

### マルチビーム測深における高精度後処理測位・動揺データの有用性<sup>†</sup>

住吉昌直<sup>\*1</sup>, 松本良浩<sup>\*1</sup>, 吉澤 信<sup>\*2</sup>, 安原 徹<sup>\*3</sup>

Utility of precise post-processed navigation/altitude data in multibeam bathymetric surveys<sup>†</sup>

Masanao SUMIYOSHI<sup>\*1</sup>, Yoshihiro MATSUMOTO<sup>\*1</sup>, Makoto YOSHIZAWA<sup>\*2</sup>, and Toru YASUHARA<sup>\*3</sup>

#### Abstract

Recently high-resolution multibeam echo sounders have become more commonly used, and, as a result, the demands of precise post-processed navigation/altitude data have been increasing. In this study, an accuracy verification test of the precise post-processed navigation/altitude data by POSpac processing is carried out on the basis of the real multibeam data analysis. This report describes the utility of precise post-processed navigation/altitude data in multibeam bathymetric surveys.

#### 1 はじめに

水路測量・海底地形調査における標準的な手法として確立しているマルチビーム測深において、正しい海底地形・海底特徴物を確実に捉えるためには、測位・動揺検出器によるデータが必要不可欠である。現代の高分解能のマルチビーム測深機において、スワスの重複部分の再現性の高い「高品質の測深データ」がデータの品質管理（以下、QC：Quality Control。ここでは測深データからのノイズ判別や海底特徴物の検出を指す。）の迅速化につながるため、測位・動揺データの高精度化の必要性が高まってきている。

特に、水路測量について言及すると、水深の水平位置の精度は、海上保安庁告示第 102 号（海上保安庁，2009）により規定されており、特級の水域では 2 m，一 a 級または一 b 級の水域では 5 m + 水深の 5%，二級の水域では 20 m + 水深の

10%と定められており、船舶の航行安全に対して重要な水域においては、高精度の測位・動揺データを用いたマルチビーム測深が要求されている。海上保安庁海洋情報部の水路測量では、これまで主として、海上保安庁交通部の運用するディファレンシャル GPS（以下、DGPS）による補正情報を GNSS 慣性航法システムに適用することで、マルチビーム測深の水平位置の精度～1 m 程度を担保してきた。しかし DGPS は平成 31（2019）年 3 月 1 日をもって廃止されることが決定されており（海上保安庁，2017）、水深の水平位置の精度を担保するためには、DGPS に代わる手法が必要となり、いくつかの手法が検討されてきた（笹原・他，2009）。

海上保安庁海洋情報部では、平成 25（2013）年度から、マルチビーム測深機の構成要素である GNSS 慣性航法システム POS/MV で収録した測

<sup>†</sup> Received September 25, 2018; Accepted October 31, 2018

\* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

\* 2 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

\* 3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

位・動揺データを後処理基線解析するためのソフトウェア POSpac MMS (以下, POSpac) を本格的に導入した。POSpac により後処理キネマティック補正された高精度の測位・動揺データをマルチビーム測深データに適用することにより, 水深の水平位置の精度が $\sim 2-5$  cm 程度まで向上し, DGPS に代わり水深の水平位置の精度を担保することが可能となる。また, 測位・動揺データの統合的な後処理により, 動揺データの測定精度も向上する。これらの効果により, オーバーラップ領域における測深データの再現性が高い「高品質の測深データ」が得られるため, 迅速で確実な QC が実現可能となることが期待される。更に, POSpac 等の後処理キネマティック処理により, 水平位置の精度だけではなく, 鉛直位置 (WGS 楕円体基準) の精度も $\sim 5-10$  cm 程度まで向上する。この鉛直位置の精度向上により, 伝統的な「水面ベースの水路測量」だけではなく, 「楕円体高ベースの水路測量」を実現する上での技術的な環境が整いつつある。この「楕円体高ベースの水路測量」の実現により, 将来の水路測量における迅速化や水深精度の向上につながる可能性も期待されている。

本報告では, POSpac 処理を行った測位・動揺データと RAW データについて, 実際の観測データを用いて, 不確実性 (Uncertainty) と相対誤差を比較検討し, POSpac 処理を行った測位・動揺データの精度が大きく向上することを示す。更に, POSpac 処理を行った高精度後処理測位・動揺データをマルチビーム測深データに適用することで, 海底特徴物の詳細な形状においても再現性の高い「高品質の測深データ」が得られ, 水路測量の品質が向上することを示す。

## 1 使用機器・データ・ソフトウェア

平成 29 (2017) 年 2 月, 第三管区海上保安本部の測量船「はましお」にて取得したマルチビーム測深データを使用した。マルチビーム測深機の一部である測位・動揺検出器は, Applanix 社製 POS/MV Wave Master V5 (以下, POS/MV) で

ある (吉澤・他, 2018)。

POS/MV は船上観測機器用の GNSS 慣性航法システムである (Applanix, 2011)。測位は GNSS 測位データと慣性航法データをカルマンフィルターで統合的に推定することにより, 高時間分解能かつ高精度の測位を実現している。姿勢計測は, 時間応答の良い慣性計測装置 (Inertial Motion Unit : IMU) に系統的ドリフトの小さい GNSS ジャイロを組み合わせることで, 高時間分解能かつ高精度の姿勢計測 (Roll, Pitch, Heading) を実現している。ヒープは, IMU に内蔵された加速度計データを時間 2 階積分することで間接的に求めており, リアルタイムで出力される (過去の加速度データのみで計算される) 通常のヒープだけではなく, 時間的に遅れて出力される (過去及び未来の加速度データで計算される) 高精度の TrueHeave (遅延ヒープ : Delayed Heave の一種) も収録可能である。

測位・動揺データの後処理基線解析に必要な POS/MV RAW データファイル (\*.000 フォーマット) は, POS/MV の制御ソフトウェアである POSView で収録した。

POS/MV で収録した測位・動揺データの後処理基線解析ソフトウェアは, Applanix 社製 POSpac MMS 6.2 を使用した。POS/MV 収録データと併せて, 電子基準点データと GNSS 衛星の軌道情報を用いて POSpac 処理を行った。

電子基準点データは, 横須賀・横浜・富津・横浜泉・神奈川川崎の 5 点の 30 秒値 (RINEX フォーマット) を国土地理院のウェブサイト「電子基準点データ提供サービス」からダウンロードして POSpac 処理に使用した。

電子基準点の位置は, 測地成果の元期である 2011 年度の位置を基に, 観測データ取得時の 2017 年度 (今期) へ変換した位置を使用した。国土地理院のウェブサイト「基準点成果等閲覧サービス」から北緯・東経・楕円体高 (測地成果 2011) を閲覧し, 国土地理院のウェブサイト上の変換ツールである SemiDynaEXE (国土地理院) を用いて元期から今期へのセミダイナミック補正

を行った。

GNSS衛星の軌道情報は、GPS、GLONASS精密暦を使用した。後述のSmartBase処理では、基準網の構築の際のチェックにのみ、GPS、GLONASS放送暦も併せて使用した。

水深の精度検証のために使用したマルチビーム測深データ (\*.HSX フォーマット) は、データ収録ソフトウェア HYPACK で収録した。マルチビーム測深データの処理・QC は、CARIS HIPS & SIPS 10.4 を用い、POSPac で後処理した測位・動揺データの適用、TrueHeave の適用、潮汐補正 (横須賀験潮所の実測値・最低水面基準)、音速プロファイル補正、各センサーのレバーアーム・角度オフセットの補正等を実施した。

## 2 POSPac を用いたデータ処理

POSPac を用いた後処理キネマティック処理には幾つか種類があるが、本報告では、主要な処理方法であるシングルベース処理とスマートベース処理の2種類を用いた (株式会社東陽テクニカ, 2012)。両者の主な違いは、GNSS測位の大きな誤差要因である大気・電離層遅延等の補正データの構築のために使用される基準局の個数の違いである。シングルベース処理は、基準局1点のみを用いた基線解析手法であり、電子基準点から測量データの始点及び終点までの基線長を20 km 以内にする必要があるものの、測量作業中、一時的に、最大100 km まで基線長が離れても処理可能である。ただし、一般に、シングルベース処理のような基準局1点を用いた処理においては、理想的な高精度測位を得るためには、基線長を30 km 程度以内に抑える必要がある (Hutton et al., 2008)。一方、スマートベース処理は、複数の基準局を用いて、後処理で、最適な仮想基準局ネットワークを構築する基線解析手法であり、理想的な高精度測位を得るためには、調査海域に電子基準点が均一に分布し、基線長が50-70 km 以内であればよく、一般に、シングルベース処理に比べて、より広い海域をカバーすることが可能である。また、複数の電子基準点を用いた相互の精度

検証が処理の中で実施できる点も、スマートベース処理が、シングルベース処理に比べて有利な点である。

本報告では、POSPac 処理方法による比較検証のため、同一のPOS/MV RAW データファイル (\*.000 フォーマット) に対して、下記の3パターンの処理を行った。

- ① シングルベース処理：電子基準点「横須賀」 (機器テスト海域に最も近い)
- ② シングルベース処理：電子基準点「横浜」 (収録開始・終了地点に最も近い)
- ③ スマートベース処理：電子基準点「横須賀」「横浜」「富津」「横浜泉」「神奈川川崎」の5点 POSPac 処理 (シングルベース処理・スマートベース処理) の具体的な手順は、下記の通りである。POSPac MMS 簡易取扱説明書 v1.3 (株式会社東陽テクニカ, 2011) がベースとなっている。
  - (1) POSPac MMS を起動し、新規プロジェクトを生成する。
  - (2) POS/MV RAW データファイル (\*.000 フォーマット) をインポートする。一つのプロジェクトには、連続収録したRAW データをインポートできる。
  - (3) RAW データをインポートする際、アンテナ位相に関する正確な処理のため、POS/MV のアンテナタイプを指定する。GNSS アンテナは Trimble 540AP を使用しているため、Trimble, AeroAntenna, Antenna Phase Center を指定した。
  - (4) 正しくインポートされると、RAW データの航跡が全て表示される。Message Logs の POS Data Import 等も確認し、RAW データが全てインポートされていることを確認する。
  - (5) RAW データの航跡から最寄りの電子基準点を選び、電子基準点データ (30 秒値) をダウンロードし、電子基準点データをインポートする。通常、シングルベース処理では1点、スマートベース処理では少なくとも4点以上、電子基準点データをインポートする必

Table 1. Coordinates of the GNSS-based control points used in POSPac processing. The upper table lists the differences in coordinates, between the ones taken in the epoch of 2011 by GSI Japan, and the ones from the present term with semi-dynamic corrections applied. The lower table lists the differences in coordinates between the ones calculated by POSPac automatically and the present term coordinates, to which semi-dynamic corrections are applied.

表 1. POSPac 処理で使用する電子基準点の座標値。上段が国土地理院の基準点等閲覧サービスにおける元期とセミダイナミック補正を適用した今期の座標値とその差分で、下段が POSPac 自動計算値と今期の座標値とその差分である。

電子基準点観測番号	基準点名	基準点成果等閲覧サービス				基準点成果 (SemiDynaEXE Ver. 1.0.1 適用後)				差分 (元期-今期)			
		北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (元期)	北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (今期)	北緯 (差) [m]	東経 (差) [m]	楕円体高 (差) [m]	
1	093067 (3067)	横須賀	35 16 1.5391	139 39 53.4194	63.330	2011	35 16 1.53927	139 39 53.42341	63.349	2016	-0.005	0.094	-0.019
2	093067 (3032)	横須賀	35 26 11.3445	139 39 13.5005	70.570	2011	35 26 11.34359	139 39 13.50639	70.602	2016	0.028	0.139	-0.032
3	093036 (3036)	富津	35 18 42.1290	139 49 31.8780	46.740	2011	35 18 42.12814	139 49 31.88287	46.774	2016	0.027	0.115	-0.034
4	970804 (0804)	横浜泉	35 25 9.3683	139 31 18.9317	89.480	2011	35 25 9.36776	139 31 18.93694	89.517	2016	0.017	0.123	-0.037
5	093026 (3026)	神奈川川崎	35 33 48.2515	139 40 24.0815	47.440	2011	35 33 48.24983	139 40 24.08898	47.479	2016	0.052	0.176	-0.039
6													
7													
8													
9													
10													

電子基準点観測番号	基準点名	POSPAC自動計算 (RINEXファイル平均)				基準点成果 (SemiDynaEXE Ver. 1.0.1 適用後)				差分 (POSPAC自動計算-今期)			
		北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (元期)	北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (今期)	北緯 (差) [m]	東経 (差) [m]	楕円体高 (差) [m]	
1	093067 (3067)	横須賀	35 16 1.5342	139 39 53.4170	63.356	2016	35 16 1.53927	139 39 53.42341	63.349	2016	-0.155	0.151	0.007
2	093067 (3032)	横須賀	35 26 11.3415	139 39 13.4939	70.531	2016	35 26 11.34359	139 39 13.50639	70.602	2016	-0.064	0.294	-0.071
3	093036 (3036)	富津	35 18 42.1248	139 49 31.8742	46.760	2016	35 18 42.12814	139 49 31.88287	46.774	2016	-0.104	0.204	-0.014
4	970804 (0804)	横浜泉	35 25 9.3648	139 31 18.9263	89.384	2016	35 25 9.36776	139 31 18.93694	89.517	2016	-0.092	0.250	-0.133
5	093026 (3026)	神奈川川崎	35 33 48.2488	139 40 24.0715	47.435	2016	35 33 48.24983	139 40 24.08898	47.479	2016	-0.037	0.411	-0.044
6													
7													
8													
9													
10													

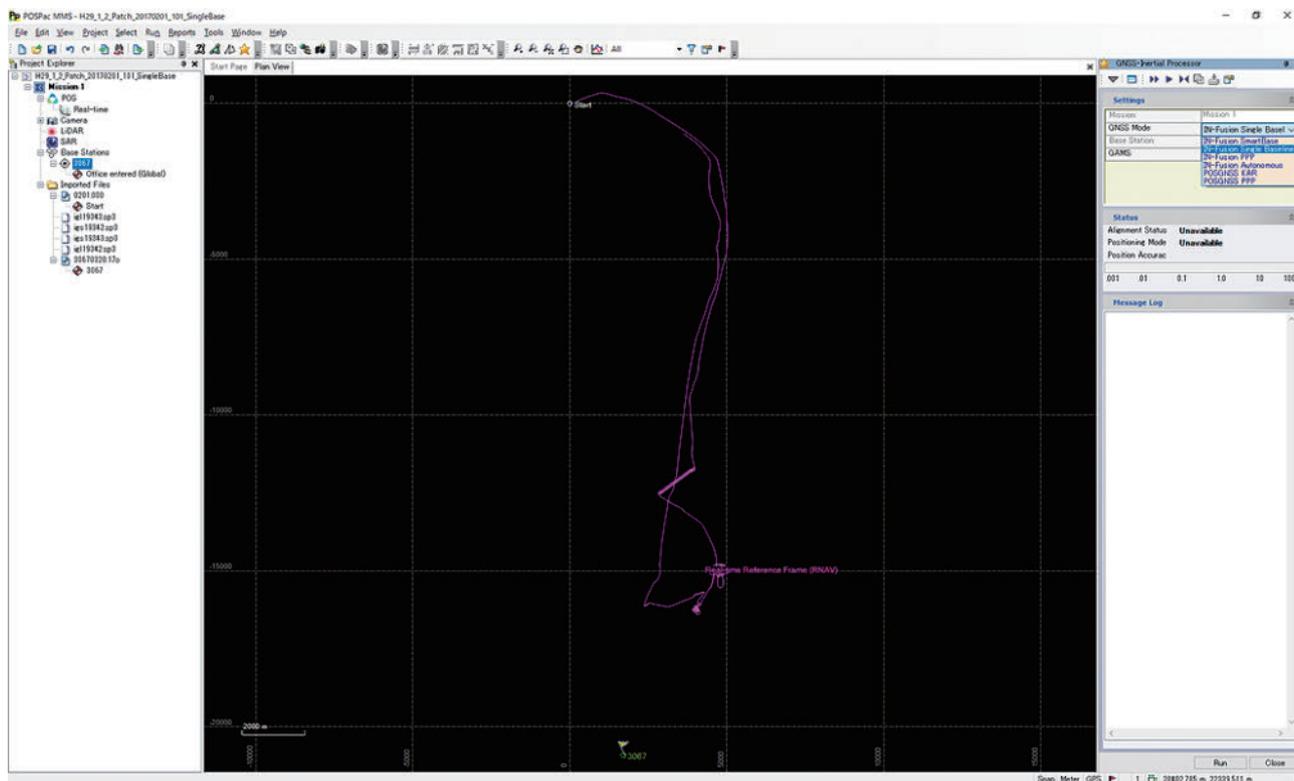


Fig. 1. Screenshot of POSPac SingleBase processing. The flag in the screen indicates the GNSS-based control point "Yokosuka".

図 1. POSPac のシングルベース処理における画面。画面下の旗印は、電子基準点「横須賀」。

要がある。(今回、POS/MV RAW データを基に、指定した HTTP/FTP サイトから POSpac 処理に必要な期間のデータを半自動でダウンロードする Internet Download 機能を使用した。調査終了5日後以降に POSpac 処理を行う場合、POSPac には POS/MV RAW データを基に、必要な電子基準点データ・GNSS 衛星の軌道情報を自動ダウンロードする機能もある。)

- (6) 電子基準点データの自動計算値(入力前値)及び元期・今期の座標値は、Table 1 の通りである。元期と今期の歪みの影響による補正量は、各 XYZ 成分において、最大 30 cm 程度の相対誤差があった。Coordinate Manager を用いて、インポートした電子基準点の座標値を、測地成果の元期の座標値を今期にセミダイナミック補正した座標値に変更した。POSPac にインポートした電子基準点の座標値は、ダウンロードした電子基準点データから自動計算された値で精度担保されていないため、より正確な基線解析を行うために、測地成果を基にした座標値に変更する必要があるためである。
- (7) GNSS 衛星の軌道情報をダウンロードし、インポートする。シングルベース処理の場合、精密暦のみで良いが、スマートベース処理の場合、精密暦に加え、基準点間の相互チェックを行うための放送暦も必要となる。(電子基準点データと同様に Internet Download 機能を使用した。調査終了5日後以降に POSpac 処理を行う場合、POS/MV RAW データを基に、必要な電子基準点データ・GNSS 衛星の軌道情報を自動ダウンロードする機能もある。)
- (8) 各々の処理方法で、基準局ネットワークを構築する。
  - (A) シングルベース処理の場合  
Set Base Station を用いて、インポートした電子基準点を基準局として設定する (Fig. 1)。
  - (B) スマートベース処理の場合

Station	Status	Horizontal	Vertical	Total	Time Span	Output
8804	OK	0.005 m	0.003 m	0.006 m	23.79 h	Original
8025	OK	0.018 m	0.016 m	0.024 m	23.79 h	Original
8067	Control	0.000 m	0.000 m	0.000 m	23.79 h	Control
8038	OK	0.013 m	0.003 m	0.013 m	23.79 h	Original
8032	OK	0.013 m	0.015 m	0.020 m	23.79 h	Original

Fig. 2. Screenshot of SmartBase Quality Check results for POSpac SmartBase processing. The relative positioning errors of all the GNSS-based control stations to the GNSS-based control point “Yokosuka” are kept in less than 5 cm range.

図 2. スマートベース処理における SmartBase Quality Check の結果。電子基準点「横須賀」を基準としたときの各電子基準点の座標値の相対誤差が、許容誤差 5 cm の範囲内に収まっている。

SmartBase Quality Check を用いて、インポートした電子基準点データを用いて各点の相互位置関係をチェックすることで、各電子基準点データの品質を確認する。通常、相互位置関係の許容範囲は 5 cm 以内である。Fig. 2 に SmartBase Quality Check の結果を示す。相互位置関係が許容範囲内であることが分かる。プロセスの中で、使用する電子基準点の品質をチェックできるのが、スマートベース処理の利点である。

続いて、SmartBase Processor を用いて、基準局ネットワークを構築する (Fig. 3)。

- (9) GNSS-Inertial Processor を用いて、All Processing を実行する。シングルベース処理の場合は、IN-Fusion Single Baseline を選択し、スマートベース処理の場合は、IN-Fusion SmartBase を選択する。処理終了後、POSPac 処理した測位データが表示されていることを確認する。この All Processing 処理により、基線解析された GNSS 測位と慣性航法測位が統合され、Forward 処理(時間の通常方向の処理)と Backward 処理(時間の逆方向の処理)を統合してスムージングす

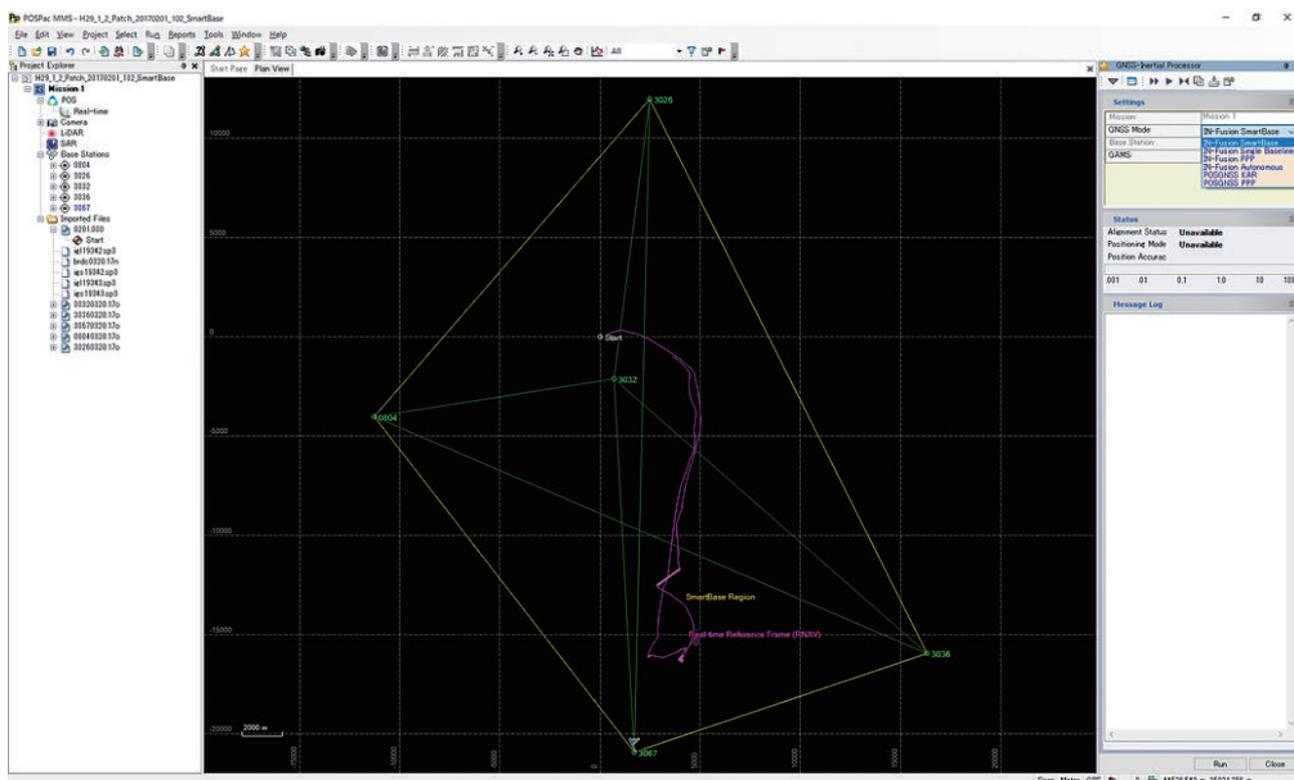


Fig. 3. Screenshot from POSpac SmartBase processing. The five flags in the screen indicate GNSS-based control stations of “Yokosuka,” “Yokohama,” “Futtsu,” “Yokohama-Izumi,” and “Kanagawa-Kawasaki,” respectively.

図 3. POSpac のスマートベース処理における画面。画面中の 5 つの旗印は、電子基準点「横須賀」「横浜」「富津」「横浜泉」「神奈川川崎」。

Table 2. XYZ distances from the reference point of the lever arm offset to the primary antenna, converged by each POSpac processing, and their initial values.

表 2. 各 POSpac 処理において収束したレバーアームオフセット原点からプライマリ GNSS アンテナまでの XYZ 距離とその初期値。

Ref to PriGNSS レバーアームオフセット	初期値 (I)	SingleBase解析 横浜 3032		SingleBase解析 横須賀 3067		SmartBase解析	
		POSPac計算値 (F)	差分 (I-F)	POSPac計算値 (F)	差分 (I-F)	POSPac計算値 (F)	差分 (I-F)
X (Forward)	-2.148	-2.146	0.002	-2.146	0.002	-2.145	0.003
Y (Starboard)	0.669	0.771	0.102	0.772	0.103	0.772	0.103
Z (Downward)	-4.237	-4.269	-0.032	-4.270	-0.033	-4.270	-0.033

ることにより、非常に高精度の測位・動揺データ (Smoothed Best Estimated Trajectory : SBET) が得られる。

- (10) Display Plot で、Calibrated Installation Parameters の XYZ Reference-Primary GNSS Lever Arm (レバーアームオフセット原点からプライマリ GNSS アンテナまでの距離) が収束していることを確認し、その収束した XYZ 距離を記録する。

シングルベース処理及びスマートベース処理において、この収束した XYZ 距離 (レ

バーアームオフセット原点からプライマリ GNSS アンテナまでの距離) を、初期値と併せて Table 2 に示す。特に Y 成分で、初期値と比べて 10 cm 程度と差分が大きい結果となった。

これらの XYZ 距離は、本来は固定値で、レバーアームオフセット値とリファレンス座標軸に対する IMU ミスアライメント角度によって決まる。特に、大きな船舶では、これらの精度の良い計測が困難な場合がある。このため、POSPac 処理では、GNSS

測位と慣性航法測位が一致するように、このXYZ距離をキャリブレーションしながら、最適な航跡を推定している。キャリブレーションされたこのXYZ距離は、理想的には、時間とともに信頼できる値に収束することが期待される。このため、後のプロセスで、この収束した値を固定値として、POSPac処理を再実行する。

- (11) GNSS-Inertial Processorのプロパティを開き、Reference-Primary GNSS Lever Armを収束したXYZ距離を元の値から変更し、Standard Deviation < 3 cmに設定する。これにより、(10)で確認した収束したXYZ距離を入力し、POSPac処理時にキャリブレーションを行わず、固定値として処理を再実行するための設定である。
- (12) GNSS-Inertial Processorを用いて、All Processingを再実行する。
- (13) POSPac処理された測位・動揺データをエクスポートする。通常の実出力ファイルはSEBTファイル(\*.outフォーマット)であり、様々なマルチビーム測深データの処理ソフトウェアに対応している。また、通常のテキストエディターで開くことのできるASCIIフォーマットも出力できる。

### 3 結果

POSPac処理したデータの航跡図をFig. 4に示す。POSPac処理前のRAW航跡と比較して、POSPac処理を行った航跡は、ほぼ一致している測線もあれば、水平位置で1 m程度異なっている測線もあることが分かる。

次に、POSPac処理後の楕円体高をFig. 5に示す。一般的に、短期の時間変動成分はヒープ、長期の時間変動成分は潮汐、その他、動的喫水や平均水面の変化(ジオイドの空間変化)が考えられるが、横須賀験潮所の潮汐データを併せて確認すると、長期的な時間変動の主成分は潮汐変化であることが分かる。

測位・動揺データの不確定性(Uncertainty)

の時系列をFig. 6及びFig. 7に示す。水平精度は、RAWデータで $\sim 0.5$  m ( $1\sigma$ ) に対し、POSPac処理データでは $\sim 0.01$  m ( $1\sigma$ ) まで大きく精度が向上する。鉛直精度は、RAWデータで $\sim 1$  m ( $1\sigma$ ) に対し、POSPac処理データでは $\sim 0.02$  m ( $1\sigma$ ) まで大きく精度が向上する。動揺データの精度も、基本的に、若干ではあるものの精度が向上している。Heading精度について、RAWデータの方が良く見えるが、POSPac処理で得られたリアルタイム精度とは単純に比較はできない。なぜならRAWデータのHeading精度は、リアルタイム精度ではなく、GAMS (GNSS Azimuth Measurement Subsystem) と呼ばれる方位角キャリブレーションで得られた精度であり、過小評価されている可能性が高いためである。Fig. 7を見ると、POSPac処理による測位・動揺データのUncertaintyの違いは、ほとんど見られない。

水平・鉛直位置の相対誤差の時系列を、Fig. 8及びFig. 9に示す。相対誤差を計算する際に基準とする測位データは、尤もらしいと考えられるスマートベース処理したデータとした。水平誤差は、RAWデータで $\pm 0.5$  m程度に対し、POSPac処理データでは $\pm 0.01$ – $0.03$  m程度まで大きく精度が向上する。鉛直誤差は、RAWデータで $\pm 1$  m程度に対し、POSPac処理データでは $\pm 0.02$ – $0.05$  m程度まで大きく精度が向上する。Fig. 9を見ると、シングルベース処理における水平・鉛直位置の相対誤差が、テスト海域に最寄りの電子基準点「横須賀」を使用した方が、「横浜」を使用したときに比べて、誤差が小さくなっている。

POSPac処理をした測位・動揺データによるマルチビーム測深データの精度向上を確認するため、横須賀港第一号灯標を井桁測線で観測し(Fig. 10)、各測線データの再現性を検証した。Fig. 11を見ると、RAWデータでは、一辺 $\sim 3$  mの四角い沈錘や直径 $\sim 1$  mの柱の形状が乱れてしまっているが、POSPacでスマートベース処理した高精度の測位・動揺データを適用すると、灯標の形状が正しく再現されていることが分かる。

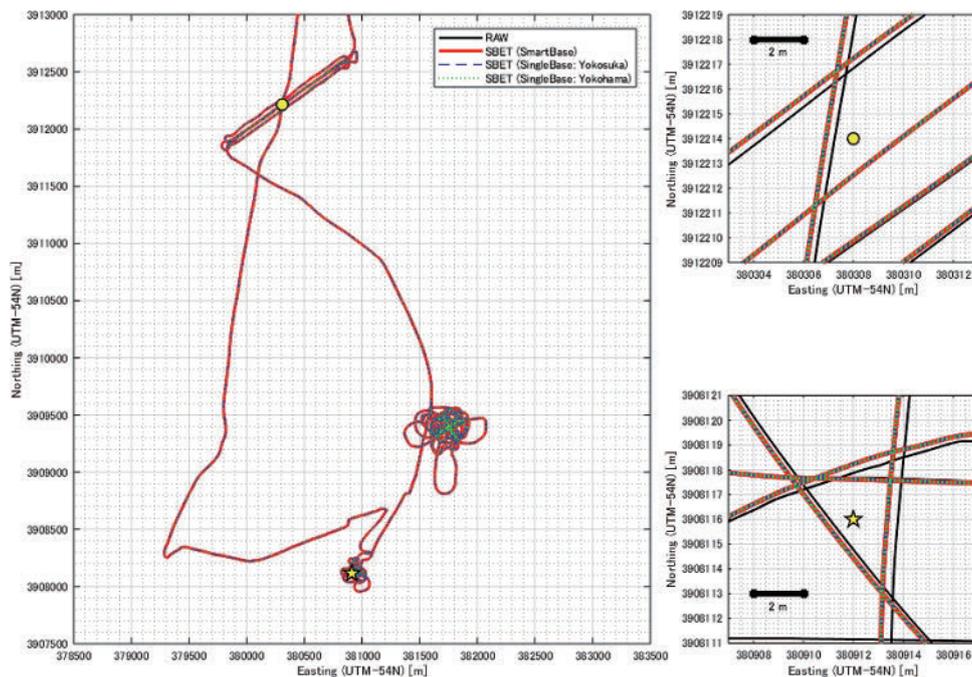


Fig. 4. Trajectories (WGS84 UTM zone 54N) based on RAW data (black) and POSPac processing data. Blue-color indicates the SingleBase-processed data for “Yokosuka” base station, green the SingleBase-processed data for “Yokohama” base station, red the SmartBase-processed data.

図 4. RAW データと POSPac 処理データの航跡図 (WGS84 UTM zone 54N)。黒色は RAW データ、青色は POSPac の「横須賀」シングルベース処理データ、緑色は「横浜」シングルベース処理データ、赤色はスマートベース処理データ (赤色) を表す。

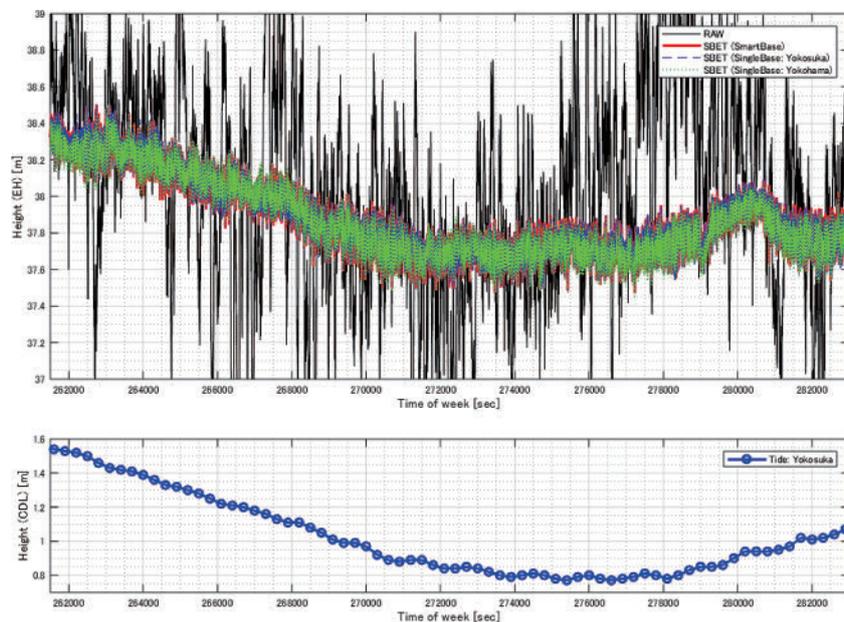


Fig. 5. Upper panel: the time series plot for ellipsoidal heights of RAW data and POSPac-processed data. Black color indicates RAW data, blue and green the SingleBase-processed data for “Yokosuka” and “Yokohama” respectively, and red the SmartBase-processed data, all in POSPac. Lower panel: time series plot for the tidal data from Yokosuka tide station.

図 5. 上段は、RAW データと POSPac 処理データの楕円体高の時系列プロット。黒色は RAW データ、青色は POSPac の「横須賀」シングルベース処理データ、緑色は「横浜」シングルベース処理データ、赤色はスマートベース処理データ (赤色) を表す。下段は、横須賀潮験所の潮汐データの時系列プロット。

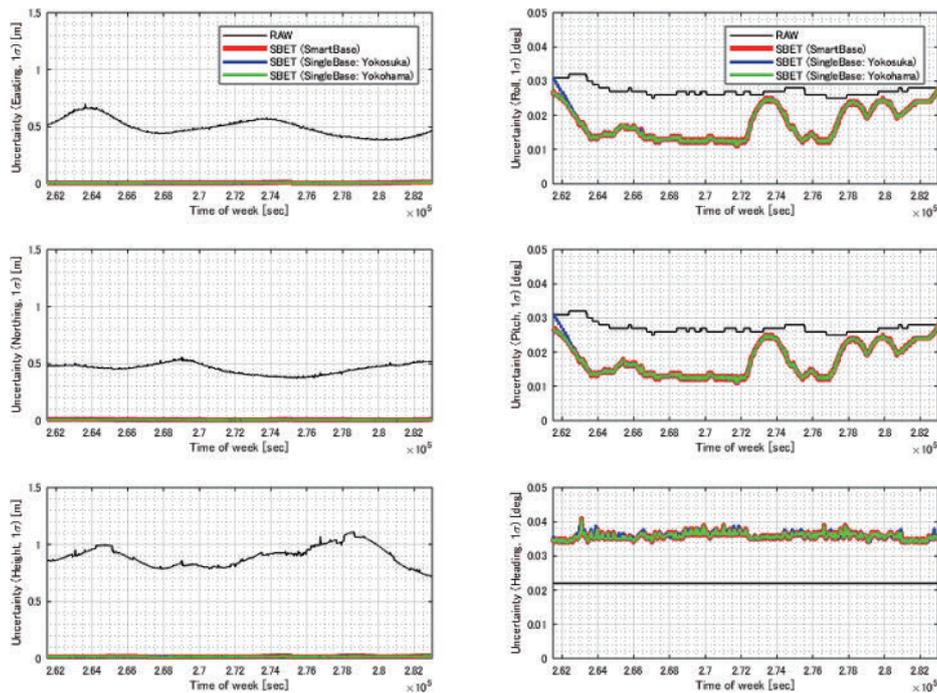


Fig. 6. Time series plot for the navigation/attitude uncertainties in both RAW and POSPac-processed data. Black color indicates RAW data, blue and green the SingleBase-processed data for “Yokosuka” and “Yokohama” respectively, and red the SmartBase-processed data, all in POSPac. The plot includes Easting, Northing, Ellipsoidal Height, Roll, Pitch, and Heading.

図 6. RAW データと POSPac 処理データの測位・動揺データ不確定性の時系列プロット (X 座標, Y 座標, 楕円体高, ロール, ピッチ, ヘディング). 黒色は RAW データ, 青色は POSPac の「横須賀」シングルベース処理データ, 緑色は「横浜」シングルベース処理データ, 赤色はスマートベース処理データ (赤色) を表す.

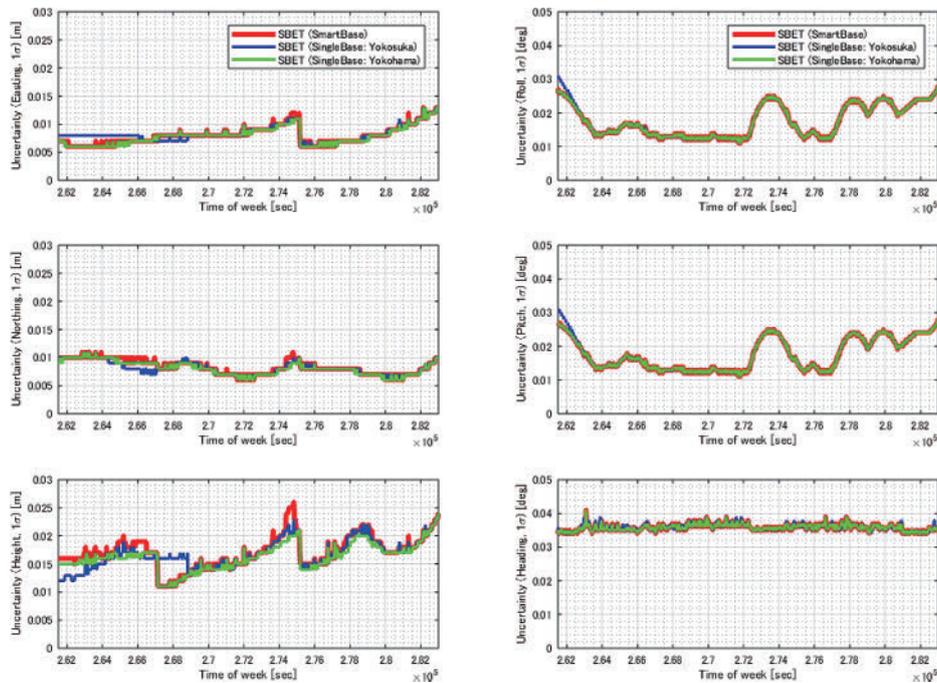


Fig. 7. Enlarged views of Fig. 6, with focus on differences among the POSPac processing results by SingleBase and SmartBase (color designation follows that of Fig. 6.)

図 7. POSPac 処理データに着目した Fig. 6 の拡大図. 線の色は Fig. 6 と同様.

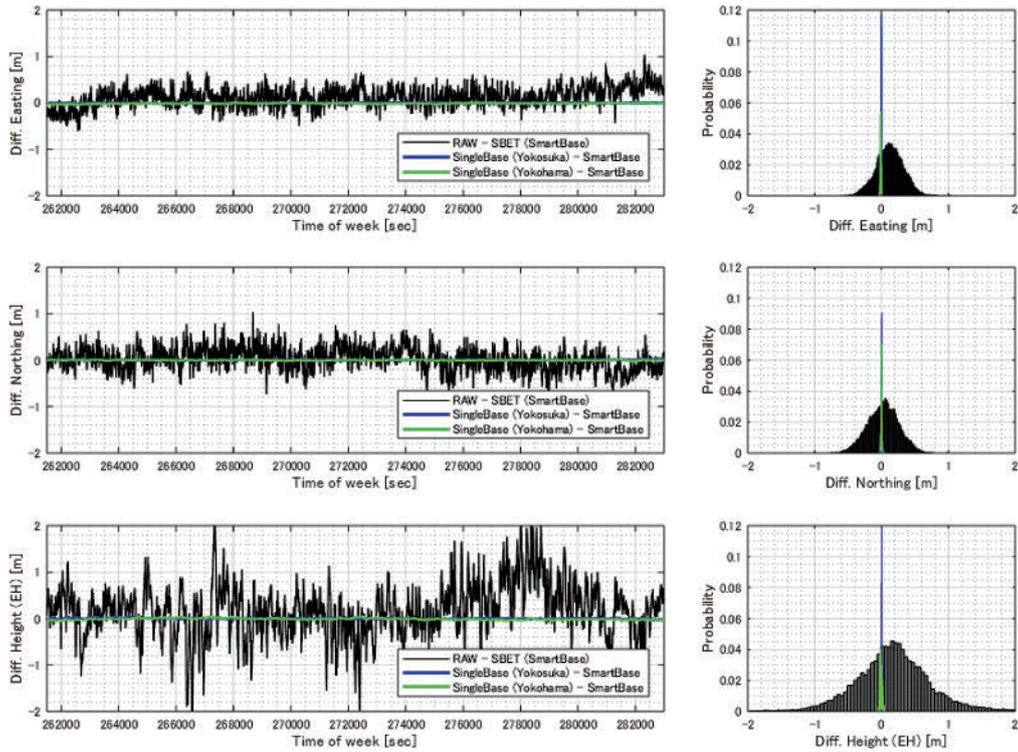


Fig. 8. Time series plots of the relative positioning errors in RAW (black) and POSPac SingleBase processing data (blue and green for “Yokosuka” and “Yokohama” base stations, respectively), based on the navigation data processed by POSPac SmartBase as the standard.

図 8. スマートベース処理を基準とした場合のRAW データ (黒色) と POSPac シングルベース処理データ (青色: 「横須賀」, 緑色: 「横浜」 基準局) の各座標値の相対誤差の時系列プロット。

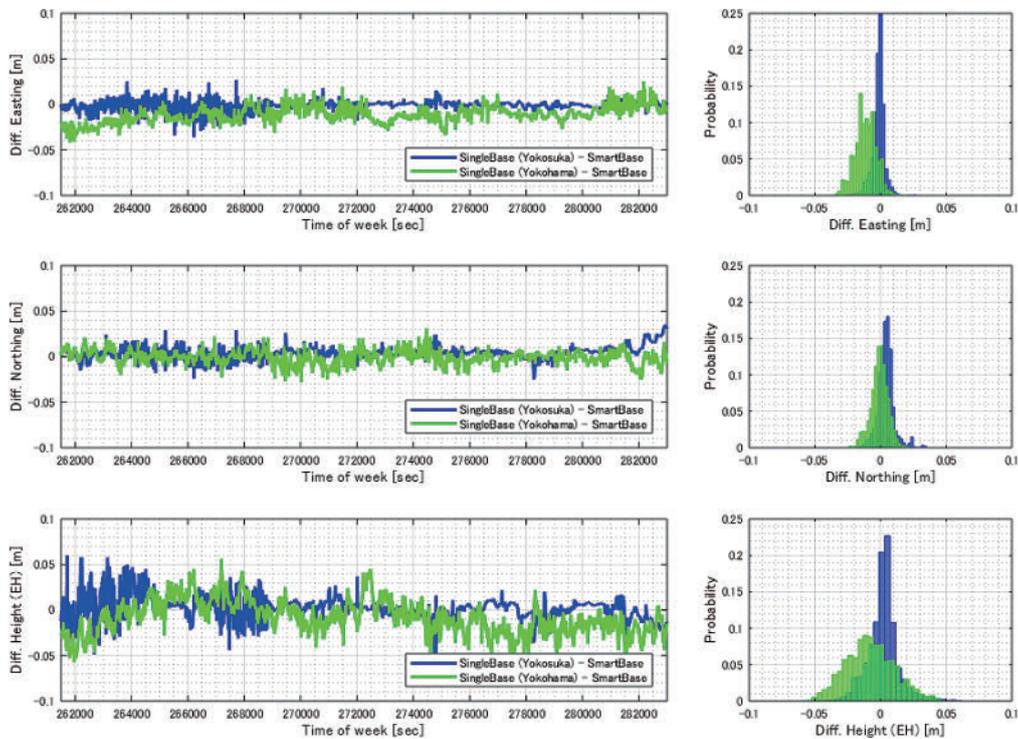


Fig. 9. Enlarged views of Fig. 8, with focus on differences between the two POSPac SingleBase processing results. Color designation of the line follows that of Fig. 7.

図 9. POSPac シングルベース処理データに着目した Fig. 8 の拡大図。線の色は Fig 7 と同様。

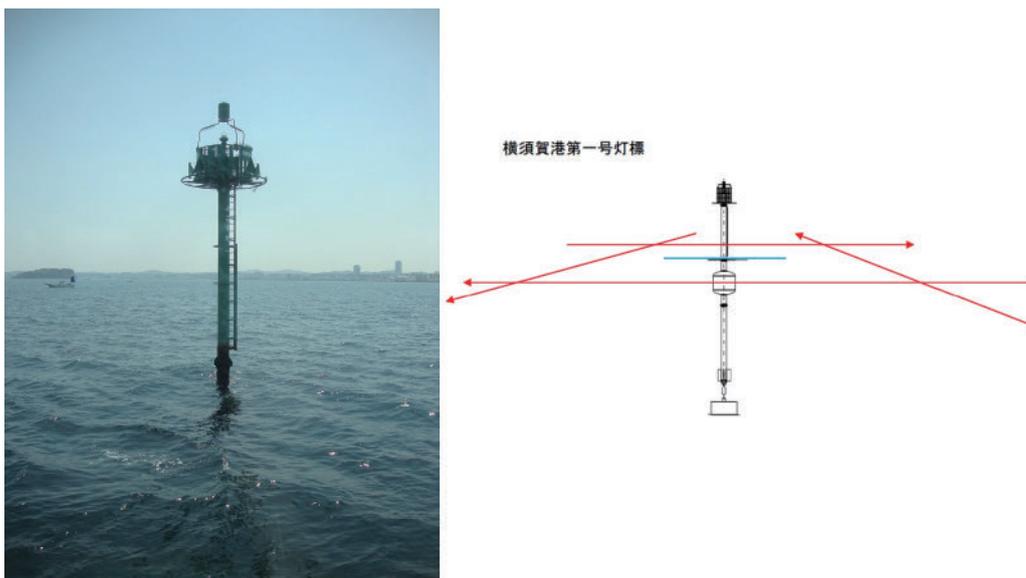


Fig. 10. Conceptual drawing of the light beacon 1 in Yokosuka Port and the double-cross survey lines.  
 図 10. 横須賀港第一号灯標と井桁測線の概念図.

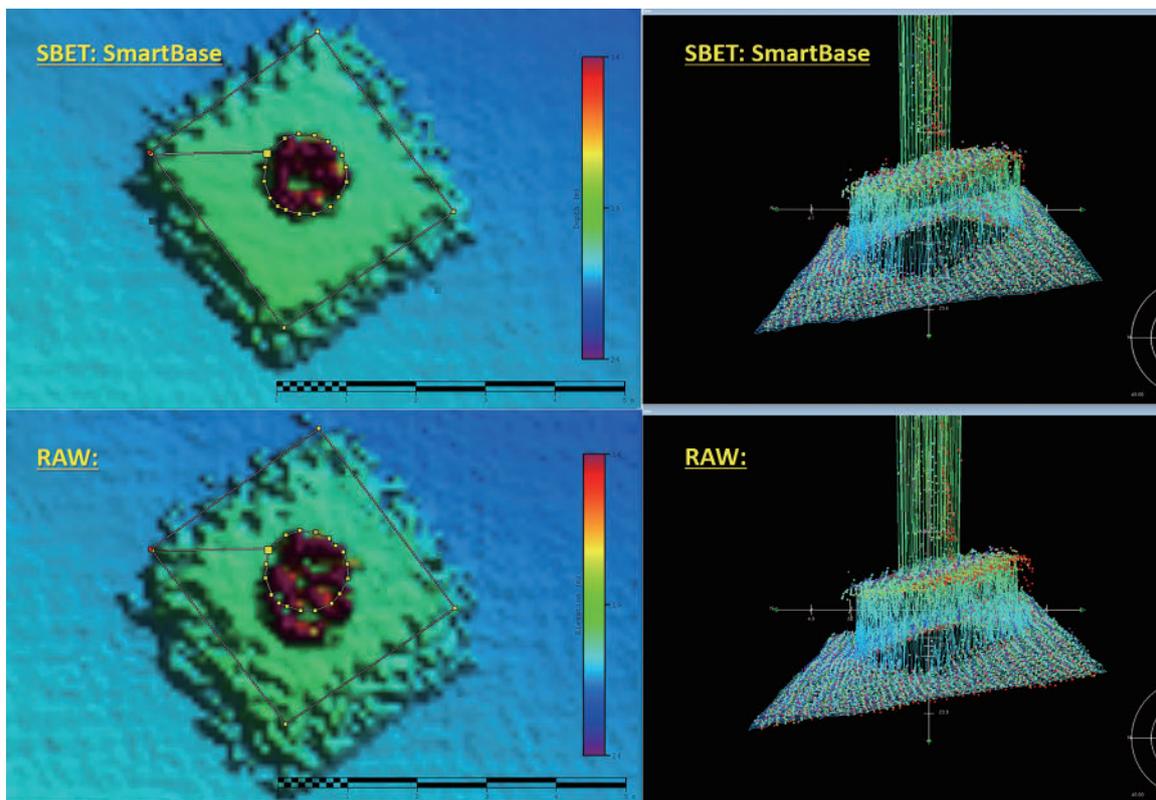


Fig. 11. 2D (left) and 3D (right) plots of multibeam bathymetry at the double cross survey lines shown in Fig. 10. Upper panels are 2D and 3D plots of the multibeam bathymetry, with the POSPac-processed data (SmartBase) applied. Lower panels are 2D and 3D plots of the multibeam bathymetry without POSPac-processed data. Colors in 2D surface indicate depths, and the colors of the dots in 3D plot describe the survey lines. (ChromaDepth glasses allow readers stereoscopic imaging.)

図 11. 井桁測線における灯標のマルチビーム測深データの二次プロット (左) 及び三次元プロット (右). 上段は POSPac 処理した測位・動揺データを適用したマルチビーム測深データで, 下段は測位・動揺データが RAW データのままのマルチビーム測深データ. 二次元プロットのサーフェスの色は水深を表し, 三次元プロットの点の色は各測線を表す. (クロマデプス 3D メガネを用いて立体視可.)

#### 4 考察・結論

マルチビーム測深で使用する GNSS 慣性航法装置の測位・動揺データに対して、POSPac 処理をはじめとする後処理キネマティック処理を適用すると、水深の水平・鉛直位置の精度がメートル級からセンチメートル級へと大きく向上することが、実際のデータから示された。精度管理の観点からスマートベース処理を行う方が理想的かと思われるが、例えば基準局の選択が困難な場合に、シングルベース処理を行う場合には、調査海域の最寄りの電子基準点を用いることが精度向上につながることも確認された。後処理キネマティック処理を行った高精度測位・動揺データをマルチビーム測深データに適用することで、灯標の詳細な形状が正しく再現されることが示された。このことは、測深データが高品質化されることを示しており、迅速で確実な QC が可能となると共に、水路測量にとって重要な海底特徴物の検出能力の向上につながることを期待される。

鉛直位置 (WGS84 楕円体基準) の精度は、本海域では ~5 cm 以下まで向上することが示されたが、これは、鉛直精度が「水面ベースの水路測量」における主な精度劣化の要因である、験潮所から離れた海域の潮汐補正、静的・動的喫水測定、ヒープ測定の不確実性 (Uncertainty) と同等もしくはそれ以下に抑えられるということの意味しており、「楕円体高ベースの水路測量」の実現可能性も視野に入ってくる。「楕円体高ベースの水路測量」では、測量海域における基準水面 (WGS 楕円体高基準) を事前に決定すれば、水路測量中のリアルタイム潮汐データを原則的には必要としないという利点もあり、将来の水路測量における迅速化や水深精度の向上につながる可能性が期待されている。将来的に「楕円体高ベースの水路測量」を選択肢の一つとするためには、欧米のように基準水面の楕円体高モデル (松本・他, 2019) の整備が必要不可欠である。

マルチビーム測深において、更に高精度の測位・動揺データが必要となった場合、30 秒値ではなく 1 秒値の電子基準点データ (RINEX フォー

マット) を使用することが検討できる。現代のマルチビーム測深の測深精度を考えると、少なくとも基線長が長くない場合においては、本報告で使用した 30 秒値で十分であると考えられる。ただし、電子基準点が測量海域から遠い場合や将来のマルチビーム測深の技術発展により、1 秒値が必要不可欠な場合もあると考えられる。

本報告で用いた精密暦は決定暦を用いた POSPac 処理を行ったが、マルチビーム測量成果作成までのデータ処理を迅速にするという観点からは、アップデート頻度が高い速報暦等を用いるのが有効であるとも考えられる。決定暦を用いた処理と比べて精度が若干劣る可能性もあるが、現代のマルチビーム測深では問題とはならない精度であると考えられる。

本報告では取り扱わなかったが、Precise Point Positioning (以下、PPP) という GNSS 解析手法で、基準局なしでデシセンチメートル級の測位精度を得る技術も、近年普及しつつある。特に、沿岸から遠く離れた海域での調査では、電子基準点を基準局として使用することが非常に困難な場合もあるが、PPP を用いると水路測量における測位精度を担保することが期待される。今回扱った POSPac は PPP 処理も可能であり、今後、水路測量における精度検証が必要とされる。

#### 謝 辞

第三管区海上保安本部海洋情報部、測量船「はましお」の職員・乗組員の皆様には、検証データの提供等、様々な点でご支援・ご協力いただきました。第六管区海上保安本部海洋情報部 白根宏道 官には、POSPac 処理について、的確なご助言をいただきました。海洋情報部海洋調査課 親川一馬 官には、POSPac 処理手順に関する資料を提供していただきました。また、本原稿を書く上で、査読者である海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室 河合晃司 官及び編集者の方には有益で適切なご助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Applanix (2011) POS/MV V5 測位・動揺検出装置 取扱説明書 (株式会社東陽テクニカ翻訳).
- Hutton, A. Ip. J., Bourke, T., Scherzinger, B., Gopaul, N., Canter P., Oveland, I., and Blankenberg, N. (2008) Tight integration of GNSS post-processed virtual reference station with inertial data for increased accuracy and productivity of airborne mapping, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37.B5: 829-834.
- 株式会社東陽テクニカ (2012) APPLANIX 社製 GNSS 後処理ソフトウェア POSPac MMS 簡易取扱説明書 v1.3.
- 海上保安庁 (2009) 水路測量における測定又は調査の方法に関する告示 (平成 14 年 4 月 1 日 海上保安庁告示第 102 号, 平成 21 年 3 月 31 日 海上保安庁告示第 110 号により一部改正), 海上保安庁, 東京.
- 海上保安庁 (2017) ディファレンシャル GPS の廃止について, <http://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/dgps/haishi.pdf>, 2018 年 9 月 21 閲覧.
- 国土地理院 SemiDynaEXE Ver.1.0.1, <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html>.
- 松本良浩・土屋主税・山野寛之・住吉昌直 (2019) 諸外国の事情にみる鉛直基準面モデル構築の取り組み, 海洋情報部研究報告 57, 87-100.
- 笹原 昇・浅倉宜矢・西下厚志・長野勝行・橋本崇史・泉 紀明 (2009) IT による長基線 KGPS 測位を基準とした MSAS・PPP・DGPS の精度評価について, 海洋情報部技報, 27, 66-77.
- 吉澤 信・松本良浩・住吉昌直・南 宏樹 (2018) マルチビーム測深機デュアルヘッドシステムの導入について, 海洋情報部研究報告 56, 9-23.

要 旨

高分解能マルチビーム測深が普及してきた現代において, 高精度後処理測位・動揺データの必要性は増してきている. POSPac 処理による高精度後処理測位・動揺データの精度検証を, 実際のマルチビーム測深データに基づいて実施した. 本報告では, マルチビーム測深における高精度後処理測位・動揺データの有用性について報告する.