

マルチビーム測深機を用いた施工管理システム

橋田 隆史・佐々木 智弘・坂元 賢司

浚渫や護岸工事，ブロック据付工などの海上工事において，水中の状態をリアルタイムに可視化しながら作業を行うことができれば，施工作業の確実性が向上する。また，確認測量などに要する待ち時間を削減することができれば，工事全体の効率化を図ることができる。このようなニーズに応えるため，マルチビーム測深機にパン回転装置を装着して台船上からスキャンニングを行い，準リアルタイムに3次元測量結果を得る施工管理システムを確立した。さらに，既存の国産施工管理ソフトの改修を行い，マルチビーム測深機のデータをリアルタイムに反映させるシステムを構築した。データ検証の結果，データの有効半径は水深比3.3倍，比較計測との標準偏差は6cmで全体の95%以上が±10cm以下の誤差範囲であることが確認できた。一方，台船でのパッチテストが課題であり，水路測量データとしての利用には課題が残るが，水中を可視化しながら作業できるという点での有効性が確認できた。

キーワード：マルチビーム測深機，MBES，モーションスキャン，マシンガイダンス，施工管理システム

1. はじめに

浚渫工事，護岸工事，ブロック据付工，などで実施される起工測量や竣工検査などにおいて，マルチビーム測深機（以下，MBESと記述：Multibeam Echosounder）が広く活用されている。MBESとは，扇状に発射した超音波の反射波を受波アレーにて受信し，数百の単独ビームに分離することで進行方向と直交する横断線上の測深を行い，作業船に艀装して航走させることで広域の3次元データを取得するシステムである。これを使って，作業中の固定された台船から面計測が可能となれば，水中地形を視認しながら重機操作が可能となり，施工の確実性を向上させることができる。この様な用途に現在では4Dソナーが利用されており，工事施工の高度化に大きく貢献してきた。一方，MBESを利用するメリットとしては，4Dソナーに比べて即時性は劣るが測量精度が高いこと，1台のMBESで水路測量と施工管理に兼用できる汎用性，などが挙げられる。本稿では，バックホウ台船およびグラブ台船にMBESを用いた施工管理システムを構築し（写真1），実証試験を行った結果を報告する。

国内においては既に自社開発もしくは国産の施工管理システムを導入している企業も多い。この場合，海外製品の導入にはコスト増と使用方法の大幅な変更が強いられる点がデメリットとなる。こうした課題を解



写真1 MBES施工管理システム使用状況
台船：ハヤカワ建設機一栄号

決するため，既存の国産施工管理ソフトに，MBESスキャンニングデータを利用できるように機能改修を行った。本稿では，海外製の施工管理システムの紹介，国産の施工管理システムの改修事例の紹介，データ精度の検証結果，および，運用上の課題などについて報告する。

2. 海外製施工管理システムの紹介

(1) 施工管理システムの構成

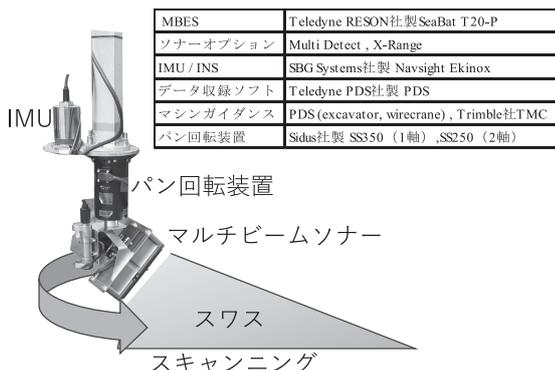
パン回転装置にMBESを艀装することで，定点からの3次元スキャンニングが可能となる。ソナー上部にIMUを装着することで，揺動なども補正しながら

スキャンニングを行うことができるため、ここではモーションスキャンと記述する。モーションスキャンは単独で利用することも可能であり、システムがシンプルなため、常設では無くテンポラリーに利用する際には有効である。また、台船や起重機もしくはバックホウなどの挙動をリアルタイムにアニメーション表示させる機能がマシンガイダンス機能であり、掘削履歴などを管理する機能が施工管理機能となる。データ収録ソフトと施工管理システムは、海外製の場合、一体的に機能するケースが多く、3Dグラフィックが洗練されている。現在提供可能な工種としては、バックホウ浚渫、グラブ浚渫、ポンプ浚渫、ブロック据付工、などである。

(2) 機器構成の一例

本稿で検証に利用したシステムの機器構成を図一1に示す。本実験ではMBESにデンマーク Teledyne RESON 社製 SeaBat T20 を使用したが、T50, T51 も選択可能である。パン回転装置は SeaBat など大型ソナーの回転にも対応する米国 Sidus 社製高トルク機種が適している。データ収録ソフトは Teledyne PDS, マシンガイダンスは Trimble 社の TMC を用いた。浚渫工事などでは掘削直後に土砂が舞い上がり底層付近で高濃度浮遊層が形成されやすい。この様な場合に有効なオプションとして X-Range を利用した。

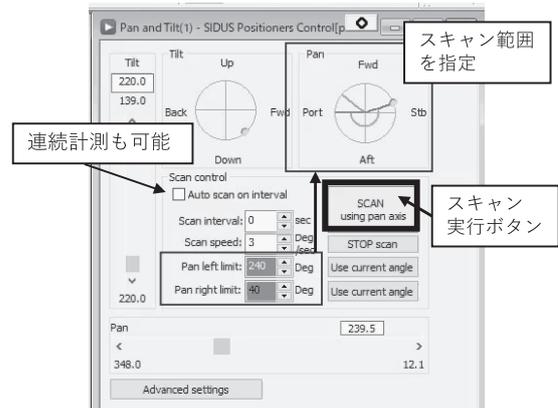
写真一2に、グラブ浚渫船にMBESを艀装した状況を示した。ソナーが回転しても浚渫船の舷側に干渉しないようにソナーヘッドを水面下1mに取付けた。GNSSアンテナはポールのトップに取付けているが、クレーンのジブがGNSSの真上に位置したときは測位データの利得が低下するため、常設の場合はブリッジの天井など上空が開けた場所にアンテナを設置することが望ましい。



図一1 MBES 施工管理システムの機器構成



写真一2 MBES 施工管理システム設置状況
グラブ浚渫船：関門港湾建設(株) 関陽



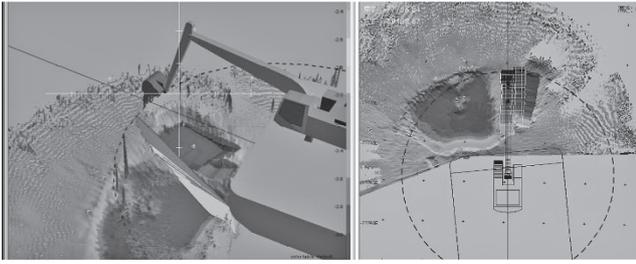
図一2 モーションスキャン制御画面

(3) モーションスキャン機能

モーションスキャン計測の制御画面を図一2に示す。スキャンの設定は、データ収録ソフトである Teledyne PDS のコントロール画面上で、船首方向から見た開始角度、終了角度、および回転速度、を入力することができる。また、Auto Scan 機能を選択すれば、一定時間ごとに自動でスキャンが実行される。ソナーのスキャン中はリアルタイムに画面上でデータ更新され、1スキャン終了と同時にグリッドファイルがハードディスク上に出力される。グリッドファイル名は固定名を選択することが可能なため、外部のソフトからファイル名を指定して容易に読み込むことが可能であり、外部アプリケーションとの連携も可能である。

(4) マシンガイダンスおよび施工管理機能

台船の位置と方位はGNSSコンパスから、クレーンやバックホウなどの情報はアームに取付けた傾斜センサーやワイヤー巻取りドラムからの回転情報などをソフトに取り込んで計算させる。なお、近年では起重機から施工管理向けの信号が出力される装置も普及しており、これを直接取り込むことも可能である。TMCでは図一3左の様に点群データを3D表示可能で、グリッドデータも並列表示可能である。またスキャン中のスワス位置も描画され、計測と同時に測深データが即座に更新される。バックホウなどで水底を掘削した場合は、バケットサイズなどの情報を元に



図—3 マシンガイダンスおよびグリッド表示

掘削量が計算されて掘削痕がグラフィック表示される。MBESによるモーションスキャンが実行された場合は、最新の実測値で上書き更新される。

3. 国産の施工管理システムの改修

(1) 海外製の施工管理システムにおける課題

Teledyne PDSなどの海外メーカー製施工管理ソフトは、同一ソフト上からMBES計測とパンチルト装置の制御が可能で、計測結果表示とマシンガイダンスがシームレスに利用できる。また、3Dグラフィック機能においても洗練されており視認性が高い。一方、国内では自社開発もしくは国産の施工管理システムを導入しているケースが多く、それらはMBESとの連携機能は持たないものの、施工管理の高度化に大きく寄与している。これら既存の施工管理システムにみられる共通点としては、台船回航の誘導機能や、施工計画立案機能、などが実装されている例が多く、これらは海外製の施工管理システムにはみられない。このため、自社製の施工管理システムを導入済みの事業者にとっては、新たに海外製システムを導入することで、使い慣れた機能が使用できなくなるなどの弊害が懸念される。こうした課題を解決するため、国内企業による自社開発の施工管理システムに、MBESのモーションスキャンデータを連携されるためのシステム改修を行った。

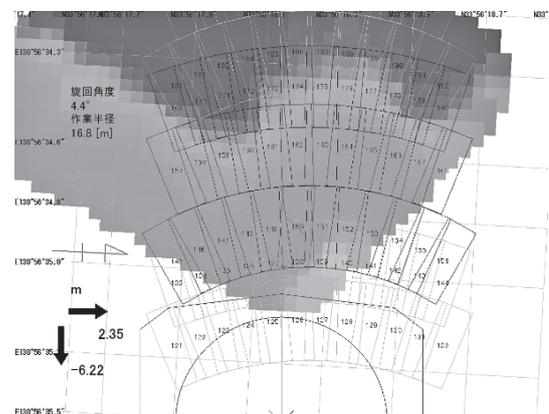
(2) MBES計測データ読み込み機能の追加

対象としたのは、関門港湾建設㈱が自社開発した施工管理システムである。ここでは仮にDRGシステム(DRG: Dredging System)と記述する。DRGシステムは、事前に掘削座標を含めた施工計画を詳細に作成し、施工時にはバケットによる実際の掘削履歴を施工計画に合わせて管理していく機能を有する。また、関門海峡などの強流帯においても海流計測結果からバケットの移流計算を行い、水中での施工座標を補正するなど、施工場所の特長を踏まえた運用が可能となっ

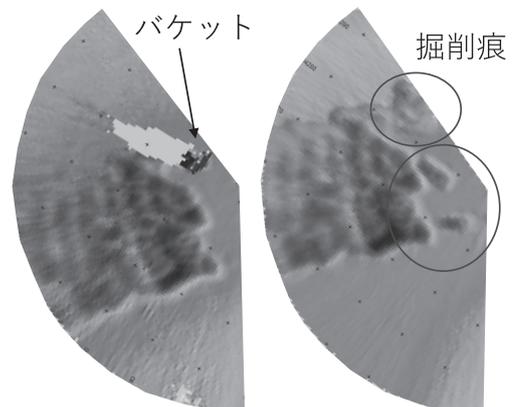
ている。このため、新たに海外製の施工管理ソフトを導入することが難しく、従来のDRGシステムを活用した形で、MBESとの連携を図る機能を追加することとした。

具体的には、MBESのモーションスキャン制御はTeledyne PDS側で実施し、スキャン完了後に得られたグリッドファイルを即座に読み込んで施工場所にグリッド表示させる、という手順である(図—4)。2種類のソフトを別々に制御する必要があるため、操作性の面で若干の煩雑さが生じることと、モニターを2つ準備しなければならない、などのデメリットもある。しかし、MBESのモーションスキャンはブリッジ上の監視員が操作できるため、クレーン操作室のオペレーターは画面の拡大・縮小やクレーンの操作などに専念でき、操作内容が追加されることは無い。

図—5はAuto Scanモードの有効性を確認した結果である。インターバルは5分間隔、回転速度は5度/秒で、掘削作業を止めることなく計測させている。図—5左は、施工中のバケットが映り込んでいる状態で、右図では10分後(2計測後)に掘削痕が追加された状況を確認できる。この様に、一時的にバケットの陰が映り込んだとしても、最新データで上書き更新され



図—4 DRGシステムでのMBESグリッド表示



図—5 Auto Scanモードの検証

る。以上より、狙った位置にバケットを降ろして掘削できることが確認されたとともに、Auto Scan モードが有効であり、計測に要する 30 秒程度の待ち時間は作業性に大きな支障を及ぼさないことが確認できた。

4. 実験およびデータ検証

(1) 水平方向の有効計測距離

垂直護岸に MBES とパン回転装置を取付け、静的環境からスキヤニングさせて水平方向の有効計測距離を検証した。計測対象は直径 20 cm 前後の捨て石マウンドである。センサー直下の水深は 9 m、有効データの半径は 31 m であった（水深比 3.3 倍）。比較のために MBES の航走計測を実施している。両者を重ね合わせたところ（図-6）、水平距離は水深比 1.6 倍付近までは比較データと良好に一致しているが、水深比 1.6~3.3 倍の範囲は比較データとの乖離が見られた。これは入射角が浅くなることと、対象が玉石であったためにボトム検出精度が低下したことが考えられる。平坦地形ではここまで顕著では無いが、やはり水深比 1.6 倍付近を境にデータ品質の低下が見られる。これらの結果から、モーシヨンスキャンのデータ有効範囲としては、最大計測範囲は水深比 3.3 倍で、良好な精度が担保できるのは水深比 1.6 倍までの範囲であることが確認された。

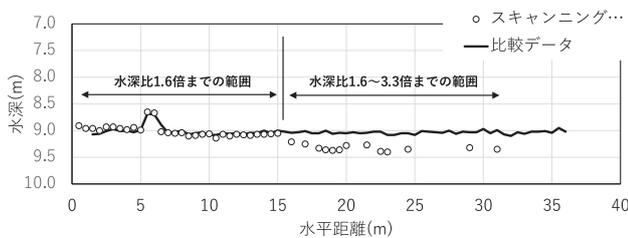
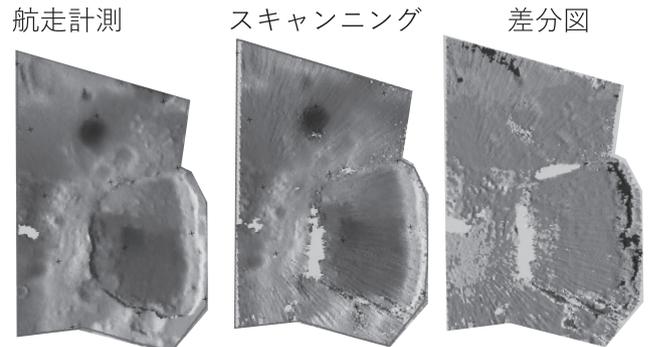


図-6 水平計測距離の検証

(2) マルチビーム航走データとの比較

次に、実際に台船に取付けた状態でモーシヨンスキャンさせたデータについて、通常マルチビーム航走計測データおよびスキヤニングデータとの高さの差分を図-7に示した。計測範囲全体について統計を取ったところ、両者の標準偏差は 6 cm、最大誤差は +44 cm、平均誤差は -1 cm となった。全データの 95% 以上が ±10 cm 以内に入っており、概ね良好なデータと言える。掘削範囲の輪郭付近では誤差が大きくなる傾向が見られたが、これは急傾斜面での僅かな座標のズレが影響したものと思われる。以上の様に、標準偏差、平均誤差、ともに良好な数値が得られてお



比較結果結果	水深差(%)		水深差(cm)			
	±5cm以内	±10cm以内	最大	平均	標準偏差	
データ数	22289	63.46%	95.53%	0.44	-0.01	0.06

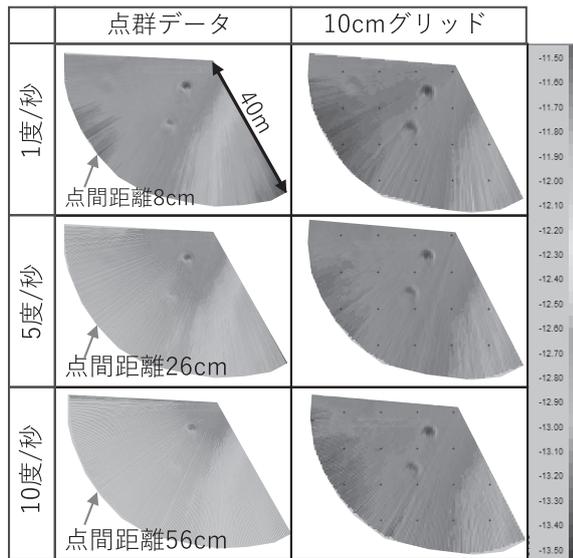
図-7 航走計測との比較検証

り、モーシヨンスキャンのデータにおいても施工管理上、実用的なデータが取得できることが確認できた。

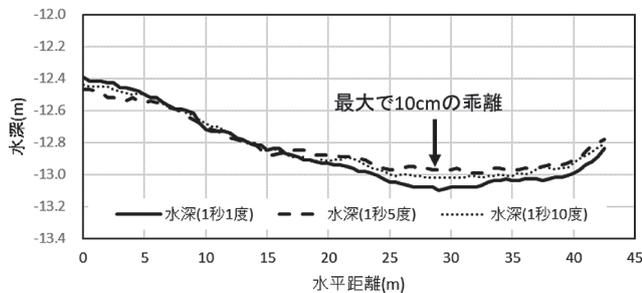
(3) 回転速度の違いによるデータ比較

次に、パン装置の回転速度によるデータ品質の違い、および最適な回転速度を把握するための検証を行った。スキヤニング時間は短時間が望ましいが、回転速度が速くなることでデータの品質や空間解像度が低下する恐れもある。このため、実用的な回転速度を把握するために、1秒間に、1、5、10度の3ケース実施した。回転範囲は120°としたため、10度/秒のケースで計測完了に12秒必要となる。各ケースについて、点群と0.5mグリッドに変換した比較図を図-8に示す。計測範囲にスパットの痕跡が2箇所確認できる。これは、いずれの回転速度でもグリッド化したデータには明確に痕跡が確認可能で、10度/秒のケースでもほとんど劣化が見られなかった。スワス端部での点群間の距離は、10度/秒のケースで水平距離40mに対して56cm程度であり、十分な点群密度を有していると言える。

次に、回転速度の違いによるバイアスの有無を検証した。図-9は、上記3ケースについて同一測線を切り出して比較した図で、最大誤差10cm以内に収まっており、回転速度の違いによりバイアスなどは生じないことが確認できた。最大誤差10cmは若干大きめに感じるが、本実験では2軸のパンチルト装置で計測しており、ギアの遊びが若干生じていたため、それが計測誤差に影響を及ぼした可能性が考えられる。経験的に、1軸のパン回転装置の方がギアの遊びが少なく、良好なデータが得られる傾向が見受けられる。以上より、施工中の回転速度として10度/秒の回転速度でも十分に実用的であることが確認できた。



図一八 回転速度の違いによる点群とグリッド



図一九 回転速度の違いによるデータ比較

(4) 台船でのパッチテスト

通常マルチビーム測量を実施する際には、ソナーとIMU間の取付け角度誤差（ミスアライメント）を、算出するためのパッチテストと呼ばれる一連の作業を実施する。これは、傾斜面など一定の条件の地形を選定して測深幅の重なりを調整しながら複数回航走して計測を行い、取得された地形データの断面プロファイルからソフトウェアがピッチ、ロール、ヨー軸それぞれのミスアライメントを逆算するというものである。しかし、機動力に乏しい台船においてパッチテストを実施するのは容易ではなく、特に流れが速い場所では困難を伴う。当該検証では、簡易的な方法として、台船をほぼ同じ測線上に約30mの距離を1往復させてパッチテストを実施した。その結果、有効なミスアライメント値を得ることができず、パッチテストそのものが成立しなかった。その理由として、選択した地形が平坦地形であったことと、作業上の制約で同一測線上を往復せざるを得なかったことが挙げられる。通常、台船が施工する場所は平坦地形が多いと予想されるため、場所や方法などには工夫が求められる。案としては、①海底にブロックなどを仮設し、台船の位置

をずらして3箇所ほどからスキヤニング計測し、既知のターゲットを重複計測させてパッチテストを行う方法、②作業船に一旦艀装を付け替えて通常のパッチテストを実施した後に台船に付け替える方法、などが考えられる。いずれも計測に要する労力が大きく、パッチテストの実施に関しては今後の課題である。

5. おわりに

MBESを活用した施工管理システムは、水中地形を視認しながら作業できる点で有効であることが確認できた。比較計測の結果、標準偏差6cm以内の精度が確認できた。計測範囲は、水深比1.6倍までは良好であるが、水深比1.6～3.3倍の範囲では精度が低下する傾向が見られる。特に玉石マウントなどの計測結果で遠方の精度低下が著しかったので計測対象によっては注意が必要である。今後は台船での簡便で効果的なパッチテストの方法を考案することが課題である。さらに施工事例と検証を重ね、誤差が生じやすい条件の把握や使用上の注意点などについて精査していく必要がある。

なお、本稿執筆にあたり、施工管理システムの事例紹介としてハヤカワ建設(株)に協力を頂いた。比較検証実験は大河津分水路新第二床固改築I期工事事務所に、バン回転装置の回転速度検証および国産の施工管理システムの改修に関しては、関門港湾建設(株)の協力を頂いた。ここに感謝の意を表すと共に、さらに当該システムが関係者の事業に貢献していくことを期待する。

JICMA

【筆者紹介】



橘田 隆史 (きつだ たかし)
 (株)ハイドロシステム開発
 代表取締役 社長



佐々木 智弘 (ささき ともひろ)
 (株)ハイドロシステム開発
 MBES 部門長



坂元 賢司 (さかもと けんじ)
 (株)ハイドロシステム開発
 MBES フィールドサポート 副技師長