

技術報告

ドローンと水位計を用いた 簡易な干潟地形測量方法

福田裕毅*1・近田靖子*2

Simple topographic survey method
for tidal flats using a drone and water-level data loggers

Hiroki FUKUDA and Yasuko KONDA

In topographic surveying of tidal flats using a drone, positioning of control points as references is difficult. Accordingly, we attempted to estimate the altitudes of water-level indicators installed in tidal flats from the tide levels recorded at nearby fishing ports and use these values as references to improve survey accuracy. The contour lines of tidal flats obtained using drone surveying and altitude correction based on water-level indicators fitted closely with the shapes of tidal flat shorelines recorded using a GNSS receiver during an incoming tide, suggesting that this is a simple and effective method for topographic surveying of tidal flats. However, the altitudes of shorelines obtained from the tide levels at the time the shorelines were recorded were higher than the altitudes of contour lines by approximately 0.1 m. This is likely due to the differences in tide level between tidal flats and nearby fishing ports, suggesting that measuring the tide level at locations closer to tidal flats may improve survey accuracy.

キーワード：ドローン, 水位計, 干潟, 測量
2020年6月17日受付 2021年5月58日受理

干潟は波浪や河川流出などに伴う侵食、堆積の影響を受け、その地形が変化する。干潟に生息する生物はそのような地形変化の影響を受けていると考えられるため、干潟を対象にした試験や調査を実施する際には地形変化の影響についても検討すべきである。例えば、アサリの稚貝密度が減少した際、その原因として生物・化学的要因だけでなく、侵食により流出した可能性も考慮する必要がある。しかし、干潟の地形を簡便に測量する方法がないため、侵食の有無やその程度を評価することは難しい。

ドローンと呼ばれる無人航空機 (UAV) を利用した写

真測量の技術開発が進んでいる。国土交通省は平成28年3月に「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」を公表し(国土交通省国土地理院2016)、土木分野ではドローンによる測量が実用化されつつある。また、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構は平成30年に「ドローンを用いたほ場計測マニュアル(不陸(凹凸)編)」を刊行している(石塚ら2018)。これらの技術に共通することは、ドローンで撮影した写真に記録される位置情報は使用せず、別途正確な位置を測定した標定点を測量対象範囲に複数点設け、これらの位置情報を測量の基準として使用することである。この理由は、一

*1 地方独立行政法人北海道立総合研究機構栽培水産試験場
〒051-0013北海道室蘭市舟見町1丁目156番3号

Mariculture Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, 1-156-3, Funamicho, Muroran, Hokkaido 051-0013, Japan
fukuda-hiroki@hro.or.jp

*2 地方独立行政法人北海道立総合研究機構釧路水産試験場

般的なドローンで測位に使用されている全球測位衛星システム受信機（以下、GNSS受信機と称す）の測位精度が、地形測量の基準とするには低いためである。本研究で使用したドローンのPhantom4Pro（DJI社）では、搭載されたGNSS受信機の対応する測位衛星がGPSとGLONASSであることが公表されている。GNSS受信機の測位精度は、使用する場所、受信している衛星の数や誤差補正機能の有無などにより異なるため精度に関する評価は難しいが、GPSとGLONASSに対応し誤差補正機能を有するマッピング用GNSS受信機を森林で使用した場合、水平方向に最大4m程度の誤差が生じることが確認されている（遠國ら2016）。Phantom4Proを離陸地点に帰還する設定で飛行させた際、数m離れた場所に帰還することもあり、上述のマッピング用GNSS受信機と同程度の誤差はあると推察される。またGNSS受信機で測定される高度は楕円体高であり、標高はその場所のジオイド高で補正することで算出される。ジオイド高を求めるにはその場所の正確な緯度と経度が必要であるが、ドローンのGNSS受信機は上述のように測位誤差が大きいため、標高を高い精度で求めることは困難である。ドローンを使用した測量では、このような測位精度の低さを補うために標定点を設ける必要がある。

干潟の測量においても標定点を設け、先述のマニュアルに従えば高い精度で地形測量が可能であるが、標定点の設定には測量に関する専門的な機材や技術が必要である。また地形が変化する干潟では長期的に利用できる標定点を設けることが難しく、測量ごとに標定点を設定する必要がある。このような作業が必要となるため、ドローンを使用して干潟の地形を簡便に測量することは困難である。しかし、高精度な測量によって設定された標定点が必要となるのは、土木測量のように高い精度が求められる場合である。侵食や堆積によって生じる干潟の地形変化を把握することが目的であれば、ドローンのGNSS受信機の精度でも緯度と経度の測定については問題がないケースが多いと考えられる。一方で、標高は侵食や堆積を評価する重要なパラメーターであるため、何らかの基準を用いて補正を行い、精度を向上させる必要がある。そこで本研究では干潟に設置した水位計と近隣の漁港で観測された潮位データから設置場所の標高を推算し、これによりドローンで測定された標高を補正して干潟の地形を測量することを試みた。

ドローンによる測量の条件

ドローンを用いた地形測量では、カメラを鉛直下向きに向けて移動しながら撮影した写真を用い、三次元形状復元計算により地形データを作成する。この計算では重複させながら連続撮影した写真を使用する。重複度は同一コース内の隣接写真では80%以上、隣接コースの写真では60%以上とすることが標準とされている（国土

交通省国土地理院2016）。地形データの作成では、鉛直下向きの写真だけを用いた場合、対象領域の中央部が盛り上がるドーム状変形と呼ばれる誤差が生じることが知られている。これを抑制するためには、カメラを鉛直下向きから撮影対象領域の中央に向けて30度上向きにし、4方向から撮影した写真を加えることが効果的である（James and Robson 2014）。また、200m×200mの撮影対象領域において、その4隅で上述のように撮影した上向きの写真を追加することでドーム状変形をほぼ完全に抑制できることが明らかとされている（神野2020）。神野は測定誤差を抑制するために必要な標定点の数についても検討しており、200m×200mの撮影対象領域であれば、上述の上向き撮影に加えて対象領域4隅に標定点を設けることで測量誤差を小さくできることを報告している。これらの知見を参考に干潟を撮影する条件を設定した。

ドローンを用いた地形測量は北海道根室市温根湯の干潟で実施した（図1）。干潟が冠水していると屈折や水面による反射の影響を受けて正確な測量ができないため、撮影時に干潟が干出している必要がある。2019年9月27日の7時59分が大潮の干潮であったことから、干潟が干出していた同日の8時45分からおよそ30分間で撮影を実施した。撮影対象領域が200m×200mに収まるように鉛直下向きに撮影するコースを設定した。先述したドーム状変形を抑制するために、撮影対象領域の4隅あたりでカメラを対象領域中央部に向けて鉛直下向きから約30度上向きにした写真を撮影した。標高の補正に用いる水位データを取得するため、30分ごとに記録するように設定した水位計（HOBO U20-001-01, Onset社）を撮影対象領域の4ヶ所（St.1～4）に事前に設置した。水位計の設置位置をドローンで撮影した写真から判別できるように、0.45m×0.45mの対空標識（ドローン用対空標識プラス型白黒、株式会社グリーンクロス）をステンレス製の杭を用いて干潟に設置し、この中心部に水位計を固定した。撮影高度はカメラの性能と必要とする解像度から求めることができ、Phantom4Proの場合、地上

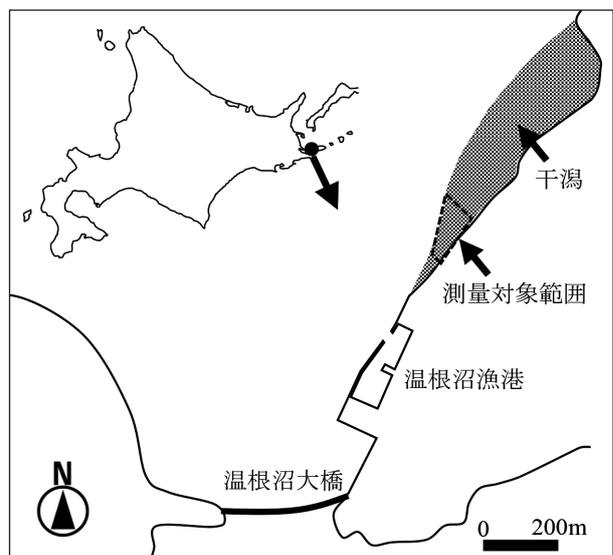


図1. ドローンによる測量を実施した北海道根室市の干潟

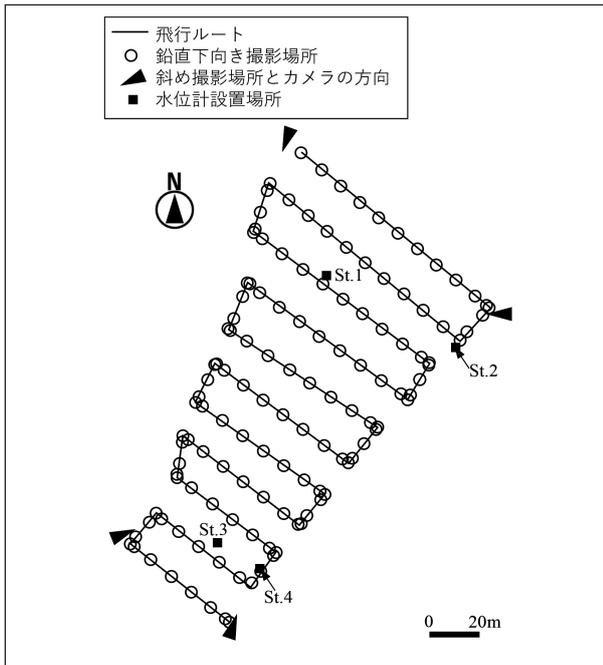


図2. ドローン測量における飛行ルートと写真撮影および水位計の設置場所

画素寸法 0.01m/pixel の画像が取得できる撮影高度は 36.48m とされている (石塚ら 2018)。事前にドローンで撮影を行った際、高度 50m でも干潟を観察するのに十分な解像度の写真が得られたことや、高度が高いほど撮影範囲が広くなりオーバーラップ率が向上することを考慮し、撮影高度はすべて 50m に設定した。また、鉛直下向きの写真の撮影時間間隔についてもオーバーラップ率を向上させることを考慮し、設定できる最短時間である 2秒とした。飛行ルートや高度の設定には自動航行用ソフトウェア Litchi (VC Technology 社) を使用した。設定した飛行ルートと写真を撮影した場所および水位計の設置場所を図 2 に示した。このドローンに搭載されるカメラの視野角は 84 度、アスペクト比は 3:2 であるため高度 50m で撮影できる範囲は 75m × 50m となる。鉛直下向きの撮影は写真の長辺が進行方向となる向きで行った。図 2 に示した鉛直下向きの撮影コースに撮影範囲を当てはめて重複度を計算すると、同一コースにおける隣接写真では約 86%、隣接コースの写真では約 64% であり「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」の基準を満たしていた。

St.1,3,4 の水位計は写真撮影時に回収したが、St.2 は水位計が流出していたため同じ場所に水位計を再度設置し翌日に回収した。調査した干潟とその北東約 10km にある根室港の潮位は同じであるが見なし、根室港の潮位から水位計の観測値を差し引くことで根室港の潮位観測基準面を標高ゼロメートルとした水位計設置場所の標高を求めた。根室港の潮位はリアルタイムナウファス (国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網) で公開されている毎分平均の潮位実況データを用いた。撮影当日の干

潮時刻 (7 時 59 分) と満潮時刻 (14 時 41 分) の潮位はそれぞれ 0.31m と 1.28m であった。St.1,3,4 についてはドローン撮影前の満潮に近い 9 月 27 日 0 時、水位計を再設置した St.2 は撮影後の満潮に近い 9 月 27 日 15 時における水位観測値および根室港の潮位から標高を算出した (表 1)。

表 1. 水位計の測定値と根室港の潮位から算出した水位計設置場所の標高

	水位計 測定値	根室港 潮位	水位計設置 場所の標高
St.1	0.790m	1.35m	0.56m
St.2	0.215m	1.30m	1.09m
St.3	0.791m	1.35m	0.56m
St.4	0.433m	1.35m	0.92m

干潟地形データの作成

ドローンで撮影した写真と表 1 のデータをパソコン (表 2) で処理して干潟の地形データを作成した。使用したソフトウェア (MetaShape Ver.1.6.2, Agisoft 社) は位置情報を持った写真から数値標高データや等高線を作成する機能を有している。表 2 のパソコンで 165 枚の写真から等高線を作成するのに要した時間は 2 時間程度であった。パソコンの RAM メモリ容量が大きいほど一度に処理できる写真の枚数が多くなり、ビデオカードチップセットの性能が高いほど処理に要する時間は短くなる。ソフトウェアによる処理手順の概要について以下に記述する。

表 2. 等高線の作成に使用したパソコンの仕様

OS	Windows10 64bit
CPU	Intel Core i7-7700k
RAM メモリ容量	64GB
ビデオカード チップセット	GeForce GTX1070

写真のアライメント 撮影したすべての写真を用いて写真のアライメントを行う。写りの悪い写真はアライメント処理が適用されず、以降の処理から除外される。除外される写真が多くなると作成される地形データの範囲が狭くなる。また、ドーム状変形を防ぐために対象領域 4 隅で撮影した斜め上向きの写真が除外されると、作成される地形データの精度が大幅に低下する。干潟の撮影において問題となるのは水面による太陽光の反射で、これが大きく写り込む写真はアライメント処理で除外される

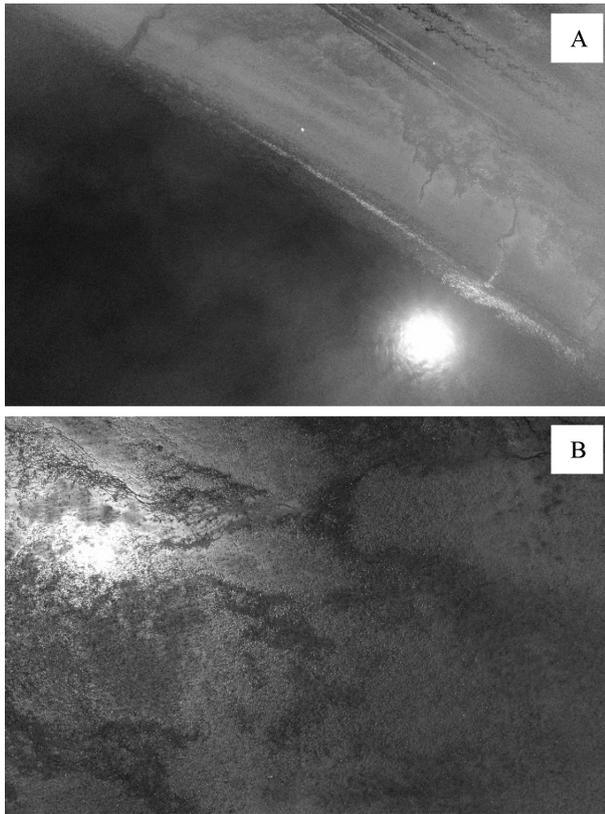


写真 1. MetaShape によるアライメント処理で除外されやすい写真の例
 Aは干潟の沖の海面に太陽が映り込んでおり、Bは干潟の潮だまりで太陽光が反射して白飛びが起きている

ことが多い(写真1)。これを防ぐためには、快晴よりも薄曇りなどの天候で撮影をすると良い。

マーカーの作成 4ヶ所に設置した対空標識が写っている写真を各1枚選び、対空標識の中心部(水位計設置場所)にマーカーを追加する。すると、マーカーの緯度、経度と高度が写真に記録された位置情報に基づいて算出される。算出されたマーカーの高度は楕円体高であるため、水位計と根室港の潮位データから求めた潮位基準面からの標高値(表1)に書き換える。

等高線の作成 撮影したすべての写真について、記録された位置情報を使用しない設定にし、マーカーの位置情報のみを使用して再度写真のアライメントを行う。この処理により4点のマーカーの緯度、経度、高度に基づいてすべての写真の位置情報が書き換えられる。これは、先述した土木測量で行われる写真に記録された位置情報を使用せず標定点の位置情報のみを使用する処理に相当する。アライメントを修正した写真から数値標高データを構築する。これを用いて干潟の等高線とオルソ画像を作成する。

作成した等高線と干潟のオルソ画像を重ねて図3に示した。等高線の標高は根室港の潮位基準面を標高ゼロメートルとしたときの値である。ここでは地形をわかりやすくするために等高線を作成しているが、上述の処理により3次元の位置情報を持った点群データが作成される。図3で示した範囲ではおよそ900万の点群データがあり、任意の点について緯度、経度および標高を得ることが可能である。

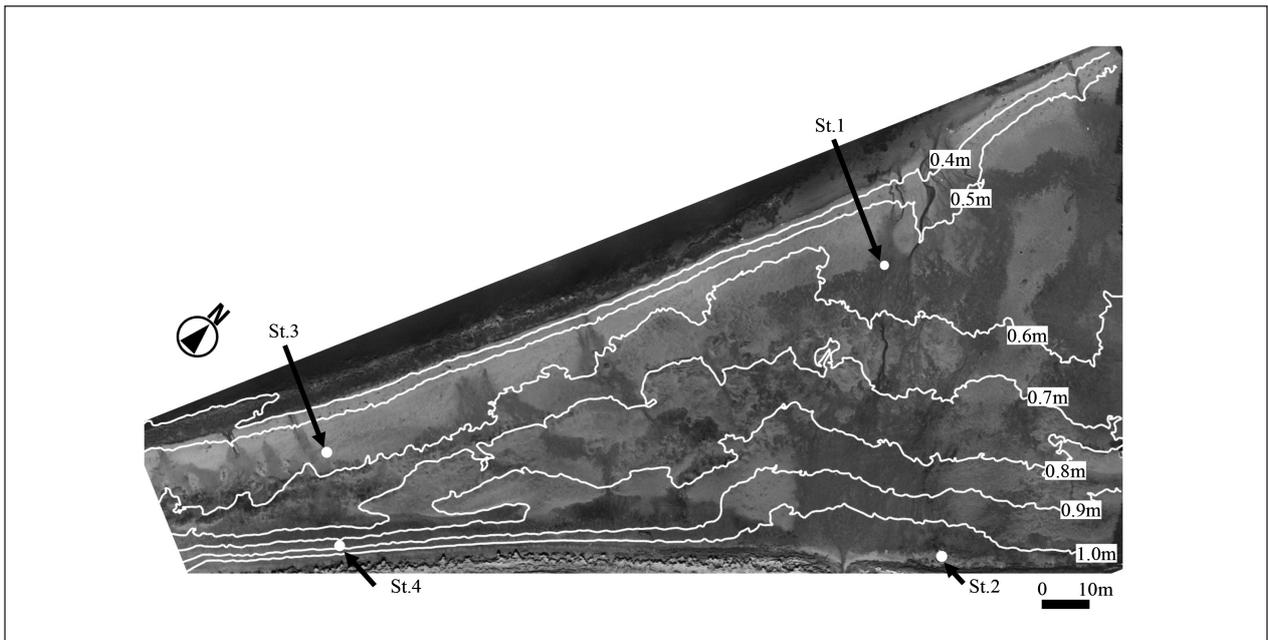


図 3. ドローン撮影と水位系データから作成した干潟の等高線とオルソ画像
 標高は根室港潮位観測面を標高ゼロメートルとしたときの高さ

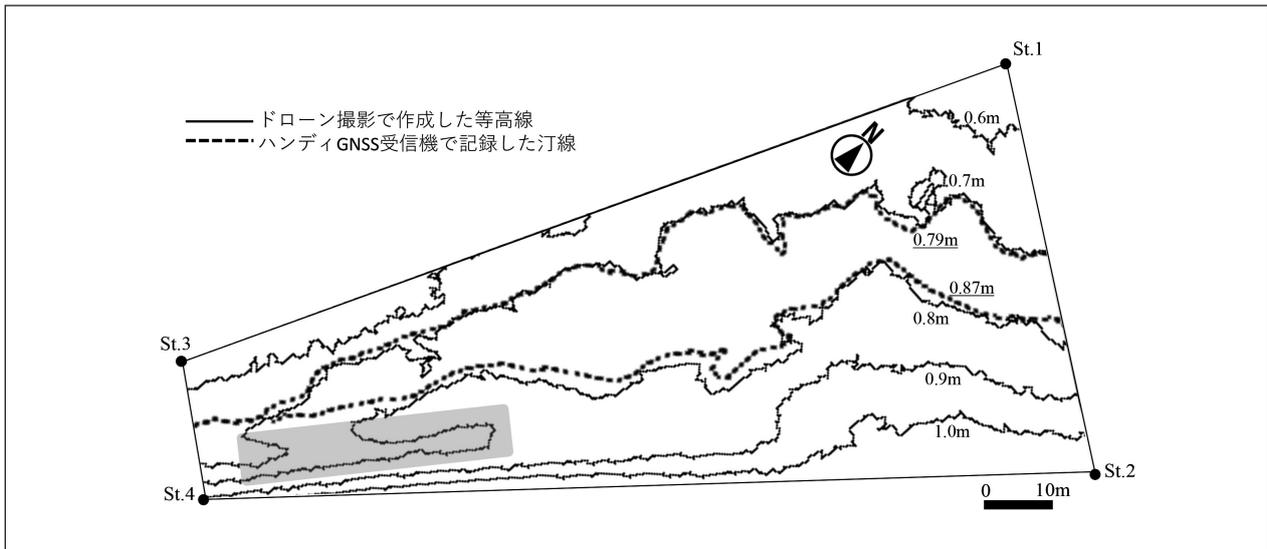


図4. ドローン撮影で作成した等高線とハンディGNSS受信機で記録した汀線の比較（下線付きの数値は汀線の標高）
網掛けの部分では等高線と汀線の形状に大きな違いが見られた

等高線の精度検証

干潟では潮位の変化に伴い干潟上に形成される汀線も変化する。汀線は干潟の同じ標高を結んだ線と見なすことができるため、これと図3の等高線を比較することで等高線の正確さを評価できると考えた。そこで、ドローンの撮影終了後の上げ潮時にハンディ型GNSS受信機（eTrex30J, Garmin社）で位置情報を記録しながら汀線に沿って歩き、その形状を取得した。また汀線の標高については、各汀線を記録した時刻について根室港の毎分潮位（ナウファスWEB）を平均した値を用いた。このようにして標高0.79mと0.87mの2本の汀線を作成した。先述のように200m×200mの対象領域であれば、その4隅に設定した標定点による補正で測量精度が向上することが知られている。今回の測量では4ヶ所に配置した水位計の測定値を標高の補正に用いており、水位計を標定点と見なせば水位計で囲まれた範囲については標高の測量精度が高いと考えられる。そこで4ヶ所に設置した水位計で囲まれた範囲において、作成した汀線と等高線を比較した。その結果、標高0.79mの汀線は標高0.7mの等高線とほぼ一致していた。また、標高0.87mの汀線は標高0.8mの等高線とおおよそ一致していた（図4）。なお、図4の網掛けした場所では汀線と等高線に大きな違いがあったが、これは写真2に示すように等高線と類似した汀線が形成されていたものの、その一部を干潮時にも存在した潮だまりと誤認して汀線を記録しなかったことが原因である。このように汀線を基準として評価した場合、ドローンによる測量で作成した等高線は干潟の地形を非常に良く捉えていたが、標高については0.1m程度の違いが生じた。



写真2. ハンディGNSS受信機で干潟の汀線を記録したときの写真
写真はSt.4の5mほど北側から北北東向きに撮影しており、白線で囲んだ部分には図4の網掛け部分とよく似た汀線が形成されていたが、これを干潮時にも存在した潮だまりと誤認したため汀線を記録しなかった

精度の向上と今後の活用

今回の試験では根室港の潮位と調査を実施した干潟の潮位は同じであると見なして等高線と汀線の標高を求めたが、両地点は約10km離れているため潮位に差があったと考えられる。とはいえ等高線と汀線の標高はともに同時刻の根室港の潮位を基準として算出しているため、両地点間の潮位の差が時間によらず同じであれば、等高線と汀線の標高に潮位の差に起因する違いは生じないはずである。しかし、潮位は風など局所的な気象条件の影響も受けることから、両地点間の潮位の差が時間とともに変化すると考えられる。今回の試験では、等高線は9月27日0時と15時、汀線は同日11時ごろの根室港の潮位を基準として標高を求めた。それぞれの時刻で生じた潮位の差が異なっていたことが原因となり、図4に示したように等高線と汀線の標高に差が生じたと推察され

る。このように時間とともに変化する潮位の差が等高線の標高に影響を与えることは、標高に基づいて地形変化を評価する際に問題となる。たとえば、定期観測により得られた標高の変化から、干潟の地形変化を定量的に評価することは難しい。しかし、離れた場所を基準とすることで生じる潮位の差が問題であるなら、干潟のごく近傍で観測した潮位を基準とすることで潮位の差をほぼゼロにすることが可能である。これにより測量精度が向上すれば、定量的な評価も可能になると考えられる。

本研究では、現在普及しているGNSS受信機を搭載したドローンと水位計を使用して干潟の地形測量を試みた。水位計のデータを用いて標高を補正することで干潟の地形を把握することができた。本手法は測量に関する専門的な機材を必要としないこと、ドローンによる撮影と水位計のデータ回収に要した時間が本研究では30分程度であったことから、干潟の地形を測量する非常に簡便な手法として評価できる。しかし、定量的な評価手法として用いるには測量精度を向上させる必要がある。近年、測位精度が非常に高いRTK-GNSS受信機を搭載したドローンが販売され、これを用いて標定点を使用せずに精度の高い測量を行う技術開発が進められている。また、衛星測位システムみちびきの運用が開始され、誤差数センチメートルで測位できるセンチメートル級測位補強サービスを利用できる受信機も販売されている。これらの測位精度の高い機器の普及が進めば、さらに簡便かつ

高精度に干潟を測量することも可能になると考えられる。

謝 辞

本研究の調査にご協力いただいた根室湾中部漁業協同組合の職員の方々にお礼を申し上げます。

文 献

- 石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘 (2018) ドローンを用いたほ場計測マニュアル (不陸 (凹凸) 編). (研) 農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター, 45p.
- James MR, Robson S (2014) Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surf. Process. Landforms*, **39**, 1413 – 1420.
- 神野有生 (2020) 山口大学空中測量研究室の技術ノート. <https://ameblo.jp/rs-algorithm-designer/entry-12418527070.html>, 2020年6月9日.
- 国土交通省国土地理院 (2016) UAVを用いた公共測量マニュアル (案). 35p.
- 遠國正樹・尾張敏章・平田雅和・鈴木祐紀・高橋功一・笠原久臣・芝野博文 (2016) 森林内におけるマッピング用およびコンシューマ用GNSS受信機の測位精度. 東大農演習林報告, **134**, 29 – 40.