

海上部測量におけるマルチビーム測深を用いた 3次元データ作成について

森本 聡¹・懸川 寛史²

¹兵庫国道事務所 計画課 (〒650-0042兵庫県神戸市中央区波止場町3-11)

²総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課 (〒100-8926東京都千代田区霞が関2-1-2)

名神湾岸連絡線の橋脚を海上部に計画しているため、海上部の設計で必要となる海底の詳細な地形状況の把握を目的として、マルチビーム音響測深器を用いた水中3次元測量を行い、3次元測深データを作成した。なお、測量に際しては、関係機関との調整、現地踏査結果に基づく適切な測深計画を策定し、3次元測深データの作成を行ったものである。

キーワード 海上部測量, マルチビーム測深, 3次元データ

1. 名神湾岸連絡線の概要

名神湾岸連絡線は、名神高速道路と阪神高速3号神戸線（大阪方面）及び阪神高速5号湾岸線を連絡し、阪神高速3号神戸線と国道43号に集中している交通を阪神高速5号湾岸線に分散させることにより、周辺地域の交通渋滞緩和や物流の効率化を図り、名神高速道路と阪神港をスムーズに連絡し、物流ネットワークの形成を図ることを目的とした道路です。



図-1 名神湾岸連絡線 位置図

当事業において、港湾部を渡港する橋梁を計画していることから、今後設計を行うために必要となる海底部の地形状況の把握を目的として、マルチビーム音響測深機を用いた水中3次元測量を行った。

また、測量作業にあたっては、関係機関との調整、現地踏査結果に基づく測深計画を策定し測量を行った。

2. 海上作業における申請や作業周知

海上作業となることから、海上交通の安全確保を最優

先とし、関係機関協議、各種申請、民間施設、地元住民への作業周知を実施して測量を行った。

(1) 水路測量許可申請

公的経費により、海岸や海底の地形を測量することを海上保安庁では「水路測量」と言う。水路測量は水路業務法に規定される水路測量許可申請を行うことが義務付けられる。これは、測量の重複を避けることを目的とするほか、その測量データを用いて海図補正に利用される。そのため、測量を計画する国や地方公共団体は、作業を行う海域を管轄する管区海上保安本部へ申請書を提出し許可を得る必要があった。

本測量においては、第五管区海上保安本部へ申請を行い許可申請を行った。また測量データは、第五管区海上保安本部に提出し審査を受け海図に利用されることとなった。

(2) 作業許可申請

特定港や適用港、これらの港の境界付近で工事・作業を実施する場合は、港則法に則り作業実施の最寄りの海上保安部に作業許可を得る必要があった。これは海上交通の安全を図るため、作業方法・使用船舶・安全対策等を明確にすることで事故防止を目的としている。

測量箇所は西宮港で特定港ではないが、西宮海上保安署と協議し、作業許可申請書を提出し許可を得ました。これは、測量箇所は船舶や水上バイクの航行が多いことによる安全確保を目的とした申請である。

(3) 関係機関への使用届

測量箇所は、兵庫県が管理する港湾施設であるため、

尼崎港湾管理事務所と協議を行い、港湾敷地一時使用届を提出し許可を得て測量を行った。

(4) 民間施設への作業周知

測量箇所には、大型工場が隣接し大型船の入船があるため、作業中に大型船が進入すると測量船と衝突の危険性が高い。そのため、作業中は大型船の進入時間の調整を行った。

また、マリーナやポートパーク、水上バイクのレンタルショップなどがあり、測量箇所は船舶や水上バイクの往来が多いため、作業中の事故が懸念されました。そのため、作業周知の徹底を図り、事故防止を目的としてそれらの施設へ行き、作業内容の説明を行い同意を得ました。この調整には約2ヶ月を要しましたが、今後の事業を進めるにあたり、最も重要な工程と考える。

(5) 地元周知資料の作成・配布

近接する地元への周知資料としてチラシ約12000枚を作成し配布を行い、作業内容の周知を行った。

3. 水深測量（マルチビーム測深）

マルチビーム測深は、指向性の強い数百本の音波を放射し、水深値・GNSS測位値・船の動揺をリアルタイムで同期・補正を行うことで、海底・湖底地形を面的に計測する計測法です。そのためマルチビーム測深で計測したデータは三次元データとして扱うことになる。計測イメージを図-2に示す。

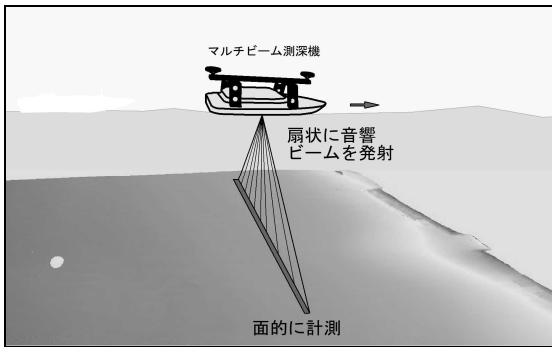


図-2 計測の概念図

(1) 機器の概要

マルチビーム測深の使用機器は2つに区分される。マルチビームソナー(以下ソナーとする)とIMU(慣性計測ユニット)です。

ソナーは、「TELEDYNE RESON社製ScabatF51」を使用しました。このソナーは、「i-Construction対応」機種で、発射する音波の大きさ(ビーム幅): $0.25^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (7~800kHz)、 $0.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ (400kHz)、発射する音波の数(ビーム数):1024本、扇状に音波が発射可能な角度(スワ幅):最大 170° (等角度発信)、直下最大測深レンジ:350m(400kHz)で

ある。

次にIMUは、「SBG Systems社製Apogee」である。ネットワーク型RTK法(本測量ではVRS方式)により、位置精度:XY=0.02m(RTK時) Z=0.03m、ピッチ・ロール: 0.008° です。それらの機種を写真-1に示す。また、これら機種の性能を表-1に示す。

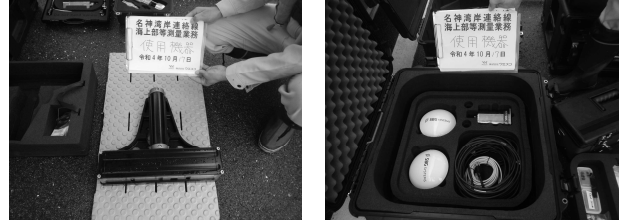


写真-1 ソナー(左), IMU(右)の写真

マルチビーム測深機 (Teledyne Reson社製 SeaBat T-51)	
高性能マルチビーム測深機です。表面音速時計によりリアルタイムで表面音速度補正を行います。	マルチビームの諸元
	周波数 700~800kHz 350~430kHz
	ビーム幅 $0.25^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (7~800kHz)、 $0.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ (400kHz)
	ビーム数 最大1024本
	スワ幅 150° (等間隔発信、 170° (等角度発信))
	最大測深レンジ 350m(400kHz)
	レンジ解像度 0.6cm
慣性GNSSジャイロ (SBG Systems社製 Navsight Apogee)	
処理ユニットと動揺センサーが一体となったシステムです。測位・動揺・方位の情報を高精度に取得可能です。	慣性GNSSジャイロの諸元
	ロール/ピッチ精度 0.01° (DGPS時) 0.008° (RTK時)
	リアルタイムヒーブ精度 5cmまたはヒーブレンジの5%
	ヒーブ精度(後処理) 2cmまたはヒーブレンジの2%
	ヘディング精度 0.02° (2mベースライン)
	測位精度(RTK時) XY=0.02m Z=0.03m
	測量誤差の試算 水平距離2.7cm 水深20m、スワ幅 120° 水深誤差2.5cm

表-1 性能表

(2) 計測概要

a) 艀装

使用する測量船に垂木等を用いてソナーやIMU等の機器および周辺機器を計測中でも動くことがないように強固に固定を行った。取付け後は、システム機器の計測原点に対し、所定の機器までの水平・鉛直距離を測定(オフセット計測)し、システム点検簿へ記入を行った。また、ソナーの喫水確認をバーチェックにて行い喫水値を確定します。艀装の状況を写真-2に示す。



写真-2 艀装状況写真

また、狭小部や浅瀬部はマルチビーム機器搭載の無人ボートを使用したことで、安全に測深が可能であり、直進かつ精度を保持する事が出来た。無人ボート航行状況を写真-3に示す。



写真-3 無人ボート航行状況

事前に計測した航行測線を測量船に配置したパソコンを操舵者がリアルタイムで航行状況が分かるシステムで行った。隣接する航行測線とのラップ率は20%以上に設定しますが、水深により未計測域が発生するため、適宜測線を追加し計測を行った。計測状況を写真-4に示す。またデータの収録状況を図-4に示す。



写真-4 計測状況写真

b) バイアス値の測定(パッチテスト)

マルチビームシステムは、水面に対し水平・垂直に艤装することが基本であるが、測量船の形状などにより困難で、取付け角度の誤差が必ず発生する。この誤差をバイアス値と言い、その取付け角度を求めるためにパッチテストを行う。パッチテストで求められる値は、ロール(Roll)・ピッチ(Pitch)・ヨー(Yaw)・レイテンシー(Latency)という。ロールは船の進行方向に対して横方向の取付け角度、ピッチは船の進行方向の取付け角度、ヨーは進行方向に対する送受波器の向き、レイテンシーはデータ収録の遅延時間である。バイアス値の種類¹⁾を図-3に示す。

本測量計測前に、パッチテストを平行測線、往復測線を航行しバイアス値を求め補正を行います。

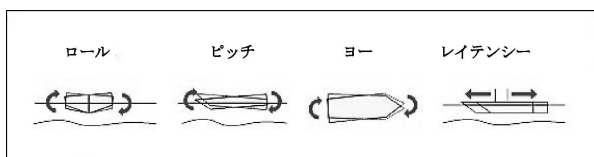
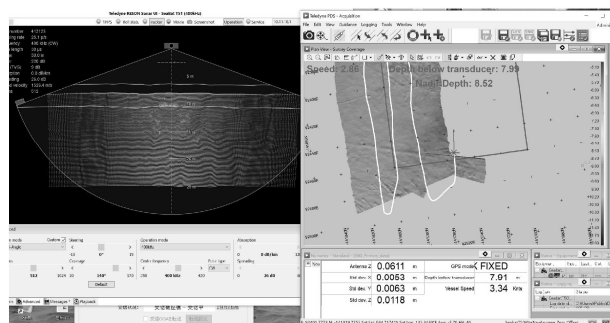
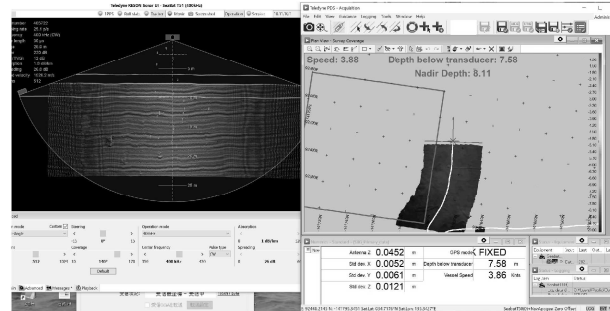


図-3 バイアス値の種類



(測深年月日:2022/10/17)



(測深年月日:2022/10/17)

図-4 データの収録状況

c) 使用するGNSSの点検

IMUに付属するGNSS測量機の点検を現地近傍にある基準点にて行った。これは、マルチビーム測深は世界測地系が標準のため座標系の違いを確認することを目的とする。本測量では、「三等三角点 鳴尾」で点検を行い較差0.028mと良好な結果を得ました。

d) 水中音速度測定

作業前後や作業中、計測域が大きく変わった時に、水中音速度計を用いて計測エリア内の最深箇所において音速度測定を行った。これは、水中における音速度は1500m/sであるが、水温等の影響により音波の伝搬遅延等による誤差を含むため、補正することを目的とした。

e) 計測

f) 検潮

検潮は、干満による誤差を最小限とするため、作業範囲内に簡易験潮所を5点設置し、計測中は2個所以上で同時観測を行った。各験潮点に作業員を配置し、測深作業内10分毎の海面を直接測定し記録を行った。検潮の状況を写真-5に示す。



写真-5 検潮の状況写真

検潮した結果を同時観測した験潮点で比較し較差の確認を行った。較差は最大で4cmと検潮の読取りや干満による差が問題がないことを確認した。験潮点の配置を図-5に示す。

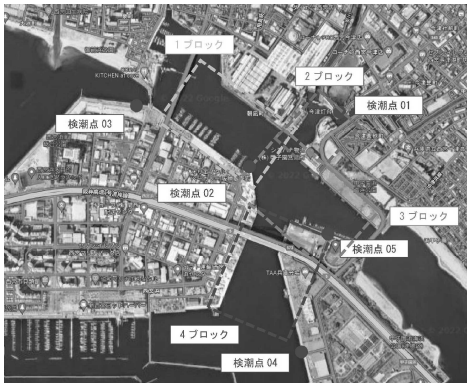


図-5 検潮点配置図

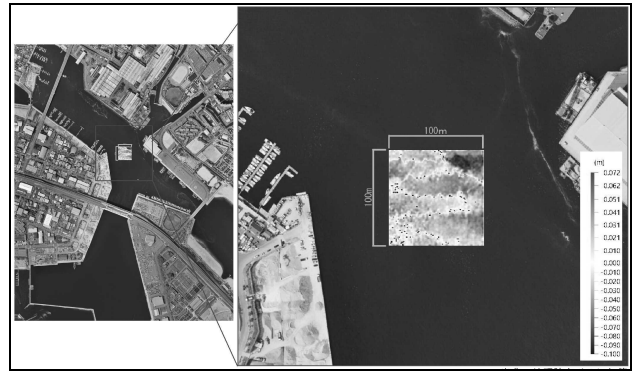


図-8 点検測量の実施図

g) 精度管理計測

本測量の精度管理計測は、3パターン行った。井桁計測・照査線・点検測量率に基づく点検測量である。

井桁計測は5mの2本の平行な測線、およびそれに直行する2本の測線を航行し、その内側の交点の水深較差を比較し精度確認を行った。許容範囲は、マニュアル¹⁾の「±10cm、90%以上の達成率」の範囲内であることを確認した。

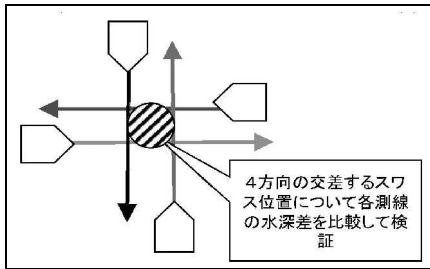


図-6 井桁計測の計測図²⁾

照査線は、測深線とそれに直行する照査線を任意個所で設定し、その交点の値の較差を確認した。許容範囲は、井桁計測と同様とし、範囲内であることを確認した。

最後に点検測量率に基づく点検測量については、マルチビーム測深は、作業規定上点検測定率の基準が無いため、現地測量の点検測量率2%を準用して点検測量を行った。成果点群データと点検点群データ(両方とも1mメッシュ)を比較し較差を確認した。許容範囲は、井桁計測と同様とし、範囲内であることを確認した。

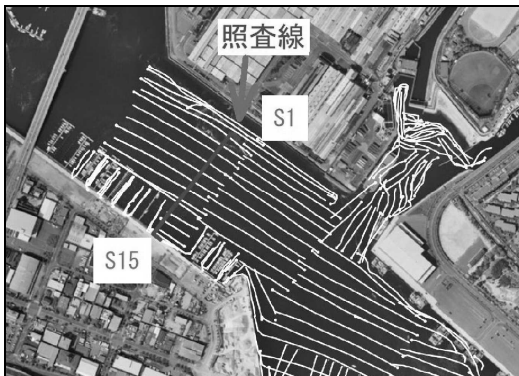


図-7 照査線の配置図

h) 測量船の衝突防止措置

測量船には、海上保安庁が規定する「白紅白旗」、測量中の旗の2種類を掲げ、他船との衝突防止に努めた。また、測量船以外に警戒船を配置し、航行中の他船へ測量作業中であることを周知し衝突防止に努めた。その措置状況を写真-6に示す。



写真-6 衝突防止措置状況写真

4. データ解析

マルチビームの計測結果には多くのエラーデータ(以下ノイズとする)が収録される。ある程度は解析ソフトで自動処理が可能であるが、自動処理も限界があるため、最終的には作業員による目視および手作業による処理が必要となる。一般的なデータ解析フローを図-9に示す。

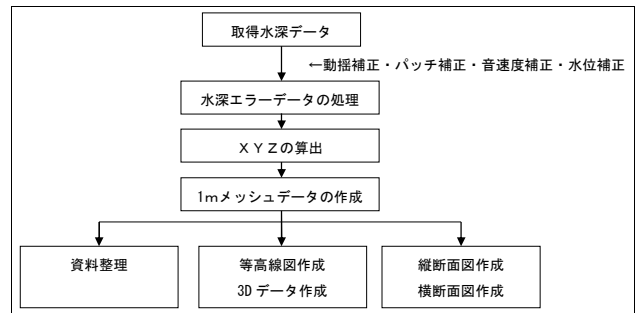


図-9 解析実施フロー図

(1) 水深エラーデータの処理

水深エラーデータの処理(以下フィルタリングとする)は、解析ソフト「TELEDYNE RESON社製 PDS Ver4.4.5.9」を使用し行った。フィルタリングの前後を図-10に示す。

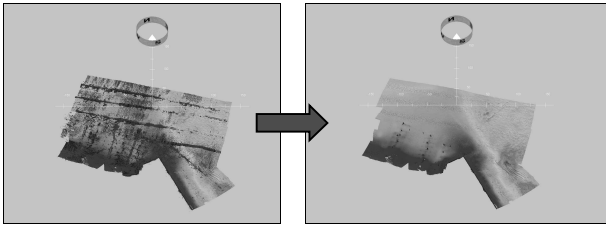


図-10 フィルタリング前(左), フィルタリング(後)

(2) 点密度の確認

フィルタリングを行ったことにより、データ密度の不足が懸念されるため、点群密度の確認を行った。マニュアル¹⁾の「3点以上/1.0m平面格子(達成率99%以上)」の範囲内であるか三次元ソフトを用いて確認を行った。

結果は達成率99.1%と範囲内であることを確認した。確認結果を図-11に示す。

バージョン	1.1		
密度データ名称	1: 密度		
点数数	6195646		
面積(m ²)	542001.792		
密度条件	1m ² (1m×1m)あたり3点以上		
格子原点座標	0		
格子原点Y座標	0		
格子角度	90		
格子数	538464		
密度を満たさない格子数	4809		
達成率(%)	99.1		
格子番号	格子中心X座標	格子中心Y座標	格子内点群数
1	-141545.5	91920.5	0
2	-141546.5	91921.5	0
3	-141546.5	91921.5	0
4	-141544.5	91921.5	14
5	-141543.5	91921.5	11
～ 各 路 ～			
538460	-142069.5	92960.5	12
538461	-142068.5	92960.5	8
538462	-142071.5	92961.5	6
538463	-142070.5	92961.5	11
538464	-142069.5	92961.5	13

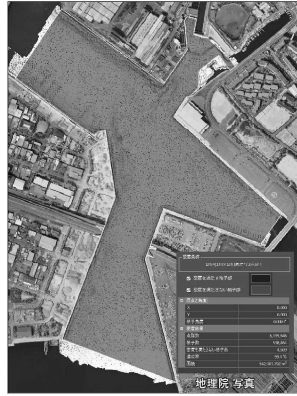


図-11 点群密度確認図

(3) メッシュデータとTINモデルの作成

フィルタリングおよび点密度確認で完成した点群データを、1.0m平面格子の点群データ(以下メッシュデータとする)の作成を行った。その後、作成したメッシュデータから現状の海底地形をモデル化したTINモデルの構築を行った。作成状況を図-12に示す。

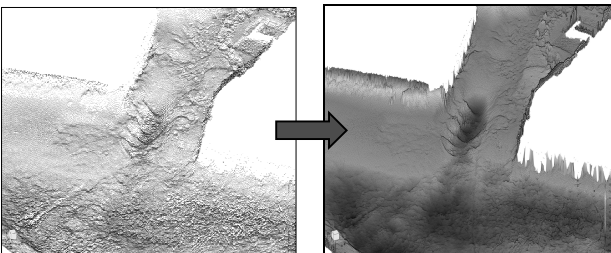


図-12 1mグリッド点群データ(左)、TINモデル(右)

(4) 三次元データの作成

作成したTINモデルを用いて等深線を作成し、標高段彩図を作成したほか、傾斜量図の作成も行うことで海底地形をより詳細に表現した。標高段彩図+傾斜量図を図-13に示す。

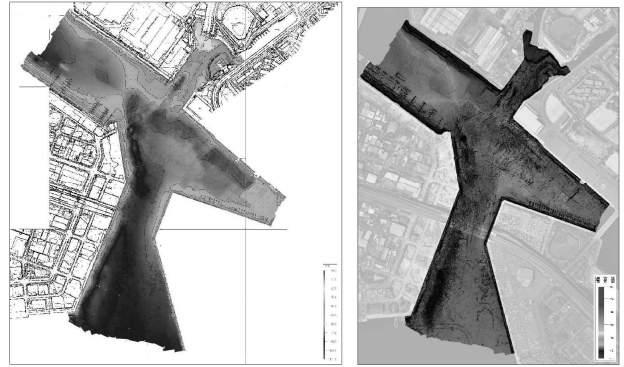


図-13 標高断彩+等高線(左), 標高断彩+傾斜量(右)

5. おわりに

海上の測量作業を行う前には、多数の関係機関と調整・協議に時間をかけて実施したことで、測量作業中の苦情等も無く測量作業を完了する事が出来た。

今後も海上作業を行う際には、時間はかかるが調整・協議を丁寧に実施していく必要があると考える。

今回作成した3次元データは、今後実施する橋梁予備・詳細設計業務や地質調査業務の成果に利用することで、施工計画の検討に活用できると考える。

最後に、本稿の執筆にあたっては、「名神湾岸連絡線海上部等測量業務」の受注者である(株)ウエスコ様にご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工編)(令和5年4月改定版)国土交通省港湾局
- 2) 音響測深機器を用いた出来形管理要領(河川浚渫工事編)(案)平成30年3月