

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1390 September 2021

水中バックホウを対象としたマシンガイダンスシステムの構築と精度検証

喜多 司, 平林 丈嗣, 高尾 俊輔, 吉江 宗生

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 現状の水中バックホウ作業の課題と水中マシンガイダンスの可能性	4
2.1 現状の水中バックホウ作業の課題	4
2.2 陸上におけるマシンガイダンスの事例	6
2.3 水中マシンガイダンスの提案	7
3. 使用するセンサの選定と精度検証	7
3.1 機体姿勢検出（関節角度）	8
3.2 機体傾斜検出	9
3.3 機体方位検出	10
3.4 水中位置検出（XY平面）	12
3.5 水中位置検出（水深）	15
3.6 外界計測	17
3.7 まとめ	27
4. 水中マシンガイダンスシステムの構築とバックホウの刃先の高さ計測精度確認試験	28
4.1 水中マシンガイダンスシステムの構築	28
4.2 陸上での精度確認試験	32
4.3 京浜ドックでの精度確認試験	34
5. 水中マシンガイダンスの実工事適応	37
5.1 平良港漲水地区工事における水中MGの適応	37
5.2 平良港漲水地区工事における水中MG運用試験	39
5.3 遠隔操作化に向けた課題点抽出	40
5.4 まとめ	41
6. まとめ	42
7. あとがき	42
謝辞	42
参考文献	42

Construction of the Prototype of Underwater Machine Guidance System for an Underwater Excavator and Accuracy Verification

Tsukasa KITA*
Taketsugu HIRABAYASHI**
Shunsuke TAKAO***
Muneo YOSHIE****

Synopsis

In marine construction in Okinawa, underwater excavators with divers on board have been used for a long time because the seawater has high transparency, which makes it possible to recognize the situation by direct visual observation. However, with the current way, divers have to work near the underwater excavators. Thus, it takes large effort to ensure the safety of divers. Therefore, in order to contribute to the improvement of safety and productivity, we have studied the application of machine guidance system, which has been used in the land-based construction, to underwater excavators.

In this study, in order to apply the machine guidance system to leveling works of mound, we set a target of ± 32 mm for the height measurement error of tips of excavators measured by underwater machine guidance system. To meet this target, we selected commercially available sensors that can be used in underwater construction, and conducted elemental tests to confirm the accuracy. In addition, underwater tests on mound shape recognition by profile sonar were conducted in our water tank to confirm the characteristics of the surrounding situation recognition.

After that, our underwater machine guidance system was constructed by installing sensors on our underwater excavator. Then, the system was used to measure the terrain by contacting the tip of the equipment on land and in water. As a result, it was possible to measure the shape with a maximum error of +12mm on the concrete surface where the contact position of the tip on land was stable. In the underwater test on a model made of 150mm crushed stone, the measurement error was larger because the contact position of the cutting edge was unclear. However, it was confirmed that the system could measure with an average error of +31mm and a deviation of ± 17 mm.

Additionally, we installed our system on the underwater excavator TKM200-9 and used it as an auxiliary tool in an actual marine construction site. After the experiment, we interviewed the divers and discussed the possibility of remote operation.

Key Words: port construction, underwater excavator, machine guidance, tank test, sea experiment

* Researcher, Meta-Robotics Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
** Head of Group, Cyber Construction Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
*** Researcher, Cyber Construction Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
**** Senior Director for Research
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:kita-t@p.mpat.go.jp

水中バックホウを対象とした マシンガイダンスシステムの構築と精度検証

喜多 司*・平林 丈嗣**・高尾 俊輔***・吉江 宗生****

要 旨

沖縄の海洋工事については、海水が高い透明度を持っているため直接目視での状況認識が可能であることから、潜水士搭乗型水中バックホウが古くから導入されてきた。しかし水中バックホウ近傍での潜水士による作業も発生することとなり、また、潜水時間の制約や波浪、潮流等による作業中止基準は、潜水士の安全確保のため必要である。そこで、さらなる安全性及び生産性向上に寄与すべく、情報化施工技術を港湾施工現場に適用するため、従来陸上施工で活用されてきたマシンガイダンスを水中バックホウに適用できるように検討を行った。

水中マシンガイダンスシステムのバックホウの刃先の高さ計測誤差の目標を±32mmとして設定し、水中施工において使用可能な市販センサを選定し、精度確認のための要素試験を実施した。また、水槽でプロファイルソナーによるマウンド形状認識に関する水中試験を実施し、周辺の状況認識の特性を確認した。

さらに、水中バックホウ試験機にセンサを搭載し、水中マシンガイダンスシステムを構築した。その後、水中バックホウ試験機で刃先接触による地形計測試験を陸上および水中において実施した。その結果、陸上の刃先の接触位置が安定しているコンクリート面では、最大誤差+12mmで地形を計測する事が可能であった。150mm 碎石の模型を対象とした水中試験では、刃先の接触位置が不明瞭となるため計測誤差が大きくなったが、平均誤差+31mm、偏差±17mmの精度で計測可能であることを確認した。

その後、本システムを、水中バックホウ TKM200-9 に搭載し、実際の海洋港湾工事現場において補助的に利用した。潜水士から意見聴取を行い、遠隔操作化に向けた検討を実施した。

キーワード：港湾工事、水中バックホウ、マシンガイダンス、水槽試験、実海域試験

* インフラDX研究領域 メタロボティクス研究グループ 研究官
** インフラDX研究領域 サイバー施工研究グループ長
*** インフラDX研究領域 サイバー施工研究グループ 研究官
**** 特別研究主幹
〒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:kita-t@p.mpat.go.jp

1. まえがき

水中における施工は機械化が進んでいないため未だ人工施工が主流であり潜水士への負担が大きい。また視界の悪さや潮流などの海象条件は作業能率を大幅に低下させるだけでなく、危険の察知や回避といった安全性も低下させる。さらに長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きいなど、その労働条件は陸上に比べて劣悪である。

潜水士の身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べきであり、同時に安全性の確保に関しても大幅な改善が期待できる。そのため水中建設機械が開発されており、その事例として潜水士が搭乗して操作する水中バックホウの実用化が挙げられる。水中バックホウは、港湾構造物の施工において活用され、主に海水の透明度が高く、周囲の状況確認が可能な沖縄管内のマウンドの捨石均し作業で活用されている。

ただし事前に張った水系によりマウンド高を確認するが、作業中に濁水が発生する場合は水系を目視で確認する潜水士が水中バックホウ操作者に指示をする必要があるため、水中バックホウ近傍での作業が発生する。

このような濁りが発生する水中作業では、陸上施工機械において近年普及が進みつつある情報化施工技術を応用することが効率向上に寄与するものと考えられる。そのために、水中における施工状況の認識を行うための外界計測と、その情報を適切に呈示するためのインタフェースであるマシンガイダンスの水中への適応を提案する。

しかし、陸上における既存技術を水中施工機械へ適応するためには、様々な課題が存在する。例えば水中MGに必要となる計測センサについて、陸上で一般的に使用されているGPSやトータルステーションなどの位置測位装置、ステレオカメラなどの地形測量センサの使用が困難となる。そこで代替品として、既に市販されている汎用性のあるセンサを選定することにする。それらのセンサの精度は仕様として公表されているものの、本検討では振動や磁性体によるノイズが作用する条件下での使用であり精度が低下する可能性があることや、仕様の値は製品個体の精度バラツキを十分考慮した値であり実際の精度は異なる可能性があることから、センサ単独での精度検証を行い、水中マシンガイダンスシステム（以後「MG」）への使用可否の判断を行った。

その後、水中バックホウに水中MGを搭載し、外界計測の精度確認試験を陸上及び水中で実施し、システム全体の精度検証を実施した。

また、実工事で使用されている水中バックホウにも水中MGを補助的に搭載し、現場実装で想定される課題点の抽出と意見聴取を実施し、その実用可能性について検討を行った。

2. 現状の水中バックホウ作業の課題と水中マシンガイダンスシステムの可能性

2.1 現状の水中バックホウ作業の課題

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

このため、潜水士による作業に大きく依存しているのが現状であるが、水中作業は、視界の悪さや潮流などの海象条件によって、作業能率が低だけでなく、船舶が多く航行する港内での作業であるなど、危険の察知や回避の困難性から安全性にも課題がある。さらに、長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きいなど、その労働条件は陸上に比べて過酷である。図-2.1、図-2.2に潜水士作業の現状を示す。

図-2.1は防波堤設置工事におけるマウンド構築の様子である。潜水士は5~200kgの石材を手作業により均している。図-2.2は投入されたマウンド石材が不陸になっていた場合、必要な場所へ移設する作業である。潜水士の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べきであり、同時に安全性の確保に関しても大幅な改善が期待できる。



図-2.1 マウンド荒均し作業（±300mm）



図-2.2 マウンド石材の移設

このような潜水士作業に対し、安全性の向上や肉体的負担の軽減を目的とした水中建設機械が開発されており、その事例として潜水士が搭乗して操作する水中バックホウの実用化が挙げられる^{1),2)}。

水中バックホウは平成6年に実海域実験においてその性能が実証されてから、港湾構造物の施工において活用されている。対象としているのは主に捨石荒均しであり、平成7年に沖縄開発庁沖縄総合事務局により行われた平良港パイロット工事の実績では、捨石荒均しでの施工能力が、同様の条件下において在来の作業方法と比較すれば、潜水士船1隻あたりの標準均し能力の約8倍であり、良好な能力といえる。なお、平良港は特に透明度が高いことに留意する必要がある³⁾。

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

現在実用化されている一般的な水中バックホウの仕様を表-2.1に示す。この水中バックホウは、近年では一般的な、船上のディーゼル発電機より発電し、機体に搭載した電動油圧ポンプを動力として駆動させる、E-H (Electro-Hydraulic)方式である。

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

このように、潜水士による水中に対し大きな効果を持つ水中バックホウではあるが、その施工方法や操作は陸上建設機械と同様であり、事前に張った水系によりマウンド高を確認する目視作業となる。しかし、水中における作業の場合、作業中に発生する濁りなどによって透明度が低下し、水中バックホウ運転席から水系を認識しにくくなる問題が存在する。そのため、作業の進捗により施工範囲が変わるたびに別の潜水士が水中バックホウの近傍に水系を張り直し(図-2.3)、その潜水士がバケット付近でバックホウの操作指示を出している(図-2.4)。

このような作業は、陸上施工機械において近年普及が進みつつある情報化施工技術を応用することで、作業効率が向上するものと考えられる。

そこで、著者らは、バックホウのバケットの位置・標高をリアルタイムで取得し、3次元データとの差分を表示し、バケットを誘導するシステムであるマシンガイダンスを水中に適応するため検討を行った。

表-2.1 水中バックホウの仕様 (TKM200 標準仕様)

動力方式	電動機油圧変換方式
定格出力	440V-110kW
標準バケット容量	0.8m ³
主要寸法 (輸送時)	全長:9.625m
	高さ:2.940m
	幅 :2.800m
運転質量 (気中/水中)	19.5t/17.0t
最大作業水深	-50m
最大作業半径	9.959m
水中登板能力	70% (35°)



図-2.3 潜水士による丁張作業



図-2.4 バックホウオペレータへの作業指示

2.2 陸上のマシンガイダンスの事例

国土交通省大臣官房技術調査課が沖縄総合事務局、北海道開発局、各地方整備局に通知した「情報化施工技術の一般化・実用化の推進について（国官技第113号/国総施第31号/平成22年8月2日）」を引用すると、「情報化施工技術は、ICT（情報通信技術）を工事の施工等に活用し、従来の施工技術と比べ、高い生産性と施工品質を実現する施工システムであり、建設業者等が海外において事業を展開していく上でも非常に重要であることから、公共事業において積極的に一般化・実用化を推進する。」とされている。またその通知には「早期実用化に向けて検討を進める情報化施工技術」として、マシンガイダンス（バックホウ）技術が挙げられており、「TSやGNSS、もしくは回転レーザを用いて、バケットの位置・標高をリアルタイムで取得し、3次元データとの差分を表示し、バケットを誘導するシステムを有するバックホウが対象。」と記載されている。

この情報化施工では作業情報を的確に操作者に伝える事を目的としており、この技術を用いることで遠隔操作作業の効率を向上させることが可能である⁴⁾。

例えば赤松谷川 9 号床固工事は雲仙普賢岳復興事業の一部として実施されており、流域を火砕流や土石流被害から守り、安全な生活を確保することを目的として砂防堰堤等の施設を建設する事業である⁵⁾。この工事の施工は危険警戒区域を境に有人施工区域と無人施工区域にまたがっており、無人施工区域では土石流や火砕流の影響を受ける恐れがある。そのため、遠隔操縦装置を装備したブルドーザ・バックホウ・重ダンプ・振動ローラ等の建設機械を、危険警戒区域外にある遠隔操作室から、車載カメラおよび監視カメラによる映像をもとに操作し施工している。

この時に使われた情報化施工技術で、GPS を利用した敷均し管理システム、GPS を利用した転圧管理システムが挙げられる。

GPS を利用した敷均し管理システムは、RCC コンクリートの敷均し作業を行うブルドーザの排土板を、RTK-GPS 測量（Real Time Kinematic GPS）等の高精度な 3 次元計測技術により設計標高に自動制御するものである。オペレータの運転操作を支援するマシンコントロールを導入し、オペレータの負担を軽減するとともに、作業性を向上し、現地での丁張を必要としない精度の高い敷均し高さを確保して施工することが可能であった。

また、GPS を利用した転圧管理システムは、RCC コンクリートの締固めを行う振動ローラの施工管理および運転時におけるオペレータの運転を支援するものである。RTK-GPS 測位等の高精度な 3 次元計測技術を採用して振動ローラの位置を計測することで、オペレータは遠隔操作室において振動ローラの施工範囲全体の転圧状況をモニタ画面でリアルタイムに確認しながら操作を行う。

また、GPS を利用した無人測量システムも使用された。これは出来形計測等の測量作業を GPS と遠隔操作により行うものである。計測は GPS を利用した RTK-GPS 測量により行っており、任意点の連続した計測や計画点の測量および位置出しを行う。無人測量システムは GPS と CCD カメラを搭載した無人測量装置と GPS 基準局、さらにシステム操作とデータ管理を行うための操作・管理用パソコンで構成される。無人測量装置は、ベースマシンに 20 t 級のバックホウを使用し、アーム先端のバケット位置に測量装置を取付ける構造となっている。

加えて、3 次元ガイダンス技術も導入された。本システムはバックホウに搭載した GPS 受信機と各種センサとの組み合わせにより、重機の位置やバケット先端位置をリアルタイムに検知しモニタに表示する。遠隔操作システムとの併用により、無人化施工においても現地丁張り無しで高精度の作業を行うことが可能である。

オペレータは遠隔操作室において無人カメラ車の映像を利用するとともに、搭載モニタに映しだされる設計形状とバケット位置の比較表示を基に作業を行う。

バックホウには GPS 受信機を 2 台搭載し、ブームに付けられたセンサによりバケット位置を算出する。バックホウの運転席に設置したコントロールボックスに、予め 3 次元 CAD により作成された設計データを入力しておく、重機の位置およびバケット先端位置と設計形状がモニタに比較表示される。本システム導入により、バックホウによる掘削・床堀等の施工において丁張りを必要とせず施工することができている。

2.3 水中マシンガイダンスの提案

作業効率向上のため、このマシンガイダンスの技術を水中バックホウに適応することで、バックホウのバケットの位置・標高をリアルタイムで取得し、3次元データとの差分を表示し、バケットを誘導するとこととした。

しかし、情報化施工技術は陸上施工を対象としたものが一般的であり、水中工事における技術開発は進んでいないのが現状である。その理由として、水中施工の現場条件として、電気電子機器の防水、内燃機関の利用不可などの事情に加えて、視界が不良な場合が一般的であるため、操作状況の認識を映像情報だけに頼ることができないという問題がある。

例えば、国際海上コンテナターミナルを有する中核国際港湾として整備を進められた茨城県の常陸那珂港では、水中透視度がおおむね0.3~0.5m、良くて1.2m程度であり、この条件では光学式カメラによる地形状況把握は不可能である。さらに、水中では赤外線やレーザ等の光波の減衰が著しいため、陸上で用いられる光波式測量機器等の使用が困難である。その上に、水中では電波も減衰するため、陸上で用いられているGNSSなどの計測センサー類のほとんどが利用できない。

このため水中では超音波を用いた測量、位置計測等が行われるが、光波や電波と比較して波長が長く精度に限界がある。このように水中での外界計測は困難な場合が多く、均し作業など精度が求められる施工においては、情報化施工が実現していない。

この問題に対し、接触情報により地形(マウンド)を認識する遠隔操作支援システムの研究がなされている⁹⁾。これは図-2.5のように、マウンド面との接触座標を蓄積しコンピュータグラフィックスとして描画することで接触情報を視覚的に呈示する。これによりオペレータは掘削などの作業により変化したマウンド形状をリアルタイムに認識可能となる。CGには現状のマウンド形状のほかに設計形状を重畳して表示することで、形状の比較を常時行ないながら作業できるよう配慮した。

このように研究段階であるが、水中建設機械における情報化技術、および、遠隔操作技術は存在する。ただし、対象はマウンドの荒均しであるため、その均し精度は±30cmを目標としたものである。また、遠隔操作を目的とした技術であり、バケットの接触による計測精度の検証はなされていない。

水中マシンガイダンスを実現するためには、本技術のうち、接触による地形計測を応用することが考えられる。ただし、バケット先端の計測精度について検証する必要がある。そのためには使用するセンサーの精度を確認する

必要がある。各センサーの精度は仕様として公開されているが、経験上、振動が作用する条件や、磁性体やモーター付近での使用は、一般的な条件で計測された仕様よりも精度が低下する。また、仕様の値は、製品個体の精度バラツキを十分考慮した値であり実際の精度はさらに高い可能性がある。そのため、センサーの1つ1つの精度検証する必要がある。

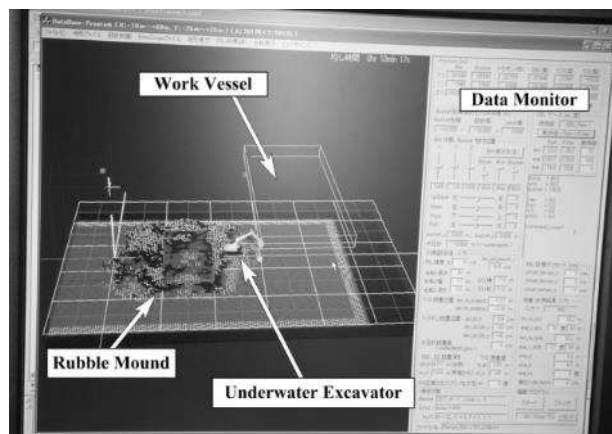


図-2.5 遠隔操作支援システムの画面表示

3. 使用するセンサーの選定と精度検証

マシンガイダンス技術を水中施工機械へ適応するためには、様々な課題が存在する。たとえば水中MGに必要な計測センサーについて、水中では濁りによる透明度の低下や電波の減衰により、陸上で一般的に使用されているGPSやトータルステーションなどの位置測位装置、ステレオカメラなどの地形測量センサーの使用が困難となる。また代替品を選定する場合、実用化を考慮すると、コストに寄与し、かつ、入手が容易である必要があり、既に市販されている汎用性のあるセンサーを選定することが望ましい。

さらに海水による腐蝕、高圧環境を考慮すると回転軸といった機械的な可動部分が無いことが望ましい。

また、検出したセンサー情報を元に、搭乗する操作者に情報を提示する表示モニターについて、陸上のMGでは、機体周辺の現状地形の認識は目視により可能であるため、設計値のみを表示することが一般的であるが、水中では周囲現状地形の目視認識が困難である。水中作業の安全性向上のために既設構造物の表示などが必要である。

さらに、陸上のMGでは様々な機体に設置する汎用性を考慮し、関節角度の認識に重力加速度を計測する方式が多い。しかしこのような重力加速度を検出する場合、機

体の運動や振動による加速度も検知するため、その静定のために遅延が存在する場合が多い。濁水中での作業ではモニタ表示だけの運転操作が必要になる場合も考えられるため、表示のリアルタイム性が必要である。

本章では、これら現状の課題点に対し、水中 MG で用いるためのセンサについて検討を行う。なお、センサ選定にあたり、水中 MG の計測誤差の許容値を設定した。機械均しによるマウンド本均しの精度を±100mm とし、その±100mm の範囲に入っているマウンド面の高さが目標値に対する正規分布であると仮定した場合、±1σ の区間に入るのは±68mm となる。そこで、100mm から 68mm を引いた±32mm を MG 計測の許容誤差とした。

3.1 機体姿勢検出（関節角度）

陸上施工機械では一部、重力加速度から関節角度を求める方式も存在するが、作業中の振動や動作運動時の制限時間・計測遅延時間の問題もあるため、シリンダの伸縮量を直接計測する方式が望ましいと考える。この点において磁歪ストロークセンサ（図-3.1）は有効であるものと考えられる。

磁歪ストロークセンサはWiedemann効果（棒状の強磁性体に対し、縦方向磁場と輪状の磁場を重ねて印加したとき、強磁性体がねじれる現象）による磁歪現象を利用した変位センサであり、センサロッドに沿って移動する磁石により磁歪線の上に発生するねじり歪みの伝搬時間によって位置を計測している（図-3.2）。そのため機械的な部分が存在せず、バックホウの油圧シリンダ内部に設置しシリンダのストロークを計測している事例がある。

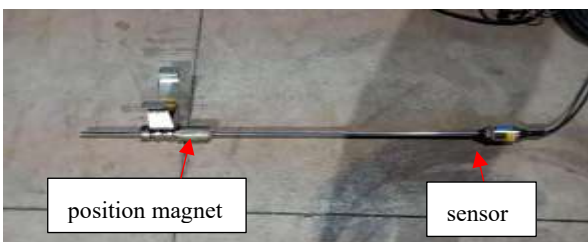


図-3.1 磁歪式ストロークセンサ

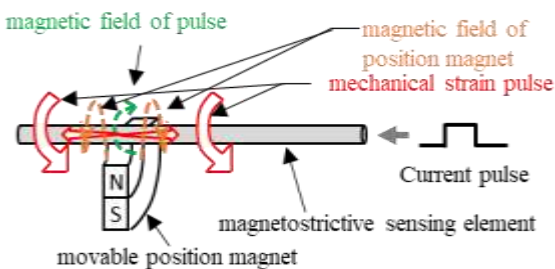


図-3.2 磁歪式ストロークセンサの原理

ここで、バックホウのシリンダ長と関節角度の関係について考えると、図-3.3に示すように、リンク機構を介してブーム等を駆動しており、直動するシリンダの変位量を計測する場合、その数値から角度を算出する必要がある。

例えばブーム角度 θ_b を考える場合、図-3.3に示す b_1 と b_2 は機体固有の長さであり、シリンダ長さCylinder-boomを計測した場合、三辺の長さが確定される。余弦定理より、

$$\cos \theta_b = \frac{b_1^2 + b_2^2 - (\text{Cylinder-boom})^2}{2 \cdot b_1 \cdot b_2} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。ここで水平からのブーム角度を算出する場合、機体ベースと b_2 のなす角度（図-3.3の場合は32.1度）と、ブーム軸間線と b_1 のなす角度（図-3.3の場合15.9度）を減算する。ブームに対するアームのなす角度、アームに対するリンクロッドの角度についても同様に算出することができる。なお、バケットの角度については、リンクロッドの角度より算出することができる。

水中MGでは、これらの式から、先端座標を計測することとした。ここで、日立建機製ZX40を対象とした場合、ブーム長が2680mmである。ブーム角度45度の場合に油圧シリンダストロークの計測に+1mmの誤差が乗ると、角度誤差としては、+0.156degの誤差となる。この場合ブーム先端座標の高さには5.162mmの誤差が発生することになる。ブーム、アーム、バケットにおける計測誤差が加算されることを考えると、水中MGにおいては、油圧シリンダのストローク計測において±1mm以下の計測誤差に収まるセンサを選定する必要がある。

本検討ではサンテスト社製GYcRSプローブを採用した。

また、バケット先端座標を計算するためには、水中バックホウの軸であるブーム・アーム・バケットの角度と、各軸間距離により算出することとなる。そのため、バケット先端座標算出に関する軸座標について光学式測量機を用いて計測を行った。

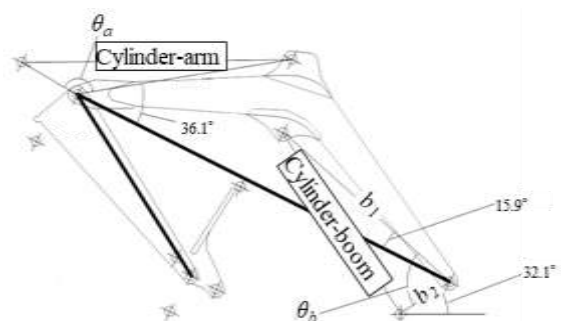


図-3.3 バックホウのシリンダ長と関節角度の関係

3.2 機体傾斜検出

(1) センサの選定

機体の傾斜は重力加速度を検出し、その方向を鉛直として算出することが必要である。ここで、水中バックホウの機構を考えた場合、旋回中心からバケット先端までの距離は一般的な水中バックホウ（20tクラス）で約10mあるため、計測誤差を考慮すべきである。

たとえば、機体が水平な状態で傾斜角度に1度の誤差が乗った場合、10m先のバケット高さは約174mmの誤差が発生するため、機械均し精度基準である±10cmの検出は不可能となる。計測時のバケット距離を旋回中心から5mとした場合、傾斜による誤差を20mm程度とするためには、分解能0.1度以下、検出誤差±0.2度以下の傾斜センサを選定する必要がある。本検討では過去の実績より日本航空電子製のFOG7402Aを選定した。その仕様で示される誤差は±0.15度である。

(2) センサの精度検証

そこで、傾斜センサの実精度を計測することとした。計測では図-3.4に示すように、任意の傾斜とする治具を製作した。また、設置場所は震動が発生しにくいコンクリート面としたが、その面が水平とは限らないため、四隅のねじの突起量を調整することにより水平を確保した。

水平を確保したベースフレーム上に蝶番により角度をもたせる傾斜フレームを配置し、センサを固定した。この傾斜フレーム端部の高さを調整することで、任意の傾斜を発生させている。計測状況を図-3.5、図-3.6に示す。

傾斜センサ精度試験の条件として、傾斜は水平から±3度までを0.5度間隔で計測した。計測点数は0.1秒間隔で5秒間（50回）とし、その平均と標準偏差を計測した。

表-3.1は計測結果である。治具の形状から、センサに対し仰角と俯角を計測する際に再設置を行ったため、仰角俯角それぞれに0度が存在する。

仕様±0.15度の精度に対し、実測では平均俯角-0.038度、仰角0.02度と非常に高い精度で計測が可能であった。

また、5秒間50回の標準偏差も最大0.003度であり、ほぼ静定した数字となっている。また、FOGは、角加速度も計測しているため、その積分で方位を検出する事が可能であり、応答速度も速く精度も高い。しかし電源を入れた方向が基準となるため、実際の方角を検出することはできない。また振動などによる外乱で加速度が乱れると誤差が蓄積するため、計測する時間が長くなる場合に方位のドリフトが大きくなる。

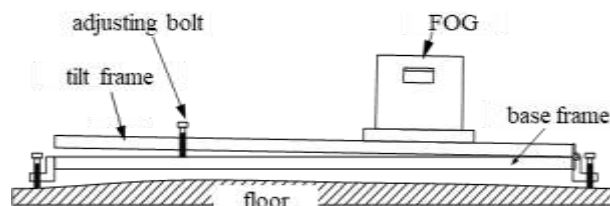


図-3.4 傾斜センサ精度計測治具

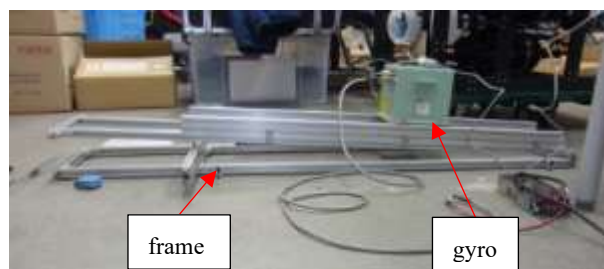


図-3.5 傾斜センサ

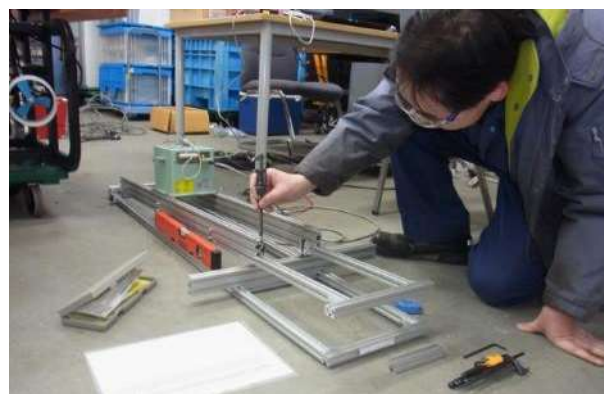


図-3.6 傾斜センサの精度計測状況

表-3.1 FOG7402A の計測結果

治具傾斜 [°]	俯角								仰角							
	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	平均	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	平均
計測結果 [°]	-3.050	-2.545	-2.056	-1.567	-1.028	-0.511	-0.012		0.015	0.483	0.983	1.461	1.978	2.488	2.983	
差[°]	-0.050	-0.045	-0.056	-0.067	-0.028	-0.011	-0.012	-0.038	0.015	0.017	0.017	0.039	0.022	0.012	0.017	0.020
標準偏差 [°]	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.002		0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	

3.3 機体方位検出

(1) センサの選定

水中バックホウでの作業を考慮した場合、機体の方位は上部旋回体の操作により常に変化するものと考えられる。また施工管理上、絶対方位として検出する事が望ましく、GPSが使用できない水中では地磁気を検出する必要がある。ただし地磁気方位計は微小な地磁気を検出するため、応答速度（整定時間）が悪く、旋回運動中の検出には適していない。また磁性体である水中バックホウに搭載した場合の精度が不確実である。これらの特徴を考慮した場合、地磁気方位計と加速度ジャイロを併用することが望ましい。これにより、運動中の高精度な方位角はジャイロの値を参照し、停止時に地磁気方位計の値を平均化することで絶対方位を検出し、ジャイロの方位を補正することが可能となる。

方位角の検出精度については、均し作業ではバケットの背面で叩く作業が想定されるため、旋回中心から5mの位置で、バケット幅の半分程度で計測可能な精度を保有する必要がある。例えばバケット幅を1mとした場合、検出精度は±2.87度となる。本検討では地磁気方位計はHaneywell社製のHMR3000を選定した。

(2) センサ単独での精度検証

初めに、センサの精度検証のため、このセンサで検出した真北を基準とし、90度間隔で計測を行った。また計測時間は1秒間隔で60秒の60点のデータとした。

計測の様子を図-3.7に、結果を表-3.2に示す。単体での計測では最大4.2度の誤差が発生しており、設定した許容値（2.87度）を越えた値となった。ここで初期値の0.03度と1周させた時の359.72度に注目すると、その差分は0.31度となり、磁北方位の検出であれば許容値以下の計測は可能である。

つまり、通常はジャイロの計測値を使用し、磁北方位をまたぐ旋回を行った際にジャイロ計測値を補正することで、許容範囲内における機体方位の検出が可能となる。

しかし、バックホウ本体が磁性体である事と、磁場を見だす恐れのある水中モータが近傍にあるため、誤差が発生することが考えられる。

(3) バックホウに取り付けた状態のセンサの精度検証

そこで、地磁気方位計をバックホウに取り付けた状態で地面にマーキングした目印を基に10度間隔で旋回させ、地磁気方位計の計測誤差を計測することとした。図-3.8にマーキングの状況を、図-3.9に計測中の状況を示す。

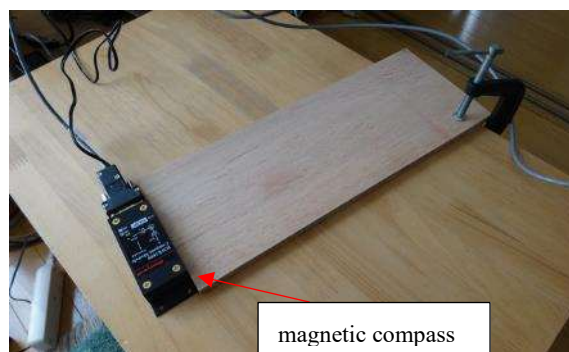


図-3.7 地磁気方位計精度確認状況

表-3.2 地磁気方位計 HMR-3000 の計測結果

真値	HMR-3000 計測値[°]
0°	0.03
90°	91.18
180°	182.03
270°	274.20
360°	359.72

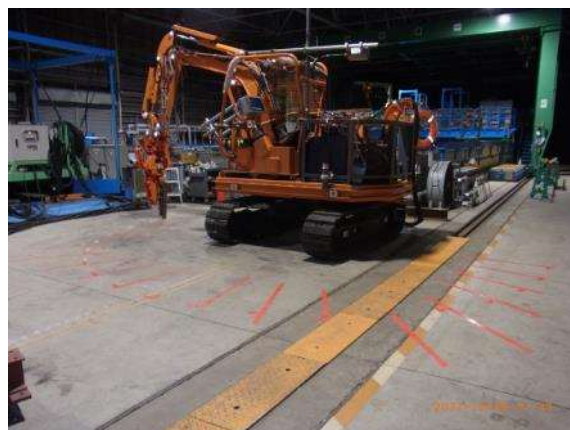


図-3.8 方位マーキング



図-3.9 計測状況（方位）

図-3.10 は計測結果をグラフ化したものである。誤差の発生量は一定で無く、方位によって変動することがわかる。特に FOG 出力で 80 度付近では地磁気方位で 10 度近い誤差となっており、定数補正では修正が困難である。そこで、方位によって補正值を変動させるルックアップテーブル方式（方位により非直線的に変動する誤差に対し、表として保持している補正值を適宜参照して補正する手法）により計測誤差を修正することとした。

補正值の計測については、キャビン上部に GPS 方位計を設置し、GPS 方位計のデータで 10 度間隔に旋回を行い、その時の地磁気方位計の値をサンプリングすることとした。図-3.11 に GPS 方位計の設置状況を、図-3.12 に計測中の状況を示す。図-3.13 に補正值のグラフを示す。

(4) ブーム上下による計測誤差に関する検討

今回方位計測のために使用したセンサは地磁気を検出するため、磁性体であるバックホウに設置した場合は、その姿勢によって計測方位が異なる可能性がある。図-3.14 は方位固定でブーム角度を変化させたときのグラフである。

ブーム角 60 度付近から計測値に変化量が大きくなり、ブーム角 80 度では約 2 度の方位誤差が発生していることがわかる。

ただし、今回の MG において、バケットを地面に接触させたときのブーム角度は約 38 度であり、その角度において地磁気方位に大きな影響は見られないことがあきらかとなった。ただしブームを引き上げた場合に方位誤差が発生する事は留意すべきである。

また、今回使用した地磁気方位計（Honeywell 社 HMR-3000）のデータを 10Hz 周期で記録しているが、機体の震動によるものとみられるノイズも検出している。

図-3.15 は方位固定の状態でのブームのアップダウン操作を行った時の地磁気方位計の出力である。操作については緩衝的な入力をせず、操作入力はいきなり最大とし、停止時は操作レバーから手を離すことで衝撃を与えた。

図-3.16 はスパイクノイズの場所（図-3.15 一点鎖線枠部）を拡大した図であり、地磁気方位計データを 10 回平均、50 回平均を重ねたものである。多少の遅延は発生するものの、衝撃によるノイズは発生していないことがわかる。

水中 MG では、このような衝撃によるノイズの削除に時間平均化処理を行うこととした。

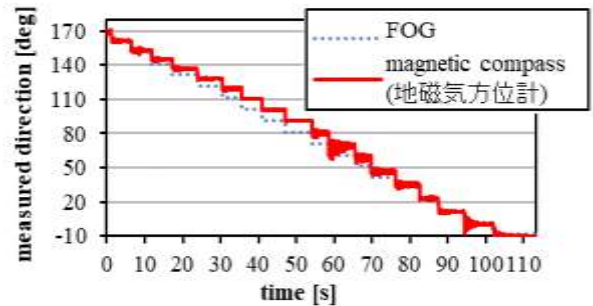


図-3.10 FOG と HMR-3000 による方位計測の差

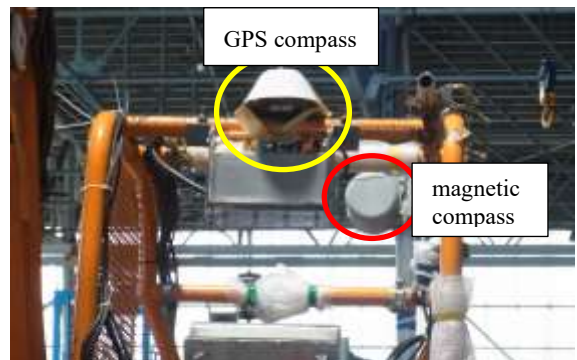


図-3.11 GPS 方位センサと地磁気方位計



図-3.12 計測状況（地磁気-GPS 方位）

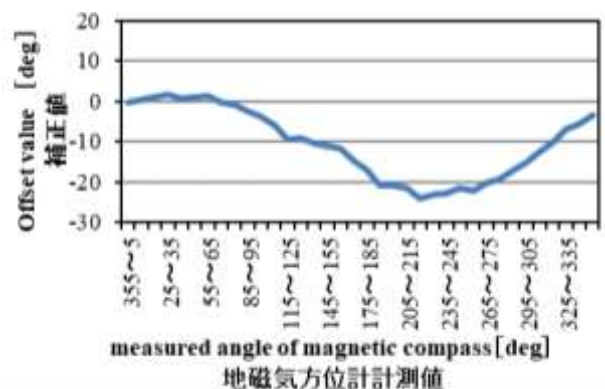


図-3.13 GPS 方位計を基準とした地磁気方位補正值

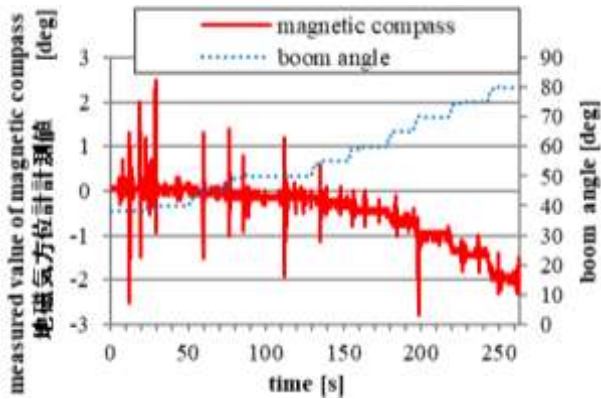


図-3.14 地磁気方位計に対するブームの影響

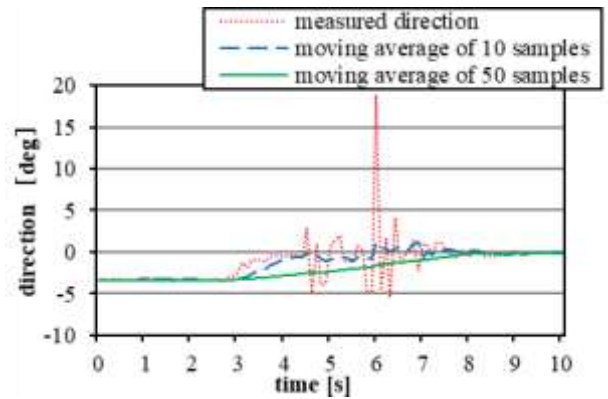


図-3.16 スパイクノイズ部の拡大と平滑化処理によるノイズ対策結果

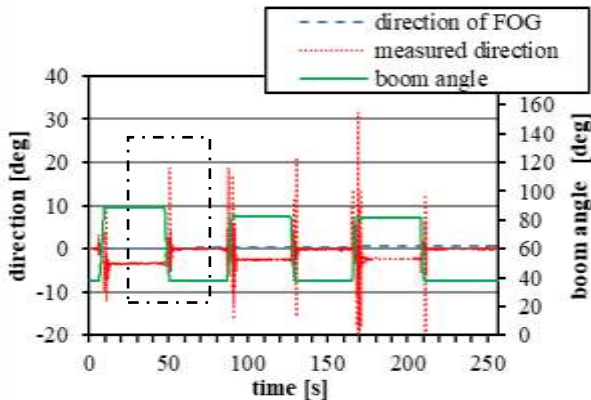


図-3.15 地磁気方位計に対する振動の影響

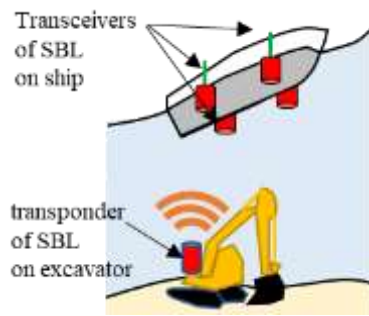


図-3.17 音響による水中位置検出

3.4 水中位置検出 (XY平面)

(1) センサの選定

水中での位置検出には図-3.17のように音の伝搬時間を計測し、三角測量の原理で計測する事が一般的である。しかし光と比較して音の波長は長くなるため、計測の分解能および精度は低くなる。

ここで水中施工機械によるマウンド均し作業では、バケットの背面で叩く作業となるため、平面座標については高精度な計測は不要であると考えられる。ここで平面位置精度について、バケット背面で面的に均す作業である事を考慮し、バケット幅の半分の精度があれば良く、許容誤差は±500mmとした。

水中の場合、電波が減衰するためGPSが使用できない。また濁りなどにより光学測量器も使用が制限される。そこで機体の水平位置を検出するセンサとして、複数箇所への音波の伝達時間を計測し、その時間差から位置を計算するSBL (Short Base Line) が考えられる。本検討ではLinkQuest社製のTrackLink1500を選定した。(図-3.18)

ただし、超音波を用いているため、GPSや光波測距より精度は低下することが一般的である。本項では水槽実験によりその位置精度を検証する。



図-3.18 TrackLink1500 の写真 (左: トランシーバ, 右: トランスポンダ)

(2) 水槽内でのセンサ単独の精度検証

実験は当所水槽の水深-1mの場所にトランシーバを設置し、既知の位置にクレーンで設置したトランスポンダの位置を検出する。水平距離方向については1m~6m (1m間隔) の6点、水深は-1.5m, -2m, -3m, -4mの計24点を計測した。図-3.19に水槽におけるSBL精度計測状況を示す。図-3.20に水平面における散布図を示す。なお散布図の原点はトランシーバ設置位置、X軸が壁面と水平方向である。

結果として、近距離であれば高精度かつ安定して計測

することが可能であった。ただし、水平距離が大きくなった場合、計測誤差が大きくなる傾向であった。

次に、トランシーバの設置位置について、設置の容易さを考慮した場合、一般に壁面付近に設置する事が考えられる。その場合、壁面で反射した音の影響が考えられる。そこでトランシーバを壁面付近（約 50cm）に設置し、X: -3.0m, Y: -2.0m の位置にトランスポンダを着底させた場合の位置計測を行った。

図-3.21 に設置状況を示す。図-3.22 にトランシーバを壁面に設置した場合の位置散布図を示す。結果として、X 方向に約 0.5m の位置の誤差が発生した。この要因としては、壁面反射の影響が考えられる。

同様にトランスポンダを壁面付近に設置した場合の結果を図-3.23 に示す。この場合、トランスポンダの位置はトランシーバから見て X: 3.5m, Y: -2.2m である。この結果では壁面の影響は少ないことがわかる。

今回の実験では、トランシーバを設置した場合に、壁面からの反射の信号を捕らえ、誤差が発生した。このため、トランシーバを壁面から離すか、壁面側に吸音材などを設置する方法が対策として考えられる。

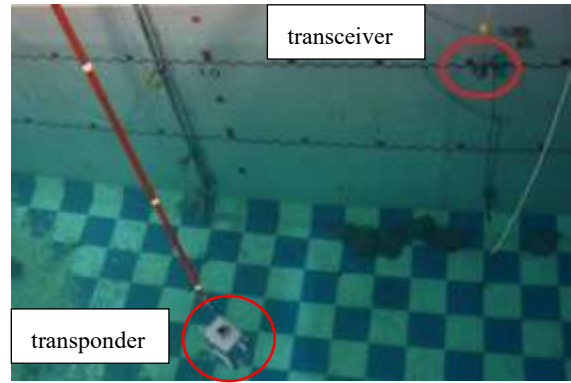


図-3.21 トランシーバ壁面設置の状況

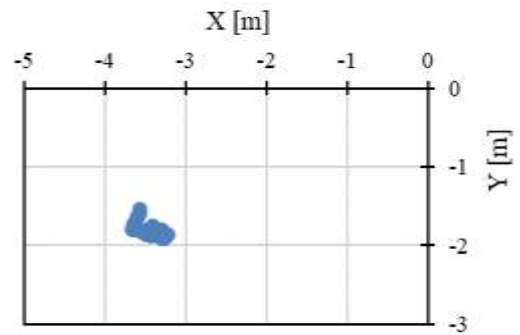


図-3.22 トランシーバ壁面設置時の計測結果

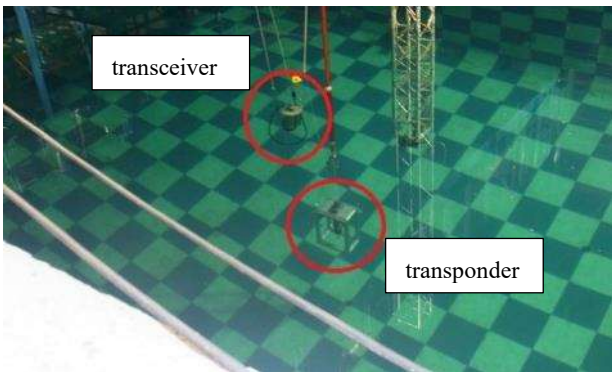


図-3.19 SBL 精度計測状況

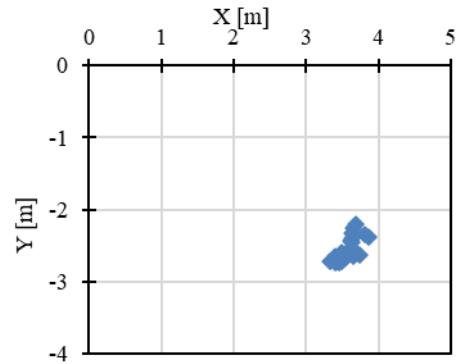


図-3.23 トランスポンダ壁面設置時の計測結果

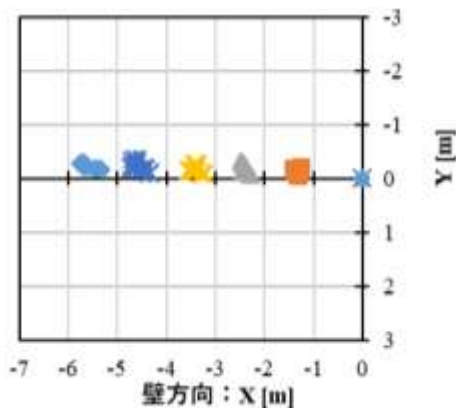


図-3.20 SBL 位置計測結果

(3) 水槽内でのバックホウ設置時の精度検証

SBL は音波を使用しており、水中バックホウのモータ音などの外乱ノイズについて検証した。実験は水中モータを起動させた状態で、バックホウ側面 1m, 水中モータ直近、動力ケーブル直近にトランスポンダを設置し、位置変化量を計測した。図-3.24 に設置状況を示す。図-3.25 に計測結果を示す。

結果として、水中モータ稼働時においても、安定した計測が可能であった。

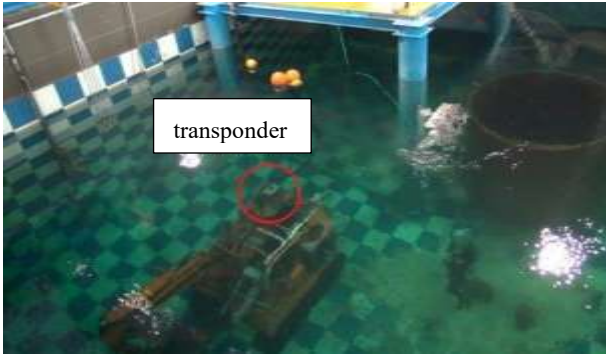


図-3.24 動力ケーブル近傍へのトランスポンダの設置

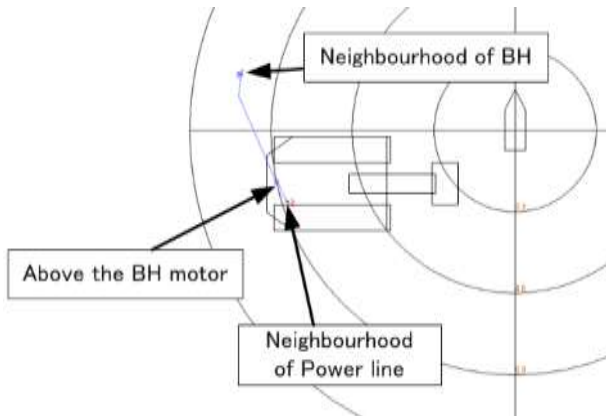


図-3.25 SBL ソフトウェアの表示画面

(4) 実現場でセンサ単独の精度検証

また、現場での誤差については、水槽で再現することは困難である。そこで、水中バックホウが稼働中の工事現場において、音響測位装置の性能試験を行うこととした。図-3.26 に計測状況を示す。

実験は台船側面からトランスポンダを吊り降ろし、海底へ着底させ静止させた状態での位置データの離散について計測する。計測は2m間隔で行い、一点あたりの計測時間は60秒とした。図-3.27 に水平方向の、図-3.28 に鉛直方向（水深）の精度試験結果を示す。なお、図-3.27の原点はトランシーバ設置、X軸を台船船主方向とした。また、図-3.28には水深にあわせて、トランシーバからトランスポンダまでの距離を示している。このグラフからわかるように、トランシーバから15mまでは、位置データの離散が無く、安定して計測が可能であった。

このときのトランシーバとトランスポンダの水深差は約9.2mであるため、トランシーバからトランスポンダへの俯角は約 31.52° となり、計測範囲に直すと約 117° の範囲となる。実施工現場においてはこの範囲内に水中バックホウが入るようにトランシーバの設置を行う必要がある(図-3.29)。



図-3.26 計測状況（単体精度）

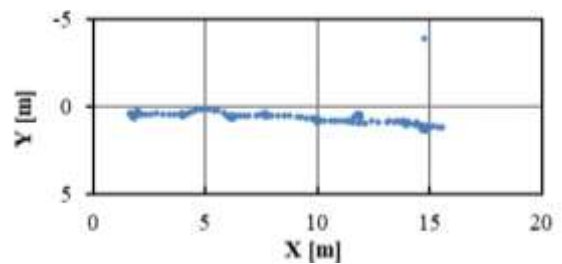


図-3.27 SBL 単体精度試験結果（平面座標）

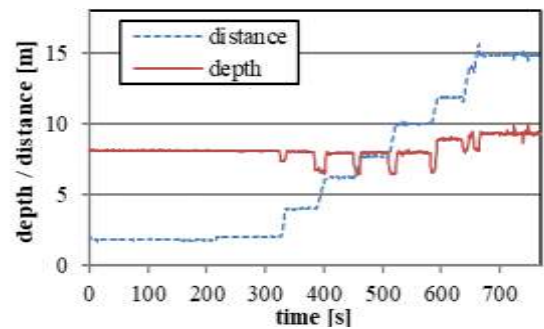


図-3.28 SBL 単体精度試験結果（水深方向）

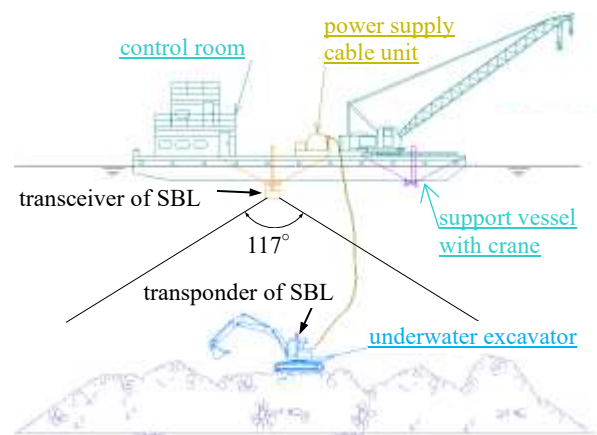


図-3.29 音響測位装置（SBL）の計測範囲イメージ

(5) 実現場でバックホウ設置時の精度検証

次に、SBL トランスポンダを工事稼働中の水中バックホウに搭載し、約3分間の位置計測を行った。なお、運転操作は旋回運動のみでクローラによる移動は行っていない。図-3.30 に水中バックホウへのトランスポンダ搭載状況を、図-3.31 に計測結果を示す。なおトランスポンダ設置位置が原点、X軸を船首方向とした。

図-3.30 からわかるように、旋回中心より後方約1.5mの位置にトランスポンダを設置しているため、旋回によってその位置が移動することとなる。そのため図-3.31 では離散しているように見えるが、計測点の多くが横幅3m、縦1mの範囲に入っており、これは旋回運動によるトランスポンダの移動量を計測したものと考えられる。

また計測時間の中で明らかに離散したデータは1点のみであり、多少大きな離散点についても2点という事から、稼働中においても水中バックホウの位置計測は可能であると言える。ただし実現場では様々な使用方法が考えられ、例えば水中バックホウを既設防波堤や岸壁などに近接して使用する場合は、壁面反射の影響が発生する可能性が残る事に留意する必要がある。



図-3.30 SBL トランスポンダ搭載状況

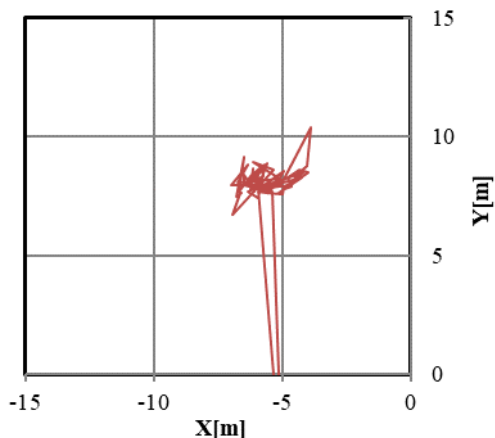


図-3.31 計測結果 (水中バックホウ稼働中)

3.5 水中位置検出 (水深)

(1) センサの選定

機体の水深方向の座標については、その誤差がバケット高さの精度に直結するため、SBL音響測位の精度では不足する。そのため高精度水圧計を使用する方式が考えられる。

バックホウ機体の高さ方向の変化は、マウンド上を移動するときに変化するが、クローラを停止し旋回作業時には大きな変動は無いものと考えられる。また、波の影響については、中位のうねり(気象庁うねり階級(Swell)では、波長100~200m、周期8.1~11.3秒と規定)程度を考慮し、うねりの3波程度の時間(30秒)をサンプリングする必要がある。

また、真水の場合、4℃の比重が1であり、20℃では0.998230となることが知られている。この場合、10m水深で約17.7mmの差が生じる。

可能な限り高精度に水深を計測する場合、水深が既知である場所でのイニシャライズが必要であるものと考えられる。本検討では、2つの水圧計を設置することとした。1つは水深が既知でバックホウの動作深度に近い周辺のケーソンやマウンドなどの構造物に固定し、潮位の変化を補正に用いる。もう1つは機体に設置し、その変化を計測することとした。

本検討では、仕様±0.15%RO (Rated Output: 定格出力)の高精度水圧計を使用する。センサについては「水圧式水位計」と呼ばれており、一般に市販されている。今回は計測機器の製造を行っている株式会社共和電業製のBWLシリーズを選定した(図-3.32)。

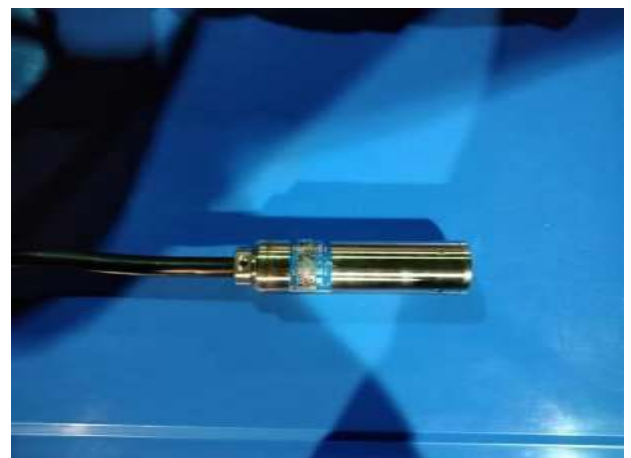


図-3.32 共和電業 BWL-10MET の写真

(2) 水槽内でのセンサの静水中の精度検証

選定したセンサの精度を実験水槽において検証した。

またケーソンマウンドの水深は約 10~20mが一般的であるため、測定レンジが 10mと 20mのものについて、その計測精度を検証する。計測方法は、水圧センサ (BWL-10MET) にメジャーを設置し、1m間隔で 5m水深までのデータを記録した。データ計測間隔は約 0.022 秒 (センサアンプからの連続出力に依存)、計測時間は 20 秒とし、870 回の計測を平均する。図-3.33 に計測時の状況を示す。

表-3.3 と表-3.4 に水圧計の計測結果を示す。10mレンジの水圧計については、仕様記載の計測誤差±15mmのところ、最大 4.9mm となった。また 20mレンジのものについては仕様記載の計測誤差±30mmのところ、最大 11.5mm となった。また偏差についても大きく振れておらず、安定した計測が可能と言える。

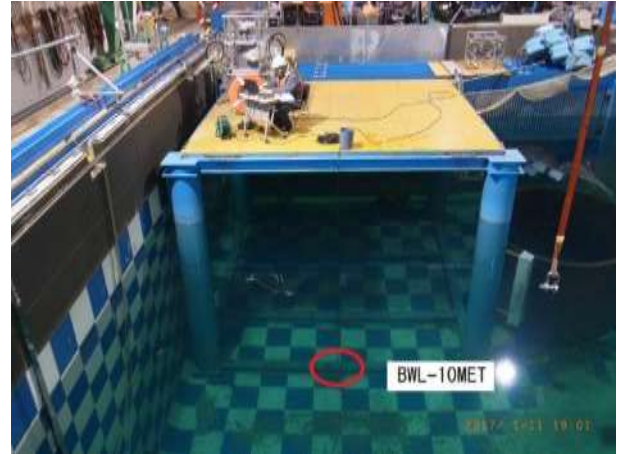


図-3.33 水圧計精度計測状況

表-3.3 BWL-10MET (10mレンジ) 計測結果

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

表-3.4 BWL-20MET (20mレンジ) 計測結果

水深[m]	1	2	3	4	5
水圧計数値 [m]	0.9901	1.9885	2.9912	3.9954	5.0000
差[m]	-0.0099	-0.0115	-0.0088	-0.0046	0.0000
標準偏差[m]	0.0015	0.0034	0.0022	0.0031	0.0021

(3) 水槽内でのセンサの造波中の精度検証

また波浪に対する影響についても検討する必要がある。当所実験水槽において波高 150mm, 周期 2.4 秒の造波を行い、同様の計測を行った。造波に対する計測結果を図-3.34 と図-3.35 に示す。この図からは水圧計が浅い位置に設置されていた場合に影響を受けることがわかる。しかし-5mの水深では、ほぼ影響が無いことがわかる。

また、20 秒間の平均を算出したところ、-1mにおいてもほぼ正確な値となっており、複数波をまたぐ時間での平滑化は有効であるものと考えられる。表-3.5 に水槽実験における造波時の平均を示す。

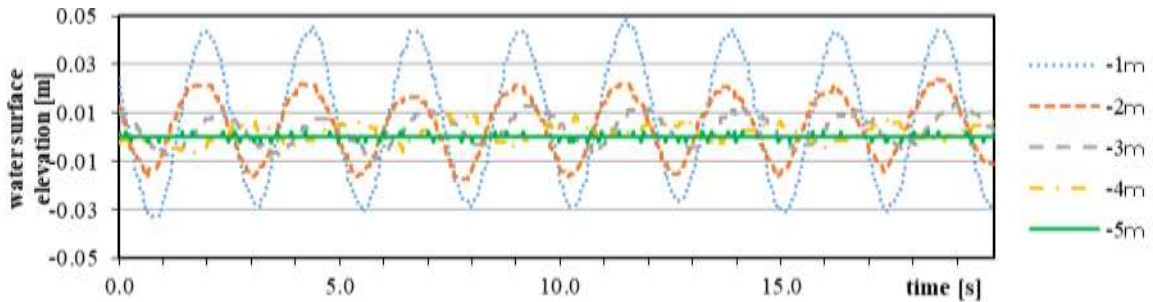


図-3.34 各水深での 150mm 造波時の水圧計データの変動の違い (10mレンジ)

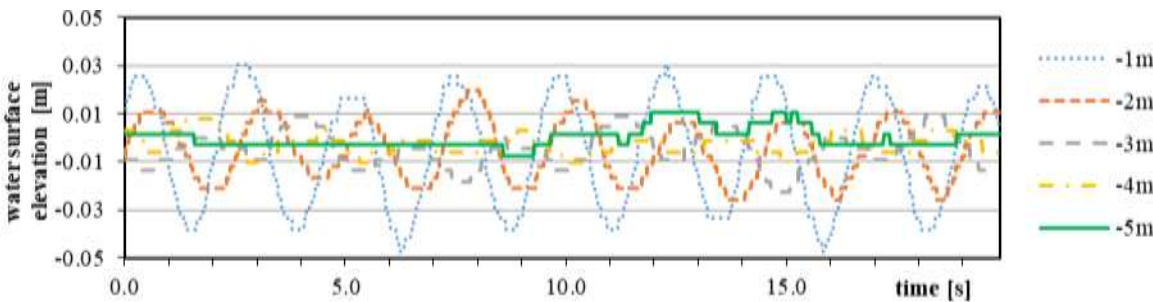


図-3.35 各水深での 150mm 造波時の水圧計データの変動の違い (20mレンジ)

表-3.5 造波時に水圧計が計測した平均水深

水深[m]	1	2	3	4	5
10mレンジ[m]	1.0074	2.0043	3.0032	4.0018	5.0000
20mレンジ[m]	0.9949	1.9951	2.9951	3.9973	5.0000

(4) 港内でのセンサの精度検証

横浜港岸壁においても同様の試験を実施した。図-3.36のように水圧計にメジャーを取付け、岸壁から1m間隔で海中に投入し、そのデータについて約3秒間(155点)の平均を求めた。図-3.37に計測状況を示す。

図-3.38は横浜港岸壁における水深計の計測データである。波があるため正確な水深(真値)の計測は困難であり、最初の計測点を基準とした相対的な水深とした。

この図のように波浪が存在する実海域においても、ほぼ水深に比例して計測ができていることがわかる。

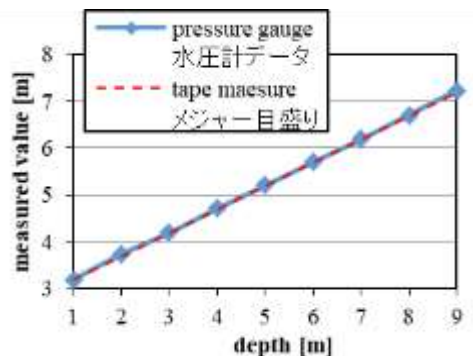


図-3.38 実海域における水深計測結果



図-3.36 メジャー取付



図-3.37 計測状況

3.6 外界計測

(1) 外界計測センサの選定

外界計測(海底形状把握)に使用するためのセンサとして、プロファイルソナーを設置検討のための試験を実施した。これは、MGの刃先計測で得られる高さデータが「点」となってしまうため、作業範囲の面的な形状をあらかじめ認識したいという潜水士からの意見を反映させたものである。

選定要件として、以下の4点を検討した。

a) 面的に計測可能

水中MGの方位情報を用いる事が可能である。そのため、ソナーは断面計測が可能であることを必須条件とする。バックホウの旋回で、計測断面が断面と垂直方向に移動することで面的に計測を行う。またアームの作業範囲が約5mであるため、断面長さ5mを計測可能なこととした。

b) リアルタイム性の高さ

水中MG内でセンサ情報をまとめる感覚を0.1秒とするため、センサからのデータの出力が0.1秒以内であることを条件とし、かつ、後処理を必要としないものとする。

c) 割石個体の形状(輪郭)が認識できる程度の高分解能測線におけるレンジ分解能を一般的な音響計測機器と同等の10mm以下であることを条件とする。ただし、旋回方向の分解能については水中MG搭載の方位センサに依存する。

d) 入手の容易性

実工事適応において、入手性や故障時の交換が容易な事を考慮すると、国内で入手可能な市販品を選定することが望ましい。

以上の要件を満たすプロファイルソナーとして、本検討では、Kongsber社製M3を選定した。その仕様を表-3.6に、写真を図-3.39に示す。M3は、断面形状を計測するプロファイルモードのほか、反射強度を陰影表示するイメージングモードを持つ、マルチビームソナーである。プロファイルモードでは、図-3.40のように音響ビームのビーム幅は3度であるものの、計測角120度の範囲において最大256点を計測しており、密な計測が可能となる。また距離分解能は1cmである。さらに更新周波数は40Hzであり、リアルタイム性も高いといえる。

(2) 水槽でのセンサ単独での壁面・底面計測

センサ単体の精度検証として、初めに当所水中作業環境再現水槽において、単体の動作試験を実施した、その状況を図-3.41に、計測時の表示画面を図-3.42に示す。画面右側の緑の点が計測された点である。

底面が安定して計測可能である事、表示の更新速度が1秒以下であることを確認した。

なお、壁面については、上部は安定して計測されたが、下部は計測が安定せず形状が認識できなかった。これは、プロファイルソナーが発射した音波の壁面に対する入射角が大きくなり、プロファイルソナーへの反射が計測の閾値より小さくなるためと推測される。

図-3.43では、わずかに水槽底面が傾斜しているように計測された。これはM3ソナーの水中での設置において水平出しを行うことができず、設置時の誤差であるものと考えられる。そのため計測結果の近似直線が水平になるよう回転(0.63度)させた結果を図-3.44に示す。

回転補正後のデータ全体の標準偏差は $\pm 7.2\text{mm}$ であったが、図-3.44を見るとセンサ直下から0.75mの位置で計測値の振れ幅(偏差)に差が見られた。

表-3.7は計測範囲を50cm間隔に区切り、各範囲における偏差を示したものである。傾向として、センサ直下はデータの離散が少ない結果となった。ここでバックホウ均しの動作を考えると、アーム関節軸からの垂線を中心としたアーム前後動作により作業を行うが多く、アーム関節軸の真下のマウンド形状を正確に計測すべきである。

この結果から、センサの正面方向が作業範囲の中心、かつ計測面に対して直交させるように設置することとした。

また、水槽底盤はほぼ平面であるにもかかわらず最大43mmの高低差が計測された。そのため、本センサは作業前の不陸の位置や面積の認識に用いることとし、正確な高さ計測は水中MGの刃先接触により行うべきと言える。

表-3.6 プロファイルソナーM3の仕様

Kongsberg Mesotech M3 (2次元マルチビームソナー)	
測定レンジ	0.2m ~ 150m
レンジ分解能	1cm
周波数	500kHz
水平幅	120度
ビーム幅	3度
ビーム数	256本
アップデートレート	~ 40Hz
通信方式	Ethernet
主要寸法	直径:19.3cm 高さ:14.8cm
質量	4.6kg
水中重量	1.7kg
電源	12 ~ 36V (22W)



図-3.39 プロファイルソナー M3

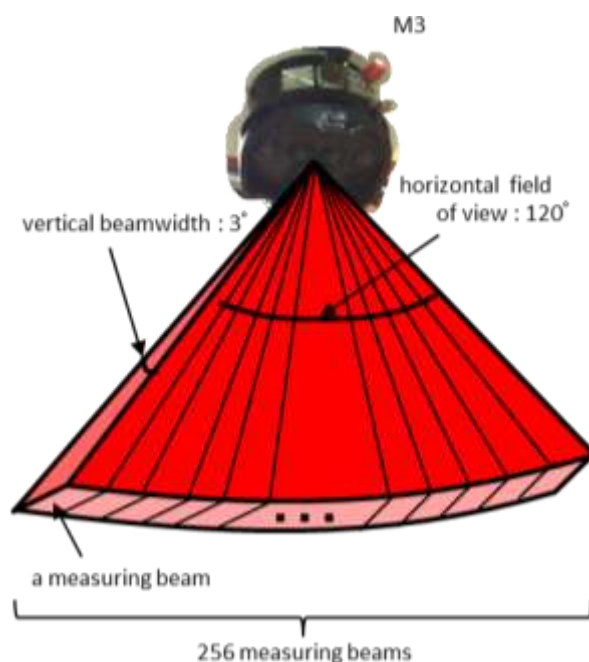


図-3.40 M3 計測イメージ

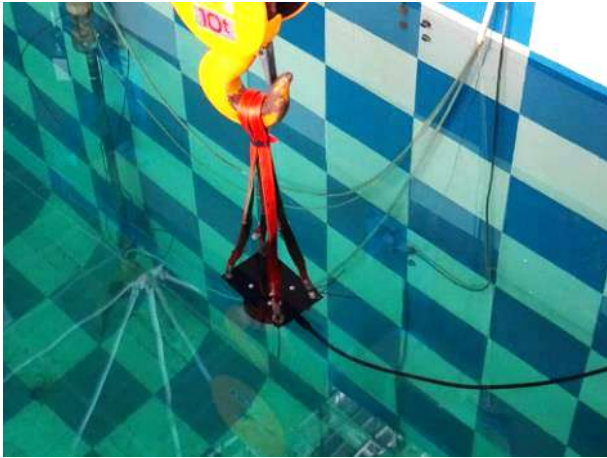


図-3.41 水槽実験の状況

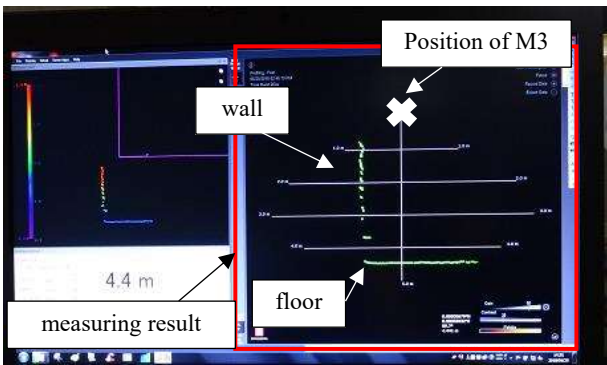


図-3.42 計測画面

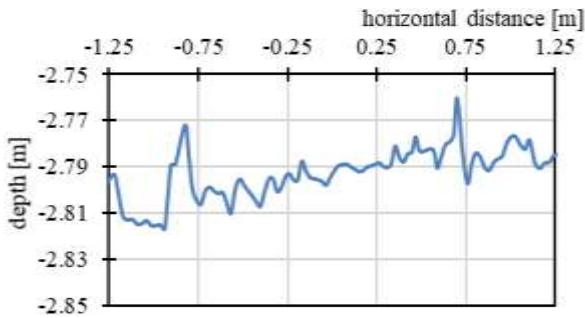


図-3.43 水槽底面の計測結果

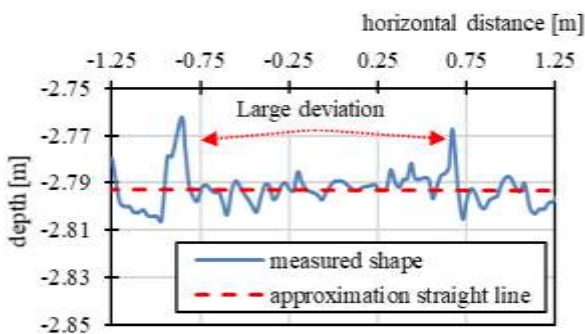


図-3.44 回転補正後の水槽底面 (赤線：近似直線)

表-3.7 50cm 間隔毎の計測値偏差

範囲 [m]	-1.25 ~ -0.75	-0.75 ~ -0.25	-0.25 ~ 0.25	0.25 ~ 0.75	0.75 ~ 1.25
最大 [mm]	-2762.4	-2789.1	-2785.3	-2767.5	-2787.6
最小 [mm]	-2806.0	-2803.4	-2797.1	-2805.1	-2803.0
高低差[mm]	43.5	14.2	11.9	37.6	15.4
偏差[mm]	12.0	3.9	2.5	7.2	4.6

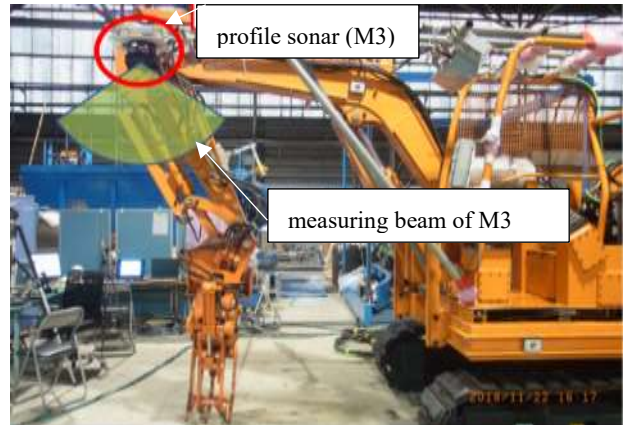


図-3.45 M3 設置位置および計測方向

図-3.45に水中建機へ搭載する場合のM3ソナー設置位置および計測方向について示す。水中建設機械に設置する角度として、対象物(マウンド面)に対して直交する角度とし、フロント部(アーム)作業範囲を計測できるように前方にオフセットさせることとした。

(3) センサ単独のマウンド模型による精度確認

選定した外界計測センサ単体の精度を確認するため、既知形状のマウンド模型を対象とした試験を実施した。

計測対象として、沖縄の港湾工事で捨て石マウンドに用いられる実サイズの5~200kg/個の割石でマウンド模型を作成し、事前に陸上で光学測量により計測したデータを真値として比較する。マウンド模型は本均し(機械均し)後を想定した不陸±10cmのもの(以後「模型1」と、台船から捨て石を投入した直後を想定した不陸-10~+50cmのもの(以後「模型2」)を用意した。マウンド模型を図-3.46に示す。

センサは固定ジグによりマウンド直上に一定距離に固定した状態で設置し、水槽内に吊り下げて計測を行った。治具の概略図を図-3.47と、水槽試験の状況を図-3.48に示す。マウンド模型底面とセンサ間の距離は、水中バックホウ実機(極東建設 TKM200-9: バケツ 0.8 立米)の

キャビン上面高さ (2.8m) とした。計測時間は約 10 秒とし、不作為の 5 回分のデータを抽出している。マウンド模型における計測線をそれぞれ長手方向に 3 本 (A,B,C) 設定した。

a) 模型 1 (不陸±10cm のマウンド模型) の計測結果

図-3.49 は模型 1 について計測したデータである。図中の赤線は事前に計測した光学測量のデータである。B, C 測線については特徴的な凹凸形状について認識できていることがわかる。

しかし、図-3.50 に示す A 測線については、存在するはずの石が計測できておらず (緑枠内)、この部分のデータを図-3.51 に示す点群とした場合、緑枠内のデータが欠測していることがわかった。これは、緑枠内の石が鋭角な形状をしており、音波が別の方向に反射してしまい信号を受信できなかったためと考えられる。また同様の理由から、石の隙間 (谷となる部分) についても判別が困難であった。



図-3.48 水槽実験状況



図-3.46 マウンド模型 (左: 模型 2 (不陸: -10 ~ +50cm), 右: 模型 1 (不陸: ±10cm))

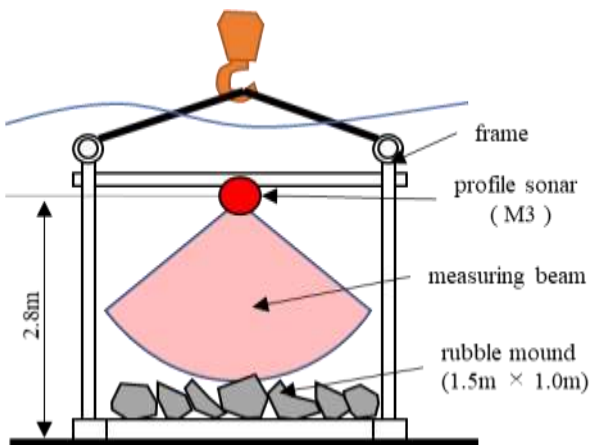


図-3.47 計測治具の概略図

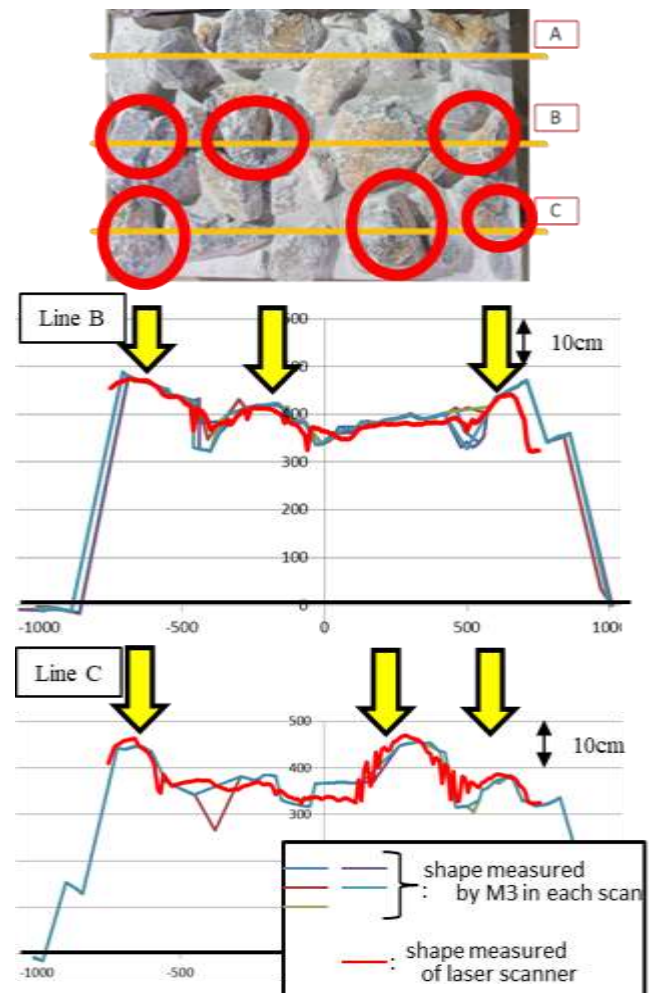


図-3.49 マウンド模型の計測形状 (模型 1 B,C 測線)

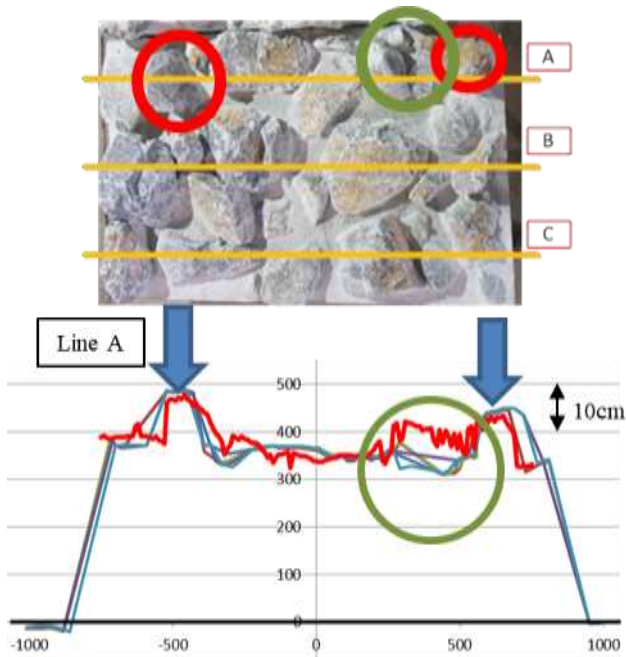


図-3.50 マウンド模型の計測形状 (模型1, A 測線)

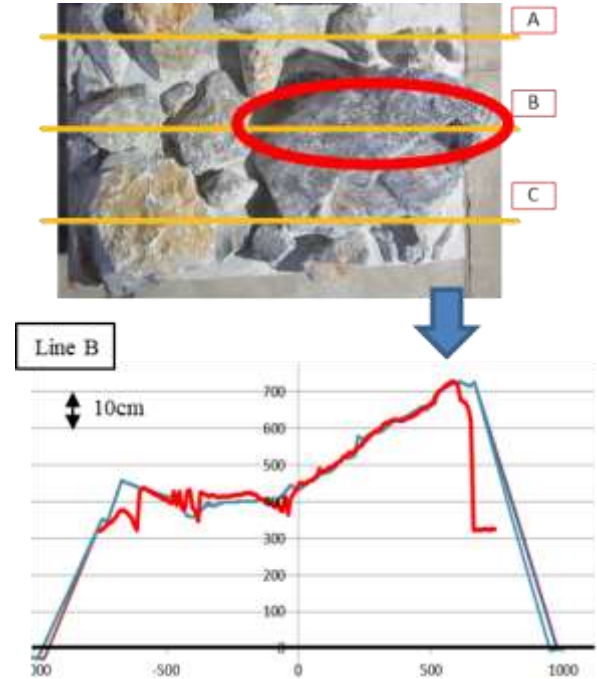


図-3.52 マウンド模型の計測形状 (模型2 B 測線)

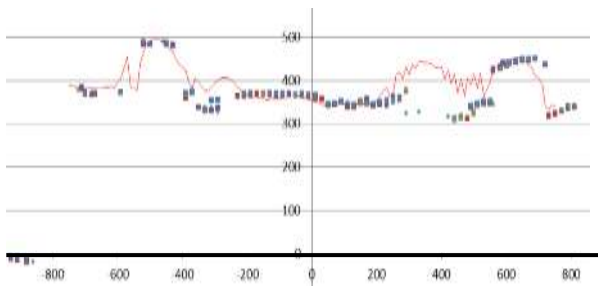


図-3.51 マウンド模型の計測点群 (模型1, A 測線)

b) 模型2 (不陸-10~+50cmのマウンド模型) の結果
 図-3.52は模型2のB測線の計測結果である. 特徴的な斜面 (赤枠) について, 高精度に計測できていることがわかる.

しかし, A 測線と C 測線については, 存在しない部分 (図-3.53 緑枠・黄枠) も計測されていた. これは, M3 のファンビーム幅が 3 度と広く, 近くに高い部分があった場合に反射波を拾ってしまったものと考えられる.

上記の結果から, 今回使用した Kongsberg 社 M3 は, 高速に断面形状を計測可能であるが, 対象物が鋭角な場合や, 石と石との隙間に関しては正確な計測が困難であると考えられ, 注意が必要である.

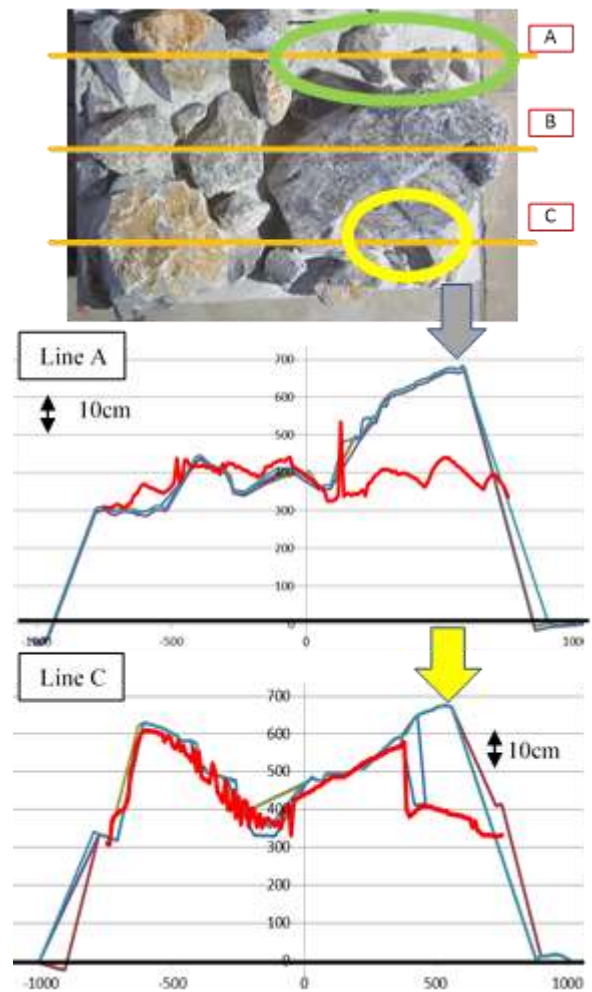


図-3.53 マウンド模型の計測形状 (模型2 A,C 測線)

(4) 水槽試験でのバックホウ旋回による面的計測試験

M3 を当所所有の水中バックホウ実験機に搭載し、水中における地形計測を行う。M3 から出力されるデータは、センサ原点からの距離であるため、水中 MG 搭載センサ（機体傾斜、方位）のデータを用い補正した。計測対象は水槽内に設置したマウンド模型とした。試験での配置を図-3.54、プロファイルソナーの設置の状況を図-3.55、試験の状況を図-3.56、試験時の画面表示を図-3.57 に示す。図-3.57 中、白枠内が今回の計測範囲である。白い点は計測点のうち水槽底面に相当する高さとして計測された部分、緑色の点はマウンド模型基準面程度、赤い点はマウンド面の基準よりも一定以上高い部分である。マウンド模型の四角い外形と、割石による不陸が判別できることが確認できた。

水槽実験において 110 度（FOG データ）の範囲を計測した際の回転時間は 25 秒であった。本実験では 0.1 秒間隔で計測データを取得しているため、測線間隔は 0.44 度となった。

(5) 水槽試験での M3 による前方探査試験

水中バックホウ機体直下のマウンド形状により、クローラが不安定となり、旋回時に機体姿勢が揺れることが想定される。

これは、M3 での計測でバックホウ機体直下のマウンド形状は計測できないためであり、その対応策として「移動前に M3 で平らな面を認識し、そこに移動する」といった運用で対応する方針である。また今後の遠隔操作化を考えた場合、移動先にある港湾構造物（障害物）を認識することは安全性確保のため必須であるといえる。

ここで、M3 の設置状況を見ると、図-3.45 のようにマウンド高さの計測を主目的として下向きに設置している。そのため、M3 の計測範囲は機体周辺の 5m 程度と狭く、移動先に存在する障害物を計測するには不十分であると考える。

そこで、M3 の設置方向を変更し、前方探査に使用することを想定した水槽試験を実施することとした。

図-3.58、図-3.59 に示すように、M3 を 1 台、扇形の計測ビームが地面に垂直に、ビーム中心が地面と水平方向を向くように水槽内に設置した。その高さは水槽底から 1.8m とした。また、M3 を首振装置に取付け、水平方向に 70° 程度の範囲で旋回させることで面的に計測を行った。首振装置には、ジャイロセンサ (JCS7401A) を搭載した。ジャイロセンサで M3 の方位等を計測し、M3 計測データを水槽ローカル座標系に変換した。

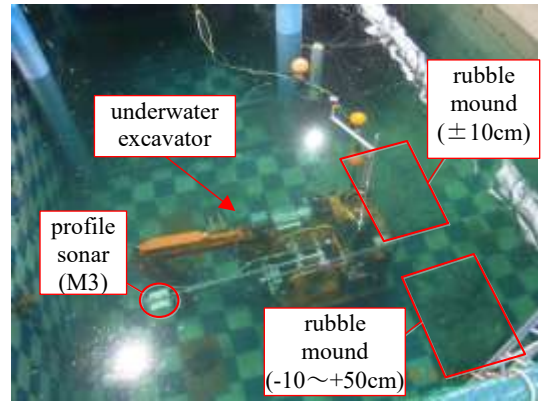


図-3.54 試験時の水槽内のマウンドの配置



図-3.55 プロファイルソナー設置状況



図-3.56 計測試験の状況

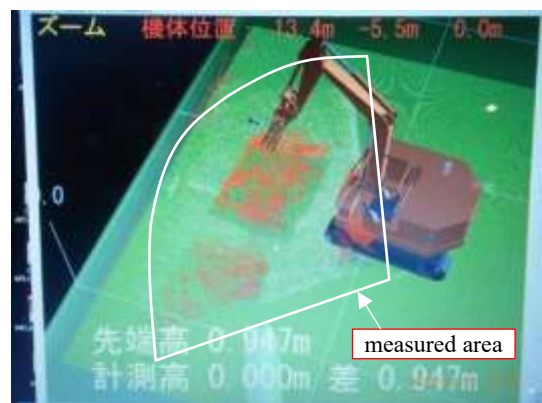


図-3.57 計測データの表示画面

これは、水中 MG を搭載した 20t クラス水中バックホウに M3 を前向きに設置し、機体の旋回もしくは首振装置により前方探査を行うことを想定した設置である。

実験は水中環境再現水槽で実施した。水深はおおむね 5m 程度とした。図-3.58 に水槽試験の状況を示す。図-3.59 に水槽試験の概要図を示す。

計測対象は、マウンド模型、水槽壁面・底面（コンクリート壁・床）、直立した鋼管（直径 0.5m）、地面に横たわる H 鋼（200mm×200mm）、消波ブロック（テトラポッド 0.5t 型）、流木（長さ 1m, 幹直径 0.2m 程度）をそれぞれ、もしくは、複数同時に計測した。これらは水中バックホウの作業で障害となる港湾構造物や、台風などの被災後の海底に落下物がある状況を想定している。

計測は、対象物の種類、位置関係（M3 との距離、向き）を変更し実施した。

a) コンクリート壁面の計測結果

図-3.60 にケーソンを想定したコンクリート壁面の計測試験時の配置図を示す。図-3.61 に水槽壁面計測試験の計測結果を示す。本試験の計測座標は XYZ 軸の三次元で管理されており、任意の視点で表示することが可能となっている。本図に示すとおり、M3 から離れた場所の水槽底面など計測できていなかった場所も存在するが、水槽壁面については正確な距離で把握できている。

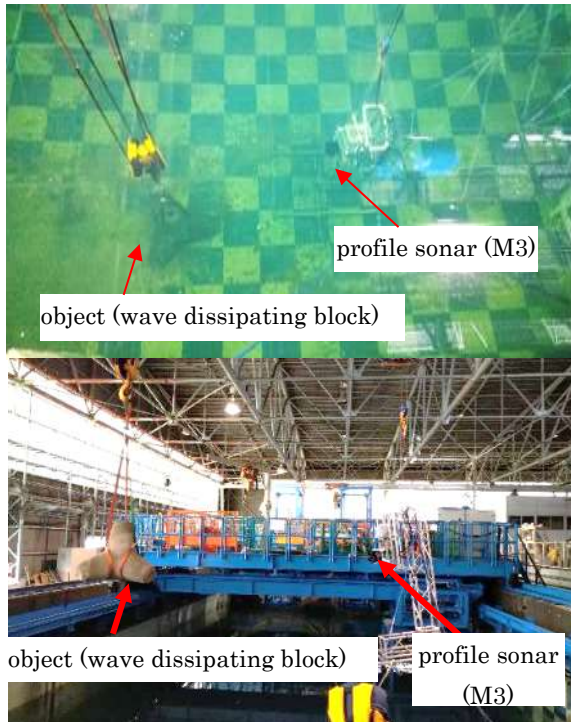


図-3.58 計測の状況

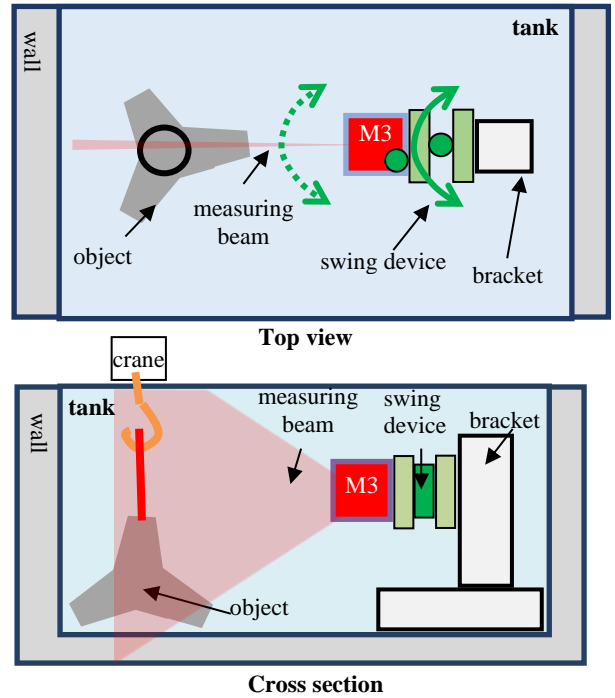


図-3.59 水槽試験の概要図

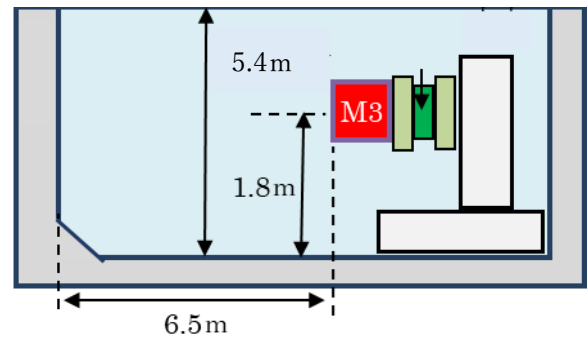


図-3.60 水槽壁面計測時のイメージ図

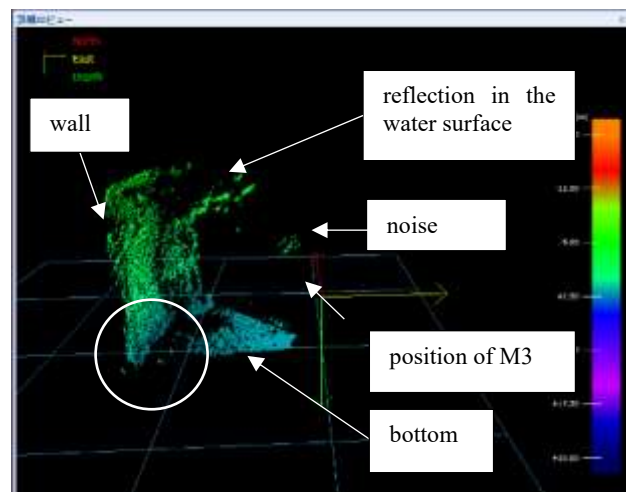


図-3.61 壁計測の結果（3D 表示、俯瞰イメージ）

また、底面は欠測していたとしても、図中丸で囲った底面からの立ち上がり部は計測できており、ケーソンなど、大型の構造物との位置関係の把握、衝突の回避のためには十分な探査ができていると考える。

b) 鋼管杭の計測結果

栈橋等を想定した直径 500mm の直立鋼管（図-3.62）1 本の計測を行った。結果は、図-3.63 のように青丸で示した実物と対応する位置に計測データは取れるものの、橙丸で示す実際には何もない位置にも、物体を誤って検知していた（図-3.63）。そのノイズは、センサを中心とした円の円周方向及び、センサから見て奥側に計測されていた。鋼管内が中空でないため、鋼管の鉄板を透過した音波が内部で反響し、複数回反射したものをセンサが計測したためと推定できる。

計測結果から鋼管近傍で、水中バックホウが移動中に衝突しないための探査は可能だが、M3 の計測データを参考として鋼管を対象に何らかの作業を行うことは困難だと考えられる。

c) 消波ブロックの計測結果

台風等の被災後に海底に散乱した障害物を想定し消波ブロックを対象に計測を行った。図-3.64 に示すように M3 が正対しているときには、形状がわかる程度に計測ができていた。しかし、M3 の音波が消波ブロックに斜めに当たる角度の時は、計測できる場合もあるものの、形状は不鮮明であった。消波ブロック脚の円筒形状に当たった音波が受け流されて、M3 の方向に反射しなかったためであると推察される。3 次元の点群として表示しても、何か物体が計測されていることは確認できるが、それが消波ブロックであると判断するのは困難である（図-3.65）。ま

た、横向きの脚を正しく計測できていないため、対象物の幅を過小評価する結果となっている。水中バックホウがそれを横に避けて通過するように操作することを想定すると、衝突の危険があり、実装する際には、注意が必要となる。

d) H 鋼の計測結果

前方に横たわる障害物として、水槽に設置している 200mm 角の H 鋼を計測する。設置位置について図-3.66 に示す。計測結果を図-3.67 に示す。H 鋼については、何か長細いものが底面上に横たわっているという状況は確認できたものの、それが H 鋼であるという形状認識は困難であった。これは分解能の問題と考えられる。高さ方向の分解能は、M3 ソナーと対象物との距離の 2.8%、つまり、1m 離れた位置にある物体に対して 2.8cm となる。2.5 m 離れたところでは、7.0cm の分解で、20cm 角の H 鋼の詳細形状は計測不可能である。

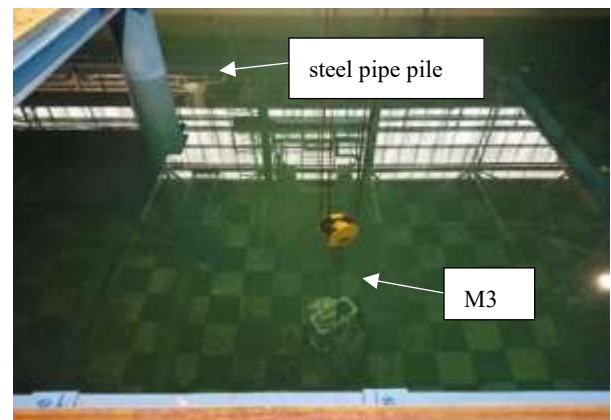


図-3.62 鋼管杭計測の状況

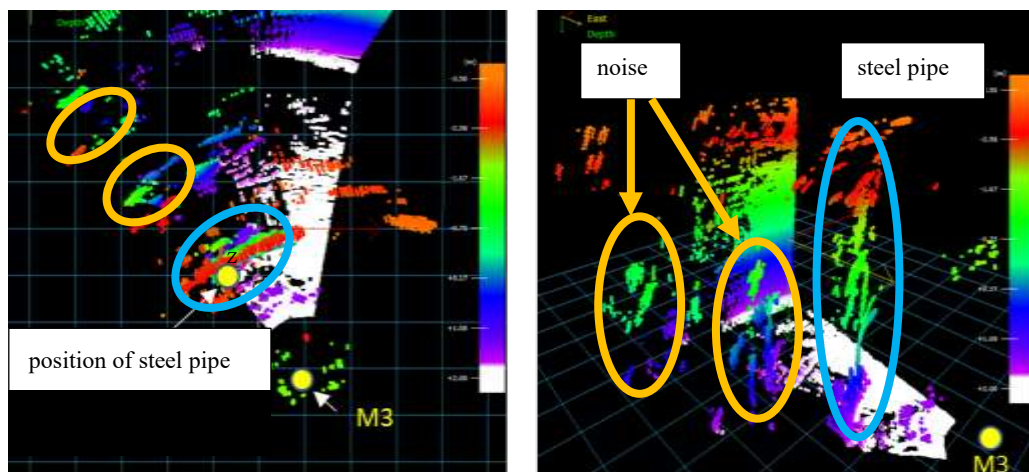


図-3.63 鋼管計測の結果（3D 表示、左：上面イメージ、右：俯瞰イメージ）

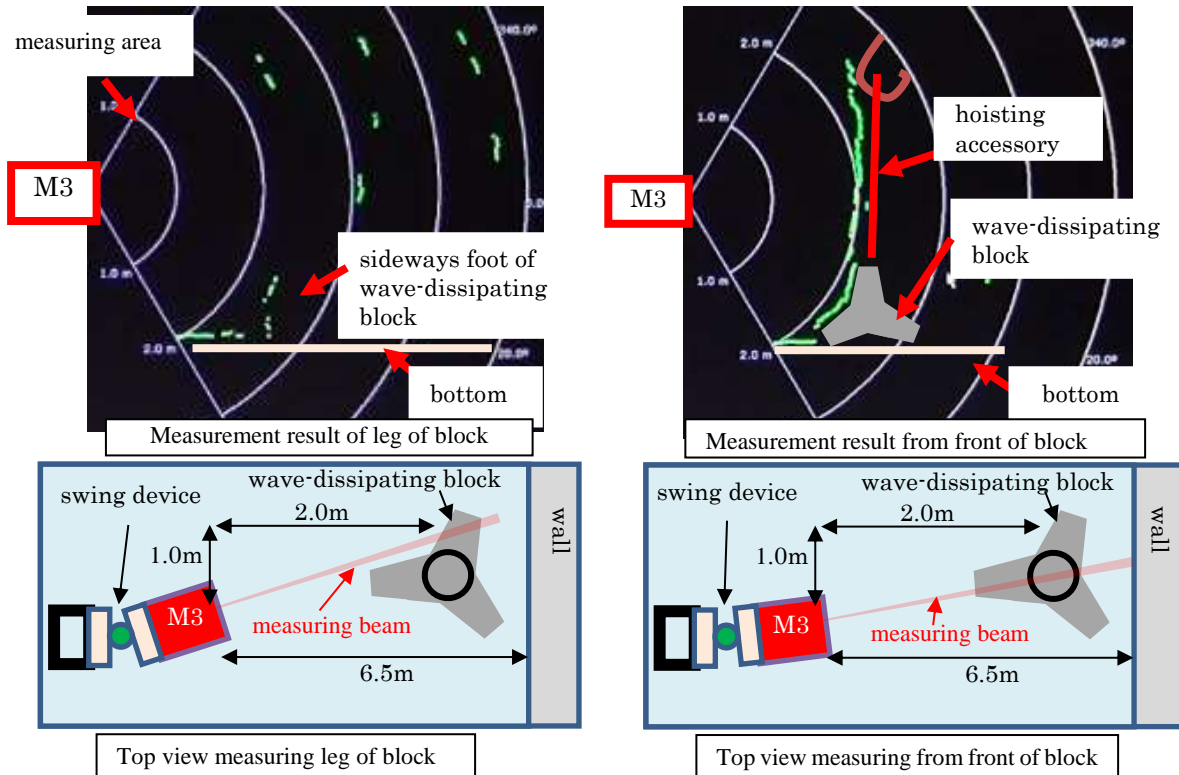


図-3.64 消波ブロックの結果（左：M3が消波ブロックの脚に向いているとき、右：M3が中央に向いているとき）
（上：M3計測表示ソフトウェア上の表示，下：配置イメージ）

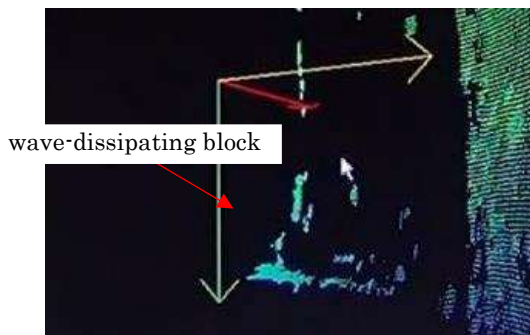


図-3.65 消波ブロックの計測結果（3D表示） 俯瞰

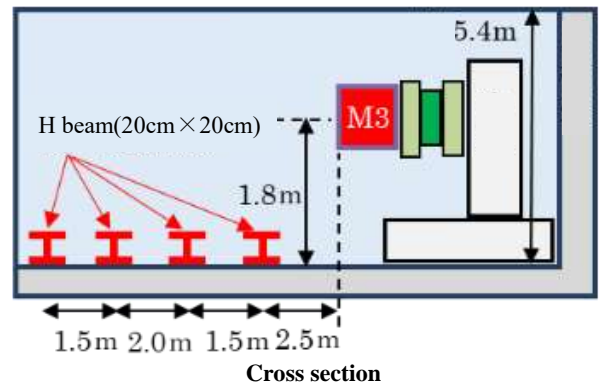
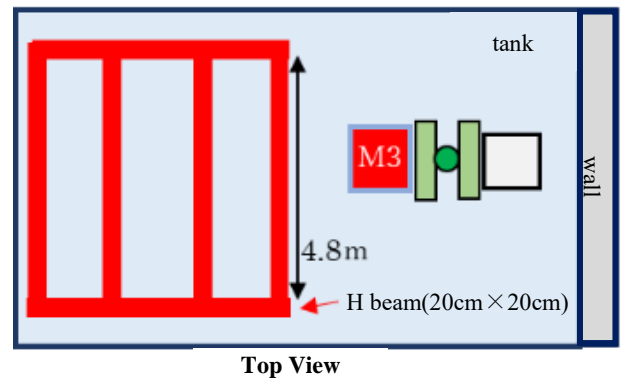


図-3.66 配置イメージ

e) 木材の計測結果

台風等で流入した沈木を想定し木材について計測を行った。計測対象物を図-3.68に示す。トロ舟内に荒木田土の地盤を設置しその上に木材を設置した。図-3.69も計測結果を図化したものを示す。おおよそ円筒形であるはずの沈木が、いくつかの平面の集まりとして計測されており、円筒形の形状は認識できなかった。消波ブロックの脚と同様、円筒形の対象物の形状認識は困難であった。

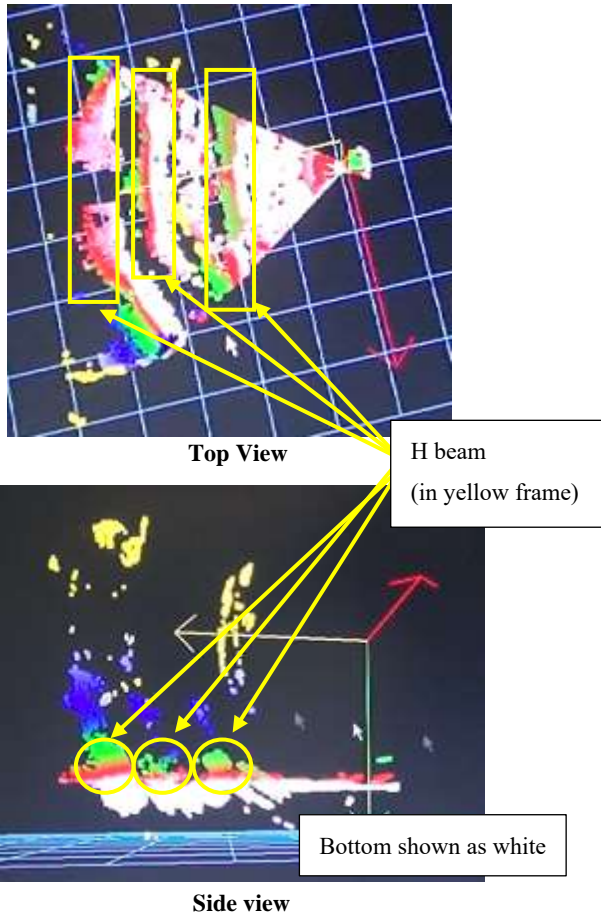


図-3.67 H鋼の計測結果 (3D表示)

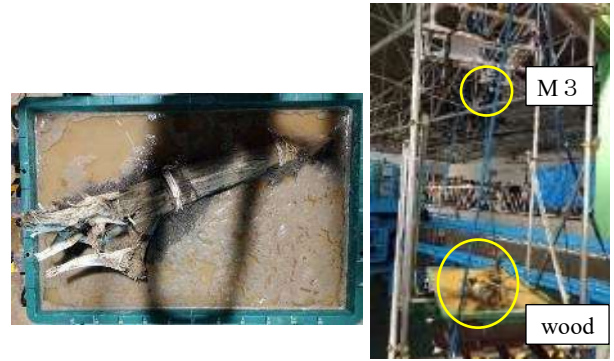


図-3.68 計測に使用した木材の状況

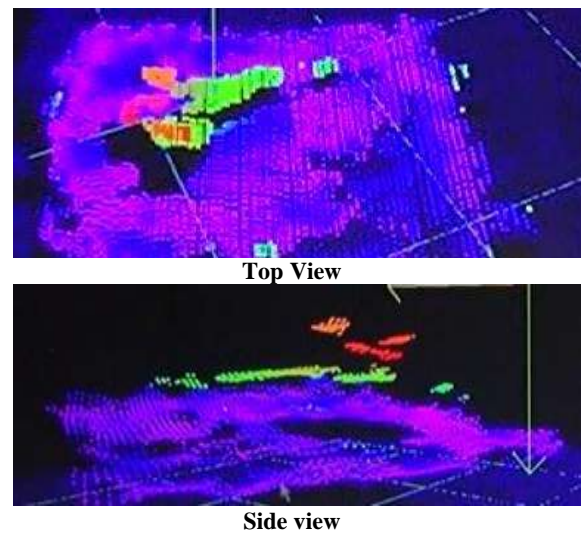


図-3.69 木材の計測結果 (3D表示)

f) 複数視点による形状認識

M3による前方探査の計測データ表示機能の視認性向上のため、図-3.70のようにM3は2台で対象物を2方向から計測し、それらの計測形状を重ね合わせた形状を表示することを検討した。

なお、実験では、M3は1台の準備とした。対象物、M3を水底に設置し、ある方向からM3で対象物を計測後、M3のみを移動させて違う方向から対象物を計測した。このとき、M3の設置位置を計測していた。計測後、2方向からの計測データを水槽ローカル座標系に変換し、重ね合わせて表示した。対象物は消波ブロック、マウンド模型とした。

消波ブロックについて4視点からの計測結果を合成したものを図-3.71に示す。結果、消波ブロックについては、一方向からでは最大で、上向きの脚と正面向き脚、ソナーに近い側の横向き脚1本の計3本しか確認できなかったものが、複数方向からの計測によってすべての脚が計測された結果となった。

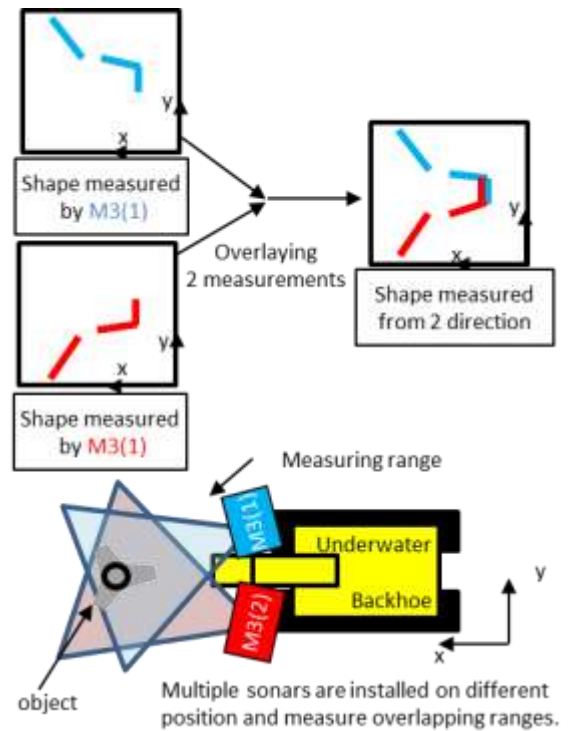


図-3.70 M3複数台による前方探査イメージ

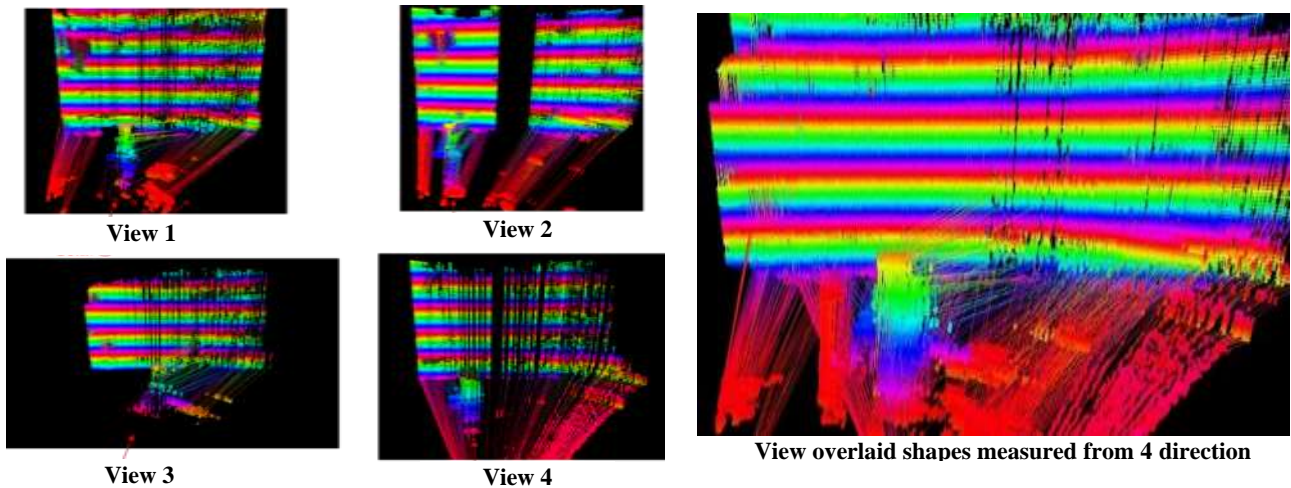


図-3.71 消波ブロックの計測結果（左4枚：それぞれ1方向からの計測形状の3D表示，右：4方向からの計測結果を重ねた3D表示）

このため、水中建設機械が走行する際、対象物を障害物として回避しようとする場合には、障害物の幅を適切に評価できるように改善されると考えられる。

マウンド模型を3視点からの計測結果を合成したものを図-3.72に示す。一部の位置に対して、石の輪郭の一部の認識が可能となった。2方向からの計測で、1つの石で複数面計測できるようになり、輪郭の認識が可能になった石もあった。ただし、全ての石に対して輪郭の認識が可能になるわけではない。さらに計測方向を増やすことで、石の輪郭の認識の可能性がさらに高まると推測される。

g) 結果まとめ

プロファイルソナーM3を前方探査に利用することで、近傍の障害物の有無の認識には有用であろうと考える。壁面、鋼管などの構造物や、消波ブロック、H鋼、流木を計測した場合に、それらに対応する位置に地面より明らかに高い位置になんらかの計測データが計測されていた。ただし、鋼管近傍のように実際には何も無い場所に障害物を検出する場合があった。

また、障害物の形状、種類の判別までは通常困難である。形状については、特に円筒形のものの計測は困難であった。また、分解能が陸上のレーザセンサなどと比べ悪いことにも留意が必要である。

加えて、複数方向からの計測を行い、そのデータを重ね合わせて前方探査を行うことで、対象物の大きさ、輪郭を把握できる可能性が高まることが判明した。

なお、本システムでは、マウンドの均し作業を想定しており、割石以外の大きな障害物がマウンド上にある可能性は小さく、また、不整地上の長距離移動も想定されない。

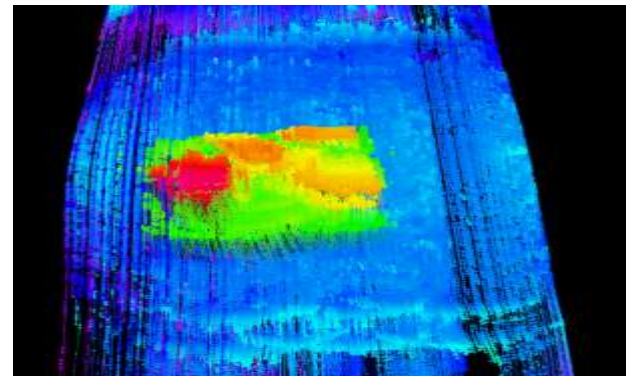


図-3.72 マウンド模型を3方向から計測した計測結果を重ね合わせて3D表示したもの

前方探査が必要となる作業では、設置方向を遠隔で変更できるジンバル等を用いてマウンド形状を計測するための下向きと前方探査のための前向きの切替えができる。

3.7 まとめ

本章では、水中MG構築に際し、適応可能なセンサの方式や計測方法について検討した。本章のまとめとして、下記の条件が水中MG構築に必要となる。

- 機体姿勢検出センサについては、遅延なく関節角度を計測するため、油圧シリンダのストローク変位を直接計測する方式とする。また防水性を考慮し、環境条件に強い磁歪式を用いる。
- 機体傾斜検出センサについては、バケット先端高さの計測精度に大きく影響するため、高精度なFOG（Fiber

Optical Gyro) を用いる。

- ・機体方位検出センサについては、前述の FOG と磁北を検出するため地磁気センサを併用する。なお、FOG 単独での計測は、絶対方位の計測はできず、ドリフトが生じる。また、地磁気センサでの計測は機体が磁性体であるためノイズが生じることから、ルックアップテーブル方式による補正が必要となる。加えて、振動の影響を受けることから時間平均を行う必要があることから、リアルタイム性が低い。
- ・水中位置検出センサについて、平面座標は超音波測位装置 (SBL) を用いる。なお、トランシーバを壁面近傍に設置する場合には、反射による計測ノイズが生じるため、壁面側に吸音材などを設置する等の対策が必要となる。
- ・ただし、水深方向についてはバケット先端高さの計測精度に大きく影響するため、高精度な水圧計を用いる。なお、水圧計の計測値は、波浪等の影響を無視するため、時間平均を行うこととした。
- ・外界計測は、接触計測によるマウンド高さの計測に加え、マルチビーム型のプロファイルソナーを用い、同時に複数点のマウンド高さ計測を行うこととした。

4. 水中マシンガイダンスシステムの構築とバックホウの刃先の高さ計測精度確認試験

4.1 水中マシンガイダンスシステムの構築

前章までに検討した結果を基に、水中における統合的な精度確認実験を行うための水中 MG を構築する。

(1) ベースマシンの概要

水中における MG の精度試験を行うため、ベース機械として当所の所有する水中台車を使用する。この水中台車は日立建機製ミニショベル ZX-40U を水中用に改造したものであり、発動機の代替として三相 200V-22 kW 水中モータを搭載している。

アタッチメントとして回転式フォークグラブを搭載しているが、本試験では先端座標を計測する事が主目的であるため、100mm の H 型鋼をフォークグラブにクランプしている。図-4.1 に水中台車の全体図を示す。

(2) センサの設置

前章で選定したセンサについて、水中バックホウに設置する際の位置を検討する。表-4.1 に水中 MG 構築のために使用したセンサの一覧を示す。図-4.2 から図-4.9 に水中台車へのセンサ設置状況を示す。



図-4.1 水中台車全景

a) 傾斜センサ

機体の傾斜角度を検出する傾斜センサについては、水中バックホウと並行になるように設置する必要がある。また、水中バックホウの方向についても検出するため、上部旋回体に設置する必要がある。本水中台車においては、機体右側の防水容器フレームに設置した (図-4.2)。

b) 地磁気センサ

地磁気方位計については、水中モータや磁性体であるブームなど、磁場が変化する構造部による影響が少なくなるように、防水容器については、塩化ビニルによる筐体を作成している (図-4.3)。また機体から離れた場所に設置する必要がある。本水中台車においては、アームから離れた車体後部に設置することにした。また、水中モータの影響を考慮し、アルミパイプを用いて水中モータから 1m 以上離れた場所に設置している (図-4.4)。

c) 水圧計

水圧計については、機体と試験海域の二カ所に設置し、その差分により潮位を補正する方式としている。そのため、水中台車については、地面から 1m の位置に取付けており、試験海域に設置する水圧計についても地面から 1m の高さになるように設置している。

d) 水中モニタ

水中モニタについては運転席から見えるように配置する必要がある。本システムでは小型モニタを防水容器内に収めることとした (図-4.5.6)。映像信号は HDMI とし、同じ容器内に HDMI 信号を 100m 延長するためのエクステンダ受信機、および、陸上から供給される 100V 交流電源を変圧する AC/DC コンバータを設置している。

表-4.1 水中マシンガイダンス仕様センサ

名称	型番	メーカー	情報の種類	仕様精度	実測精度
傾斜センサ	FOG-7402A	日本航空電子	ピッチング角	±0.15度以下	0.038度
地磁気センサ	HMR-3000	Honeywell	地磁気		約4.2度
水圧計	BWL-10MET	共和電業	機体水圧	±0.15%RO以内	4.9mm
水圧計	BWL-20MET	共和電業	ドック水圧	±0.15%RO以内	11.5mm
水中モニタ	LCD-10000VH5	CENTURY	MG表示	WXGA 1280×800	
HDMIエクステンダ	VE-814	ATEN	HDMI延長	Up to 100m	約80m
超音波位置測位 (SBL)	TrackLink	LinkQuest	平面座標		
ストロークセンサ(ブーム)	GYcRS-605-M-WP3G120	サンテスト	シリンダ長	±0.025%FS以下	
ストロークセンサ(アーム)	GYcRS-750-M-WP3G140	サンテスト	シリンダ長	±0.025%FS以下	
ストロークセンサ(ポケット)	GYcRS-750-M-WP3G140	サンテスト	シリンダ長	±0.025%FS以下	

e) 超音波位置測位 (SBL)

位置の計測を行う SBL は音響の伝搬時間を計測するため、トランシーバとトランスポンダの間で障害物となるものが存在しないように設置する必要がある。そのため、機体上部面で、かつ、近傍に障害物が無い場所に設置した。

f) ストロークセンサ

機体関節角度を遅延なく計測するため、重力式を用いず直動式のリニアセンサを選定した。また水中において可動部分が存在する場合、防水性に対し不利となる。そこで、磁歪式ストロークセンサを油圧シリンダの側面に設置した。また、作業中に割石などが跳ねるなど接触する可能性が考えられるため、センサを保護するための金属板を設置している (図-4.7~図-4.9)。

(3) 機器構成

今回の試験において水中機体から陸上局の距離は 100m とした。図-4.10 に各センサからの信号線の系統図を示す。

(4) ソフトウェア (MG 画面)

MG における潜水士への意見を聴取するため、数字表示、鳥瞰表示、上面表示、側面表示の表示方式を試作した。

図-4.11 から図-4.14 に MG モニタ画面を示す。また、モニタ上には既存施設を表示させ、機体位置との位置関係を直感的に認識できるようにしている。図-4.15 から図-4.19 に実地形と MG 表示モニタを示す。



図-4.2 傾斜センサの設置位置



図-4.3 地磁気方位計の防水容器



図-4.4 地磁気方位計の設置状況



図-4.5 モニタ容器



図-4.7 ストロークセンサ (ブーム)



図-4.8 ストロークセンサ (アーム)



図-4.6 水中モニタの設置状況



図-4.9 ストロークセンサ (バケット)

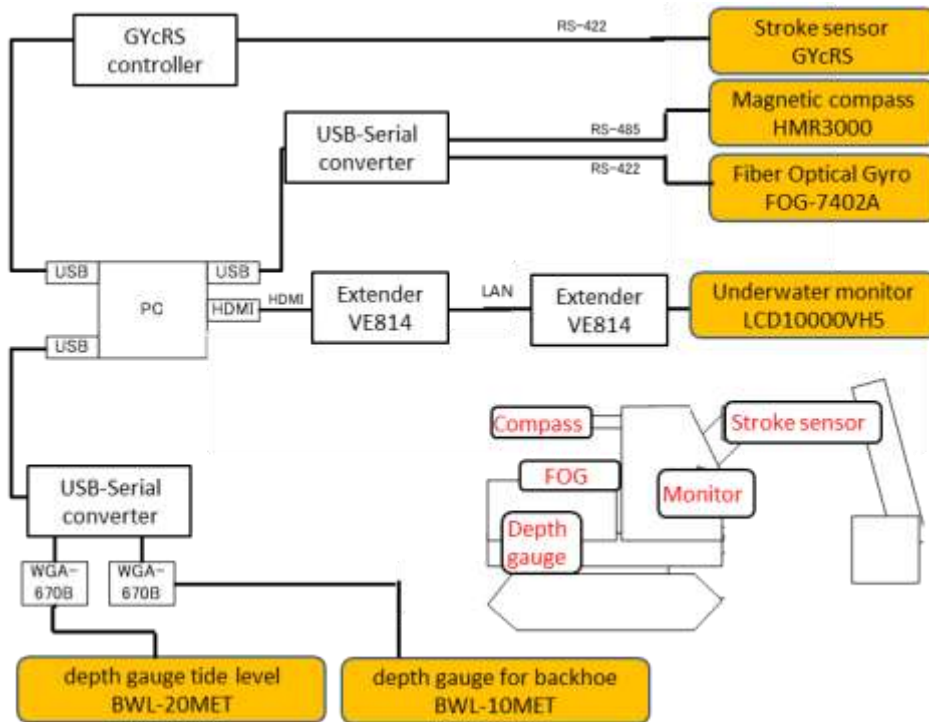


図-4.10 機器構成と信号線経路

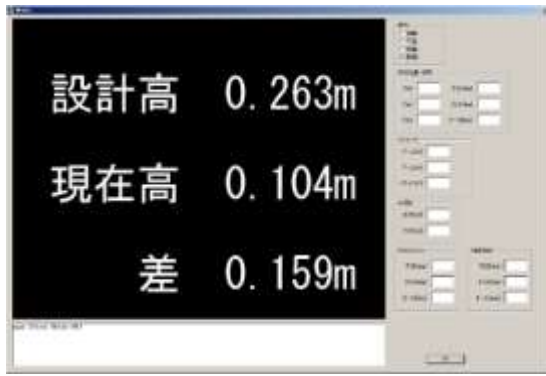


図-4.11 数字の表示



図-4.15 水槽内既設物

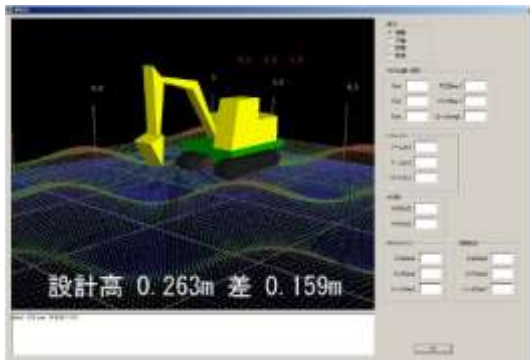


図-4.12 鳥瞰の表示

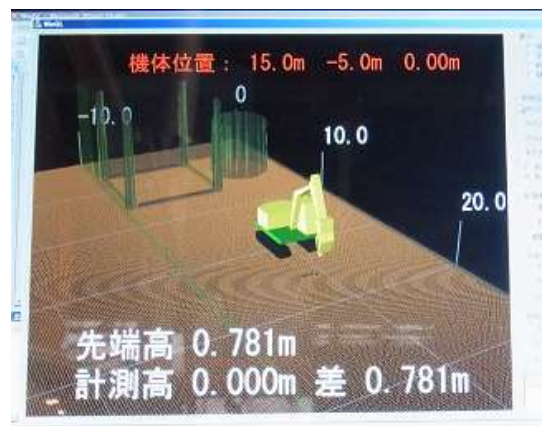


図-4.16 水槽既設物の MG 表示

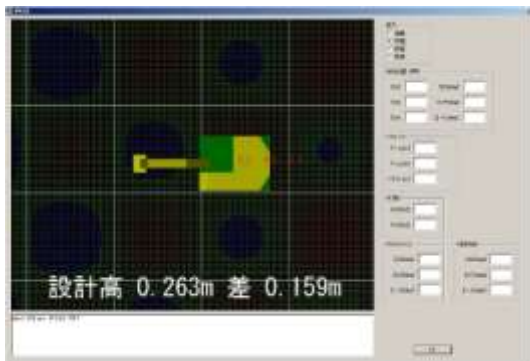


図-4.13 平面の表示



図-4.17 京浜ドックに設置された対象物

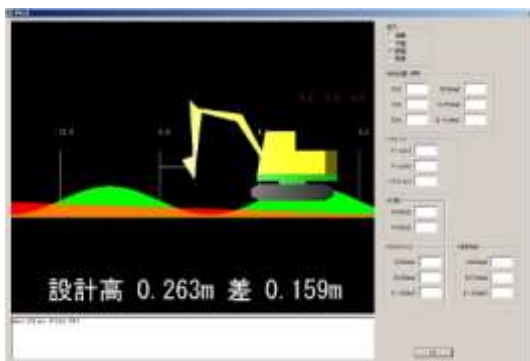


図-4.14 断面の表示

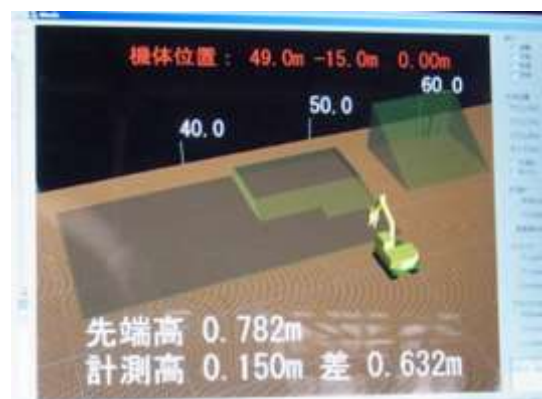


図-4.18 対象物の MG 表示



図-4.19 対象物の正面断面の表示



図-4.20 先端座標誤差計測状況

4.2 陸上での精度確認試験

前項において構築した水中 MG を用い、陸上において先端高さの精度を計測する。

(1) コンクリート面の高さの計測

計測はコンクリート面を対象とし、水平距離 10cm 間隔で先端をコンクリート面に接触させ、別途光学測量器で計測した値との比較を行うこととした。計測は、グラグに取り付けた鋼材が地面と垂直になるよう静かに接触させたケースとバケット関節を開いた状態(バケットシリンダを縮めた状態)で静かに接触させたケースを各 3 回実施した。先端座標誤差計測状況を図-4.20 に、コンクリート面の測量状況を図-4.21 に示す。

図-4.22 に計測誤差を比較したグラフを示す。先端の誤差すべての点においてほぼ±10mm の範囲(最大誤差+12mm, 平均誤差+3.6mm, 標準偏差±4.3mm)に収まる事が確認された。ただし、トータルステーションで計測した値からもわかるように、コンクリート面は平坦ではない。



図-4.21 コンクリート面測量状況

(2) 鋼材の高さの計測

追加試験として、計測対象を H 鋼(図-4.23)とした直線的な計測を行った。H 鋼には同じく 10cm 間隔の目印をつけており、横にいる誘導員により接触点を指示することとした。図-4.24 に計測状況を示す。計測は、垂直に接触させたケースと開いて接触させたケースを、静かに各 2 回、さらに衝撃による振動などが発生するよう叩きつけるように接触させて計測することを各 1 回実施した。図-4.25 に計測結果を示す。前述のコンクリート面と比較して、誤差が大きい結果(最大誤差-49mm)となっており、特に旋回中心からの距離が 3.5m から 4.4m 付近において、下方向への誤差が大きい結果となった。この要因として、先端を押しあてた際に対象物とした H 型鋼が歪んだ事によるものと考えられる。

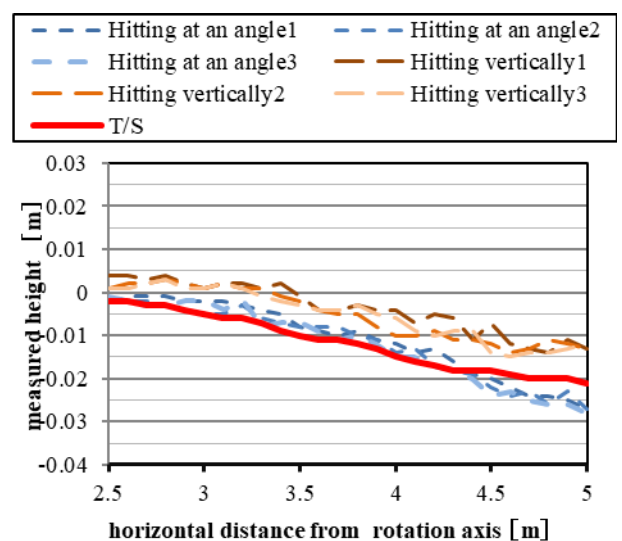


図-4.22 MG によるコンクリート面計測結果



図-4.23 接触対象(H型鋼)



図-4.26 計測状況 (25mm 鉄板)



図-4.24 計測状況(H型鋼)

そこで、たわみが発生しない鉄板を重ねることで、Z軸(高さ方向)の変化による誤差の傾向を検証する。旋回中心から3m, 3.5m, 4m, 4.5mの位置に、厚さ25mm鉄板を置き、その枚数を1枚から5枚に変化させる。真値はトータルステーション計測値とした。計測のケースは前節と同様とした。図-4.26に計測時の状況を示す。図-4.27に計測結果を示す。

バケットを垂直に当てた場合の誤差の平均は+0.7mm、標準偏差±2.6mmであった。バケットを開いた状態で当てた場合の誤差の平均は-3.1mm、標準偏差±3.0mmであった。

この結果から、高さが変化した場合(25mmから125mmの100mmの範囲)においても誤差は大きく変動しないことがわかった。

(3) まとめ

構築した水中MGの精度を検証するため、バックホウ正面断面の高さを真値(測量値)と比較する絶対精度試験を実施した。なお、陸上で行った理由として、地盤の真値計測が水中では困難であることから、初期段階としては陸上で行ったためである

陸上における精度確認試験の結果を以下に示す。

- 絶対精度試験においては、200mmのH型鋼を対象として、その形状を計測した。その結果、最大誤差10.3mm、誤差の平均値は+6.02mm、標準偏差±4.22mmであった。また、25mmの高さの違いについては認識可能であった。

上記の結果から、下記の課題点が存在すると考えられる。

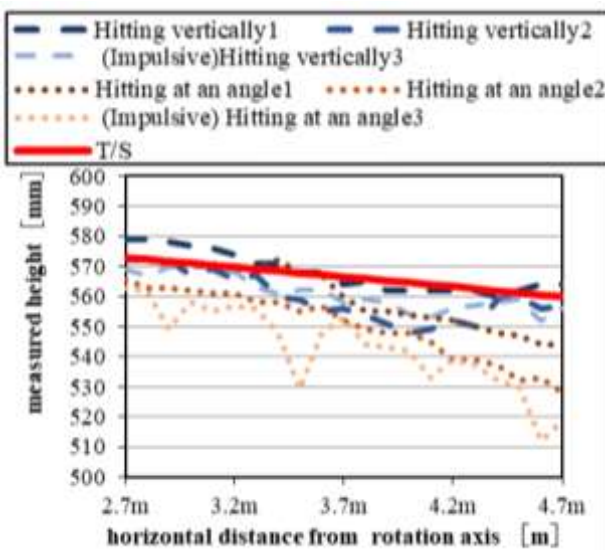


図-4.25 計測結果(H型鋼)

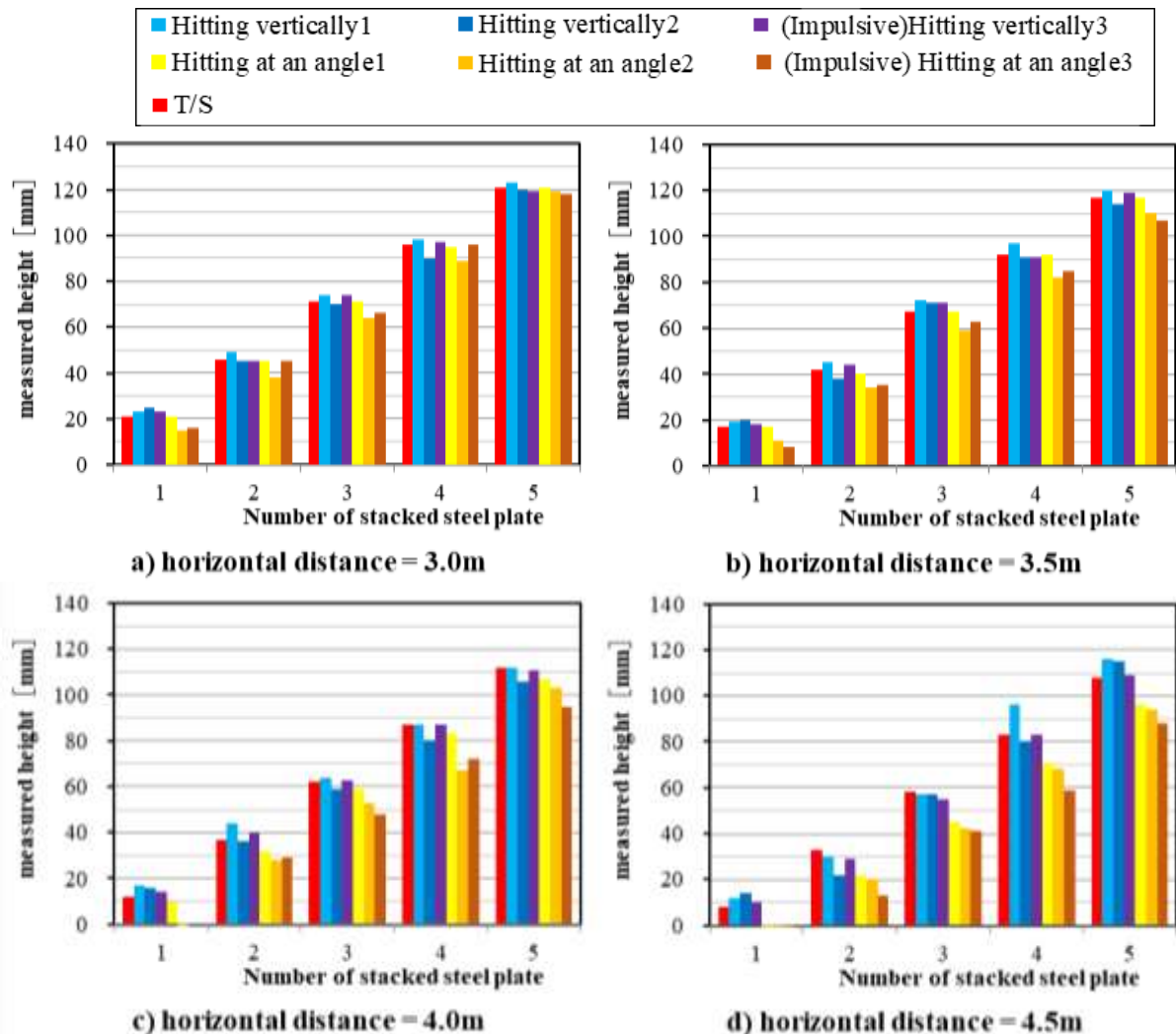


図-4.27 先端座標計測結果 (25mm 鉄板)

- ・コンクリートや鋼板などの平らな面と比較して、地盤計測時には誤差が大きくなっており、その要因として地盤の細かな凹凸が影響したものと考えられる。対策として近傍の点を複数回計測し、平均化する方法が考えられる。

4.3 京浜港ドッグでの精度確認試験

(1) 試験内容

水中 MG の実用化に向け、関東地方整備局 京浜港工事事務所のケーソン製作ドック (図-4.28) において水中実験を行った。なお、面積は 100m×30m、水深は 6.0m で海水を使用した。ドック底盤には、既知形状のマウンド模型を設置した。マウンドは、壁から離れた位置に設置し、全体の大きさが 20m×10m、粒径約 150mm の割石で製作した。水中 MG によりバックホウ刃先端を接触させて

地盤高さを計測する実験を行う。対象物はマウンド模型とし、図-4.29 に示すように 3 測線を対象とした。対象とする測線は事前に光学測量器による計測を行っている。



図-4.28 関東地方整備局 京浜港工事事務所ケーソン製作ドック (京浜港ドック)

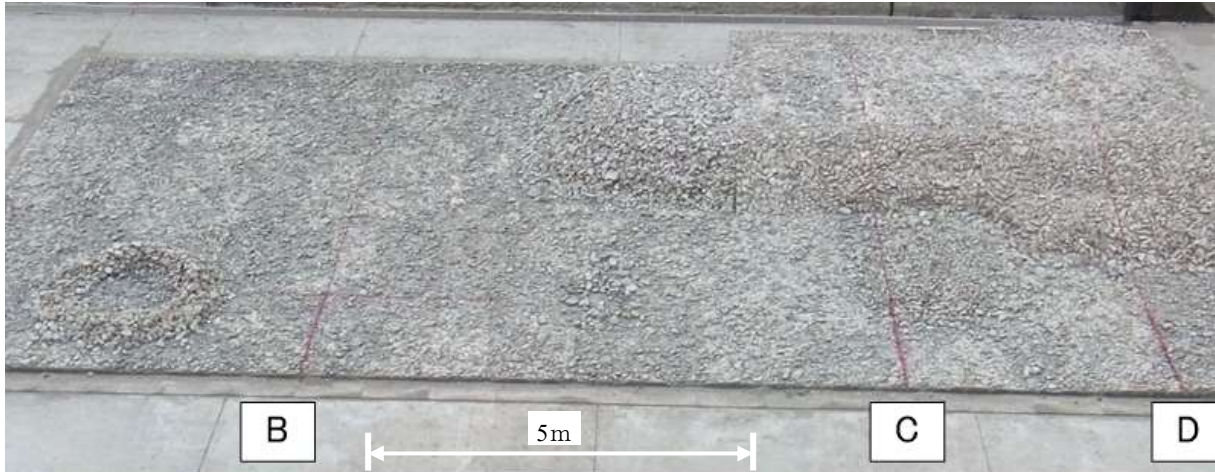


図-4.29 捨石マウンド模型の測線位置

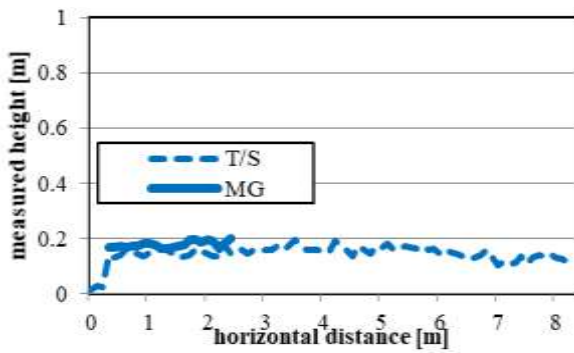


図-4.30 B 測線結果

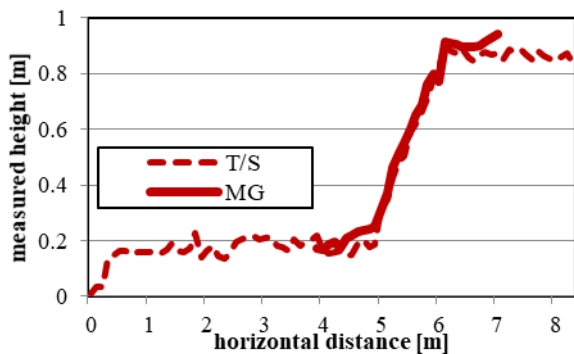


図-4.31 C 測線結果

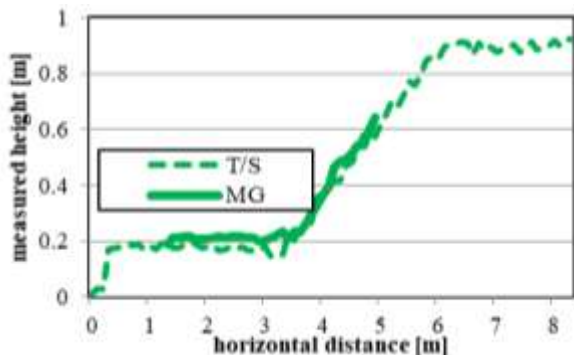


図-4.32 D 測線結果

(2) 試験結果

図-4.30 から図-4.32 に計測結果を示す。なお、横軸はマウンド模型の手前側の端からの距離を示している。また、刃先の高さ計測の結果は、計測時に実際に刃先が届いた範囲で、模型全体は計測していない。

以下に各測線における水中 MG 計測を行った範囲でのトータルステーション計測値 (T/S) を真値としたと水中 MG 計測の差分を示す。

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

すべての測線において、事前にトータルステーションで実測した値より、水中 MG の接触による計測が高い結果となった。これはプリズムポール先端がとがっており、MG の接触計測時の H 鋼部より細く、碎石の隙間等の値も計測しているためであると考えられる。

ここで、実験で用いたグラブや H 鋼の代わりに実作業で使用されるバケットで刃先接触による高さ計測について検討する。このとき、バケット背面の面接触で計測する場合、その面内の最高点の高さが計測される事に留意する必要がある。バケット奥行きを 60cm としたとき、バケット接触による水中 MG での高さ計測は、今回の H 鋼による計測結果 7 点の最大値となる。

トータルステーション (T/S) と水中 MG の 7 点の最大値同士の差を表-4.2 に示した。差はそれぞれ 23mm, 16mm, 19mm となり、突起部分においては目標としている±32mm 以内に収まっていることが確認できた。

表-4.2 バケット背面における複数点平均化 (B 測線)

計測位置 [m]	計測値[m]		最大値[m]		差分
	T/S	MG	T/S	MG	
0.0	0.142	0.169	0.157	0.180	0.023
0.1	0.132	0.170			
0.2	0.14	0.171			
0.3	0.157	0.169			
0.4	0.155	0.171			
0.5	0.144	0.172			
0.6	0.137	0.180	0.164	0.180	0.016
0.7	0.149	0.180			
0.8	0.148	0.180			
0.9	0.164	0.161			
1.0	0.158	0.165			
1.1	0.144	0.169			
1.2	0.132	0.175	0.179	0.198	0.019
1.3	0.138	0.178			
1.4	0.142	0.195			
1.5	0.165	0.196			
1.6	0.152	0.187			
1.7	0.145	0.198			
1.8	0.135	0.193	0.137	0.165	
1.9	0.137	0.165			
2.0	0.179	0.183			



図-4.33 運転席から見たモニタの位置

(4) 実機適応に関する検討

水中 MG の現場適応に向け、実機に移設する場合の変更点や改良点について検討を行う。

a) ストロークセンサの選定

実現場で稼働する機体はバケット容量で $0.3\text{m}^3 \sim 0.8\text{m}^3$ と機体クラスが異なり、同クラスでもメーカーによってディメンションは異なるほか、同一機種でも加工精度によっても数ミリの誤差が存在するため、刃先座標計算に必要な軸間距離は実機を対象に再計測する必要がある。

また油圧シリンダのストローク長も異なる。そのためストローク量を計測するセンサについても選定が必要である。

b) バケットストロークセンサの代替案

今回の水中 MG で使用した磁歪式ストロークセンサは、リアルタイム性が高く高精度に計測可能である。また物理的な可動部分回転部分も存在しないため、ロータリーエンコーダと比較して防水性も優位である。

しかし、シリンダ側面に並行して設置する機構となることから、アームを折りたたんだ状態や深掘りする際に、地面や捨石マウンドに接触する可能性があるためと潜水士から指摘があった。

対策として、バケットリンク側面に傾斜計を設置する機構が考えられる。

ただし前述の通り、重力加速度を検出しているため、掘削施工時の衝撃などの加速度も検知してしまうため、安定させるための静定時間 (遅延) が必要である。

(5) まとめ

水中 MG 実用化にむけた検証として、港湾空港技術研究所が所有する水中バックホウを用い、京浜港ドックにおいて水中試験を実施した。

(3) 搭乗潜水士に対するヒアリング調査

水中実験において搭乗操作を行った作業潜水士に対し、実作業現場適応時に想定される課題点、および機能拡充の要望をヒアリングにより調査した。

a) 課題点

- ・運転席モニタの配置について、視界を遮らない場所に設置してほしい (図-4.33)。
- ・視点切り替えは手間がかかる。断面図と配置図 (上面図) を同時に表示してほしい。
- ・掘削作業時に、バケットシリンダのストロークセンサを捨石マウンドにぶつけそうで気になる。
- ・機体が停止しているのに、モニタ上に表示される機体位置が移動している。(これは水中音響測位装置の計測位置が移動しているためであった。)

b) 機能拡充の要望

- ・バケット背面が水平になっているかが重要なので、表示をバケットにしてほしい。
- ・モニタに表示されたマウスカーソルで当てる場所を指示された時はわかりやすかった。潜水時のコミュニケーションツールとして、図や文字が表示されると使いやすくなるかもしれない。
- ・水中 MG で表示する設計データを作成する作業が面倒なので、設計データ作成支援ソフトがほしい。

- ・水中に設置した既知形状の対象物に水中バックホウ刃先を接触させ、その精度を検証したところ、誤差の平均は目標値の±32mmに収まった。
- ・すべて測線において、水中MGの接触による計測値は光学測量計測値より高く計測された。

また、水中実験時の搭乗潜水士にヒアリング調査を行い、以下の課題点を得た。

- ・運転席モニタの設置位置（実機設置時に対処する）
- ・断面図と上面図の同時表示（ソフトの改善で対処可能）
- ・ストロークセンサの位置（保護材や重力加速度計で対処可能）
- ・バックホウは停止しているのに、水平位置の計測結果が移動する。（SBLの使用環境に依存し、次章で平良港では安定していることを確認）

さらに、今回実験で用いた水中MGを0.8m³クラスの実機に適応する際の課題として、

- ・ストロークセンサの選定検討
- ・傾斜センサによるケット角度計測を挙げ、選定および検討を実施した。

5. 水中マシンガイダンスの実工事適応

5.1 平良港漲水地区工事における水中MGの適応

4章で精度を確認した水中MGを実工事で試用し、課題点・改良点、および、遠隔操作化に向けた付加機能点を抽出することを目的として、実工事適応試験を実施した。試験に用いる水中バックホウ（TKM200-9）は実工事で使用されている0.8立米クラスである。工事は沖縄県宮古島市の平良港漲水地区で実施された（図-5.1）。

水中バックホウへの水中MGの取り付け状況を図-5.2に示す。なお、本試験ではプロファイルソナーは使用しなかった。工種は基礎捨石マウンド均し作業とした。ただし、実工事であるため、施工能力や出来型に影響を与えないよう通常の施工方法・施工手順を基本としており、事前の丁張り作業や別潜水士による誘導を実施している。



図-5.1 床掘作業中の状況



図-5.2 水中バックホウ（TKM200-9）、および、センサ配置図

本試験の実施にあたり、設計図面をシステムデータに変換する必要がある。GPS等で一般的に用いられるのは、緯度経度による世界座標系(図-5.3)であるが、施工一般図では主に法線方向を基準とした直交座標系となる。また、水中MGで採用している座標系も法線直角方向を+Y軸とした直交座標であり、既設防波堤の任意の位置を原点とするMGシステムローカル座標系(図-5.4)としている。

さらに、機体位置(XY平面)を検出するSBL(水中位置検出)は、トランシーバを設置している作業台船の船首方向を0度としたローカル座標系(図-5.4 緑線)となり、また、TKM200-9の方位は地磁気方位計により検出するため、磁北を0度とした方位が出力される。

そのため、バックホウ座標については、台船方位と法線直角方向の角度差分による座標変換(回転)を行う事とし、バックホウ方位については磁北と法線直角方向の差分を補正することでMGシステムローカル座標系に変換する。

またバックホウの高さ(水深方向)については、機体に設置した水圧計により検出している。ここで時間によって変化する潮位に対して補正を行う必要があるため、別途既知の水深に設置した潮位補正用水圧計とバックホウ水圧計の差分によって補正を行うこととした。今回、潮位補正用水圧計は安定した設置のため既設防波堤港内側のフーチング部に設置することとした。図-5.5に平良港漲水地区(-10m)岸壁工事における水圧計配置を示す。

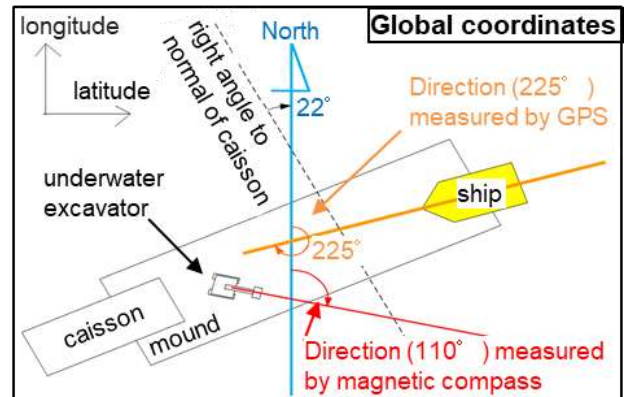


図-5.3 世界座標系(図中の角度は例)

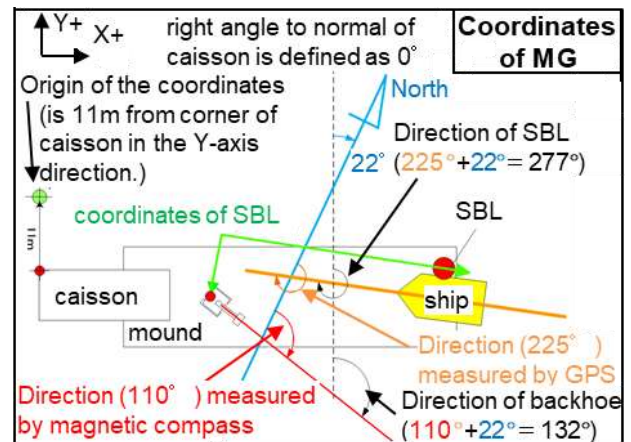


図-5.4 MGシステム座標系(図中の角度は例)

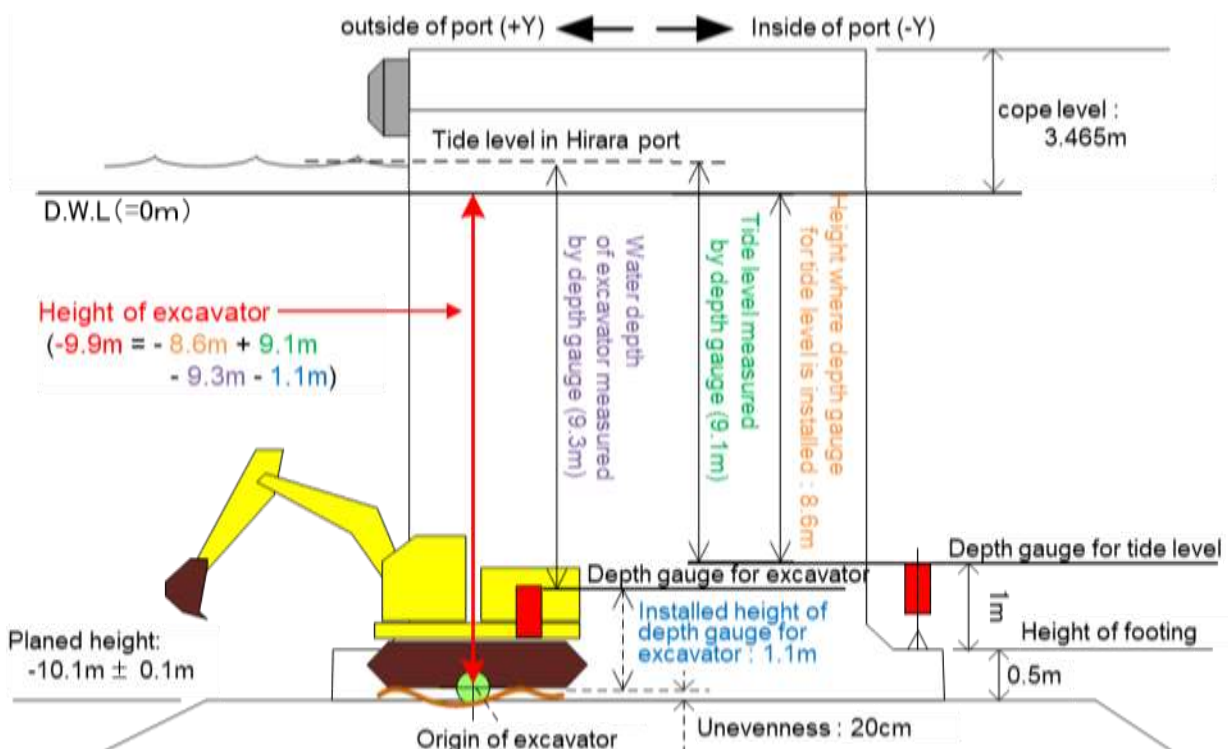


図-5.5 平良港漲水地区(-10m)岸壁工事におけるバックホウ水圧計関係図

この潮位水圧計は既設防波堤に設置し作業台船と有線接続ができないため、無線テレメトリモジュールを介し作業台船上のシステム PC と通信を行う。図-5.6 にテレメトリモジュールを接続した潮位補正用水圧計を示す。

なお、これらの設置位置等は事前計測し、オフセット値として入力する事で対応する。図-5.7 と図-5.8 に計測状況を示す。

これらの条件を基に、設計図面から座標変換等を行い、水中 MG で使用するデータを作成した。図-5.9 に水中 MG 表示内容を、図-5.10 にモニタへの表示状況を示す。



図-5.6 潮位水圧計テレメトリシステム動作試験状況

5.2 平良港漲水地区工事における水中 MG 運用試験

以下に、平良港漲水地区工事における試用試験実施状況を示す。

台船に設置する潮位水圧計の水平位置検出用の SBL の設置中のトランシーバの状況を図-5.11 に、機体に取り付けたトランスポンダの様子を図-5.12 に示す。また、水中バックホウを台船のクレーンで投入する状況を図-5.13 に示す。さらに実験時の台船上に設置した SBL 計測用の PC と船上で水 MG の動作状況を確認するために設置した運転席モニタと同じ内容が表示されるモニタの状況を図-5.14 に示す。加えて、水中での作業状況とその時の運転席の MG 用の表示モニタの様子を図-5.11 に示す。

なお、本試験は、実工事の実施に併せて行われたものであり、水中 MG のためのセンサの計測ログなどの記録は実施したが、その計測結果の精度を評価するための真の値の計測や、形状が既知の構造物への接触等は実施していない。そのため、実験で得られる成果は次項で示すヒアリング結果となる。

また、本試験は 1 回目の捨石投入直後（2019 年 2 月 6 日）に実施しており、その際の設置作業や PC 操作は港湾空港技術研究所が主体となって行った。ここで、本システムの技術移転を目的として、3 回目の捨石投入後（2019 年 2 月 19 日）に、TKM200-9 号機を所有する共同研究者単独で水中 MG を使用することとした。その結果、両日も特に問題無く使用しており、また設置解体についても共同研究者である民間会社単独で作業を行う事ができた。このことから、本システムは技術指導を行うことで民間施工会社単独で使用可能であると言える。



図-5.7 MG 原点座標計測（既設防波堤）



図-5.8 潮位補正水圧計の設置座標計測

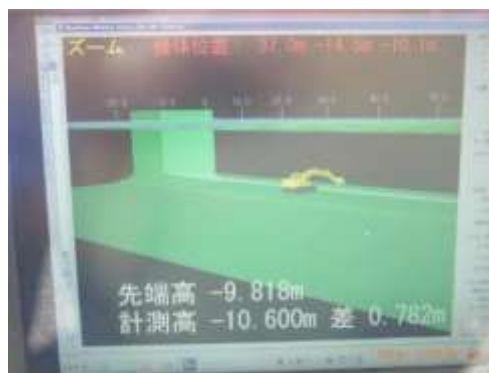


図-5.9 水中 MG 表示内容



図-5.10 モニタの表示状況



図-5.14 台船上制御室



図-5.11 SBL（トランシーバ）設置状況



図-5.15 水中作業状況



図-5.12 SBL（トランスポンダ）設置状況



図-5.16 運転席のMG モニタ



図-5.13 投入状況

5.3 遠隔操作化に向けた課題点抽出

試用試験終了後に、搭乗運転を行った潜水士、および、システム設置に関与した作業者に対しヒアリング調査を行った。

質問項目は「作業情報呈示の有効性」「遠隔操作に向けた機能拡充」「運用時の課題点」の3点を重点とし、改良点や要望などの意見についても聴取した。

(1) 作業情報呈示の有効性

- ・現場海域は少し濁りがあったが、フロントを延ばした

ときにバケットの姿勢がわかるのはありがたい。

- ・いままで誘導指示を信用するしかなかったが、表示があると安心できる。
- ・先端の高さが数字で表示されているので、わかりやすい。
- ・描画に遅れが無いのでストレスは無い。
- ・バケット背面が水平になっているかがわかるので、叩く時に役に立つ。
- ・右側の細かい数字は見ない(見えない)ので、そのぶん大きな画面にしてほしい。
- ・画面操作(視点変更)がやりにくい。
- ・動いている関節が赤く表示されるのは、遠隔操作時にわかりやすいと思う(図-5.17)。

なお、これらの意見に対し、画面操作については、水中無線を介した潜水士の指示で、船上に設置したPCから行うようシステムを運用することで対処することとした。



図-5.17 動作部位の赤色表示

(2) 遠隔操作に向けた機能拡充

- ・機体方位は少し遅れて表示されるので、向きたい方向で止められないかもしれない。
- ・断面図と鳥瞰図は同時に見たい。
- ・鳥瞰図の半透明は高さがわかりにくい。
- ・遠隔操作はこの画面だけで作業は難しいと思う。水中カメラ映像は欲しい。
- ・法面付近での作業で転落防止の面から、クローラの方角の表示は絶対が必要。

なお、これらの意見に対し、機体方位の表示遅れについては、操作者の熟練によって一般に対処可能な課題であるため、更新レートの向上などは実施しなかった。また、遠隔操作時の画面表示については、船上に多画面を設置することで、断面図、俯瞰図の同時表示や、水中カメラ映

像の表示を行うことで対処可能である。さらにクローラの方角については、今後、回転軸にエンコーダを取り付け、上部旋回体とクローラの方角差を検出することで、その向きを表示を実施することを検討する。

(3) 運用時の課題点

- ・捨石の払い動作で乱暴に扱ったが、故障しなかった。
- ・バケットにセンサがあるので、掘削動作時に気を遣う。
- ・SBLのデータにばらつきがある。ただし潜水士が浮上した時は安定しているので気泡の影響だと考えられる(図-5.18)。

なお、これらの意見に対し、バケットセンサについては、これ以上の保護が困難であることから、別に、陸上のマシンガイダンスなどでも一般的に用いられている傾斜計を取り付け、ストロークセンサが故障した場合にも作業継続を可能とすることを検討する。SBLの水平位置のばらつきについては、トランスポンダの設置位置を操縦席から離す、同種の違う装置を用いる、海上に機体の一部を出して光学測量するなどの対処を検討する。



図-5.18 SBLのデータ離散(計測結果は青線)

5.4 まとめ

本章は、課題点・改良点、および、遠隔操作化に向けた付加機能点を抽出することを目的として、構築した水中MGを試験的に水中バックホウに搭載し、補助的に実工事に利用した。

その結果、作業に伴う振動が衝撃が作用したものの水中マシンガイダンスが故障しないことが確認された。

また、操縦者から意見聴取を行い、遠隔操作化に向けて主に次のような要望が得られた。

- ・遠隔操作化にむけて、クローラ方位の検出は必須

- ・断面と鳥瞰の同時表示（多画面化）の要望
- ・水中カメラ映像と併用することが望ましい

6. まとめ

本稿は、安全性及び生産性向上を目的として、情報化施工技術を水中バックホウでの捨石マウンドの本均し作業に適用するため、従来、陸上施工で活用されてきたマシンガイダンス技術を、水中に適用することを提案したものである。

- ・水中マシンガイダンスを構成するセンサ選定及び単独の精度検証を実施した。なお、センサ選定にあたり、水中マシンガイダンスによる高計測について誤差の目標値を±32mmと設定した。
- ・水中施工において使用可能な市販センサを選定し、精度確認のための要素試験を実施した。
- ・水槽でプロファイルソナーによるマウンド形状認識に関する水中試験を実施し、周辺の状況認識の特性を確認した。
- ・選定したセンサを水中バックホウに搭載し、水中マシンガイダンスの構築を行った。
- ・水中バックホウ試験機で刃先接触による地形計測試験を陸上において実施した。その結果、陸上の刃先の接触位置が安定しているコンクリート面では、最大誤差+12mmで地形を計測する事が可能であった。
- ・京浜港ドッグの水中においても水中バックホウ試験機で刃先接触による地形計測試験を実施した。計測対象は150mm 砕石の模型とした。その結果、刃先の接触位置が不明瞭となるため計測誤差が大きくなったが、平均誤差+31mm、偏差±17mmの精度で計測可能であることを確認した。
- ・水中バックホウの遠隔操作化に向けて、実工事で利用される水中バックホウに水中マシンガイダンスを適用し、補助的に使用した。その後、潜水士らから遠隔操作化に向けた意見聴取を行った。

7. あとがき

この水中マシンガイダンスにより、現状の水中バックホウによる作業の安全性及び生産性向上が期待される。

また、従来は水中建設機械の導入が困難であった濁水により極端に視界が悪い環境下での作業にも水中バックホウを導入することが可能となり、潜水士の作業負荷の軽減や新たな水中構造物の課題への対処が期待される。

なお、水中マシンガイダンスシステムは、他の民間の施工現場からも導入の要望があり、当所の共同研究者である極東建設株式会社がそれに応えた事例がすでに出ており、今後も本研究開発技術についての民間への技術移転および社会実装に向けて努力する。

加えて、今後は、更なる安全性の向上等を目的として、水中バックホウ遠隔操作化に向けた検討を行っていく計画である。

(2021年8月5日受付)

謝辞

本検討は、内閣府沖縄総合事務局の委託研究「水中作業の機械化施工におけるマシンガイダンス技術高度化研究委託」、「沖縄管内における港湾空港施設整備等高度化研究委託」により実施した成果である。

また、本検討は、(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。

なお、水中試験における京浜港ケーソンヤードの使用は、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。

また、水中バックホウ TKM200-9 への水中 MG の搭載は極東建設株式会社との共同研究「水中施工機械の作業性向上のための技術開発」の一環で実施したものである。

本資料を作成するにあたり実験等にご協力いただいた関係各位に対し、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 金山裕幸：水中施工機械「水中バックホウ ビッグクラブ」による施工コスト削減対策について、第16回港湾技術報告会概要集, 1999.
- 2) 金山裕幸:上川口港防波堤工事での「水中バックホウビッグクラブ」による施工例, 建設の機械化 3月号, 2000, pp.44-49.
- 3) 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,1996, pp.17-22.
- 4) 小林一年:バックホウ2Dマシンガイダンスシステム, 建設の施工企画, 2012年11月号, 2012, pp.49-52.
- 5) 供田英一, 岩崎肇, 岡本仁:赤松谷川9号床固工工事における無人化施工, 建設の施工企画, 2010年8月号, 2010, pp.14-20.

- 6) 平林丈嗣, 山本恭, 酒井浩, 秋園純一, 内海真: バイラテラル制御に対応した遠隔操作型バックホウの開発, 港湾空港技術研究所資料No.1057, 2003.

港湾空港技術研究所資料 No.1390

2021.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

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

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