の実証実験（**図 2.6**）の作業記録を時系列で記載することで、実現場における ICT 型水中バックホウ導入のための運用手順の参考事例を示すものである。

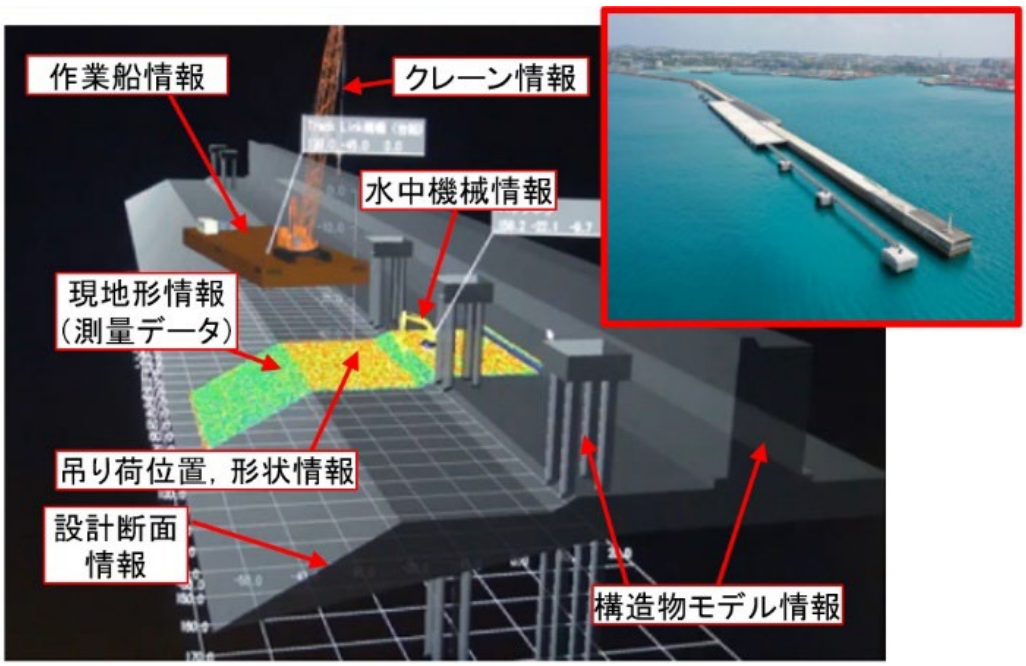
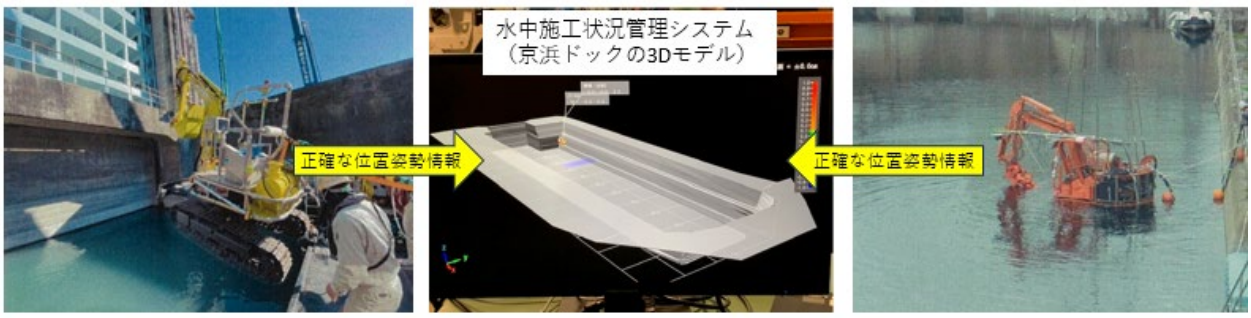


図 2.5　「水中作業の見える化」のイメージ図



正確な位置姿勢を計測することで、複数の建機や潜水士等を管理することが可能となる。
全体を俯瞰できない（見えない）水中工事で、安全性や作業効率の向上に資する技術

図 2.6　京浜港ドックにおける協調作業実験

2.2　使用機材

2.2.1　浮上式音響測位装置

本項目では、京浜港ドックにおける実験に用いた浮上式音響測位装置、および、周辺機材について仕様および写真を示す。

機材類の詳細は **3.2　浮上式音響測位装置の準備、展開、運用**を参照すること。

浮上式音響測位装置は**図 2.1** に示すように、3 基以上の浮上局、1 基以上の移動局、1 つの基地局より構成される。海中の移動局の座標は、位置が既知の 3 つ以上の点（既知点）と移動局の距離を求め（測距し）、GNSS 測量もしくは三辺測量に類似した方法を用いて求めている。既知点の実体は浮上局（動揺センサ付き GNSS 浮標）底部の受波器であり、海中の移動局より送信された測位用音響信号の伝搬時間を測定し、伝搬時間と音速の積によって伝搬距離を求めている。なお移動局のクロックは、設置前に浮上局のクロックに同期させてあり、移動局は定刻に測位用音響信号を送信するようになっている。

以下に、ドック実験で用いた浮上式音響測位装置の仕様と外観を示す。

(1) 仕様

図 2.7 に、浮上式音響測位装置のブロック図（トップレベル）を示す。また、浮上式音響測位装置の仕様を**表 2.1**～**表 2.3** に示す。

表 2.1 浮上式音響測位装置仕様

機能		
	項目	概要
1	測位機能	浮上局を用いて、海中または海底の移動局の位置情報を得る。
2	ヘディング機能	移動局の２つの送波器を測位することにより、移動局の水平面内の方向に関する情報(ヘディング情報)を得る。
3	音速補正機能	音速プロファイルを用いて、音響信号の経路長を補正する。
4	測位用音響信号の発生	浮上局と同期したクロックに従い、一定時間間隔で測位用音響信号を送信する。
5	浮上局の制御	基地局より、浮上局の受信パラメータ、データ収録の ON/OFF を制御する。

表 2.2 浮上式音響測位装置仕様

性能		
	項目	概要
1	測位性能	
	分解能	15mm 以下
	誤差（正確度）	0.5m 以内（水平方向）
	ばらつき（精密度）	0.5m 以内（水平方向）
	測位周期	毎秒 1 回以上の測位が行えること。 移動局より最遠方の浮上局が受信してから、測位用信号の送信繰り返し間隔時間以内に、測位結果が表示できること。
2	稼働時間	8 時間以上
3	ヘディング分解能	1° 以内
4	音速補正	0.5m 毎に水深 40m までの範囲で音速を補正できること。
5	移動局のクロック同期	GNSS 受信機の 1pps 信号を用いて、移動局のクロックを UTC 時刻に同期させたあと 1pps 信号を切断し、8 時間後経過した時点において、移動局の内部時計と UTC 時刻の差が±15μs 以内であること。
	浮上局の制御	(1) 浮上局ハードウェアの各種設定が行えること。 (2) 浮上局で動作するソフトウェアの各種設定が行えること。 (3) 浮上局ごとに個別の設定が行えること。

表 2.3 浮上式音響測位装置仕様

規模		
	項目	規格
1	浮上局本体	φ1000mm × 3000mm 以下、50kg 以下（係留用錘等を除く）
	浮上局（係留索及び錘を含む）	「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示 平成３０年４月１日施行」の第５３条の１項の１号及び３号を準用するものとする。
2	移動局	送信ユニット φ200mm ×1000mm 以下、20kg 以下 バッテリーユニット： φ200mm × 1000mm 以下、20kg 以下 送波器ユニット 形状：φ200mm×500mm 以下、15kg 以下
3	基地局	本体（収納時） 600×400×300 mm 以下、20kg 以下 （表示用 PC 除く）
適用範囲		
	項目	範囲
1	外気温	作動時 0～35℃ 保管時 －10～50℃
2	海水温度	0～30℃
3	湿度	30～80%（海中で使用する機器を除く）
4	耐水圧	移動局 水深 40m 相当 浮上局の水中に没する機器 水深 10m 相当 その他甲板上で使用する機材 防滴（IPX2）以上 （基地局本体の防滴は収納時のみとする。）
	覆域 水平方向 深さ方向	 概略、半径 150m の円の内側と円周の近傍とする。 水深：7m～40m とする。

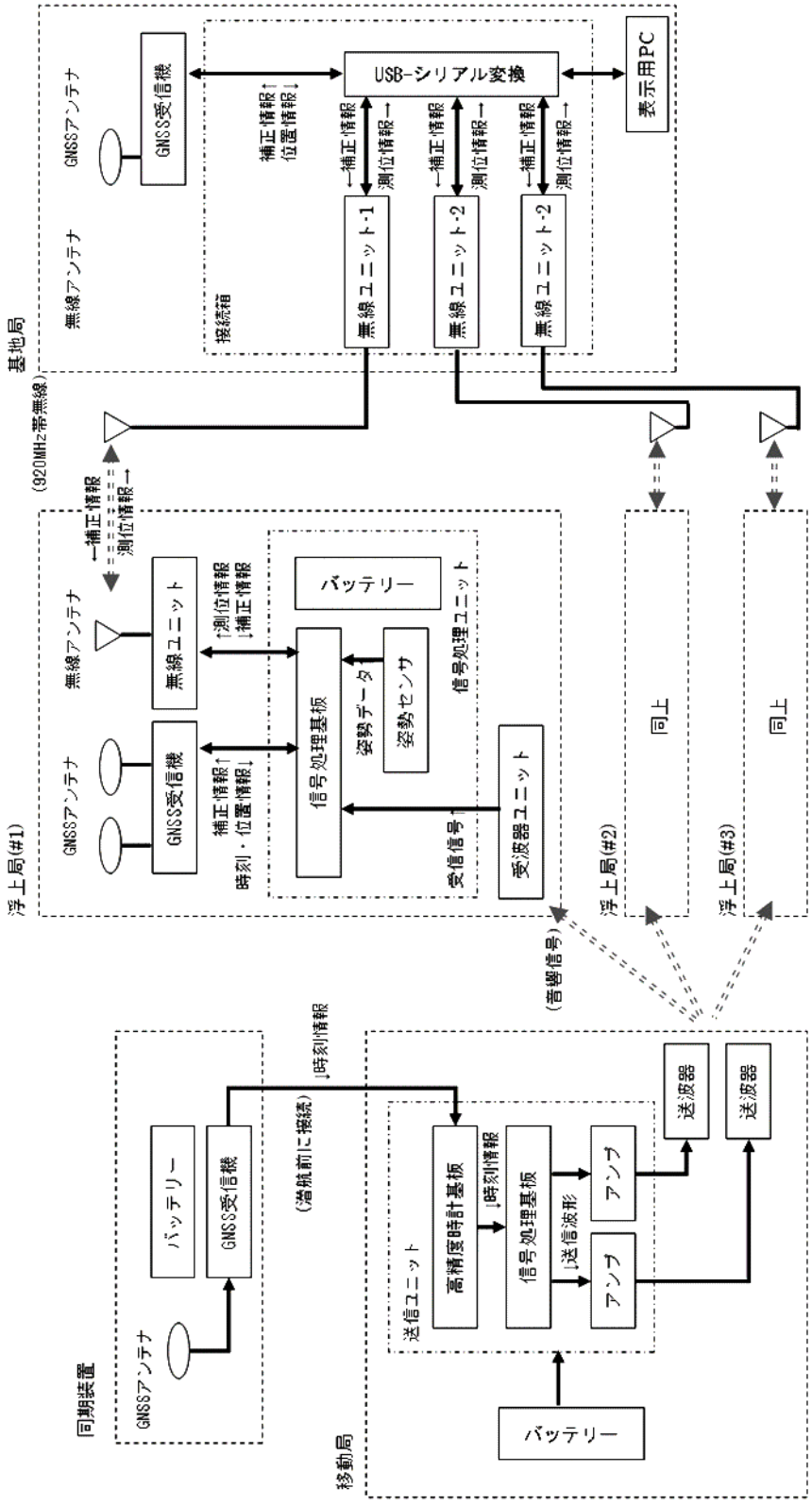


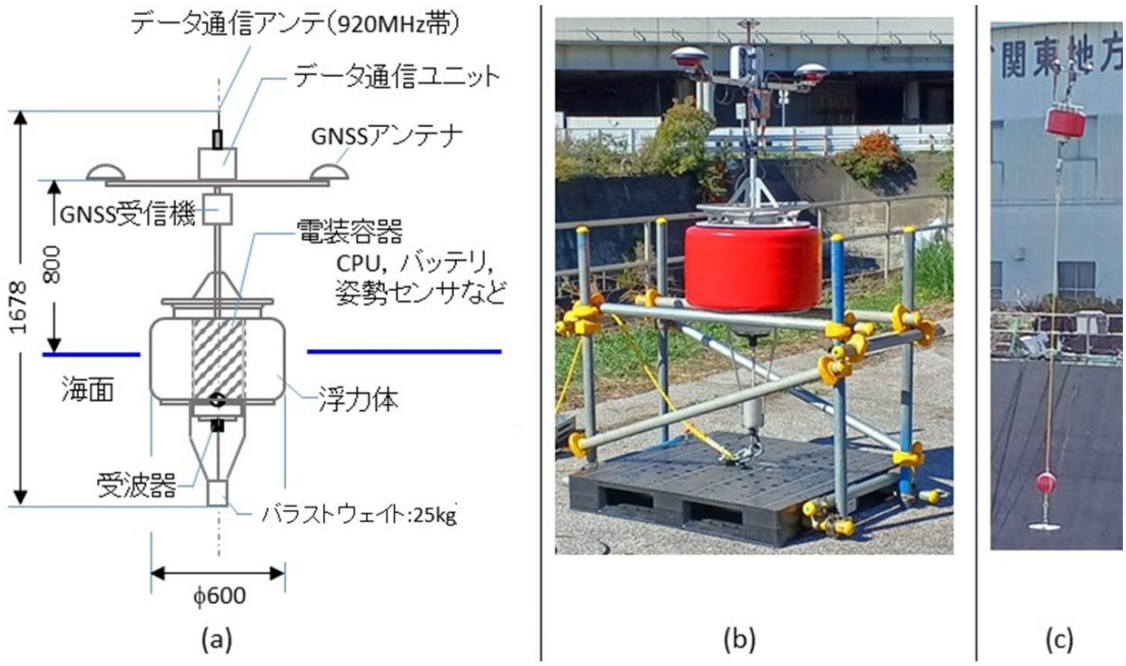
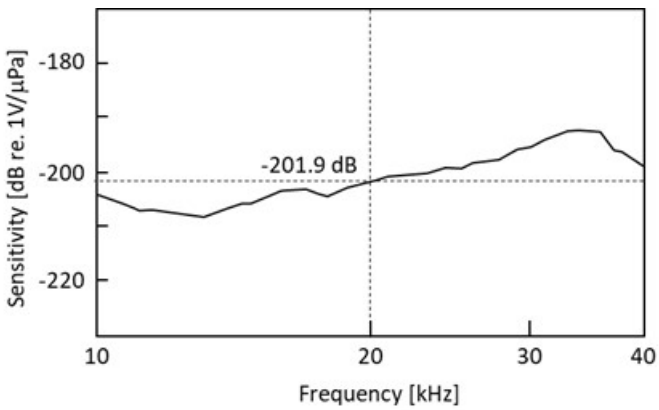
図 2.7 浮上式音響測位装置のブロック図（トップレベル）

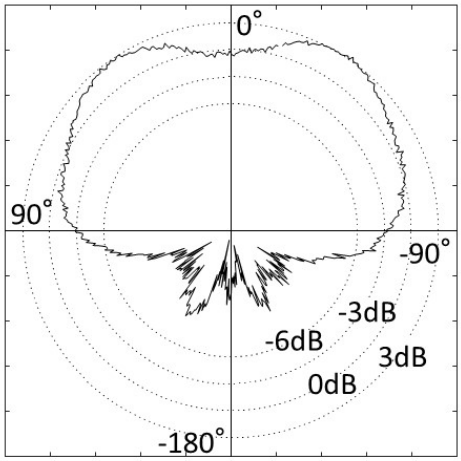
(2) 浮上局

浮上局は、①浮上局本体、②係留索（錘を含む）から構成され、③充電器は付属品である。

なお、係留系は水深 7～40mに対応しており、京浜港ドックにおける実験では設定が 6±0.5mの水深に対して、深度 7m用の係留系で対応した。

表 2.4 浮上局の外観及び規格、性能等

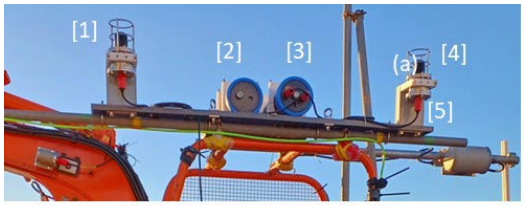
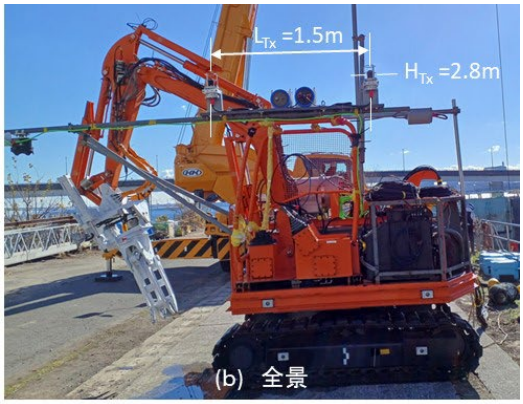
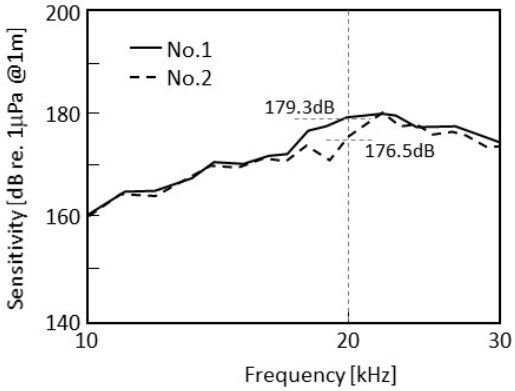
	項目	規格、性能等
1	外観、寸法、重量	 (a)構成及び概略寸法、(b)外観写真（浮上局及び作業用架台） (c)浮上局投入風景（京浜港ドック向け係留系を含む）
2	音響性能	受波感度　-201.9dB（re 1V/μPa）@20kHz 水平方向 

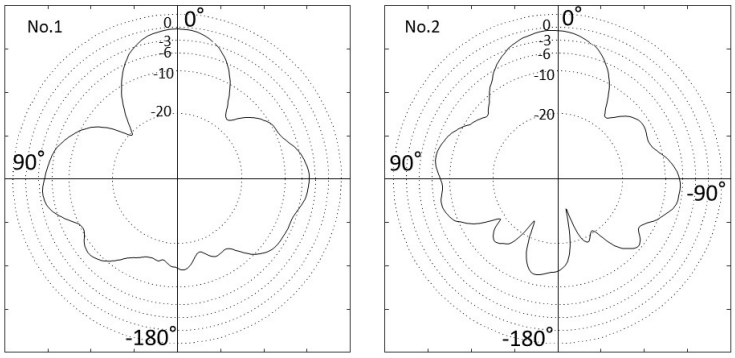
		指向特性 水平方向　：無指向性 垂直方向　：下図参照 
3	無線性能	規格：ARIB STD-T108 準拠 性能：見通しにおいて 伝送距離：300m 以上 通信速度：10kbps 以上
4	動揺・位置検出性能	ロール精度：0.1° ピッチ精度：0.1° ヘディング精度：0.2° 位置精度：　2cm+2ppm（RTK）以内 ヒーブ精度：5cm or 5% 以内
5	連続稼働時間	8 時間以上
6	充電時間	8 時間以内

(3) 移動局

移動局は、①送信ユニット、②バッテリーユニット、③2 つの送波器ユニットから構成される。④クロック同期ユニット、⑤充電器は付属品である。

表 2.5 移動局（水中バックホウ艤装時）の外観及び規格、性能等

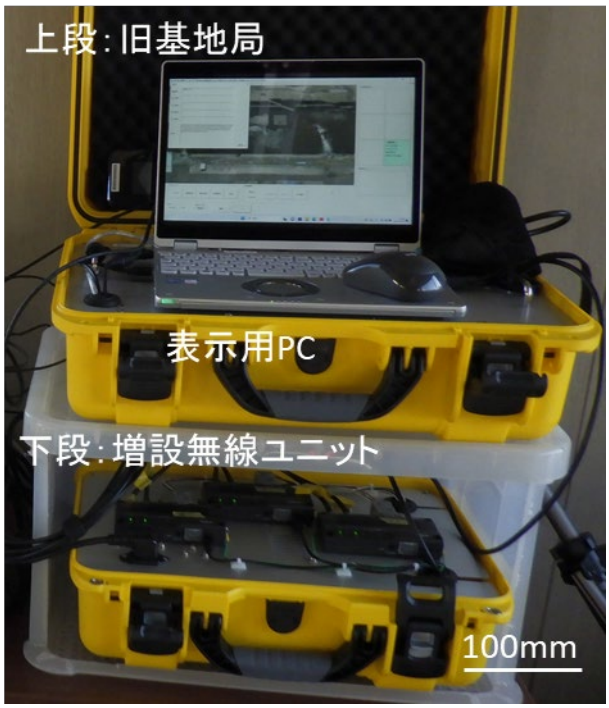
	項目	規格、性能等
1	外観、寸法、重量	 (a) 拡大図 [1]送波器-2, [2]バッテリーユニット, [3]送信回路ユニット, [4]送波器-1, [5]バックホウ用架台  (b) 全景 寸法・重量（気中） [1],[4] 送信ユニット　　φ190mm x 550mm、12kg [2] バッテリーユニット　φ190mm x 375mm、10kg [3] 送信回路ユニット　　φ130mm x 225mm、 5kg
2	音響性能	送信音圧：179.3dB re μPa@1m, 20kHz (No.1) 176.5dB (No.2)  指向特性 水平方向：無指向性 垂直方向：下図参照

		 送波信号設定項目 (1) 送信周期（測位間隔） (2) パルス幅 (3) 周波数掃引開始周波数 (4) 周波数掃引終了周波数 (5) 送信遅延（ch 間スキュー） (6) 送波利得（送波振幅）
4	クロック精度	$+0.8\times10^{-10}$
5	連続稼働時間	8 時間以上
6	充電時間	8 時間以内

(4) 基地局

基地局はトランクに設置されたノート型 PC と無線ユニットにより構成される。**表 2.6** に基地局の仕様を示す。

表 2.6 基地局の外観及び規格、性能等

<table>
<tr><td></td><td>項目</td><td>規格、性能等</td></tr>
<tr><td>1</td><td>外観、寸法、重量
 
</td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>基地局ノート PC 仕様
<table>
<tr><td>No</td><td>項目</td><td>仕様</td></tr>
<tr><td>1</td><td>OS</td><td>Windows11 Pro</td></tr>
<tr><td>2</td><td>CPU</td><td>i7-1185G7</td></tr>
<tr><td>3</td><td>メモリ</td><td>32GB</td></tr>
<tr><td>4</td><td>HDD</td><td>512GB</td></tr>
</table></td><td></td></tr>
</table>

2.2.2　ICT 型水中バックホウ

本項目では、京浜港ドックにおける実験に使用した ICT 型水中バックホウ、および、周辺機材について仕様および写真を示す。

使用しているセンサ等の詳細は **4.2　ICT 型水中バックホウの仕様**を参照すること。

表 2.7　ICT 型水中バックホウ

名称	仕様	名称	仕様
ZX40	0.13m³級 (5.35×1.96×H2.53) 約 6.0t	TKM30	0.09m³級 (4.53×1.55×H2.565) 約 3.0t
発動発電機	220V/125kVA	発動発電機	440V/125kVA
配電盤	非常停止ボタン(30m)付	制御盤	
動力線	100m ケーブル	ドラム	動力線収納用

2.2.2-(a)　ZX40（遠隔操縦対応型水中ミニショベル）

・ZX40 機体本体

図 2.8　ZX40（遠隔操縦対応型水中ミニショベル）本体

・ベースモデル　：日立建機社製 0.13 立米級ミニショベル　ZX40
・実重量　　：6 トン（ベースモデルは 4ｔクラス）
・動力　　：三相 220V　22kW 水中モータに変更
・マシンガイダンスセンサ：装備済
・遠隔操作　　：可（アタッチメント制御用にエクストラポートを 4 ポート追加
（油圧シリンダ往復路×3、油圧モータ CW/CCW 入力+復路））
・アタッチメント：デム工業社製チルトローテータフォークグラブ

図 2.9　ZX40 水中モータ制御盤

・直入れ始動方式（全電圧始動方式）

・非常停止ボタン延長ケーブル 30m

図 2.10　ZX40 用、動力線（100m）

2.2.2-(b)TKM30（水中マシンガイダンス付き水中ミニショベル）

・TKM30 機体本体

図 2.11　TKM30（水中マシンガイダンス付き水中ミニショベル）本体

・機体質量　　：3 トン以下
・ベースモデル　：クボタ製 0.09 立米級ミニショベル U30s
・動力　　：三相 440V　22kW 水中モータに変更
・マシンガイダンスセンサ：装備済
・遠隔操作　　：不可
・アタッチメント：デム工業社製フォークグラブ

図 2.12　TKM30 水中モータ制御盤

・インバーター方式によるモータ回転数可変
・起動/停止/回転数ペンダント付き

図 2.13　動力線収納ドラム（TKM30）

・電動巻き取り巻き出し機能

・動力線には浮力材チューブを巻き付け済

図 2.14　発動発電機

（右）：ZX40 用　三相 220V125kVA　（左）：TKM30 用　三相 440V125kVA

2.2.3　その他の周辺機器

本項目では、京浜港ドックにおける実験実施に使用したその他の周辺機材・治具等について紹介する。今回使用した周辺機器の仕様を**表 2.8** に示す。

表 2.8　周辺機材・治具等

名称	仕様	用途
ラフタークレーン	100t吊	水中バックホウ、浮上局等の投入・揚収
4tユニック	4t	浮上局架台の運搬
高圧洗浄機		水中バックホウ、浮上局の洗浄
水槽	1000L	洗浄水の貯水
浮上局用架台		
受波器用架台	1.0×1.0×H1.0m	
ベッセル枠	2.0×1.0×H0.325m	実験の目標用
石材		実験用　※モッコを使用し水中へ投入
船外機付き小型船舶		
鉄板	1.5×6.0m　3 枚	ドック底盤養生用

図 2.15　100ｔラフタークレーン（投入・揚収用）

図 2.16　４ｔユニックトラック（ドック内機材輸送）

図 2.17　高圧洗浄機（機材洗浄用）

図 2.18　水槽（洗浄水）

図 2.19　浮上局用架台（メンテナンス、充電等に使用）

図 2.20　受波器用架台（LBL や Evologics の水中固定用）

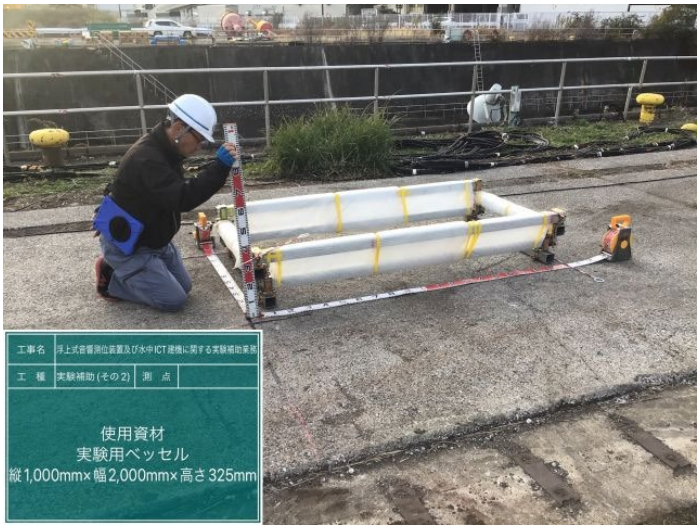


図 2.21　ベッセル枠（把持実験の位置目標として利用）

図 2.22　石材（把持対象物として利用）

図 2.23　船外機付き小型船舶（水面での玉掛等に使用）

図 2.24　敷鉄板（実験範囲の養生用）

2.2.4　京浜港ドックにおける機材配置図

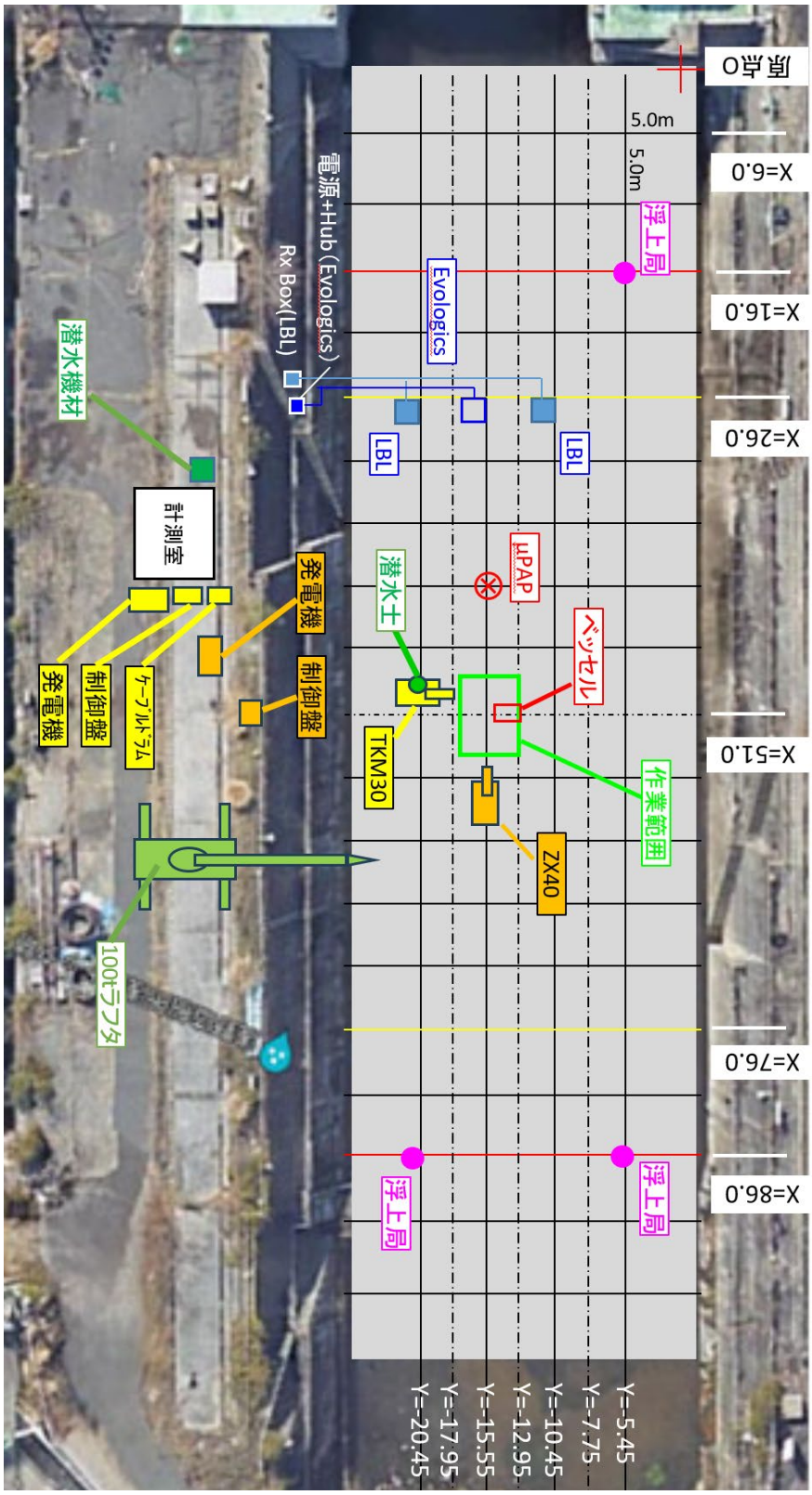


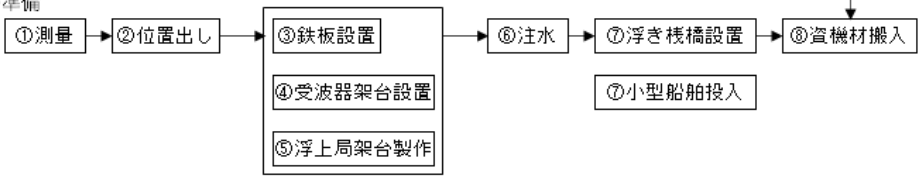
図 2.25　機材配置図

2.3　作業フロー

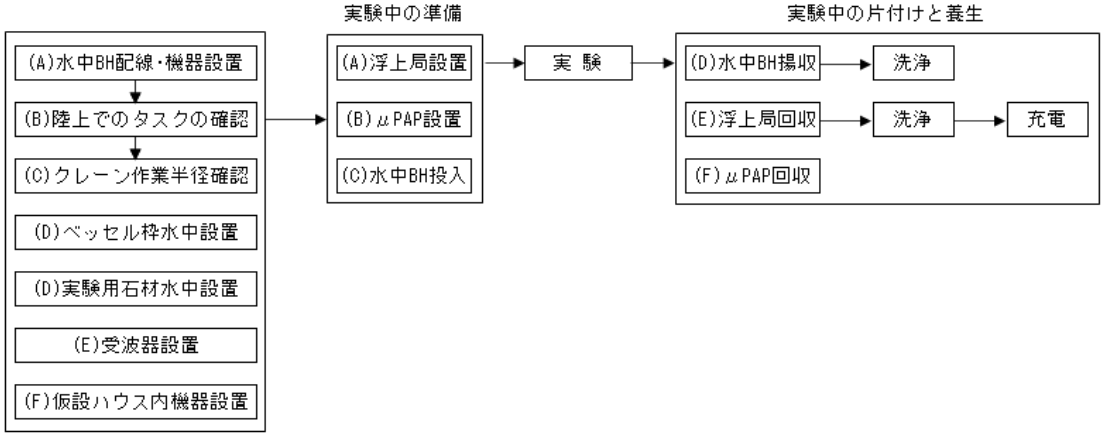
本節では、京浜港ドックにおける実験実施に関し、その計画準備、作業手順を示す。
また京浜港ドックにおける実験タスクについても合わせて示す。

2.3.1(B)港空研での準備

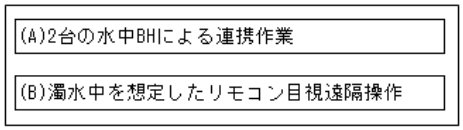
2.3.1(C)京浜港ドックでの準備



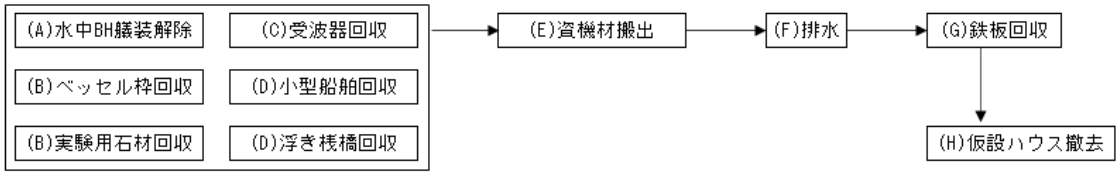
2.3.2 京浜港ドックでの実験前の準備　2.3.3 実験期間中の作業



2.3.4 実験タスク



2.3.5 実験後の片付け



2.3.1　計画・準備

(A)　実験計画の策定

本実験は、「衛星測位を活用した浮上式音響測位装置」「ICT 型水中バックホウ」「水中作業情報管理システム」を用い、複数台の水中バックホウと潜水士の位置関係や作業状況を共有できることを実証することを目的としたものである。

ここで使用する機材である ICT 型水中バックホウや潜水士には動力線や送気ホースが必要である。さらに、TKM30 や潜水士の位置を測位するセンサ（USBL や LBL）では、親機の設置位置を正確に取得する必要があるほか、信号線を計測室まで取り廻す必要がある。このため、これら使用する機材の配置と動線・移動範囲、ケーブルの配線についてあらかじめ計画する必要がある。

配置条件①から③を考慮した､京浜港ドックにおける機材の配置計画図を**図 2.26** に示す。

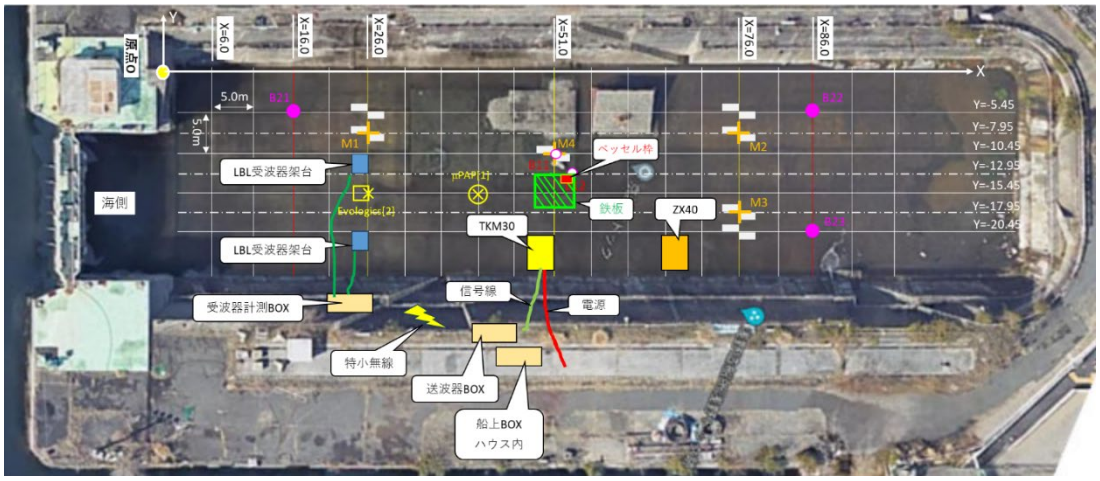


図 2.26　京浜港ドック配置計画図

【配置条件①】　計測室の配置

京浜港ドックに設置している斜面模型、砕石模型を撤去するため、**図 2.26** 上側は揚収解体ヤードが存在することとなる。そのため、計測室（仮設ハウス）を設置する位置は、ドック配置図下側となる。

【配置条件②】　水中バックホウ投入・揚収位置

本実験で水中バックホウを投入揚収するためにラフタークレーンを使用する。また配置条件として、ラフタークレーンアウトリガーの位置は、過去に京浜港ドックに存在していたジブクレーンのレール跡にすることとしており、水中バックホウ ZX40 の機械重量 6 トンと、ジブクレーンレール跡から投入位置までの距離 13mを条件とすると、100 トンクラスのラフタークレーンが必要となる。

図 2.27 に旋回半径を考慮したラフタークレーン配置検討図を示す。

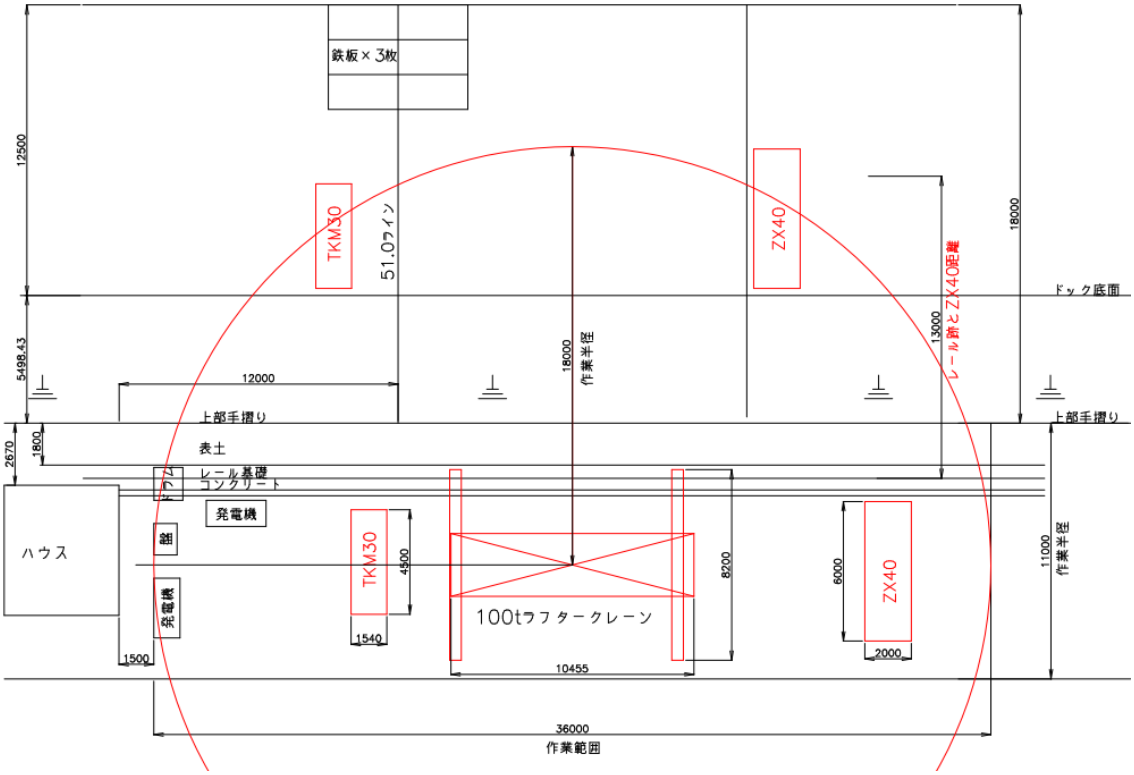


図 2.27　投入揚収クレーンの作業範囲検討

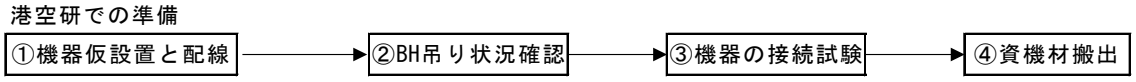
【配置条件③】作業範囲（水中バックホウ動力ケーブル、測位センサ信号線、送気ホース）

動力線や信号線、送気ホースが水面上で交差しないような配置を検討する。

また、作業機械が移動する範囲についても検討を行う。

(B)　港空研での準備

京浜港ドックでの実験に先立ち、港空研において実験で使用する機材について、①機器の仮設置と配線、②吊り状況の確認、③接続試験を行った。その後、④機器を取り外して京浜港ドックに向けて資機材の搬出を行った。



① 機器仮設置と配線

【ZX40】

各種機器（POE カメラ、M3）をバックホウに仮設置し、ケーブルを動力線に這わせる（50m程度)。

・測量用プリズムを設置するための単管パイプ（テスト用に 2m）を仮設置する。

【TKM30】

・測量用プリズムを設置するための単管パイプ（テスト用に 2m）を仮設置する。

・単管の振れ止めにワイヤーで 3 点固定する。

② 吊り状況の確認

・2 台の水中バックホウに吊具を付け、クレーンで吊った時に干渉しないか確認を行う。

③ 接続試験

・機器（MG、箱庭ソフト、μPAP、M3）を実際に接続し試験を行う。

・2 台のバックホウを使用し、実験タスクの確認を行う。

④ 機器を取り外して、京浜港ドックに向けて搬出

・10t トラック 3 台と 25t ラフタークレーンにより京浜港ドック向けに搬出。

トラック	備考
1 台目	TKM30、制御盤、動力線用ドラム、発電機
2 台目	ZX40、動力線ケーブル、配電盤
3 台目	網カゴパレット、その他実験用資機材

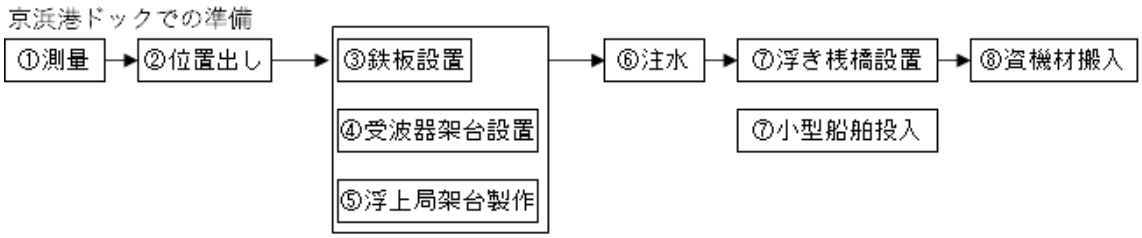
図 2.28　搬出用トラック（1 台目）

図 2.29　搬出用トラック（2 台目）

図 2.30　搬出用トラック（3 台目）

(C) 京浜港ドックでの準備

京浜港ドックでは、実験準備として、①測量、②位置出し、③養生用鉄板の設置、④LBL 受波器架台の設置、⑤浮上局架台の製作、⑥ドック内の注水、⑦浮き桟橋設置と小型船舶投入、⑧港空研からの資機材の搬入を行った。



① 測量

・測量を行い、京浜港ドック座標系における設置機材のマーキング等を行う。
マシンガイダンスと水中作業状況管理システムで同じ座標軸となるように、基準点となるドック原点（0,0）を設定する。
またGNSSデータ等のグローバル座標系とリンクさせるため、ドック原点の緯度経度と真北と法線方向の角度差を計測する。

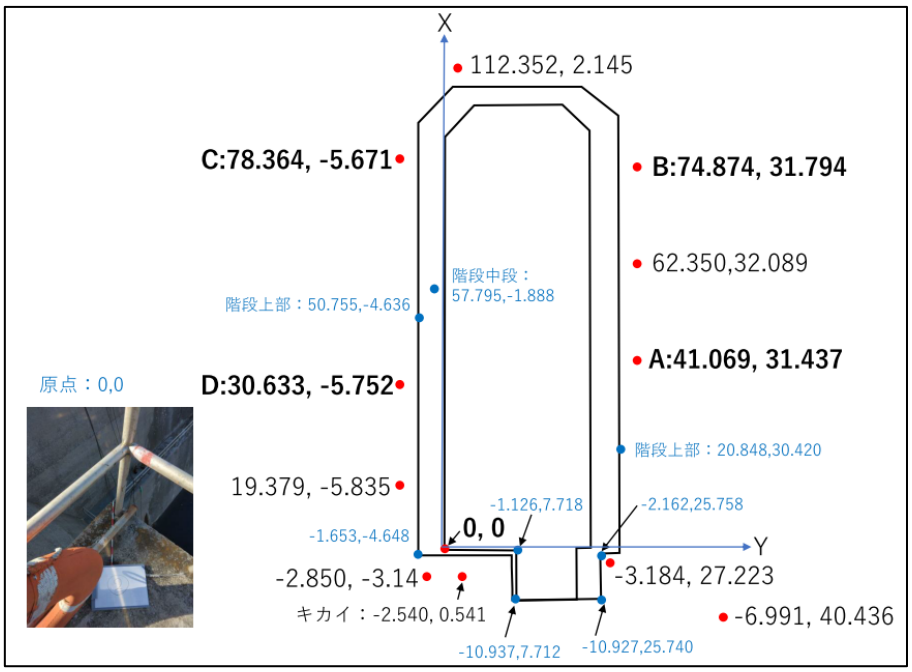


図 2.31　京浜港ドックの原点（0,0）設定と測量結果

② 位置出しとマーキング

・計画図面に基づき、機器を設置する箇所が目視で確認できるようにドック内底面と中段にロープを張り、設置場所にブロックやカラーテープで目印を設置する。

図 2.32　ドック内の位置出しとマーキング

③　養生用鉄板設置

・ドック底盤を損傷させないよう、実験範囲に 70t ラフタークレーンで鉄板を設置する。

図 2.33　鉄板設置状況

図 2.34　鉄板設置完了

名称	人数	備考
クレーン 70t	1	
合図者	1	
作業員	2	玉掛

④　LBL 受波器架台の設置

・受波器設置位置に、単管で架台を製作し、設置個所の位置を測量する。

図 2.35　受波器架台設置完了

名称	人数	備考
作業員	2	単管運搬・組立

⑤　浮上局用架台の製作

・浮上局を養生するための架台を、単管で製作する。

・浮上局は充電する必要があるため、3 基の架台を 4t ユニックで運搬できるサイズで作成する。

図 2.36　浮上局用架台製作状況

図 2.37　浮上局と浮上局用架台

名称	人数	備考
作業員	2	単管組立

⑥　注水

・8 吋水中ポンプ 3 台で、ドック内に注水を行う。昼間 8 時間運転で 3 日程度の時間が必要であった。

図 2.38　注水ポンプ設置状況

図 2.39　注水状況

名称	人数	備考
クレーン 25t	1	
合図者	1	
作業員	2	玉掛

⑦浮き桟橋設置と小型船舶投入

・浮き桟橋を、25ｔラフタークレーンで設置する。

・船外機付小型船舶を、浮桟橋付近に 25ｔラフタークレーンで設置する。

図 2.40　浮き桟橋と小型船舶

名称	人数	備考
クレーン 25t	1	
合図者	1	
作業員	2	玉掛

⑧搬入

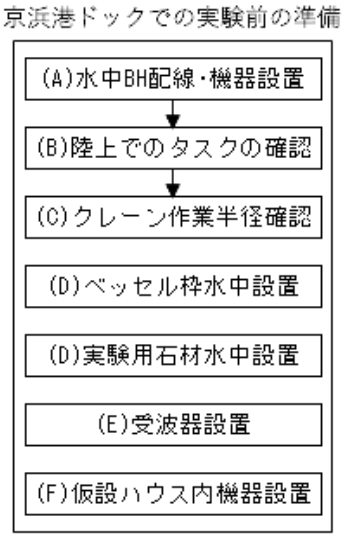
・港空研から搬出した水中バックホウ等の資機材（10t トラック 3 台）を京浜港ドックに搬入し、25t ラフタークレーンで荷卸しを行う。

図 2.41　港空研からの機材搬入

名称	人数	備考
クレーン 25t	1	
合図者	1	
作業員	4	玉掛

2.3.2　京浜港ドックでの実験前の準備

京浜港ドックでの実験前の準備として、(A)水中バックホウの配線と機器設置、(B)陸上での実験タスクの確認、(C)クレーン作業半径の確認、(D)実験用資材（ベッセル枠・実験用石材）の水中設置、(E)受波器の設置、(F)仮設ハウス内の機器設置を行った。



(A)　水中バックホウの配線と機器設置

・水中バックホウと発電機、分電盤との配線接続を行う。

・各種機器（POE カメラ、M3、送波器等）を水中バックホウに設置し、動作や通信の確認を行う。

・測量用プリズムを設置するための単管パイプ（4m）を設置する。

図 2.42　水中バックホウの配線接続

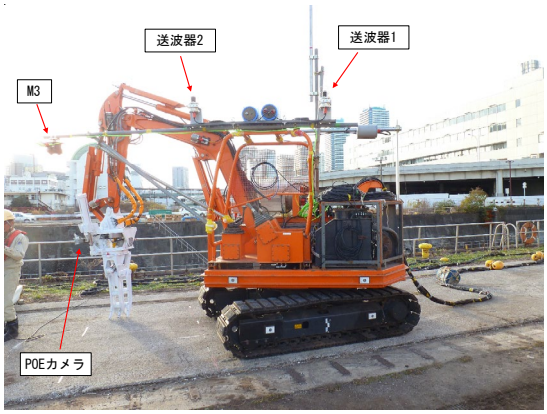


図 2.43　各種機器設置

図 2.44　プリズム用単管パイプ設置

(B)　陸上での実験タスクの確認

・潜水士や陸上遠隔操作者の意思を共有するため、陸上において水中バックホウ 2 台を使用した実験タスクの事前練習及び確認を行う。

図 2.45　実験タスク確認（ZX40）

図 2.46　実験タスク確認（TKM30）

(C)　クレーン作業半径の確認

・100t ラフタークレーンを使用してドック内に水中バックホウ ZX40（約 6t）を投入するのに必要な作業半径 18m（**図 2.27** 参照）において、ラフタークレーン最大荷重を超過しないことを陸上で事前確認する。

図 2.47　作業半径確認状況

図 2.48　作業半径確認

(D)　実験用資材（ベッセル枠、石材）を水中へ投入・設置

・ベッセル枠を養生用鉄板の上に、100t ラフタークレーンと潜水士で設置する。

・養生用鉄板は 1.5m×6m×3 枚、ベッセル枠の外形は 1m×2m で、**図 2.51** のように設置する。

・実験における把持対象の石材 3 個を養生用鉄板の上に、100t ラフタークレーンと潜水士で設置する。

図 2.49　ベッセル枠設置状

図 2.50　石材設置状況

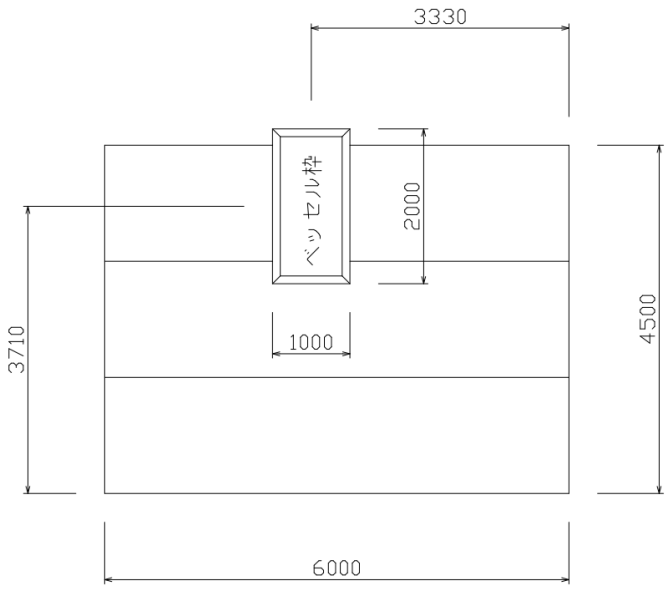


図 2.51　養生用鉄板とベッセル枠の寸法と配置

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
潜水士	1	
潜水士連絡員	1	
潜水士補助	1	
作業員	2	陸上玉掛

(E)　受波器の設置

・潜水士により、受波器架台に受波器を設置する。

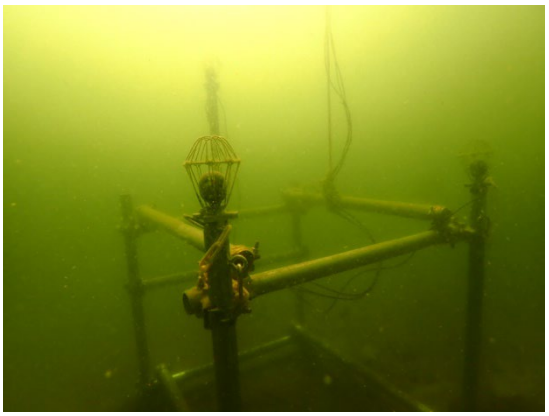


図 2.52　受波器設置状況

名称	人数	備考
潜水士	1	
潜水士連絡員	1	
潜水士補助	1	

(F)　仮設ハウス内の機器設置

・仮設ハウス内に水中バックホウの遠隔操作用、マシンガイダンス用の各種機器、浮上式音響測位装置、箱庭システムなどの機器を設置する。

各機器の構成は**図 2.53** に示すとおりであり、仮設ハウス内の機器配置は**図 2.54** のとおりである。

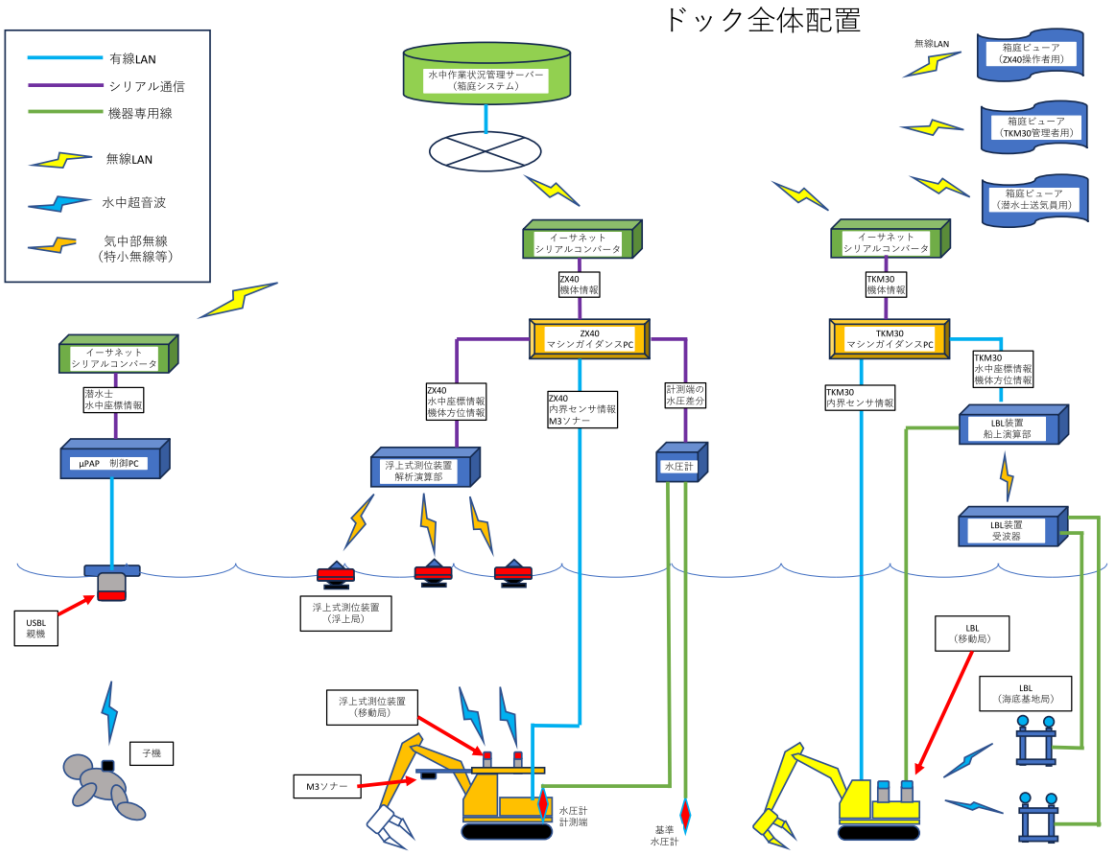


図 2.53　水中バックホウの遠隔操作、マシンガイダンス、浮上式音響測位装置の各種機器構成

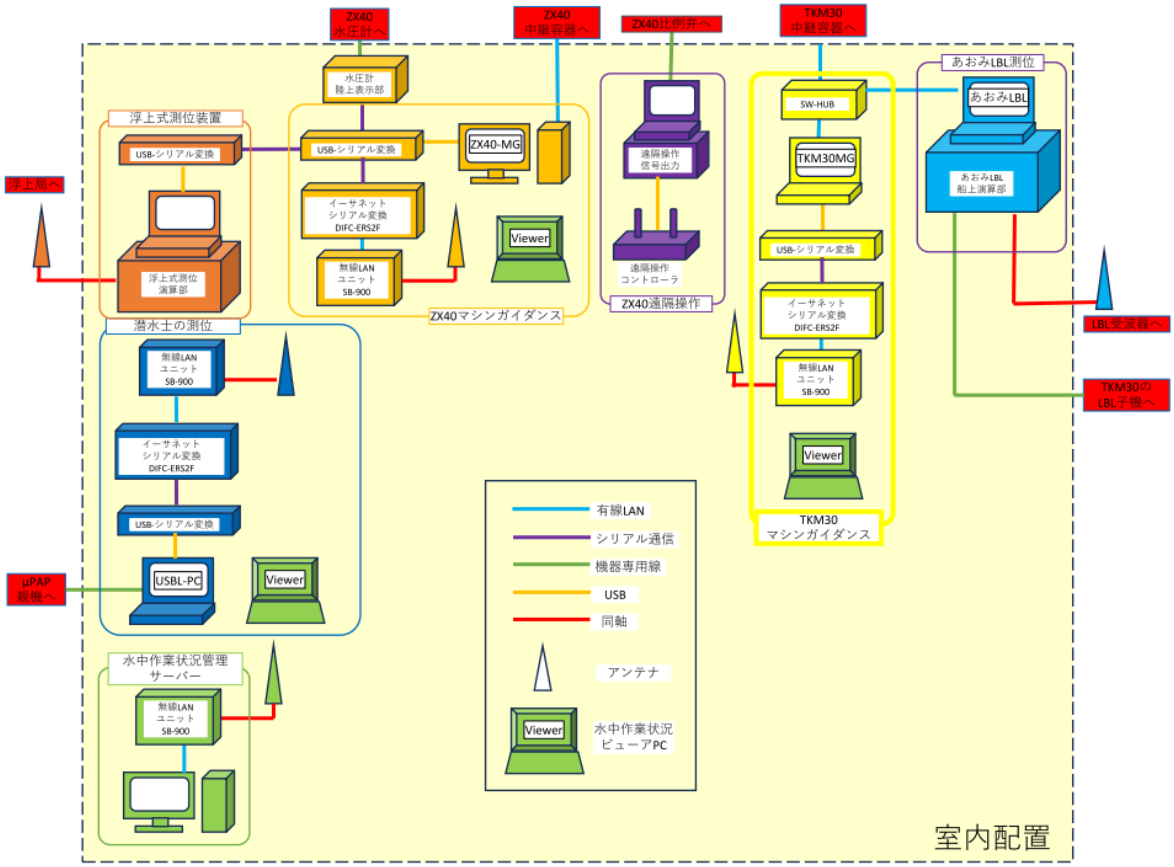
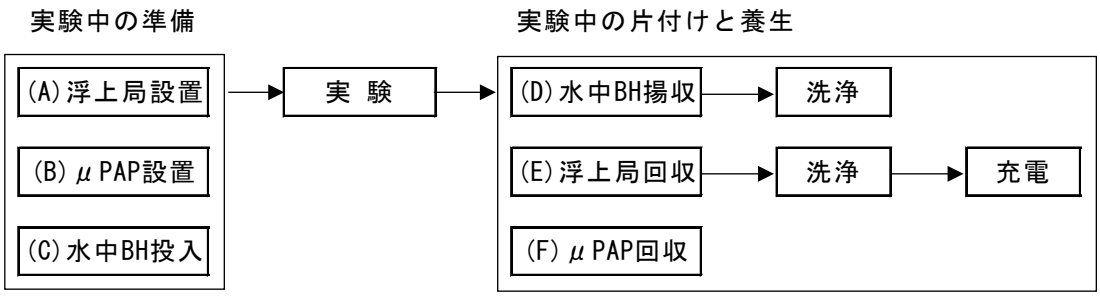


図 2.54　仮設ハウス内の機器配置 x

2.3.3　実験期間中の作業

京浜港ドックでの実験期間中の作業として、(A)浮上局の設置、(B)μPAP の設置、(C)水中バックホウの投入、(D)水中バックホウの揚収、(E)浮上局の回収、(F)μPAP の回収を行った。



各種機器の設置、撤去にかかる時間は、計測の結果、**表 2.9** の通りであった。

表 2.9　作業時間まとめ

項目	作業時間[hh:mm]					備考
	12/19	12/20	12/21	12/22	平均	
○実験準備						
浮上局設置　1基目	0:09	0:20	0:04	-	0:11	
クレーン移動	0:04	0:12	0:19	-	0:11	
浮上局設置　2基目	-	0:04	0:04	-	0:04	
浮上局設置　3基目	0:04	0:05	0:06	-	0:05	
μPAP設置	0:08	0:09	0:05	0:06	0:07	
ZX40投入	0:19	0:15	0:15	0:13	0:15	
TKM30投入	0:15	-	0:16	-	0:15	
合計	0:59	1:05	1:09	0:19	0:53	
○終業準備						
ZX40揚収	0:29	0:19	0:21	0:20	0:22	
TKM30揚収	-	0:18	-	0:12	0:15	
浮上局回収　1基目	0:11	0:10	-	0:04	0:08	
浮上局回収　2基目	0:06	0:05	-	0:05	0:05	
μPAP回収	0:04	0:04	0:06	0:07	0:05	
クレーン移動	0:20	0:17	-	0:20	0:19	
浮上局回収　3基目	0:08	0:05	-	0:05	0:06	
合計	1:18	1:18	0:27	1:13	1:04	

(A)　浮上局の設置

・3 基の浮上局を 100t ラフタークレーンと小型船舶に搭乗した作業員により設置する。

・1 基（B21）の浮上局はドック北側から設置し、2 基（B22、B23）の浮上局はドックの南側から設置する。

図 2.55　浮上局設置状況

図 2.56　浮上局設置完了

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
小型船舶	2	操船 1 名、玉掛 1 名
作業員	2	陸上玉掛

(B)　μPAP の設置

・μPAP を 100t ラフタークレーンと小型船舶に搭乗した作業員により設置する。

・μPAP が動かないように、北側と南側の手摺にロープで固定する。

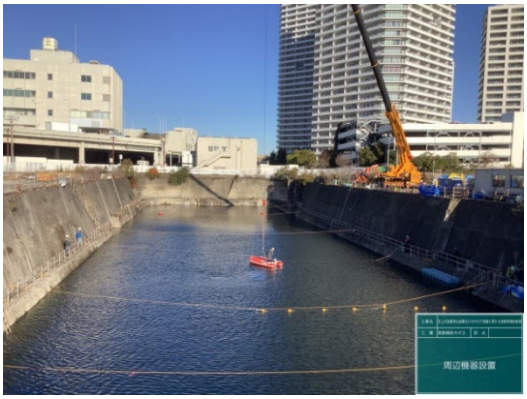


図 2.57　μPAP 設置状況

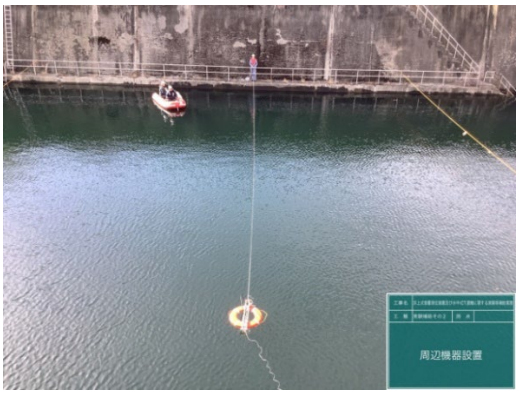


図 2.58　μPAP 設置完了

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
小型船舶	2	操船 1 名、玉掛 1 名
作業員	2	ロープの固定

(C)　水中バックホウの投入

・水中バックホウを 100t ラフタークレーンで投入する。

・投入中は、動力線が絡まないよう作業員が補助する。

・投入後、潜水士がワイヤーの玉掛を外す。

図 2.59　ZX40 投入状況

図 2.60　ZX40 投入状況

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
潜水士	1	
潜水士連絡員	1	
潜水士補助	1	
作業員	6	動力線の補助（上段 4 名、下段 2 名）
作業員	2	本体の介錯ロープ（上段 1 名、下段 1 名）

図 2.61　TKM30 投入状況

図 2.62　TKM30 投入状況

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
潜水士	1	
潜水士連絡員	1	
潜水士補助	1	
作業員	4	動力線の補助（上段 2 名、下段 2 名）
作業員	2	本体の介錯ロープ（上段 1 名、下段 1 名）

(D)　水中バックホウの揚収

・潜水士により水中バックホウの玉掛を行い、100 t ラフタークレーンで揚収する。

・揚収中は、動力線が絡まないよう作業員が補助する。

・揚収した水中バックホウは、高圧洗浄機により洗浄する。

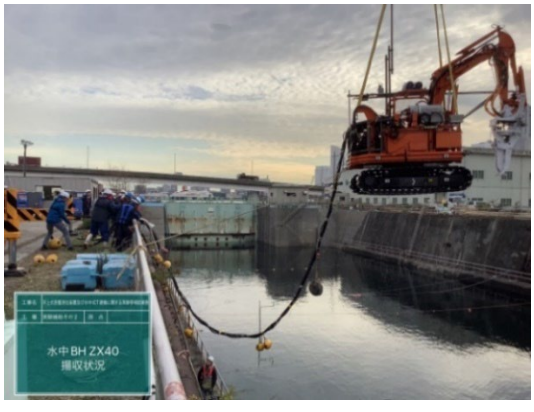


図 2.63　ZX40 揚収状況

図 2.64　TKM30 揚収状況

図 2.65　ZX40 洗浄状況

図 2.66　TKM30 洗浄状況

(E)　浮上局の回収

・3 基の浮上局を 100t ラフタークレーンと小型船舶に搭乗した作業員により回収する。
・回収した浮上局は、高圧洗浄機により洗浄する。
・浮上局の回収場所が異なるため、高圧洗浄機を 4ｔユニックに乗せ移動する。
・回収した浮上局は、架台に乗せ養生し、充電も行う。

図 2.67　浮上局回収状況

図 2.68　浮上局洗浄状況

図 2.69　浮上局養生

図 2.70　浮上局充電

(F)　μPAP の回収

・μPAP を 100t ラフタークレーンと小型船舶に搭乗した作業員により回収する。

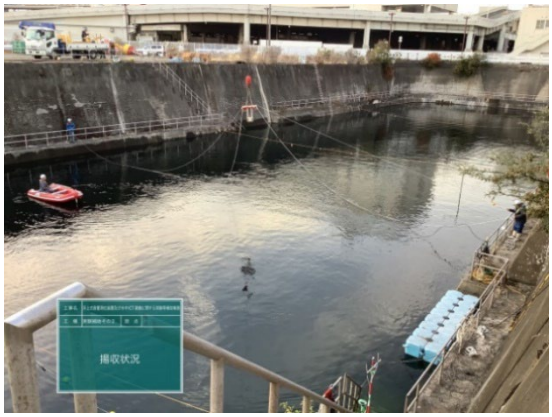
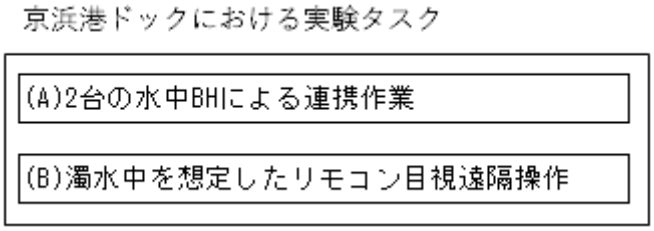


図 2.71　μPAP 回収状況

図 2.72　μPAP 全景

2.3.4　実験タスク

京浜港ドックにおける実験タスクとして、(A) 2 台の水中バックホウによる連携作業、(B) 濁水中を想定したリモコン目視遠隔操作実験を行った。



(A)　2 台の水中バックホウによる連携作業

2 台の水中バックホウのうち、ZX40 は遠隔操作、TKM30 はマシンガイダンス付有人操作として、**図 2.73** に示す機器配置で、以下の連携作業を行う。なお、水中バックホウの位置計測は、ZX40 は浮上式音響測位装置、TKM30 はあおみ建設が開発した LBL による測位装置にて行う。また、2 台の旋回範囲は一部重複させることとして、両機が接触しないよう箱庭システムで管理することとする。

①TKM30：石山を崩して、バケット側面でころがして移動する。

②ZX40：　ソナーで石を認識して、グラブで把持する。

③ZX40：　ソナーでベッセル枠を認識して石を投入する。

④ZX40：　アームの干渉が無いように、状況提示ソフトで情報を共有する。

⑤TKM30：陸上補助員が、状況提示ソフトで ZX40 の姿勢を認識して、声で指示する。

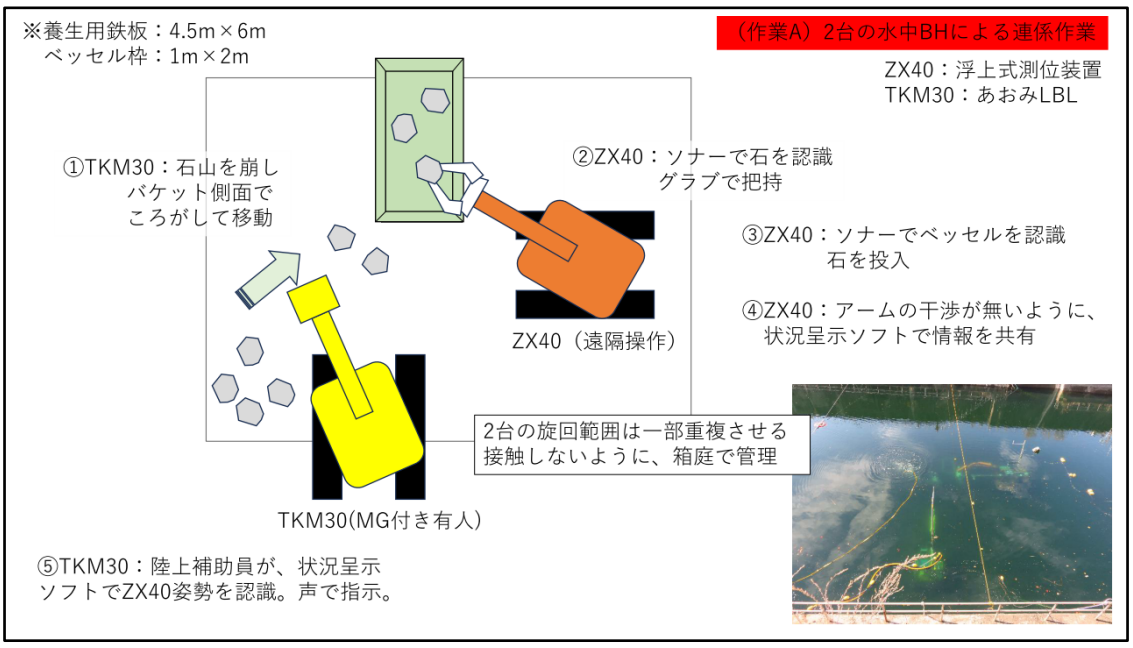


図 2.73　（作業 A）2 台の水中バックホウによる連携作業の機器配置と作業内容

2 台の水中バックホウによる連携作業の所要時間は**表 2.10** のとおりであった。

表 2.10　連携作業時間まとめ

（作業A）2台の水中BHによる連係作業　時間計測結果

動作機体	項目	時間 [mm:ss]	動作内容詳細
TKM30	石をZX40の前へ移動　1個目	05:59	待機姿勢→石を把持→ZX40の前で手放す→待機姿勢
ZX40	石を枠の中へ移動　1個目	04:14	M3でスキャン→石を把持→枠の中で石を手放す→待機姿勢
TKM30	石をZX40の前へ移動　2個目	01:38	待機姿勢→石を把持→ZX40の前で手放す→待機姿勢
ZX40	石を枠の中へ移動　2個目	03:19	M3でスキャン→石を把持→枠の中で石を手放す→待機姿勢
TKM30	石をZX40の前へ移動　3個目	01:58	待機姿勢→石を把持→ZX40の前で手放す→待機姿勢
ZX40	石を枠の中へ移動　3個目	03:53	M3でスキャン→石を把持→枠の中で石を手放す→待機姿勢

(B)　濁水中を想定したリモコン目視遠隔操作

透明度の低い濁水中での作業を想定して、潜水士直接目視によるリモコン操作として、**図 2.74** に示す機器配置で、以下の作業を行う。なお、水中バックホウの位置計測は浮上式音響測位装置、潜水士の位置計測はμPAP により行う。また、把持作業中は「旋回」「走行」を停止する。「旋回」「走行」時、潜水士が安全な位置にいることを確認して、陸上側 PC で許可することとする。

①ZX40（TKM30）：　ベッセル枠内の石を直接目視で把持する。

②ZX40（TKM30）：　石を揃えて置く。

③ZX40（TKM30）：　クローラで移動する。

④ZX40（TKM30）：　石を集めてベッセル枠内に設置する。

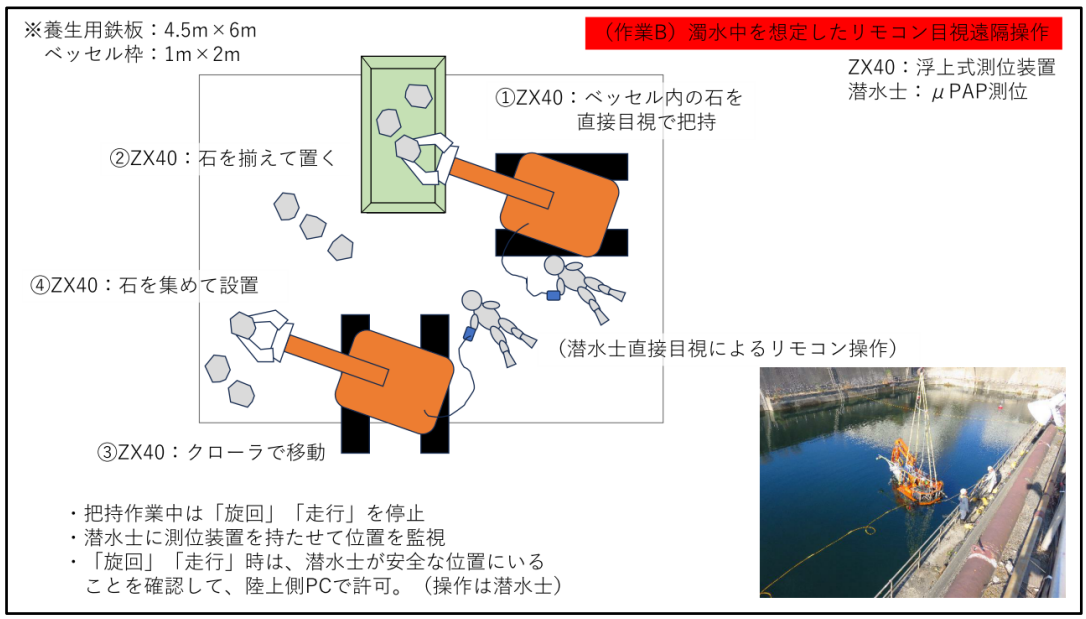


図 2.74　（作業Ｂ）濁水中を想定したリモコン目視遠隔操作の機器配置と作業内容

濁水中を想定したリモコン目視遠隔操作の所要時間は**表 2.11** のとおりであった。

表 2.11　リモコン目視操作時間まとめ

（作業B）濁水中を想定したリモコン目視遠隔操作　時間計測結果

ZX40動作時間計測結果

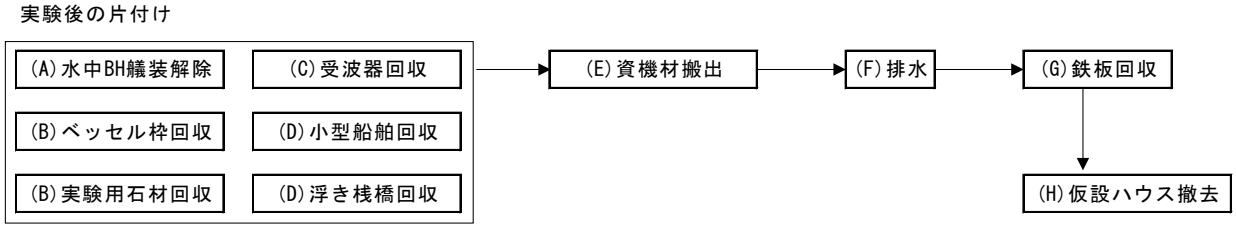
動作機体	項目	時間 [mm:ss]	動作内容詳細
ZX40	石を枠の外へ出す　1個目	01:29	待機姿勢→枠内の石を把持→枠外で石を手放す
ZX40	石を枠の外へ出す　2個目	01:25	石を手放した姿勢→枠内の石を把持→枠外で石を手放す
ZX40	2.5m移動	00:35	石を手放した姿勢→ブームアームを走行姿勢に→2.5m前進
ZX40	石をTKM30の前へ移動　1個目	01:04	走行姿勢→石を把持→TKM30付近で石を手放す
ZX40	石をTKM30の前へ移動　2個目	01:35	石を手放した姿勢→石を把持→TKM30付近で石を手放す

TKM30動作時間計測結果

動作機体	項目	時間 [mm:ss]	動作内容詳細
TKM30	石を枠の外へ出す	04:55	待機姿勢→枠内の石を把持→枠外で石を手放す

2.3.5　実験後の片付け

京浜港ドックでの実験後の片付けとして、(A)水中バックホウの艤装解除、(B)実験用資材の回収、(C)受波器の回収、(D)小型船舶と浮き桟橋の回収、(E)資機材の搬出、(F)ドックの排水、(G)鉄板の回収、(H)仮設ハウスの撤去を行った。



(A)　水中バックホウの艤装解除

・水中バックホウに艤装・設置した機器を取り外す。

図 2.75　ZX40 艤装解除

図 2.76　TKM30 艤装解除

(B)　実験用資材の回収

・ベッセル枠を 100t ラフタークレーンと潜水士で回収する。

・実験用石材 3 個を 100t ラフタークレーンと潜水士で回収する。

図 2.77　ベッセル枠回収状況

図 2.78　石材回収状況

名称	人数	備考
クレーン 100t	1	
合図者	1	
小型船舶	2	操船１名、玉掛１名
作業員	2	

(C)　受波器の回収

・潜水士により、受波器架台から受波器を取り外し回収する。

図 2.79　受波器回収状況

(D)　小型船舶と浮き桟橋の回収

・船外機付小型船舶を、100ｔラフタークレーンで回収する。

・浮き桟橋を、100ｔラフタークレーンで回収する。

図 2.80　小型船舶回収状況

図 2.81　浮き桟橋回収状況

(E)　資機材の搬出

・水中バックホウ等の資機材（10t トラック２台、８ｔユニック）を搬出する。
トラックに搭載後に姿勢をかえる必要があるので、動力は最後まで使用できる対応が必要である。

図 2.82　資機材搬出状況

(F)　排水

・8 吋水中ポンプ 3 台を 100ｔラフタークレーンで設置し排水する。排水に要した時間は 1 日 8 時間で 5 日であった。

図 2.83　排水状況

図 2.84　排水状況

(G)　鉄板回収

・ドック内の排水完了後、60ｔラフタークレーンで養生用鉄板を回収する。

図 2.85　鉄板回収状況

図 2.86　鉄板洗浄状況

(H)　仮設ハウス撤去

・計測室等の仮設物を撤去する。

第３章　衛星測位を活用した水中測位技術の開発

3.1　水中音響測位の周辺状況と浮上式音響測位装置の開発経緯

3.1.1　水中音響測位の周辺状況

①水中音響測位装置の分類及び動作

基線長によって LBL、SBL, USBL に分類されている。その動作原理、特長については参考文献を参照されたい[1-4]。

②港湾域における音響測位装置の利用状況

音響測位装置（既製品）の状況、新技術情報提供システム(NETIS)の登録技術、港湾関連民間技術の確認審査・評価事業登録技術（沿岸技術研究センター）を調査した。

a)音響測位装置（既製品）の状況

国内で入手可能な既製品を網羅的調査していないが、web 検索では以下のとおりであった。

USBL：5 社以上の複数社が提供、メーカーによっては複数機種提供されている。

SBL：国内の既製品は 1 機種のみである。

LBL：3 社程度のカタログは見つかるが、USBL の構成品（トランスポンダなど）を組み合わせて、セミオーダーにて販売する形態になっている。

b)NETIS における音響測位関連技術の登録状況

表 3.1　NETIS における音響測位関連の登録技術*

No.	登録番号	名称、会社名	測位方式	登録年
[A]	KT-230211-A	産業用水中ドローン FIFISH(ファイフィッシュ)を用いた水質調査 CFD 販売（株）	USBL （$\rho-\theta$）	2023
[B]	KTK-210007-A	高精度水中ブロック・潜水士位置検知機能搭載据付支援システム WIT B-Fix Neo 若築建設（株）	SBL（$\rho-\rho$）	2021
[C]	KTK-200011-A	3D 水中施工管理システム りんかい日産建設（株）	USBL （$\rho-\theta$）	2000
[D]	KTK-200007-VR	産業用水中ドローン DiveUnit300 （株）FullDepth	USBL （$\rho-\theta$）	2000

*掲載期間終了を除く

表 3.2　key word(NETIS 検索)

No.	Key word	Hit 数	備考
1	音響測位	1	[A]
2	LBL	0	
3	SBL	3	[B],[C],[D]
4	USBL	2	[C],[D]
5	SSBL	0	

c)　港湾関連民間技術における音響測位関連の登録状況

表 3.3　港湾関連民間技術における音響測位関連の登録技術

No.	登録番号	名称、会社名	測位方式	登録年
1	14001	PU-NAVI（ピンポイント水中位置誘導システム） 東亜建設工業（株)、信幸建設（株）	USBL （$\rho-\theta$）	2011 2019 更新
2	10002	水中位置監視システム「水中ポジショニングシステム」 五洋建設（株）	USBL （$\rho-\theta$）	2011 2021 更新

d)備考（LBL 及び類似技術の使用例）

LBL では基線長>100ｍと言われているが[3,5]、港湾域における LBL の開発例として、船舶艤装の SBL の基線長より大きく（数十m以上)、$\rho-\rho$ 航法による測位を行っている例を紹介する。

第四港湾建設局が、基線長 200m級の LBL 測位装置の開発実験を 1986 年に行っており、ケーソンが設置されたマウンド上の移動軌跡が示されている。マルチパスによる測定誤差に関する考察では、測定対象とマルチパス発生源であるケーソンの距離が、測位用音響信号の持続距離（パルス持続時間×音速）より大きくなると影響がないと考察されている。

近年の LBL に関連した新しい試みとして、浦らの ROV による港湾施設や船舶の調査・点検のデモ[6]があげられる。このデモでは、岸壁に 30m間隔程度に設置した計測点を配置した LBL 測位と USBL 測位の比較を行っているが､LBL 方式の方が客船の船底下を航行する ROV の軌跡を安定にトレースできることが示されている。

e)まとめ

港湾域の音響測位として LBL が利用されることは稀であると言える。この背景のひとつとしては、従来の LBL では海底に設置された計測点の位置座標を正確に把握することが必要であり、展開コストが大きいことが考えられる。また、装置がセミオーダーであり、手軽に利用できる装置が存在しないことも、港湾域で LBL 方式が利用されない一因と考えられ

る。

③GIB（GPS Intelligent Buoys）

従来、海底に設置していた LBL の計測点を海面に配置し、海面の計測点の位置を GPS 測位することにより、LBL 測位の展開コストを下げる試みが 1990 年代後半には既に行われている[7]。装置コスト、運用コストを下げるために、音響測位装置と GPS 受信機を取り付けた浮体が用いられ、GPS Intelligent Buoys と呼ばれている。同様の試みは、2001 年にはワイドベースライン方式[8]として、2010 年に Alex の学位論文[9]として報告されている。実験条件が異なるため浮上式音響測位装置と直接の比較はできないが、2 つの先行例ともに測位結果の標準偏差が大きいように感じられる。当時の GPS の精度と浮体にも動揺センサが搭載されていないことが要因と推測される。

④マルチパス対策

音響測位では計測点と測定対象間のダイレクトパスを伝搬する音響信号を利用することが前提になっているが、港湾工事が行われる環境では、水深が浅く海底や海面での反射波が十分減衰しないことや、隣接する水中構造物からの反射、あるいは計測対象（水中作業機械）のボディでの反射といった、いわゆるマルチパス成分が受波され、測位結果に大きな外れ値が生じることがある。

これに対して、種々の試みが行われている。例えば、Alex は水中構造物が存在しない環境において、海面あるいは海底からの反射により生じた外れ値に対して、計測対象に取り付けた同期ピンガに水深計（圧力センサ）を内蔵することより、LBL（$\rho-\rho$）の測位結果での異常を検出している[9]。また高田らは、USBL（$\rho-\theta$）の測角（θ）において、時間軸上でダイレクトパスとマルチパスを分離するのではなく、その両者を一塊の信号と見なすことにより、測角の精度を向上させている[10]。吉原らは、SBL に近い受波器配置の $\rho-\rho$ 測位で、予め信号波の到達時刻を予想することにより形成した時空間フィルタにより、岸壁の近くを移動する水中バックホウの軌跡を良好にトレースしている[11]。

いずれにしても、港湾域の音響測位では何らかのマルチパス対策が必要である。

3.1.2　浮上式音響測位装置の開発経緯

浮上式音響測位装置の測位方式は、気中部は GNSS 衛星測位、水中部は音響測位のリレー式測位を海面に配置した GIB を介して行うものである。測位精度の向上のために LBL 方式を選択した。従来の LBL 方式のように海底の定点から測距するのに比べ、動きが伴う海面の計測点からの測距となるため、浮体の動きをキャンセルできるかが技術課題となる。この技術課題に対して、初期の GIB 方式 LBL には搭載されていなかった動揺センサを用いることにした。また測位に使用できる衛星数の増加、RTK 法の普及により衛星測位自体の性能が向上している。

測位誤差はバイアス（正確度）とばらつき（精密度）に分離される。長基線化により測距のばらつきの測位ばらつきへの誤差伝搬が小さくなることは、DOP(Dilution of Precision)を用いて容易に示すことが出来る。ただし、この考え方は LBL 測位に用いる最低 3 つの測距のばらつきが、距離によらず一定であるという仮定が伴う。光波測量儀の扱いでは、ばらつきは定数項と距離に比例する項で扱われている。浮上式音響測位装置の測距で取扱う距離は、数十m程度から 300mまで一桁程度異なるため、測距のばらつきに注意を要する。

一方、音速の誤差は距離が遠いほどその影響が大きくなり、バイアス誤差として測位結果に影響する。このため、基線長 20mといった LBL 測位が有効か、測定対象に極近接（10m程度）した USBL 測位とどちらが有効かについては、利用する条件によって異なるものと考えられる。但し、本資料の対象となる港湾工事や水中建設機械での利用を想定した場合、数百mの範囲に点在する複数の移動体を測位することについては、LBL 測位が優位であると考える。

（2021 年度）

音響測位装置の実海域設置上の技術課題の整理や現地実証試験計画の策定等を行う「令和３年度　水中施工機器のための音響測位装置導入検討委員会」を開催し、開発する測位装置の仕様の妥当性、運用に必要な諸手続き、性能試験方法を検討した。

装置開発としては、浮上局 1 基、移動局、基地局を製作し、新本牧沖において測距機能の動作確認を行った。

（2022 年度）

浮上局 2 基の追加製作と、基地局に測位機能を付与した。新本牧沖で移動局を着底させて測位試験を行った。そこで、実験に使用したクレーン付き台船の船底の反射に由来すると考えられるマルチパスを確認した。測位性能の評価は、実験海域の水深が 20mを越すため丁張が出来ず、クレーントップに取り付けた GNSS 受信機の座標を真値と仮定したが、GNSS 受信機の位置と吊芯の位置が異なること、移動局が潮流で流されため絶対的な測位精度の評価は行えなかったものの、ばらつきについては非常に小さいことが確認された。

（2023 年度）

京浜港ドックにて水中バックホウとの接続試験を実施するために、マルチパス対策を実施した。また無線データ通信を改良した。京浜港ドックにおける実験では、接続試験、測位性能評価ともに大きな問題はなかった。

また、2022 年度新本牧での実験において発生した測位精度検証方法の課題については、マルチビームソナーにより移動局が着底している座標を計測し、真値と仮定した。結果として、今回の実海域実験においては、浮上式音響測位装置の精度は 0.5m 以内を満たしていた。

【文献】

[1] 海洋音響の基礎と応用

[2] 超音波便覧（丸善）

[3] 飯森、水中測位、日本造船学会誌

[4] 尾崎、https://sensait.jp/11834/

[5] Keith Vickery, ACOUSTIC POSITIONING SYSTEMS A PRACTICAL OVERVIEW OF CURRENT SYSTEM

[6] 高精度音響位置決め技術を基盤とした ROV による浮体構造物や船の水中部分の調査・検査の実現
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ocean_policy/sosei_ocean_fr_000015.html, 2023-03

[7] Keith Vickery, ACOUSTIC POSITIONING SYSTEMS NEW CONCEPTS - THE FUTURE, 1998-09

[8] 澤 他、超音波による水中長距離計測システムの開発, 五洋建設技術年報, Vol.31, pp55-60 (2001)

[9] Alex Alcocer, Positioning and Navigation Systems for Robotic Underwater Vehicles, Oslo Metroplitan Univ., 2009-11

[10] 高田 他、水中音源到来方向推定におけるマルチパス干渉に強い到達時間差測定アルゴリズム、Jounal of Signal Processing, Vol.25, No.1, January 2021, pp.33-42

[11] 吉原 他、耐マルチパス水中音響測位技術の開発と水中バックホウの水中測位への応用、海洋音響学会研究発表会講演論文集、2023、pp.53-56

3.2　浮上式音響測位装置の準備、展開、運用

3.2.1　浮上式音響測位装置の概要

浮上式音響測位装置(以下、本装置)は、海上に設置した浮上局を用いて、海中を移動する移動局の位置を計測するシステムである。

全体のイメージ図を**図 3.1** に示す。

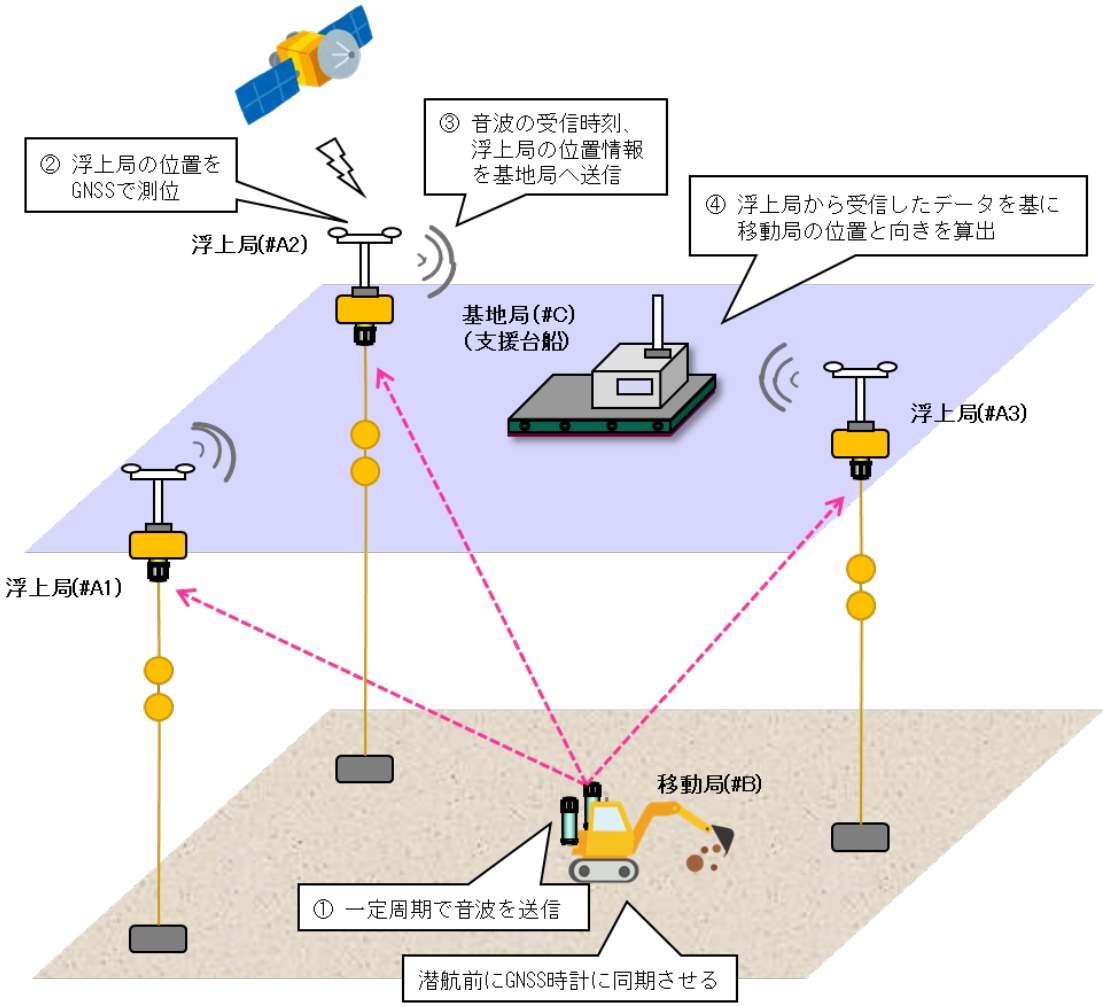


図 3.1　浮上式音響測位装置のイメージ図

本装置は以下の動作で測位を行う。

(1) 移動局は一定周期で音波を送信する同期ピンガである。移動局のクロックの同期は、設置前に GNSS 時計と同期し、設置後は内蔵された高精度クロックにより、時刻同期された状態を長期間保持する。

(2) 移動局から送信された音波を、3 基の浮上局で検出する。
浮上局は GNSS により常に自身の位置を測位している。

(3) 音波を検出した時刻、その時の浮上局の位置情報などを無線により基地局へ送信する。

(4) 基地局は、3 基の浮上局から受信したデータを基に、移動局の位置と向きを算出する。

(5) 移動局の位置を求める計算は、平面直角座標系を用いて行われる。

(6) 位置の表示および外部出力は、表示領域内の 1 点を中心として回転させ、構造物の長手方向を x 軸方向に設定できるようになっている。(京浜港ドックにおける実験で用いた座標系を**図 3.2** に示す。)

(7) 音速は音速プロファイルを事前に計測し、浮上局の受波器深度より移動局の送波器深度までの平均音速を用いる。

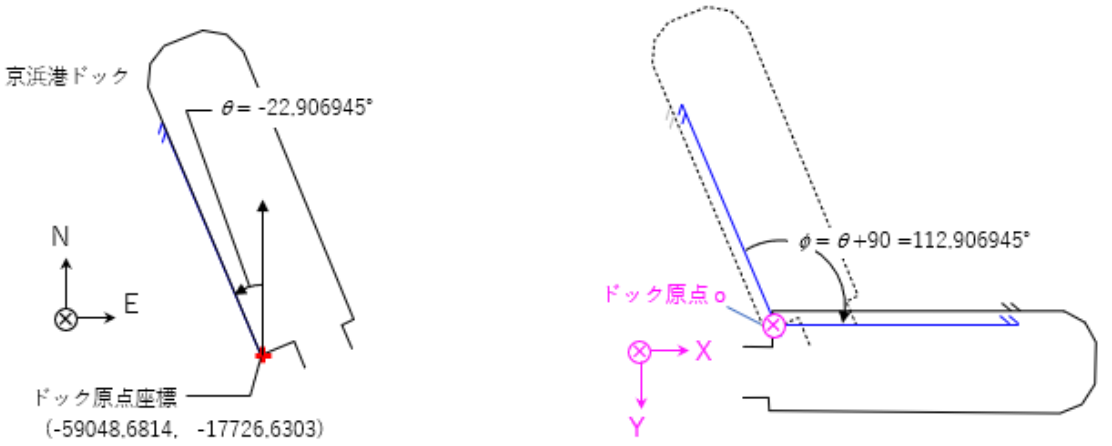


図 3.2　京浜港ドックにおける実験で用いた座標系

3.2.2　構成

現状の本装置は、「浮上局 3 基」「移動局」「基地局」から構成される。本装置の構成品を**表 3.4**、付属品を**表 3.5**～**表 3.6** に示す。

表 3.4　構成品一覧

番号	名　称	数量	備考
1	**浮上局** (3 式分)		
1.1	アンテナマスト	3	(GNSS アンテナ、GNSS 受信機、

			無線ユニットを含む)
1.2	ブイ本体	3	(信号処理ユニット、受波器ユニットを含む)
2	**移動局**		
2.1	送信ユニット	1	
2.2	バッテリーユニット	1	
2.3	送波器ユニット	2	
3	**基地局**		
3.1	基地局	1	
3.2	基地局無線ユニット	1	
4	**充電ユニット**（浮上局 3 台、移動局 1 台）		
4.1	充電ユニット	4	浮上局用と移動局用で共通
5	**同期装置**		
5.1	同期装置	1	

表 3.5　付属品一覧

番号	名　称	数量	備考
1	**浮上局**（3 基分）		
1.1	係留用ロープ、フロート類	3	表 3.6 参照
1.2	錘	3	
2	**移動局**		
2.1	送波器用接続ケーブル	2	
2.2	移動局電源ケーブル	1	
2.3	メンテナンス用ケーブル	1	
3	**基地局**		
3.1	基地局電源ケーブル	1	
3.2	無線機用ルーフトップアンテナ	8	
3.3	無線機用アンテナケーブル(7.5m)	5	
3.4	無線機用アンテナケーブル(2.5m)	5	
3.5	GNSS 受信機	1	
3.6	GNSS アンテナ	2	
3.7	GNSS アンテナケーブル	4	
4	**充電ユニット**（浮上局 3 台、移動局 1 台）		
4.1	充電ユニット電源ケーブル	4	浮上局用と移動局用で共通
4.2	浮上局用充電ケーブル	3	

4.3	移動局用充電ケーブル	1	
4.4	移動局充電用延長ケーブル	1	
5	**同期装置**		
5.1	同期ケーブル	1	

表 3.6　係留索等の構成

番号	品番/型番	品名	数量 (※1)	単位	備考
1	Φ12	キョーレックスロープ（2m）	1	本	
2	Φ12	キョーレックスロープ（3m）	2	本	
3	Φ12	キョーレックスロープ（5m）	1	本	
4	Φ12	キョーレックスロープ（10m）	2	本	
5	Φ12	キョーレックスロープ with 中間フロート（0.5m）	1	本	宇部フロート （CT-308B）
6	Φ12	キョーレックスロープ with 中間フロート（5m）	1	本	宇部フロート （CT-308B）
7	呼び 9	ロングリンクチェーン（1.5m）	1	本	溶融亜鉛メッキ
8	呼び 9	ロングリンクチェーン（2m）	1	本	溶融亜鉛メッキ
9	SB-10	TAIYO シャックル(※2)	4	個	溶融亜鉛メッキ
10	SB-12	TAIYO シャックル(※2)	16	個	溶融亜鉛メッキ
11	BB-12	TAIYO シャックル(※2)	2	個	溶融亜鉛メッキ
12	呼び 13	両形スイベル	2	個	電気メッキ

(※1) 各部品の数量は、浮上局 1 基分の数量を示している

(※2) シャックルに使用する割りピンは、呼び径：3.0mm、長さ：20mm の物を使用

3.2.3　浮上式音響測位装置の寸法・重量・形状

浮上式音響測位装置の寸法・重量を**表 3.7** に示す。浮上式音響測位装置の形状を**図 3.3**～**図 3.9** に示す。

表 3.7　浮上式音響測位装置の寸法・重量

番号	名　称	寸法・重量
1	**浮上局**	
1.1	アンテナマスト＋ ブイ本体	寸法：(W)1000×(L)1688×φ600 [mm] 空中重量：51[kg] （ブライドルまでの重量。係留系を除く）

1.2	錘	空中重量：100[kg] 水中重量： 87[kg]
2	**移動局**	
2.1	送信ユニット	寸法：φ190×550［mm］（突起部除く） 空中重量：12[kg]
2.2	バッテリーユニット	寸法：φ190×375［mm］（突起部除く） 空中重量：10[kg]
2.3	送波器ユニット	寸法：φ130×225［mm］（突起部除く） 空中重量：5[kg]
2.4	送波器用接続ケーブル	長さ：3[m]
2.5	移動局電源ケーブル	長さ：3[m]
2.6	メンテナンス用ケーブル	長さ：1[m]
3	**基地局**	
3.1	基地局	寸法：476×373×180［mm］（突起部除く） 重量：6.4[kg]
3.2	基地局無線ユニット	寸法：424×342×172［mm］（突起部除く） 重量：5.0[kg]
3.3	電源ケーブル	長さ：3[m]
3.4	無線機用 ルールトップアンテナ	ケーブル長さ：2.5[m]
4	**充電ユニット**	
4.1	充電ユニット	寸法：350×260×130［mm］（突起部除く） 重量：5.4[kg]
4.2	電源ケーブル	長さ：3[m]
4.3	浮上局用充電ケーブル	長さ：10[m]
4.4	移動局用充電ケーブル	長さ：3[m]
4.5	移動局充電用延長ケーブル	長さ：10[m]
5	**同期装置**	
5.1	同期装置	寸法：194×135×86［mm］（突起部除く） 重量：1.3[kg]
5.2	同期ケーブル	長さ：3[m]

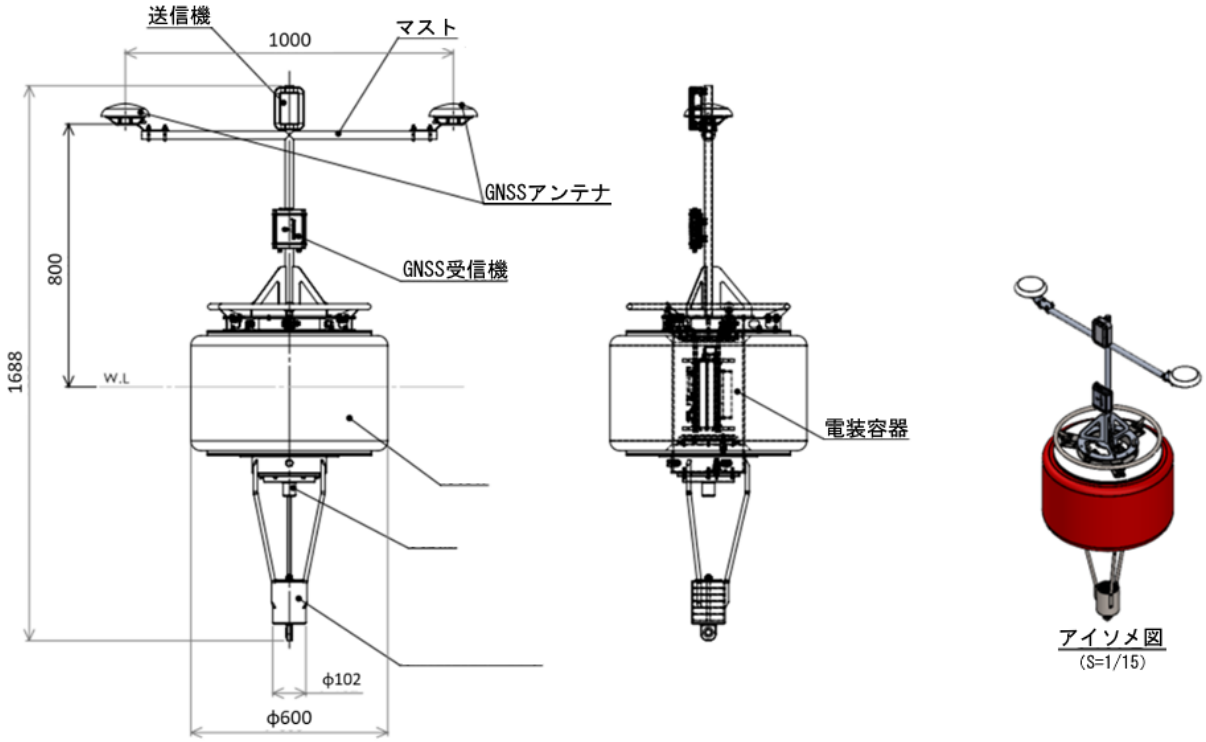


図 3.3　浮上局

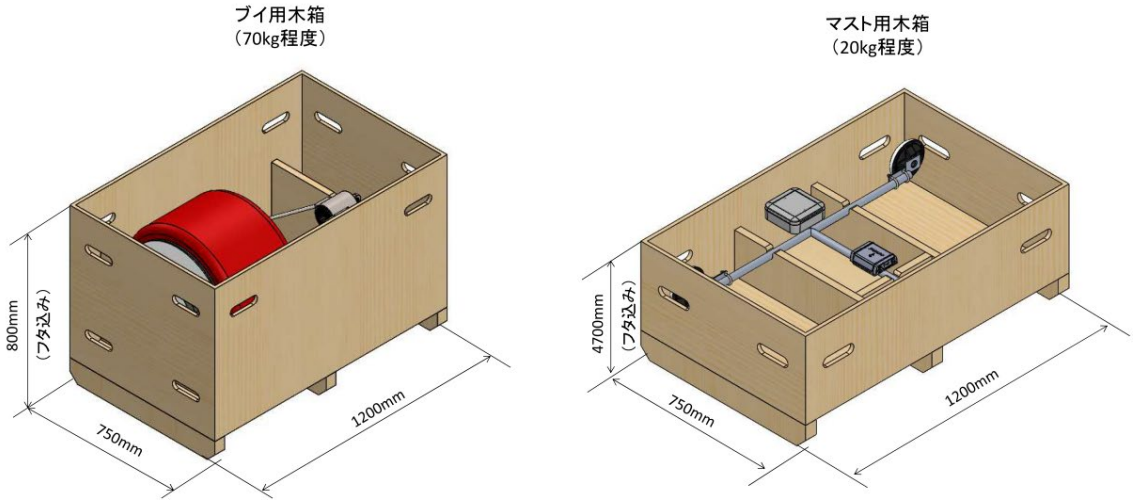
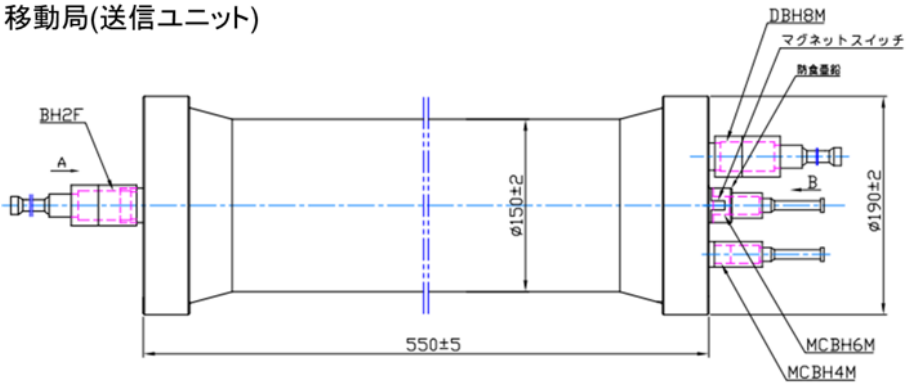
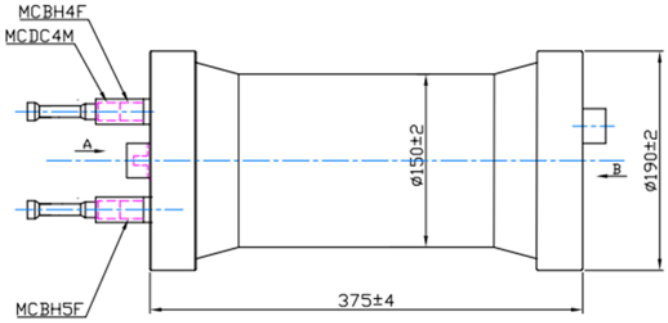


図 3.4　浮上局輸送用木箱

■ 移動局(送信ユニット)



■ 移動局(バッテリーユニット)



■ 移動局（送波器ユニット）

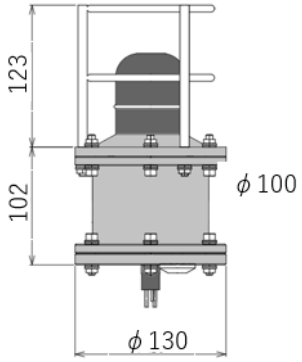


図 3.5　移動局

■ 基地局

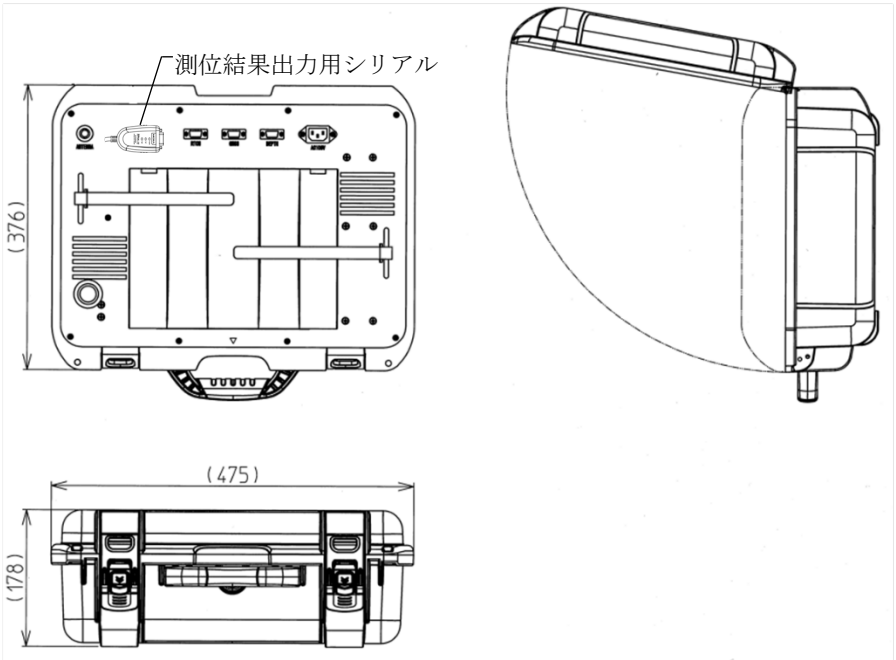


図 3.6　基地局

■　基地局無線ユニット

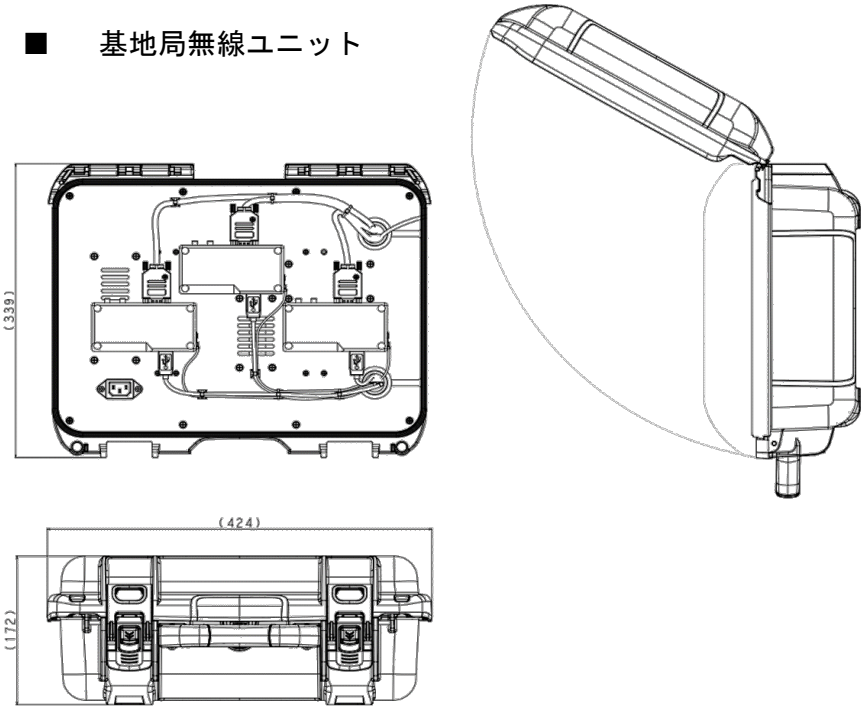


図 3.7　基地局無線ユニット

■　充電ユニット

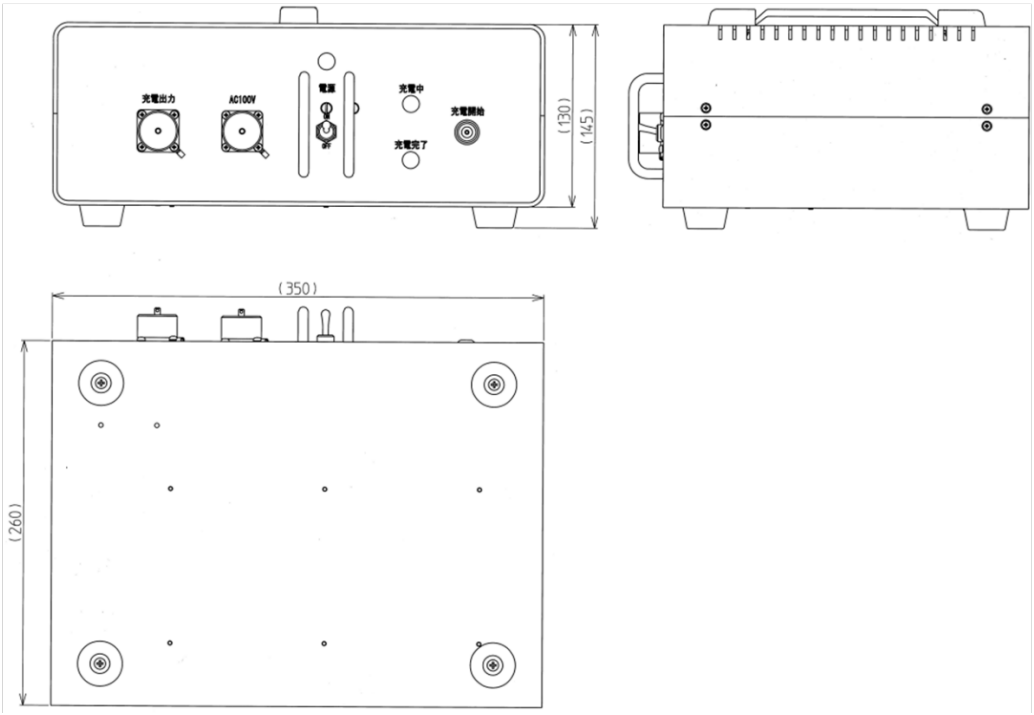


図 3.8　充電ユニット

（付録）P.71

■ 同期装置

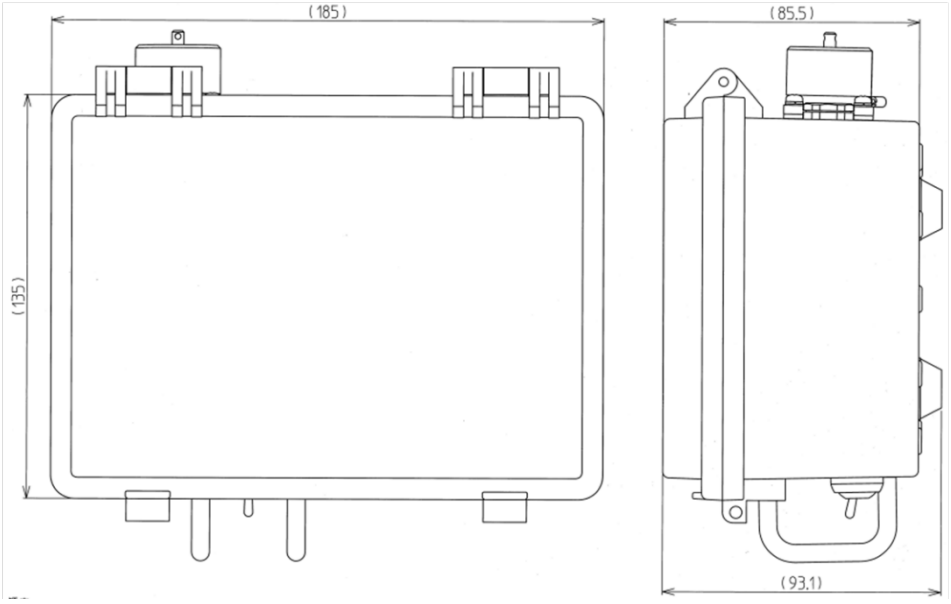


図 3.9　同期装置

3.2.4　主な仕様（測位関連）

本装置の測位に関連する仕様を**表 3.8** に示す。想定する利用状態を**図 3.10** に示す。原点を中心した 100mx100mのサービスエリアに対して、ベースライン 200mで浮上局を正三角形に配置することを想定している。

表 3.8　測位に関する性能

	項目	
1	測位性能	
	分解能	15mm 以下
	ばらつき	0.5m 以内（水平方向）
	バイアス	0.5m 以内（水平方向）
	測位周期	毎秒 1 回以上の測位が行える 移動局より最遠方の浮上局が受波してから、測位用信号の送信繰り返し間隔時間以内に、測位結果が表示できる。
	稼働時間	8 時間以上
2	ヘディング分解能	1° 以内
3	音速補正	0.5m 毎に水深 40m までの範囲で音速を補正する

4	移動局のクロック同期	GNSS 受信機の 1pps 信号を用いて、移動局のクロックを UTC 時刻に同期させたあと、1pps 信号を切断し、8 時間後経過した時点において、移動局の内部時計と UTC 時刻の差が±15μs 以内
5	サービスエリア	水平方向：100mx100m 深度：7～40m

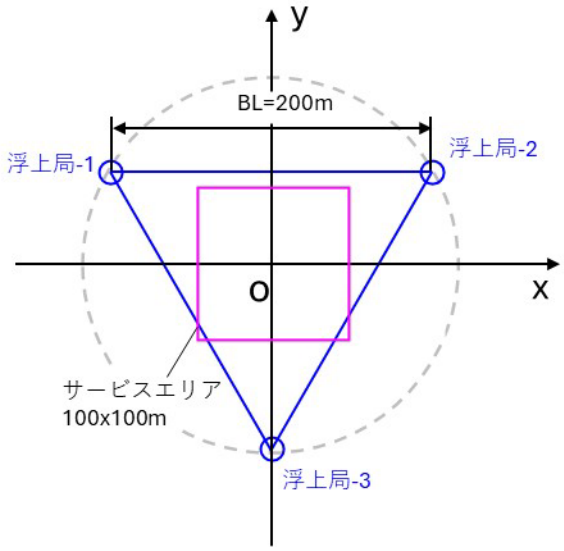


図 3.10　想定する利用状態

3.2.5　データ出力フォーマット

外部機器への測位データ出力に関して説明する。接続は**図 3.6** の測位結果出力用シリアルポートを介して行われる。データの出力は、通常測位を行う場合のみに行われる。

表 3.9　通信パラメータ

ボーレート	115200 bps
データビット	8 bit
パリティ	なし
ストップビット	1 bit
フロー制御	なし

表 3.10　出力フォーマット

	項目	例	説明
1	ヘッダ	$POS	固定のヘッダ文字
2	ステータス	3	0：送波器 1・2 ともに無効 1：送波器 1 有効、送波器 2 無効 2：送波器 1 無効、送波器 2 有効 3：送波器 1・2 ともに有効
3	送波器 1_X	1.234	座標系はマシンガイダンスの座標系(X→Y↓)とする 無効時はデータ無し(カンマのみ)
4	送波器 1_Y	1.234	
5	送波器 1_Z	1.234	
6	送波器 2_X	1.234	
7	送波器 2_Y	1.234	
8	送波器 2_Z	1.234	
9	ヘディング	123.4	方位角 0～359.9　ステータス=3 の時のみ有効 無効時はデータ無し(カンマのみ)
	終端文字	<LF>	<LF>のみ

カンマ区切りの可変長アスキーデータ(終端文字の前はカンマ無し)

3.2.6　基地局ソフトウェアの主要画面

基地局ソフトウェアの主要な画面であるメインウィンドウ、計算条件設定ウィンドウについて説明する。

(1) メインウィンドウ

メインウィンドウ画面を図 3.11 に示す。

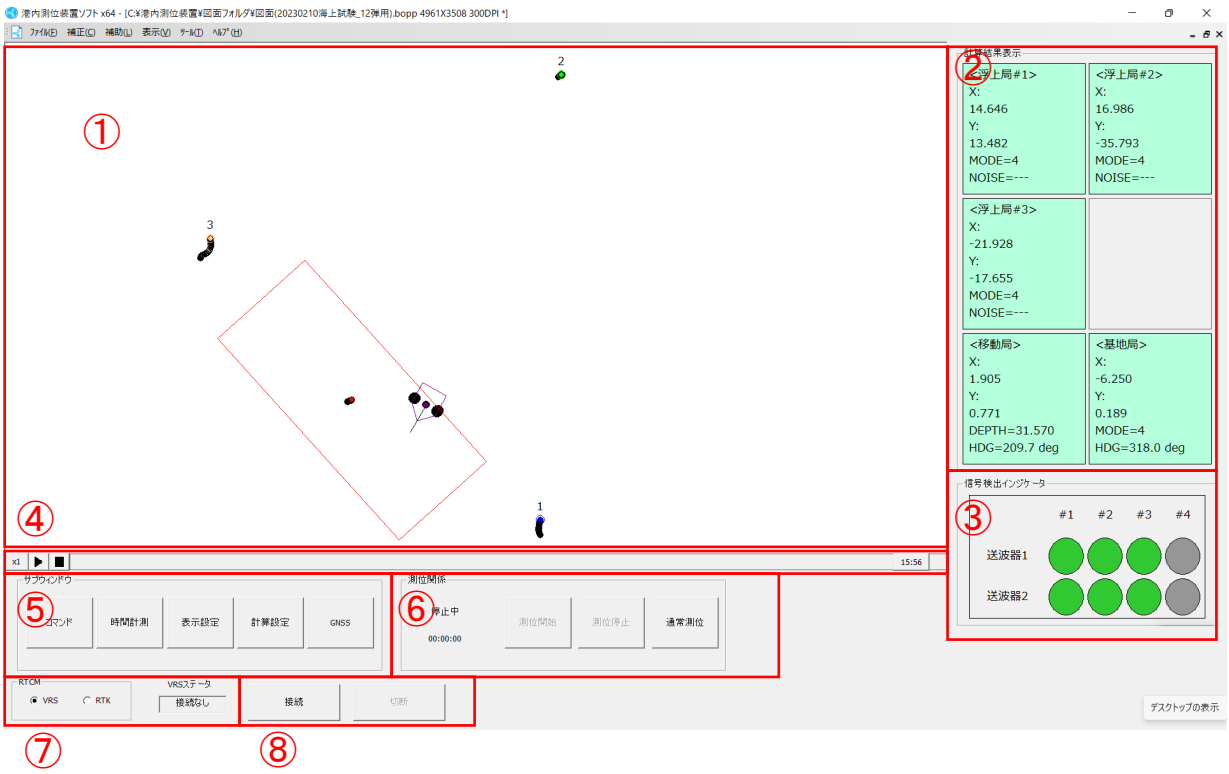


図 3.11　基地局測位ソフトウェア メインウィンドウ

番号	名称	説明
1	航跡表示	浮上局、移動局、基地局の位置を表示する。 背景に電子国土オルソ画像を表示することができる。
2	計算結果表示	浮上局、移動局、基地局の位置を数値で表示する。
3	信号検出インジケータ	各浮上局における信号検出状況を表示する。
4	航跡再生ツールバー	ログ再生モード時に、航跡再生の早送りや巻戻しに用いる。
5	サブウィンドウボタン	各種サブウィンドウを開く。
6	測位関係ボタン	測位開始/停止を行う。 通常測位モード/ログ再生モードの切り替えを行う。
7	RTCM 設定	GNSS 補正情報を VRS から取得するか、RTK 基準局から取得するかを選択する。VRS 選択時は、接続状況を表示する。
8	接続/切断ボタン	各浮上局、シリアルポート、VRS との接続および切断するときに使用する。

(2) 計算条件設定ウィンドウ

メインウィンドウ ⑥測位関係ボタンは 5 つのボタンから構成され、その中の計算設定ボタンを押下すると、計算条件設定ウィンドウ（**図 3.12**）が表示される。

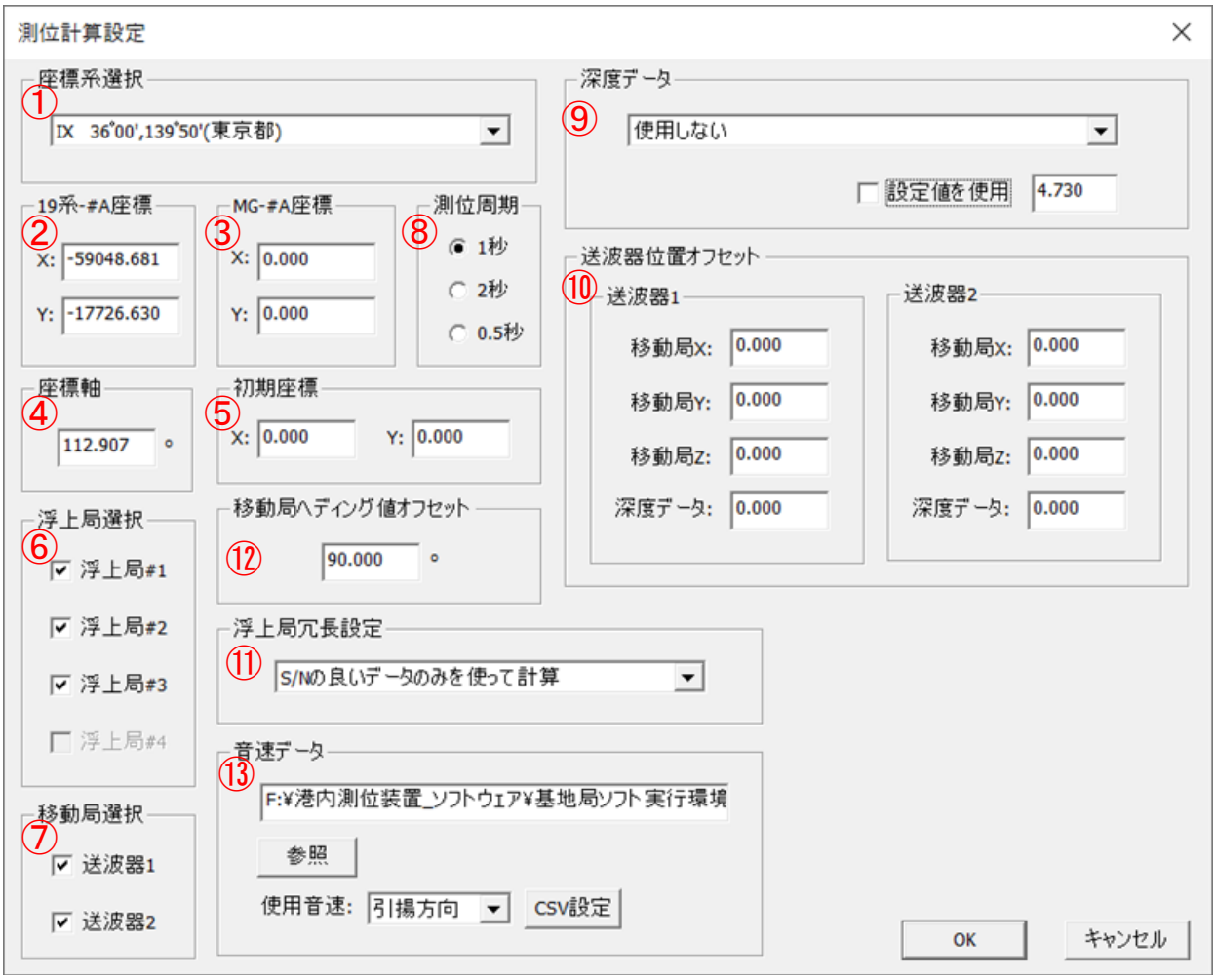


図 3.12　計算条件設定ウィンドウ

番号	名称	説明
1	座標系選択	測位エリアに最も近い平面直角座標系（19 座標系）を選択する。
2	19 系-#A 座標	測位エリア内の 1 点(#A)の座標を平面直角座標系(X↑Y→)で設定する。 この欄に作業用原点座標(0,0 とする座標)を直接設定する場合は、項目③の[MG-#A 座標]を 0,0 に設定する。 (図 3.14 参照)

3	MG-#A 座標	作業用原点座標(0,0 とする座標)から見た#A の座標を表示座標系(X→Y↓)で設定する。 作業用原点を#A とする場合は 0,0 に設定する。 （図 3.14 参照）
4	座標軸	平面直角座標系と作業用座標系の軸の角度を設定する。 (図 3.13 参照) (例) 0 度とした場合：画面上が真北 90 度とした場合：画面右が真北

座標系について

A) 平面直角座標系

日本列島を 19 の区域に分け、各区域に 19 個の原点を設定し、それらの原点を基準とした平面直角座標系であり、日本の国家座標である。

X 軸が画面の縦方向、Y 軸が画面の横方向で、

X 軸の＋が北、Y 軸の＋が東を示す(X↑Y→)。

緯度・経度から 19 系座標系の平面直角座標(X,Y)への変換は、国土地理院のサイト（https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html（参照 2024-07-31）） 等を参照のこと。

B) 作業用座標系

本装置の画像表示および外部データ出力に用いている。

原点はユーザが任意設定し、構造物の長手方向を X 軸とした座標系である。

X 軸が画面の横方向、Y 軸が画面の縦方向で、X 軸の＋が画面右、Y 軸の＋が画面下を示す。(X→Y↓)。(エクセルのセルの数え方と同じ)

Z 軸は正の値が海底方向である。

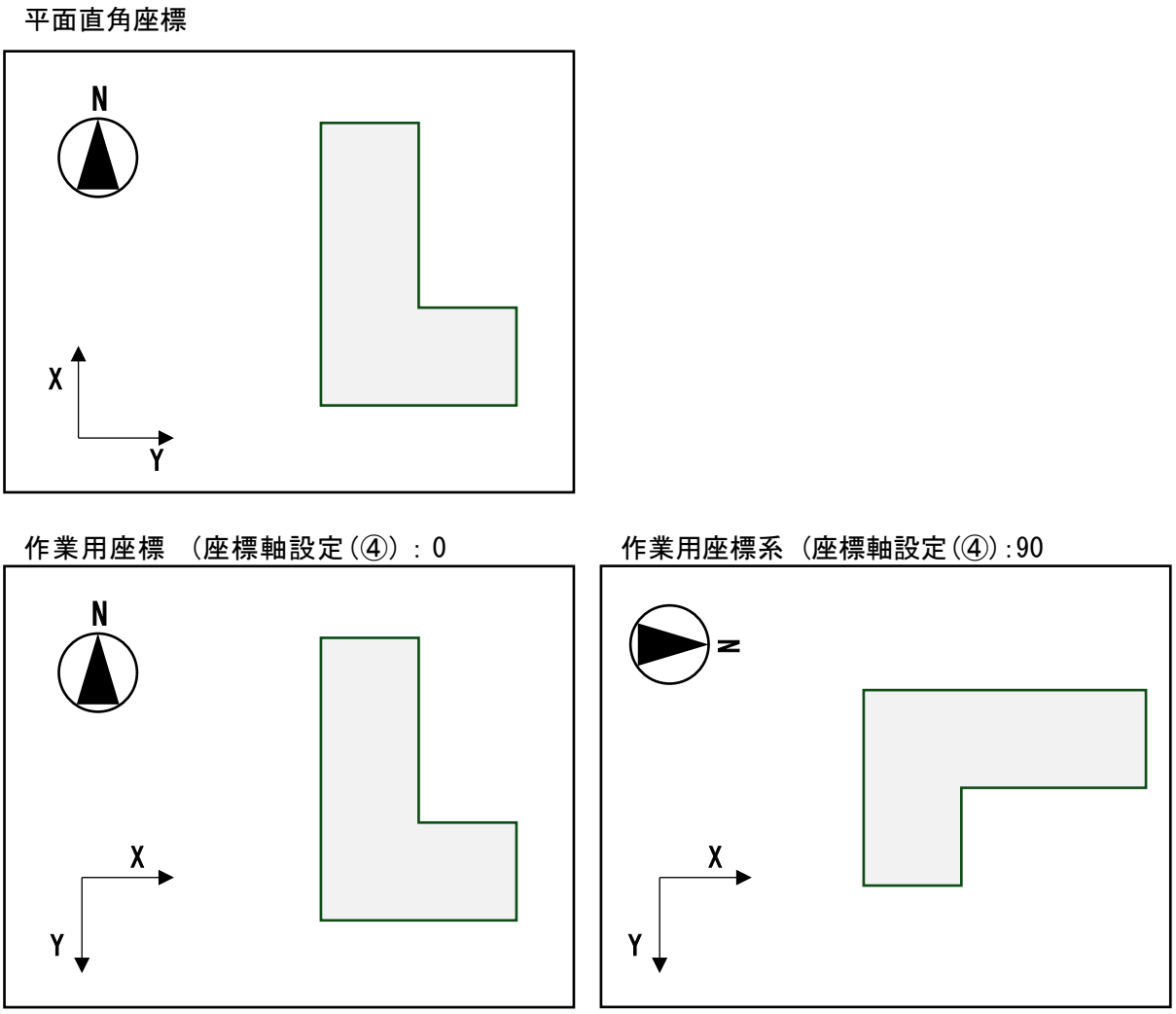
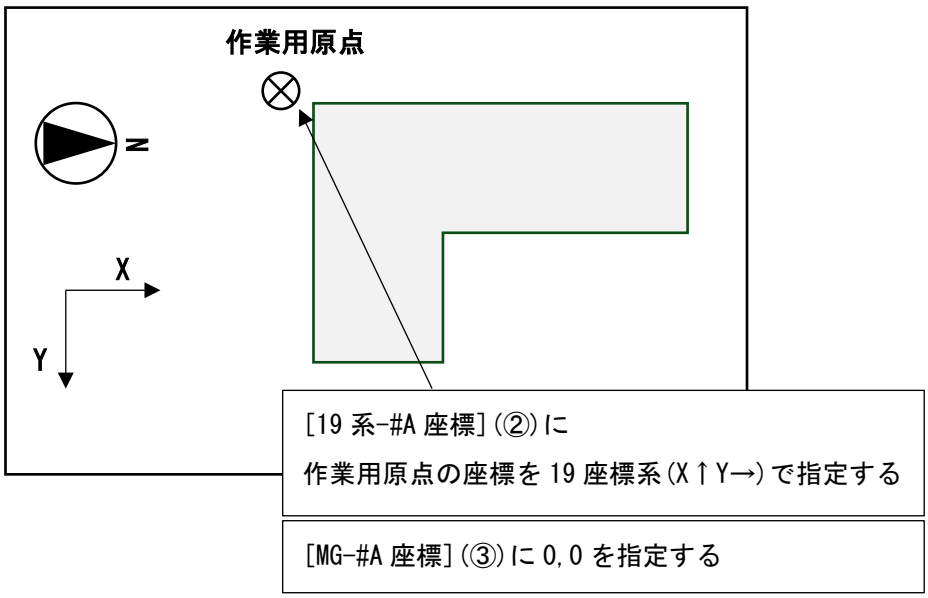


図 3.13　座標系と座標軸設定

【作業用原点座標を直接指定する方法】



【#A 座標を使って指定する方法】

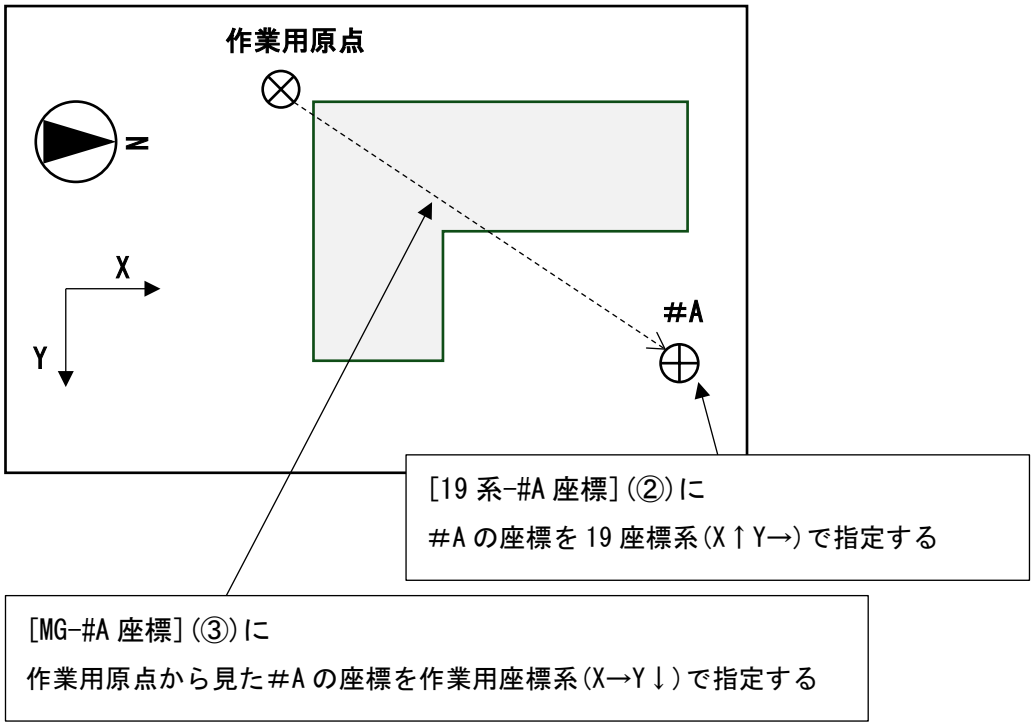


図 3.14　作業用原点の指定方法

(a)測位計算方式について(⑤～⑪)

本装置の測位計算方式は、以下の 2 通りのうちいずれかを選択できる。

A) 浮上局 3 台のデータを使う方法

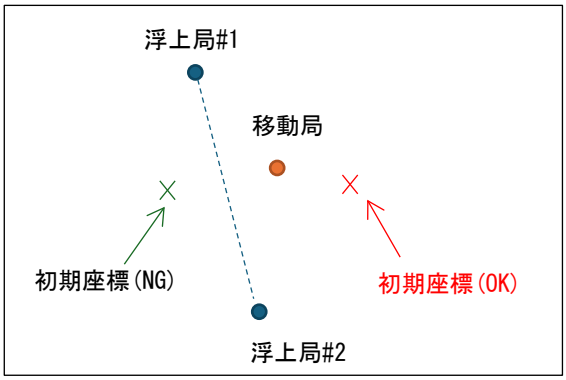
B) 浮上局 2 台＋深度データを使う方法

A) 浮上局 3 台のデータを使う方法

番号	項目	設定方法
5	初期座標	この測位計算方式では使用しない。
6	浮上局選択	浮上局 3 台全てにチェックを入れる。
7	移動局選択	測位対象とする移動局送波器にチェックを入れる。 移動局ヘディングを計測する場合は 2 台ともチェックを入れる。
8	測位周期	移動局の設定値に合わせる。
9	深度データ	(a)[使用しない]または (b)[使用せずに計算後、Z のみを深度データに置き換える]を選択する。 (b)の場合、[設定値を使用]にチェックを入れると、設定した深度が常に使われ、シリアル入力された深度データは無視される。
10	送波器位置オフセット	この値は、表示設定ウィンドウにて[移動局(送波器#1 基準)]及び[移動局(送波器#2 基準)]の表示を ON にした場合のみ使用される。(表示位置を計算に利用する。) 移動局の基準点から見た、各送波器の位置を設定する。 また、深度データの設定(⑨)にて(b)を選択した場合は、[深度データ]の入力欄に、深度データが示す深度から各送波器までの深さ(下方向が＋)を設定する。
11	浮上局冗長設定	現バージョンでは使用していない。

B)　浮上局 2 台＋深度データを使う方法

番号	項目	設定方法
5	初期座標	移動局の位置に近いと思われる点の座標を 19 系座標系(X↑Y→)で設定する（※）。
6	浮上局選択	使用する浮上局 2 台または 3 台にチェックを入れる。 3 台選択した場合は、S/N の良い 2 台のデータを使って計算する。
7	移動局選択	測位対象とする移動局送波器にチェックを入れる。 移動局ヘディングを計測する場合は 2 台ともチェックを入れる。
8	測位周期	移動局の設定値に合わせる。
9	深度データ	(a)[使用しない]または (b)[使用せずに計算後、Z のみを深度データに置き換える] を選択する。 (b)の場合、[設定値を使用]にチェックを入れると、設定した深度が常に使われ、シリアル入力された深度データは無視される。
10	送波器位置 オフセット	この値は、表示設定ウィンドウにて[移動局(送波器#1 基準)]及び[移動局(送波器#2 基準)]の表示を ON にした場合のみ使用される。(表示位置を計算に利用する。) 移動局の基準点から見た、各送波器の位置を設定する。 また、深度データの設定(⑨)にて(b)を選択した場合は、 [深度データ]の入力欄に、深度データが示す深度から各送波器までの深さ(下方向が＋)を設定する。
11	浮上局冗長設定	現バージョンでは使用していない。



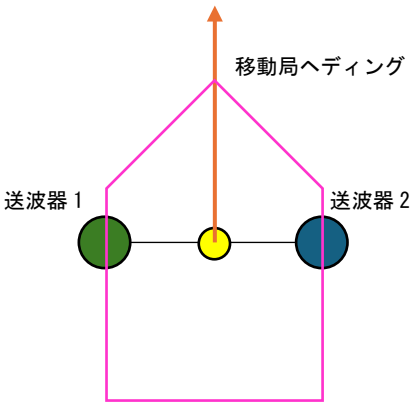
(※)2 基の浮上局で測位する場合は解が複数存在するため、2 つの浮上局を結んだ直線で分断される範囲において移動局と同じ側となる初期座標を指定する。

移動局ヘディング値オフセットについて(⑫)

移動局のヘディング値は、「送波器 1 を左、送波器 2 を右に配置」するものとして計算されるが、それ以外の配置とする場合は、下記のようにオフセット値を設定する。

送波器 1 を左、送波器 2 を右に配置する場合

オフセット＝0 度に設定



送波器 1 を後方、送波器 2 を前方に配置する場合

オフセット＝90 度に設定

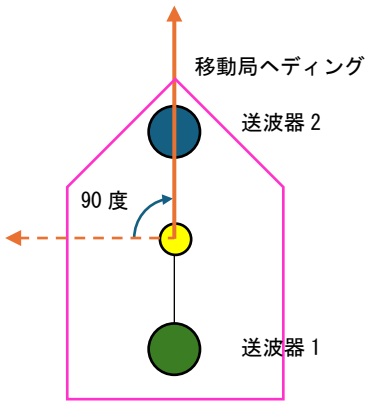
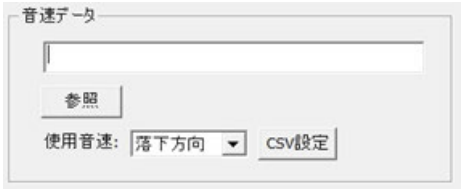


図 3.15　移動局のヘディング設定

音速の設定について（⑬）

音速度計から取得した音速プロファイルを読み込ませ、測位計算に使用する。

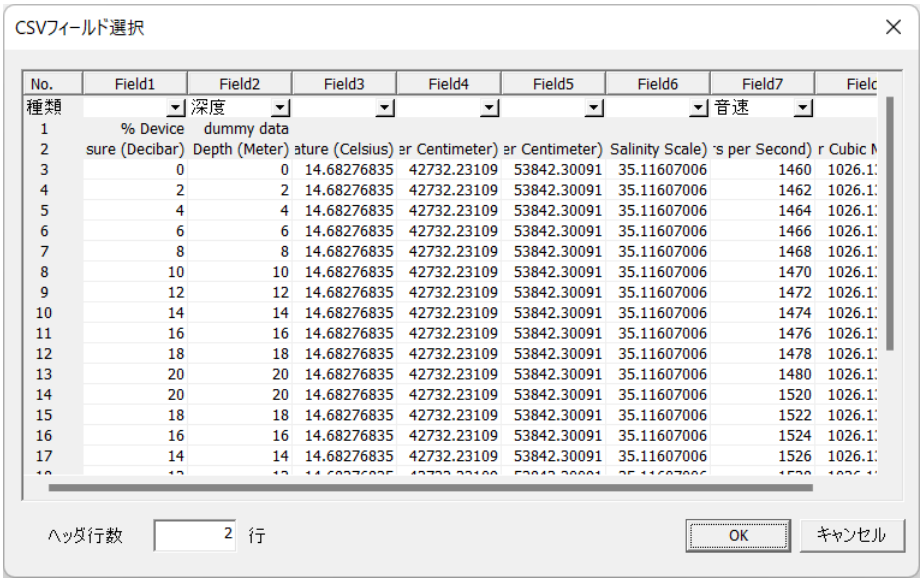
[参照]をクリックするとファイル選択ダイアログが開き、読み込ませる音速データファイル（CSV 形式）を選択できる。



[使用音速]のプルダウンメニューから、使用する計測結果を選択する。

- 落下方向：深度の浅い方向から深い方向に計測した結果のみ使用
- 引揚方向：深度の深い方向から浅い方向に計測した結果のみ使用
- 両方：両方の計測結果を使用

[CSV 設定]をクリックすると以下のような画面が表示される（ファイル依存）。



[種類]の行のプルダウンメニューを使い、[深度]の列と[音速]の列を選択する。
[ヘッダ行数]の欄に、ヘッダ(数値が書き込まれていない部分)の行数を指定する。
指定した行数の分だけグレーアウトされ、読み込まれなくなる。
設定が終わったら[OK]をクリックして画面を閉じる。

3.3　測定精度の検討

測定値と真値の差を誤差とする。誤差は要因が明らかであり測定のたびに同じ値（バイアス）となる系統誤差と、測定のたびにランダムな値（ばらつき）となる偶然誤差に大別される。

系統誤差

- 論理（モデル）の誤差
- 測定器固有の誤差
- 測定者の一定のクセ
- 環境による誤差

偶然誤差

- 測定器の精度限界
- 測定ミス
- 測定者のランダムな測定むら

本装置の測位精度について以下の手順で検討する。

(1) 誤差モデル

測位対象の座標を求めるための方程式を示し、誤差を含む測定量を明らかにし、誤差を考量したモデルを作成する。この時、誤差をバイアス（系統誤差）とばらつき（偶然誤差）に分類する。

(2) 誤差成分の見積もり

本装置の仕様、及び実海域での実験結果より各測定量のバイアスとばらつき（標準偏差）を見積もる。

(3) 測位ばらつきの検討

測定量のばらつきの見積もりより、DOP（Dilution of precision）を介し測位ばらつきを求める。実測結果と比較し、見積もった測定量のばらつきの大きさの妥当性を検討する。

3.3.1　誤差モデル

測位対象の座標を(x, y, z)、浮上局iの受波器の座標を(X_i, Y_i, Z_i)、測定対象と浮上局i受波器の斜距離をρ_iとすると、以下の方程式が成り立つ。

$$\rho_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \quad (1)$$

ただし、$i = 1,2,3$

さらに斜距離は音速 c と測位用音波の伝搬時間τ_iの積で与えられるので、式(1)は

$$c \cdot \tau_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \quad (2)$$

ここで、測定量は音速 c、伝搬時間τ_i、受波器位置座標(X_i, Y_i, Z_i)である。なお、受波器位置座標(X_i, Y_i, Z_i)に関する直接の測定量は、GNSS 測位で得られる緯度、経度と姿勢センサ(IMU)から得られる 3 軸の傾き、ヘディングから構成されるが、ここではそれらを用いて直角平面座標系の座標に変換した値として検討することにする。また、その誤差に関しては、斜距離の測定誤差として扱うものとする。

音速と伝搬時間について，それぞれの観測量mは、真値m_0、バイアスb_m、ばらつきσ_mから構成され、$m = m_0 + b_m + \sigma_m$と考える。さらに受波器位置座標のバイアスとばらつきを左辺に加えると式(2)は下式となる。なお、以降では各浮上局を示すiを省略する。

$$(c_0 + b_c + \sigma_c) \cdot (\tau_0 + b_\tau + \sigma_\tau) + (b_{XYZ} + \sigma_{XYZ}) = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2} \quad (3)$$

表 3.11　検討対象

測定量	バイアス	ばらつき	備考
音速 c	b_c	σ_c	
伝搬時間 τ	b_τ	σ_τ	
受波器位置 $\varepsilon\rho_{XYZ}$	b_{XYZ}	σ_{XYZ}	斜距離に換算し扱う

3.3.2　誤差成分の見積もり

誤差成分の見積もり結果を**表 3.13** に示し、以下、その詳細について述べる。

3.3.2-1　浮上局配置、サービスエリア等検討条件

安定な測位が行われ実験結果の解釈が容易な、実海域における測位実験時（2023 年 3 月上旬、新本牧工事エリア）の浮上局と移動局（測位対象）の配置（**図 3.10**）を用いて検討した。浮上局の配置は基線長 BL=200ｍの正三角形配置である。浮上局は原点 o を中心とした半径$R = \frac{200}{\sqrt{3}}$ =115.5ｍの円周上に配置されている。測位のサービスエリアは原点 o を中心とした 100×100ｍの範囲であり、移動局は水深 25ｍを移動するものとした。

なお、本装置の測位性能の仕様が水平方向のみであるので、水平方向（平面図内）の誤差のみを検討した。

3.3.2-2　音速バイアス

本装置が測位演算に用いる装置音速$c_{machine}$と実際の音速c_{true}に乖離があった場合に生じるバイアスについて、以下の手順で検討した。

(1) 音速度計で検出可能な速度差

使用経験のある音速度計の仕様より、0.5ｍ/s の音速差であれば検出可能と考える。

表 3.12　音速度計の精度と分解能

機種名	方式	精度	分解能	備考
AML-3	SVP	0.025 m/s	0.001 m/s	音速を直接測定する。 比較的新しい測定方法。
CastAway	CTD	0.15 m/s	0.01 m/s	塩分濃度、水温、水圧より実験式により音速を求める。 過去からのデータの蓄積あり

(2) 音速度の測定

移動局の送波器と浮上局の受波器の間の経路上の音速を、送波のたびに測定し平均を取り、装置音速$c_{machine}$とすることが理想であるが、実際には作業開始前にサービスエリアの 1 か所で測定した音速プロファイルが用いられることが多い。同じ作業で、測定時刻と測定場所によって、どの程度音速プロファイルに差があるかを把握することが必要である。**図 3.16** に音速プロファイルの測定例を示す。浮上局の配置は、**図 3.10** と同じであり、浮上局の周辺と移動局を設置した原点付近で音速を測定した。場所を変えての測定は、作業船で計測場所まで移動し、投げ込み式の音速度計を投入し、引き上げるため、40 分程度の時間差がある。気温が低い日**図 3.16(a)**の音速プロファイルは、場所によらず良く一致している。一方、**図 3.16(b)**は、気温が高い日に、同時刻に場所を変えて音速度を測定した例である。サービスエリア内で音速プロファイルに差が見られる。また**図 3.16(c)**は、場所を固定し、時刻を変えて音速度を測定した例である。

データが限られているが、音速度の測定時刻と測定場所の違いによって、装置音速$c_{machine}$と実際の音速c_{true}に 1m/s 程度の乖離があると言える。運用においては、装置音速$c_{machine}$と実際の音速c_{true}の乖離を小さくするために、頻回に音速度を測定するなどを行うものの、**図 3.16(b)**に示す通り、水深 10mまでは水中音速が大きく変化しているほか、前述の音速度計の検出可能な速度差が 0.5m/s であることを考慮して音速のバイアスの影響を大きめに見積もることとし、$|c_{machine} - c_{true}| \leq 2$m/s として検討した。

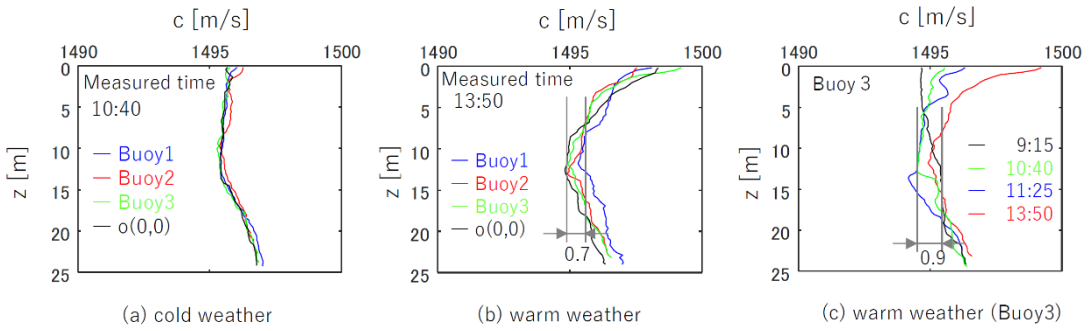


図 3.16　音速プロファイルの測定例

(3) 音速バイアスの測位結果への影響

以下の 2 点を検討する。

(a) 音速バイアスが±2m/s の場合、測位誤差はどの程度になるか

(b) 音速バイアスがどの程度になると、測位仕様：バイアス誤差（0.5m以内）を満たさなくなるか

以下の手順で平面内の誤差を求めた。（以下では、浮上局を示す、添え字を略す。）

① 移動局(x,y,z)と浮上局の距離 $\rho_{true}=\sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+(z-Z)^2}$ を求め、測定される伝搬時間 $\tau_{true}=\frac{\rho_{true}}{c_{true}}$ を求める。

② 装置音速 $c_{machine}$より、斜距離 $\rho_{machine}=c_{machine}\cdot\frac{\rho_{true}}{c_{true}}$ を求める。

③ $\rho_{machine}$を用いて、移動局の座標を求め、音速バイアスが乗った場合の移動局の座標、(x',y',z')とする。

④ 仕様はｘ－ｙ平面内のみであるので $\varepsilon_{xy}=\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}$ を誤差として評価する。

図 3.17 に結果を示す。**図 3.17(a)**は、ε_{xy}の平面内分布（z=25m）を示す等値線図である。c_{true} =1500m/s、$c_{machine}$ =1510m/s である。等値線の単位は mm である。サービスエリアの中心 o(0, 0)では誤差は生じていない。これは各浮上局からの距離が等しいためである。ｘ－ｙ平面内ではサービスエリアの辺縁に行くほど、誤差が大きくなり、サービスエリアの辺縁では仕様を超えていることがわかる。次に**図 3.17(a)**内の●(-50, -50)と●(-25, -25)において、1490m/s ≤ $c_{machine}$ ≤1510m/s の場合のε_{xy}を**図 3.17(b)**に示す。

(a) 音速バイアスb_c ±2m/s では測位誤差 ε_{xy}=0.2m程度になることがわかる。

(b) 測位仕様：バイアス誤差（0.5m以内）を達するためには$|b_c|$ ≤5m/s が必要であることがわかる。

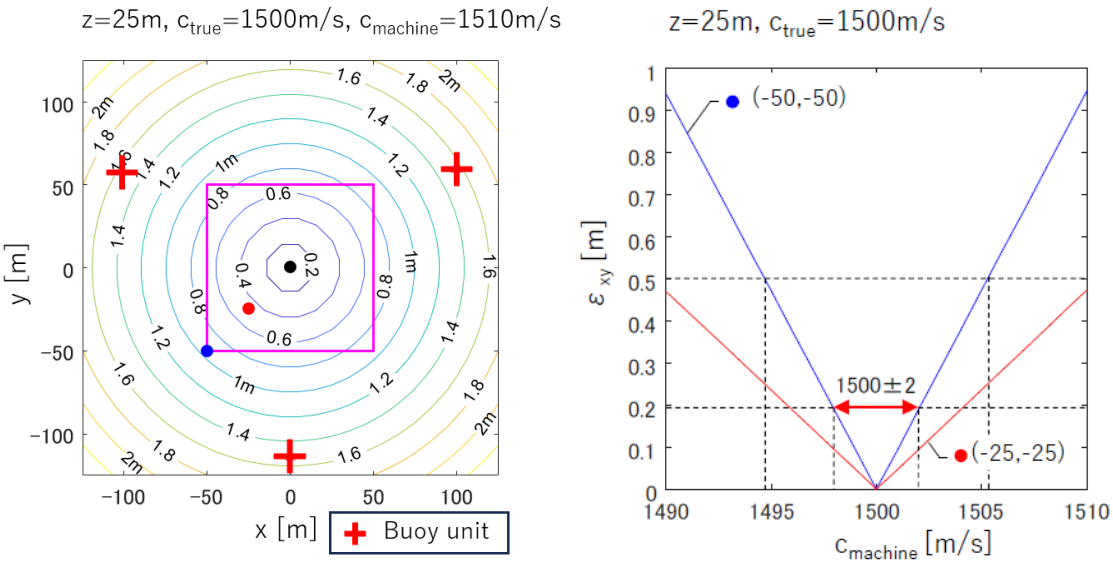


図 3.17　音速バイアスによる測位誤差（平面内）

3.3.2-3　音速のばらつき

同一箇所で音速のプロファイルを計測した**図 3.16(b), (c)**を同一条件での繰り返し測定と考え，そのばらつきが正規分布であり，ばらつく値の Peak to Peak（約 1m/s）を 2×3σ（σ：ばらつきの標準偏差）に対応していると仮定すると，

σ_c = 0.166 ≒ 0.2m/s と考える。

3.3.2-4　斜距離に同一のバイアスが加わった場合の測位誤差

検出時刻に関するバイアスb_τ、及び受波器位置のバイアスb_{XYZ}の検討を単純化するために、各測定量のばらつきを無視し（σ=0）、音速バイアスb_c=0（$c_{machine} = c_{true}$）とする。測定対象の位置を求めるための連立方程式(1)は、斜距離バイアスをρ'として

$$\rho_i + \rho' = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \quad (1')$$

ただし、$i = 1,2,3$

を解いて、測位対象の座標を求める。すなわち、

① 移動局(x, y, z)と浮上局の斜距離$\rho_i = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2}$を求める。

② 斜距離にバイアスρ'を加えて

$$\rho_i + \rho' = \sqrt{(x' - X_i)^2 + (y' - Y_i)^2 + (z' - Z_i)^2} \quad (1')$$

ただし、$i = 1,2,3$

を解き、斜距離バイアスが乗った場合の移動局の座標(x', y', z')を求める。

③　x－y 平面内誤差 $\varepsilon_{xy} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ を評価する。

計算結果を**図 3.18** に示す。ε_{xy}の等値線の単位は[㎜]である。サービスエリアの隅(-50, 50)あるいは(50, 50)において誤差最大となり、ρ'=50㎜ でε_{xy}=30㎜、ρ'=100㎜ でε_{xy}=60㎜ 程度あり、音速バイアスによる測位誤差に比べ小さくなることがわかる。ここでは斜距離誤差 ρ'=10㎜ あたり平面測位誤差 ε_{xy}=6㎜ と見積もる。

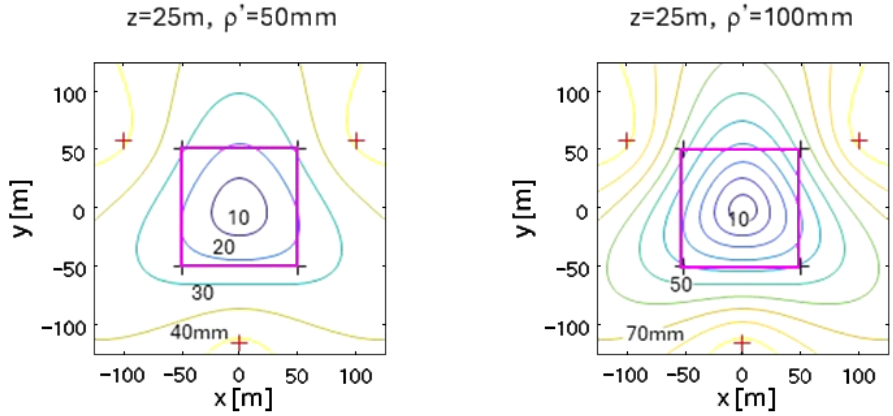


図 3.18　斜距離に同一のバイアスが加わった場合の測位誤差（平面内）

3.3.2-5　伝搬時間バイアス

伝搬時間に関するバイアスは、移動局のクロックの誤差により生じるものが主である。移動局のクロックの性能から，GNSS に同期後 8 時間の設置中に、±15μs の誤差が発生する可能性がある。これは斜距離に換算するとρ'=1500　m/s×（±15μs）=±22.5㎜ の誤差となる。前述の**図 3.18** を求めた考え方に従い、この値を測位誤差に換算すると

0.6×22.5㎜ = 13.5㎜ となり、約 15㎜ と見積もる。

3.3.2-6　伝搬時間ばらつき

信号検出時に雑音により生じる時間軸上のばらつきを検討する。

信号波到着時刻を検出に必要とする SNR（Signal-Noise Ratio）は、信号検出確率 P_d、誤警報確率 P_{fa} より ROC（Receiver Operating Characteristic）曲線を用いて求まる。$P_d \geqq 0.98$、$P_{fa} \leqq 10^{-6}$ では SNR=17dB(真数は約 50、無単位)となる。

信号検出時に雑音により生じる時間軸上のばらつきは次式で与えられ

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sqrt{SNR}} \frac{T}{2}$$

測位用音響信号の帯域が$\frac{1}{T} = \Delta f = 8kHz$ なのでσ_τ=8.83μs≒10μs と見積もった。

3.3.2-7　受波器位置座標誤差の影響

仕様によると受波器位置座標に関する精度は、いずれも RMS（Root Mean Square）値で

水平方向：2cm+2ppm（RTK）
ヒーブ：50mm

である。$(RMS)^2 = b^2 + \sigma^2$なので、 bと σの最大値は各々、$b = RMS$、$\sigma = RMS$ と考える。仕様の値を斜距離に投影し、最大となるのは水平面内で、移動局と浮上局が最も近接した場合であり、その時斜距離は 40mm 程度変化する。よって、b_{XYZ} ≦40mm、σ_{XYZ} ≦ 40mm と見積もる。

表 3.13　誤差見積もり（まとめ）

測定量	バイアス	要因、条件等	ばらつき	要因、条件等
音速 c	$\lvert b_c \rvert \leqq$ 2 m/s	音速分布モデル 深さ方向の分布のみ考慮（水平方向は均一） 屈折は無視 音速時計の精度/実測の実績を考慮（３月上旬、新本牧にて実測）	σ_c = 0.2 m/s	実測の実績（３月上旬、新本牧）
伝搬時間 τ	$\lvert b_\tau \rvert \leqq 15\mu s$ 斜距離換算 ≦22.5mm	クロック精度	$\sigma_\tau \leqq 10\mu s$	帯域幅、SNRより
受波器位置 $\varepsilon_{\rho XY}$	$\lvert b_{XY} \rvert \leqq$ 40 mm	受波器位置に関する装置仕様を斜距離に換算（最悪値）	$\sigma_{XYZ} \leqq$ 40 mm	受波器位置に関する装置仕様を斜距離に換算（最悪値）

3.3.3　測位ばらつきの検討

測位のばらつきと測距のばらつきの間には以下の関係がある。

測位のばらつき＝DOP×測距のばらつき

表 3.13 の、σ_c、σ_τ、σ_{XYZ}より斜距離 ρ に関するばらつきσ_ρを求め、DOP（Dilution of precision）を介して測位のばらつきを求め、実際の測位ばらつきと比較することによりσ_c、σ_τ、σ_{XYZ}の妥当性を検討する。この検討を水平方向（平面内）に行うので用いる DOP は HDOP（Horizontal DOP)である.

3.3.3-1　HDOP と測位ばらつきの実測値

図 3.10 のように浮上局が正三角形に配置されたときの中心位置における HDOP は，西の論文[1]を参考として HDOP＝1.16 とした。

同様の配置である**図 3.19** において実際に測定した測位結果を**図 3.20** に示す。移動局は左右に 2 つの送波器を有するので、左右送波器単体の測位結果と左右の送波器の測位結果

を用いて求めた送波器間の中点に関するデータが示されている。水平面内の送波器-1 の測位ばらつきは 50mm、送波器-2 の測位ばらつきは 42mm であった。

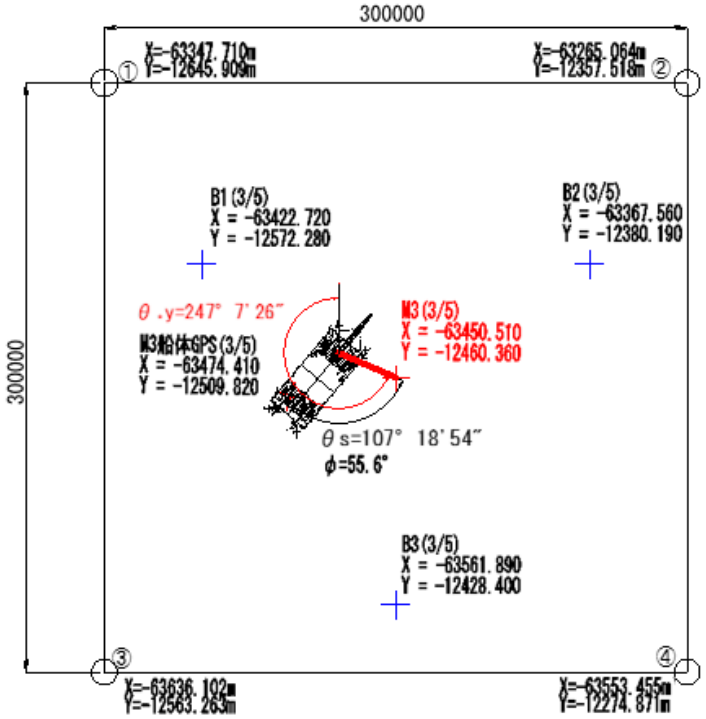


図 3.19　浮上局配置

	移動局中心				送波器 1				送波器 2			
	X	Y	Z	水平距離	X	Y	Z	水平距離	X	Y	Z	水平距離
標準偏差	0.025	0.028	0.094	0.037	0.034	0.037	0.122	0.050	0.029	0.029	0.101	0.042
平均値	1.220	-0.087	24.804		2.041	-1.350	24.778		0.399	1.177	24.830	

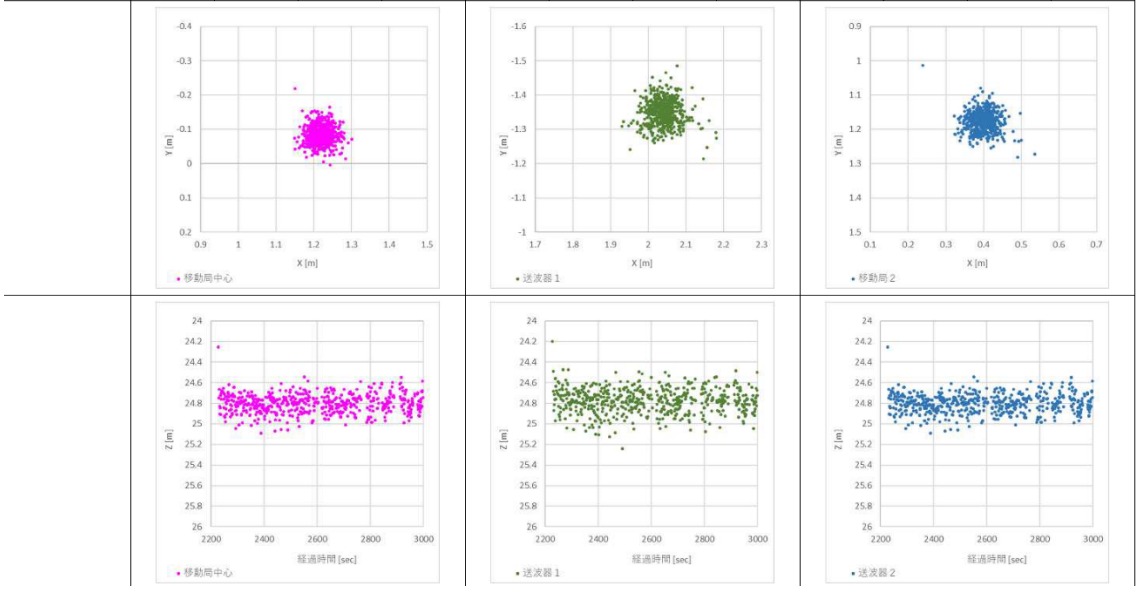


図 3.20　実測結果

（付録）P.91

3.3.3-2　測距ばらつき

σ_c、σ_τ、σ_{XYZ}より斜距離ρに関するばらつきσ_ρを求める。斜距離は音速と伝搬時間の積なので、音速と伝搬時間による斜距離のばらつき$\sigma_{\rho_{c\tau}}$は、音速と伝搬時間の平均値をμ_c、μ_τとして

$$\sigma_{\rho_{c\tau}} = \sqrt{(\mu_c\sigma_\tau)^2 + (\sigma_c\mu_\tau)^2}$$

で与えられる。

ここで μ_c=1500m/s、移動局が座標原点に設置されている場合、$\mu_\tau = \frac{\sqrt{115.5^2+25^2}}{1500}$=78.8ms、

σ_τ=10μs、σ_c=0.2m/s である。

$$\sigma_{\rho_{c\tau}} = \sqrt{(\mu_c\sigma_\tau)^2 + (\sigma_c\mu_\tau)^2}$$
$$= \sqrt{(1500\cdot 10\times 10^{-6})^2 + (0.2\cdot 78.8\times 10^{-3})^2}$$
$$= \sqrt{(15\times 10^{-3})^2 + (15.8\times 10^{-3})^2} = 21.8\times 10^{-3}$$

また、σ_{XYZ}=40mm なので、斜距離のばらつきσ_ρ=$\sqrt{{\sigma_{\rho_{c\tau}}}^2 + {\sigma_{XYZ}}^2}$ は

σ_ρ=$\sqrt{(21.8\times 10^{-3})^2 + (40\times 10^{-3})^2} = 45.6\times 10^{-3}$mとなる。

σ_c、σ_τ、σ_{XYZ}より予想される測位ばらつきは

HDOP×σ_ρ=1.16×45.6mm=52.9mm

となる。

図 3.20 に示すように送波器 1 と送波器 2 の水平距離標準偏差の実測値はそれぞれ 50mm と 42mm であり、ほぼ同程度の値であった。検討では伝搬時間と受波器位置のばらつきσ_τ, σ_{XYZ}を大きめに見積もっているものの、開発した装置は仕様であるばらつき（精密度）0.5m以内を満たしていると考える。

3.3.4　測位バイアスの検討

測位バイアス（誤差）について、**表 3.13** で示したバイアス値から考察を行う。

まず音速バイアスb_c は、-2（m/s）≦ b_c ≦　+2（m/s）

であり、**図 3.17(b)** より計測範囲（-50、-50）における計測誤差 ε_{xy} ≒ 0.2（m）となる。

次に伝搬時間バイアスb_τ は移動局内部時計の誤差として±15μs と見積もっており、音速を 1500m/s とした場合の斜距離誤差は±0.0225（m）となる。ここで前述の音速のば

らつきで求めた考え方（斜距離誤差 ρ' =10mm あたり測位誤差ε_{xy} = 6mm）に従い、この値を測位誤差に換算すると$\varepsilon_{\tau xy}$ ＝ 0.6 × 0.0225 = 0.0135（m）となる。

また浮上局の位置誤差は、$\varepsilon_{\rho xy}$ ≦ 0.04（m）と見積もっている。

測位誤差の最大値はこれらの誤差要因の絶対値を加算したものであると考え、

$$\varepsilon_{xy} \leqq 0.2 + 0.0135 + 0.04 \fallingdotseq 0.2535\ (\mathrm{m})$$

となる。

2023 年度に実施した新本牧での実海域試験では、**図 3.21** に示すように 10 トンの方塊ブロックに設置した水中移動局をクレーン付き台船で海底面に設置した。このとき、着底位置の座標はマルチビームソナーにより別途計測を行った。**図 3.22** に浮上局と移動局の位置関係を示す。

表 3.14 は、浮上式音響測位装置による測位データとマルチビームソナーによる設置座標を比較したものである。

②の座標が、前述の検討で行った計測範囲（-50、-50）に対応する点であり、その差は 0.16（m）であった。また、3 基の浮上局を通る円のほぼ中心位置である計測点③においては 0.077（m）と非常に高精度に測位できている。なお、計測点①については、測位方法が計測点②、③と異なるため、参考値ではあるが、誤差 0.42（m）であった。

以上の結果より、開発した浮上式音響測位装置は仕様である誤差（正確度）0.5m以内を満たしていると考える。

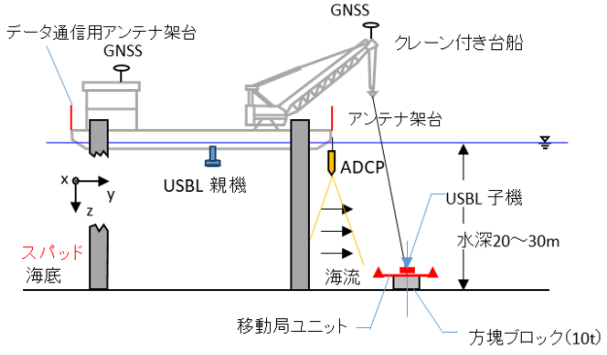


図 3.21　クレーン台船による移動局の設置

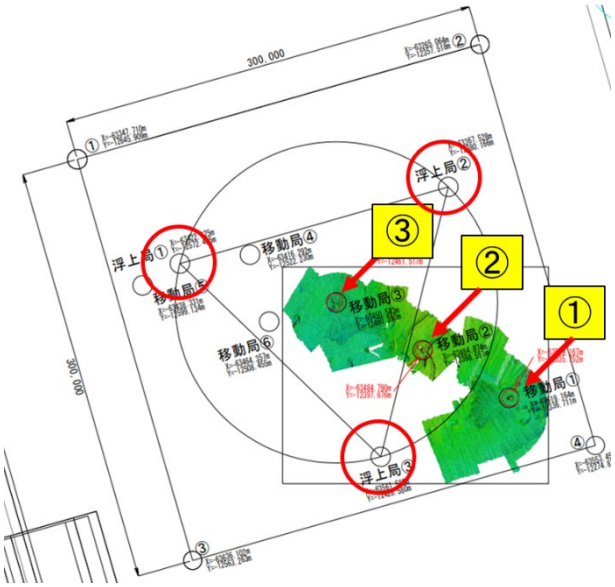


図 3.22　マルチビームソナーによる移動局座標の計測

表3.14　測位計測結果（m）

	浮上式測位装置		マルチビームソナー		計測誤差		
	X	Y	X	Y	X軸誤差	Y軸誤差	斜距離
①	101.310	-100.423	100.920	-100.266	0.390	-0.157	0.420
②	50.982	-50.052	50.864	-50.160	0.118	0.108	0.160
③	-1.014	0.819	-0.951	0.774	-0.063	0.045	0.077

【文献】

［1］西周次，″フェイズ 11　GPS の利用可能時間と測位精度の解析″，日本航海学会第 65 回講演会，pp. 57-65（1981）

3.4　浮上式音響測位装置の準備、展開、運用

3.4.1　概要

浮上式音響測位装置の運用に関して、事前準備、現地での展開、運用について述べる。必要となる作業の概要を**図 3.23** に示す。以下、事前準備、展開（測位前日）、運用（測位当日）の時系列で浮上局、移動局、基地局に関する作業内容を述べる。

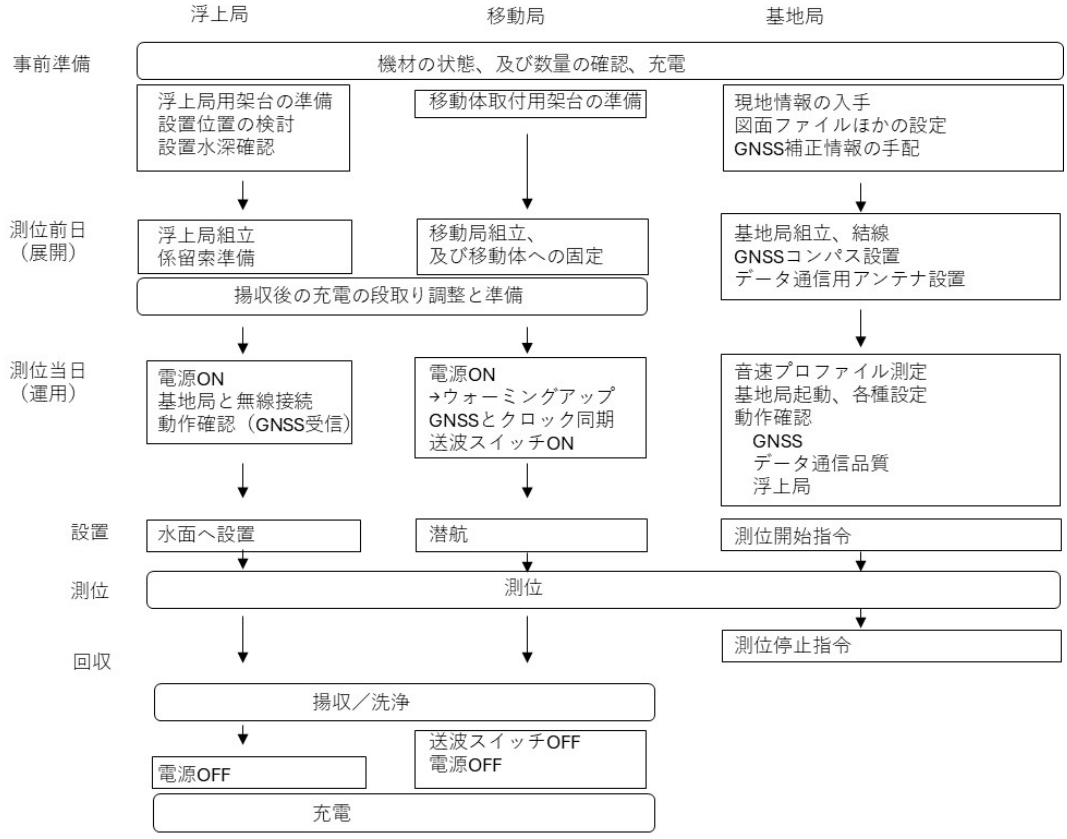


図 3.23　浮上式音響測位装置運用に関する流れ図

3.4.2　事前準備

ここでは機材を現地に搬入する前に行っておく必要のある作業について述べる。

3.4.2-1　浮上局

(1) 浮上局用架台

浮上局は輸送時、木箱 2 つに浮体部とアンテナマスト部に分割されて収納されている（**図 3.4**）。この 2 つを機械的に結合し、電気的に接続するための組立作業、測位（運用）後の充電、浮上局内蔵 SSD からのデータ回収作業に用いる架台が必要である。京浜港ドックにおける実験で用いた浮上局用架台を**図 3.24** に示す。

図 3.24　浮上局用架台

(2) 浮上局設置位置の検討

以下を考慮して、浮上局の配置を決めた。

① 浮上局の水面への設置作業を含めて、水中作業と干渉しないこと。

② できるだけ基線長が長くなること。

基線長が長くなると、測距ばらつきの測位ばらつきへの誤差伝搬が小さくなることが知られている。DOP（Dilution Of Precision）は、測位のばらつきが測距のばらつきの概略の何倍になるかを示している。浮上式音響測位装置（以下、本装置と略す。）の仕様では、測位は水平方向のみ行うので、HDOP（horizontal DOP）を指標とする。

③ GNSS 衛星からの信号波確保

以前京浜港ドックで行った実験で、ドックの壁際で GNSS 信号波が良好に受信できないことを経験した。本装置は GNSS 衛星を利用できないと、クロック同期ができなくなり、測距が成り立たなくなるため、GNSS 衛星からの信号波を受信できるようにしなければならない。

④ ドック壁面からの音響反射の影響

③、④に関しては別日程で予備実験を行い、ドック壁面から 5ｍの位置で影響がないことを確認した。

①、②に関しては、計画している浮上局配置で得られる HDOP と水中バックホウの作業利用域から、HDOP<4 であることを確認した。**図 3.25** に浮上配置、水中バックホウ移動範囲（想定）、HDOP を示す。

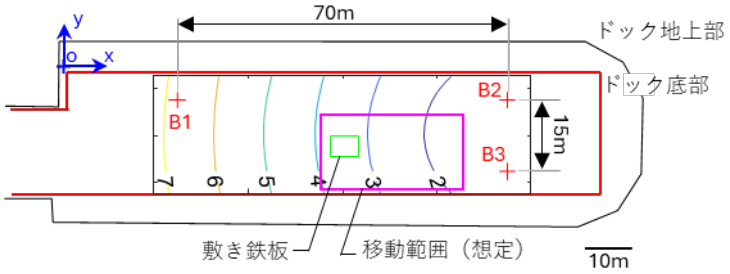


図 3.25　京浜港ドック配置時の HDOP

(3) 浮上局設置位置の水深情報の入手

平面図内での浮上局の設置位置が決まったら、その位置の水深情報を入手し、係留索の構成を把握する。水深と係留索の構成は**表 3.15** に従い、定める。

表 3.15　水深毎の係留索等選定表

索種	(m)	深度(m)								
		7	8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
ブイ直下	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
チェーン	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
キョーレックスB	3			○	○	○	○	○	○	○
キョーレックス 5m with 中間フロート	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中間フロート	0.5				○	○	○	○	○	○
キョーレックスA	2					○		○		○
キョーレックスB	3									
キョーレックスC	5						○	○		
キョーレックスD	10									
キョーレックスD	10								○	○
チェーン	1.5				○	○	○	○	○	○
その他接続金物1	1		○		○	○	○	○	○	○
その他接続金物2	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
合計索長（m）	44	8	9	11	14	16	19	21	24	26

索種	(m)	深度(m)								
		23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34	35-36	37-38	39-40
ブイ直下	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
チェーン	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
キョーレックスB	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○
キョーレックス 5m with 中間フロート	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中間フロート	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
キョーレックスA	2		○		○		○	○		○
キョーレックスB	3	○		○	○	○	○		○	○
キョーレックスC	5		○	○	○			○	○	○
キョーレックスD	10					○	○	○	○	○
キョーレックスD	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
チェーン	1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
その他接続金物1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
その他接続金物2	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
合計索長（m）	44	27	31	32	34	37	39	41	42	44

3.4.2-2　移動局

移動局を構成する各ユニットの形状は**図 3.5** のように円筒形を基本構造とした水密容器となっている。また空中の重量も送波器ユニットで 6kg、送信ユニットとバッテリーユニットは約 10kg あり、水中バックホウに固定する際には機械的にしっかり固定する必要がある。このため円筒形の各ユニットを樹脂製のホルダ（**図 3.26**）で固定し、樹脂製架台（**図 3.27**）に移動局の各ユニットを載せた上で、水中バックホウの運転席上部に固定した（**図 3.28**）。

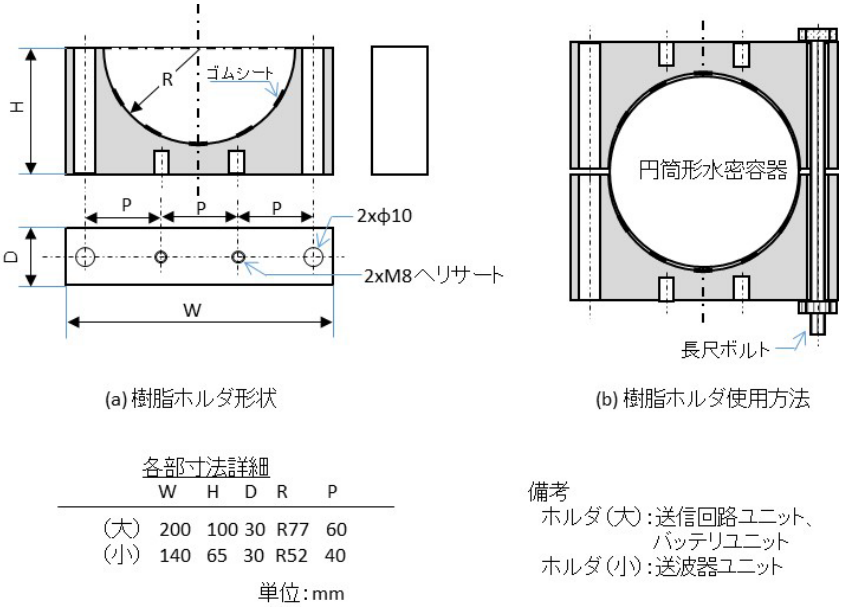


図 3.26　樹脂ホルダ

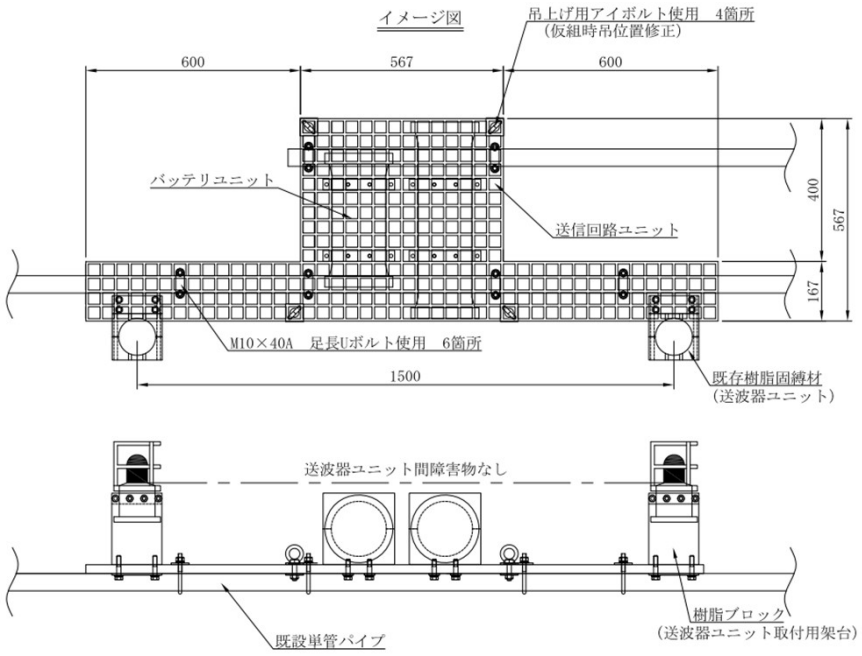


図 3.27　水中バックホウ用架台イメージ図

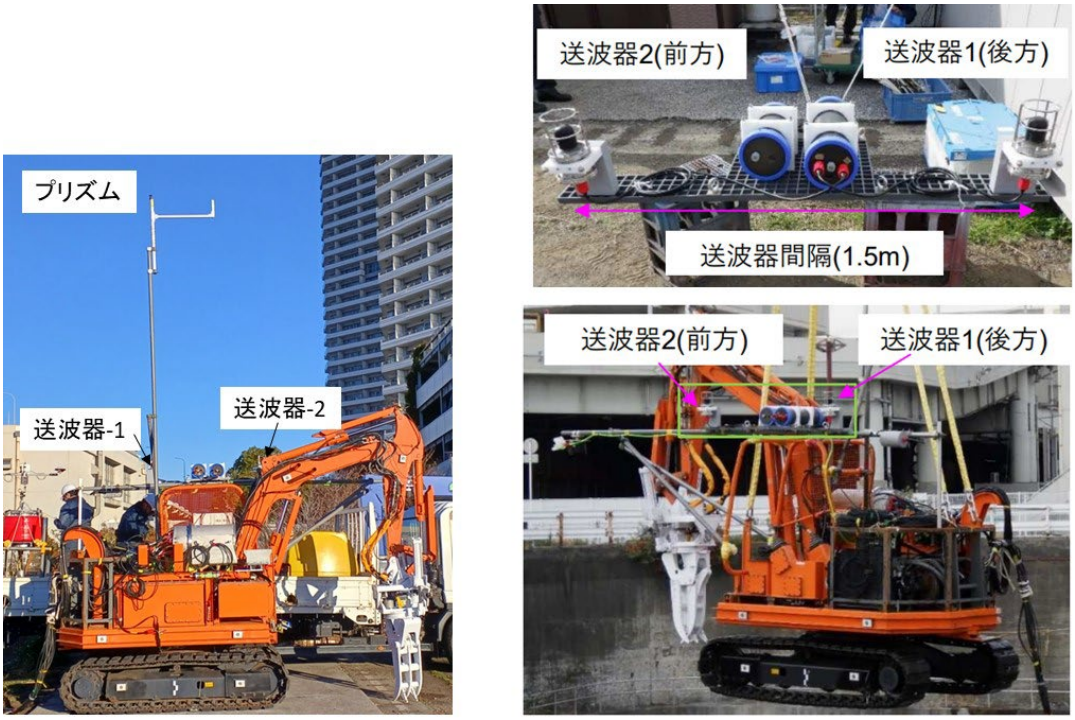


図 3.28　京浜港ドック実験時艤装状態

3.4.2-3　基地局

(1) 現地情報の入手

現地で使用する作業用座標系の座標原点と作業用座標系の方位角を入手する。座標原点が緯度、経度表示の場合は、該当する平面直角座標系での表示に変換しておく。平面直角座標と作業用座標の関係は**図 3.13** に示したものを用いた。

(2) 図面ファイルほかの設定

測位を開始する前に図面ファイルを作成する。既に作成済の場合は図面ファイルを読み込む。

図 3.29　図面ファイル用「新規作成 図面条件」ウィンドウ

(3) GNSS 補正情報の手配

浮上局の位置を高精度に計測するためには、GNSS 受信機に対し補正情報(RTCM 信号)を基地局より各浮上局へ配信する必要がある。RTCM 信号は VRS から取得する方法と RTK 基準局から取得する方法の 2 通りがある。

また、補正情報は浮上局 3 基と基地局の合計 4 台の GNSS 受信で使用しており、VRS の商用契約によっては 4 契約の扱いとなることがある。

3.4.3　展開

本装置を搬入し、測位できるように展開する作業について述べる。

搬入する機材の量は、4 トントラック 1 台に余裕をもって積載できる程度である。係留系の錘の重量が 100kg（空中）のため、パワーゲート付きトラックが望ましい。

展開作業は本装置を熟知した技術者 4 名で、4～6 時間程度の作業量であった。

3.4.3-1　浮上局

(1) 組立

①輸送用木箱より浮体部を取り出し、浮上局用架台上に載せる。

②アンテナ部を木箱より取り出し、浮体部に取り付け、ケーブルの結線を行う。

作業量は、3 名で 10 分／台程度であった。（空き箱の後片付けは含まず。）

(2) 係留索の準備

浮上局の設置水深により**表 3.15** に従い、係留索を準備する。水深 2m毎に係留索の組合せ部品が異なり、特に浮上局毎に設置水深が異なる場合は、設置場所ごとに浮上局と係留索をまとめるなどの注意を要する。ロープ等の接続部のシャックルに割ピンを使っているので、水深が 11m以上となると、1 人作業で 1 本あたり 30 分程度時間を要した。

3.4.3-2　移動局

①移動局用架台に各ホルダを取り付ける。

水中バックホウ用架台（**図 3.27**）に各移動局ユニットが固定されていない状態まで組み立てるのに、1 人作業（手工具のみ使用）で 30 分程度を要した。

②各移動局ユニットの取付と結線

各ユニットをホルダに固定し、ユニット間を参考に結線する（**図 3.30**）。本装置では送波器 1 と送波器 2 を区別しているので、結線には注意が必要である。この作業には 2 人で 45 分程度を要した。

③水中バックホウ取付

水中バックホウの準備と調整の後、水中バックホウに取り付ける。

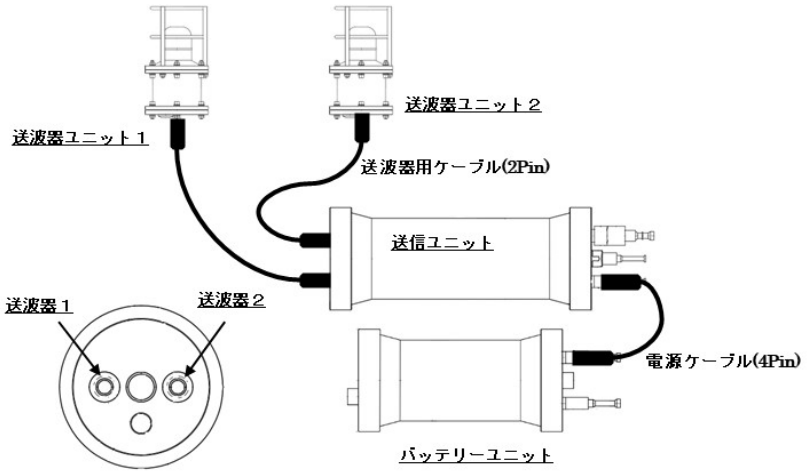


図 3.30　移動局接続図

3.4.3-3　基地局

①計測室内に基地局ユニット、基地局無線ユニット、GNSS 受信機を設置し、接続図(**図 3.31**)を参考に結線する。

②アンテナを設置し各ユニットと接続する。アンテナケーブルの養生を行う。

無線データ通信用のアンテナは、浮上局との見通しが確保できる位置に設置する。

使用したデータ通信用無線機は免許不要のものであるが、規格で送信時間が 10%に制限されている。このため浮上局と基地局の見通しが悪くなると、再送信が増加し、やがて制限時間を越えて送信が制限される。この状態を避けるために海上実験で基地局を設置したクレーン付き台船（約 50x20m）に設置した際には、アンテナを台船のクレーンで見通しを遮られないよう、台船の 4 隅に 1.5m程度の高さの架台を設けてアンテナを設置した（**図 3.32**）さらに台船の移動に合わせて基地局側で見通しが確保できるアンテナにケーブルで繋ぎ変えを行った。アンテナケーブルの引き回しが長くなったために、ケーブルの養生を含めると、4 人で 3 時間程度要した。

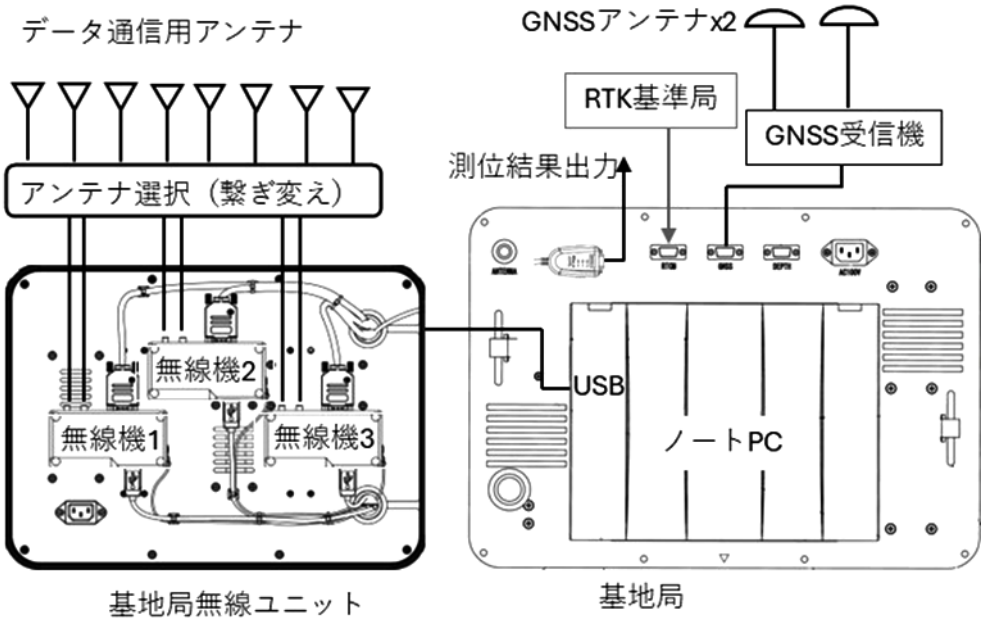


図 3.31　基地局接続図

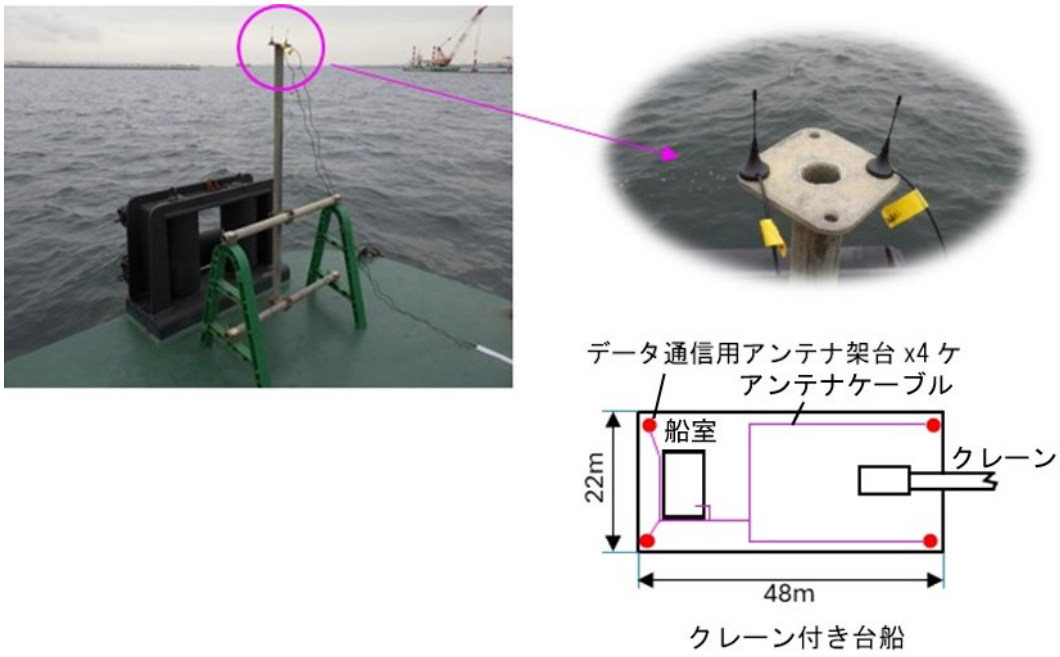


図 3.32　（参考）クレーン付き台船におけるデータ通信用アンテナ設置例

3.4.3-4　充電

浮上局と移動局は回収後夜間に充電し、翌日の利用に備える運用となっている。充電時間の定格は 8 時間であり、専用充電器の入力は AC100V である。京浜港ドックでの実験では夜間に発動発電機が使用できないため交流電源が使えない環境であったため、1500Wh 級のポ

ータブル電源を 4 台用意した。充電後のポータブル電源の残量が 50%以下になることはなく、京浜港ドックにおける浮上局の 1 日の実稼働時間は 5 時間程度であったため、浮上局の消費電力量は 1 時間で 150Wh 程度と考えられる。

充電器と充電対象間のケーブル長に限りあるため、浮上局と移動局は密集させ充電器を近傍に配置する必要があるため、充電器の防水対策が必要である。このため、浮上局アンテナ輸送木箱に充電器とポータブル電源を 2 組入れ、木箱をブルーシートで覆うことにより対応した。

3.4.4　運用

京浜港ドック実験での運用手順、および、注意事項を述べる。

3.4.4-1　浮上局

浮上局は水面の曳航を考量していないので、京浜港ドックの実験では設置位置の近くまでトラックで運び、クレーンで設置した。

また、浮上局をクレーンで吊り上げた際にスリングとアンテナマストが干渉しないように指定の位置で吊り上げた（**図 3.33**）。

図 3.33　浮上局の吊り上げ方法

3.4.4-2　移動局

電源を入れ、クロック同期ユニットを送信ユニットに接続し、移動局のクロックを同期させる。その後、移動局の設置直前に送波スイッチを入れる。

3.4.4-3　基地局

(1) 音速プロファイル測定

本装置には音速度計は含まれていないので、別途手配する必要がある。京浜港ドックの実験では、朝、1回、1か所（アクセスのし易い場所）で測定を行った。測定の時間サンプリング、空間サンプリングについては今後の課題である。

(2) データ通信用アンテナの繋ぎ変え

京浜港ドックでの実験のように基地局の位置が固定されている場合は不要であるが、作業台船に基地局を設置し、作業台船が作業内容に応じてその位置を変える場合には、各浮上局との見通しを確保するために、アンテナの切り替えを行う必要がある。

第４章　ICT 型水中バックホウ技術

水中施工において、作業効率、安全性を大幅に改善させることに加え、潜水士の肉体的負担を軽減する点においても海洋工事の機械化を推進することは有効であると考えられる。

現在、海中透明度の高い沖縄における港湾工事では、潜水士搭乗型の水中バックホウが実用化されており、潜水士の作業環境改善に大きく寄与している。

しかし水中作業では発生する濁りのため視覚情報が劣化するため、透明度の低い海域では光学映像に代わる外界計測技術や作業状況の提示技術が必要となる。

本章では、沖縄で既に実用化され適用例の多い水中バックホウを対象とし、水中での作業情報を操作者に提示する水中版マシンガイダンス技術、機体の状況やマウンド形状等を取得するために使用するセンサ、水中バックホウを遠隔操作する際に必要となる改造点等、過去の技術開発から得られた知見について資料としてとりまとめるものである。

4.1　周辺状況と開発経緯

4.1.1　水中バックホウの開発経緯

1972 年に沖縄県が本土復帰したことにより沖縄県の本島、離島地区において港の築造、整備が本格的に始まった。当初の潜水作業は潜水士の人力作業で行っていたが、潜水士の人材不足、高齢化の問題のほか、台風の多い沖縄では施工の遅れが生じることから、水中における機械化施工が望まれていた。当初、水中ブルドーザなども候補となったが、防波堤築造工事の主な作業である捨石の均し作業、岩の割石などの施工に対応するには、先端アタッチメントの交換により多機能性を有するバックホウタイプが必要であった。また、防波堤マウンドの作業水深は-10m以深も想定されるため、水陸両用ブルドーザのような吸排気ダクトを設置することが困難であり、エンジンの代替となる動力源についても大きな課題が存在した。

水中バックホウは 1982 年に開発が開始され、1985 年に 6 トンクラスの水中バックホウ初号機が与那国島の防波堤工事において初施工を行っている（**図 4.1**、**図 4.2**）。当初の水中バックホウは船上に油圧ポンプを置き、水中の機体には油圧ホースを接続する方式で動力を供給していたが、油圧ホースが重く、最大延長が短いなど、取り回しに難があった。1993 年には機体に水中モータおよび油圧ポンプを設置した電動油圧変換方式の 10 トンクラスの水中バックホウ（**図 4.3**）が開発され、ケーソンマウンド築造工事に導入されていった。この電動油圧変換方式の水中バックホウは水深 50m まで対応できること、ケーブルの延長が 100 mとなったため大幅に機動力が向上している。

図 4.1　水中バックホウ初号機の製作状況（写真は極東建設株式会社より提供）

図 4.2　水中バックホウ初号機による作業（写真は極東建設株式会社より提供）

図 4.3　電動-油圧変換方式の水中バックホウ（写真は極東建設株式会社より提供）

なお、初期の水中バックホウは沖縄の潜水施工会社が独自に開発・製造を行っていた。これは機械の信頼性が潜水士の安全に大きく関連するほか、水中での作業を熟知した作業潜水士の意見の反映や防水に関するノウハウを必要としたためである。

水中バックホウは、実績として 30 機以上製作されており、2022 年 10 月現在で 13 台が稼働可能な機体として日本に存在するが、その多くは水中透明度の高い沖縄に集中している。

なお耐用寿命は 7 年程度である。海水による金属腐食のほか、錆による軸の固着等が発生するため、定期的な塗装やグリスアップが必要である。特に海洋汚染の原因となる油漏れに配慮して、油圧ホースの交換、作動油のメンテナンスが重要な項目となっている。

作業区域への水中バックホウ投入については、現場海域まで回航、現場において水中に設置、揚収する必要がある。そのため揚貨装置のついた支援台船が必要となる。**図 4.4** は台形フレームに揚貨装置を設置した水中バックホウ専用の支援台船であり、搭乗する潜水士の

ための潜水機材等も有している。

図 4.4　水中バックホウ専用の支援台船（写真は極東建設株式会社より提供）

4.1.2　水中バックホウのアタッチメント

水中での作業に対応するため、様々な作業アタッチメントが開発されている。例えば捨石均し作業に使用する「ロックバケット」は、一般的なスケルトンバケットのように格子状で、そのバケットの側面に 2 本の大きな爪を配置し、岩を掬ったり、掴んだりする装置となっている。また港湾空港技術研究所で所有する水中バックホウには、高度な把持作業（ロボットアーム化）を研究するために、チルトローテータフォークグラブ（**図 4.5**）を設置しており、アーム開閉やチルト等の各自由度の情報も取得することで、マシンガイダンスへの表示も可能となっている。（**図 4.6**）

その他、水中専用で開発した回転ブラシ（**図 4.7**）、サンドポンプ、エジェクター装置のほか、陸上で使用されるものを水中用に改造したインパクトブレーカ、ダウンザホールハンマー、ツインヘッダー、シングルヘッダーなど様々な使用実績がある。これら通常の水中バックホウで使用実績のあるアタッチメントについては、**5.1　通常の水中バックホウ適用事例**に記載する。

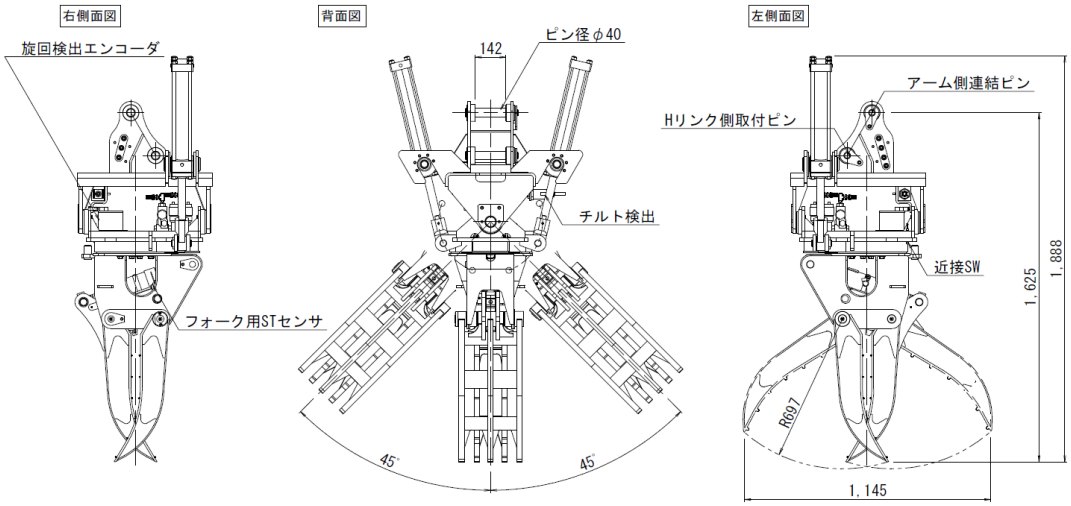


図 4.5　チルトローテータフォークグラブ

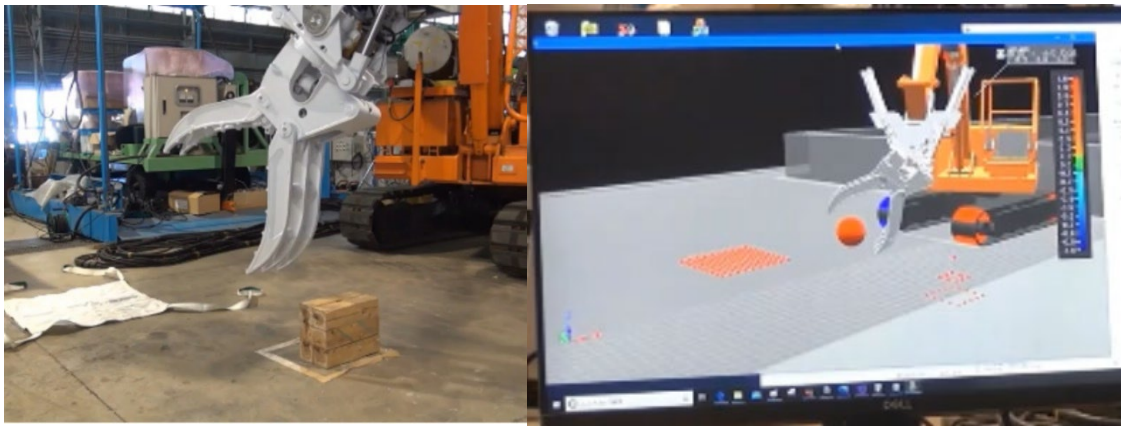


図 4.6　チルトローテータの姿勢を計測して CG 表示

（付録）P.110

図 4.7　回転ブラシを搭載した水中バックホウ（写真は極東建設株式会社より提供）

4.1.3　ICT 化によるメリット

ICT 型水中バックホウに搭載される水中マシンガイダンスは、機体の姿勢や設計図等、作業に有益な情報を操作者に提示するものである。このような情報提示や、作業情報の管理を活用することで下記の利点が存在するものと考えられる。

(1) 濁水中における機械化施工の導入

水中施工において陸上ほど機械化が進んでいないのは、機械の防水化が困難である以外に透明度の劣化による要因も存在する。これは水中透明度の高い沖縄で水中バックホウが定常的に使用されていることからも示されている。

透明度の低さに起因する視覚情報の劣化に対し、ICT 型水中バックホウに設置したセンサの情報を代替の情報として利用することで、施工機械の導入が可能となるものと考えられる。たとえば、捨石均し作業時に必要なバケットの角度や位置・高さについては、傾斜センサや関節角度センサにより計測した情報を運転席に設置したモニタにグラフィカルに表示することで認識が可能である。また外界計測センサにより現状のマウンド形状を計測した結果と設計図面を重ねて表示することで、不陸の位置や目標高さとの差分を認識可能となる。

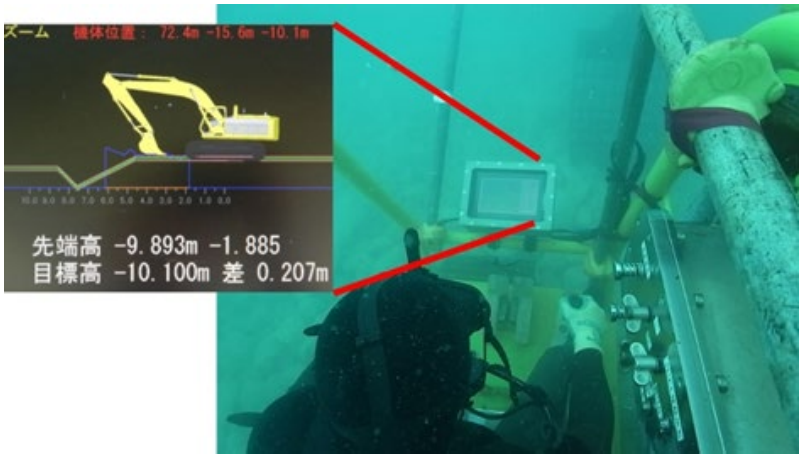


図 4.8　バケット角度や高さ、対象物との位置関係をビジュアル的に認識可能

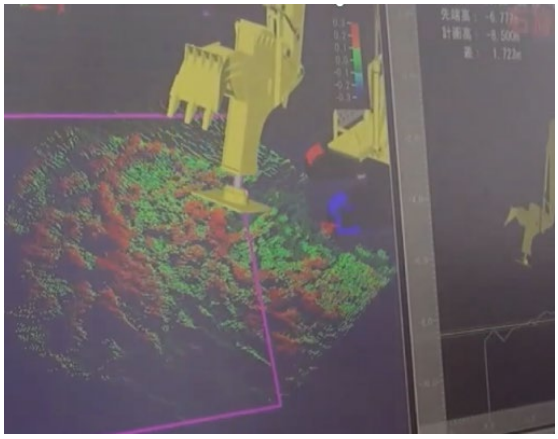


図 4.9　外界計測ソナーによるマウンド 3D 計測

(2) 安全性の向上

透明度の低い条件下での作業では、ケーソンや矢板等の既設構造物やトンネル壁面への接触を防止するため、補助潜水士の目視誘導を行うなどの安全対策が必要である。しかし、その補助潜水士は、バックホウバケット付近に存在し、かつ、操作者は目視でその安全を確認することが難しい。

ICT 型水中バックホウに搭載される水中マシンガイダンスでは、3D モデルで既設構造物を構築し、かつ、その空間内でバックホウの位置、姿勢、方位を表示しており、既設構造物との位置関係をグラフィカルに認識することが可能となる。これにより透明度の低い水中の狭隘部において安全な作業が可能となる。**図 4.10** は透明度が低いダム排水口で小型の水中バックホウを使用した事例である。

運転席に設置されたマシンガイダンスモニタにより、周囲の壁や天井と機体の位置関係を認識することで透明度の低い条件でも安全性を向上させている。

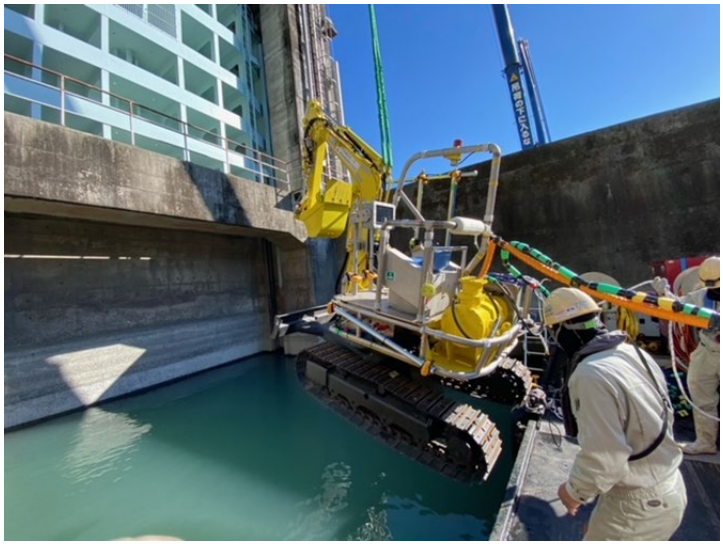


図 4.10　透明度の低い狭隘部での水中バックホウ利用

（付録）P.113

(3) 作業効率の向上

作業に必要な情報を認識しやすい形式で提示することにより、作業効率が向上するものと考えられる。特に捨石均し作業時には、バケットの背面を水平にすることが重要であるため、リアルタイムに機体の姿勢が表示される水中マシンガイダンスは透明度の低い海域で有効である。

この水中マシンガイダンスの有効性を検証するため、A 港のケーソンマウンド築造工事で水中マシンガイダンスを使用した比較を行った。

この工事は、共に 20 トンクラスの 2 台の水中バックホウを使用した捨石均し作業であり、同じ工事区域であるため透明度や水深、潮流などの海象条件の差がほぼ無い状況での比較となる。

一方は通常の水中バックホウ、もう一方の機体には水中マシンガイダンスシステムを搭載した。なお、実工事内での試験のため、安全性を最優先し、水中バックホウ搭乗潜水士以外に誘導潜水士を配置している。また連日の雨により海中透明度は 3m以下の状況が多かった。作業結果を**表 4.1** に示す。

結果として、本均し・荒均し共にマシンガイダンスを搭載した機体の方が作業効率が高い結果となった。特に±5cm の本均しでは、マシンガイダンスを設置した機体の方で作業効率が 14%向上した結果が得られた。さらに、本均しと荒均しでは、本均しの方がマシンガイダンスによる機体情報呈示の効果が高い結果となった。

この理由について潜水士にヒアリングを行ったところ、マシンガイダンスによりバックホウの機体姿勢、特にバケット背面の角度が透明度に依存せず認識が容易となるため、誘導潜水士による微修正を必要としないためであるとの結果であった。

この結果から、水中マシンガイダンスは透明度の低い海域において有効な技術であると考えられる。

表 4.1　作業効率の比較

	潜水士搭乗BH		MG付き搭乗BH	
	本均し（±5cm）	荒均し（±30cm）	本均し（±5cm）	荒均し（±30cm）
延べ㎡	650	489	1,098	90
延べ時間	51.9	20.8	76.7	3.6
時間当たり㎡	12.5	23.5	14.3	25.0

（4）作業データ記録による安全対策の検討

ICT 型水中バックホウに搭載されるセンサの情報を、マシンガイダンス上で記録することにより、水中バックホウの運動や位置等の履歴を解析することが可能である。まだ事例は存在しないが、事故が発生した場合の機械の状況を操作者の口頭だけでなく正確な動作データとして解析することで、事故発生時の状況を再現することができ、事故防止のための対策を検討する事が可能であると考える。

（5）外界計測ソナーや刃先の運動記録による出来形管理の可能性

ICT 型水中バックホウに搭載される外界センサのうち、KongsBerg 社の M3 プロファイルソナーでは水中バックホウ周辺の地形を計測している。**図 4.11** は±10cm のマウンド模型を対象にレーザー測量（気中計測）と M3 ソナー（マウンドまでの距離 2.7m）による計測を比較したデータであるが、最大で 50mm 程度の差が存在するものの、多くの点では 10mm 以下となっており、断面形状の認識としては十分な精度を有していると考える。この M3 ソナーは現状の ICT 型水中バックホウにおいてイメージングとして利用しているが、測深器としての正確性が保証される機器を用いることができれば、将来的には計測結果を出来形管理のデータとして使用できる可能性がある。

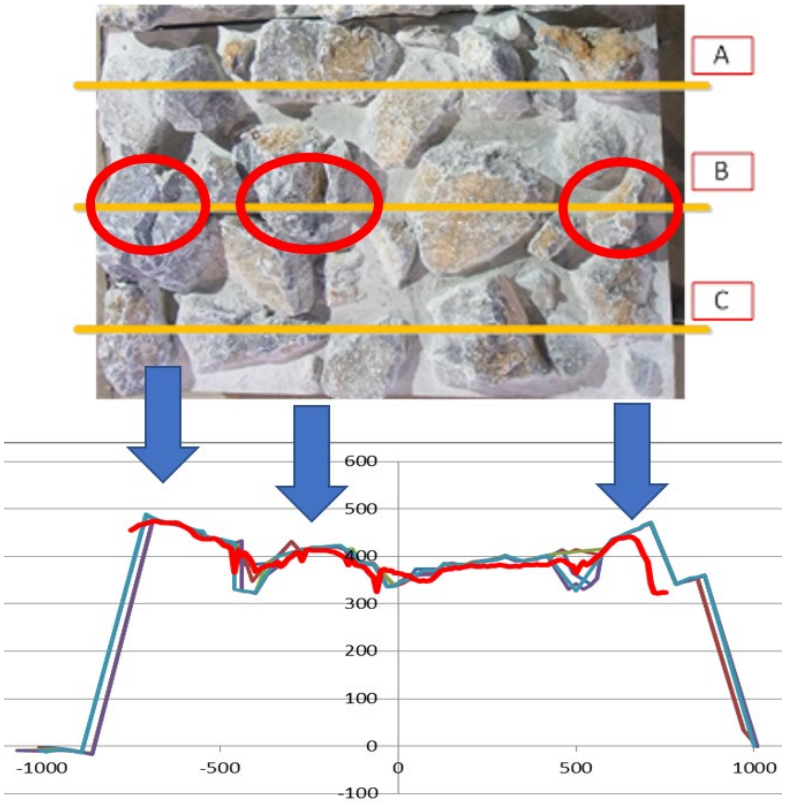


図 4.11　±10cm マウンド模型の計測比較（単位 mm）
（赤線：レーザー測量／その他：M3 ソナー）

4.2　ICT 型水中バックホウの仕様

現在のところ ICT 型水中バックホウは一般に市販されていないため、基本的に陸上用として市販されている油圧バックホウをベース車両とし、動力の変更やセンサの追加、遠隔操作に関する各種改造を行う必要がある。

本節では、ICT 型水中バックホウに使用するセンサや改造に関する情報をとりまとめるものとする。

4.2.1　ベース機体スペック

ICT 型水中バックホウの開発は、実験機サイズ（6 トン）、実機サイズ（20 トン）、ミニショベル（3 トン）の 3 クラスを使用して開発を行った。本項では、ICT 型水中バックホウの開発機として使用した各機体のスペックを示す。

A）実験機サイズ（6 トン）

港湾空港技術研究所が所有する実験機で使用するサイズの水中バックホウは、2008 年に日立建機の特車部門に発注して製作した機体である。

製作からすでに 15 年以上経過しており、設置センサや油圧ホース等は数回交換しているものの、比例電磁弁やバルブコントローラ、油圧モータ等は当時のままである。

使用する場所は、港湾空港技術研究所の実験水槽（水深 6m）を想定していたため、耐圧性能は検討しておらず、電磁比例弁等は単純な箱状の防水容器に格納している。

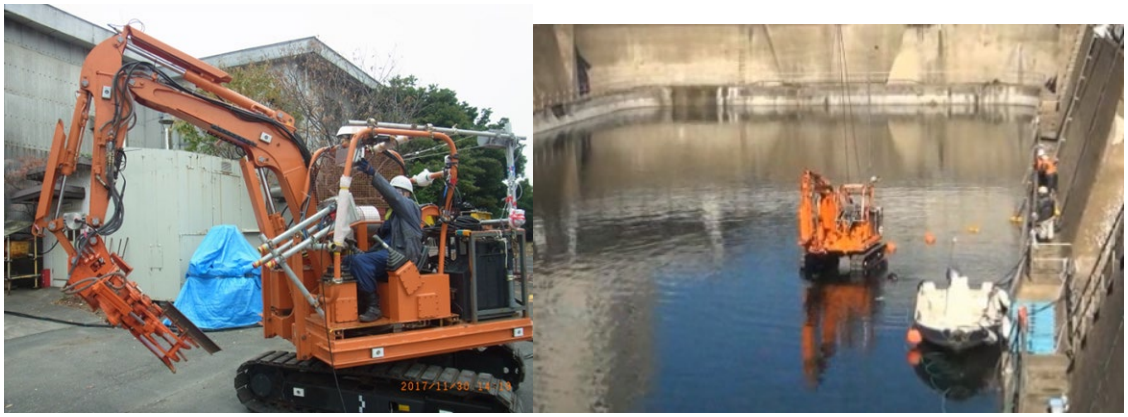


図 4.12　実験機サイズ水中バックホウ（6 トン）

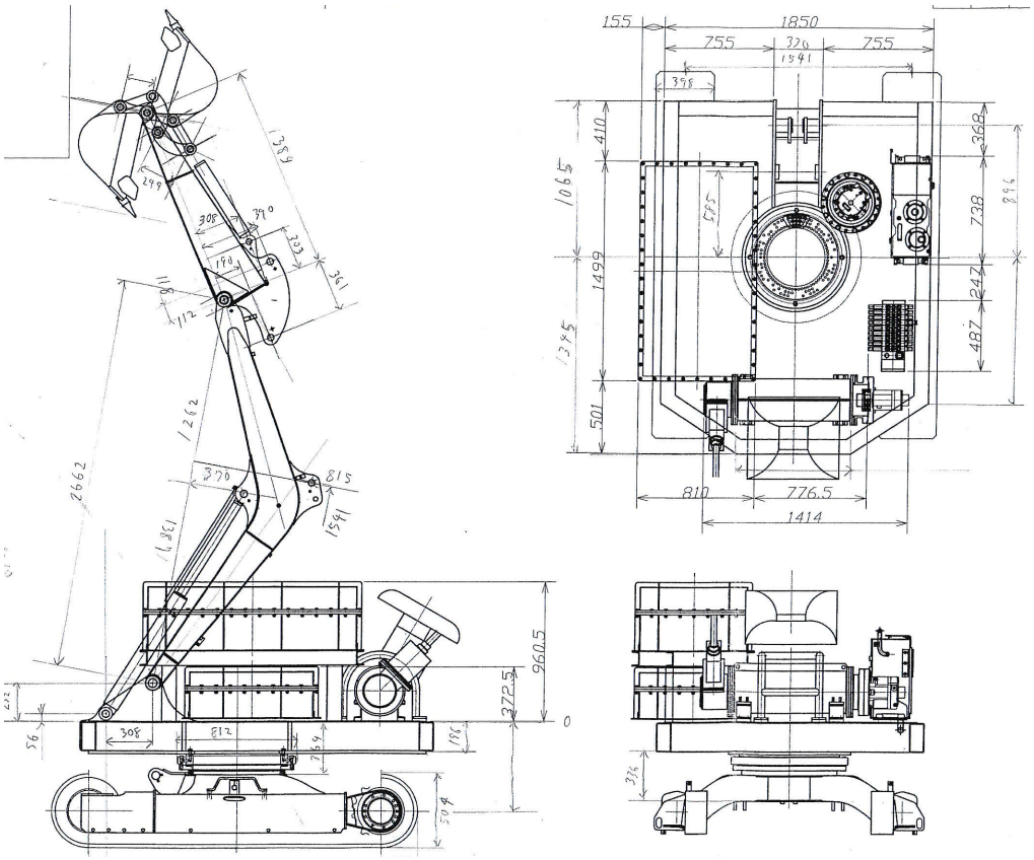


図 4.13　実験機サイズ水中バックホウ（6 トン）の機体サイズ

表 4.2　実験機サイズ水中バックホウ仕様

名称	ZX40U
ベース車両	日立建機社製　ZX40U-2
施工水深	-10（m）
気中運転時間	10分
バケット容量	0.13㎥
機械質量	6,000kg以下
最大旋回半径	5,780mm
機械寸法　（全長）	4,900mm
機械寸法　（全高）	2,371mm
機械寸法　（全幅）	1,850mm
最低地上高	440mm
搭載水中モーター	22kW（三相220V）
定格出力	27.1kW（ベース車）
最大掘削力	32.1kN（ベース車）
追加ポート	4 系統＋ドレン
遠隔操作	可能

（付録）P. 117

B) 実機サイズ（20 トン）

TKM200-9 は、極東建設株式会社が 2011 年に製作した 20 トンクラスの水中バックホウである。この 20 トンクラスは、リーチの長さや掘削力、作業反力についてバランスの取れたサイズであり、沖縄の実工事で一般的に使用されているサイズである。

開発当初は遠隔操作機器が設置されていなかったが、2018 年に試験的に遠隔操作化の改造を行い、港湾空港技術研究所の遠隔操作実験に使用したほか、2023 年に極東建設株式会社が独自に遠隔操作のための油圧配管に変更している。

図 4.14　実機サイズ水中バックホウ（20 トン）

図 4.15　実機サイズ水中バックホウ（20 トン）稼働状況

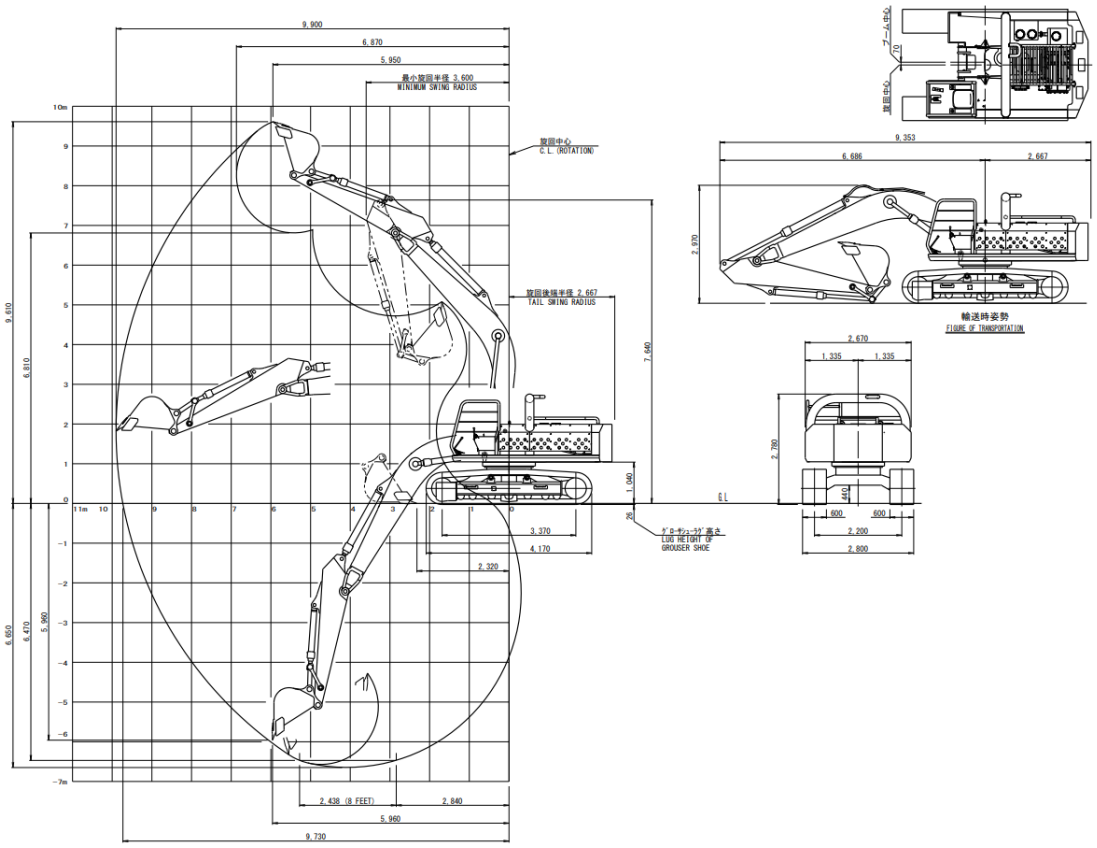


図 4.16　実機サイズ水中バックホウ（20 トン）の機体サイズ

表 4.3　実機サイズ水中バックホウ（20 トン）仕様

名称	TKM200-9
ベース車両	住友建機社製　SH200-7
施工水深	-50（m）
気中運転時間	10分
バケット容量	0.8㎥
機械質量	20,000kg以下
最大旋回半径	9,900mm
機械寸法　（全長）	9,354mm
機械寸法　（全高）	2,970mm
機械寸法　（全幅）	2,670mm
最低地上高	440mm
搭載水中モーター	110kW（三相440V）
定格出力	119.3kW（ベース車）
最大掘削力	142kN（ベース車）
追加ポート	1 系統
遠隔操作	可能

（付録）P.119

C) ミニショベルサイズ（3 トン）

トンネル状になった排水口内で作業するため、極東建設が 2020 年に製作した機体である。投入時に必要となるクレーンが現場条件により小型のラフタークレーンしか利用できなかったため、3 トン以下の制約で設計された。小型であるため、遠隔操作油圧配管や制御装置を設置するスペースが無く、本機体は搭乗操作のみである。

図 4.17　ミニショベルサイズ水中バックホウ（3 トン）

図 4.18　ミニショベルサイズ水中バックホウ（3 トン）投入状況

（付録）P.120

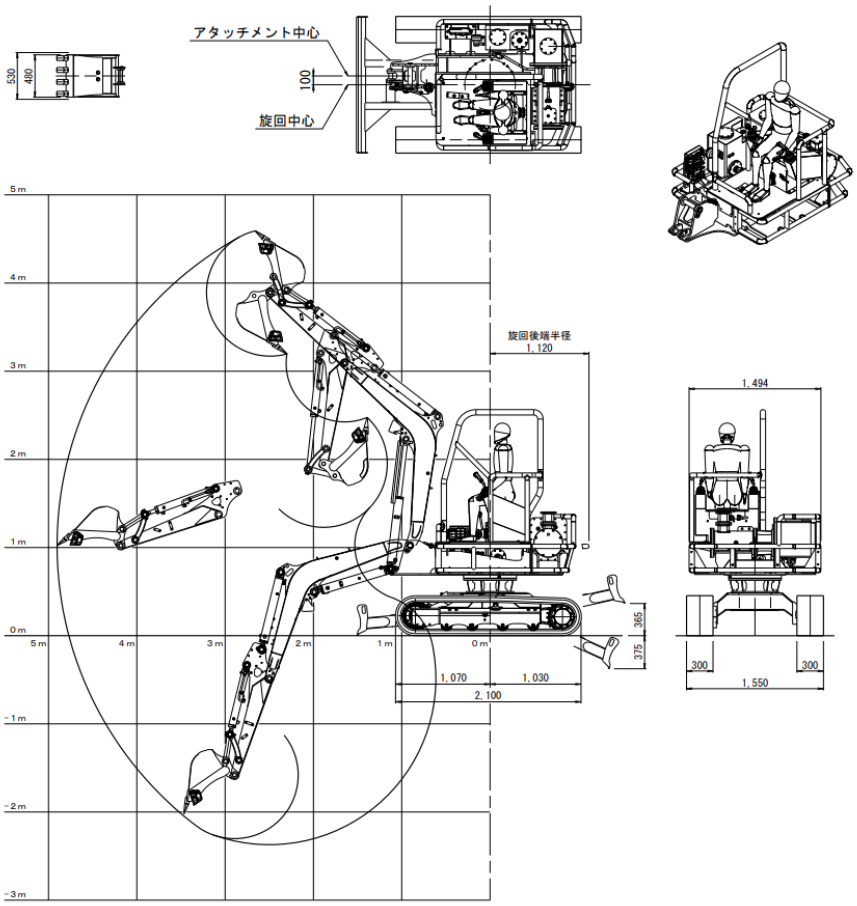


図 4.19　ミニショベルサイズ水中バックホウ（3 トン）の機体サイズ

表 4.4　ミニショベルサイズ水中バックホウ（3 トン）仕様

名称	TKM30-1
ベース車両	クボタ社製　U30-6
施工水深	-50（m）
気中運転時間	10分
バケット容量	0.09㎥
機械質量	3000kg
最大旋回半径	4,910mm
機械寸法　（全長）	4,530mm
機械寸法　（全高）	2,565mm
機械寸法　（全幅）	1,550mm
最低地上高	280mm
搭載水中モーター	22kW（三相440V）
定格出力	18.9kW（ベース車）
最大掘削力	30kN（ベース車）
追加ポート	1 系統
遠隔操作	ーーー

（付録）P. 121

4.2.2　機体情報取得センサ（内界センサ）

ICT 型水中バックホウでは、機体の情報を取得するための各種センサを設置している。本項では、ICT 型水中バックホウで使用した実績のある内界センサについてとりまとめている。

(A) 関節角度計測

（A-1）磁歪式ストロークセンサ

表 4.5　磁歪式ストロークセンサ仕様

名称・型番	磁歪式リニアセンサGYc-RS
メーカー	サンテスト株式会社
出力形式	RS422
電源	12V～24V
精度	±0.025%FS以下
アンプ	GYDC-5
設置方法	油圧シリンダに平行して設置

図 4.20　アンプ（GYDC-5）

図 4.21　磁歪式ストロークセンサ（GYc-RS）

図 4.22　設置状況（GYc-RS）

図 4.23　防水容器内のアンプ（GYDC5）

表 4.6　磁歪式ストロークセンサ通信方式

通信方式	電気的仕様	RS422	
	通信方式	パラレルインタフェース	ホスト側から随時取得
	取得データ	ストローク位置	

(A-2) 重力加速度計

表 4.7　重力加速度計仕様

名称・型番	重力加速度計　MTLT-110s
メーカー	MEMSIC（アメリカ）
出力形式	RS232c
電源	9V～32V
精度	1deg
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、Iリンクに固定

図 4.24　重力加速度計

図 4.25　設置状況（MTLT-110s）

表 4.8　重力加速度計通信方式

通信方式	電気的仕様	RS232	
	通信方式	非同期シリアル通信	
	取得データ	角度データ(°)	

（A-3）全角度傾斜センサ

表 4.9　全角度傾斜角センサ仕様

名称・型番	全角度傾斜センサ　NG360
メーカー	SAIKA社（ドイツ）
出力形式	RS485
電源	9V～15V
精度	＜±0.25°
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、アーム等に固定

図 4.26　全角度傾斜角センサ

図 4.27　防水容器内の NG360

図 4.28　TKM30 設置状況

表 4.10　全角度傾斜角センサ通信方式

通信方式	電気的仕様	RS485	最大 78 台同時接続可
	通信方式	非同期シリアル通信	ホスト側から随時取得
	取得データ	角度データ（°）	

表 4.11　全角度傾斜角センサデータフォーマット

Byte	項目	値/形式　(単位)	備考
1	Start of Text	02h	STX
2-7（可変長）	角度データ	nnn.nn(°)	
8	End of Transmission Block	17h	ETB
9-10	チェックサム	ascii	
11	終了コード	24h	$

(B) 機体傾斜計・方位計

(B-1) ファイバーオプティカルジャイロ

表 4.12　ファイバーオプティカルジャイロ仕様

名称・型番	ファイバーオプティカルジャイロ　JCS7402A
メーカー	日本航空電子株式会社
出力形式	RS485・RS232・ANALOG
電源	20V～30V
精度	≦±0.15deg
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、上部旋回体フレームに設置
特徴	光ファイバジャイロにより振動に対し高い信頼性

図 4.29　ファイバーオプティカルジャイロ

図 4.30　防水容器内の JCS7402A

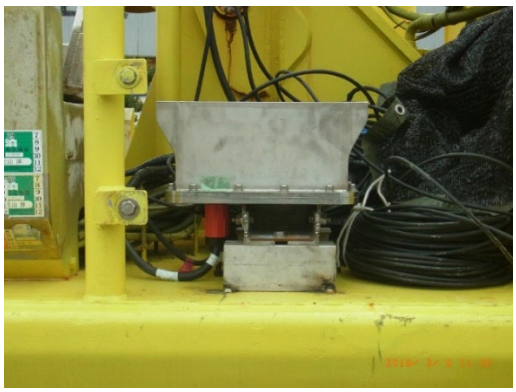


図 4.31　TKM200-9 設置状況

表 4.13　ファイバーオプティカルジャイロ通信方式

通信方式	電気的仕様	RS422	
	通信方式	非同期シリアル通信	一定周期で出力
	取得データ	姿勢角度、加速度	

表 4.14　ファイバーオプティカルジャイロデータフォーマット

Byte	項目	値/形式　(単位)	備考
1	Start of Text	02h	STX
2-3	ID	38h,32h	固定値
4-5	IMU ステータス	binary	
6-11	ロール角、ピッチ角、ヨー角	符号付き 16 ビット(°)	
12-17	X，Y，Z　加速度	符号付き 16 ビット(°)	
18-23	X，Y，Z　角速度	符号付き 16 ビット(°)	
24-25	チェックサム	Byte2-23 を XOR した値	
26	End Code	0Dh	

(B-2)　9 軸 MEMS センサ

表 4.15　9 軸 MEMS センサ仕様

名称・型番	9軸 MEMSセンサ　BNO-055
メーカー	Bosch
出力形式	UART
電源	2.4V～3.6V
精度	
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、上部旋回体フレームに設置
特徴	低価格で 9 軸MEMSセンサを搭載

図 4.32　9 軸 MEMS センサ

表 4.16　9 軸 MEMS センサ通信方式

通信方式	電気的仕様	デジタル出力(0/3V)	
	通信方式	非同期シリアル通信	コマンド/レスポンス方式
	取得データ		

表 4.17　9 軸 MEMS センサデータフォーマット

Byte	項目	値/形式　(単位)	備考
1	ResponseByte	BBh	
2	データ長	送信バイト数	
3－n+2	データ値	指定したレジスタのデータ値	

（B-3）MEMS 慣性センサ

表 4.18　MEMS 慣性センサ仕様

名称・型番	MEMS慣性センサGCAH-12ノースファインダ
メーカー	住友精密工業株式会社
出力形式	RS485
電源	6.5V～24V
精度	＜±0.5°　（ドリフト　＜5°/h 最大）
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、上部旋回体に設置
特徴	高精度MEMSセンサにより地球の自転を計測することで、水中でも真北が検出可能

図 4.33　MEMS 慣性センサ

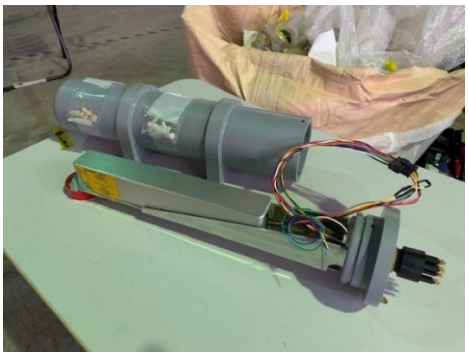


図 4.34　防水容器内のノースファインダ

図 4.35　機体設置状況

表 4.19　MEMS 慣性センサ通信方式

通信方式	電気的仕様	RS422	
	通信方式	非同期シリアル通信	一定周期で出力
	取得データ	姿勢角度、加速度	

表 4.20　MEMS 慣性センサデータフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1	ヘッダ	AAh	
2	データ長	21h	
3	コマンド No	01h	
4	ステータス	動作モードを表す番号	
5-7	ステータス 1-3	自己診断による状態情報等	
8	リザーブ	－	
9-10	メッセージカウンタ	符号なし 16 ビット	
11-16	角速度　X,Y,Z	符号付き 16 ビット(deg/s)	
17-23	加速度　X,Y,Z	符号付き 16 ビット(g)	
23-28	ロール角，ピッチ角，方位角	符号付き 16 ビット(°)	
29-30	緯度	符号付き 16 ビット(°)	
31-32	温度	符号付き 16 ビット(℃)	
33	チェックサム	Byte1 から 32 の合計の 2 の補数	

(B-4) 地磁気方位計

表 4.21　地磁気方位計仕様

名称・型番	HMR-3000
メーカー	Honeywell
出力形式	RS485・RS232
電源	6V～15V
精度	＜±0.5°　(Heading)
アンプ	ーーー
設置方法	地磁気方位検出の場合、非磁性体の防水ハウジングに入れる。機体から数メートル離して設置
特徴	姿勢角以外に地磁気コンパスを搭載

図 4.36　地磁気方位計

図 4.37　HMR3000 設置状況

表 4.22　地磁気方位計通信方式

通信方式	電気的仕様	RS485	
	通信方式	非同期シリアル通信	一定周期で出力
	取得データ	方位角、ピッチ、ロール	

表 4.23　地磁気方位計データフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1 - a （可変長）	方位角	nnn.n(°)	
a+1	区切り	2Ch	カンマ区切り
a+2 - b （可変長）	ピッチ角	nnn.n(°)	
b+1	区切り	2Ch	カンマ区切り
b+2 – c （可変長）	ロール角	nnn.n(°)	
c+1 – c+2	終端コード	0Dh,0Ah	

(C) 水圧計

(C-1)高精度水位センサ

表 4.24　高精度水位センサ仕様

名称・型番	BWL-20MET
メーカー	共和電業株式会社
出力形式	ひずみブリッジ回路
電源	ーーー
精度	±0.15%RO以内
アンプ	WGA-670A
設置方法	上部旋回体フレームに設置
特徴	キャピラリホース大気圧補正による高精度水圧計

図 4.38　高精度水位センサ

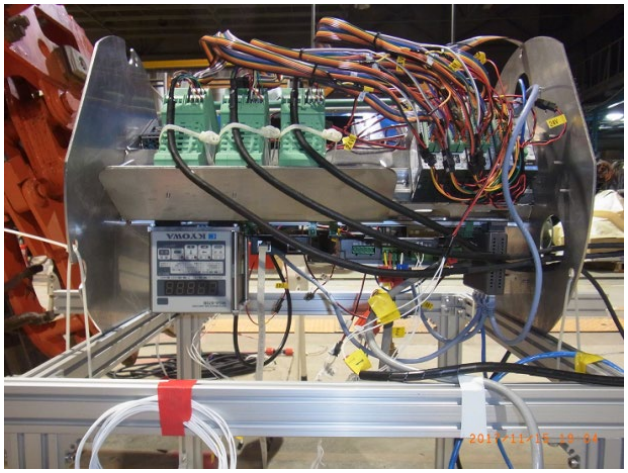


図 4.39　防水容器内のアンプ（WGA670A）

表 4.25　高精度水位センサ通信方式

通信方式	電気的仕様	RS485	WGA-670A オプション
	通信方式	非同期シリアル通信	コマンド/レスポンス方式
	取得データ	ひずみ値	係数により水位に換算

表 4.26　高精度水位センサデータフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1-2	ヘッダ	44h,31h	
3-9	データ値	±yyyyyy	小数点を含む
10-11	終端コード	0dh,0ah	

(C-2)差圧型水圧計

表 4.27　差圧型水圧計仕様

名称・型番	海事工事用差圧計測システム　QT-100-30
メーカー	クリオテクノス
出力形式	RS232c
電源	AC100V
精度	20mm以下（計測端２器の水深差が1m以下の場合）
アンプ	ーーー
設置方法	防水ハウジングに入れ、上部旋回体フレームに設置
特徴	既知高さとBH機体の２個所を同時に計測することで、潮位による影響を受けない

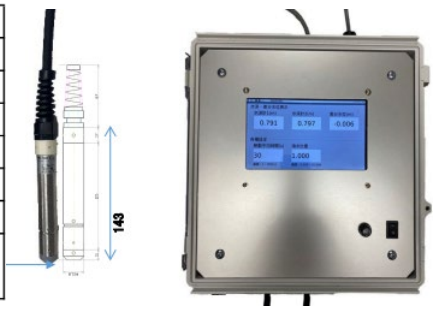


図 4.40　差圧型水圧計

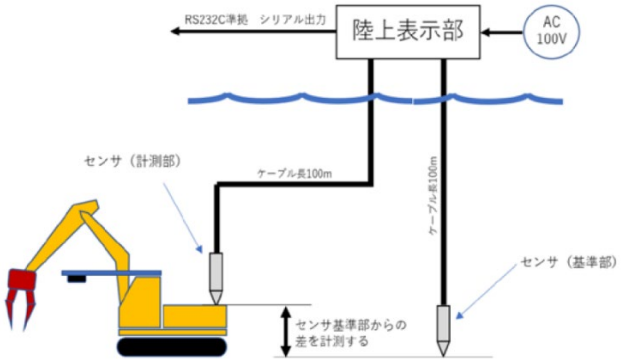


図 4.41　差圧型水圧計の設置イメージ

図 4.42　計測端設置状況

表 4.28　差圧型水圧計通信方式

通信方式	電気的仕様	RS232	
	通信方式	非同期シリアル通信	一定周期で出力
	取得データ	水深（m）	

表 4.29　差圧型水圧計データフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1	スタートコード	24h	$
2-6	データ種別	44h 45h 50h 54h 48h	固定値(DEPTH)
7	区切り	2Ch	カンマ区切り
8 - a（可変長）	水深計1	nnn.nnn　（m）	
a+1	区切り	2Ch	カンマ区切り
a+2 - b（可変長）	水深計2	nnn.nnn　（m）	
b+1	区切り	2Ch	カンマ区切り
b+2 – c（可変長）	差分水位	±nnn.nnn　（m）	
c+1 – c+2	終端コード	0Dh,0Ah	

4.2.3　外界計測センサ

水中での建設機械作業では、作業中に濁りを巻き上げる状況や港湾内の透明度が低い場合、目視や光学映像による情報が得られない場合が多い。

本項では、ICT 型水中バックホウ機体周辺の状況を認識するためのイメージングソナー等の外界計測センサについてとりまとめるものである。

（A-1）プロファイルソナー

表 4.30　プロファイルソナー仕様

名称・型番	Multibeam sonar M3
メーカー	Kongsberg Mesotech（ノルウェー）
出力形式	Ethernet
電源	AC100V
レンジ解像度	10mm
周波数帯	500kHz
設置方法	単管パイプ等で前方へ張り出す
特徴	イメージングとプロファイルの２つのモードがある

図 4.43　プロファイルソナー

図 4.44　設置状況（M3 プロファイルソナー）

表 4.31　M3 プロファイルソナー通信方式

通信方式	下位レイヤ	Ethernet(UTP)	
	通信方式	TCP/IP	サーバーポートから取得
	取得データ	イメージデータ	

表 4.32　M3 プロファイルソナーデータフォーマット

・データ電文の基本構造

byte	1	…	56	57	…	n1	n1+1	…	n2	n2+1	…	n2+44
data	Packet Header			Data Header			Data Body			Packet Footer		
value	–			–			–			–		

Data Body は、m=0～M-1 までのビーム毎の振幅データ、位相データの繰り返し

byte	1	2	3	4	…	2n-1	2n
Field	Am		Am+1			Am+n-1	
data	振幅データ (0.1dB 単位)		同左			同左	
value	signed int 16		signed int 16			signed int 16	

byte	2n+1	2n+2	2n+3	2n+4	…	2n+2N-1	2n+2N
Field	Qm		Qm+1			Qm+N-1	
data	位相データ (0.0001radian 単位)		同左			同左	
value	signed int 16		signed int 16			signed int 16	

n は、振幅データ数。N は、位相データ数

(A-2) ペンシルビーム型プロファイルソナー

表 4.33 ペンシルビーム型プロファイルソナー仕様

名称・型番	881A プロファイリング ソナー
メーカー	IMAGENEX TECHNOLOGY（カナダ）
出力形式	RS485
電源	20V～36V
レンジ解像度	2mm（4m以下）／10mm（5m以上）
周波数帯	600kHz～1.0MHz
設置方法	機体上面に設置
特徴	ペンシルビーム発振を物理的に回転させている

図 4.45 ペンシルビーム型プロファイルソナー

図 4.46 設置状況（881A）

表 4.34　ペンシルビーム型プロファイルソナー通信方式

通信方式	電気的仕様	RS485	
	通信方式	非同期シリアル通信	コマンド/レスポンス方式
	取得データ	エコーデータ	

表 4.35　ペンシルビーム型プロファイルソナーデータフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1-2	ヘッダ	データ種別	
3-12	ヘッダ情報	ID、ステータス等	
12 - N-1	エコーデータ	コマンドで指定したポイント数のエコーデータ	
N	終端コード	FCh	

(A-3) イメージングソナー　Oculus1200

表 4.36　イメージングソナー仕様

名称・型番	イメージングソナー　Oculus1200M
メーカー	BluePrint Subsea(イギリス)
出力形式	Ethernet
電源	12V～32V
レンジ解像度	2.5mm
周波数帯	1.2MHz～2.1MHz
設置方法	単管クランプ等で固定
特徴	陰影表示のため高さ情報は得られないが、リアルタイム性は高い

図 4.47　イメージングソナー

図 4.48　設置状況（Oculus1200M）

4.2.4　測位システム

水中における測位は、GNSS 等の電波信号が得られないため、基本的に超音波の伝搬時間により算出する方式をとっている。本項では、ICT 型水中バックホウの水中での位置を計測するための測位センサについてとりまとめるものとする。ただし、浮上式音響測位装置は第３章に記載するため本項では省略する。

（A-1）TrackLink

表 4.37　TrackLink 仕様

名称・型番	USBL方式水中測位装置 TrackLink1500
メーカー	LinkQuest（アメリカ）
出力形式	RS-232c
電源	AC100V
斜距離精度	0.2m
周波数帯	31.0～43.2kHz
設置方法	親機は台船側に設置、子機をバックホウに設置。 ただし親機のビーム幅150度以内にバックホウが存在する必要がある。
特徴	USBLの初期に開発されたため設計が古く、浅い海域での多重反射に弱い。

図 4.49　TrackLink

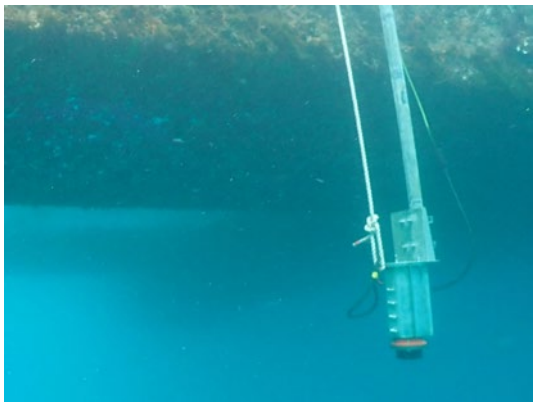


図 4.50　トランスデューサ（親機）設置例

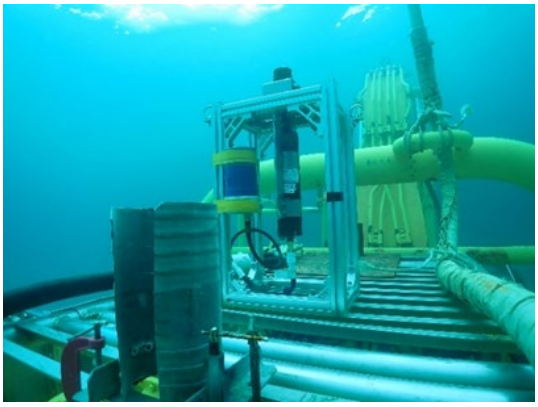


図 4.51　トランスポンダ（子機）設置例

表 4.38　TrackLink 通信方式

通信方式	電気的仕様	RS232	
	通信方式	非同期シリアル通信	
	取得データ	トランスポンダ位置情報	

表 4.39　TrackLink データフォーマット

TP2 互換フォーマット（他に GLL, LXT フォーマットにも対応）

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1	対象番号	ascii code	
3-10	時刻	hh:mm:ss	
12-14	Ship heading	nnn	
16-20	Target Bearing	nnn.n	
22-28	Slant Range	nnn.n	
30-54	X,Y,Z Offset（カンマ区切り）	±nnnnn.n	
56-66	Reserved		
67-68	終端コード	0Dh,0Ah	

(A-2) μPAP

表 4.40　μPAP 仕様

名称・型番	USBL方式水中測位装置 μPAP
メーカー	Kongsberg Discovery（ノルウェー）
出力形式	Ethernet／RS232c
電源	AC100V
レンジ解像度	0.45%@RO
周波数帯	20-30 kHz
設置方法	親機は台船側に設置、子機をバックホウに設置。
特徴	音響ビームフォーミングやDSSS等のスペクトラム拡散を使用することで、いままでのUSBLよりノイズや多重反射に強くなっている

図 4.52　μPAP

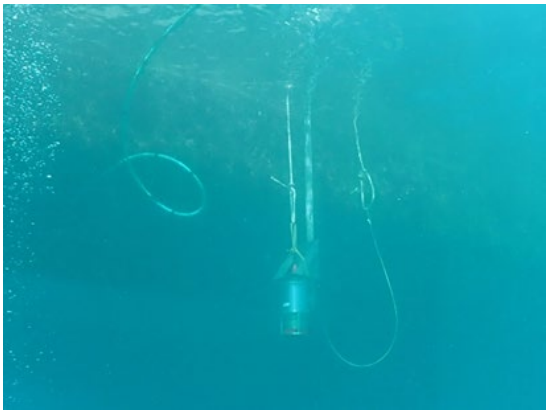


図 4.53　トランスデューサ（親機）設置例

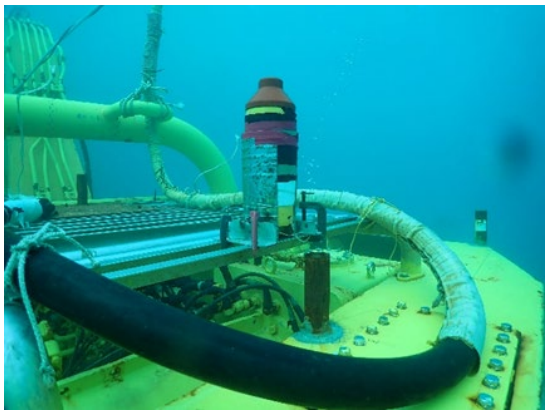


図 4.54　トランスポンダ（子機）設置例

表 4.41　μPAP 通信方式

通信方式	下位レイヤ	Ethernet(UTP)	
	通信方式	TCP/IP	位置測定完了時にデータ送信
	取得データ	位置データ	

表 4.42　μPAP データフォーマット

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1	スタートコード	24h	$
2-8	識別子	50h,53h,49h,4Dh,53h,53h,42h	固定値(PSIMSSB)
9	区切り	2Ch	カンマ区切り
10-19	タイムスタンプ	hhmmss.sss	
20	区切り	2Ch	カンマ区切り
20 - n（可変長）	各種データ（右のデータがカンマ区切りで記述される）	トランスポンダコード	各データはアスキーコードで記述される
		トランシーバ番号	
		トランスデューサ番号	
		ロール角度 （° ）	
		ピッチ角度 （° ）	
		高さ （m）	
		方向 （° ）	
		タグ情報	
		パラメータ	
		前回測定からの経過時間	
		潮位 （m）	
		マスター/スレーブ	
n+1	データ終端	2Ah	＊区切り
n+2 – n+3	チェックサム	チェックサム又は空	
n+4 – n+5	終端コード	0Dh,0Ah	

(A-3) Evologics

表 4.43　Evologics 仕様

名称・型番	USBL方式水中測位装置　Evologics　S2C
メーカー	Evologics（ドイツ）
出力形式	Ethernet、RS232C
電源	AC100V
レンジ解像度	0.01m
周波数帯	18－34kHz
設置方法	親機は台船側に設置、子機をバックホウに設置。
特徴	水平方向全周を計測するソナーヘッドがあるため、浅海域でも使用しやすい

図 4.55　Evologics

表 4.44　Evologics 通信方式

通信方式	電気的仕様	RS232/Ethernet	
	通信方式	非同期シリアル通信	
	取得データ	トランスポンダ位置情報	測位完了時に送信

表 4.45　Evologics データフォーマット（例）

Byte	項目	値/形式 （単位）	備考
1	スタートコード	24h	$
2-8	識別子	50h,53h,49h,4Dh,53h,53h,42h	固定値(PSIMSSB)
9	区切り	2Ch	カンマ区切り
10-19	タイムスタンプ	hhmmss.ss	
20	区切り	2Ch	カンマ区切り
20 - n（可変長）	各種データ（右のデータがカンマ区切りで記述される）	トランスポンダコード	各データはアスキーコードで記述される
		ステータス	
		エラーコード（ブランク）	
		座標系	
		基準方位	
		フィルター（常に M）	
		Y 座標　x.xx(m)	
		X 座標　x.xx(m)	
		Z 座標　x.xx(m)	
		精度 x.xx(m)	
		追加情報（常に I）	
		ピッチ角（° ）	
		ロール角（° ）	
n+1	データ終端	2Ah	＊区切り
n+2 – n+3	チェックサム	チェックサム又は空	
n+4 – n+5	終端コード	0Dh,0Ah	

(A-4)あおみ建設 LBL「そこにイルカ」

表 4.46　あおみ建設 LBL「そこにイルカ」仕様

名称・型番	耐マルチパス水中音響測位装置 「そこにイルカ」
メーカー	あおみ建設
出力形式	Ethernet(UDP)
電源	AC100V
レンジ解像度	斜距離 1cm 以下
周波数帯	35kHz±12.5kHz
参考価格	未定
設置方法	水中バックホウ上部旋回体の側面に送波器 4 基を設置。 海底（既設防波堤のフーチング部など）に受波器架台（受波器を 3 基固定）を 2 基設置。
特徴	測位に不要な反射波をフィルタリングして、安定かつ高精度に測位可能なシステム。特に港湾工事が行われる浅海域はマルチパスの影響が顕著であり有効である。 高精度磁気方位計を内蔵し、真北に対するバックホウ機体の方位を出力。 Z 座標は、水圧計で高精度に計測。水圧計 2 基使用し、1 基を深さが既知の水中 BM に設置することで、バックホウの深さは自動的に潮位補正した結果を出力。

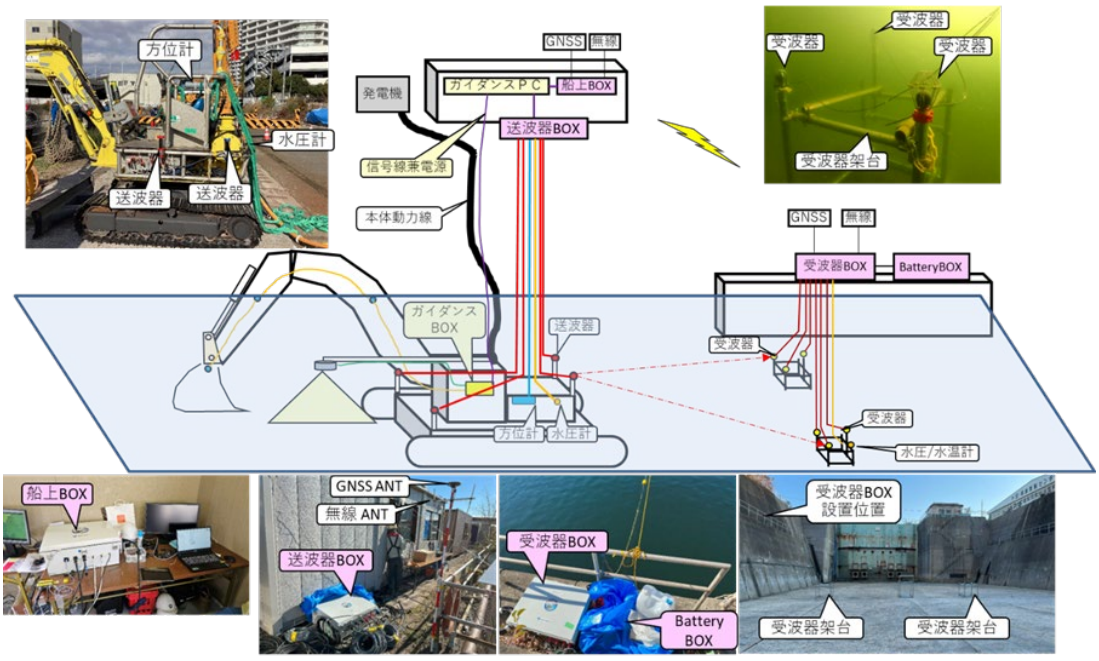


図 4.56　「そこにイルカ」機材構成

（付録）P.142

表 4.47　「そこにイルカ」データフォーマット

○データフォーマット例

$POS2	固定のヘッダ文字列		data
稼働送波器数	0：不稼働(基本なし) 1：送波器 1-2 のみ稼働　2：送波器 2-3 のみ稼働 3：送波器 3-4 のみ稼働　4：送波器 1-4 のみ稼働 5：送波器 1-2-3-4 全稼働		5
Lo_θ0	現場Local座標軸の回転角[度] N=Y軸→0,CW+360, xxx.xx(度)		100.00
AcP_θ	音響測位方位[度] 現場LocalY軸=機首→0,CW+360, xxx.x(度)		114.3
BH_Pz	圧力計(バックホウ)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.00
Tr1_X	送波器 1(Tr1)の現場 LocalX 座標[m],xxx.xx(m)		999.90
Tr1_Y	送波器 1(Tr1)の現場 LocalY 座標[m],xxx.xx(m)		999.90
Tr1_Z	送波器 1(Tr1)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.21
Tr2_X	送波器 2(Tr2)の現場 LocalX 座標[m],xxx.xx(m)		21.61
Tr2_Y	送波器 2(Tr2)の現場 LocalY 座標[m],xxx.xx(m)		-30.05
Tr2_Z	送波器 2(Tr2)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.57
Tr3_X	送波器 3(Tr3)の現場 LocalX 座標[m],xxx.xx(m)		20.33
Tr3_Y	送波器 3(Tr3)の現場 LocalY 座標[m],xxx.xx(m)		-28.52
Tr3_Z	送波器 3(Tr3)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.61
Tr4_X	送波器 4(Tr4)の現場 LocalX 座標[m],xxx.xx(m)		23.39
Tr4_Y	送波器 4(Tr4)の現場 LocalY 座標[m],xxx.xx(m)		-25.95
Tr4_Z	送波器 4(Tr4)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.25
BM_Pt	圧力計(ベンチマーク)で計測した水温[℃]　xx.xx(c)		20.00
BM_Pp	圧力計(ベンチマーク)の圧力[bar]　x.xxx(bar)		6.250
BM_Z	座標原点からの Z 位置[m],水面 0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.00
checksum	XOR チェックサム(Hex2 桁)(先頭の$含め、チェクの直前まで)		FF
(LF)	0x0A（'¥n'）		

$POS2,稼働送波器数,Lo_θ0,AcP_θ,BH_Pz,Tr1_X,Tr1_Y,Tr1_Z,Tr2_X,Tr2_Y,Tr2_Z,Tr3_X,Tr3_Y,Tr3_Z,Tr4_X,Tr4_Y,Tr4_Z,BM_Pt,BM_Pp,BM_Z,checksum(LF)

$POS2,5,100.00,114.3,5.00,999.90,999.90,5.21,21.61,-30.05,5.57,20.33,-28.52,5.61,23.39,-25.95,5.25,20.00,6.250,5.00,FF

表 4.48　「そこにイルカ」データフォーマット２

$ATT	固定のヘッダ文字列		data
稼働送波器数	0：不稼働(基本なし) 1：送波器 1-2 のみ稼働　2：送波器 2-3 のみ稼働 3：送波器 3-4 のみ稼働　4：送波器 1-4 のみ稼働 5：送波器 1-2-3-4 全稼働		5
方位計使用	使用 1、不使用 2		1
Nf_r	方位計ロール[度]水平0,右傾斜+180,左傾斜-180, xxx.xx(度)		1.0
Nf_p	方位計ピッチ[度]水平0,機首上げ+90,機首下げ-90, xxx.xx(度)		2.0
Nf_y	方位計ヨー[度]真北 0,CW+180,CCW-180,xxx.xx(度)		150.0
BH_Pt	圧力計(バックホウ)で計測した水温[℃]　xx.xx(c)		21.00
BH_Pz	圧力計(バックホウ)の水深[m],DL0m,下方向＋,xx.xx(m)		5.22
Air_Pt	圧力計(大気圧)で計測した気温[℃]　xx.xx(c)		23.00
Air_Pp	圧力計(大気圧)の圧力[bar]　x.xxx(bar)		1.000
checksum	XOR チェックサム(Hex2 桁)(先頭の$含め、チェクの直前まで)		FF
(LF)	0x0A（'¥n'）		

$ATT,稼働送波器数,方位計使用,Nf_r,Nf_p,Nf_y,BH_Pt,BH_Pz,Air_Pt,Air_Pp,checksum(LF)

$ATT,5,1,1.0,2.0,150.0,21.00,5.22,23.00,1.000,FF

4.2.5　通信システム配置

ICT 型水中バックホウは、動力源として水中モータを使用しており、そのモータに給電する必要があるため有索となる。そのため、水中バックホウに設置したセンサと支援船舶との通信は有線により行う。ただし、ICT 型水中バックホウに設置したセンサは多数であるが、それらと１対１で通信すると通信線が錯綜するため、水中バックホウ機体上で Ethernet に変換し、仮想 COM ポート等で通信している。

本項では、ICT 型水中バックホウと支援船舶との通信に使用している機器についてとりまとめるものとする。

(A) シリアルデバイスサーバー

表 4.49　シリアルデバイスサーバー仕様

名称・型番	シリアルデバイスサーバー　NPort 5430
メーカー	MOXA（台湾）
入力形式	RS232c／RS485／RS422
ポート数	1～4 ポート
電源	12V～49V
特徴	型番によって、ポート数や入力信号を指定可能

図 4.57　シリアルデバイスサーバー

(B) 産業用リモート I/O 通信カプラ

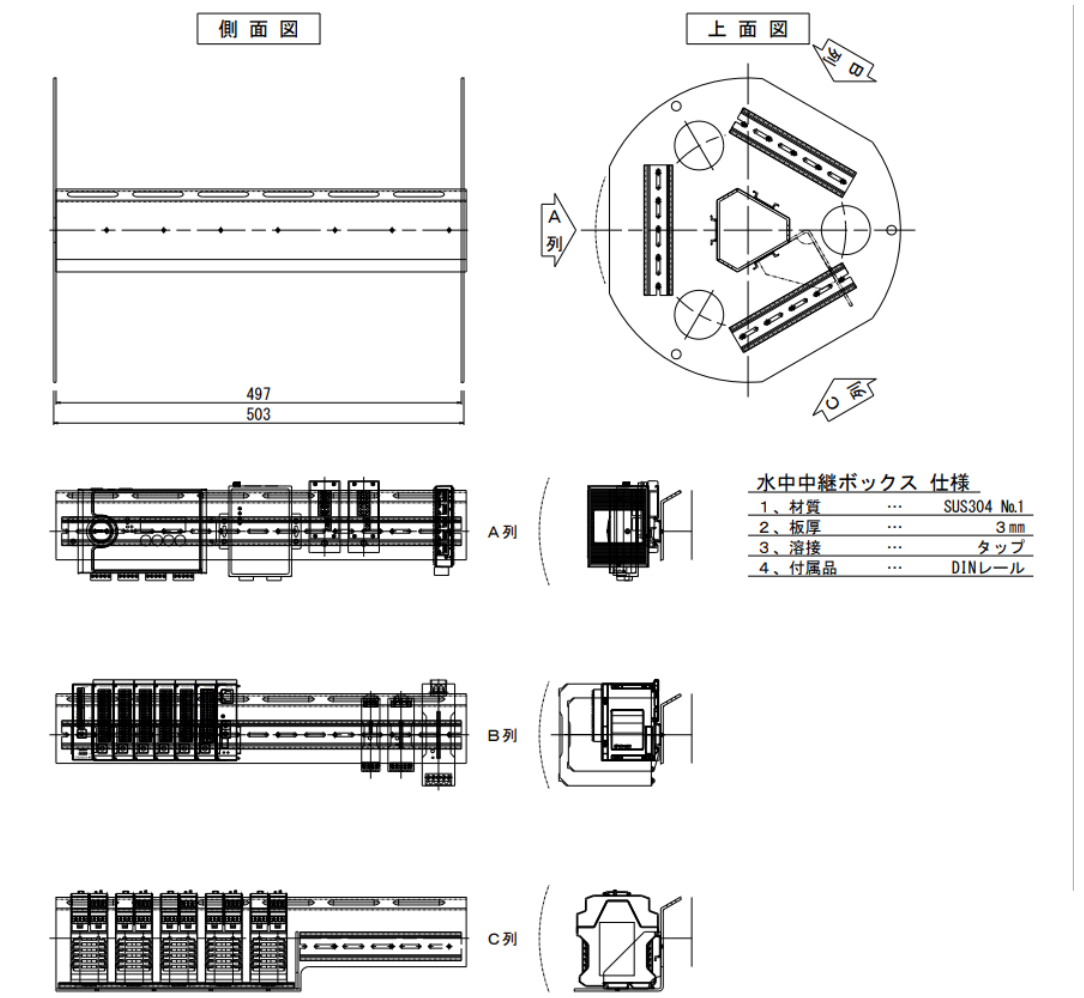
表 4.50　産業用リモート I/O 通信カプラ仕様

名称・型番	CPU-CA20(FIT)GY
メーカー	CONTEC（日本）
入力形式	DIO・Counter
ポート数	1～2ポート
電源	5 V
特徴	通信信号に合わせた機器をCPU-CA20に追加する。

図 4.58　産業用リモート I/O 通信カプラ

4.2.6　信号中継装置

前項 4.2.5 で示した通信機器や設置センサのアンプ等は、防水の信号中継装置に格納する。本項では ZX40 と TKM30 で使用した信号中継装置についてとりまとめるものとする。



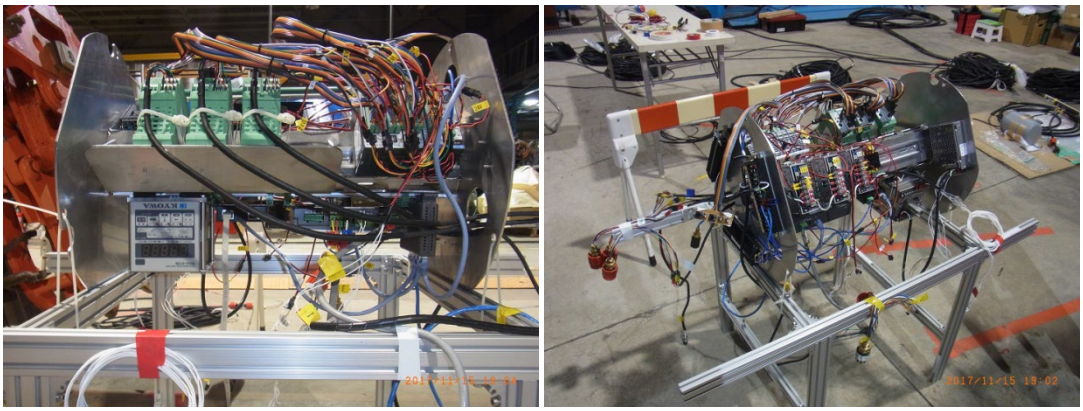


図 4.59　ZX40 用マシンガイダンス中継容器内の機器配置

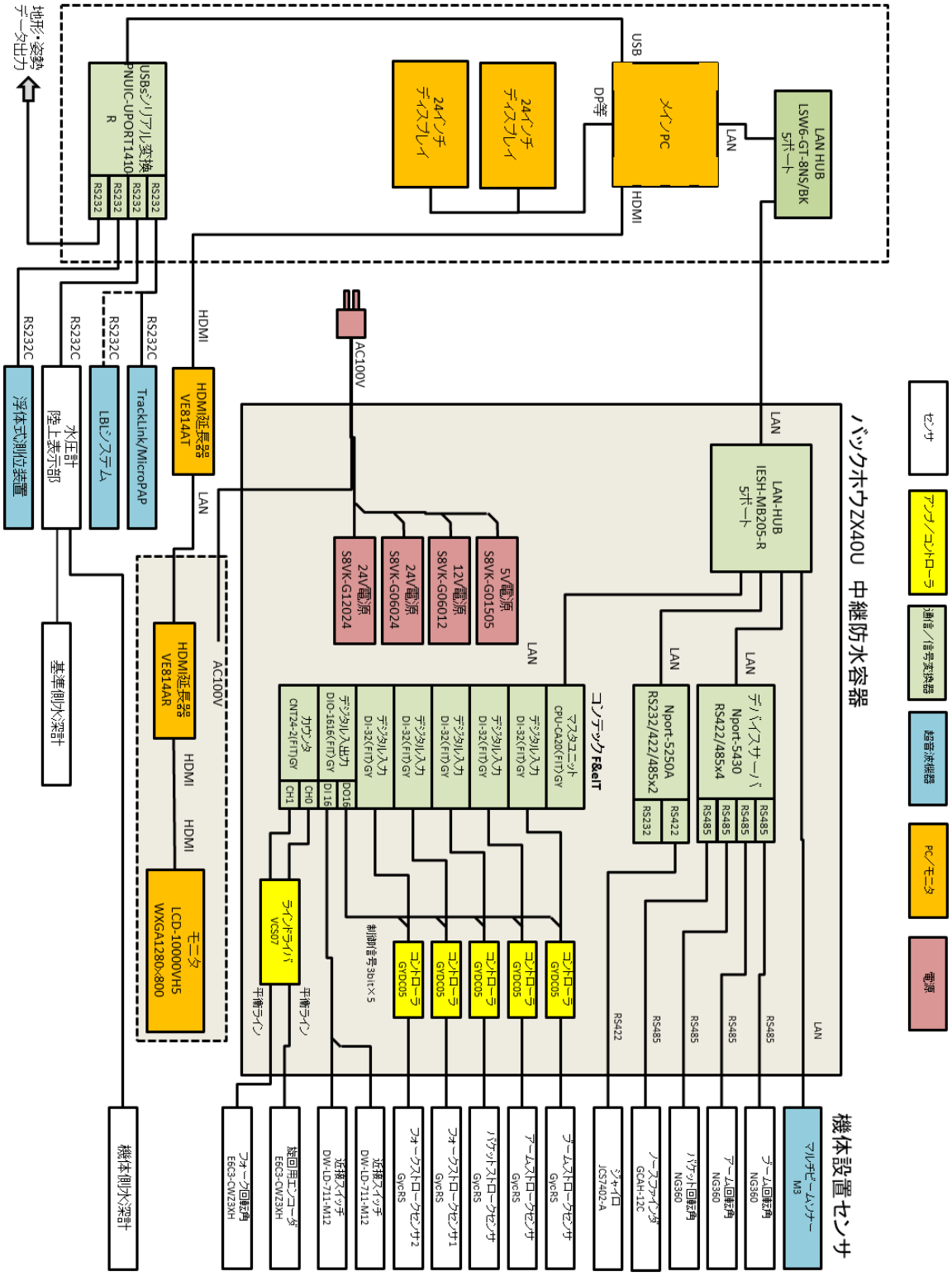


図 4.60　水中マシンガイダンスセンサ接続図

（付録）P.147

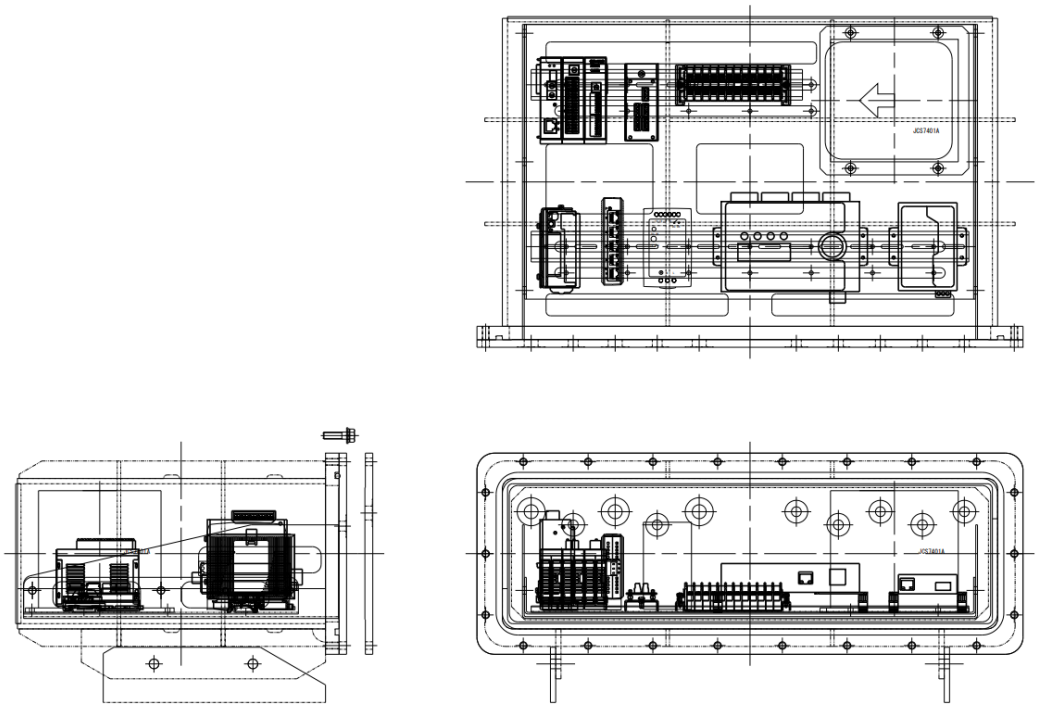


図 4.61　TKM30 用マシンガイダンス中継容器内の機器配置図面

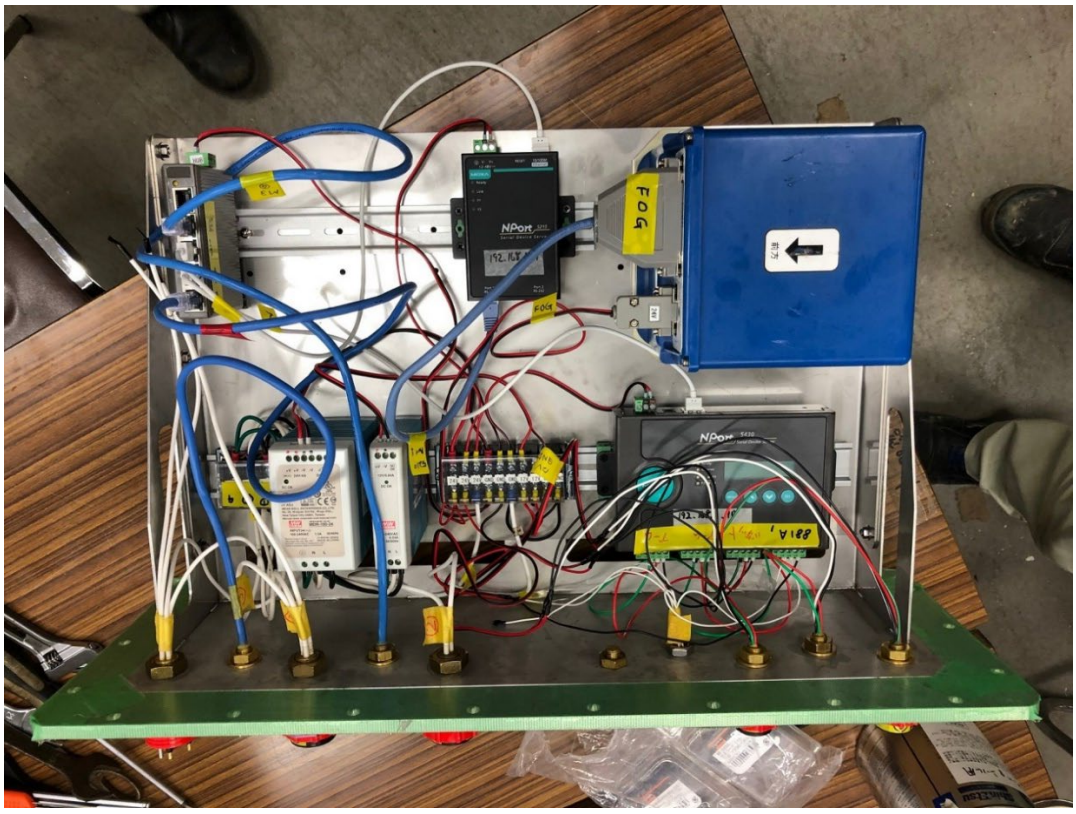


図 4.62　TKM30 用マシンガイダンス中継容器内部

（付録）P.148

4.2.7　遠隔操作に必要となる機材（電磁バルブ、PLC 等）

ICT 型水中バックホウを遠隔操作する場合、機体側で発生した油圧を各シリンダや油圧モータに供給するスプール弁を電気的に制御することが一般的である。この方式は陸上の遠隔操作建設機械と同様である。

本項では、ICT 型水中バックホウに搭載した電磁バルブ、および、制御機器についてとりまとめるものとする。なお、本項で示す機器は TKM200-9 号機を対象とした遠隔操作機器で使用したものである。TKM200-9 号機の油圧配管の概略図を**図 4.63** に示す。

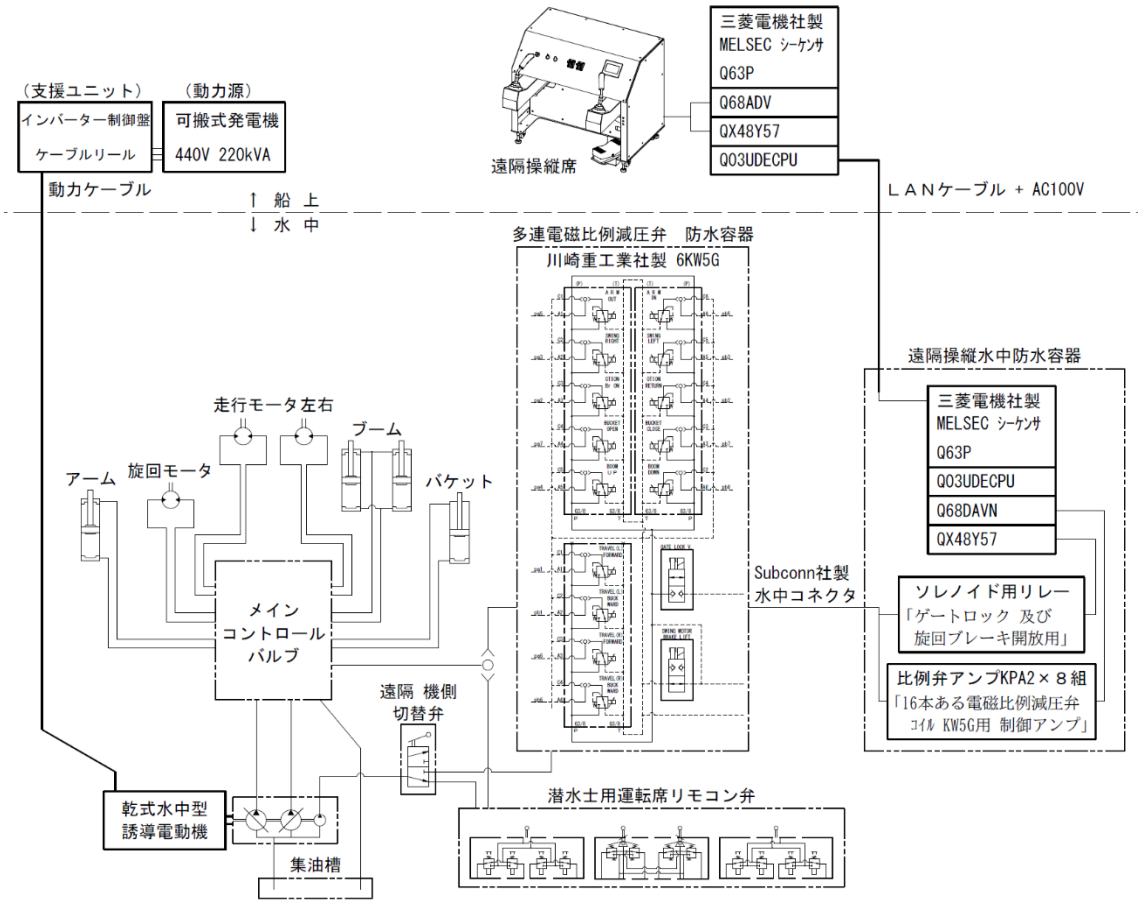


図 4.63　TKM200-9　油圧配管概略図

（A）電磁比例弁　（川崎重工社製　KW5G）

図 4.63 における「乾式水中型誘導電動機」により発生した回転力を油圧ポンプにより作動油圧を発生させている。一般的なバックホウでは、この油圧ポンプのうち低圧ポンプから出力されるパイロット油圧を運転席のレバーで開閉させ、その圧力をメイン油圧のスプール弁に入力することで油圧シリンダや走行モータの制御を行っている。

遠隔操作ではこのパイロット油圧を運転席レバーの代わりに電磁比例弁により電気的に

開閉している。電磁比例弁ユニットから出力されるパイロット圧は、各シリンダを駆動するためのメインコントロールバルブに接続される。**図 4.64** にスプール弁の概略図を示す。

また TKM200-9 号機ではパイロット圧は運転席レバーと電磁比例弁を排他的に切り替えることとしている。

電磁比例弁は電気信号により駆動されるため、防水容器内に格納している。**図 4.65** に防水容器のイメージ図を、**図 4.66** に改造時の写真を示す。

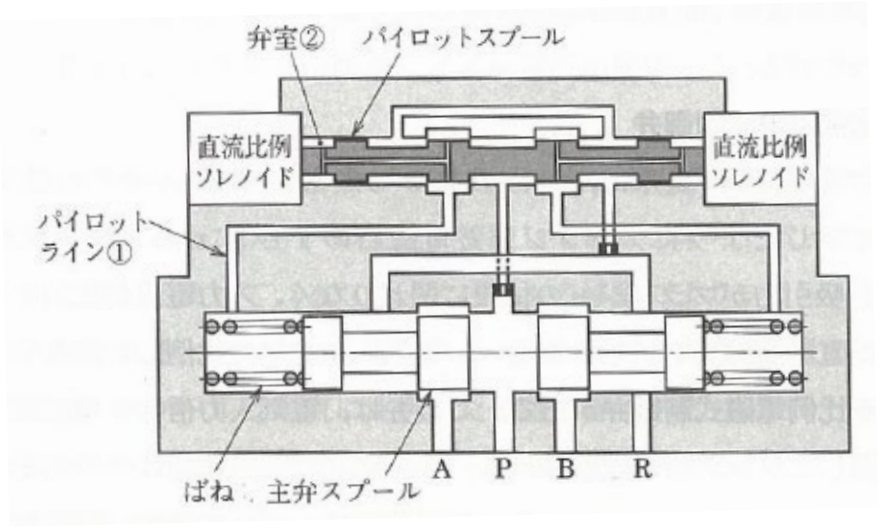


図 4.64　電磁スプール弁の概略図

※小波，西海著，「油圧制御システム」，pp. 150, 東京電気大学出版局（1999 年）より引用

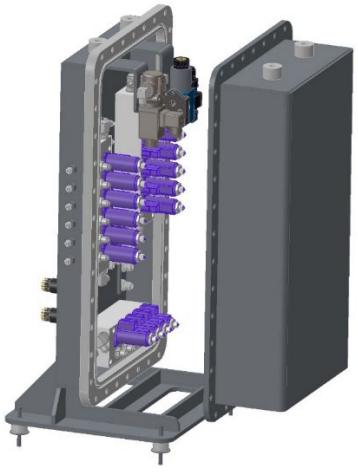


図 4.65　電磁比例弁防水容器

図 4.66　TKM200-9 改造時の写真

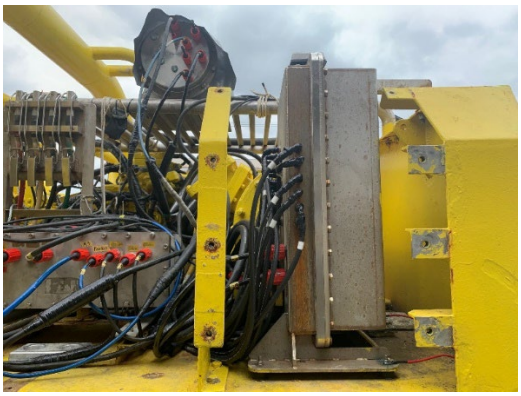


図 4.67　機体搭載状況

(B) PLC (Programmable Logic Controller) (三菱電機社製 MELSEC シーケンサ　Q63P)

船上操作卓からの信号を水中バックホウに通信するための機器として、PLC (Programmable Logic Controller) を使用した。特に安全性を重視する必要があるため、工場等で使用され実績と信頼性を有する産業用を選択している。**図 4.68** に防水容器内の PLC 設置状況を示す。

船上の遠隔操作卓（**図 4.69**）のレバーは、ポテンショメータ抵抗による電圧変化を出力しており、その電圧値を PLC の通信機能により水中バックホウ側に送信するものである。

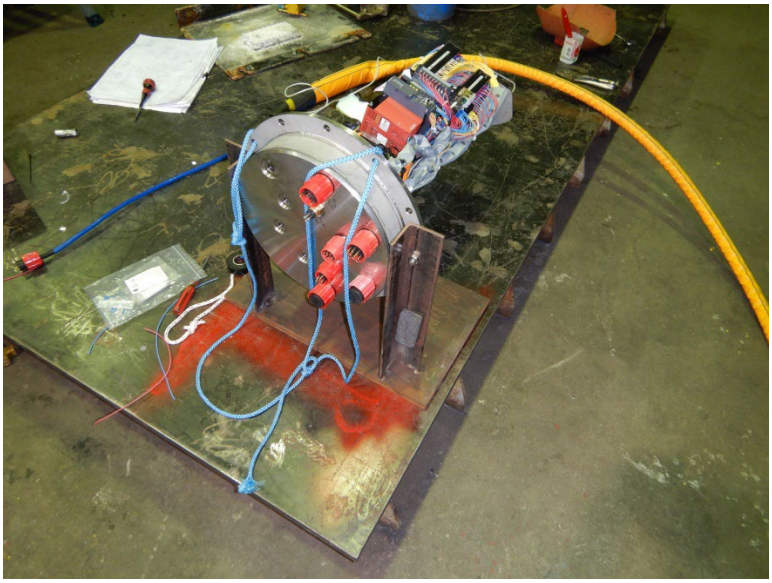


図 4.68　防水容器内の PLC 設置状況

図 4.69　遠隔操作卓

一般的な電磁比例弁では流量を制御する場合、電流値に比例してバルブ（弁）の開き具合（流量）を制御している。そのため前述の PLC で受け取った電圧値を電流値に変換させる必要がある。この電磁比例弁用アンプは、制御装置からの指令信号（電圧）に応じて、電磁比例弁のソレノイドに制御電流を供給するものである。またゲイン調整や不感帯の設定も単独で行うことが可能であるほか、開閉時の立ち上がり立ち下りを独立して調整することでショックレス動作を可能としている。この電磁比例弁アンプも**図 4.68** に示す防水容器内に組みこまれている。

図 4.70　電磁比例アンプ

（付録）P.152

4.3　水中マシンガイダンスシステムの操作マニュアル

ICT 型水中バックホウに搭載される様々なセンサ等の情報や、設計図等の情報を CG 化し、視覚的に表示する水中版マシンガイダンスは、現状では市販されたものは存在せず、4.2.1 に示す各水中バックホウを対象として研究開発したもののみである。

ただし水中バックホウは機体サイズ等によって関節の軸間距離や軸が成す角度が異なるほか、また取り付けスペースの問題から傾斜センサや方位センサ等を設置する位置を変更する場合があった。このため、機体寸法やセンサオフセット値等を機体ごとに設定する必要がある。

また、センサによっては時間に応じて誤差が蓄積するものや、初期設定が必要なものも使用しているため、実験中にそれらセンサへの指令値などを調整する必要もあった。

本節では、民間事業者の現地適用、技術開発に資することを目的として、港湾空港技術研究所が開発した水中版マシンガイダンスソフトウェアの機能と操作方法を記載し、設定する項目やセンサの選択、オフセット値等の参考資料とする。

4.3.1　水中マシンガイダンスシステムの基本事項

研究開発及び試験的な利用のため、様々なセンサや機器を管理する必要がある。そのため、各機器を動作するためのドライバ等の開発環境が潤沢な Microsoft 社 Windows を OS として使用している。

また開発環境として、これもドライバ等が多く用意されている Microsoft Visual Studio を使用している。**表 4.51** に使用した PC の仕様を示す。**図 4.71** に、陸上システムの接続環境を示す。

機体が異なる場合、軸間距離等のディメンションが変更となるほか、搭載するセンサが異なる場合がある。水中マシンガイダンスでは、それらの機体形状を変数として設定することで、今後様々な機体に対応するための冗長性を持たせている。**表 4.52** と**表 4.53** に水中マシンガイダンスソフトで管理設定可能な項目を示す。

表 4.51　マシンガイダンス PC スペック（例）

項目	名称	注釈
ＯＳ	Microsoft　Windows10	
CPU	Intel Core i7-11700	
GPU	GeForce RTX 3070 Ti	
メモリ	16GB	
SSD	NVMe-1TB	
モニタ出力	DisplayPort	デイジーチェーンで複数モニタに対応
	HDMI（ｘ3）	運転席モニタにHDMIエクステンダで延長
外部出力	USB3.0×3	RS232c変換／入出力
	USB2.0× 2	マウス/キーボード
	有線LAN x 1	
開発環境	Microsoft　VisualStudio	
導入ソフトウェア	KongsbergM3Viewer	M3ソナーを動かす
	Contec設定ソフト	使用している通信機器の設定
	Moxa設定ソフト	使用している通信機器の設定
	ターミナルソフト	シリアルデータ等のチェック用

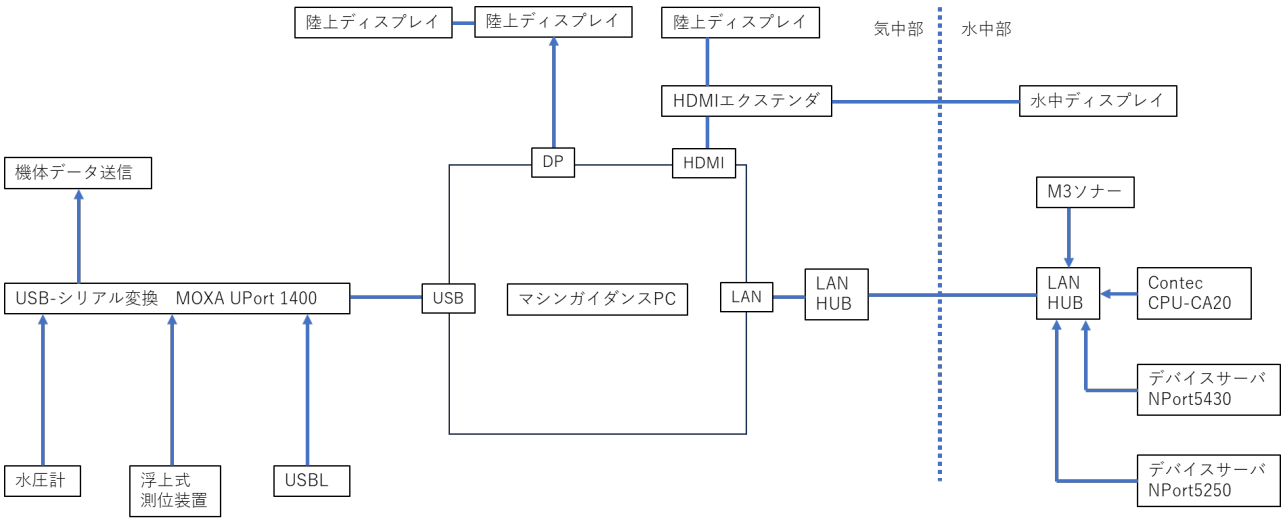


図 4.71　マシンガイダンス PC の接続図

表 4.52　センサ選択設定

項目	選択センサ
機体位置XY	浮上式測位/μPAP/Evologics/TrackLink/LBL
機体位置Z	BWL-20MET/QT-100
機体方位	FOG/Enc/HMR/BNO-055/GCAH12
機体傾斜	FOG/HMR/BNO-055
ブーム角度	Gyc/NG360
アーム角度	Gyc/NG360
バケット角度	Gyc/NG360/MTLT110
地形計測	M3/881A
アタッチメント変更	バケット/チルトフォーク/叩き均し機

表 4.53　ディメンション設定項目

ディメンション項目	設定項目
機体	原点-クローラ上部/ブーム軸座標/ブームシリンダ軸
ブーム	軸間距離/ブームシリンダ軸角度/アームシリンダ軸角度
アーム	軸間距離/アームシリンダ軸角度/バケットシリンダ軸角度/Iリンク軸
バケット	Iリンク長/バケットリンク長/軸間距離/刃先延長
チルトフォーク	軸間距離/チルト軸座標/フォーク長
均し機	軸間距離/鉛直オフセット角度/転圧面/転圧板距離

水中マシンガイダンスで表示する地形や構造物の 3D モデルは、現状では 2D-CAD データや紙の印刷図面を参考に 3D-CAD を用いて手作業で作成している。マウンドやケーソン形状は、おおむね断面形状をケーソンの延長方向に伸ばした形状であるため、長手方向をマシンガイダンス座標系のＸ軸となるように回転させている。これはバックホウ操作者が情報として必要なのは法線方向や既設構造物との位置関係であり、それらを基準方位としたローカル座標系のほうが操作しやすいと考えたからである。そのためマシンガイダンス座標系の「X 軸 Y 軸」と「東西南北」は一致していない。

製作した 3D-CAD データの範囲のうち、任意の座標を「マシンガイダンス原点」と定める。また工事用基準面（W.D.L）の高さをマシンガイダンスでは「ゼロ」として扱う。

できあがったマウンドや構造物の 3D モデルを 3D-CAD で OBJ ファイル形式に変換してそれぞれ出力する。

マシンガイダンスで使用する 3D ファイルは「OBJ フォーマット」の 3D モデルを使用しマウンドの計画面を表示している。OBJ 型のファイルは 3D モデルを面として記述するサーフェース型のファイルであり、

・フォーマットが公開されている。
・色情報を付加できる。
・多くの CAD がサポートしている。

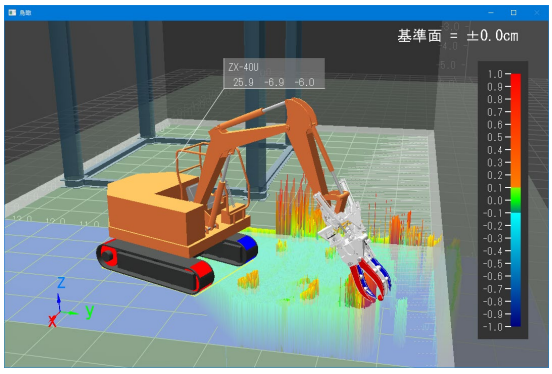
という理由からマシンガイダンスで採用したものである。

OBJ フォーマット以外の実績としてマシンガイダンスの派生ソフトであり、土木分野での標準になりつつある LandXML（※１）から地形情報のみ読み込み表示することも試験的に実証した。ただし LandXML で構造物の表現ができるかについてはまだ実証していない。

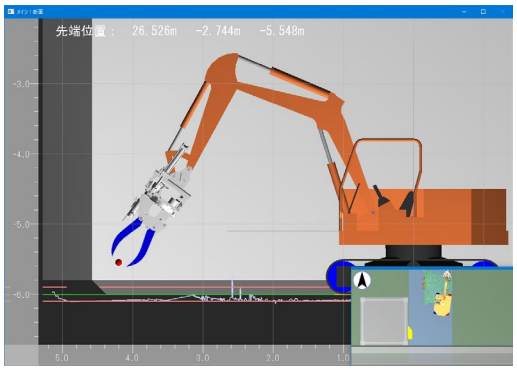
（※１） https://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/training/pdf/2/2.2.4.pdf(参照 2024-07-29)

4.3.1.1 マシンガイダンスプログラムの使用方法

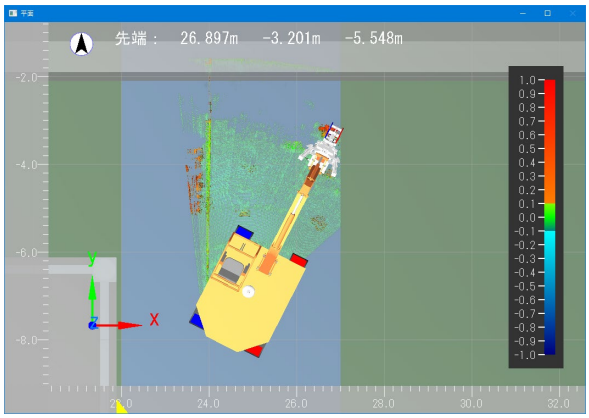
プログラム起動後、「(a) 鳥観図」「(b) 断面図」「(c) 平面図」の 3 つの描画ウィンドウと各種設定を行う「操作用ダイアログ」が表示される。



(a)鳥瞰図



(b)断面図



(c)上面図

(d)操作用画面

図 4.72　情報提示インタフェースソフトウェア起動時の画面

4.3.1.2　接続

各センサと接続が成功すると位置姿勢等のデータ取得が始まる。接続が確立できなかった場合や計測対象が見当たらないなどエラーが発生した場合は、警告が表示される。

4.3.1.3　地形計測

(A) 計測開始

地形計測は超音波マルチビームソナーの M3 の専用ソフトウェアから UDP 経由で信号出力を開始する（**図 4.73**)。

計測データを受信すると精細地形（1cm ピッチ）の高さが更新される。

M3 はファンビームとなるので計測する範囲は“前方角”、“後方角”で設定する。

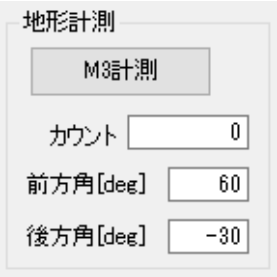


図 4.73　入出力のチェック

(B) 計測終了

M3 からの計測データの受信を終了すると標準計測地形（10 ㎝ピッチ）にデータがダウンコンバートされる。

必要であればこの時点で、地形データが保存される。

4.3.1.4　水中作業機械情報管理用システムへのデータ送信

本ソフトウェアは水中バックホウの機体姿勢情報と地形情報を RS232C 出力で水中作業機械情報管理用システムへ送信することができる。

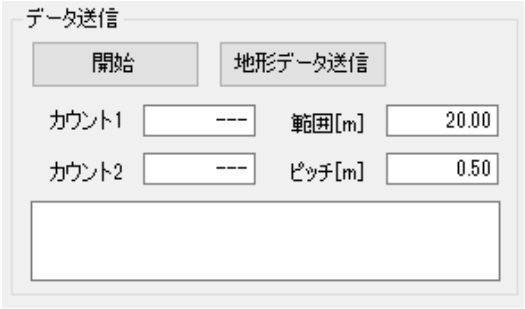


図 4.74　データ送信

4.3.1.5　終了

地形計測後に保存を行っていな場合はプログラム終了前に地形データの保存が行われる。

4.3.2　マシンガイダンスソフトウェアの各部設定

4.3.2.1　本体位置姿勢

ICT 型水中バックホウに設置したセンサは機体ごとに異なる場合があるため、位置・姿勢取得を行うセンサは設定画面で選択可能としている。例えば京浜港ドックでの実験では「浮上式音響測位装置」からの位置データを使用したが、他の測位装置である「TrackLink」「μPAP」「Evologics」及び「あおみ建設 LBL」のデータを使用することができる。

同様に、水深については、共和電業社製水深計「BWL-20MET」やクリオテクノス社製「QT-100-30」を選択可能である。

方位は「旋回エンコーダ」「FOG」「HMR3000」を選択可能である。

機体傾斜については「FOG」「HMR3000」「BNO-055」を選択可能である。

手入力を選択するとエディットボックスへの数値入力かスライダコントロールによって値を直接指定することができる。(**図 4.75**)。

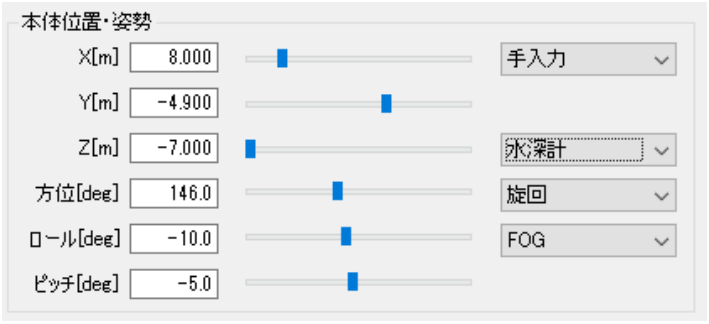


図 4.75　位置姿勢取得センサの選択

4.3.2.2　ブーム・アーム・バケット

ブーム・アーム・バケットの角度取得に使用するセンサを選択可能である（**図 4.76**）。ここで表示される値はオフセット値も含めたセンサ値であり、ブーム・アーム・バケットの角度では無い。

“角度リミット”をチェックするとセンサの値によらずブーム・アーム・バケットの姿勢が可動範囲外に出ないようにリミットが作用する。

“傾斜計角度補正”ボタンを押すと、ストローク計で計測した各部の角度を参照値として、傾斜計のオフセット値を自動で補正する。

図 4.76　ブーム・アーム・バケット姿勢取得センサの選択

4.3.2.3　旋回エンコーダ

旋回エンコーダの旋回角度を表示する。近接スイッチが反応するとグレーの矩形が緑色に変化する（**図 4.77**）。

旋回エンコーダはインクリメンタル型であるため、初期位置の設定が必要となる。水中バックホウを旋回させて、近接スイッチが反応すると、設定した近接スイッチの設置角度にエ

ンコーダの角度値が校正される。

4.3.2.4　フォーク

フォークのチルト、旋回、開閉の角度を表示する（**図 4.77**）。チルト・開閉はストローク計、旋回はロータリエンコーダを使用する。フォークの旋回も本体の旋回と同様にフォークに設置した近接スイッチを使用して角度の構成を行う。

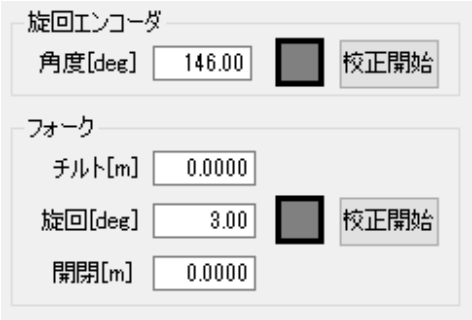


図 4.77 旋回エンコーダ・フォーク

4.3.2.5　水深計

差圧水深計の計測値を表示する（**図 4.78**）。“機体側”、“岸壁側”はそれぞれのセンサの計測値となり、これらの値の差に岸壁側水深計の設置位置を合わせて機体側水深計の水深を“DWL 基準”に表示する。機体の位置基準は本体底面であるため機体の Z 位置はこの DWL 基準水深から機体側水深計の設置位置と機体姿勢で計算した値となる。

図 4.78 水深計

4.3.2.6　姿勢設定

図 4.79 に姿勢設定を示す。

図 4.79 姿勢設定

(A) 磁北偏移補正

本プログラムの座標系は Y 軸＋を法線直角方向としている。磁北と Y 軸に偏移がある場合は、偏移角度値を入力することで偏移補正する。

(B) 船首偏移補正

台船等に固定して使用する位置出し装置で、北方向（基準方向）と本プログラムの座標系に偏移がある場合は、偏移角度を入力することで偏移を補正する。

(C) FOG リセット

FOG の方位は相対値であるため、初期値を調整する必要がある。水中バックホウの現在の方位角度を入力し、FOG の方位角度を入力値にリセットする。

(D) 磁気方位計と FOG の同期

FOG の方位を磁気方位計の値に同期させる。

(E) シュー基準傾斜

水中バックホウのロール・ピッチ傾斜をシュー（クローラ）によって作られる底面四角形の辺を軸として計測する。このとき水深位置（Z 位置）は無視される。

4.3.2.7　姿勢センサ情報表示

ドロップダウンリストで選択されている姿勢センサのデータが表示される（**図 4.80**）。“カウント”は通信回数を表し、データの更新状況のチェックに使用する。

図 4.80 姿勢センサ情報表示

4.3.2.8　位置出しセンサ情報表示

ドロップダウンリストで選択されている位置出しセンサのデータが表示される（**図 4.81**）。ステータスは通信状況を表示する。

図 4.81 姿勢センサ情報表示

4.3.2.9　音響計測地形表示設定

音響計測された高精細地形（1 cmピッチ）と標準地形（10 cmピッチ）の表示を切り替える（**図 4.82**）。点描にチェックを入れると地形描画が点描になる。点のサイズは 1～10 ポイントまで変更できる。

図 4.82 音響計測地形表示設定

4.3.2.10　カメラ操作

カメラ操作部分を**図 4.83** に示す。

図 4.83 カメラ操作

(A) フォーカス移動

“フォーカス移動”ボタンを押すと、鳥瞰と平面図のカメラフォーカスが水中バックホウに移動する。

(B) 操縦席モニタ画面

操縦席に設置されているモニタ画面に表示する画像を選択する。

4.3.2.11　基準面表示の切り替え

“基準面表示”で鳥観図・平面図に表示されている基準地形（計画図面）の表示高さを切り替えることができる（**図 4.84**）。

図 4.84 基準面表示切り替え

4.3.3　メニューの操作

4.3.3.1　ファイル（図 4.85）

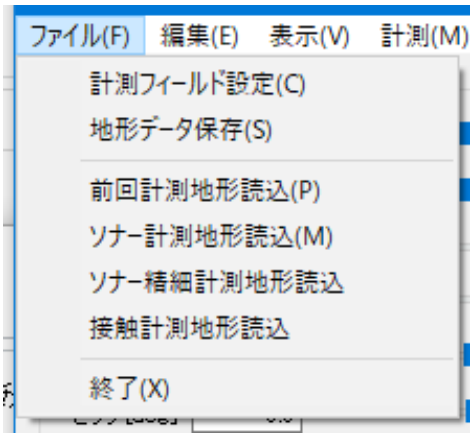


図 4.85 メニュー：ファイル

(A) 計測フィールド設定

“計画マウンド”で使用する計画マウンドの図面データを設定する。（図 4.86）。

“構造物”の図面データを設定する。

計測地形のサイズやピッチ、オフセット位置などの値を入力する。

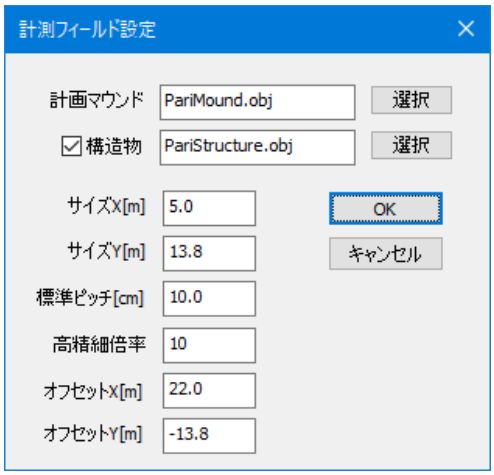


図 4.86 計測フィールド設定

(B) 地形データ保存

計測した地形データを保存する。

(C) 前回計測地形読込

前回計測した地形データを読み込む。ただし地形のサイズやピッチなどが現在の設定と同じ必要がある。

(D) ソナー計測地形読込

ソナー計測地形データファイルを選択し読み込む。ただし地形のサイズやピッチなどが現在の設定と同じ必要がある。

(E) ソナー精細計測地形読込

ソナー精細計測地形データファイルを選択し読み込む。ただし地形のサイズやピッチなどが現在の設定と同じ必要がある。

(F) 接触地形読込

接触計測地形データファイルを選択し読み込む。ただし地形のサイズやピッチなどが現在の設定と同じ必要がある。

4.3.3.2　編集（**図 4.87**）

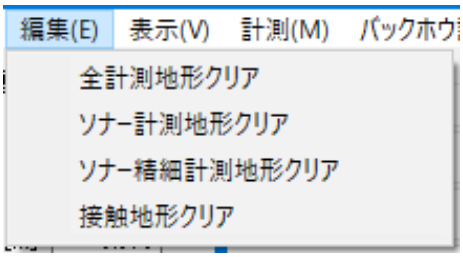


図 4.87 メニュー：編集

(A) 全計測地形クリア
全計測地形をクリアする。
(B) ソナー計測地形クリア
ソナー計測地形（標準ピッチ）をクリアする。
(C) ソナー精細計測地形クリア
ソナー精細計測地形をクリアする。
(D) 接触地形クリア
接触計測地形をクリアする。

4.3.3.3　表示（**図 4.88**）

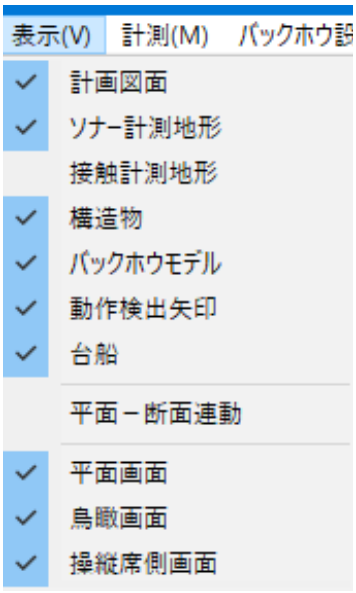


図 4.88 メニュー：表示

(A) 表示するオブジェクトの選択

画面内に表示したいものをチェックする。

(B) 平面-断面連動

“平面-断面連動”にチェックすると、断面図と平面図の方向とカメラ焦点位置・ズームが連動するようになる。各画面位置やサイズなどは手動で調整する必要がある。

(C) 表示する画面の選択

平面・鳥瞰・操縦席側画面（ウィンドウ）の表示を選択する。

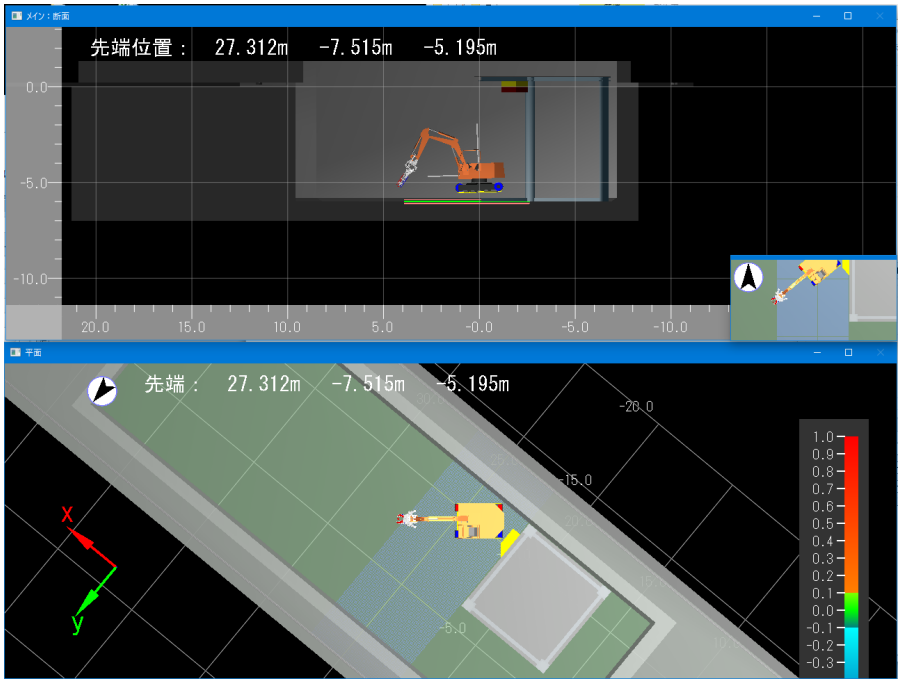


図 4.89 断面-平面連動

4.3.3.4 計測（**図 4.90**）

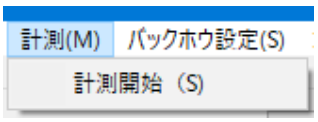


図 4.90 メニュー：計測

“計測開始”をクリックするとプログラム内で設定した機体位置やセンサ値等の記録をCSV ファイル形式で行う。

4.3.3.5　バックホウ設定（**図 4.91**）

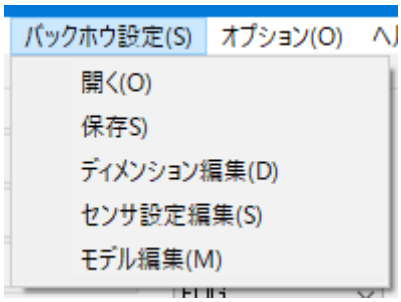


図 4.91 メニュー：バックホウ設定

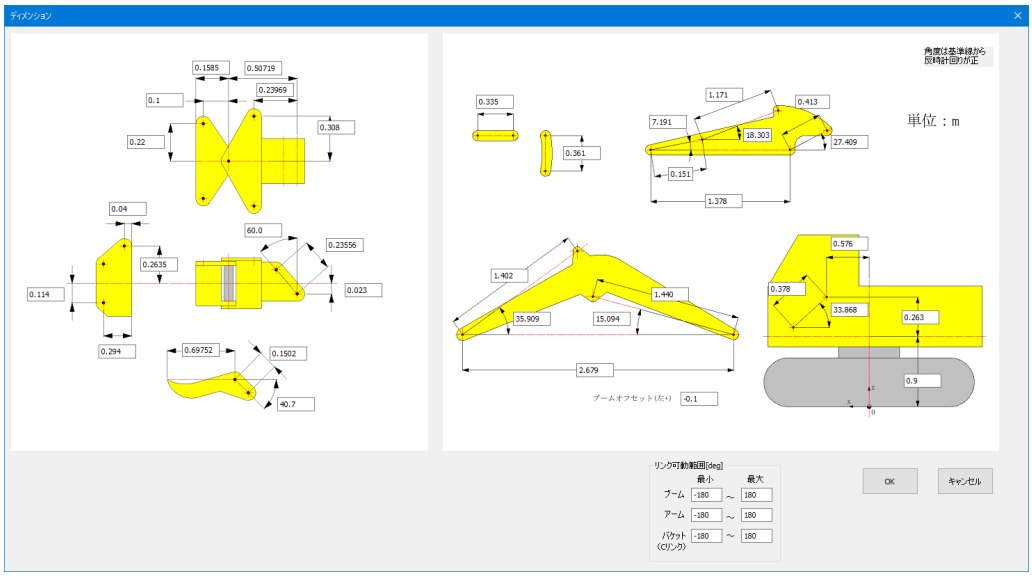
(A) 設定ファイル

“開く”をクリックすると水中バックホウの設定を読み込む。

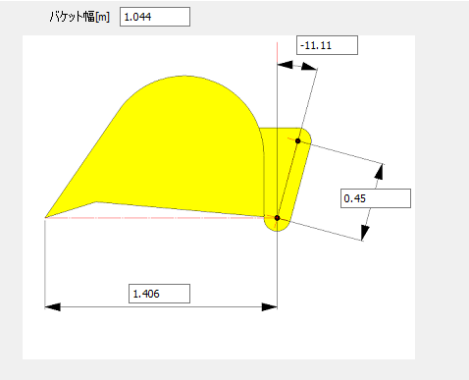
“保存”をクリックすることで現在のバックホウの設定を保存する。

(B) ディメンション編集

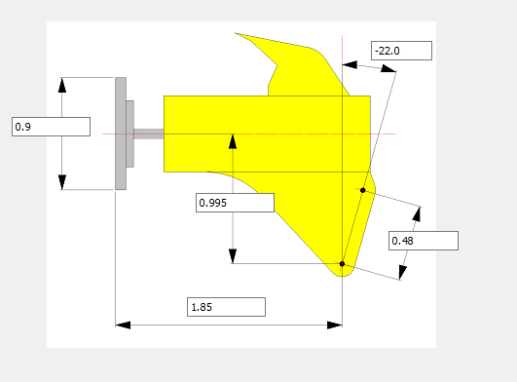
“ディメンション編集”をクリックすることでディメンション設定ダイアログ(**図 4.92**)が表示されるので、所用の値を入力設定する。またブーム等の可動範囲も設定する。



（a）　ディメンション：フォーク



（b）バケット



（c）ブレーカ（均し機）

図 4.92 ディメンション設定

(C) センサ設定編集

“センサ設定編集”をクリックするとセンサ設定ダイアログが立ち上がる（**図 4.93**）。使用するセンサにチェックを入れて各センサの設定値を入力する。接続中には編集はできない。

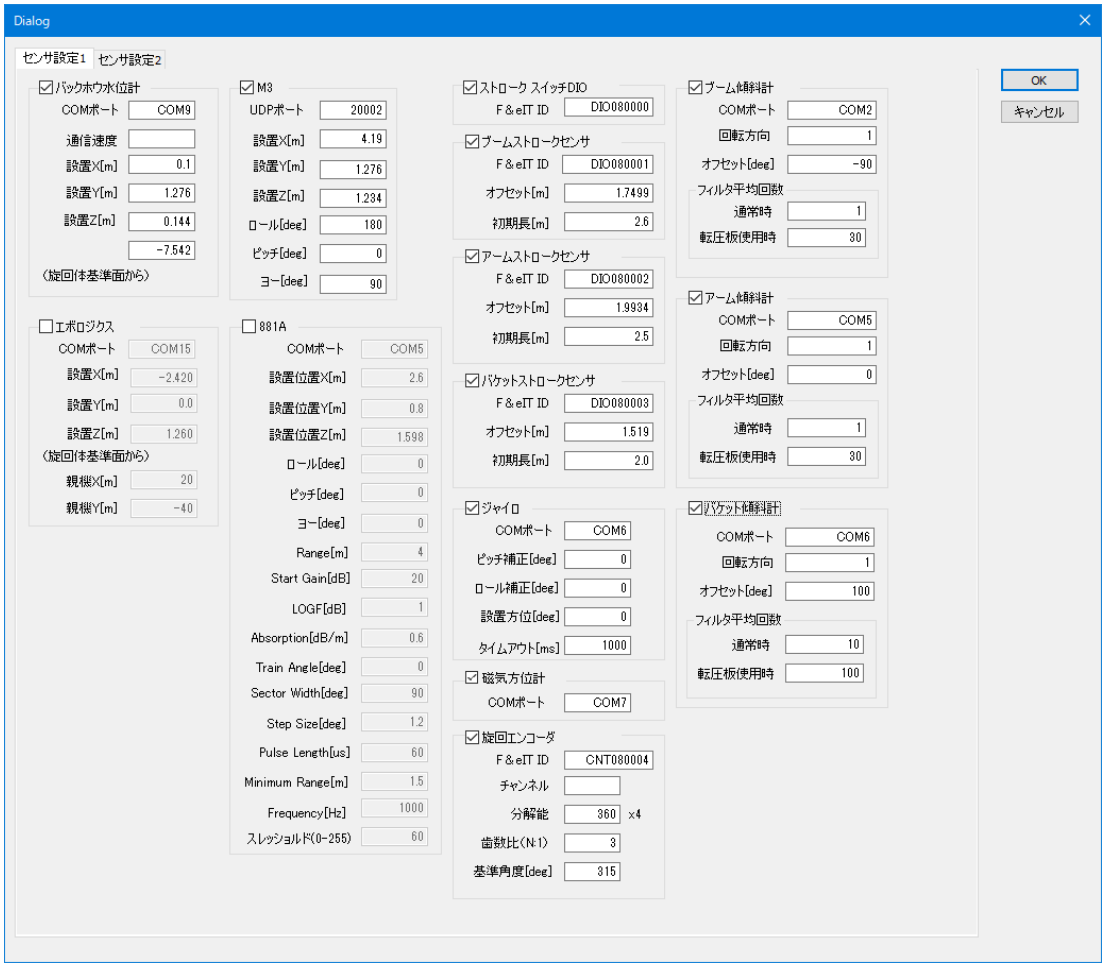


図 4.93 センサ設定

(D) モデル設定編集

“モデル設定編集”をクリックするとモデル設定ダイアログが起動される。水中バックホウの CG モデルのファイルを設定する。

また管理番号と名称もここで設定できる。

4.3.3.6　オプション（図 4.95）

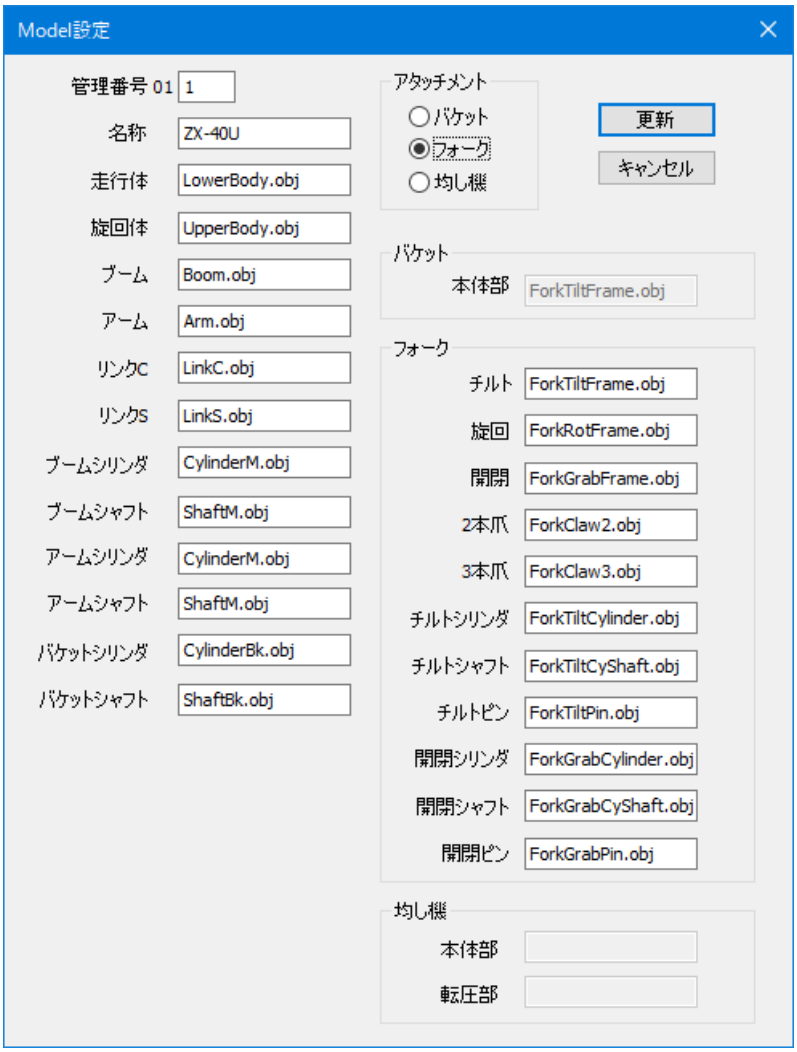


図 4.94 モデル設定

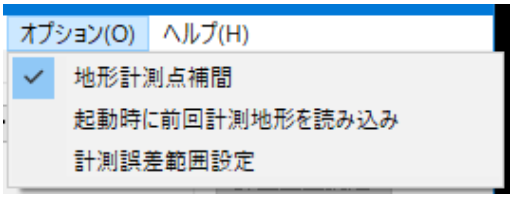


図 4.95 メニュー：オプション

(A) 地形計測点補完

接触地形計測において計測地形高さの計測点間の補完を行う。

(B) 起動時に前回地形を読み込み

本ソフトウェア起動時に前回の計測地形を読み込むか選択する。

（付録）P.172

(C) 計測誤差範囲設定（**図 4.96**）

“計測誤差範囲設定”をクリックすると計測誤差範囲設定ダイアログが起動する。

“許容誤差”値は断面図の許容誤差範囲の描画に影響する。

“最大誤差”値は平面図・鳥観図の地形高さによる色分けに影響する。

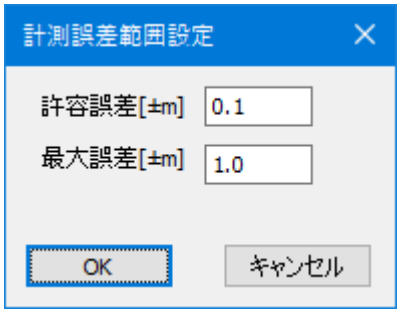


図 4.96 計測許容誤差範囲設定

4.3.4　送信データフォーマット

4.3.4.1　機体データ・地形データ出力

本ソフトウェアはRS232Cから水中作業機械情報管理用システムへ機体データおよび地形データを出力する。また位置出し装置用に別系統で機体データを出力する。**表 4.54** に通信設定を示す。

表 4.54 通信設定

	項目	仕様
1	ビットレート	115200 bps
2	データビット	8 bit
3	パリティ	なし
4	ストップビット	1 bit
5	フロー制御	なし

(A) 機体データフォーマット

例：ID011, 23:45:56, 23.4, 56.7, 89.0, 310.0, 50.0, 5.2, -2.3, 2, 20.2, 30.3, 180.0, -7.89, 23.4, -34.5, dddmm.mmmm, dddmm.mmmm, 12.3, 99 [CR+LF]

項番	項目	値/形式　（単位）	備考
1	管理番号	ID011	範囲 ID011～ID015
2	内部時刻（JST）	hh:mm:ss	バックホウ内部 PC の時刻
3	ブーム角度	23.4（deg）	上部フレームを基準 0 度として、上側が正
4	アーム角度	56.7（deg）	ブームを基準 0 度として、ダンプ側が正
5	バケット角度	89.0（deg）	アームを基準 0 度として、ダンプ側が正
6	旋回体方位	310.0（deg）	地磁気方位、上から見て時計回りを正（範囲：0～359.9）
7	クローラ方位	50.0（deg）	上部旋回体とクローラフレームの角度差、上部旋回体正面を 0 度として、時計回りを正（範囲：0～359.9）
8	機体ピッチ傾斜	5.2（deg）	上部旋回体のピッチ角、水平を 0 度として、フロントアップが正
9	機体ロール傾斜	-2.3（deg）	上部旋回体のロール角、水平を 0 度として、後方から見て時計回りが正
10	アタッチメント	2	0：バケット/1：油圧ブレーカ/2：フォークグラプ
11	フォーク爪 A 開度	20.2	全閉を 0 度
12	フォーク爪 B 開度	30.3	全閉を 0 度
13	フォーク回転角	180.0（deg）	左回転リミット位置を 0 度（範囲：0～359.9）
14	機体原点水深	-7.89（m）	工事基準面 D.W.L を 0
15	バックホウ座標 X	23.4（m）	支援台船前方を+Y、支援台船後方から見て右を＋X とした台船ローカル座標系（範囲-99.9～99.9）
16	バックホウ座標 Y	-34.5	
17	支援台船の座標（緯度）	dddmm.mmmm	
18	支援台船の座標（経度）	dddmm.mmmm	
19	支援台船の方位	12.3（deg）	上から見て時計回りを正（範囲：0.0～359.9）
20	地形データ送信フラグ	99	通常時は「00」、地形データ送信３秒前から「99」を送信
21	電文終端文字	0x0D、0x0A	前データとの間にカンマなし

上記データをカンマ(0x2C)区切りとした形式。

(B) 地形出力フォーマット

地形データの送信形式

項目	仕様
データ範囲	水中バックホウを中心に　20m×20m の範囲 （北を＋Y 軸、東を＋X 軸とした直交座標系）
ピッチ	50cm
データ送信順序	北西端から北東端に順番に高さデータを送信し、北東端まで送ったら北端から 50cm 南の列のように繰り返す

データ送信範囲は水中バックホウを中心としているため、位置や計測範囲によっては、データ送信範囲が計測範囲を外れてしまう場合がある（**図 4.97**）。計測範囲外のデータは-99.999m（送信時は-99999）として送信している。

データフォーマットは以下のとおり。

例：STARTID011, 23:45:56, -12345, -12345, -12345, ・・・ -12345,END[CR+LF]

項番	項目	値/形式　（単位）	備考
1	管理番号	STARTID011	バックホウの管理番号(範囲 ID011～ID015)
2	内部時刻（JST）	hh:mm:ss	バックホウ内部 PC の時刻
3	地形データ	-12345（mm）	M3 で計測した地形の高さ 計測範囲外は-9999 の値とする
	・		上記データを 1681 点分繰り返し （41×41 ピッチ分）
1683	データ終了文字列	END	固定値
1684	電文終端文字	0x0D、0x0A	前データとの間にカンマなし

上記データをカンマ(0x2C)区切りとした形式。

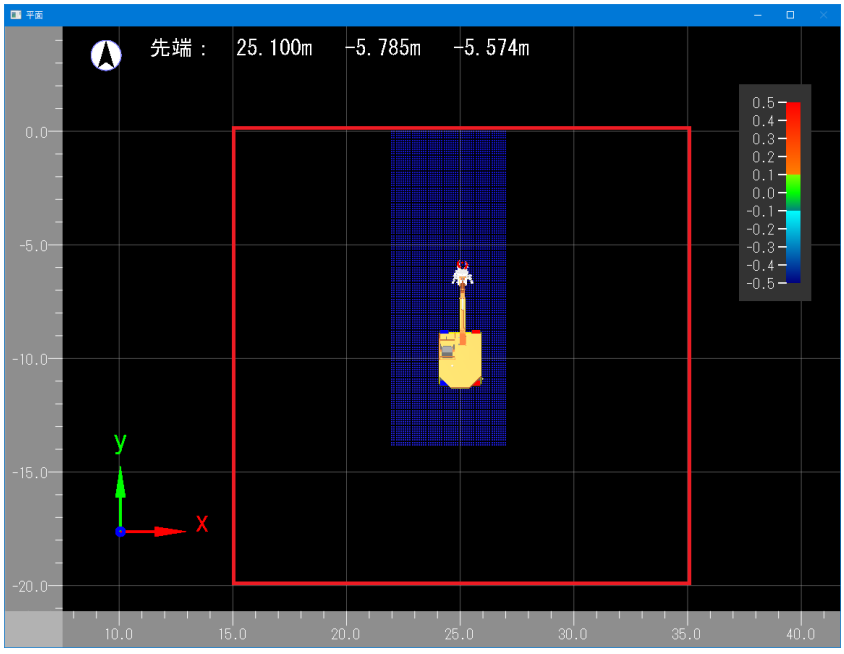


図 4.97 地形データ送信範囲（赤枠）と計測範囲（青領域）

4.3.4.2　遠隔操作 PC への姿勢データ送信

本ソフトウェアは遠隔操作 PC へ水中バックホウの姿勢データを TCP/IP によって本ソフトウェアがサーバーとなり遠隔操作 PC をクライアントとして送信する。使用しているポートは 10002（変更可能）である。

データはカンマ区切りのテキスト文字データでフォーマットは以下のとおり。

例：$-42.802219,-42.679218,104.140846,102.890846,-9.871522,-9.315522,7.043321,25.000000,16.264791*19

項番	項目	値/形式　（単位）	備考
1	先頭文字	$	
2	ブーム角度１	-42.802219(deg)	ストローク計によるブーム角度
3		-42.679218(deg)	傾斜計によるブーム角度
4		104.140846(deg)	ストローク計によるアーム角度
5		102.890846(deg)	傾斜計によるブーム角度
6		-9.871522(deg)	ストローク計によるバケット角度
7		-9.315522(deg)	傾斜計によるバケット角度
8		7.043321(deg)	フォークチルト角度
9		25.000000(deg)	フォーク旋回角度
10		16.264791(deg)	フォーク開閉角度
11	データ終端文字	*	前データとの間にカンマなし
12	チェックサム	19	$と*の間のデータ（$と*含まず）の排他的論理和の 16 進数表記 前データとの間にカンマなし

上記データをカンマ(0x2C)区切りとした形式。

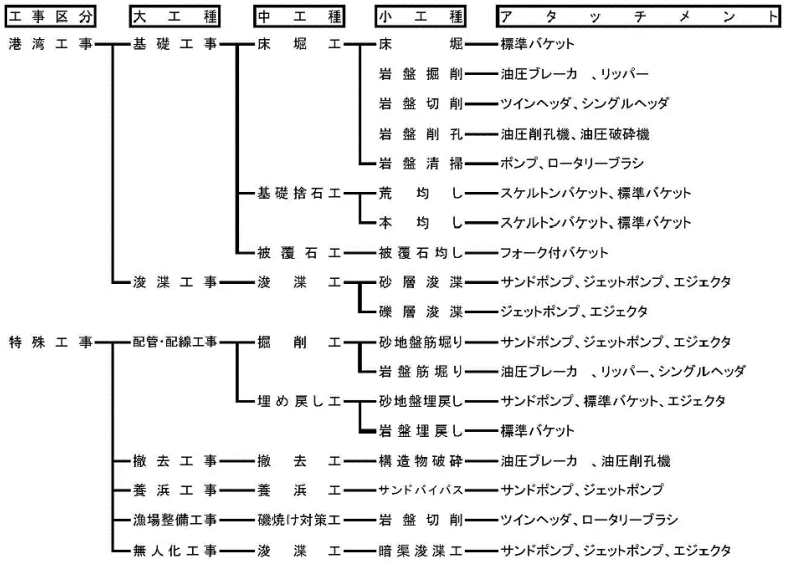
第５章　水中バックホウ運用の基本事項

5.1　通常の水中バックホウ適用事例

ICT 型ではない、通常の潜水士搭乗型もしくは遠隔操作型の水中バックホウについて、水中バックホウを所有する共同研究者（極東建設株式会社、共同研究名称：水中施工機械の作業性向上のための技術開発. 2016～2023 年度）の施工実績を巻末に付表として記すとともに、水中バックホウが使用されている主な工種と施工内容、アタッチメントなどを**表 5.1**～**表 5.5** に示す。

表 5.1　水中バックホウの適用工種とアタッチメント（1/5）

水中バックホウの適用工種



大工種	中工種	小工種	アタッチメントと施工状況
基礎工事	床掘工	床　掘	●既設構造物周辺の掘削 ●ピンポイントの掘削 ●船舶が進入できない海域 標準バケット 施工事例　橋脚補強工事
		岩盤掘削	岩盤掘削 アタッチメント リッパー アタッチメント 油圧ブレーカ　吸引口付バケット 施工事例　光設備工事
		岩盤切削	杭基礎部（土炭部）の掘削　掘削と搬送を同時に行う ツインヘッダ　と　サンドポンプ 施工事例　橋梁工事

表 5.2　水中バックホウの適用工種とアタッチメント（2/5）

<table>
<tr><th>大工種</th><th>中工種</th><th>小工種</th><th>アタッチメントと施工状況</th></tr>
<tr><td rowspan="4">基礎工事</td><td rowspan="2">床掘工</td><td>岩盤削孔</td><td>アタッチメントをドリフタ（削孔機）に取替

油圧式破砕機

油圧式破砕機
ドリフタで削孔後、油圧破砕機を挿入し構造物を破壊
施工事例　浚渫工事</td></tr>
<tr><td>岩盤清掃</td><td>●岩盤の露出　●掘削面の整形　●掘削ズリの撤去
アタッチメント　サンドポンプ

サンドポンプの噴出水で基岩面を清掃

アタッチメント　ブラシ

アタッチメント　ツインヘッダ

施工事例　取水設備工事</td></tr>
<tr><td rowspan="2">基礎捨石工</td><td rowspan="2">荒均し
本均し</td><td rowspan="2">●急施工施工による工期短縮　●機械化による安全性の向上　●法面の均し
スケルトンバケット

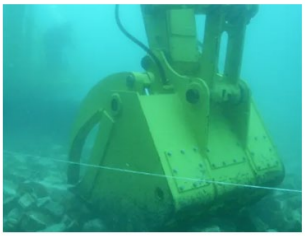
フォーク付バケット
 
施工事例　港岸設備工事</td></tr>
<tr><td>被覆石工</td><td>被覆石均し</td></tr>
</table>

表 5.3　水中バックホウの適用工種とアタッチメント（3/5）

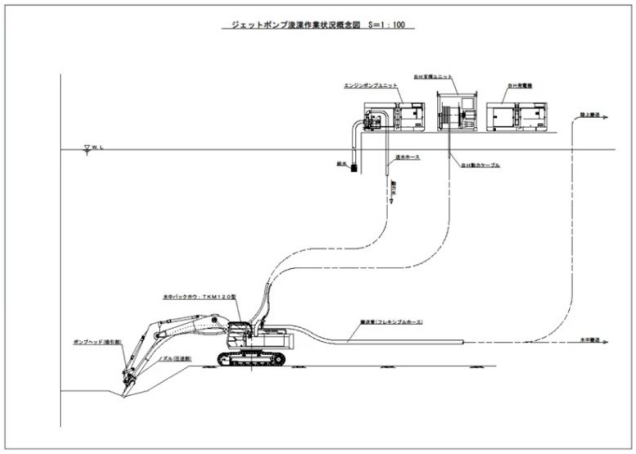
大工種	中工種	小工種	アタッチメントと施工状況
浚渫工事	浚渫工	砂層浚渫 礫層浚渫	遠浅な水域で、ＢＨ台船等船舶進入不可能な水域で稼働  エンジンポンプユニット ポンプヘッド 施工事例　浚渫工事
配管・配線工事	掘削工	砂地盤筋掘り 岩盤筋掘り	砂地盤・岩盤　筋堀り ●現地盤の変形を最小限に抑制 ●設計ルート上に精度よく敷設 ●砕波帯から沖合まで連続施工 電力ケーブル敷設 岩盤層の敷設　アタッチメント取替 シングルヘッダ 岩盤層の敷設　アタッチメント取替 エジェクタ 施工事例　ケーブル敷設工事

表 5.4　水中バックホウの適用工種とアタッチメント（4/5）

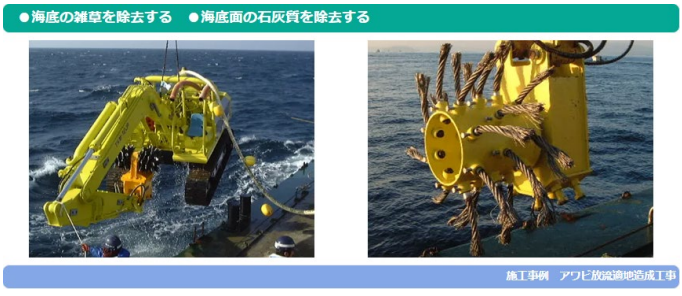
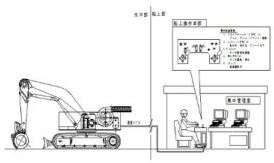
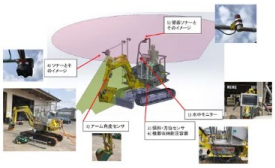
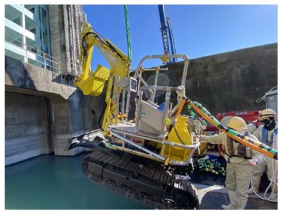
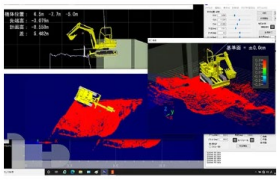
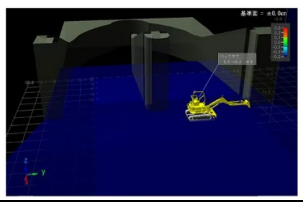
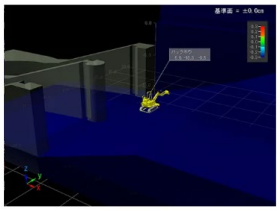
大工種	中工種	小工種	アタッチメントと施工状況
配管・配線工事	埋戻し工	砂地盤埋戻し 岩盤埋戻し	
撤去工事	撤去工	構造物破砕 吊具取付け	
養浜工事	養浜工	サンドバイパス	
漁場整備工事	磯焼け対策工	岩盤切削	

表 5.5　水中バックホウの適用工種とアタッチメント（5/5）

大工種	中工種	小工種	アタッチメントと施工状況
無人化工事	浚渫工	暗渠浚渫工	●無人化による暗渠内の施工　●劣悪環境下の施工 アタッチメント交換 中央監視室 無人化工事の基本構成  遠隔操縦装置のモニター管理画面 施工事例　カルバート内部土砂撤去成工事 ●マシンガイダンスシステム　●劣悪環境下の施工 水中マシンガイダンスシステム  中央監視室 小型水中バックホウ投入状況  マシンガイダンス画面 濁水・暗渠・狭隘部での作業に マシンガイダンスを利用 濁水・暗渠・狭隘部での作業に マシンガイダンスを利用 マシンガイダンス画面  マシンガイダンスシステム マシンガイダンス画面  マシンガイダンス画面 

5.2　使用機材と参考コスト

（A）水中バックホウの動力供給方式の変遷

水中バックホウは、陸上で多くの作業に汎用的に使用されているバックホウを、水中で陸上と同等の機能、性能を発揮できるように改造した施工機械である。

1985 年（昭和 60 年）に水中バックホウの初号機（0.5 ㎥級）が開発、実用化されたが、その当時は**図 5.1** 左側に示すように、陸上（もしくは支援台船の船上）にエンジン油圧ユニットを置き、油圧ユニットを搭載した水中バックホウに対して油圧ホースにより油圧を供給するエンジン油圧式であった。

これによって、従来は潜水士によって人力で施工されていた基礎捨石や被覆石の均し作業などを、機械化施工により大幅な作業能力の向上と、省力化、工期短縮などを実現することができた。また、人災（指詰め等の事故）の防止も実現することができた。

一方で、エンジン油圧式では、比較的重量のある油圧ホースにより動力を伝達する仕組みのため、油圧ホースの重量や長さ、またそれに伴うホースの捌きにくさによって作業範囲が制限を受けやすいという課題もあった。

その課題を解決する方策として、1993 年（平成 5 年）頃から、**図 5.1** 右側に示すように、電動油圧ポンプを水中バックホウに搭載して、陸上（もしくは支援台船の船上）に置いた発動発電機と電源ユニットから電源ケーブルにより電気を供給する電動油圧式の水中バックホウが開発、実用化された。

油圧ホースよりも軽量な電源ケーブルによって、ケーブルが捌きやすくなり施工性が向上し、また油圧ホースよりも径が細いことから、ケーブルの延長を長くすることも容易であり、作業範囲も拡大させることが可能となった。

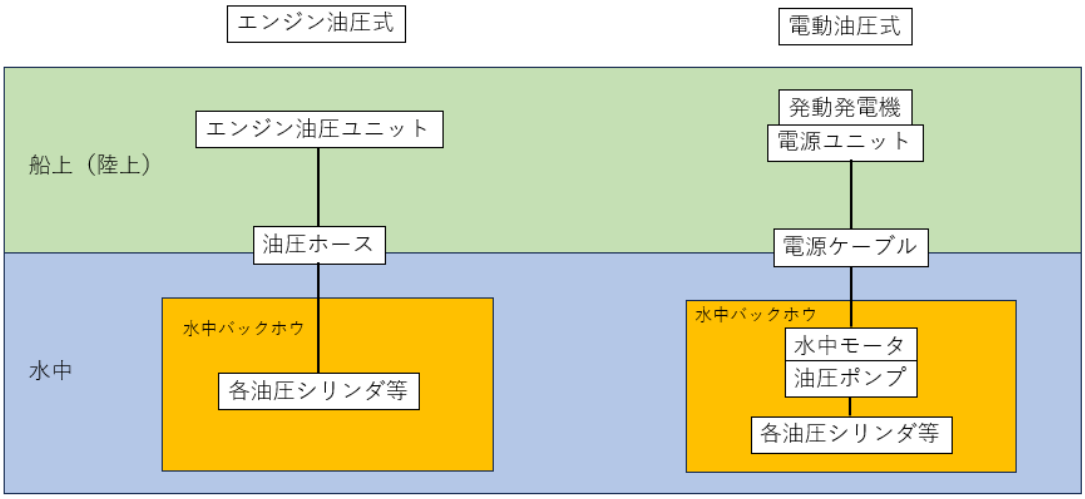


図 5.1　水中バックホウの動力供給方式の違い

(B) 水中バックホウの積算基準

前記のとおり、1985 年（昭和 60 年）にエンジン油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級）が開発、実用化された。

1999 年（平成 11 年）には、港湾土木請負工事積算基準の基礎工の基礎捨石均しにおいて、水中バックホウによる機械均し（0.5 ㎥級）が参考工種として掲載された。

その後、エンジン油圧式水中バックホウは老朽化のため退役し、電動油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級、0.8 ㎥級）が使用されているが、最新の令和 5 年度改訂版の港湾土木請負工事積算基準においても、平成 11 年の掲載開始当初と同様にエンジン油圧式水中バックホウの実績に基づく歩掛と機械損料の改定はないままであり、電動油圧式の実情に合わせた歩掛と機械損料の改定が要望されている。

ここでは、港湾土木請負工事積算基準（令和５年度改訂版）、ならびに船舶および機械器具等の損料算定基準（令和４年度改訂版）に記載された水中バックホウの①機械損料、②運転単価、③バックホウ均し代価表、④標準均し能力と、改定が望まれる電動油圧式水中バックホウの各数値を記載する。

①水中バックホウの機械損料

船舶および機械器具等の損料算定基準（令和４年度改訂版）に記載されたエンジン油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級）の損料率を、電動油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級、0.8 ㎥級）でもそのまま準拠させる想定として、各方式、能力の機械損料を以下に示す。

規格			(1)	(2)	年間標準			(6)	(7)	残存率	算定表				摘要
					(3)	(4)	(5)				運転時間（または日）当り		供用日当り		
船舶の種類	呼称	機関出力	基礎価格	標準使用年数	運転時間	運転日数	供用日数	維持修理費率	年間管理費率		(8) 損料率	(9) 損料額	(10) 損料率	(11) 損料額	
		(kw)	(千円)	(年)	(時間)	(日)	(日)	(%)	(%)	(%)	($\times 10^{-7}$)	(円)	($\times 10^{-7}$)	(円)	
水中バックホウ	エンジン油圧式 97PS型 質量21.3t (0.5㎥級)	71	85,700	7.1	500	100	220	115	10	14	4,450	38,100	7,300	62,600	

船舶および機械器具等の損料算定基準（令和4年度改訂版） 参考-1

規格			(1)	(2)	年間標準			(6)	(7)	残存率	算定表				摘要
					(3)	(4)	(5)				運転時間（または日）当り		供用日当り		
船舶の種類	呼称	機関出力	基礎価格	標準使用年数	運転時間	運転日数	供用日数	維持修理費率	年間管理費率		(8) 損料率	(9) 損料額	(10) 損料率	(11) 損料額	
		(kw)	(千円)	(年)	(時間)	(日)	(日)	(%)	(%)	(%)	($\times 10^{-7}$)	(円)	($\times 10^{-7}$)	(円)	
水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	85,700	7.1	500	100	220	115	10	14	4,450	38,100	7,300	62,600	
水中バックホウ	電動油圧式 150PS型 質量20.0t (0.8㎥級)	110	105,000	7.1	500	100	220	115	10	14	4,450	46,700	7,300	76,700	

船舶および機械器具等の損料算定基準（令和4年度改訂版） 参考-1 に準拠

②水中バックホウの運転単価

エンジン油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級）では**図 5.1** に示したとおり、陸上もしくは支援台船の船上に置いたエンジン油圧ユニットによって水中バックホウを駆動させる方式であったため、港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）では、水中バックホウ（エンジン油圧式）の主燃料が運転単価に見込まれている。

これに対して、電動油圧式水中バックホウ（0.5 ㎥級、0.8 ㎥）では**図 5.1** に示したとおり、陸上もしくは支援台船の船上に置いた発動発電機によって水中バックホウを駆動させる方式となるため、従来水中バックホウ本体の主燃料として見込まれていた項目、費用を、発動発電機の主燃料として見込む必要がある。

水中バックホウ（エンジン油圧式）

燃料消費率 軽油 0.153L/kW･hr （雑材料含む）

水中バックホウ（エンジン油圧式） 運転1日当り　　就業8時間

名　称	形状寸法	単位	数量	摘要
			エンジン油圧式 0.5㎥	
			71kW	
主 燃 料	軽　油	L	55	
損　料	運　転	時間	5	
〃	供　用	日	α	

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） 単-52

水中バックホウ（電動油圧式）

水中バックホウ（電動油圧式） 運転1日当り　　就業8時間

名　称	形状寸法	単位	数量		摘要
			電動油圧式 0.5㎥	電動油圧式 0.8㎥	
			65kW	150kW	
損　料	運　転	時間	5		
〃	供　用	日	α		

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） 単-52 に準拠

発動発電機

燃料消費率 軽油 0.145L/kW･hr （雑材料含む）

発動発電機 運転1日当り （海上）　　就業8時間

名　称	形状寸法	単位	数量		摘要
			125kVA	200kVA	
主 燃 料	軽　油	L	85	140	
賃　料		日	α		

注）賃料は物価資料による。

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） 単-43

③水中バックホウのバックホウ均し代価表

港湾土木請負工事積算基準（令和５年度改訂版）では、水中バックホウ（エンジン油圧式 0.5 ㎥級）の支援台船としてクレーン付台船 45～50t 吊が見込まれていたが、電動油圧式の水中バックホウ（0.5 ㎥級、0.8 ㎥級）では、それぞれの機体重量（12.5t、20.0t）に応じた起重機船ならびに引船を見込む必要がある。

バックホウ均し　1日（　　㎡）当り

水中バックホウ（エンジン油圧式） 0.5㎥級

名　称	形状寸法	単位	数量	摘要
水中バックホウ	71kW、21.3t	日	1	運5H／就8H
潜水士船	D270PS型　3～5t吊	〃		就業8H
クレーン付台船	45～50t吊	〃	1	運2H／就8H
引船	鋼D 450PS型	〃	1	運2H／就8H
特殊作業員		人	1	
雑材料				

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） P.3-3-(6)

④水中バックホウの標準均し能力

港湾土木請負工事積算基準（令和５年度改訂版）で規定されている、エンジン油圧式の水中バックホウ（0.5 ㎥級）の１時間当り標準均し能力に対して、電動油圧式の水中バックホウ（0.5 ㎥級）は基本的な施工能力の違いはないものとして、1 時間当り標準均し能力は同等と想定される。

一方、電動油圧式の水中バックホウ（0.8 ㎥級）は、これまでこの仕様能力の規定がなかったため、歩掛調査によって 0.8 ㎥級の 1 時間当り標準均し能力を規定する必要がある。本比較では水中バックホウを所有する会社へのヒアリングから暫定的に 1.1 倍と仮定した。

水中バックホウ均し1時間当り標準均し能力

水中バックホウ（エンジン油圧式） 0.5㎥級

均し精度	捨石均し		被覆均し	
	±30cm	±50cm	±30cm	±50cm
ai（㎡／h）	29.0	33.5	15.0	17.3

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） P.3-3-(5)

水中バックホウ均し1時間当り標準均し能力

水中バックホウ （電動油圧式） 0.5㎥級

均 し 精 度	捨石均し		被覆均し	
	±30cm	±50cm	±30cm	±50cm
ai （㎡／h）	29.0	33.5	15.0	17.3

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） P.3-3-(5) に準拠

水中バックホウ （電動油圧式） 0.8㎥級

均 し 精 度	捨石均し		被覆均し	
	±30cm	±50cm	±30cm	±50cm
ai （㎡／h）	31.9	36.9	16.5	19.0

0.5㎥級の1.1倍とした

（C）水中バックホウの運搬費用

水中バックホウ（電動油圧式 0.5 ㎥級、0.8 ㎥級）は、作業船で運搬する外、船便による海上運搬、トラックによる陸上運搬がある。なお、水中バックホウ（電動油圧式）の重量は、0.5 ㎥級は 12.5t、0.8 ㎥級は 20.0t である。

①水中バックホウの海上運搬

海上運搬は、一般貨物船、RORO 船、フェリー等の定期航路を利用することが考えられる。一例として那覇港を起終点とする定期航路（2023.03.28 時点）は、東京、大阪、北九州、博多、鹿児島の各港と結ばれており、これらの定期航路による海上運搬を計画することができる。（那覇港管理組合

https://nahaport.jp/userfiles/files/users/teiki/teikikouro20230328.pdf（参照 2024-07-29））

②水中バックホウの陸上運搬

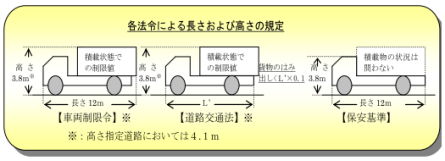
トラック運搬に関する各法令で定める基準等を以下に示すが、一部の指定道路を除いては、自動車の重量（自重）＋貨物重量が 20t を超える場合には、特殊車両通行許可を受けた車両による運搬が必要となる。

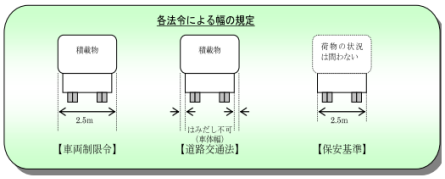
各法令で定める基準等について

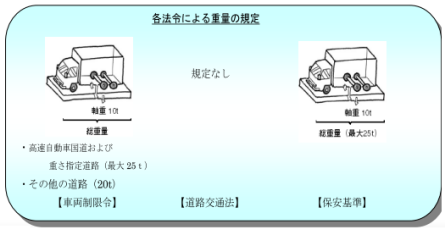
	車両制限令 【道路】	道路交通法 【警察】	道路運送車両の保安基準 【車両】
長さ	貨物積載状態で 12m	①自動車の長さの10%を超えたはみ出しを禁止 ②他の車両をけん引する場合の全長 25m	①自動車の全長（車長） 12m ②連結車の特例 セミトレーラ連結車は、連結装置中心から車両後端までの距離が12m トラクタは、車長が12m
幅	貨物積載状態 2.5m	貨物の幅は車両の幅を超えないこと。	貨物に関係なく 2.5m
高さ	貨物積載状態 3.8m （高さ指定道路は4．1m）	貨物積載状態 3.8m （高さ指定道路は4．1m）	車両の高さ 3.8m
総重量	①自動車の重量（自重）＋乗員の体重＋貨物重量 ・高速自動車国道と重さ指定道路は25tまで ・その他の道路：一律20t ②連結車の特例 バン型などのセミトレーラやフルトレーラは、最遠軸距に応じて ・重さ指定道路 25～27t ・その他の道路 24～27t	①規定なし 「貨物の最大積載量は、保安基準に準拠（車検証の記載値）」 ②連結車の特例 規定なし	①自重＋乗車定員の体重（一人当たり55kg）＋貨物の最大積載量 ・車長や軸距によって20～25t ②連結車の特例 セミトレーラ（被けん引）は、連結中心から最後軸中心までの距離によって20～28t
運行	特殊車両通行許可を受けた車両は運行できる。 また、緊急自動車や災害救助等を用務として通行する車両は、車両制限令の適用外。	制限外許可および制限外けん引許可を受けた最大積載量を超える車両は運行できる。	保安基準の制限値を超える車両は認定をうければ基準緩和車両として運行できる。

※国交省資料の一部引用

○道路法：橋やトンネルなどへの影響を勘案して限度を決める
・幅、重量、長さなどの最高限度は乗員、貨物が載った状態
・トレーラなど連結車の重量、長さなどの最高限度も連結状態
○道路交通法：交通安全上の観点から規定
・危険防止、交通の安全を図るため過積載を禁止
・貨物のはみ出しを制限
○保安基準：自動車の安全性の確保のため、規制がある
・連結車では、切り離した状態での個々の車両について規定







（出典：全日本トラック協会

https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/anzen/oogata/tokushu_sharyo.pdf（参照 2024-07-29））

③水中バックホウの運搬事例と費用

水中バックホウ（電動油圧式 0.8 ㎥）の運搬については、令和 5 年度に茨城県鹿島港での施工に際し、那覇港から大阪港まで定期航路で海上運搬、大阪港から鹿島港の現場まで特殊車両通行許可を受けた車両によって陸上運搬している事例がある。

この際の運搬費用の実費としては、沖縄県宮古島～茨城県鹿島港の往復で約 800 万円であった。

5.3　水中バックホウ作業の安全確保

水中バックホウは、陸上で汎用的に使用されているバックホウを水中用に改造したものである。

図 5.2 に示すとおり、水中バックホウの駆動源は電動モータである。水中バックホウ本体に搭載された電動モータは、船上の発電機から AC440V/60Hz の電力を支援ユニットに供給し、支援ユニット内のインバーターによって周波数を調節された後、動力複合ケーブルを介して水中にあるバックホウの電動モータを駆動して油圧源を得ている。

水中バックホウの操作は、水中の潜水士による直接操縦もしくは遠隔操作により行うが、モータの起動、停止は潜水士の指示により船上支援員が支援ユニットの操作で行う。

以下に、水中バックホウ作業の安全確保について示す。

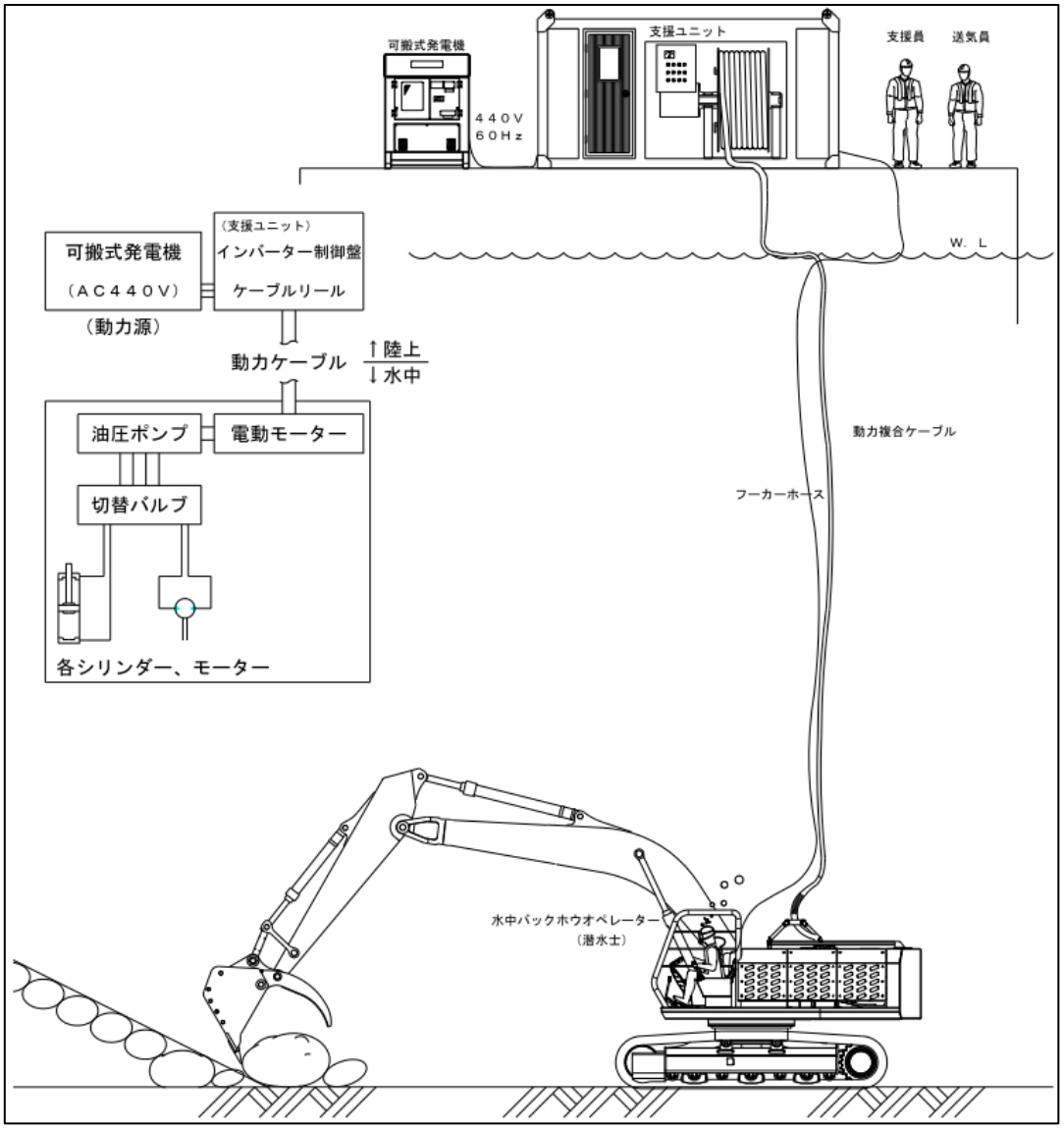


図 5.2　水中バックホウの機器構成

（A）水中バックホウの運転に必要な資格

水中バックホウの作業に従事する者には、水中バックホウの取扱において、その役割に応じた専門知識が必要となり、知識の修得と技能の練磨が要求される。**表 5.6** に水中バックホウの運転、支援作業に必要な資格を示す。

表 5.6　水中バックホウの運転、支援作業に必要な資格

作　業　者	労働安全衛生法による資格		
	免　許	技 能 講 習	特 別 教 育
水中バックホウ オペレーター	潜水士	車両系建設機械 （整地・運搬・積込用及び掘削用） 内容に応じ（解体用） 玉掛技能講習	水中バックホウ 取扱特別教育
支援作業のうち 送気作業			送気調節業務特別教育 水中バックホウ 取扱特別教育
支援作業のうち 支援・操作作業		玉掛技能講習	低圧電気取扱特別教育 水中バックホウ 取扱特別教育

（B）実現場習熟教習の方法

実現場習熟の方法の事例として、水中バックホウを開発・製作し、実施工も行う極東建設株式会社が作成した「水中バックホウ取扱説明書」を別紙参考資料として添付する。同社では実現場で就業する前にまず、この取扱説明書（教習テキストも兼ねる）によって、座学と、工場内の気中で電源の入れ方などの基礎教育実習を 3 日間行っている。

（C）水中バックホウの海中投入・揚収時の注意点

(C-1) 水中バックホウの水中投入作業

水中バックホウを施工する現場の水中に投入し、水底に着座させる作業である。

本作業は、潜水士（水中バックホウ操作者）のほか、船上支援員（玉掛け合図者、ケーブル送り出し者、浮体（ブイ）取付者、介錯ロープさばき者、クレーン操作者）と一番人員を要するため、密なる打合せのもと、作業時の合図、指示系統を明確にして安全作業に務める必要がある。

１） 水中降下作業時の注意事項

①潜水士は事前に潜降したら海底状況を把握して着座位置を確認する。
その後船上にバックホウ降下の要請をする。

②作業別人員配置、指揮系統の取決めをすると共に作業順序を周知させる。

③吊りワイヤーの玉掛け状況の確認と介錯ロープの結束。（介錯ロープは通常アーム先端に結束する。）

④予め船上に空きスペースがあれば、施工水深に応じた動力ケーブルを事前に繰り出しておく。

⑤その際、ケーブルブイ（浮体）も動力ケーブル 3mピッチに取り付けておく。

⑥機械を吊上げて水面よりクレーンで水中バックホウを降下する際は、船上支援員が動力ケーブルにテンションが懸からない様に巻き下げ速度を指示する。
必要であれば、随時ケーブルを繰り出しする。

⑦海底にいる潜水士は水中バックホウが目視確認できるまでは台船の船底など安全な位置で待機して、確認が出来たら合図、誘導を行う。

⑧潜水士の指示により、機械の着座位置の誘導と、スピードを船上に伝える。

２） 機械、海底面着座後の吊りワイヤーの切り離し

①海底に着座後、吊りワイヤーの切り離しの際、機械本体、油圧ホース等にシャックルが引っ掛からないように確認を行う。
切り離しの順序としては、本体吊りワイヤーを外した後介錯ロープを外す。
波高があり、クレーンのフックが大幅に上下している際は、迅速にワイヤーを外さないと本体吊りピースが曲がる恐れがあるので十分に注意する。

②切り離し後、クレーンフックを巻き上げてもらう際は、クレーンフックが、動力ケーブル、ケーブルブイ、フーカーホースに引っ掛からないように予め機械から離れるまで誘導し、見届けるようにする。

(C-2) 水中バックホウの船上回収作業

水中での作業終了後、海中にある水中バックホウを船上に揚収する作業である。

水中設置作業と同様に潜水士と船上支援員の密なる連絡、指揮系統の統一を図って作業を行う。

①支援船上、機械を置く位置は予め物がないように片付けて揺れ等の危険に備える。

②作業が終了したら、潜水士は機械を水中降下姿勢にして、運転席下のゲートロックレバーを OFF にする。その後船上支援員に連絡して水中モータ、ミキサーを止める指示をする。

③船上支援員は、潜水士の指示により水中バックホウのモータを止め、動力ケーブルに関する電源（ブレーカー）を OFF にする。

（メインブレーカー、ケーブルウインチのブレーカーは絶対に OFF にしない事）

④船上では、クレーンのフックをバックホウ上側まで移動させ着水したら潜水士の誘導の下、フックを下ろす。その際、フックに介錯ロープも結び付け一緒に降ろす。

⑤潜水士は玉掛け作業を行った後、クレーンのフックが機械を真直ぐ巻き上げられるか再度誘導する。

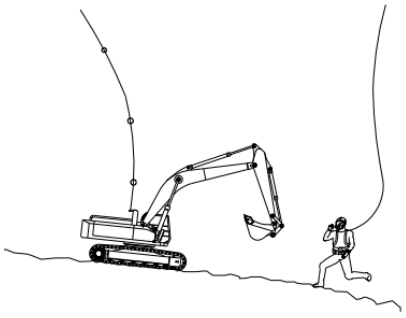
機械が横引きされると吊りピースの破損の原因となる。

⑥海水面から機械が引きあがる際、約 2 トン程度荷重が増加する。出来るだけブームを起こして、安定したスピードで巻き上げる。

⑦機械回収時、動力ケーブルはブイ（浮体）を取り外しながらケーブルリールに巻き取りする。ただし、機械が水面付近にきたら一旦巻取りを止めて、絡み、撚り等がない事を確認する。

（D）補助潜水員（誘導員）が近傍にいるときの連絡方法

微操作で精度を求められる作業、あるいは透明度が悪く、誘導員をつけて施工を行う場合など、右図の様に、補助潜水士が水中バックホウの動作を指示する場合の作業の注意事項を以下に示す。



①まず、操作者、補助潜水士同士が作業内容を確認しあい、合図の方法を確立して作業を行う。

②通話装置は確実に同時に通話できるものを使用すること

③操作は必ず誘導員（補助潜水士）の合図でしか動かさないこと。また、その際は、操作者は合図を復唱すること。

④誘導員は、操作者の視界に入り、なおかつ安全な位置にて誘導すること。

⑤誘導員のフーカーホースが、機械アタッチメントに引っ掛からないように操作者、誘導員、共に気を付ける。

（E）1 日の作業範囲、作業手順の指示方法

実現場においては、作業関係者全員で作業開始前の打合せを綿密に行うとともに、**図 5.3** に示す水中バックホウの運転手順チャート図に則った操作、作業を行う。

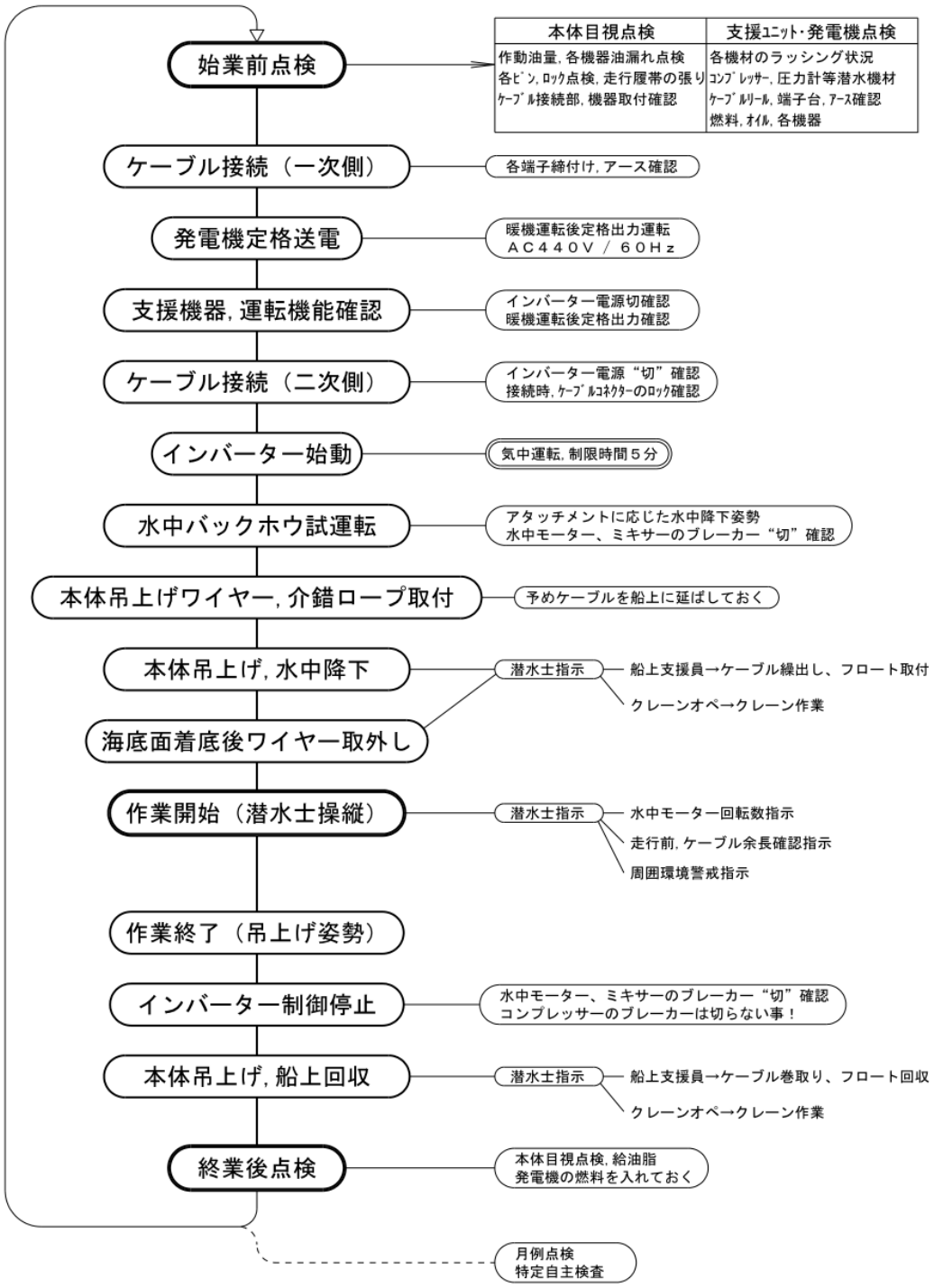


図 5.3　水中バックホウの運転手順チャート図

（F）動力ケーブルと潜水士ホースの交差・管理

水中バックホウが走行して移動を行う際は、潜水士と船上支援員との綿密なやり取りが重要である。その際、**図 5.4** に示すように、船上から動力ケーブルが延長されている。ケーブルは若干潮流には影響を受けるが、ほぼ真直ぐ機械の上に延長され、それから沈み込んでいる。ケーブルには 3m ピッチでブイが取り付けられているので、支援船から水中バックホウまでの距離は把握できる。

潜水士と船上支援員の連絡方法は下記のようにすることとする。

潜水士；　「トップどうぞ、走行するのでケーブルの送り出し量の確認を頼む。」
船上支援員；「了解、どの方向に、どの程度走行するのか。どうぞ。」
船上支援員；「ダイバーどうぞ、ケーブルを延長しましたので走行可能ですよ。どうぞ。」
潜水士；　「西側に、10m移動します。どうぞ。」
船上支援員；「先にケーブルを延長します。準備が出来たら指示します。どうぞ。」
潜水士；　「了解、これから走行します。どうぞ。」
潜水士；　「トップどうぞ、目的地到着しました。どうぞ。」

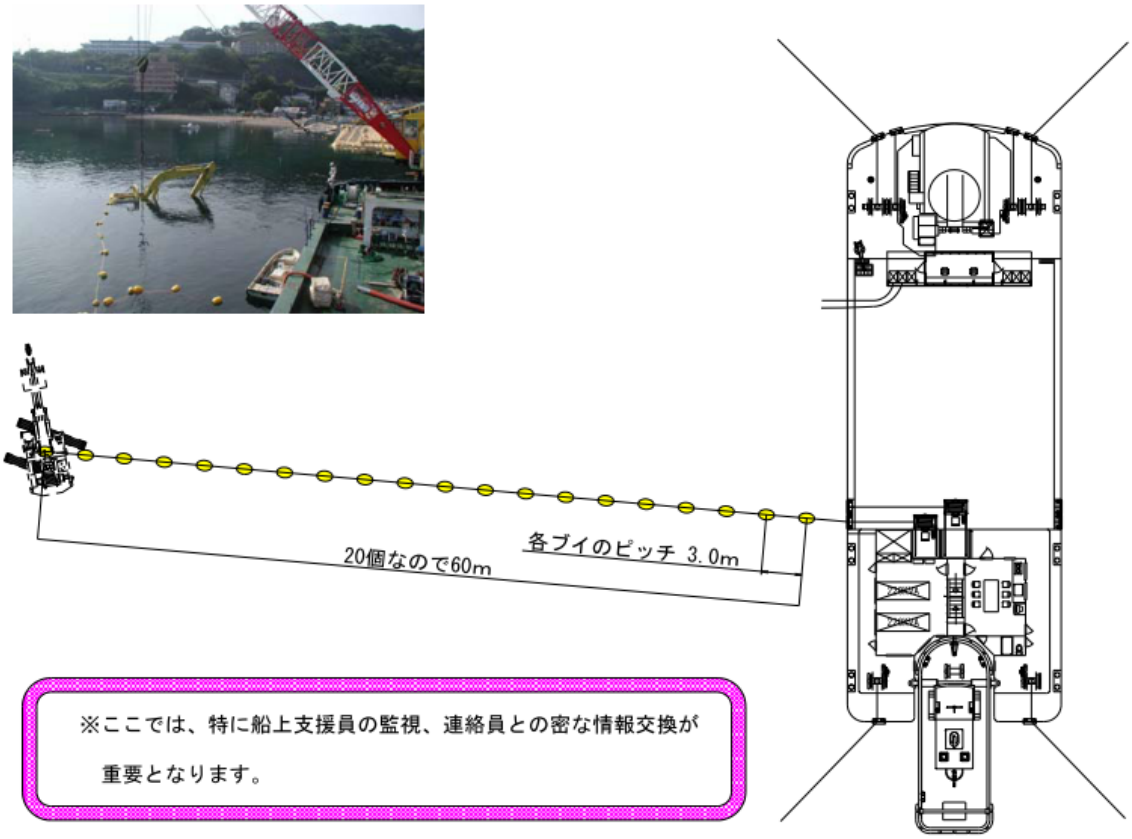


図 5.4　水中バックホウの動力ケーブルの配線状況

（G）法面からの転落防止方法

作業エリアをあらかじめ規定し、そのエリアに法面が含まれる場合には、目印となる水中ブイを立てるなどして法尻の位置を明示する。現状ではまだ水中バックホウによる法面作業は少ないが、水中マシンガイダンスや浮上式音響測位装置なども組み合わせた位置管理が重要となる。

（H）水中バックホウの作業中止基準

以下の数値を参考として、現場状況に応じて、十分に安全が確保できる作業中止基準を、現場毎に定めることが必要となる。

・波高：　有義波高 $H_{1/3}$＝1.0m
・潮流：　2 ノット（現場状況による）
・風速：　10m/sec(水中仕様の場合)
・水深：　-2m～-50m以浅(水中電動モータ搭載仕様の場合)

（Ｉ）　水中バックホウのみを水中に残置する場合の注意点

万一、急な海気象の変化により支援船に水中バックホウを揚収することが危険になった状況などで、現場海域に水中バックホウの残置が必要となる場合、適切な浮標の設置や、事前工事などが必要であり、元請職員、発注者と十分な連絡協議を行う。

その上で、水中で水中バックホウ本体側より動力ケーブルの切り離し作業を行い、ケーブルのみの回収、潜水士を浮上させて支援船が避難する場合の手順を以下に示す。

１）　動力ケーブルの脱装（切り離し）

①潜水士は、船上支援員より、回収の判断の指示があった際、先ず機械を安定した地盤に移動して、アタッチメントを接地させる。
②潜水士は、船上支援員に準備が出来たことを知らせて、動力ケーブルに関する電源（ブレーカー）を OFF にしてもらう。
（メインブレーカー、コンプレッサー、ケーブルウインチのブレーカーは絶対に OFF にしないこと）
③上記項目を潜水士が確認したら、**図 5.5** のようにレバー錠を外してケーブルを引き抜く。
コネクターはケーブルを引かずに根元から真直ぐ上方向に抜く。

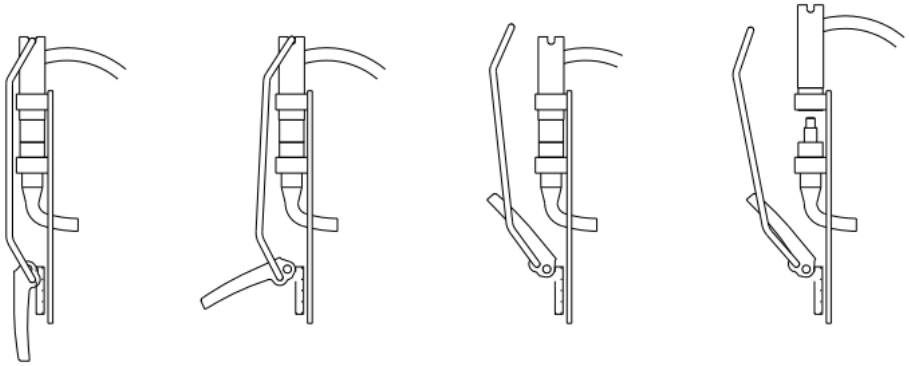


図 5.5　レバー錠の外し方

④次に、カウンターウェイト、ロールバーに固定したロープを外す。
　ケーブルにはブイ（浮体）がついているので、すべて放すと浮上してゆく。放す前には、必ずケーブルコネクターが機械に引っ掛かっていないか、ケーブルと自分のフーカーホースが絡まっていないかを確実に目視する。
⑤ケーブルを浮上させ始めたら船上に連絡して、巻き取ってもらう。
　この時、船上でのケーブルの無理な引きずりはせず、コネクター部も手で抱えて大切に扱うこと。
⑥回収後は、機械本体側、ケーブルエンド両方共にメクラキャップをつけて端子接触部の腐食防止に努める。

（Ｊ）定期的なメンテナンス項目

１）点検の意義と目的

　海中で稼動する水中バックホウは、陸上の機械と異なり水中では簡単に修理ができないため、日常的に水中での機械の稼動音に耳を傾けると共に、船上に上がった際は細心の注意を払って点検を行えば故障やトラブルを未然に防ぐ事ができる。

２）車両系建設機械の点検について

　水中バックホウは、労働安全衛生規則（安衛則）の車両系建設機械に準じて点検を行う。

①日常（始業・終業）点検：	安衛則第百七十条	（作業開始前点検）
②月例点検：	安衛則第百六十八条	（定期自主検査）
③年次点検：	安衛則第百六十七条	（定期自主検査）
	安衛則第百六十九条のニ	（特定自主検査）

上記点検のうち特定自主検査以外のものは事業者が行う。特定自主検査においてはその使用する労働者で労働省令に定める資格を有する者、又は検査業者にて実施しなければならない。

上記点検記録は、安衛則第百六十九条に基づきその結果を 3 年間保存しなければならない。

（K）水中バックホウの事故事例

水中バックホウの事故事例について、水中バックホウの保有会社（施工会社）にヒアリングした結果を**表 5.7** に示す。

人身事故については、大きな事故がなく、社内 ISO でも記録が残っていない状況である。

物損事故については、沖縄県糸満市の整備工場において遠隔操縦の試運転時に機材が暴走してハウスをへこませた事例がある。

転倒事故、感電事故については発生事例がない。

漏油事故については、油量は少量だが、件数は多数あり、その原因のほとんどが油圧ホースの破裂であるため、油圧ホースの規定を**図 5.6** のように社内規定している。

表 5.7　水中バックホウの事故事例に関するヒアリング結果

事故分類	件　数	事 故 状 況 等
人身事故	0	人身事故事例については、大きな事故がなく、社内ISOでも事例報告が残っていない。
物損事故	1	沖縄県糸満市の整備工場において、遠隔操縦の試運転中に機材が暴走してハウスをへこませた。
転倒事故	0	陸上、水中ともに事故事例なし。
感電事故	0	陸上、水中ともに事故事例なし。
漏油事故	多数	油量は少量だが、件数は多数ある。 原因のほとんどが油圧ホースの破裂であるため、油圧ホースの規定を社内で規定している。

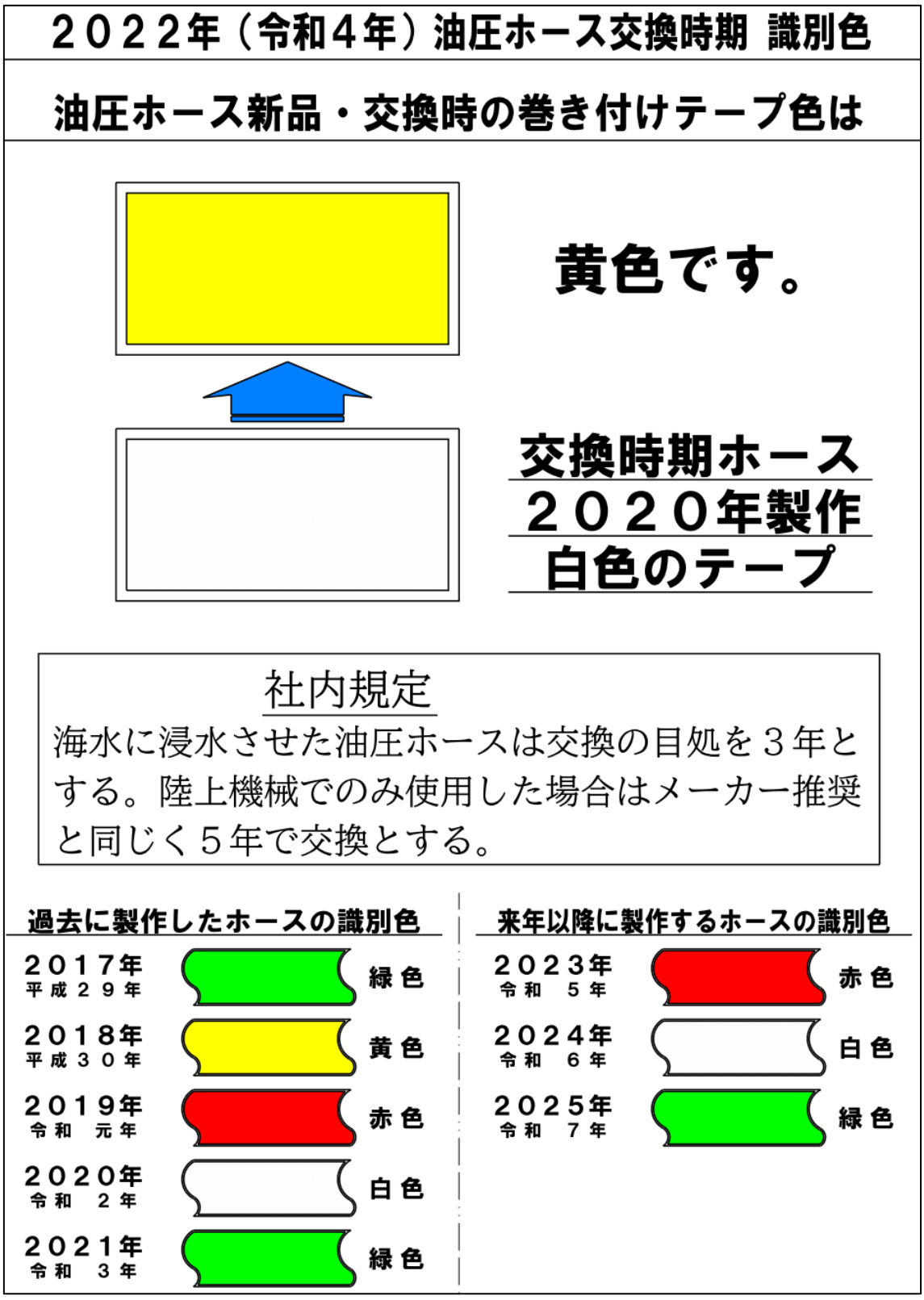


図 5.6　水中バックホウの油圧ホースに関する社内規定（機材保有会社）

5.4　水中バックホウの全国的な需要解析

本節では、2020 年度における全国の直轄港湾整備事業 588 工事を対象にして、水中バックホウによる施工が期待できる基礎工、被覆工を抽出し、その現場条件等から水中バックホウの全国的な需要について検討を行う。

5.4.1　水中バックホウ使用工種の抽出

全国の直轄港湾整備事業 588 件の収集工事より、施設形態ごとの主要工種は、**表 5.8** に示すとおりである。

このうち水中バックホウに関係する工種は基礎工の捨石均し工事と、被覆工の被覆石均し工事と想定し、2020 年度における全国の直轄港湾整備事業 588 工事から、基礎工の捨石均し工事と、被覆工の被覆石均し工事を抽出した。

なお、北海道開発局発注の工事については、収集データから工種毎の工事数量などが読み取れない形式であったため、今回の抽出データからは省いている。

表 5.8　各施設形態の主要工種

施設形態	施設形式	主 要 工 種							
【1】外郭施設	①護岸	基礎工	本体工	上部工					
	②消波ブロック被覆堤	基礎工	本体工	根固工	被覆工	上部工	消波工		
	③直立堤・混成堤	基礎工	本体工	根固工	被覆工	上部工			
	④傾斜堤	基礎工	被覆工	本体工	上部工	消波工			
【2】係留施設	①重力式岸壁	基礎工	本体工			上部工	裏埋工	地盤改良工	
	②桟橋	本体工	上部工	土留工					
	③矢板式岸壁	裏込工	裏埋工	本体工	控上部工	舗装工		地盤改良工	
	④ジャケット式桟橋	基礎工	本体工	裏込工	裏埋工	上部工	舗装工	土留工	床掘
	⑤セル式岸壁	本体工							
【3】水域施設	①航路・泊地	グラブ浚渫	土運船運搬	揚土土捨工	排砂管設備工	安全対策工			
【4】臨港交通施設	①橋台	橋台工							

5.4.2　全国直轄港湾整備事業の解析

5.4.1 の抽出結果から、**表 5.9** に地方整備局別の捨石均し工事と被覆石均しの施工数量をまとめる。また、**図 5.7～5.9** には各工種区分（荒均し、本均し、被覆石均し）の各地方整備局別の施工数量比率を示す。

これらの結果からは、以下の点がわかる。

・捨石荒均し工事は、関東 22%、東北 15%、沖縄 13%、九州 12%、北陸 10%の順に多い。
・捨石本均し工事は、東北 31%、関東 25%、沖縄 14%、九州 12%、中部 8%の順に多い。
・被覆石均し工事は、東北 43%、九州 33%、関東 7%、沖縄 6%、中部 4%の順に多い。

表 5.9　地方整備局別の均し工事（捨石均し・被覆石均し）の施工数量

主要工種	区分	地方整備局別　均し工事　施工数量(㎡)									合計
		東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄	
基礎工 捨石均し	荒均し	16,422 (15%)	24,475 (22%)	10,806 (10%)	2,481 (2%)	11,487 (10%)	8,328 (8%)	8,596 (8%)	12,722 (12%)	14,126 (13%)	109,443 (100%)
	本均し	13,496 (31%)	11,085 (25%)	2,970 (7%)	3,780 (9%)	531 (1%)	750 (2%)	0 (0%)	5,182 (12%)	6,326 (14%)	44,120 (100%)
被覆工 被覆石均し	被覆石均し	22,076 (43%)	3,758 (7%)	1,278 (2%)	1,746 (3%)	1,729 (3%)	681 (1%)	0 (0%)	16,987 (33%)	3,163 (6%)	51,418 (100%)
合　計		51,994 (25%)	39,318 (19%)	15,054 (7%)	8,007 (4%)	13,747 (7%)	9,759 (5%)	8,596 (4%)	34,891 (17%)	23,615 (12%)	204,981 (100%)

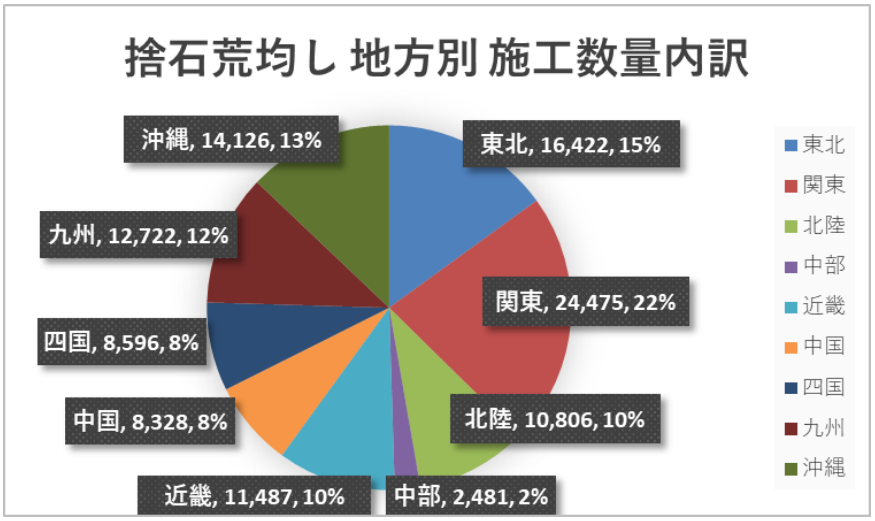


図 5.7　捨石荒均し工事の地方整備局別の施工数量比率

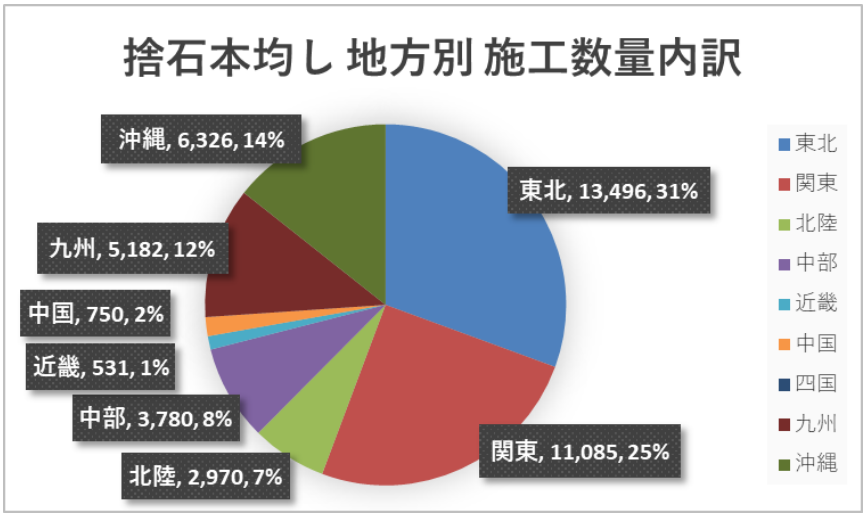


図 5.8　捨石本均し工事の地方整備局別の施工数量比率

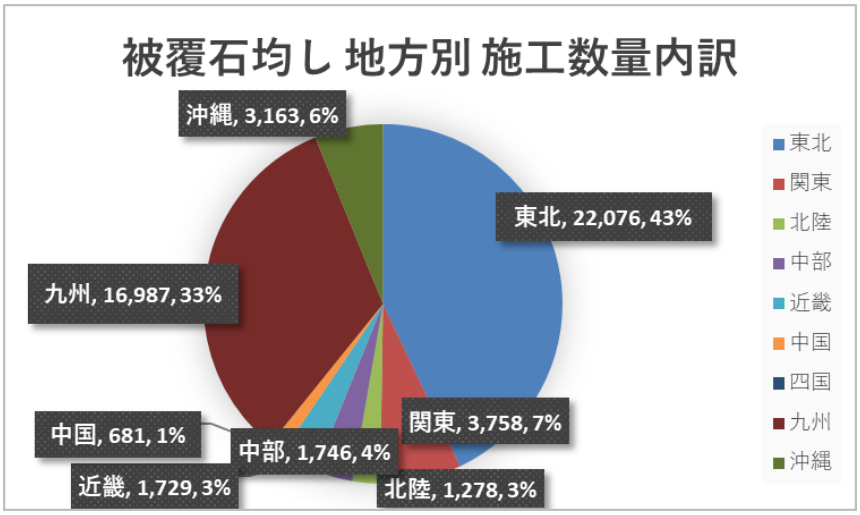


図 5.9　捨石荒均し工事の地方整備局別の施工数量比率

次に、**表 5.10** には、捨石均しと被覆石均しの施工方法（機械施工、人力施工）別に施工水深ごとの施工数量をまとめる。

この結果からは、以下の点がわかる。

・機械均しは各工種（捨石荒均し、捨石本均し、被覆石均し）とも、陸上部や海岸部などで施工が行われている。
・捨石本均しでは「機械均し機」による天端施工が、比較的水深のある区域でも行われている。
・その他の施工条件では、捨石均し、被覆石均しとも人力施工が大半である。

表 5.10　均し工事（捨石均し・被覆石均し）施工方法、水深区分ごとの施工数量

形状区分	施工水深	均し工事　施工水深別　施工数量						合計
		基礎工　捨石均し				被覆工 被覆石均し		
		荒均し		本均し				
		機械施工	人力施工	機械施工	人力施工	機械施工	人力施工	
法面のみ	陸上・海岸	9件 2,577㎡ (72%)				2件 926㎡ (26%)	2件 61㎡ (2%)	13件 3,564㎡ (100%)
	10m未満		18件 15,632㎡ (90%)				11件 1,790㎡ (10%)	29件 17,422㎡ (100%)
	10～15m未満	2件 1,054㎡ (14%)	17件 6,562㎡ (85%)				2件 128㎡ (2%)	21件 7,744㎡ (100%)
	15～20m未満		7件 1,746㎡ (100%)					7件 1,746㎡ (100%)
	20～25m未満		2件 4,571㎡ (83%)				2件 968㎡ (17%)	4件 5,539㎡ (100%)
	25～30m未満		1件 169㎡ (83%)				1件 34㎡ (17%)	2件 203㎡ (100%)
天端のみ	陸上・海岸	6件 2,438㎡ (28%)	2件 1,590㎡ (18%)	4件 864㎡ (10%)	1件 481㎡ (5%)	7件 3,407㎡ (39%)		20件 8,780㎡ (100%)
	10m未満		5件 6,339㎡ (43%)		10件 8,225㎡ (56%)		1件 21㎡ (0%)	16件 14,585㎡ (100%)
	10～15m未満		11件 8,175㎡ (33%)	3件 4,809㎡ (19%)	10件 10,310㎡ (41%)		3件 1,587㎡ (6%)	27件 24,881㎡ (100%)
	15～20m未満		10件 4,525㎡ (22%)	5件 9,718㎡ (46%)	7件 5,832㎡ (28%)		2件 842㎡ (4%)	24件 20,917㎡ (100%)
	20～25m未満			1件 3,079㎡ (100%)				1件 3,079㎡ (100%)
	25～30m未満							0件 0㎡ (100%)
法面･天端複合	陸上・海岸	4件 1,054㎡ (14%)	10件 3,238㎡ (43%)		1件 346㎡ (5%)	6件 2,242㎡ (30%)	6件 564㎡ (8%)	27件 7,444㎡ (100%)
	10m未満		22件 13,746㎡ (54%)		1件 456㎡ (2%)		14件 11,065㎡ (44%)	37件 25,267㎡ (100%)
	10～15m未満		19件 8,863㎡ (70%)				7件 3,793㎡ (30%)	26件 12,656㎡ (100%)
	15～20m未満		17件 16,408㎡ (62%)				12件 10,094㎡ (38%)	29件 26,502㎡ (100%)
	20～25m未満		7件 5,662㎡ (35%)				11件 10,368㎡ (65%)	18件 16,030㎡ (100%)
	25～30m未満		4件 4,667㎡ (57%)				8件 3,528㎡ (43%)	12件 8,195㎡ (100%)
合　計		21件 7,123㎡ (3%)	152件 101,893㎡ (50%)	13件 18,470㎡ (9%)	30件 25,650㎡ (13%)	15件 6,575㎡ (3%)	82件 44,843㎡ (22%)	313件 204,554㎡ (100%)

次に、**表 5.11** には、捨石均しと被覆石均しの人力施工について、施工水深と供用ランクごとの施工数量をまとめる。

この結果からは、以下の点がわかる。

・捨石均し（荒均し、本均し）、被覆石均しのいずれでも、水深が大きく、供用ランクが大きい（海象条件が悪い）海域でも施工が行われている。
・捨石均し、被覆石均しのいずれでも、法面のみや天端のみだけではなく、法面と天端が混在した形状でも施工が行われている。
・被覆石均しは、捨石均しと比べて、割石の寸法・重量が大きいが、捨石均しと同等もしくはそれ以上に供用ランクが大きく、水深も大きい海域でも施工が行われている。
・供用ランクが大きく（仮に供用ランク６以上）、水深が大きい（仮に水深 15m以上）海域で均し施工が行われている港湾としては、以下の各港があげられる。

捨石均し
ランク６：細島港（九州地方整備局）、那覇港浦添地区（沖縄総合事務所）
ランク７：相馬港、小名浜港(東北地方整備局)
ランク８：久慈港（東北地方整備局）、常陸那珂港（関東地方整備局）
ランク９：鹿島港（関東地方整備局）

被覆石均し
ランク６：該当なし
ランク７：小名浜港(東北地方整備局)
ランク８：久慈港（東北地方整備局）、常陸那珂港（関東地方整備局）
ランク９：鹿島港（関東地方整備局）

・細島港や那覇港浦添地区以外は、いずれも東北地方整備局と関東地方整備局の太平洋側で、供用ランクが大きく、水深が大きい施工条件で均し施工が行われており、夏から秋にかけて発生する「うねり」により作業船の稼働が困難になる時期が重なることも類推される。
・上記の供用ランクが大きく、水深が大きい施工条件での施工数量は、概ね以下のとおりである。

捨石均し：　各供用ランク・施工水深区分ごとの平均として、268～2,025 ㎡
被覆石均し：　各供用ランク・施工水深区分ごとの平均として、232～1,289 ㎡
（※施工件数が 1 件のみで、極端に施工数量が少ない事例は省いた）

表 5.11　均し工事（捨石均し・被覆石均し）　水深区分、供用ランクごとの施工数量

形状区分	施工水深	均し工事　施工水深・係数ランク別　施工数量											
		基礎工　捨石均し								被覆工			
		荒均し				本均し				被覆石均し			
		人力施工				人力施工				人力施工			
		ランク	件数	合計面積	平均面積	ランク	件数	合計面積	平均面積	ランク	件数	合計面積	平均面積
法面のみ	10m未満	1	13件	11,624	894					1	11件	1,790	163
		8	13件	4,008	308								
	10～15m未満	1	14件	5,553	397					1	2件	128	64
		4	3件	1,009	336								
	15～20m未満	1	6件	1,610	268								
		9	1件	136	136								
	20～25m未満	1	2件	4,571	2,286								
										9	2件	968	484
	25～30m未満	6	1件	169									
										9	1件	34	34
天端のみ	10m未満	1	4件	6,054	1,514	1	6件	3,205	534	1	1件	21	21
		8	1件	285	285	8	4件	5,020	1,255				
	10～15m未満	1	7件	4,867	695	1	7件	8,883	1,269	1	4件	1,647	412
		2	1件	56	56	2	1件	284	284	2	1件	149	149
		4	3件	3,252	1,084	4	1件	367	367	4	1件	1,765	1,765
						8	1件	776	776	8	1件	232	232
	15～20m未満	1	2件	637	319	1	2件	1,756	878				
		2	1件	33	33	2	1件	531	531				
		4	1件	10	10								
		6	2件	1,304	652	6	1件	626	626				
		7	2件	2,109	1,055	7	1件	754	754				
						8	2件	2,164	1,082				
		9	2件	432	216					9	2件	842	421
	20～25m未満												
	25～30m未満												
法面･天端混在	10m未満	1	17件	10,994	647	1	1件	456	456	1	13件	9,787	753
		2	2件	1,536	768					2	1件	1,278	1,278
		3	1件	37	37								
		4	2件	1,179	590								
	10～15m未満	1	9件	4,936	548					1	3件	1,587	529
		2	3件	334	111								
		3	4件	2,501	625								
		4	2件	610	305								
		6	1件	482	482								
	15～20m未満	1	12件	13,660	1,138					1	3件	2,146	715
		4	3㎡	1,517	506								
		6	2件	1,231	616								
										7	3件	1,468	489
										8	6件	6,480	1,080
	20～25m未満	1	3件	1,186	395								
		6	2件	1,882	941								
		7	1件	569	569					7	1件	1,038	1,038
		8	1件	2,025	2,025					8	9件	9,273	1,030
										9	1件	57	57
	25～30m未満	1	2件	3,072	1,536								
		7	1件	465	465					7	1件	1,289	1,289
		8	1件	1,130	1,130					8	7件	2,239	320

5.4.3　水中バックホウの需要解析

項 5.4.2 で抽出・整理した結果に対して、以下の検討・考察を加える。

①均し面形状区分別の比率

均し工事の均し面形状区分として、法面のみ、天端のみ、法面と天端の混在の 3 区分の比率を**図 5.10** に示す。

図のとおり、法面の施工が 28%ある。また法面と天端混在の施工は 47%あり、均し工事では法面施工の比率が高いことがわかった。

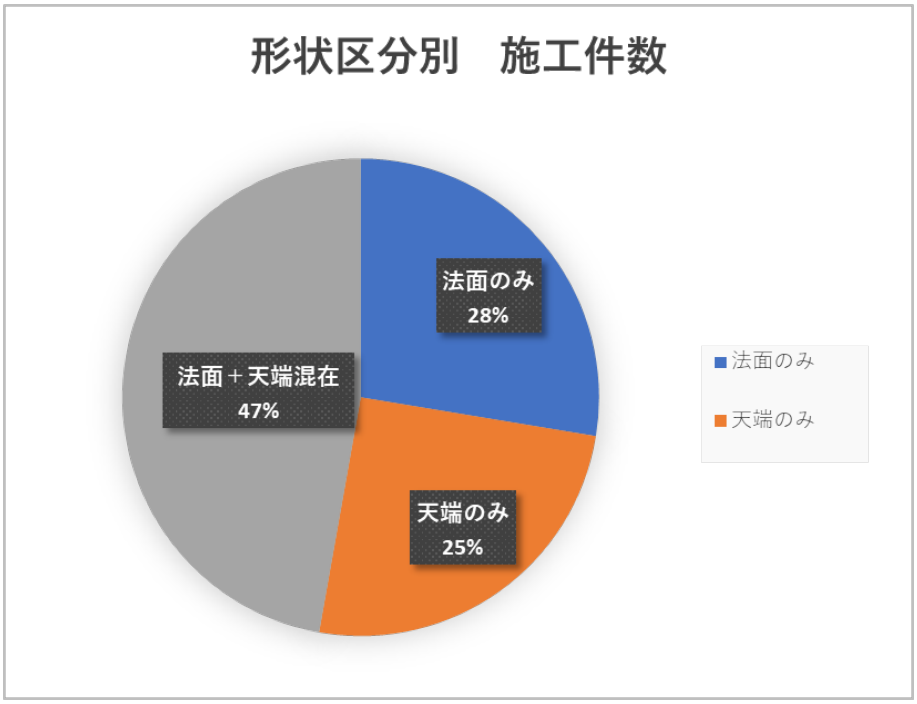


図 5.10　均し工事の均し面形状別　施工件数比率

②施工水深別・供用ランク別の比率

次に、捨石均しと被覆石均しそれぞれについて、施工水深別・供用ランク別の施工件数と比率を**表 5.12** と**表 5.13** にそれぞれ示す。

両表の比較より、捨石均しよりも被覆石均しの方が、施工水深も供用ランクも大きい海域で施工されていることがわかる。

被覆石均しについては、施工水深別・供用係数別の件数分布グラフも**図 5.11** に示す。

被覆石均しでは、供用ランク 6 以上の海象条件の悪い場所の施工件数は 49%であり、施工水深が-20m以上の深い場所での施工件数が 24%となっていることもわかる。

表 5.12　捨石均し工事　施工水深別・供用ランク別の施工件数と比率

供用ランク 水深	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合　計		比率
10m未満	41	2	0	0		0	0	18	0	61	134件	92%
10～15m未満	37	5	0	3		0	0	0	0	45		
15～20m未満	22	2		3		0	0	0	1	28		
20～25m未満	5	0				2	0	0	0	7	11件	8%
25～30m未満	2	0				1	1	0	0	4		
合　　計	107	9	0	6	0	3	1	18	1	145件		100%
	122件					23件						
比　　率	84%					16%				100%		

表 5.13　被覆石均し工事　施工水深別・供用ランク別の施工件数と比率

供用ランク 水深	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合　計		比率
10m未満	25	1	1	2						29	80	76%
10～15m未満	9	1	4	7		1		2		24		
15～20m未満	3			1		5	6	8	4	27		
20～25m未満							2	10	3	15	25	24%
25～30m未満							1	8	1	10		
合　　計	37	2	5	10	0	6	9	28	8	105件		100%
	54件					51件						
比　　率	51%					49%				100%		

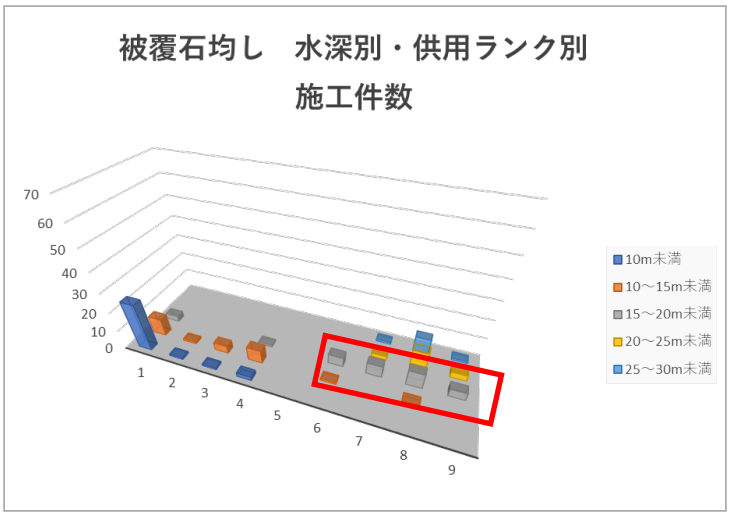


図 5.11　被覆石均し工事　施工水深別・供用ランク別の施工件数

③法面での施工可能範囲

次に、法面の施工可能範囲について検討を加える。

20t 級（0.8 ㎥級）の水中バックホウの使用を想定する場合、**図 5.12** に示すとおり、バケットの届く範囲（深さ方向）は、法面勾配 1:3 の場合は-2.25m、法面勾配 1:2 の場合は-3.20mである。

全国の直轄港湾整備事業 588 工事から抽出した捨石均しと被覆石均しのうち、陸上部の施工は除いた水中部の均し施工について、水中バックホウの均し面形状に対する施工可能件数比率を算定した結果を**図 5.13** に、水深区分毎の施工可能件数比率を**図 5.14** に、工事規模（均し面積㎡）区分毎の施工可能件数比率を**図 5.15** に示す。

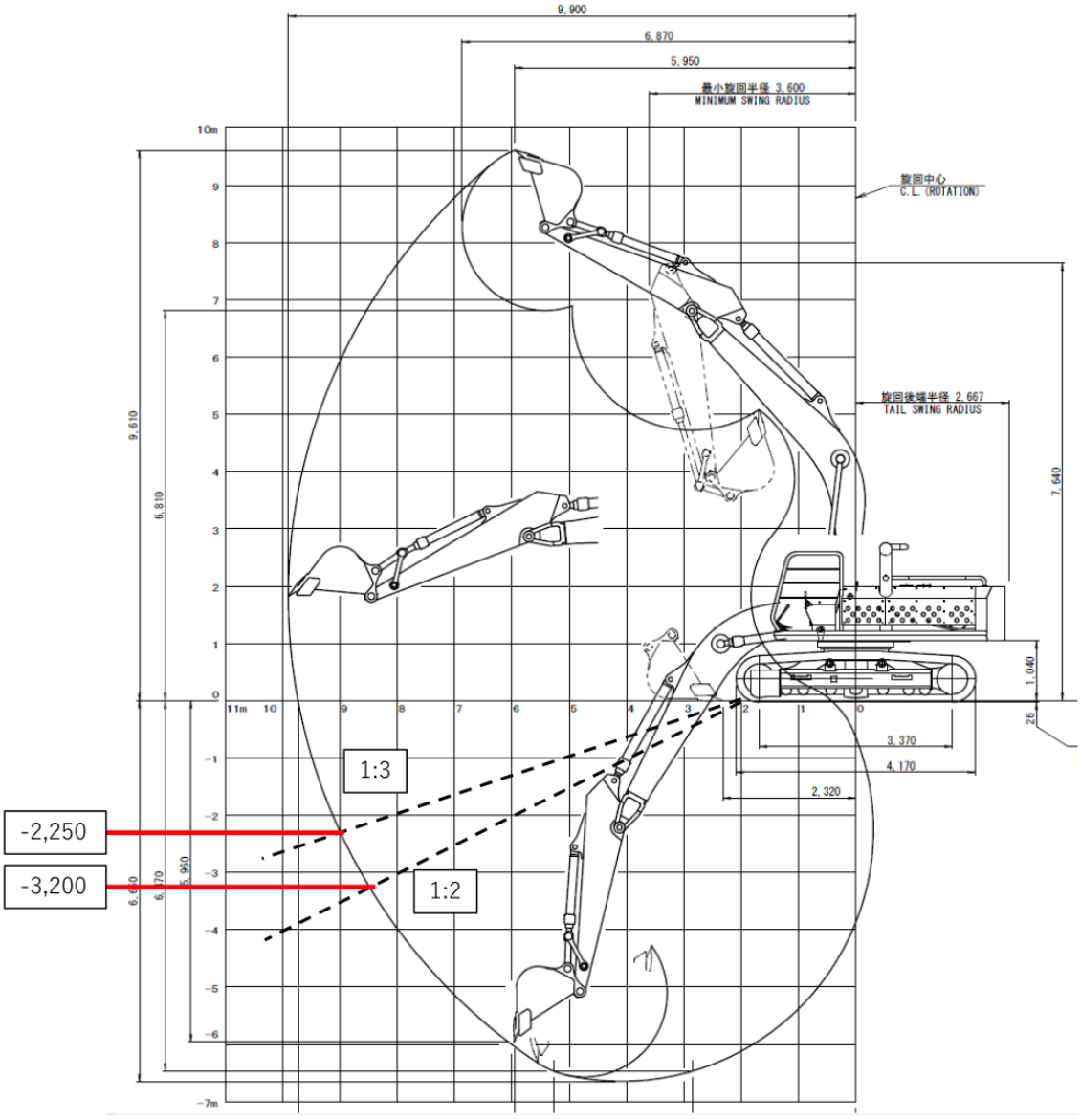


図 5.12　20t 級(0.8 ㎥級)水中バックホウの法面勾配に対する施工可能範囲（深さ方向）

（付録）P.210

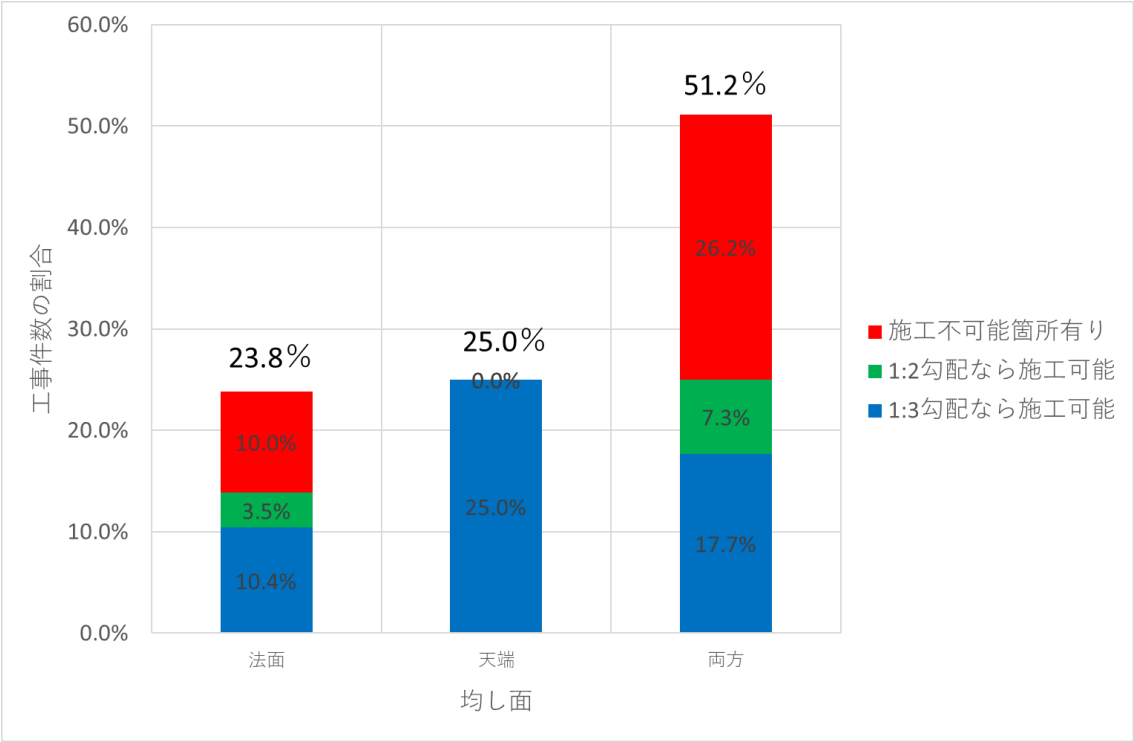


図 5.13　20t 級(0.8 ㎥級)水中バックホウの均し面形状に対する施工可能件数比率

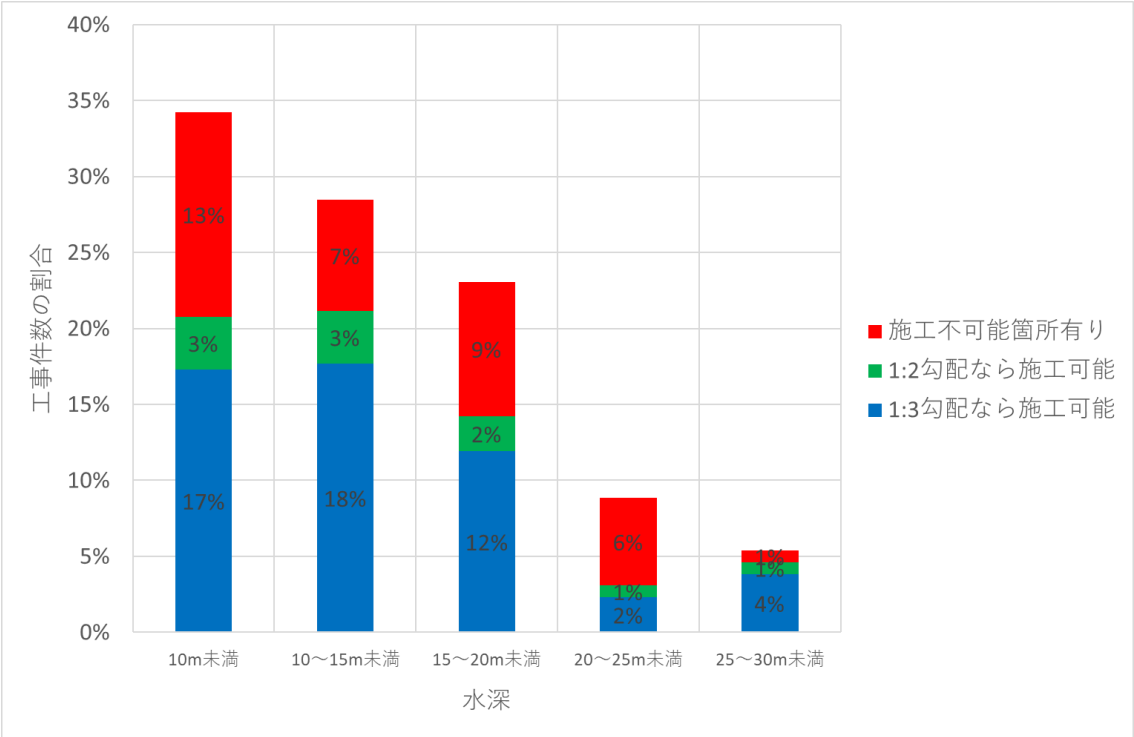


図 5.14　20t 級(0.8 ㎥級)水中バックホウの水深区分毎の施工可能件数比率

（付録）P.211

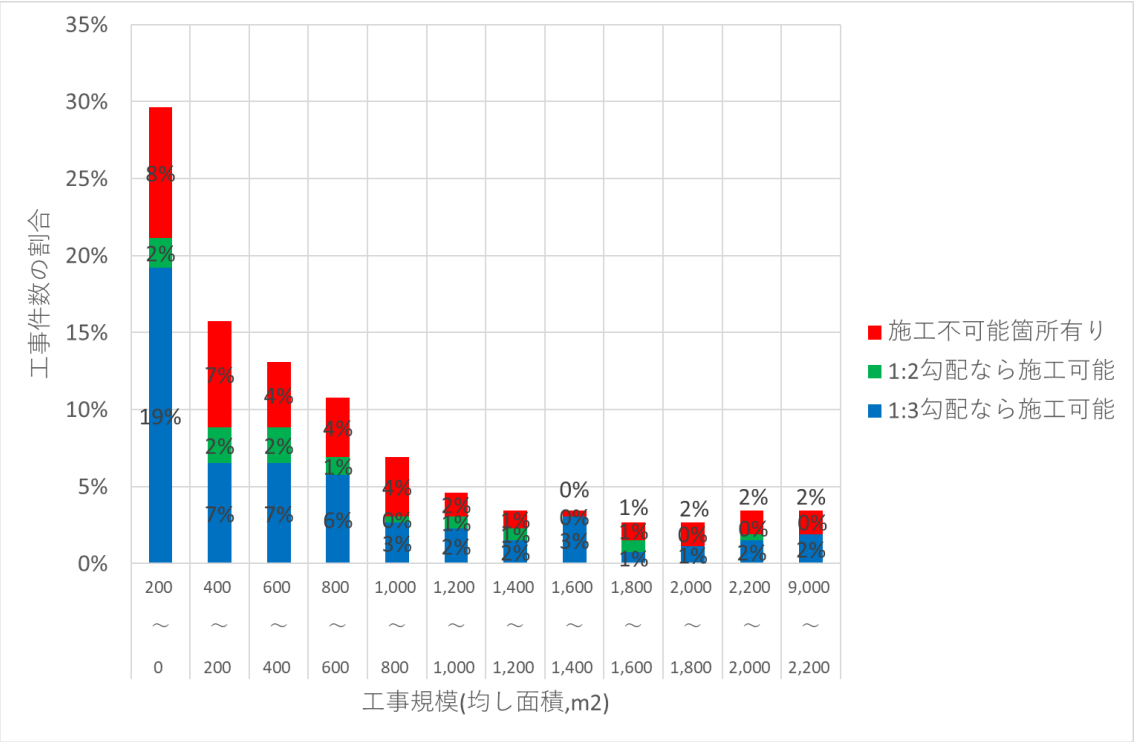


図 5.15　0.8 ㎥(20t)級水中バックホウの施工規模（㎡）区分毎の施工可能件数比率

以上の法面の施工可能範囲についての検討結果より、現状のままでは法面施工の場合にはバケットが届かない範囲があることがわかったため、以下の方策、技術開発が有効と考えられる。

(1) 水中バックホウのロングアーム化　⇒　法面用ロングリーチアーム

水中バックホウによる均し施工では、現状では作業反力を安定して受ける必要があるため、基本的には天端面のような水平な場所で施工を行う必要があるが、上記の検討結果より、法面施工の比率が高く、なおかつ現状のアームでは届かない範囲が多いことも明らかとなったため、水中バックホウをロングアーム化する「法面ロングリーチアーム」については 6.2.4 で後述する。

(2) 法面用の架台　⇒　スライドレール機構

均し施工を行う場合、水中バックホウの機体を水平にすることで作業効率が向上するため、法面上で水中バックホウ機体を水平化できる法面用の架台として、「スライドレール移動機構」については 6.2.2 で後述する。

5.5　水中バックホウが有効活用される条件

5.5.1　全国直轄港湾整備事業の解析結果

5.4 では 2020 年度における全国の直轄港湾整備事業 588 工事から、基礎工の捨石均し工事と、被覆工の被覆石均し工事を抽出しデータの解析を行った結果、以下の各点がわかった。

・捨石荒均し工事は、関東 22%、東北 15%、沖縄 13%、九州 12%、北陸 10%の順に多い。
・捨石本均し工事は、東北 31%、関東 25%、沖縄 14%、九州 12%、中部 8%の順に多い。
・被覆石均し工事は、東北 43%、九州 33%、関東 7%、沖縄 6%、中部 4%の順に多い。

・機械均しは各工種（捨石荒均し、捨石本均し、被覆石均し）とも、陸上部や海岸部などで施工が行われている。
・捨石本均しでは「機械均し機」による天端施工が、比較的水深のある区域でも行われている。
・その他の施工条件では、捨石均し、被覆石均しとも人力施工が大半である。

・捨石均し（荒均し、本均し)、被覆石均しのいずれでも、水深が大きく、供用ランクが大きい（海象条件が悪い）海域でも施工が行われている。
・捨石均し、被覆石均しのいずれでも、法面のみや天端のみだけではなく、法面と天端が混在した形状でも施工が行われている。
・被覆石均しは、捨石均しと比べて、割石の寸法・重量が大きいが、捨石均しと同等もしくはそれ以上に供用ランクが大きく、水深も大きい海域でも施工が行われている。
・供用ランクが大きく（仮に供用ランク６以上)、水深が大きい（仮に水深 15m以上）海域で均し施工が行われている港湾としては、以下の各港があげられる。

捨石均し
　ランク６：細島港（九州地方整備局)、那覇港浦添地区（沖縄総合事務所）
　ランク７：相馬港、小名浜港(東北地方整備局)
　ランク８：久慈港（東北地方整備局)、常陸那珂港（関東地方整備局）
　ランク９：鹿島港（関東地方整備局）
被覆石均し
　ランク６：該当なし
　ランク７：小名浜港(東北地方整備局)
　ランク８：久慈港（東北地方整備局)、常陸那珂港（関東地方整備局）
　ランク９：鹿島港（関東地方整備局）

・細島港や那覇港浦添地区以外は、いずれも東北地方整備局と関東地方整備局の太平洋側で、供用ランクが大きく、水深が大きい施工条件で均し施工が行われており、夏から秋にかけて発生する「うねり」により作業船の稼働が困難になる時期が重なることも類推される。
・上記の供用ランクが大きく、水深が大きい施工条件での施工数量は、概ね以下のとおりである。

捨石均し　：　各供用ランク・施工水深区分ごとの平均として、268～2,025 ㎡
被覆石均し：　各供用ランク・施工水深区分ごとの平均として、232～1,289 ㎡

以上の解析結果より、水中バックホウや水中 ICT 技術のニーズとして、以下の点が類推される。

・捨石均し、被覆石均しを合わせた集計結果より、法面の施工が 28%ある。また法面と天端混在の施工は 47%あり、均し工事では法面施工の比率が高いことがわかった。これまで水中バックホウは、天端、水平な現場での施工が多かったため、法面施工にも対応可能な機構、あるいは法面施工を支援できる仕組み、システム等が求められると考えられる。
・捨石均しよりも被覆石均しの方が、施工水深も供用ランクも大きい海域で施工されていることがわかった。被覆石均しでは、供用ランク６以上の海象条件の悪い場所の施工件数は 49%であり、施工水深が-20m以上の深い場所での施工件数が 24%となっていることもわかった。潜水士の高齢化や要員不足などを勘案すると、この施工領域での水中バックホウ、特に水深の大きい海域では ICT 型水中バックホウのニーズがあると考えられる。
・海象条件が悪く、水深が大きい施工現場は、東北や関東の太平洋側に多く（北から久慈、相馬、小名浜、常陸那珂、鹿島の各港）、夏から秋にかけて発生する「うねり」により作業船の稼働が困難になる時期が重なることも類推され、施工規模としても 230～2,000 ㎡程度あるため、同時期に複数現場の対応が必要になることも想定されるため、ICT 型水中バックホウを複数セット保有しておく必要性も考えられる。

5.5.2　水中バックホウが有効活用される施工条件、施工費用の算定

5.2 では、港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）に準拠して水中バックホウの積算、能力算定について記したが、以下では改めて港湾土木請負工事積算基準等に準拠して、水中バックホウが有効活用される施工条件や、施工能力を算出することとする。

水中バックホウは、市場が広く構築されている陸上用のバックホウと異なり、ベースマシンとしてのバックホウ本体の価格の他に防水対策や動力源の分離、それに伴う油圧系統の改造などが必要であり、陸上機の 8～10 倍程度の価格になってしまう。さらに遠隔操作型とするためには、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。

ここでは港湾土木請負工事積算基準に準拠する歩掛りによって、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。

(1)　捨石均し工事におけるケーススタディ

積算は港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）、船舶および機械器具等の損料算定基準（令和 4 年度改訂版）に準拠する数値によって算出する。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。（あくまでも試算として茨城県の単価を採用した）

積算するにあたり現場条件を設定する必要があるが、無人化施工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 5.14** 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。なお、供用係数ランクは、前述の**表 5.12** と**表 5.13** においてランク 6 以上で最も施工件数の多いランク 8 と設定した。

これらの条件を元に潜水士による施工費用、潜水士搭乗型ならびに遠隔操作型水中バックホウによる施工費用を比較することにより、水中バックホウが有効活用される施工条件を検討することとした。

表 5.14　捨石均し工事の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	潜水士800㎡以上／水中BH2,000㎡未満
海　象　条　件	やや悪い
透　　視　　度	～2m ／ 2～4m ／ 4m～
荒　天　日　数	217日～240日
船舶供用係数	3.2
船員供用係数	2.15

(2)　捨石均し工事における施工費用比較

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船舶および機械器具等の損料算定基準（令和 4 年度改訂版）に準拠したが、遠隔操作型水中バックホウの損料価格については損料算定基準に記載されていないため、遠隔操作型への改造費を 1,500 万円と想定し、それを水中バックホウの基礎価格に付加させて損料価格を算定した。

水中バックホウの損料算出条件を**表 5.15** に示す。

表 5.15　水中バックホウ損料算出条件

規格			(1)	(2)	年間標準			(6)	(7)	残存率	算定表				摘要
					(3)	(4)	(5)				運転時間（または日）当り		供用日当り		
船舶の種類	呼称	機関出力	基礎価格	標準使用年数	運転時間	運転日数	供用日数	維持修理費率	年間管理費率		(8) 損料率	(9) 損料額	(10) 損料率	(11) 損料額	
		(kw)	(千円)	(年)	(時間)	(日)	(日)	(%)	(%)	(%)	($\times 10^{-7}$)	(円)	($\times 10^{-7}$)	(円)	
潜水士搭乗型水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	85,700	7.1	500	100	220	115	10	14	4,450	38,100	7,300	62,600	
遠隔操作型水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	100,700	7.1	500	100	220	115	10	14	4,450	44,800	7,300	73,500	基礎価格に、遠隔操作型への改造費1,500万円追加

船舶および機械器具等の損料算定基準（令和4年度改訂版） 参考-1 に準拠

均し作業に関連する潜水士船の隻数を**表 5.16** に、船舶・機械損料を**表 5.17** にそれぞれ示す。

労務単価については「令和 6 年 3 月から適用する公共工事設計労務単価」と「港湾請負工事積算基準に係る令和 6 年度標準賃金」に準拠する値を**表 5.18** に、燃料単価については「建設物価」（2024 年 1 月）に準拠する値を**表 5.19** にそれぞれ示す。

表 5.16　潜水士船の隻数

名　称	水深12m未満	水深12m～20m未満	水深20m～24m未満	摘　要
潜水士船	1隻	2隻	3隻	

注）水深24m以上の場合は別途検討する。

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） P.3-3-(6) に準拠

表 5.17　船舶・機械損料

名　称	形状寸法	運転時間(日)当り損料	供用1日当り損料
潜水士船(12m 未満)	D270PS型 3～5t吊	(日) ¥13,000	(日) ¥18,400
潜水士船(12～20m未満)	D270PS型 3～5t吊	(日) ¥26,000	(日) ¥36,800
潜水士船(20～24m未満)	D270PS型 3～5t吊	(日) ¥39,000	(日) ¥55,200
クレーン付台船	45～50t吊	(日) ¥16,300	¥85,800
引船	鋼D 450PS型	¥3,570	¥37,100
潜水士搭乗型水中バックホウ	65kW、12.5t	¥38,100	¥62,600
遠隔操作型水中バックホウ	65kW、12.5t	¥46,700	¥76,700

船舶および機械器具等の損料算定基準(令和4年度改訂版)に準拠

表 5.18　労務単価

名　称	労務単価	備　考
潜水世話役	¥52,200	
潜水士	¥52,200	潜水深度10m未満
〃	¥56,600	潜水深度10～20m未満
〃	¥60,900	潜水深度20～30m未満
潜水連絡員	¥29,700	
潜水送気員	¥31,900	
船団長	¥38,400	
高級船員	¥38,400	
普通船員	¥29,400	
特殊作業員	¥25,100	

令和6年3月から適用する公共工事設計労務単価 および
港湾請負工事積算基準に係る令和6年度標準賃金に準拠

表 5.19　燃料単価

名　称	単　価	備　考
A 重油	¥82.0	海上、バージ
軽油(免税)	¥104.9	バージ
軽油(免税)	¥103.9	小型ローリー・パトロール

建設物価(2024年2月)に準拠

表 5.20 は、船舶・機械の運転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 日当りの単価である。なお各船舶・機械の単価基準も港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）に準拠した。

表 5.20　船舶・機械単価（運転一日あたり）

名　称	船舶・機械単価	備　考
潜　水　士　船	¥352,528	潜水深度10m未満
〃	¥705,056	潜水深度10～20m未満
〃	¥1,057,584	潜水深度20～24m未満
クレーン付台船	¥693,036	
引　　船	¥362,636	
潜水士搭乗型 水中バックホウ	¥396,534	
遠隔操作型 水中バックホウ	¥487,754	

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版）に準拠

捨石均しの作業面積は、作業の精度の他に海象条件や透明度、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。（港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）P.3-3-17）

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

A=潜水士船 1 日当り均し面積（㎡/日）

a_i=3.1 ㎡/h（荒均し±10cm）

a_i=4.5 ㎡/h（荒均し±30cm）

E_1=0.00（割石質量 200 kg/個未満）

E_2=0.00（透明度区分普通 1m以上）

E_3=0.00（施工規模区分 800 ㎡以上）

E_4=1.00（潮待ち区分　潮待ち部以外）

E_5=0.87（水深区分-10m未満）

0.70（-10～-15m）

0.78（-15～-20m）

0.72（-20～-25m）

0.57（-25～-30m）

T=6.0h（潜水士船 1 日運転時間）

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。（港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版）P.3-3-(5)）

$A = a_i \times (1.00 + E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \times T$

A=水中バックホウ1日当り均し面積（㎡/日）

a_i=29.0 ㎡/h（荒均し±30㎝）

E_1= 0.00（割石質量200 kg/個未満）

E_2=-0.10（海象条件区分　悪い潮流大）

E_3= 0.10（透視度区分　良好4m以上）

0.00（透視度区分　普通2～4m）

-0.10（透視度区分　悪い2m未満）

E_4=-0.05（施工規模区分　2,000 ㎡未満）

T=5.0ｈ（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100 ㎡当りの施工費用を求める。

表 5.21 には1日当りの捨石均し作業面積の比較を示し、**表 5.22** は100 ㎡当りの捨石均し施工費用の比較を示した。

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、これは積算基準上で水深区分が無く、水深により変化する潜水時間の影響を潜水士船を増やすことで確保しているためである。潜水士船隻数は、水深12m未満は1隻、水深12～20mは2隻、水深20m～24mで3隻となっている。

±30㎝ の均し精度で比較した場合、透明度が高く水深が大きい場合、潜水士搭乗型水中バックホウが有利となっている。しかし透明度が悪く、施工水深 15mより浅い条件では、潜水士船の方が安価となっており、水中バックホウの普及のためには透明度の悪い現場条件でも、視認性を補える形の技術開発が求められることがわかる。

表 5.21　一日当りの捨石均し作業面積（㎡）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	潜水士搭乗型水中バックホウ（±30cm）		
	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	16.2	23.5	108.8	123.3	137.8
−10m～−15m	13.0	18.9	↑	↑	↑
−15m～−20m	14.5	21.1	↑	↑	↑
−20m～−25m	13.4	19.4	↑	↑	↑
−25m～−30m	10.6	15.4	↑	↑	↑

表 5.22　潜水士船と潜水士搭乗型水中バックホウの 100 ㎡当り捨石均し施工費用比較（円）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	潜水士搭乗型水中バックホウ（±30cm）		
	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	¥1,985,000	¥1,368,400	¥1,605,200	¥1,416,400	¥1,267,400
−10m～−15m	¥2,473,600	¥1,701,400	¥1,900,800	¥1,677,200	¥1,500,700
−15m～−20m	¥2,907,600	¥1,998,100	¥1,900,800	¥1,677,200	¥1,500,700
−20m～−25m	¥3,146,300	¥2,173,200	¥2,196,300	¥1,938,000	¥1,734,100
−25m～−30m	¥3,977,400	¥2,737,700	¥2,196,300	¥1,938,000	¥1,734,100

表 5.23 には 100 ㎡あたりの潜水士船と、遠隔操作型水中バックホウによる施工費用の比較を示す。

潜水士搭乗型水中バックホウの場合と同じく、±30cm の均し精度で比較した場合、透明度が高く水深が大きい場合、遠隔操作型水中バックホウが有利となっているが、透明度が悪く、施工水深 15mより浅い条件では、潜水士船の方が安価となっており、遠隔操作型水中バックホウの普及のためには、潜水士搭乗型水中バックホウと同様に、透明度の悪い現場条件でも、視認性を補える形の技術開発が求められることがわかる。

表 5.23　潜水士船と遠隔操作型水中バックホウの 100 ㎡当り捨石均し施工費用比較（円）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	遠隔操作型水中バックホウ（±30cm）		
	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	¥1,985,000	¥1,368,400	¥1,689,100	¥1,490,400	¥1,333,600
−10m～−15m	¥2,473,600	¥1,701,400	¥1,984,600	¥1,751,200	¥1,566,900
−15m～−20m	¥2,907,600	¥1,998,100	¥1,984,600	¥1,751,200	¥1,566,900
−20m～−25m	¥3,146,300	¥2,173,200	¥2,280,200	¥2,012,000	¥1,800,300
−25m～−30m	¥3,977,400	¥2,737,700	¥2,280,200	¥2,012,000	¥1,800,300

(3)　被覆石均し工事におけるケーススタディ

被覆石均し工事についても、(1)で示した捨石均し工事と同様に、無人化施工が求められる海象条件の悪い海域での利用を想定し、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 5.24** 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。

これらの条件を元に潜水士による施工費用、潜水士搭乗型ならびに遠隔操作型水中バックホウによる施工費用を比較することにより、水中バックホウが有効活用される施工条件を検討することとした。

表 5.24　被覆石均し工事の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	被覆均し（±30cm）
割　石　質　量	200～1,000kg/個
施　工　規　模	潜水士800㎡以上／水中BH2,000㎡未満
海　象　条　件	やや悪い
透　　視　　度	～2m ／ 2～4m ／ 4m～
荒　天　日　数	217日～240日
船舶供用係数	3.2
船員供用係数	2.15

(4)　被覆石均し工事における施工費用比較

捨石均し工事の場合と同様に、港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版)、船舶および機械器具等の損料算定基準（令和 4 年度改訂版）に準拠する数値によって施工費用を算出する。

水中バックホウの損料算定条件（**表 5.15**)、潜水士船の隻数（**表 5.16**)、船舶・機械損料（**表 5.17**)、労務単価（**表 5.18**)、燃料単価（**表 5.19**)、船舶・機械単価（**表 5.20**）は、捨石均し工事の場合と同じである。

被覆石均しの作業面積は、作業の精度の他に海象条件や透明度、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。(港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）P.3-5-10)

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

A=潜水士船1日当り均し面積（㎡/日）

a_i= 2.6 ㎡/h（被覆石均し±10㎝）

a_i= 3.9 ㎡/h（被覆石均し±30㎝）

E_1=-0.05（割石質量200～1,000 kg/個未満）

E_2= 0.00（透明度区分普通1m以上）

E_3= 0.00（施工規模区分800 ㎡以上）

E_4= 1.00（潮待ち区分　潮待ち部以外）

E_5= 0.87（水深区分-10m未満）

0.70（-10～-15m）

0.78（-15～-20m）

0.72（-20～-25m）

0.57（-25～-30m）

T=6.0h（潜水士船1日運転時間）

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被覆石均し面積計算式である。（港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版）P.3-3-(5)）

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

A=水中バックホウ1日当り均し面積（㎡/日）

a_i= 15.0 ㎡/h（被覆石均し±30㎝）

E_1=-0.10（割石質量200 kg/個以上）

E_2=-0.10（海象条件区分　悪い潮流大）

E_3= 0.10（透視度区分　良好4m以上）

0.00（透視度区分　普通2～4m）

-0.10（透視度区分　悪い2m未満）

E_4=-0.05（施工規模区分　2,000 ㎡未満）

T=5.0h（運転時間）

表5.25には1日当りの被覆石均し作業面積の比較を示し、**表5.26**は100 ㎡当りの被覆石均し施工費用の比較を示した。

捨石均しの場合と同様に、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、これは積算基準上で水深区分が無く、水深により変化する潜水時間の影響を潜水士船を増やすことで確保しているためである。潜水士船隻数は、水深12m未満は1隻、水深12～20mは2隻、水深20m～24mで3隻となっている。

±30cm の均し精度で比較した場合、ほとんどの条件で、潜水士搭乗型水中バックホウよりも潜水士船による施工の方が有利となっており、透視度 4m以上で水深 25m以上の場合に、潜水士搭乗型水中バックホウと潜水士船の施工費用が若干近い金額となっている。

表 5.27 には 100 ㎡あたりの潜水士船と、遠隔操作型水中バックホウによる施工費用の比較を示す。±30cm の均し精度で比較した場合、すべての条件で、遠隔操作型水中バックホウよりも潜水士船による施工の方が有利となっている。

表 5.25　一日当りの被覆石均し作業面積（㎡）

	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	潜水士搭乗型水中バックホウ（±30cm）		
水深	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	12.9	19.3	48.8	56.3	63.8
−10m～−15m	10.4	15.6	↑	↑	↑
−15m～−20m	11.6	17.3	↑	↑	↑
−20m～−25m	10.7	16.0	↑	↑	↑
−25m～−30m	8.4	12.7	↑	↑	↑

表 5.26　潜水士船と潜水士搭乗型水中バックホウの 100 ㎡当り被覆石均し施工費用比較（円）

	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	潜水士搭乗型水中バックホウ（±30cm）		
水深	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	¥2,746,400	¥1,835,600	¥3,768,600	¥3,266,300	¥2,882,400
−10m～−15m	¥3,406,600	¥2,271,000	¥4,494,400	¥3,895,600	¥3,437,700
−15m～−20m	¥4,126,000	¥2,766,600	¥4,494,400	¥3,895,600	¥3,437,700
−20m～−25m	¥4,473,100	¥2,991,300	¥5,220,400	¥4,524,900	¥3,993,000
−25m～−30m	¥5,697,800	¥3,768,600	¥5,220,400	¥4,524,900	¥3,993,000

表 5.27　潜水士船と遠隔操作型水中バックホウの 100 ㎡当り被覆石均し施工費用比較

（円）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	遠隔操作型水中バックホウ（±30cm）		
	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
−0m～−10m	¥2,746,400	¥1,835,600	3,993,000	3,388,400	2,991,000
−10m～−15m	¥3,406,600	¥2,271,000	4,635,200	4,017,700	3,545,400
−15m～−20m	¥4,126,000	¥2,766,600	4,635,200	4,017,700	3,545,400
−20m～−25m	¥4,473,100	¥2,991,300	5,361,200	4,647,000	4,100,700
−25m～−30m	¥5,697,800	¥3,768,600	5,361,200	4,647,000	4,100,700

以上のことから、被覆石均しについては、積算基準に準拠した積算上では、水中バックホウよりも潜水士船による施工が有利であることがわかるが、遠隔操作型水中バックホウでは、水中マシンガイダンスや箱庭システムのような ICT 型水中施工技術を取り入れることによって、潜水士作業をまったくなくすことは現実的ではないにしても、潜水士の作業負担や潜水士の作業量、施工水深区分に応じた潜水士船の隻数を減らすことは可能と思われる。

また、ICT 型水中施工技術を取り入れることによって、現場海域の透明度にも左右されずに施工可能になるものと思われる。

(5)　水中バックホウが有効活用される条件

ICT 型水中施工技術を取り入れることによって、潜水士の作業負担や潜水士の作業量、施工水深区分に応じた潜水士船の隻数を減らせると想定して、仮に潜水士船の隻数を**表 5.28** のように水深区分によらず一定＝1 隻と仮定し、現場海域の透視度に左右されず潜水士搭乗型水中バックホウの透視度 2～4m未満相当の作業面積が確保できると仮定した場合の、ICT 型水中バックホウによる被覆石均しの施工費用を算定する。

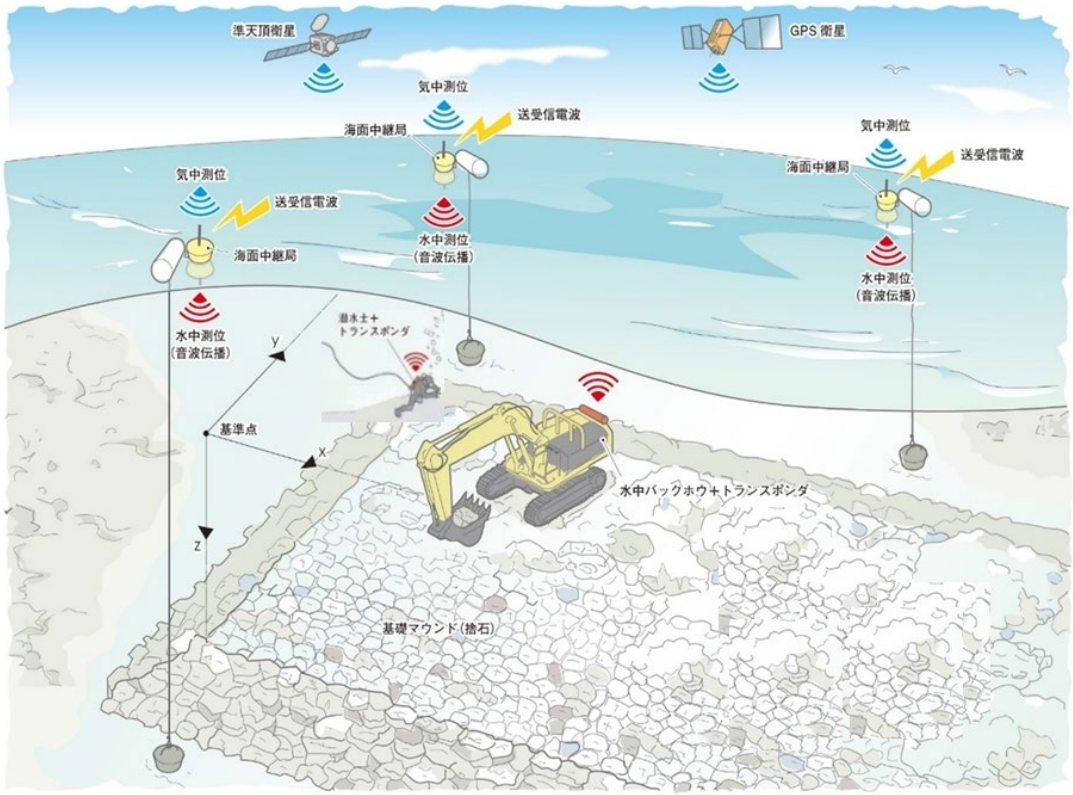


図 5.16　ICT 型水中バックホウによる均し施工イメージ

表 5.28　ICT 型水中バックホウによる被覆石均し施工の潜水士船隻数（仮定）

名　称	水深12m未満	水深12m～20m未満	水深20m～24m未満	摘　要
潜水士船	1隻	1隻	1隻	

注）水深24m以上の場合は水深20m～24m未満に準じる。

港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版） P.3-3-(6) に準拠

表 5.29　ICT 型水中バックホウによる被覆石均し作業面積(㎡)（仮定）

水深	潜水士船（±10cm） 透明度1～2m	潜水士船（±30cm） 透明度1～2m	ICT型水中バックホウ（±30cm） 透視度2m未満	 透視度2～4m	 透視度4m以上
−0m～−10m	12.9	19.3	→	56.3	←
−10m～−15m	10.4	15.6	↑	↑	↑
−15m～−20m	11.6	17.3	↑	↑	↑
−20m～−25m	10.7	16.0	↑	↑	↑
−25m～−30m	8.4	12.7	↑	↑	↑

ICT型水中技術の導入により、透視度によらず能力一定と想定し、
潜水士搭乗型水中バックホウの透視度2～4m相当の施工能力を想定した。

ICT 型水中バックホウおよび関連機器の損料条件および損料は**表 5.30** のように仮定する。

なお、浮上式音響測位装置については、現段階ではまだ損料算定できるほどの費用データの蓄積がないため、損料算定条件や施工費用の算定には見込まず、**表 5.30** に示す市販の USLB 方式の水中測位装置の損料（仮定）を見込んだ

表 5.30　ICT 型水中バックホウおよび関連機器の損料算定条件（仮定）

規格			(1)	(2)	年間標準			(6)	(7)	残存率	算定表				摘要
					(3)	(4)	(5)				運転時間（または日）当り		供用日当り		
船舶の種類	呼称	機関出力	基礎価格	標準使用年数	運転時間	運転日数	供用日数	維持修理費率	年間管理費率		(8) 損料率	(9) 損料額	(10) 損料率	(11) 損料額	
		(kw)	(千円)	(年)	(時間)	(日)	(日)	(%)	(%)	(%)	(×10⁻⁷)	(円)	(×10⁻⁷)	(円)	
潜水士搭乗型水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	85,700	7.1	500	100	110	45	9	14	4,450	38,100	7,300	62,600	船舶機械損料算定基準 参考1に準拠
遠隔操作型水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	100,700	7.1	500	100	110	45	9	14	4,450	44,800	7,300	73,500	潜水士搭乗型基礎価格に、遠隔操作型への改造費1,500万円追加
ICT型水中バックホウ	電動油圧式 88PS型 質量12.5t (0.5㎥級)	65	125,700	7.1	500	100	110	45	9	14	4,450	55,900	7,300	91,800	遠隔操作型基礎価格に、ICT型への改造費2,500万円追加
水中測位装置	USBL方式		8,000	7.7			190	25	2	7			9,118	7,300	流向・流速計(海中係留型)準用

船舶および機械器具等の損料算定基準（令和4年度改訂版） 船17,参考1,参考5 に準拠

表 5.31 には 100 ㎡あたりの潜水士船と、ICT 型水中バックホウによる施工費用の比較を示す。±30cm の均し精度で比較した場合、水深 25m よりも深い区域で、潜水士船よりも ICT 型水中バックホウによる施工の方が施工費用として有利となる可能性があることがわかる。

表 5.31　潜水士船と ICT 型水中バックホウの 100 ㎡当り被覆石均し施工費用比較（円）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	ICT型水中バックホウ（±30cm）		
	透明度1～2m	透明度1～2m	透視度2m未満	透視度2～4m	透視度4m以上
-0m～-10m	¥2,746,400	¥1,835,600	→	¥3,443,900	←
-10m～-15m	¥3,406,600	¥2,271,000	→	¥3,443,900	←
-15m～-20m	¥4,126,000	¥2,766,600	→	¥3,443,900	←
-20m～-25m	¥4,473,100	¥2,991,300	→	¥3,443,900	←
-25m～-30m	¥5,697,800	¥3,768,600	→	¥3,443,900	←

ICT型水中技術の導入により、透視度によらず能力一定と想定し、
潜水士搭乗型水中バックホウの透視度2～4m相当の施工能力を想定した。

最後に、被覆石均しの施工水深区分別に、ICT 型水中バックホウによる施工費用が、潜水士船の施工費用と同額となるための、ICT 型水中バックホウの施工能力を逆算した結果を**表 5.32** に示す。

表 5.32　潜水士船と ICT 型水中バックホウの施工費用が同額となるための施工能力（㎡/日）

水深	潜水士船（±10cm）	潜水士船（±30cm）	ICT型水中バックホウ（±30cm）
	透明度1～2m	透明度1～2m	水深別に潜水士船と同額となる施工能力
-0m～-10m	¥2,746,400	¥1,835,600	112.6 ㎡/日
-10m～-15m	¥3,406,600	¥2,271,000	91.0 ㎡/日
-15m～-20m	¥4,126,000	¥2,766,600	74.7 ㎡/日
-20m～-25m	¥4,473,100	¥2,991,300	68.9 ㎡/日
-25m～-30m	¥5,697,800	¥3,768,600	54.9 ㎡/日

ICT型水中技術の導入により、透視度によらず能力一定と想定した。

第６章　衛星測位を活用した高度な遠隔操作・水中 ICT 施工の将来展望

6.1　適用が望まれる工種

6.1.1　水中バックホウの全国的な需要解析結果

第５章では、2020 年度における全国の直轄港湾整備事業 588 工事から、基礎工の捨石均し工事と、被覆工の被覆石均し工事を抽出し、水中バックホウの全国的な需要解析を行った。

その結果からは、以下の各点がわかった。

・捨石均し、被覆石均しを合わせた集計結果より、法面の施工が 28%ある。また法面と天端混在の施工は 47%あり、均し工事では法面施工の比率が高いことがわかった。これまで水中バックホウは、天端、水平な現場での施工が多かったため、法面施工にも対応可能な機構、あるいは法面施工を支援できる仕組み、システム等が求められると考えられる。

・捨石均しよりも被覆石均しの方が、施工水深も供用ランクも大きい海域で施工されていることがわかった。被覆石均しでは、供用ランク６以上の海象条件の悪い場所の施工件数は 49%であり、施工水深が-20m以上の深い場所での施工件数が 24%となっていることもわかった。潜水士の高齢化や要員不足などを勘案すると、この施工領域での水中バックホウ、特に水深の大きい海域では ICT 型水中バックホウのニーズがあると考えられる。

・海象条件が悪く、水深が大きい施工現場は、東北や関東の太平洋側に多く（北から久慈、相馬、小名浜、常陸那珂、鹿島の各港）、夏から秋にかけて発生する「うねり」により作業船の稼働が困難になる時期が重なることも類推され、施工規模としても 230～2,000 ㎡程度あるため、同時期に複数現場の対応が必要になることも想定されるため、ICT 型水中バックホウを複数セット保有しておく必要性も考えられる。

水中バックホウの必要台数（最大）については、以下のように試算する。

①水中バックホウ１台の年間運転日数

水中バックホウの年間運転日数は、船舶および機械器具等の損料算定基準（令和 4 年度改訂版）によれば年間標準運転日数 100 日である。

②水中バックホウ１台の年間作業面積

・被覆石均しの場合

被覆石均し精度±30㎝の場合、港湾土木請負工事積算基準（令和 5 年度改訂版）より、１時間当り標準均し能力は 15.0 ㎡/h であり、標準作業時間は 5h/日である。年間作業面積は以下のように算定できる。

100 日×15.0 ㎡/h×5h/日＝7,500 ㎡/日

・捨石本均しの場合

本均し精度±10㎝の場合、港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版）では1時間当り標準均し能力の規定はないが、ここではあくまでも試算として15.0㎡/hとすれば、標準作業時間は5h/日として、年間作業面積は以下のように算定できる。

100日×15.0㎡/h×5h/日＝7,500㎡/日

・捨石荒均しの場合

荒均し精度±30㎝の場合、港湾土木請負工事積算基準（令和5年度改訂版）より、1時間当り標準均し能力は29.0㎡/hであり、標準作業時間は5h/日なので、年間作業面積は以下のように算定できる。

100日×29.0㎡/h×5h/日＝14,500㎡/日

③均し施工の年間施工面積

2020年度の場合として、全国の直轄港湾整備事業の各工種ごとの年間施工面積は、**表6.1**に示すとおりであり、それから求められる年間必要台数（最大の場合の想定値）も表中に合わせて示す。なお、この数字はあくまで作業面積÷単位日数あたりの作業能力の単純計算で算出したものであり、荒天や現場移動のための期間、同時期に工事があった場合等は考慮していないため、参考程度に留めるものとしたい。

表6.1　水中バックホウ1台当りの施工能力と、2020年施工面積から算定した最大必要台数（参考値）

施　工　区　分	被覆石均し	捨石本均し	捨石本均し	合　計
施　工　精　度	（±30cm）	（±10cm）	（±30cm）	
年間作業日数(日/台)	100	100	100	
均し能力(㎡/h･台)	15	15	29	
日当り作業時間(h/日･台)	5	5	5	
日当り作業面積(㎡/日･台)	75	75	145	
年間作業面積(㎡/年･台)	7,500	7,500	14,500	
2020年度施工面積(㎡/年)	51,418	44,120	109,443	204,981
年間必要台数(台/年)	7	6	8	21

6.1.2　水中バックホウが有効活用される施工条件、施工費用

次に、港湾土木請負工事積算基準や、船舶および機械器具等の損料算定基準に準拠して、水中バックホウが有利となる施工条件などについて、機械化施工のコスト面からみた普及の可能性の検討を行った。

その結果からは、以下の各点がわかった。

・捨石均し施工については、透明度が高く水深が大きい場合、潜水士搭乗型や遠隔操作型の水中バックホウが有利となっている。しかし透明度が悪く、施工水深 15mより浅い条件では、潜水士船の方が安価となっており、水中バックホウの普及のためには透明度の悪い現場条件でも、視認性を補える形の技術開発が求められる。
・被覆石均し施工については、積算基準に準拠した積算上では、水中バックホウよりも潜水士船による施工が有利であることがわかったが、遠隔操作型水中バックホウでは、水中マシンガイダンスや箱庭システムのような ICT 型水中施工技術を取り入れることによって、潜水士作業をまったくなくすことは現実的ではないにしても、潜水士の作業負担や潜水士の作業量、施工水深区分に応じた潜水士船の隻数を減らすことは可能と思われる。
・ICT 型水中施工技術を取り入れることによって、潜水士の作業負担や潜水士の作業量、施工水深区分に応じた潜水士船の隻数を減らせると想定して、仮に潜水士船の隻数を水深区分によらず一定＝1 隻と仮定した場合の、ICT 型水中バックホウによる被覆石均しの施工費用を算定した結果からは、透視度 2m以上で水深 25mよりも深い区域で、潜水士船よりも ICT 型水中バックホウによる施工の方がコスト的に有利となることがわかった。
・覆石均しの施工水深 20mで、ICT 型水中バックホウによる施工費用が、潜水士船と施工費用が同額となるためには、ICT 型水中バックホウの施工能力を逆算すると、68.9 ㎡/日となる。

6.1.3　民間各社へのヒアリング結果

上記と並行して、港湾工事に携わる民間建設会社に水中 ICT 建設機械、水中バックホウ、浮上式音響測位装置についてのヒアリングを行い、以下の結果が得られた。

（設問１）水中 ICT 技術等の取組状況について
・水中バックホウの ICT 化について、各社が独自に開発することはあまりされていない。
・ソナー等の周辺技術や要素技術については、独自の取り組みが始まっている。
・ソナー等の視認技術のニーズは、濁った場所での使用の可能性があるということと考えられる。
・国や研究所に、各社が自由に使えるベースシステムの開発やコスト的な配慮が期待されている。

（設問２）水中 ICT 建設機械の実工事への使用実績について
・水中バックホウだけでなく、均し機などの機械で ICT 化は進められている。
・水中施工の ICT 化の必要性は各社が認識している。

（設問３）水中バックホウの国内の港湾工事における実運用について
・水中で不可視な状況での利用について、安全確保は重要である。
・潜水士と水中バックホウの位置関係や機体の安定に不安がある（技術開発が必要)。

（設問４）浮上式音響測位装置に関する技術的課題
・電源装置の稼働時間や、入替作業、他船舶との干渉などの課題がある。
・荒天時の回収方法あるいは残置可能な構造、漂流対策、故障時のバックアップなど、技術的に解決すべき課題がある。
・陸上の GNSS と同様に、水中施工のインフラとして公的な整備が期待されている。

6.1.4　適用が望まれる工種と技術開発の方向性

6.1.1～6.1.3 で示した第５章の解析結果や、民間各社へのヒアリング結果から、水中バックホウの適用が望まれる工種、現場条件としては以下が挙げられる。

・適用工種としては被覆石均しで、捨石均しにも従来以上に展開可能となる。
・現場条件としては、透明度が低い（視認性が悪い)、海象条件が悪い（供用ランク６以上)、水深が大きい（水深 15m以上)、主に太平洋側の港湾工事現場。
・付帯する条件としては、法面施工にも対応可能であること。

透明度も含めた海象条件が悪く、水深があり、法面施工も含まれる被覆石均しに対して、今後の技術開発ニーズがあるものと考える。その場合の技術開発の方向性として以下が考えられる。

・水中バックホウの移動機構を補助、改善できる技術（吊り下げ式、スライド式、水平保持、ロングアーム等)。
・水中での視認性を補助、改善できる技術。
・被覆石、被覆ブロックに対応可能なアタッチメント。

6.2　技術開発が望まれる項目

前節の適用が望まれる工種において、法面や不陸のある状況、被覆ブロックなどは通常の機構やバケットでは作業を行うことができないため、効率的な作業のための機構開発や専用アタッチメント開発が必要である。その他、遠隔操作時の認識能力が目視に比べて劣化するため、移動時の事故リスク増加や作業効率の低下が存在するものと考えられる。

また水中バックホウ本体を対象とするだけでなく、当日の作業前の状況確認や投入場所の計測といった作業支援のための技術開発も重要な項目である。

本節では、水中バックホウの効率的な作業のために必要と考えられる機能や技術開発項目について、アイディア等を取りまとめるものとする。

6.2.1　吊り下げ移動式水中バックホウ

水中バックホウを遠隔操縦で稼働させる際、被覆石や捨石の不陸状況などを正確に認識する事が出来ない水中環境下では、機体本体の転倒のリスクが存在する。ICT 型水中バックホウでは、断面形状を計測する Kongsberg 社製 M3 プロファイルソナー（以下：M3 ソナー）によるマウンド形状認識や、音響測位による自機の位置検出を行うことができるが、M3 ソナーは上部旋回体の旋回運動によりスキャンするため、移動中の更新が不可能である。また音響測位についても、多重反射等による測位誤差や欠測による更新時間が遅延する可能性があり、リアルタイム性と正確性を改善しなければ、長距離移動を行うことは危険と考えられる。

その対策として水中バックホウを揚重するクレーンから外さずに吊ったままにしておくことを試験的に実施した。その際の不具合として、揚重スリングと機械本体にシャックルで連結したものが、起重機の波浪による揺れで配管等に衝突する事象が発生した。船の動揺によるワイヤスリングの弛みをキャンセルする機構、吊り下げ中のバックホウ方向の制御、バックホウ支援台船の方位計測、クレーンフック 3 次元座標の計測機構が必要と考えられる。

6.2.2　スライドレール移動機構

均し作業を行う場合、水中バックホウの機体を水平にすることで、その作業効率は向上する。これは機体がロール方向に傾斜していた場合、旋回動作により刃先の高さが変化するため、方向に応じて高さを微調整する必要があるためである。また、傾斜だけでなくクローラ移動により自機の高さが変化するため、正確な水深計測を常に行う必要がある。

このような課題に対し、直動伸縮のジャッキを脚としたスライドレール移動機構（**図 6.1**）を提案する。このジャッキ高さを調整することで常に上部旋回体を水平に保つことができるほか、スライドレールの範囲で、機体高さが変位せずに移動することも可能となる。また天端面だけでなくジャッキを安定的に固定することで法面斜面への対応（**図 6.2**）等も可能であると考えられる。なお、架台の移動についてはクローラ以外にも前項の吊り下げ方式を併用することで、不陸の影響を受けにくく、転倒や法肩からの転落の可能性も無くなる。

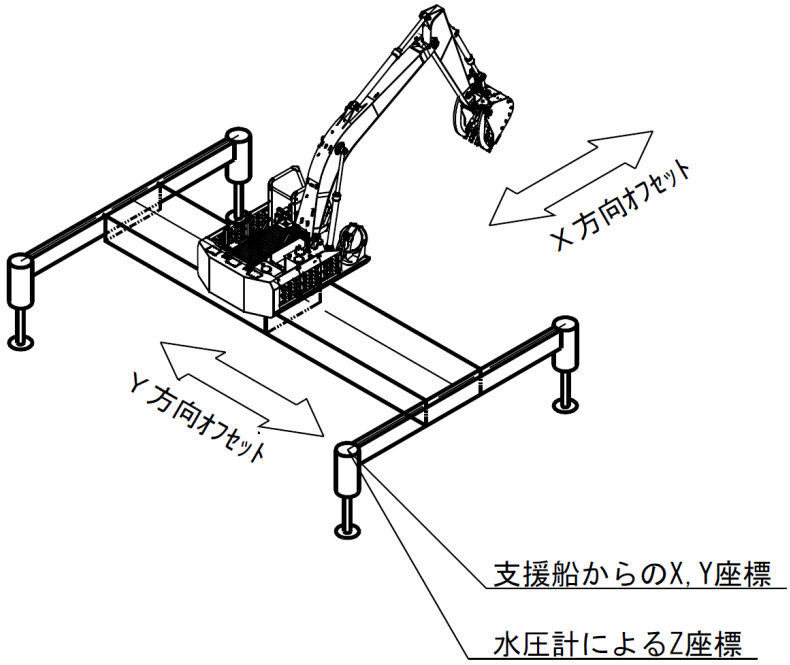


図 6.1　スライドレール機構

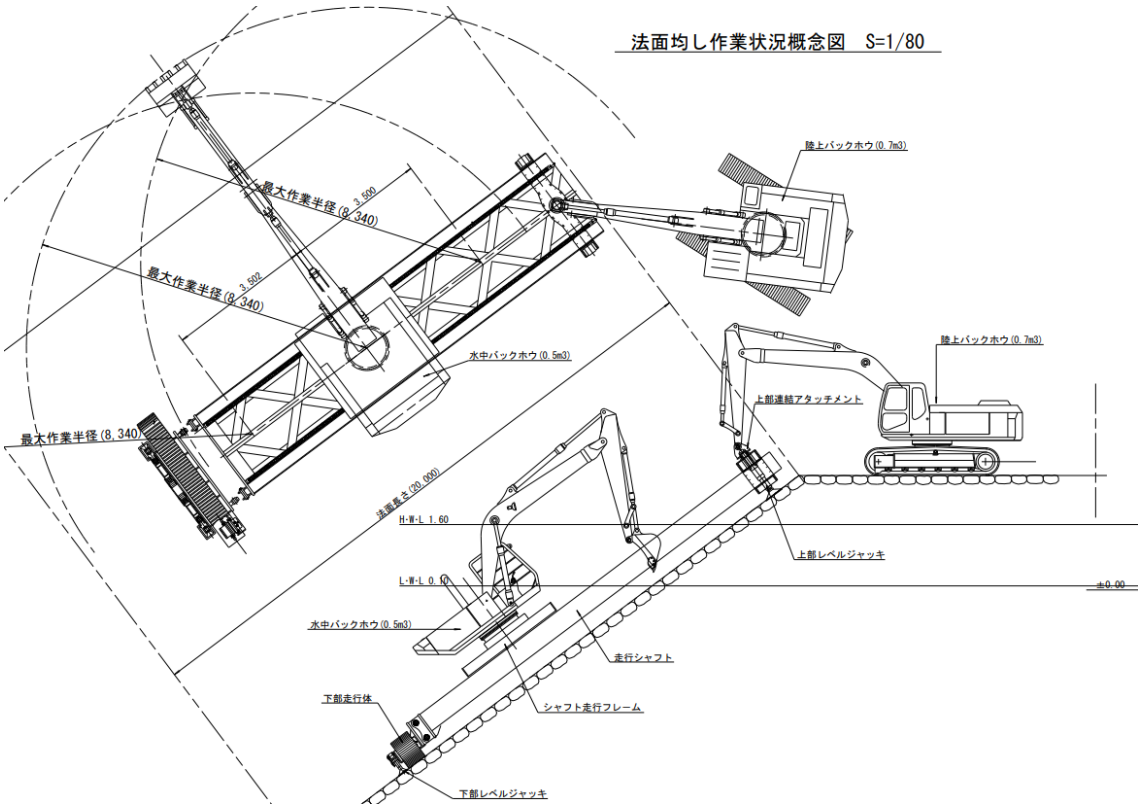


図 6.2　法面均し作業にスライドレール架台を用いる機構（案）

6.2.3　水平ジンバル機構

前項のスライドレール移動機構と同様に、機体の傾斜を水平に保つ水平ジンバル機構を、旋回体部に設けることで、機体を水平に保つことが可能となる。1 軸ではあるが、急傾斜地での作業を行うロッククライミングバックホウ（**図 6.3**）や自衛隊所有の機体（**図 6.4**）が存在しており、このような機構を応用し、2 軸の自由度を持たせることで実現可能と考えられる。

図 6.3　ロッククライミングバックホウによる急傾斜地の施工

（引用：高所機械施工協会／大昌建設株式会社
https://www.nerc.or.jp/uploads/files/17_%E5%A4%A7%E6%98%8C%E5%BB%BA%E8%A8%AD.pdf
（参照 2024-07-29））

図 6.4　自衛隊所有機体のチルト機構

6.2.4　法面用ロングリーチアーム

水中バックホウによる作業では、作業反力を安定して受ける必要があるため、基本的に天端面の水平になっている場所で作業を行う必要がある。しかし、法面均しや被覆石の設置均し作業など、斜面を対象とした作業も存在する。この場合、天端面に存在する水中バックホウから、アームが届く範囲でのみの作業となる。

この斜面への対応範囲を広げるため、アームをロングリーチ化（**図 6.5**）することや、テレスコピック型に変更することが考えられる。

ただしアームを延伸した場合、先端部の掘削力や楊重は減少するため、旋回半径に応じた最大力の表示や、作業に応じたアタッチメントによる補助等の検討が必要である。

図 6.5　陸上ロングリーチバックホウによる水中法面への作業

6.2.5　簡易水中地形確認ソナー

ICT 型水中バックホウでは、M3 ソナーを使って機体周辺のマウンド形状を計測することが可能である。M3 ソナーはプロファイラであり、1 断面しか計測できないが、マシンガイダンスで使用している傾斜センサや方位センサの情報を加えることで、3D 情報として計測可能となる。このような水中部計測センサを流用することで、大掛かりなサイドスキャンソナー等の測量を行うことなく、作業直前にマウンド面の現状を把握することが可能であると考えられる。現状では水中バックホウを降ろす場所に石などの突起がない事を潜水士が実際に潜って確認しており、もしあった場合は台船を再度移動する必要がある。

簡易水中地形確認ソナーの機構としては、**図 6.6** のように小型船舶や台船の縁や、作業近傍の岸壁等から単管パイプ等で M3 ソナーを下し、旋回角度や対地角度のセンサ情報から 3D モデルを構築するものである。回転運動等は作業員の手仕事でも可能である。

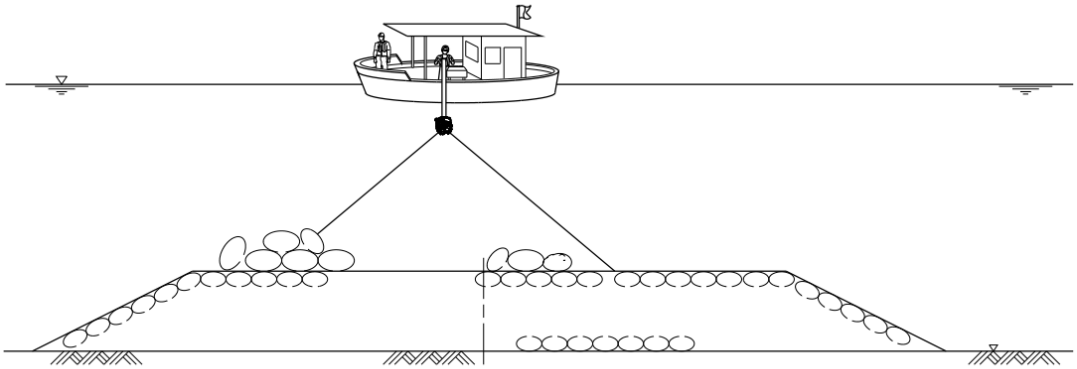


図 6.6　M3 ソナーを使った簡易水中地形ソナーのイメージ

6.2.6　ミーティング装置の開発

港湾工事では、段取りや作業手順について打合せするため事前に潜水士が下見を行う場合が存在する。

しかし濁った海域では写真や動画等で撮影できる範囲が限定的であり、口頭あるいは手書きスケッチで状況を説明するため、認識に齟齬や相違が発生する場合がある.

さらに経験の少ない作業者や潜水士は、通常の 2 次元の土木図面から実際の形状を認識することに時間がかかり、かつ、間違う可能性も存在する。

このような課題に対し、三次元形状のコンピュータグラフィクスで状況を共有することができれば、作業の効率化に大きく寄与するものと考えられる。

前項の簡易水中地形確認ソナーが、リアルタイムまたは数分の遅延で可視化した結果が出力される表示システムであれば、作業当日の事前事後ミーティング機材として活用できるほか、船上から直感的に水中の状況を指示できる等、ICT 型潜水作業としての応用も考えられる。

6.2.7　被覆ブロック用自動玉掛けアタッチメント

水中バックホウによる既存作業の一つとして、被覆石均しがある。これは 500kg 程度の割石を爪付きのロックバケットにより把持して移動させる作業であり、潜水士が手作業で玉掛けしてクレーン台船で移動するより非常に効率的であるほか、潜水士の挟まれ事故等の防止に役立っているものと考えられる。

同様の作業として、被覆ブロック設置があるが、現在は潜水士の玉掛け誘導により正確な位置に設置している。ただし、陸上の建設機械では、**図 6.8** のようなブロック自動玉掛けアタッチメントが存在する。被覆ブロックが専用の形状となるが、バケット角の制御により斜面への設置も容易となるものと考えられる。

図 6.7　ロックバケットによる被覆石均し

図 6.8　自動玉掛けアタッチメントによる護岸ブロック設置

6.2.8　潜水士操作用水中リモコン

通常の水中バックホウでの作業を考えた場合、運転席から作業対象の状況とバックホウのエンドエフェクタとの位置関係の認識が重要である。しかし、目視可能な距離が数メートルという状況では、運転席から対象物を視認することができない。そのため補助潜水士の誘導により操作を行っているのが現状である。

また対象物に近いアーム先端にカメラをつけた場合、対象物を見ることはできるが、カメラの視点位置と視線方向を直感的に認識することができないため操作は難しい。

そこで、補助潜水士が直接バックホウを操作することができる水中リモコン操作化を提案する。これにより誘導潜水士が対象物を直接確認しながら、バックホウを操作することができる。

図 6.9 は、京浜港ドックにおける実験時に、試験的に導入したリモコン遠隔操作システムの作業状況である。８ボタン式で、ブーム・アーム・バケット、旋回の操作を行うほか、クローラとチルトローテータの制御は排他的ではあるが行うことができる。

操作した潜水士へヒアリングを行ったところ、濁った海象条件で有用だという意見があった。また、ICT 型バックホウの機体情報を、水中リモコンに表示することで、水中マシンガイダンスの情報を表示してほしいとの意見も見られた。

ただし、エンドエフェクタ付近での作業となるため、潜水士の安全確保について検討する必要がある。

図 6.9　京浜港ドックにおけるリモコン操作試験

図 6.10　水中操作リモコン試作機

6.2.9　3D データ変換ソフト

ICT 型水中バックホウで計測したマウンド形状は、1cm ピッチ、または、10cm ピッチの点群データとなっている。この点群データから、検査結果として出力できる変換ソフトを開発することで、検査の省力化が期待できる。

課題としては、点群データに存在するノイズ等の除去アルゴリズム、計測センサの精度保証がある。さらに本システムのように複数のセンサの情報をシリアルリンク的に使用した場合、それぞれのセンサで誤差が発生する。許容できる計測誤差に収まるための各センサの仕様を検証する必要がある。

6.2.10　水中測位装置

港湾工事の機械化において、水中の位置測位は非常に重要な技術項目である。過去、LBL 装置からはじまり、台船の角に設置する SBL、船舶の 1 か所での設置が容易な USBL が市販品として存在するが、これらは基本的に数百ｍから数千ｍの大水深での利用を想定されたものが多い。つまり、水深数メートルから 10m程度といった浅くて横方向に広域な範囲を計測対象とする港湾工事に適用することは困難である。

しかし近年では、港湾空港技術研究所の開発する浮上式音響測位装置のほかに、あおみ建設株式会社の水中音響測位装置「そこにイルカ」（※１）、株式会社熊谷組の高精度水中測位システム「AquaMarionette(アクアマリオネット)」（※２）など、水中工事に特化した水中測位システムが開発されており、非常に強いニーズが存在するものと考えられる。今後、複数社の開発競争により、価格面や現場適用の容易さ、計測精度が向上すれば、様々な水中機械の開発に大きく寄与するものと考えられる

※１　吉原,海老原,水谷,「音波の伝搬時間群とデータベース照合を用いたマルチパス環境下における移動体の水中測位実験」,土木学会論文集 79 巻（2023）22 号

※２　https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2023/ict_aquamarionette.html(参照　2024-07-27)

6.2.11　夜間作業への対応

極東建設株式会社が過去に実施したシャフト式水中建設機械による施工では、24 時間の夜間作業を行った実績が存在する。この工事はダム湖岩盤での作業であり、水位変動がほぼ無い、潮流や波浪が無い、機体移動はしない、他の船舶がいない、安全な足場を組んでいる等、海洋工事とは異なる条件であった。この事例から、無人化施工機械により潜水士の作業が無ければ夜間作業の実現についても可能性があると考えられる。

6.3　ICT 型水中バックホウの施工データの活用案

ICT 型水中バックホウでは、機体に設置したセンサや外界センサによる計測データ、設計図面の 3D 表示など様々なデジタルデータを使用・管理・作成しており、これは国土交通省が提唱する BIM/CIM のうち、「施工への活用」としての建設生産・管理の効率化・高度化が期待できる。

本節では、ICT 型水中バックホウで使用・管理する施工データについて、今後の活用方法や課題点を示す。

6.3.1　設計データの共通化

ICT 型水中バックホウで使用している水中版マシンガイダンスでは、目標となるマウンド形状や既設構造物の表示させるため、それらを 3D モデルデータとして用意しファイルとして読み込ませる必要がある。しかしその 3D モデルデータは、2D の図面等から 3 次元 CAD を使って手作業で作成しているのが現状である（**図 6.11**）。

近年では BIM/CIM の活用が進められており、この中で使用される情報のうち 3D モデル形状のデータはマシンガイダンスと親和性が高いものと考えられる。各港の 3D モデルデータを使用することができるようになれば、データ作成の手間や変換ミス等が無くなり効率的になると考えられる。

ただし、現在のマシンガイダンスで使用しているファイルは「.obj」形式ですべて管理しているが、「BIM/CIM モデル等電子納品要領（案）及び同解説（国土交通省、令和 2 年 3 月）」で定義されているファイル形式は、「J-LandXML（地形データ）」、「IFC2 x 3（構造物モデル）」である。またファイルに付帯する「属性情報」や「参考資料」などを、マシンガイダンス側でどのように活用するのかは検討が必要である。

さらに、マシンガイダンスで管理するローカル座標系の原点と工事基準点緯度経度との対応や、法線方向と真北との差分などを考慮したファイル形式の変換が必要になるものと考えられる。

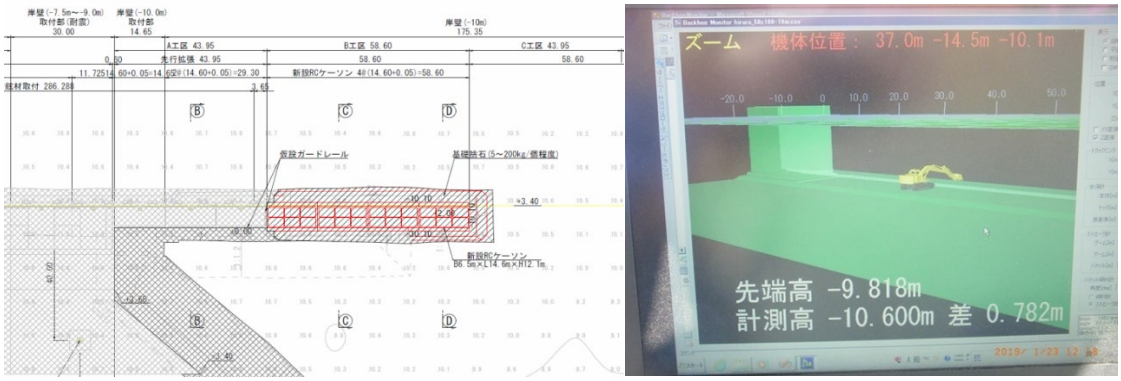


図 6.11　設計図面から 3D モデルデータに手動で作成

（付録）P.242

6.3.2　マウンド形状計測データの完成検査への利用

ICT 型水中バックホウでは、濁水中での視覚情報の補助として、超音波による地形計測を行っており、水中マシンガイダンス PC のファイルとして 10cm ピッチ、または、1cm ピッチの点群データとして記録することが可能となっている。特に 1cm ピッチでのデータは高精細に計測できており、割石の１つ１つの形状まで認識が可能である（**図 6.12**）。

また陸上の ICT バックホウを使った河床掘削（**図 6.13**）では、ICT バックホウ刃先の軌跡により施工管理が行われており、そのデータを使用して出来形検査に適用するための検討も実施されている。このように ICT 型水中バックホウで計測されるデータを、出来形検査として利用することができれば、ICT 技術の全面的な活用に示される検査の省力化につながるものと期待できる。

問題としては、計測データの信頼性や精度保証等の解決すべき課題が挙げられる。ICT 型水中バックホウで使用した M3 プロファイルソナーはあくまで視覚の補助として利用するものであり、測深機としての精度は保証されたものではないため精度的な検証を行う必要がある。

また、マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(海上地盤改良工：床掘工・置換工編)国道交通省港湾局編では、測量機機器の取付誤差や動揺センサとの同期のため、パッチテストが求められており、水中バックホウでの計測についても同様の課題が存在するものと考えられる。

例えば、M3 プロファイルソナーは水中バックホウに固定されており機体の水深位置やピッチ傾斜によりソナーの基準高さが変動するため機体の水深位置や傾斜を高精度に計測するセンサが必要である。さらにそれらセンサの設置精度や計測データの同期の誤差を含め、出来形計測の基準を満足する測量誤差に収まるための検証を実施する必要がある。

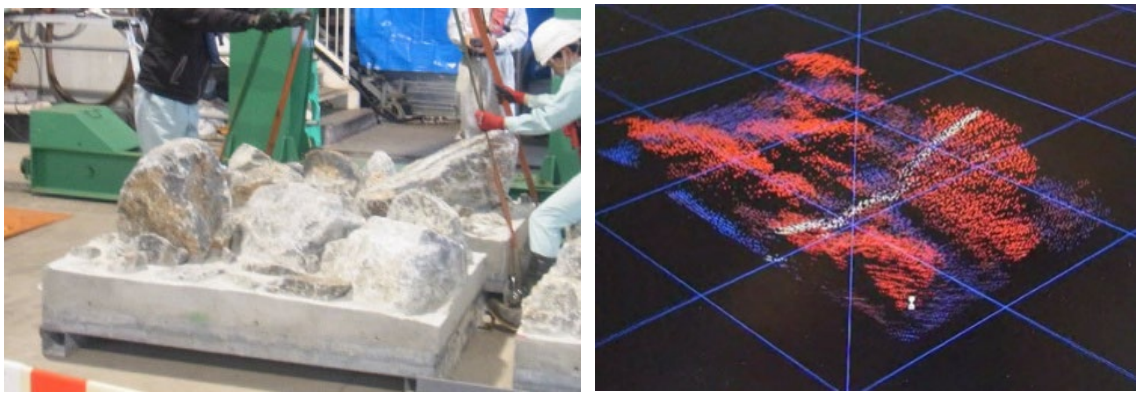


図 6.12　マウンド形状の 3D 点群データ

図 6.13　ICT バックホウを使った河床掘削

（引用元：高橋英之「河道掘削における ＩＣＴ活用について」(2021-03) https://www.hrr.mlit.go.jp/takada/wp-content/uploads/2021/03/210304_02.pdf(参 照 2024-07-29))

6.3.3　機体運動データによる作業解析

ICT 型水中バックホウでは、ブーム・アーム・バケット、機体方位、機体傾斜、機体位置など、機体姿勢に関する様々な運動データ（内界計測データ）を記録している。これらの運動データは秒単位で記録しているため、1 日の作業量に対する機体の実運転時間から高精度な作業能力を求めることが可能となる。

また、作業当日の透明度や潮流、波浪等のデータとリンクさせることで、海象条件に対する 1 日の作業量を予測することや、作業の改善のための解析に活用することも考えられる。

さらに、ヒヤリハットや事故が発生した際の機体運動データを解析することで、安全性の向上につなげることも考えられる。

6.4　ICT 型水中バックホウの普及に向けた技術開発方針（案）

ICT 型水中バックホウを普及させるにあたり、以下の（A）から（G）の点について発注者の視点、最新の技術動向を把握する業界団体の視点、実際の使用者である民間企業の視点、実際の技術開発を担当する技術者の視点など、様々な立場からの意見を収集した。

（A）新技術導入により工事価格が高額になってしまう場合の対策や考え方

①従来技術と比較して新技術の経済性が劣る場合は、新技術の適用が困難であり、当該新技術を使用しなければならない必要性を、明確に説明する必要があると考える。

②潜水士に限らず、作業員不足に対してコストへどのように反映するかの議論が進んでいないように感じる。従来の積算の考え方が通用しなくなりつつあるのかもしれない。

③ 新技術導入によって工程短縮が図れるといったわかりやすい図式が成り立てばよいが、システム系ではなかなかそうはならない事象が多い。手戻りの防止などはコストに表すことが難しい。

（B）技術開発成果の取り扱いについて、各社が自由に使える部分と囲い込みたい部分を、誰がどのように管理するか

①陸上建機の自動化・自律化でも検討されていると思うが、競争する領域と協調する領域を設定することが有効であると考える。

②基本は、各社の考え方に任せればよいと考える。

③他の技術と連携する部分はあるはずなので、基本となる枠組みとやり取りする規格やデータフォーマットの統一は、国が主導してもらえるとありがたい。

④民間企業は統一規格の中で開発し、使用するハードウェアやソフトウェアは、市販品や他社製品を使うのか、自社開発品を使うのか、自由選択できるのがよい。

（C）新技術導入によるメリットや評価などへの反映

①プレキャスト導入検討では、各工事の現場条件においてコスト以外の評価項目も選定して点数化し、評価点の合計で採用を決めるという手順としている。
これは複雑な手順に見えるが、水中 ICT の適用条件や地域性、調達性などを調査して整理していくと、評価の項目・内容は揃ってきて、手順も単純化できると考える。発注者

としては水中 ICT 導入を検討するための根拠がまず第一に欲しいと考えられるので、オーソライズされたものがあれば水中 ICT 普及の後押しになるのではないか。

②1 社しかできない技術だから公平性が担保できないという考え方が問題。技術開発行為は、公正な競争であるという認識が定着してほしい。

(D) 水中部の機械化が進んでいない原因や要因

①専門メンテナンス要員や体制が必要となることが多くみられる。

(E)「衛星測位を活用した浮上式音響測位装置」に不足する技術項目

①浮上局の運用コストに対する検証が不足しているように思う。設置・撤去の作業にどのくらいの時間や周辺機材が必要なのかを整理すべきである。

②水中バックホウを安全に遠隔操縦するための測位技術としては、まだ測位結果のばらつきや欠測時間が大きいように見える。マルチパス対策やノイズ除去だけではなく、欠測中のアラートや誤差の範囲を表示するなど、使用者の安心感を増加させる仕組みの導入も必要である。

③実施工では、ガット船、石材投入用のクレーン付台船、ICT 型水中バックホウの支援船等、複数の作業船が航行・停泊することになるが、これらにより浮上局と基地局の無線通信が遮蔽される可能性もあるため、通信の安定性の実証あるいは安定した通信確保手段が必要。

(F)「ICT 型水中バックホウ」に不足する技術項目

①安全に操縦できるという安心感・信頼感が操作者には必要である。システムを信頼できないと、確認しながらの運転となり、作業効率が落ちると考えられる。もっと経験を積んでいく必要があるが、実施工レベルでの運用となるとコストや工期の問題が発生するため、発注者の理解と協力が望まれる。

(G) 積算基準の改訂要望など

①水中バックホウは現在 0.8 ㎥（20 トン）の電動油圧式が主流である。
積算基準の参考として記載されている歩掛は古く、0.5 ㎥（12 トン）の油圧ホースで送るタイプである。この場合、クレーン付き台船を大きくする必要があり、また、発動発電機を、現地でレンタルする必要があるため、金額に差が出てしまう。
ICT 化で使用するセンサや機材の条件もアップデートしていくべきである。

以上のヒアリング結果から、ICT 型水中バックホウの普及のためには、今後以下の検討・整理が必要であると考える。

①ICT型水中バックホウの経済性を，様々な視点で整理しておく

・新技術を実現場に適用するためには，金額的な根拠だけでなく，地域性，現場条件や調達性から評価できるような根拠データも揃えて置くべきである.

・水中施工の機械化の課題は，技術の困難性だけでなく専門スタッフやメンテナンス等が必要となることも大きな要因である.

・新技術導入による追加コストとメリットを整理する必要がある.

②平等な技術開発競争と協調すべき範囲の設定

・現状では水中バックホウ自体を所有する会社が非常に少ない. 技術的に競争する部分と協調する部分を検討しておく必要がある.

・平等な競争が可能なように，基本的な規格やフォーマット等は統一すべきである.

③実現場でのブラッシュアップの必要性

・新しい技術が普及するには，現場での使用とブラッシュアップが必要である. 技術の過渡期においては発注者と施工者の協力関係が必要である.

④浮上式音響測位装置の信頼性向上

・水中バックホウの安全な遠隔操作には，測位の信頼性が非常に重要である. 実現場でのテストを実施し，測位中/欠測中の判断や誤差範囲の表示など，操作者が安心できる判断材料を提示すべきである.

・実現場において毎日の展開や撤収に時間がかかるのであれば，現場に残置できるような運用方法や技術開発を行う必要がある.

・実海域における設置・撤収等の作業コストを検証すべきである.

⑤ICT型水中バックホウの信頼性向上

・実機による遠隔操作事例が少ない. 民間会社が導入するには安全に操縦できるという安心感・信頼感が必要なため，試験的な施工で実現場での使用実績を増やすべきである.

（付表）　水中バックホウ施工実績

No	発 注 元	工 事 名	施 工 期 間	施 工 内 容	アタッチメント
1	総合事務局	97 浦添BH均し	H9/4/20 ～ H9/12/25	捨石均し	バケット
2	電信会社		H9/9/3 ～ H9/10/10	ケーブル埋設	リッパー
3	民間会社		H9/7/29 ～ H9/8/21	捨石均し	バケット
4	電信会社		H10/3/12 ～ H10/3/29	ケーブル埋設	エジェクター
5	総合事務局	97 平良下崎西BH均し	H9/8/25 ～ H10/3/30	捨石均し	バケット
6	総合事務局	97 平良下崎西BH均し 2	H9/12/15 ～ H10/7/31	捨石均し	バケット
7	総合事務局	石垣港(本港地区)防波堤(沖南)D工区	H9/9/12 ～ H10/3/27	捨石均し	バケット
8	建設省	戸原波浪観測所海底ケーブル補修工事	H10/5/11 ～ H10/5/31	ケーブル埋設	エジェクター
9	電信会社		H10/5/28 ～ H10/6/28	ケーブル埋設	エジェクター
10	電力会社		H10/5/6 ～ H10/9/13	捨石均し	バケット
11	電信会社		H10/6/29 ～ H10/7/10	ケーブル埋設	エジェクター
12	総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)築造工事(第2次)	H9/7/24 ～ H10/7/31	捨石均し	バケット
13	総合事務局	98 平良下崎西防波堤2	H10/9/10 ～ H11/2/10	捨石均し	バケット
14	総合事務局	98 平良下崎西防波堤	H10/8/13 ～ H11/6/30	捨石均し	バケット
15	総合事務局	97 石垣沖南防波堤	H10/4/16 ～ H10/11/30	捨石均し	バケット
16	総合事務局	石垣港防波堤(沖南)E工区	H10/8/24 ～ H11/3/10	捨石均し	バケット
17	香川県	99 草壁廃棄物護岸	H11/3/24 ～ H11/7/20	捨石均し	バケット
18	電信会社		H11/5/29 ～ H11/6/20	ケーブル埋設	エジェクター
19	電信会社		H11/8/30 ～ H11/9/14	ケーブル埋設	エジェクター
20	総合事務局	98 平良下崎西防波堤	H10/8/13 ～ H11/7/31	捨石均し	バケット
21	電信会社		H11/10/8 ～ H11/10/20	ケーブル埋設	エジェクター
22	総合事務局	98 平良下崎西BH均し	H11/6/1 ～ H11/12/20	捨石均し	バケット
23	建設省	戸原6号突堤10(その1)(その2)工事	H11/10/25 ～ H12/3/31	波消ブロック露出	エジェクター
24	総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)築造工事(第3次)	H11/3/10 ～ H12/1/10	捨石均し	バケット
25	総合事務局	98 石垣港－9m岸壁	H11/4/5 ～ H12/3/10	捨石均し	バケット
26	総合事務局	石垣港(本港地区)防波堤D工区	H11/4/15 ～ H12/1/10	捨石均し	バケット
27	総合事務局	石垣港防波堤(沖南)C～E工区	H11/8/3 ～ H12/3/10	捨石均し	バケット
28	運輸省	高港御坊地区防波堤(西)築造工事	H12/4/3 ～ H12/6/30	捨石均し	バケット
29	電力会社		H12/5/1 ～ H12/9/20	捨石均し	バケット
30	電力会社		H12/4/24 ～ H12/9/30	捨石均し	バケット
31	運輸省	高港御坊地区防波堤(西)築造工事(その2)	H12/7/10 ～ H12/9/15	捨石均し	バケット
32	製鉄会社		H12/7/1 ～ H12/8/1	捨石均し	バケット
33	運輸省	常陸那珂港東防波堤基礎工事	H12/6/9 ～ H12/8/4	捨石均し	バケット
34	空港会社		H12/9/10 ～ H13/2/10	捨石均し	バケット
35	漁協		H12/11/1 ～ H12/11/30	海草の除去,海底切削	ツインヘッダ
36	総合事務局	99防波堤　沖南C工区	H12/5/29 ～ H13/1/19	捨石均し	バケット
37	総合事務局	石垣港(本港地区)岸壁(-9.0m)外1件築造工事	H12/6/20 ～ H13/3/15	捨石均し	バケット
38	総合事務局	石垣港(本港地区)防波堤(沖南)BC工区築造工事	H12/8/21 ～ H12/11/10	捨石均し	バケット
39	総合事務局	99 平良港下先西防波堤	H12/2/15 ～ H13/2/28	捨石均し	バケット
40	総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)築造工事	H12/10/1 ～ H13/1/31	捨石均し	バケット
41	電源会社		H12/11/15 ～ H13/3/31	土丹層の掘削	ツインヘッダ
42	作業船協会	水中バックホウ遠隔操縦装置実海域実験	H12/11/1 ～ H12/11/30	捨石均し	バケット
43	東京都	神田川整備工事(その31)	H12/12/1 ～ H12/12/28	川床の障害物撤去,浚渫	バケット
44	国土交通省	高港御坊地区防波堤築造工事	H13/1/9 ～ H13/6/30	捨石均し	バケット
45	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事(その2)	H13/3/1 ～	浚渫による方塊の露出	エジェクター
46	電信会社		H13/8/8 ～ H14/2/28	ケーブル埋設	エジェクター
47	富山県	(滑川海洋深層水)浅海部取水管敷設及び管防護工事	H13/7/16 ～ H13/8/31	取水管路掘削, 埋戻	バケット
48	総合事務局	平良港防波堤(下崎西)築造工事(第二次)	H13/5/25 ～ H14/2/15	捨石均し	バケット
49	総合事務局	平良港防波堤(下崎西)築造工事(第二次)	H13/8/6 ～ H14/1/31	捨石均し	バケット
50	総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)築造工事(第二次)	H13/9/25 ～ H13/11/10	捨石均し	バケット
51	漁協		H13/10/1 ～ H13/11/30	海草の除去,海底切削	回転ブラシ
52	東京都・民間会社		H13/9/1 ～ H13/9/15	海底に堆積した火山灰撤去	回転ブラシ他
53	電信会社		H13/11/19 ～ H13/12/21	ケーブル埋設	エジェクター
54	沖縄県知念村	久高島海底送水管敷設工事	H13/10/18 ～ H13/12/15	取水管路掘削	ツインヘッダ
55	民間会社		H13/12/5 ～ H13/12/24	アタッチメントの実証実験	ドリフター
56	民間会社		H13/12/8 ～ H13/12/20	遠隔操縦装置の実証実験	遠隔操縦
57	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事(その3)		浚渫による方塊の露出	エジェクター,ドリフター
58	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事(その4)		浚渫による方塊の露出	エジェクター,ドリフター
59	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事(その5)		浚渫による方塊の露出	エジェクター,ドリフター
60	東京都	神田お茶の水分水路工事に伴う河床防護工事(その2)	H14/1/1 ～ H14/3/22	川床の障害物撤去,浚渫	バケット
61	神奈川県	平塚ヘッドランド工事	H14/2/16 ～ H14/3/15	浚渫,捨石均し	サンドポンプ
62	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事(その7)			エジェクター,ドリフター
63	民間会社		H14/2/25 ～ H14/3/5	遠隔操縦装置の実証実験	遠隔操縦
64	国土交通省	高港御坊地区防波堤(西)築造工事(その2)	H14/4/2 ～ H14/6/30	捨石均し	バケット
65	漁協		H14/10/1 ～ H14/11/30	海草の除去,海底切削	回転ブラシ
66	水族館		H15/1/25 ～ H15/3/15	取水管路掘削, 敷設, 旧管撤去	水陸両用
67	国土交通省	常陸那珂港東防波堤築造工事(その2)	H15/1/25 ～ H15/2/28	捨石均し	被覆バケット
68	横須賀市	走水地区道路(伊勢町)道路橋梁築造工事	H15/4/7 ～ H15/5/10	橋脚基礎の海底地盤掘削	サンドポンプ
69	国土交通省	下関港(新港地区)外周護岸(廃棄物)築造工事	H15/5/6 ～ H15/5/20	捨石均し	バケット
70	国土交通省	古黒部離岸堤工事	H15/5/19 ～ H15/6/30	捨石均し	バケット
71	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事		浚渫による方塊の露出	エジェクター,ドリフター

（付録）P. 249

No	発注元	工事名	施工期間	施工内容	アタッチメント
72	東京都	H14年度　新海面処分場西側護岸建設工事	H15/7/17 ～ H15/8/8	浚渫	サンドポンプ
73	三重県	片田地区海岸高潮対策工事	H15/7/20 ～ H15/8/31	捨石均し	エジェクター
74	電力会社		H15/9/20 ～ H16/2/28	ケーブル管路掘削	ツインヘッダ他,一部水陸両用
75	神奈川県	H15年度　海岸高潮対策工事	H16/1/13～H16/3/25	捨石均し	エジェクター
76	電力会社		H16/2/12～H16/3/12	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦
77	国土交通省	東京湾口航路(浦賀水道航路)方塊撤去工事	H16/3/1～H17/7/20	浚渫による方塊の露出	エジェクター
78	沖縄県	粟国港防波堤(沖)工事	H16/4/6～H16/6/15	捨石均し	バケット
79	沖縄総合事務局	平良港防波堤築造工事	H16/3/5～H17/3/18	捨石均し	バケット
80	電力会社		H16/5/1～H16/6/30	ケーブル管路埋設	ブレーカー,ヘッダー
81	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)2-H築造工事	H16/7/12～H17/3/10	捨石均し	バケット
82	沖縄総合事務局	平良港(下崎地区)防波堤(-10m)外1件築造工事	H16/7/12～H17/3/22	捨石均し	バケット
83	電力会社		H16/11/8～H17/1/21	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦
84	電力会社		H17/1/11～H17/3/29	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦
85	沖縄県	下地空港侵入灯柱設置	H17/1/22～H17/3/28	コンクリート塊の破砕,撤去	ブレーカー
86	国土交通省	橋脚基礎コンクリート水中切削工事	H17/3/25～H17/8/31	コンクリート塊の切削,整形	ツインヘッダ
87	発電会社		H17/4/15～H17/8/15	捨石均し	バケット
88	電力会社		H17/8/1～H17/8/10	掘削,破砕,切削,浚渫	各種
89	国土交通省	羽田弁天橋附帯工事	H17/1/7～H18/3/24	コンクリート塊の破砕,撤去	ブレーカー,ドリフター
90	沖縄総合事務局	平良港防波堤(下崎西)1-B工区	H17/3/5～H18/3/18	捨石均し	バケット
91	沖縄総合事務局	平良港(下崎地区)岸壁(-10.0m)外2件築造工事	H17/6/21～H18/1/20	捨石均し	バケット
92	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)D工区築造工事	H17/7/6～H18/3/17	捨石均し	バケット
93	沖縄総合事務局	石垣港(本港地区)防波堤(沖南)	H17/8/1～H18/3/15	捨石均し	バケット
94	北海道開発局	函館港防波堤災害復旧工事	H17/12/1～H18/3/20	捨石均し	バケット
95	電力会社		H18/5/1～H18/5/31	掘削,破砕,切削	ブレーカー,ツインヘッダ
96	発電会社		H18/4/1～H18/10/31	捨石均し	バケット
97	電力会社		H18/5/16～H18/8/11	浚渫	遠隔操縦
98	東京都	内川護岸耐震補強工事	H18/7/18～H18/9/9	川床の障害物撤去,浚渫	バケット
99	電力会社		H19/2/26～H19/3/31	浚渫	サンドポンプ
100	沖縄県	渡名喜漁港沖第1防波堤災害復旧工事	H19/3/9～H19/12/31	捨石均し	バケット
101	電信会社		H19/7/9～H19/7/27	ケーブル埋設	エジェクタ
102	沖縄県	金武湾港(天願地区)防波堤(南)工事(1工区)	H19/8/4～H20/3/14	捨石・被覆石均し	バケット,一部水陸両用
103	沖縄県	阿嘉漁港第1沖防波堤災害復旧工事	H20/1/4～H20/3/27	捨石・被覆石均し	バケット
104	発電会社		H19/4/25～H19/10/31	捨石・被覆石均し	バケット
105	青森県	大畑漁港災害復旧工事	H19/8/1～H19/9/15	ケーソン上部撤去	水陸両用,ブレーカー
106	電力会社		H19/9/15～H19/10/25	土砂浚渫	バケット
107	沖縄総合事務局	平良港防波堤(下崎西)1-A工区築造工事	H19/3/12～H20/2/28	捨石均し	バケット
108	沖縄総合事務局	平良港防波堤(下崎北)(第二)D工区築造工事	H19/7/23～H20/3/17	捨石均し	バケット
109	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H19/8/20～H20/1/30	捨石均し	バケット
110	酒造会社		H19/12/6～H19/12/25	老朽護岸撤去	ドリフタ
111	電力会社		H20/2/1～H20/3/25	土砂浚渫	サンドポンプ
112	製鉄会社		H20/3/1～H20/3/31	床盤敷石補修	バケット
113	電力会社		H20/4/1～H20/5/30	掘削,破砕,切削	
114	神奈川県	H19年度河川維持改修工事	H20/5/19～H20/6/30	導流堤災害復旧	水陸両用,ブレーカー
115	国土交通省	福井港海岸(福井地区)離岸堤(潜堤)築造工事	H20/7/10～H20/9/10	捨石均し	バケット
116	国土交通省	小名浜港東港地区護岸(防波)基礎工事	H20/9/20～H21/1/31	捨石均し	バケット
117	国土交通省	須崎港湾口地区防波堤築造工事	H21/1/8～H21/1/31	捨石均し	バケット
118	国土交通省	常陸那珂港東防波堤築造工事	H21/1/5～H21/3/31	捨石均し	バケット
119	東京都	H20年度辰巳西側護岸改修工事	H21/1/22～H21/1/31	掘削	バケット
120	沖縄総合事務局	平良港防波堤(下崎北)DE工区築造工事	H20/7/7～H21/3/27	捨石均し	バケット
121	沖縄総合事務局	平良港防波堤(下崎北)改良工事	H20/8/1～H21/3/25	捨石均し	バケット
122	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)沖防波堤(外)築造工事	H20/9/2～H21/3/27	捨石均し	バケット
123	鉄道会社		H20/11/5～H21/3/15	障害物撤去,浚渫	遠隔操縦
124	沖縄総合事務局	那覇港沈埋函(7号)基礎砕石掘削本均し工事	H21/1/15～H21/3/31	捨石均し・掘削	バケット,ブレーカー
125	国土交通省	09苅田新松山護岸防波堤工事	H21/12/1～H22/3/26	捨石均し	水陸両用,バケット
126	電信会社		H21/5/18～H21/5/29	掘削, 埋戻(ケーブル)	バケット
127	国土交通省	直江津港(荒浜ふ頭地区)第3東防波堤築造工事	H21/4/13～H21/8/28	捨石均し	バケット
128	電力会社		H21/12/21～H22/3/19	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦
129	沖縄総合事務局	平良港本港地区防波堤(下崎西)2-H工区築造工事	H21/4/16～H22/2/26	捨石均し	バケット
130	沖縄総合事務局	平良防波堤下崎北改良工事	H21/7/31～H22/3/25	捨石均し	バケット
131	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)基礎工事	H21/4/16～H21/8/14	捨石均し	バケット
132	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H21/7/31～H22/3/30	捨石均し	バケット
133	沖縄県	上地港防波堤(西)工事(I工区)	H21/9/14～H22/6/18	捨石均し	バケット
134	電信会社		H22/7/1～H22/11/4	掘削, 埋戻(ケーブル)	リッパー,ブレーカー
135	民間会社		H22/8/23～H22/10/10	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦
136	高速道路会社		H22/6/10～H22/11/10	コンクリート構造物撤去	ニブラー,ブレーカー
137	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)改良工事(第2次)	H22/3/26～H23/1/17	捨石均し	バケット
138	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H22/7/17～H23/3/31	捨石均し	バケット
139	沖縄総合事務局	平良港本港地区防波堤(下崎北)(第二)D工区築造工事	H22/7/17～H23/3/31	捨石均し	バケット
140	鉄道会社		H22/7/15～H23/5/31	掘削	バケット,ブレーカー
141	長崎県	中島川広域河川改修工事(河床改修工事)	H22/12/8～H23/2/28	掘削(水陸両用仕様)	バケット,ブレーカー
142	電力会社		H23/1/6～H23/3/18	浚渫(遠隔操縦)	遠隔操縦

（付録）P. 250

No	発 注 元	工 事 名	施 工 期 間	施 工 内 容	アタッチメント
143	沖縄県	南大東漁港第3防波堤工事	H22/9/23～H23/9/30	掘削	バケット,ブレーカー
144	鉄道会社		H23/4/1～H23/6/17	掘削	バケット,ブレーカー
145	沖縄県	東江海岸整備工事(H22-3)	H22/11/19～H23/8/31	砂均し(水陸両用仕様)	バケット
146	沖縄総合事務局	那覇港(浦添ふ頭)防波堤仮設堤	H23/7/15～H24/3/30	捨石均し	バケット
147	鉄道会社		H23/10/18～H24/3/17	掘削	バケット,ブレーカー
148	大分県	H23/竹田津漁港水産物供給基盤機能保全工事	H23/12/1～H24/2/18	捨石均し	バケット
149	福岡県	那珂川河床掘削工事(1工区)	H23/12/12～H24/3/15	掘削	バケット,ブレーカー
150	国土交通省	仁ノ海岸第3離岸堤工事	H23/12/1～H25/3/29	捨石均し	バケット
151	電力会社		H23/4/20～H23/8/31	障害物撤去,浚渫	遠隔操縦
152	国土交通省	宮古・閉伊川橋桁他撤去工事	H24/1/30～H24/3/31	障害物撤去	バケット
153	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)改良工事	H23/7/7～H24/3/20	捨石均し	バケット
154	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)改良工事(第2次)	H23/11/25～H24/3/20	捨石均し	バケット
155	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H23/8/1～H24/3/15	捨石均し	バケット
156	福岡県	樋井川河床掘削工事1工区	H24/9/26～H25/3/15	掘削	バケット,ブレーカー
157	福岡県	那珂川河床掘削工事(7工区)	H24/11/1～H25/3/15	掘削	バケット,ブレーカー
158	北九州市	紫川(MM区間)河道掘削工事(H24-1・2)工区	H24/12/1～H25/3/22	掘削	バケット,ブレーカー
159	国土交通省	木更津国有防波堤災害復旧工事	H24/5/26～H24/8/31	捨石均し	水陸両用,バケット
160	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)改良工事	H24/5/31～H25/3/27	捨石均し	バケット
161	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H24/9/1～H25/3/15	捨石均し	バケット
162	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)基礎外1件工事	H24/12/20～H25/3/25	捨石均し	バケット
163	電信会社		H24/12/1～H25/6/10	掘削, 埋戻(ケーブル)	バケット,ブレーカー
164	沖縄県	沖縄県水産海洋研究ｾﾝﾀｰ取水管設置工事	H24/10/22～H25/6/30	掘削, 埋戻(取水管)	バケット,ブレーカー
165	電力会社		H25/5/24～H25/8/31	掘削, 埋戻(ケーブル)	水陸,バケット,ブレーカー
166	沖縄県	宜名真漁港第1防波堤改修工事(H25)	H25/8/31～H25/11/30	捨石均し	バケット
167	北九州市	紫川(MM区間)河道掘削工事	H25/10/15～H26/3/20	掘削	バケットブレーカー
168	電力会社		H25/12/1～H25/3/25	障害物撤去,浚渫	遠隔操縦
169	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)改良工事(第2次)	H25/6/3～H26/3/14	捨石均し	バケット
170	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)ケーソン仮置場築造工事	H25/5/24～H25/9/9	捨石均し	バケット
171	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)岸壁改良基礎工事	H25/10/1～H26/3/7	捨石均し	バケット
172	沖縄総合事務局	平良港(下崎西)防波堤改良工事(第2次)	H25/9/5～H26/3/25	捨石均し	バケット
173	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)改良工事	H25/10/3～H26/3/10	捨石均し	バケット
174	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)防波堤(外)築造工事	H25/7/12～H26/3/14	捨石均し	バケット
175	電信会社		H26/4/9～H26/5/31	掘削, 埋戻(ケーブル)	水陸両用バケット, ブレーカー
176	国土交通省	13B鳥取港防波堤築造	H26/4/1～H26/8/29	捨石均し	バケット
177	沖縄総合事務局	14那覇空港護岸N築造	H26/6/17～H26/11/15	サンゴ移築	バケット(ワイヤーソー)
178	沖縄総合事務局	那覇空港桟橋1工区	H26/6/4～H26/12/26	捨石均し	バケット
179	北九州市	紫川河道掘削工事(26-1)	H26/9/10～H27/3/16	掘削	バケット・ブレーカー
180	国土交通省	鹿野川ダム捨コン破砕工	H26/12/8～H27/1/31	撤去	バケット・ブレーカー
181	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)岸壁(-7.5m)(改良)(耐震)外1件築造工事	H26/4/25～H26/8/29	捨石均し	バケット
182	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設仮設桟橋2築造工事	H26/4/1～H26/11/28	捨石掘削	バケット
183	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎北)(改良)築造工事	H26/7/22～H26/12/26	捨石均し	バケット
184	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)港湾施設用地築造外1件工事	H26/9/2～H27/3/4	捨石均し	バケット
185	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸AN工区築造工事	H26/11/17～H27/9/7	捨石均し	バケット
186	電力会社		H26/5/28～H26/6/25	掘削, 埋戻(ケーブル)	水陸両用バケット, ブレーカー
187	国土交通省	天ヶ瀬ダム放流設備流入部建設工事	H27/6/13～H27/9/30	掘削	シャフト式水中作業機バケット・ブレーカ
188	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)岸壁(-7.5m)(改良)(耐震)外1件築造工事	H27/5/14～H28/1/31	捨石均し	バケット
189	沖縄総合事務局	中城湾港護岸築造工事	H27/10/1～H28/3/31	裏込め砂投入均し	水陸両用バケット
190	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸W工区築造工事	H27/4/1～H28/3/31	捨石均し	水陸両用バケット
191	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)岸壁(-7.5m)(改良)(耐震)外1件築造工事	H27/4/22～H28/2/29	捨石, 被覆石均し	バケット
192	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸W工区築造工事(第2次)	H27/3/1～H28/3/31	捨石均し	水陸両用バケット
193	電力会社		H27/7/1～H27/8/31	機材回収	バケット
194	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸W工区築造工事(第4次)	H27/9/18～H28/3/31	捨石均し	水陸両用バケット
195	国土交通省	細島港(外港地区)防波堤(南沖)(改良)工事	H27/9/15～H28/3/25	捨石均し	バケット
196	福島県	H27年度　ため池放射性物質対策実証事業	H28/1/12～H28/2/28	土砂撤去	水陸両用バケット
197	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸N工区築造工事	H26/11/16～H29/3/31	捨石均し	バケット
198	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸W工区築造工事	H27/5/1～H28/8/31	捨石均し	バケット
199	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設護岸W工区築造工事	H27/11/2～H28/8/31	捨石均し	水陸両用バケット
200	北九州市	紫川(MM工区)河道掘削工事(27-1)	H27/11/1～H28/6/30	掘削	バケット・ブレーカー
201	沖縄総合事務局	平良港(本港地区)防波堤(下崎西)(改良)外1件築造工事	H28/7/25～H29/3/28	捨石均し	バケット
202	兵庫県	(一)加古川水系　別府川河床掘削(その4-1)工事	H28/11/22～H29/6/30	掘削	水陸両用バケット
203	国土交通省	H27年度　津管内南部橋梁補強工事	H28/11/1～H29/3/30	掘削	水陸両用バケット
204	化学会社		H28/7/1～H28/8/31	掘削	バケット
205	発電会社		H28/11/21～H29/1/31	掘削	水陸両用バケット
206	製紙会社		H29/2/13～H29/3/19	掘削, 袋詰根固設置	水陸両用バケット
207	国土交通省	大分港(西大分地区)岸壁(-7.5m)(改良)(耐震)工事	H28/9/6～H29/3/24	掘削, 捨石投入・均し	バケット
208	沖縄県	小浜航路サンゴ移築工事	H28/10/21～H28/11/30	サンゴ移築	バケット(ワイヤーソー)
209	国土交通省	大塚船着場河道掘削工事	H28/9/26～H29/10/30	掘削	水陸両用バケット, ブレーカー
210	沖縄総合事務局	中城湾港護岸築造工事	H29/9/26～H30/3/23	裏込め砂投入均し	水陸両用バケット
211	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)岸壁(-7.5m)(改良)(耐震)築造工事	H29/5/16～H29/10/31	捨石均し	バケット
212	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)岸壁(-9.1m)②築造工事(第2次)	H29/5/16～H29/10/31	掘削, 捨石均し	バケット
213	沖縄総合事務局	石垣港(新港地区)岸壁(-9.0m)②築造工事	H28/11/2～H29/11/30	掘削, 捨石均し	バケット

No	発注元	工事名	施工期間	施工内容	アタッチメント
214	製紙会社		H30/2/1～H30/5/31	掘削，袋詰根固設置	水陸両用バケット
215	兵庫県	庄下川護岸補強工事	H29/11/15～H29/12/14	掘削，捨石均し	水陸両用バケット
216	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設埋立5工区築造工事	H29/5/23～H30/7/31	捨石均し	バケット
217	兵庫県	(一)加古川水系　別府川河床掘削(その4-2)工事	H30/1/5～H30/6/29	掘削	水陸両用バケット
218	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設埋立1工区築造工事	H30/2/19～H30/12/28	掘削，捨石均し	水陸両用バケット
219	兵庫県	(一)庄下川護岸補強工事(上流その2)	H30/3/1～H30/3/31	掘削	水陸両用バケット
220	国土交通省	宮古島海洋暴露場設備解体撤去工事	H30/4/16～H31/4/30	掘削	バケット
221	東京都	情報通信基盤整備保守及び運用事業に伴う水中重機作業委託	H30/4/1～H30/7/31	掘削，埋戻(ケーブル)	バケット
222	宮古島市	宮古島市海業センター取水管整備工事	H30/4/1～H30/8/30	掘削，埋戻し	水陸両用バケット，ブレーカー
223	国土交通省	H30年度　清水港の出岸壁(-12m)被覆工事	H30/7/18～H31/3/27	掘削，被覆石均し	バケット
224	国土交通省	H30年度　清水港の出岸壁(-12m)基礎工事	H30/7/18～H31/3/11	掘削，被覆石均し	バケット
225	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)泊地(-10m)浚渫工事外2件	H30/8/1～H31/3/25	捨石均し	バケット
226	兵庫県	(一)庄下川護岸補強工事(上流その1)	H30/11/1～H30/12/25	掘削	水陸両用バケット
227	発電会社		H30/11/1～H31/1/31	掘削	バケット・ブレーカー
228	兵庫県	(二)法華山谷川水系　法華山谷川河床掘削工事　その3	H30/11/15～H31/2/28	掘削	水陸両用バケット
229	発電会社		H30/11/20～H31/1/31	掘削，運搬	水陸両用バケット,水陸両用ｷｬﾘｱﾀﾞﾝﾌﾟ
230	沖縄総合事務局	平良港(漲水地区)泊地(-10m)築造工事	H30/12/21～H31/3/25	捨石均し	バケット
231	兵庫県	(二)法華山谷川水系　法華山谷川河床掘削工事　その4	H31/1/10～H31/4/26	掘削	水陸両用バケット
232	不動産会社		R1/5/24～R1/6/30	掘削	水陸両用バケット
233	沖縄総合事務局	那覇空港滑走路増設仮設桟橋撤去工事	R1/6/1～R1/7/31	掘削	水陸両用バケット
234	沖縄県	北大東地区第1泊地堆積岩撤去工事	R1/6/17～R1/9/24	掘削	バケット
235	国土交通省	宇部港航路泊地浚渫工事	R1/10/10～R1/10/31	掘削(矢板前面)	バケット・ブレーカー
236	不動産会社		R1/11/11～R1/11/29	掘削，埋戻し	水陸両用バケット
237	三重県	H31年度　一般国道167号(船津橋・P3橋脚)橋梁耐震対策工事	R1/11/20～R2/4/30	掘削	水陸両用バケット
238	沖縄県	屋部川河床掘削工事	R1/12/4～R1/12/26	掘削	水陸両用バケット
239	発電会社		R2/1/9～R2/2/27	掘削	水陸両用バケット
240	兵庫県	(一)庄下川護岸補強工事(上流その5)	R1/11/7～R2/1/31	張石	水陸両用被覆バケット
241	国土交通省	金沢港(大野地区)泊地(-10m)浚渫外1件工事	R2/1/22～R2/3/13	掘削(矢板前面)	バケット・ブレーカー
242	防衛省	辺野古弾薬庫(中央部)ウミガメ産卵場創出工事	R2/3/5～R2/3/19	伐採・除根	水陸両用バケット・ｱｲｱﾝﾌｫｰｸ
243	防衛省	シュワブ(H29)埋立工事(2工区)	R2/3/9～R2/4/30	構造物撤去	水陸両用バケット・ブレーカ
244	沖縄県	名護本部線渡久地橋仮桟橋設置工事(R1)	R2/6/25～R2/12/28	構造物撤去	水陸両用バケット・ブレーカ
245	沖縄県	博愛漁港漁港設備工事(R2)	R2/6/16～R3/3/10	掘削	バケット・ブレーカー
246	沖縄総合事務局	那覇港(新港ふ頭地区)港湾施設用地外1件築造工事	R2/7/1～R3/1/29	捨石均し，被覆石均し	バケット
247	沖縄県	粟国港岸壁(-4.5m)工事(R2-2)	R2/7/13～R2/12/25	捨石均し	バケット
248	沖縄総合事務局	那覇港(新港ふ頭地区)港湾施設用地外1件築造工事(第2次)	R2/8/4～R3/3/26	被覆石均し	バケット
249	国土交通省	R2年度　新門司沖土砂処分場(Ⅱ期)護岸築造工事(第2次)	R2/10/15～R3/1/31	捨石均し	バケット
250	国土交通省	R2　圏央道利根川橋下部その1工事	R2/9/14～R2/12/31	掘削	水陸両用バケット
251	民間会社		R2/11/1～R3/3/31	掘削，養浜	水陸両用バケット
252	国土交通省	船明発電所放水口堆積土砂撤去工事	R2/11/10～R3/1/31	掘削	バケット，ベッセルMG
253	那覇港管理組合	那覇空港漂着クジラ処理工事	R3/1/9～R3/2/26	曳航，埋設	水陸両用バケット
254	兵庫県	揖保川上余部地区堤防整備工事	R3/1/12～R3/2/26	掘削，運搬	水陸両用バケット,水陸両用ｷｬﾘｱﾀﾞﾝﾌﾟ
255	国土交通省	R2　圏央道利根川橋下部その1工事	R3/4/1～R3/6/9	掘削	水陸両用バケット
256	沖縄総合事務局	那覇港(新港ふ頭地区)泊地(-12m)築造工事(第2次)	R3/5/1～R3/6/30	捨石均し	バケット，均し装置MG
257	国土交通省	R3年度　新門司沖土砂処分場(Ⅱ期)護岸築造工事		捨石均し	バケット
258	沖縄総合事務局	石垣港	R3/5/1～R3/6/30	捨石均し	バケット，均し装置MG

（※本付表は共同研究者の実績のみとした）