

干潟の地形測量における実測横断測量と GPS測量による観測結果の比較検討

THE STUDY ON COMPARISON BETWEEN CROSS-SECTIONAL SURVEYING
AND GPS SURVEYING AT TOPOGRAPHY SURVEY IN TIDAL FLAT

西本英明¹・平川麻里子²・増田龍哉³・五十嵐学⁴・滝川清⁵・森本剣太郎⁶

Hideaki NISHIMOTO, Mariko HIRAKAWA, Tatsuya MASUDA,
Manabu IGARASHI, Kiyoshi TAKIKAWA and Kentaro MORIMOTO

¹株式会社水野建設コンサルタント (〒862-0933 熊本市小峯2-6-26)

²正会員 株式会社水野建設コンサルタント (〒862-0933 熊本市小峯2-6-26)

³正会員 博(工) 熊本大学特任助教 大学院先導機構 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

⁴正会員 工修 熊本大学研究員 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

⁵フェロー 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

⁶正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In recent years, the environmental function of tidal flats have been reviewed, and regeneration projects of tidal flats are being done positively all over Japan. Topography surveys are requisites in the planning, monitoring and maintenance of the projects. It is difficult to conduct monitoring and topography surveys of tidal flats in Ariake Bay because of the influence of the rhythm of the tides. Now, various survey techniques are being developed along with the rapid progress of surveying technology. One of the techniques employed is the combined use of sonar and RTK-GPS. In this study, we examine the accuracy and problems of this survey technique by comparing of cross-sectional surveying.

Key Words : Cross-sectional surveying, RTK-GPS, Sonar, Ariake Bay

1. はじめに

近年, 干潟の環境機能が見直され, 全国各地で干潟再生事業が積極的に行なわれつつある. 事業の計画段階や事後のモニタリング, さらに維持管理において, 地形測量(海浜測量・深浅測量)の実施は必要不可欠なものである. しかしながら, 干潟における地形測量は, 干満の影響を大きく受けてしまうため作業時間に限りがあり, 歩行すらままならない泥質干潟の場合は実測することは困難を要する.

本研究で調査研究を実施した有明海は, 九州西部に位置しており, 福岡県, 佐賀県, 長崎県及び熊本県に囲まれた, 海域面積約1,700 km²の日本を代表する大型閉鎖性内湾である. 東京湾や伊勢湾等の閉鎖性海域と比べて閉鎖性が高く, 大潮時の潮位差は湾口の早崎瀬戸で3~4m, 湾奥(住ノ江港)では5m以上の大きな潮位差の下, 我が国の干潟総面積の約40%(約190km²)に及ぶ日本で最も広大な干潟を有している. そのため, 一般的に満潮時に船を用い

た音響測深が行なわれているが, その精度を干潮時に計測した実測データと比較した事例は少なく, 干潟地形の実体さえ十分には把握されていない.

そこで本研究では, 現地の干潟において実測横断測量(以下「直接法」と, 満潮時に船上で実施するRTK-GPS測量と音響測深機の併用観測(以下「間接法」)の観測結果を比較し, 間接法の精度と課題について検討を行った.

2. 調査箇所及び観測方法

(1) 調査箇所

調査対象地位置図を図-1に示す. 熊本港は, 有明海の湾中央部東側に位置し, 船舶が利用する岸壁を除いて, 周囲を石積み護岸によって囲まれた人工島である. この熊本港の東護岸前面において, 有明海の干潟海域環境を回復・保全するために, 生物や塩生植物等の生息場であるなぎさ線を人工的に造成し, 干潟生態系が有している自己再生機能(浄化機

能)を回復(復元)させる「なぎさ線の回復」という対策工法の現地実証試験が行なわれている。

熊本港東護岸は延長約400m、護岸天端の標高は約T.P.+3.0m、前面干潟の標高は約T.P.±0.0m、中央粒径が約0.06mmの泥質干潟で、対岸の干拓地まで平坦な干潟が広がっている。潮流は上げ潮時は北向き、下げ潮時には南向きへ流れており、波浪の影響を受けにくく、船舶の航行も殆ど無いため、深浅測量における船舶の揺れなどの影響を受けにくい箇所である。

ここに、2005年10月に幅100m×奥行100mの範囲で人工前浜干潟「東なぎさ線」が造成された。潜堤をカタナリー曲線形に設定し、ちどり状に配置されており、中央粒径が約0.79mmの有明海産の海砂で覆砂が施されている。H.W.L.から現地盤のT.P.±0.0mまでなだらかな地形となっており、中央部勾配は約1/30で、護岸の前面には潮上帯付近の覆砂の流出を防ぐための突堤が2本、中央部には生物の生息環境に多様性を持たせるための島堤が3箇所配置されている¹⁾。

調査地点詳細図を図-2に示す。調査はこの人工前浜干潟を中心として北向きに70m、南向きに130m、東に110mの200m×110mの範囲において、2008年5月に行った。

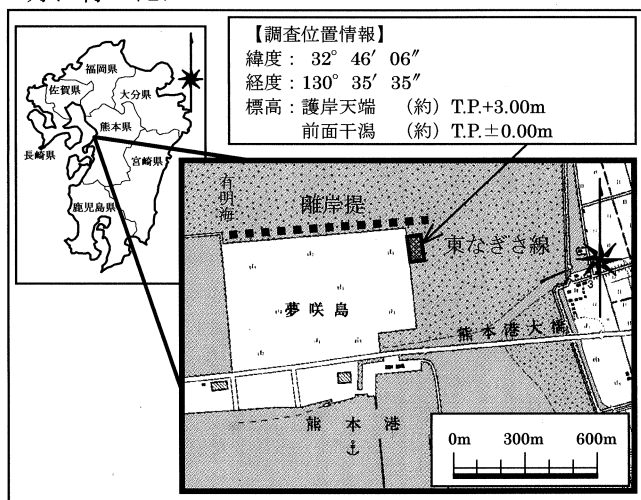


図-1 調査対象地位置図

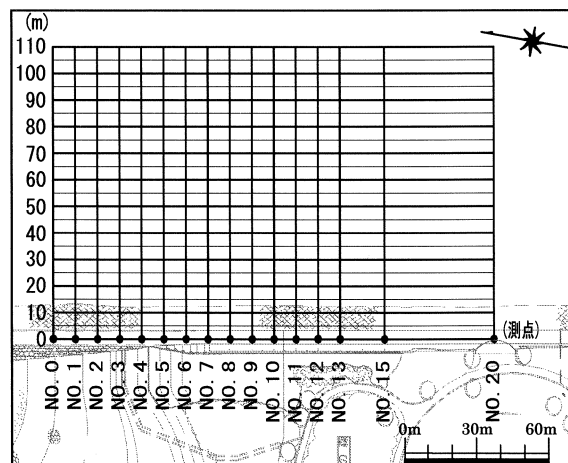


図-2 調査地点詳細図

(2) 「直接法」観測方法

大潮干潮時に2級トータルステーションを用い、堤防上に決定した路線(測点間隔:10m)より、直角方向に沖合110mの横断測量を実施した(図-2)。目視による主要変化点の計測及び勾配変化が無い箇所は横断方向5mを標準として計測した。

(3) 「間接法」観測方法

間接法の観測方法の模式図を図-3に示す。通常、間接法は静水域に用いられ、調査地域における水位変動を定期的に観測することで水位情報を取得している²⁾。

今回の調査対象地域である干潟域は干満等の影響で水位変動が不安定であるため、水位の観測を位置情報の取得と同時にRTK-GPS測量で行った。

以下に調査方法の選定根拠と観測時の注意点を詳細に述べる。

a) 音響測深機(ソナー)

音響測深機とは、水中に発した音波の反射により対象物までの距離を測る装置である。

国土交通省公共測量作業規程において、音響測深機を用いる場合、観測を行う前(観測日毎)にはバーチェック(音速補正)を必ず行うことが定められている²⁾。装置の水中音速は水温等により異なるため、測定時の音速度(1500m/sec)の補正量を算出して加えた。なお、補正量は、各ソナーメーカーにより表示方法が異なる。

通常測量調査で使用されている音響測深機は、シングルビーム測深(周波数200kHz帯)、ナローマルチビーム測深(周波数300kHz帯)等である。本調査箇所においては干満比高が大きいことや、護岸前面に位置しており陸域に近いこと、また満潮時でも水深3m程度の低浅水域である事などから、測深域が最も浅いシングルビーム測深を採用することとした。

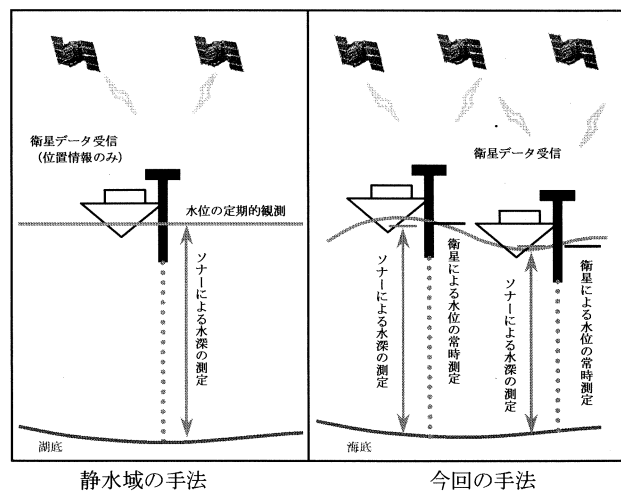


図-3 「間接法」観測方法の模式図

使用したシングルビームの精度は $\pm (0.03 + \text{水深}/1000)$ m, 指向角 6° , 分解能 ± 5 cmである。

有明海のように底質性状が泥質で浮泥が存在する水域において深浅測量を実施する際は、音響測深機の反射強度に違いが生じ、測量結果に影響を及ぼす恐れがある。よって、実際に潜水土による底質の確認と実測を行い、ソナー計測値との補正量を算出する必要がある。

本水域における調査では、調査域が護岸前面に位置しており陸域に近いため水深が浅く、干潮時に目視にて底質状況の確認が可能であること、人工前浜干潟の底質性状が砂質でありスタッフでの水位確認ができること、直接法により泥～砂泥質干潟面の調査を一貫して行うこと等から水質、水圧の補正のみで調査を行った。

またソナーを使用する場合、船の傾きを計測する動揺計や常に水平を保つ機器を搭載するが、今回は低浅水域での小型船使用のためそれらが使用できない。よって、出来るだけ水平を保つような航行姿勢をとることを心がけて調査を行った。

b) RTK-GPS 測量

RTK-GPS測量は、複数のGPS衛星から同時に送られる衛星データを既知局と移動局で受信し、位相差により位置情報 (X, Y, Z座標値) を取得する。

今回の調査エリアは熊本平野から突き出した熊本港の敷地内であるため、上空に支障となるものが全く無くGPS測量に最適である。

図-4は、今回の作業地点上空の衛星飛来図である。上段が衛星数、下段がPDOP (Position Dilution of Precision) 値であり時間ごとの衛星の配置を数値で表している。国土交通省公共測量作業規程では、使用衛星数5衛星以上、仰角 15° 以上と定められており²⁾、さらに使用GPSメーカーが推奨する、PDOP値4.0以下という条件を満たし、FIX解になれば1エポックで得られる精度は水平 $\pm (10\text{mm} + 2\text{ppm} \times D)$ 、鉛直 $\pm (20\text{mm} + 2\text{ppm} \times D)$ 、D=基線長である。PDOP値は、各GPSメーカーにより数値は異なり、PDOP値は数値が低い程、上空では均等に衛星が配置していることになる。

また、水位を観測する場合は、ダムや河川横断といった船舶の航行に支障が無く水位の変動も一定で

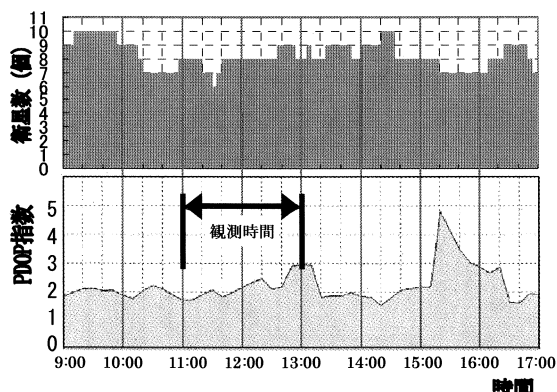


図-4 衛星飛来図

ある静水域において、調査エリアの水位を定期的に観測することでソナー測定値を標高値に換算する。

しかし本水域のような干潟では、特有の干満比高や、不規則な水位増減、波浪の影響、定期的な水位の観測率が換算値に不具合を起こす恐れがある。

表-1に熊本港における観測日の1時間毎の潮汐表を記す。

RTK-GPS 測量を使用する深浅測量の国土交通省公共測量作業規程では、最小情報取得間隔は1秒 (1エポック) とされている。位置情報と同時に標高情報も取得し、水位の定期観測よりも細密な情報を得ることで上記問題点を解決することとした。

よって、今回の測定方法は、水位観測は位置情報と同時に RTK-GPS 測量で行い、いかに実測値に近い結果となるか比較検証を行う。

c) 観測状況

前述したような現地上空の衛星状況、作業時刻、潮の変動、汀線状況を考慮して調査日の選定を行い、表-2に示す諸条件下において、11:00～13:00に調査を実施した。

当日の調査時間内における GPS 衛星の捕捉状況は、概ね 7～8 個であり、最低捕捉数については 11:30 頃に 10 分程度の間 6 個であった。

表-1 1時間毎の潮汐表 (熊本港) 2008. 5. 26

時間	比高	水位	時間	比高	水位
6:00	+6.2cm	上昇↑	12:00	-14.4cm	下降↓
7:00	+31.8cm	上昇↑	13:00	-42.9cm	下降↓
8:00	+46.6cm	上昇↑	14:00	-60.7cm	下降↓
9:00	+47.5cm	上昇↑	15:00	-63.5cm	下降↓
10:00	+36.2cm	上昇↑	16:00	-51.6cm	下降↓
11:00	+14.7cm	上昇↑	17:00	-27.7cm	下降↓
12:00			18:00		

表-2 観測日における諸状況

観測日	2008年5月26日
天候	晴れ
気温	24℃
湿度	41%
風速	3m/s 程度
潮	小潮
満潮時刻	0:18, 12:01
干潮時刻	6:17, 18:22
ソナーのバーチェック補正量	-2.0%

PDOP 値は平均 2.2 程度であり、最大で 12:50 頃に 2.9 程度であった。これらの観測条件は RTK-GPS 測量では良好な条件である。

RTK-GPS 測量では、実測調査との関連付けを行う必要がある。よって、水準点を GPS 固定局とし、標高値及び座標値の統一を図った。

また、船舶での調査は必ずしも比較対象である実測横断測量地点と同ポイントを計測出来るとは限らない。よって実測横断方向と平行に航行することを基本にし、水位変動を考慮しながらランダムに面的な情報取得を行い、図-5 に示すように陸上部を除く水深部 13,000 m² に対し 5,822 点の位置情報 (X, Y, Z 座標値) を取得した。

情報取得間隔は、音響測深機では最大 5 (回/sec)、RTK-GPS は最大 1 (回/sec) にデータを受信する³⁾⁴⁾ことを考慮したうえで、観測速度は秒速 1.0m 程度とし、1.0m 間隔の位置データを取得した。

調査船は測深域、測深時間の影響等を考慮して、計測範囲を最大限まで測定できるように、喫水 0.5m 程度の小型船を使用した。

3. 「間接法」観測結果の補正

今回取得した間接法による観測データの解析方法として 3 次元解析を行った。取得した X, Y, Z 値を 3 次元解析ソフト (3D-Boss-Plus Version4.4, 株式会社未来システム工房社製) に取込み、目視によるデータの確認を行った。

取得生データ標高段彩図を図-6 に示す。取得生データでは、陸上に近い箇所ではノイズ (バグデータ) が多く見られる。これは、水深が浅い影響や、スクリーや波の影響で巻上げられた底泥や気泡がソナーが計測したためと考えられる。

取得データで作成した平面図に等深線を表示した際、単独で円を描く点、すなわち隣接する点に比べ著しく標高が上下している点を取り除いていく。この生データからノイズを取り除いた標高段彩図を図-7 に示す。急激な凹凸を除去し、実際の地形同様のなだらかな地形図を作成した。

直接法による実測値と比較を行なう為、間接法による未測位箇所を補う必要がある。よって、観測エリアすべてにおいて取得データを基に 1m メッシュに換算した。こうして補正したデータから三角網計算を行い、TIN サーフェス 3 次元図を作成した。

作成した 3 次元データを基に、直接法による観測結果と同断面箇所となるように路線計算を行い断面の抽出を行った。

図-7 に示すノイズ除去後の標高段彩図で確認したところ、NO.3~NO.10 間の横断面はその多くが陸上部であり、またノイズを含んだデータが多く見受けられる為、今回の比較検討から除外することとした。

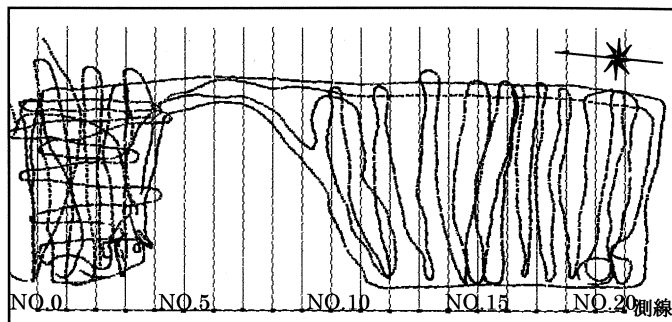


図-5 航跡図

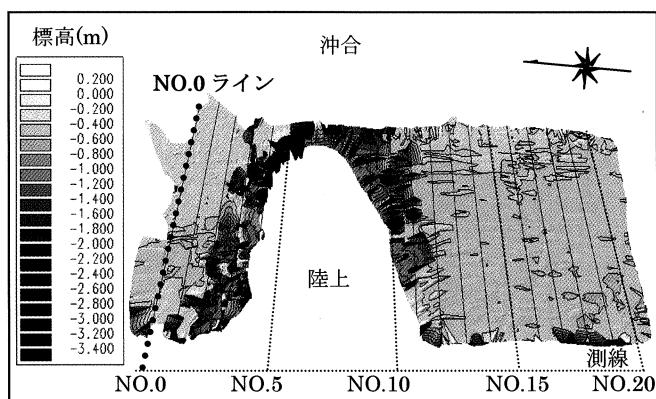


図-6 生データ標高段彩図

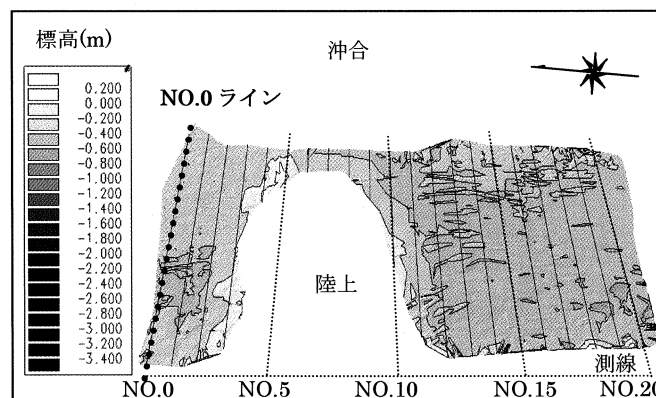


図-7 ノイズ除去後の標高段彩図

4. 直接法と間接法の比較検証

(1) 検証 1

実測横断面図「直接法」と前章で抽出した横断面図「間接法」の比較図を作成し、断面法 (同地点の標高値比較) を用いて比較した。代表断面として図-8 に NO.0 ラインにおける比較断面図を示す。

直接法は干潮時に干潟の標高を 5m 間隔で観測を行っているが、丁線部より海側においては干潟標高の計測値には殆ど変化が見られなかったため、10m 間隔での比較を行った。

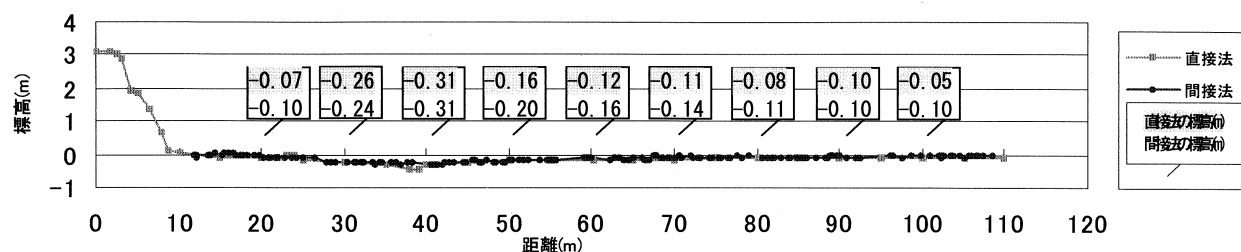


図-8 NO.0ラインにおける比較横断面図

表-3 全断面における較差表

測点	最大較差	較差平均	標高差平均
NO.0	5cm	2.7cm	-2.4cm
NO.1	5cm	2.6cm	+0.1cm
NO.2	6cm	3.2cm	-3.2cm
NO.11	6cm	3.1cm	-3.1cm
NO.12	6cm	3.0cm	-2.8cm
NO.13	7cm	3.7cm	-3.1cm
NO.15	6cm	1.9cm	-1.8cm
NO.20	6cm	2.6cm	-2.1cm
平均値	5.9cm	2.9cm	-2.3cm

図-8 で比較した同地点の標高較差を集計し、全断面における較差表を表-3 に示す。

各断面の最大誤差は 5cm～7cm 程度であり、誤差平均値は 3cm 未満、標高差平均値では-2.3cm という結果が得られた。

水平位置の精度として、衛星数条件、PDOP 値条件は十分に満たしており、水平±(10mm+2ppm×D (今回 D=0.2km 以内)) であるため、±10.4mm 以下の精度であると考えられる。

鉛直位置の精度は、衛星数条件、PDOP 値条件を十分に満たしており、水平±(20mm+2ppm×D (今回 D=0.2km 以内)) であるため、±20.4mm 以下の精度となる。

また、ソナーの精度±(0.03+水深/1000) m に対し、水深は最大で 3m 程度であり、±33.0mm 以内の精度となる。

これらのことから標高差において観測値が低く計測されていることが分る。これは船の傾きによりソナーが垂直より長く(斜長)計測したことが原因と考えられたが、平均値-2.3cm で逆算すると、船の傾きは 7°、最大で-3.2cm:8° となり、気象状況、作業状況を考えると、船の傾きによる誤差は含まれないものであると考えられる。

以上に述べたように、最大較差は 7cm であったものの、較差平均値は 2.9cm であった。これは、水位変動の激しい場所であることや定期的に水位を直接観測する従来法で起きる較差を鑑みても、広域の地

形測量においては良好な結果が得られた。今回の調査結果により、衛星条件が良好な場合に間接法が有用であることが確認された。

(2) 検証 2

検証 1 の場合、GPS 衛星状況が最も良好な時間帯に調査を実施し、調査箇所においても、GPS 衛星からの受信を遮る物がない場所であった。

その中で、間接法の結果は有用であるが、現実像に近づけるためには、衛星状況の把握が十分に必要であることが確認された。

これを踏まえ、捕捉衛星が減少した場合におけるデータの検証として、今回の衛星捕捉数 8 個に対し最低衛星数 5 個という条件で、調査域が山間部前面の干潟域や都市部に隣接した干潟域である場合の地物や建造物を想定し、仰角が低い GPS 衛星を使用せず再計算を行い、検証 1 の捕捉衛星 8 衛星時のデータとの比較を行った。比較データは、GPS 解析で取得した X, Y, Z 値を用いた。

その結果、捕捉衛星 8 衛星時には Fix 解が 5,822 点であるのに対し、捕捉衛星 5 衛星時には 5,793 点と、29 点のデータが使用不可となる。

また、5 衛星時の Fix 解 5,793 点の値を 8 衛星時 Fix 解と比較した場合の較差発生数は水平方向 2,835 点(8 衛星時 Fix 解に対する較差発生率 48.9%)、鉛直方向 2,505 点(較差発生率 43.0%)と 5 衛星時 Fix 解全体の約半数であり、その最大較差は水平方向±50mm、鉛直方向±60mm、較差平均は水平・鉛直方向ともに 12mm であった。

このことから、衛星数の減少により Fix 解の減少および水平・鉛直方向に較差の発生が見られ、より取得データの精度を上げるためにも、観測状況を厳選し多くの衛星情報を取得することの重要性が再認識された。

GPS 衛星は、31 基(2007/9 現在)が地球上を周回し、遮るものがなければ理論上 6 個以上捕捉出来ると言われている。インターネット上で閲覧できる衛星飛来予測システムを利用することで、調査域上空の衛星数及び PDOP 値を把握することができる。しかしながら、衛星からの受信を遮る地物、建造物等が存在する水域であれば、調査船が調査域をランダムで航行する為、常に移動している衛星を把握するのは限度がある。広範囲に調査を行う場合は、最少衛星数の誤差を視野に入れて観測する必要がある。

5. おわりに

近年、測量技術の飛躍的進歩に伴い様々な調査方法が開発されているが、今回は一般的に使用されている測量機器を使用し、干潮時に計測した実測データと、満潮時に計測した間接データを比較し、間接データの精度と課題について検討を行った。その結果、間接法の精度の信頼性を確認することができた。

データを処理していく中で、もっとも神経を使うのは生データ内におけるバグデータ除去作業である。目視では確認できない海底面を実現象に近づけていくには、GPS衛星状況、日々のバーチェック、往復観測、観測密度などを考慮することが必要となる。さらにバグデータの発生を防止する為には、ソナーの感度を落とす事や、大潮の満潮時に部分的計測をすることが望ましい。今回は、3次元化する標高値が事前に把握できていたことと、干潟といったほぼフラットな地形であったため、データ解析を容易に行うことができた。

しかしながら、音響測深機は使用する音波の周波数と底質性状によって反射強度に違いが生じ、測量結果に影響を及ぼすことが知られている。通常、音響測深機のバーチェックは水質による補正は行いが底質による補正は行わない²⁾。今回の調査エリアは直接法による観測も可能であったため良好な結果が確認できたが、目視が困難な場所では底質調査も同時に実施することで音波の反射状況を把握した上で補正の検討が必要となってくる。

さらに、干潟の生態系調査地点を選定する際、滞筋や潮溜りなどの微地形の把握が必要となるが、今回の方法では、深さが5cm程度の微地形は誤差の範囲になってしまう。よって、それらを把握する場合は別途直接法による調査や目視調査の併用、空中写真を参照するなどの必要がある。

また、ナローマルチビームなど広範囲で測定できる機器を使用することで標高に誤差は含まれるが、微地形の状況は把握できる。しかし、低浅水域であ

るためナローマルチビームの使用はできない。また、干潮時に地上レーザースキャナー及び、航空レーザースキャナーを使用することも考えられるが、調査に莫大な費用がかかるため現実的ではない。

現在の一般的な水位情報の取得法はGPS衛星によるものよりも定期的に直接水位を観測する手法が重要視されている²⁾。しかしながら従来法である定期的に直接水位を観測する手法では、波浪による船舶の上下動が観測誤差に含まれることが懸念されるため、ダム、河川、湖等の静水域でない場合、そのような標高誤差が発生してしまう恐れがある。

これらのことから、波風などの影響により水位変化の激しい場所では、定期的に水位を観測するだけでなく、GPS衛星による詳細な水位情報も併用し、より正確な水位を観測することが求められる。

間接法による深浅測量は、広範囲に渡る水域では最も効率的且つ簡易的に作業を行うことができる。各々の条件で精度は変わってくるが、各種条件や精度に留意した上で、その特性を活かして行きたい。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費重要課題解決型研究等の推進「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験（平成17～21年度）」の補助によるものであり記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 増田龍哉, 滝川清, 森本剣太郎, 畑田紀和, 新井雅士: 熊本港に造成された「なぎさ線」における生物生息環境の空間分布特性, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 717-722, 2008.
- 2) 社団法人日本測量協会: 国土交通省公共測量作業規程, pp. 419-422, 2002.
- 3) 社団法人日本測量協会: 公共測量-作業規程の準則, pp. 107-110, 2008.
- 4) 社団法人日本測量協会: RTK-GPS を利用する公共測量マニュアル, pp. 45-49, 2000.