UAV を用いた多視点ステレオ写真測量による海氷厚分布測定手法の開発

Development of sea ice thickness distribution measurement method by multi-view stereo photogrammetry using the UAV

照井 雄大[1]，舘山 一孝[2]，渡邊 達也[2]
Yudai Terui[1], Kazutaka Tateyama[2] and Tatsuya Watanabe[2]
Corresponding author: m1852200155@std.kitami-it.ac.jp (Y. Terui)

This study attempt to develop the method of sea-ice thickness measurement using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The aerial photographs and digital elevation data were acquired over the lake ice of the Saroma-ko Lagoon in winter by a UAV with a high-precision Global Navigation Satellite System unit. The Digital Surface Model were created with SfM (Structure from Motion) from photograph and GNSS data and converted to the sea-ice thickness distributions.

１．研究背景と目的

海氷は大気と海洋間の熱交換に対して断熱材としてはたらくなど重要な役割を持っており[1)]，その変化は地球規模の気候変動に大きな影響を及ぼすため，気候変動の実態把握に海氷観測が有効な手段の１つとなっている[2)]．特に海氷面積にとどまらず，気温変化に敏感な海氷厚の変動も監視することが重要である．海氷厚の測定はドリル掘削や航空機・船舶に搭載した電磁誘導式海氷厚計（EM）などといった現地での観測が主であるが，これらの測定方法では労力やコストがかかり，広範囲を定期的に観測することは困難である．そのため，現地測定よりも効率良く広範囲でコストがかからない観測手法の開発が求められる．

近年，地形学や地質学などの分野ではドローンと呼ばれる小型無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）を使用し，多視点ステレオ写真測量技術（Structure from Motion，SfM）を用いて，異なる方向から撮影した複数の写真からカメラと対象物の３次元構造を復元する手法が注目されている[3),4)]．本研究はこの手法を海氷厚観測に応用し，航空写真と UAV に搭載した GNSS 機器で測位した撮影時の高精度位置情報から数値地表モデル（Digital Surface Model, DSM）を構築し，モデルから得られた海氷と積雪のフリーボード（水面からの高さ）を海氷厚に換算する手法の開発を行った．これまでの海氷厚測定では，ドリル掘削は点，電磁誘導法（EM）は線のデータであったが，本法によって初めて面の海氷厚データが得られることが大きい利点である．

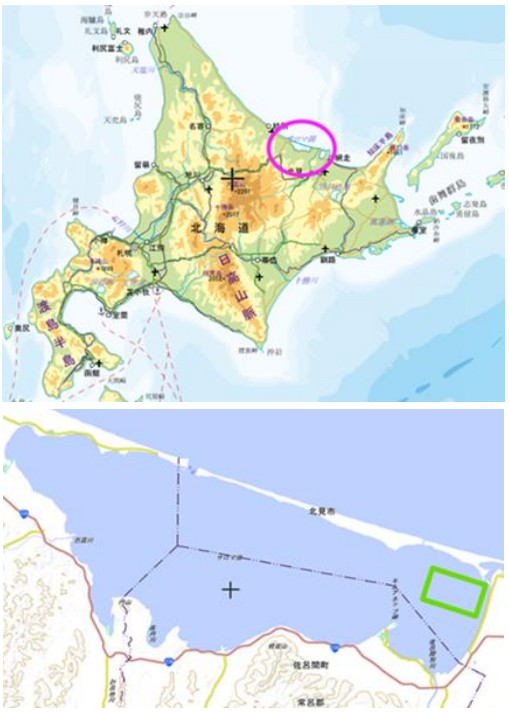

図１　北海道の全体図（上図）とサロマ湖の拡大図（下図）．国土地理院地図を使用．

２．観測対象地域

本研究では図１に示す北海道東部に位置するサ

1 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻
Graduate School of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology
2 北見工業大学 地球環境工学科
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

ロマ湖の湖氷を観測対象とした．サロマ湖は冬になると積雪深は最大 20cm 程度，湖氷厚は 30cm から 50cm 程度になり，沿岸の流氷と比較して湖氷上へのアクセスが容易かつ安全であり，検証点を設けることが可能である．また，同時期に他の氷上観測を行っているため，広範囲な氷厚や積雪深などのデータを共有する事が可能であるという利点があり，これらの理由から観測対象域として選定した．図１の上図に丸で囲まれた部分がサロマ湖であり，下図はサロマ湖の拡大図である．この図に記載されている緑色で囲まれた部分は UAV による撮影を行った範囲を示している．

３．観測とデータ解析方法

（１）UAV による空撮

2019 年 2 月 23，26，28 日に UAV の自動航行による空撮を行った．使用した UAV は DJI 社の Phantom4Pro を使用した．撮影条件として，重複率を表すオーバーラップとサイドラップは 80%以上確保するために，UAV の飛行時の巡航速度は 7 km/h，撮影高度は 50m，撮影インターバルは 10 秒とした．また，写真の保存形式は RAW と JPEG である．撮影範囲には

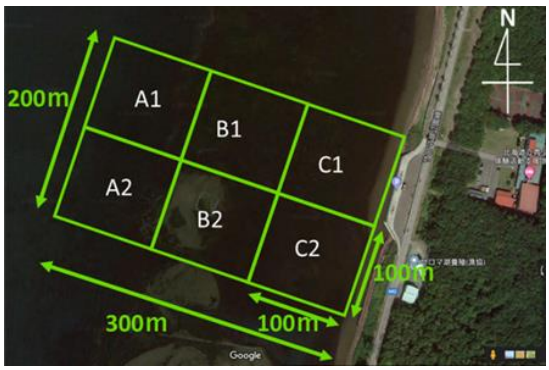

図２　サロマ湖での撮影範囲と分割したエリアの図（Google Map より）

図 2 のように 300m×200m の範囲を 1 エリア 100m×100m の 6 エリアに分割した．総撮影枚数は 6 エリアの合計で約 680 枚であった．

（２）位置情報の取得と実測値

航空写真から作成する DSM に正確な位置情報を付与するために，通常はリアルタイムキネマティック（Real-time kinematic, RTK）測位によって精密な空間座標を持つ地上基準点（Ground Control Points，GCP）を複数設置する必要がある．しかし 広範囲の観測を行う場合，多数の GCP を設置するための測量に時間がかかり，撮影範囲に GCP が入っていなかったり点数が不十分であると DSM に顕著な歪みが生じるといった問題があった．そこで本研究はその問題を解決するために，図 3 のように UAV へ RTK 測位を行える GNSS 機器を装着し，写真撮影と同時に位置情報を取得する方法を採用した．使用した GNSS 機器は Emlid 社の Reach M+である．サイズは 45.5× 27×9.2 mm, 重量は 14g, RTK 測位の精度は水平 5mm, 鉛直 10mm と小型で精度の高いものを使用した．

図３　GNSS 機器を装着した Phantom4 と RTK GNSS 機器である Reach M+

また，精度検証を目的として測量範囲内で検証点を設け, RTK 測位とドリル掘削による氷厚の実測を行い，測定精度の検証を行った．

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

（３）SfM 処理

SfM 処理には，Agisoft 社の SfM ソフトウェアである PhotoScan Professional を使用した．観測時に得た写真と位置情報をこのソフトウェアに取り込み，最初に高密度点群モデルを作成した．

（４）全氷厚換算

SfM 処理で得た高密度点群モデルから DSM を出力し，水面から湖氷表面までの距離であるフリーボードF_{ice}を計算した．F_{ice}は東京湾の平均海面の高さとサロマ湖の水面の高さの差の平均を用いて水面から雪表面までの距離を計算し，観測で得た実際の積雪深を引いたものである．静水圧平衡の式(1)を用いて，現地観測によって得られた海水密度ρ_{W}，海氷密度ρ_{I}，積雪密度ρ_{S}，積雪深Z_{snow}，および UAV 観測により得られたF_{ice}から全氷厚（積雪深＋氷厚）T_Tに換算した[4]．

$$T_T = F_{\mathrm{ice}} \cdot \frac{\rho_{\mathrm{W}}}{\rho_{\mathrm{W}} - \rho_I} + Z_{\mathrm{snow}} \cdot \frac{\rho_{\mathrm{S}}}{\rho_{\mathrm{W}} - \rho_{\mathrm{I}}} \qquad (1)$$

４．解析結果

本稿では A1 区域の解析結果を報告する．

（１）高密度点群モデル

SfM ソフトウェアに撮影した写真と位置情報を取り込み，図 4 のようにサロマ湖の高密度点群モデルを作成した．撮影範囲の端部分は画像の重複が無いため SfM 処理が行えず，点群の欠落が見られる．しかし，図に示す 100m×100m の範囲の内側に関しては欠落が少なく湖上の雪も表現されている．

（２）等高線図の作成

作成した高密度点群モデルから地表マップ作成ソフトウェアを用いて図 5 のように 0.5m 格子の DSM を出力した．図 5 のカラーバーは東京湾の平均海面を基準とした雪面の高さを意味している．問題であった GCP の点数不足による DSM の歪みを防ぐことができ，100m×100m の範囲内に関してはほぼ均一にすることができた．

（３）推定氷厚

DSM で得られた雪面の高さから，東京湾の平均海面とサロマ湖の平均水面の差（0.505m）を引いてフリーボードF_{ice}を計算した．現地観測で得られたデータからρ_{W}を 1017.63 kg m^{-3}，ρ_{I}を 924.41 kg m^{-3}，ρ_{S}を 295.52 kg m^{-3}とし，式(1)を用いてF_{ice}からT_Tに換算した．負のフリーボード（氷表面が水面下にある場合）はT_Tに換算することはできない[4]．表 1 に示す検証点において，推定と実測のF_{ice}およびT_Tを比較し

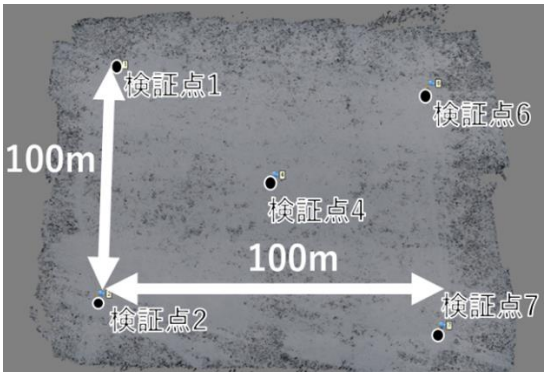

図 4　A1 の高密度点群モデル

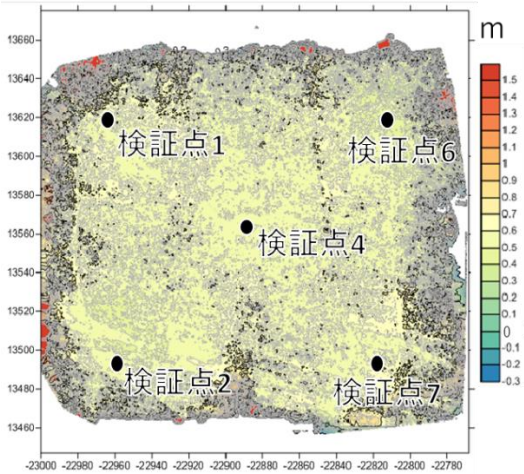

図 5　A1 の DSM

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

表１　推定と実測のフリーボード，氷厚の比較

検証点	フリーボードF_{ice}（m）			全氷厚T_T（m）		
	推定	実測	誤差	推定	実測	誤差
1	0.021	0.028	-0.007	0.584	0.566	0.017
2	-0.007	0.015	-0.022	-	0.461	-
4	0.093	0.054	0.039	1.102	0.606	0.496
6	-0.063	0.028	-0.091	-	0.543	-
7	0.101	0.020	0.081	1.381	0.422	0.959

た結果，検証点１のみ誤差が小さかったものの，他の検証点ではフリーボードで 0.02～0.09m, 全氷厚で 0.50～0.96m と誤差が大きい結果となった.

５．まとめ

UAV に直接 RTK GNSS 機器を装着することにより，GCP を多数設けなくとも均一な DSM を作成することに成功した．問題であった DSM の歪みや解析の精度の低下を防ぐことに成功し，GCP のための測量にかかる時間を大幅に減らすことができた. このことから一面が白く凹凸が少ない雪原など SfM 測量に向かない場所でも観測が可能であり，DSM を作成することができることがわかった.

湖氷のフリーボードおよび全氷厚の推定に関しては 5 点の検証点中 4 点において誤差が大きい結果となった. 検証点 1 のみ誤差が小さい結果が得られたが, この点は他の検証点と比べると実測での積雪深が深く, 氷厚が厚いという特徴があった．このことから積雪深が深い，氷厚が厚い湖や海氷では本手法が有効である可能性がある. 今後は誤差の要因を検討し静水圧平衡のパラメータ等を見直すことで改良を加え, フリーボードおよび全氷厚の推定精度の向上を目指す.

【謝辞】

本研究は ArCS 北極域研究推進プロジェクト（2015 年度～）の支援を受けて実施しました.

【参考文献】

1）　石川信敬，小林俊一，1983 : 海氷の生長に伴う表面熱収支の変化Ⅰ：サロマ湖における冬期の表面熱収支, 低温科學, 物理篇, **41**, 179-189.

2）気象庁：気候変動と海氷，http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/seaice/knowledge/eikyou_kikou.html，2019 年 7 月 2 日閲覧

3）山崎新太郎，2017 : 地すべり調査におけるドローン（UAV）の活用事例, 地質と調査, **148**, 12-16.

4）渡邊達也，山崎新太郎，亀田純，2018 : 小型無人航空機と GNSS を利用した数値地表モデルの作成実習，地質学雑誌，**124**(8)，643-649.

5）星野聖太, 他　2018 : 北極海における衛星高度計 Cryosat-2 SIRAL を用いた海氷厚推定手法の改良と南極海への応用，雪氷，**80**(4)，297-317

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice