

氷海航行支援に向けた UAV-LiDAR による高精度海水観測技術の開発

Development of a high-precision UAV-LiDAR sea ice observation method for ice navigation support

加藤 隼天¹, 舘山 一孝², 白井 秀和²

Hayate Kato¹, Kazutaka Tateyama², Hidekazu Shirai²

Corresponding author: m3255200073@std.kitami-it.ac.jp (H. Kato)

¹北見工業大学大学院 工学専攻, ²北見工業大学 先進工学科

¹ Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology, ² Department of Integrated Engineering, Kitami Institute of Technology

Safe navigation in ice-covered waters requires accurate observations of sea ice conditions. This study developed a high-precision sea ice observation method using UAV-LiDAR. Field observations were conducted in the Saroma-ko Lagoon and Utoro Port, Hokkaido, using a 905 nm LiDAR system. The RANSAC algorithm was applied to the acquired point cloud data to estimate sea surface height, enabling accurate freeboard measurement with a coefficient of determination of $R^2 = 0.869$. Furthermore, restricting the LiDAR scan angle effectively reduced water surface variances and improved the stability of freeboard estimation. These results demonstrate that the proposed method has strong potential for practical application in ice navigation support and can contribute to safer vessel operations in ice-covered waters.

1. はじめ

北極域は地球温暖化の影響を最も受けやすい地域の一つであり、海水の変動は北極域のみならず地球規模の環境変動を示す重要な指標となっている¹。人工衛星による海水域面積の長期観測から、北極海の海水域面積が減少傾向にあることがわかっている(図1)。海水観測にはマイクロ波放射計などの衛星観測、電磁誘導式氷厚計(EM)、音響ソナーなどが用いて行われてきた。しかし、これらの観測手法は、船舶の安全航行支援において必要な観測範囲、頻度および精度を十分に満たすことは困難であった。

我が国では、2026年に初の砕氷機能を有する北極域研究船「みらいⅡ」の竣工が予定されており、北極海における研究活動のさらなる発展が期待されている。一方で、我が国における氷海航行技術の蓄積は十分とは言えず、安全かつ効率的な氷

海航行を実現するためには、船舶周辺の海水状況を高精度かつ高頻度に把握できる技術の開発が求められる。

近年は UAV の発達と普及が著しく、海水観測分野においても、UAV を用いた写真測量(UAV-SfM)が活用されているが、自然光に依存するため夜間や降雪時の観測が困難であること、高さ情報の取得精度が観測条件に左右されること、重複撮影が必要であることなどの課題があった²⁾。

そこで本研究では、能動型センサであり、高密度な 3 次元点群を直接取得できる UAV 搭載型 LiDAR (UAV-LiDAR) に着目した。近赤外レーザー(905 nm)を用いて海面高度を高精度に推定し、海水フリーボードおよび海水厚を cm 級の精度で推定する手法を開発することを目的とする。

2. 観測概要

2. 1 使用機器

本観測では、UAV に DJI Matrice 400, LiDAR に DJI Zenmuse L2, ベースステーションに DJI D-RTK3 multi Station を用いた。RTK (Real-Time Kinematic) 補正を適用することで、cm 級の測位精度を実現した。主要な機器の仕様を表 1~3 に示す。

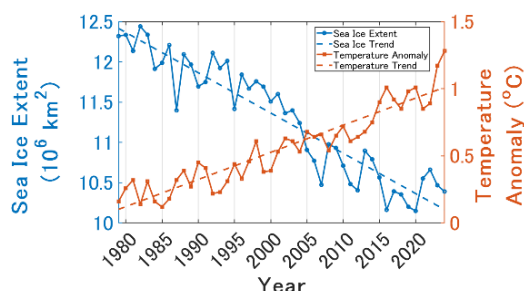


図1 北半球の平均気温偏差と海水域面積の変動(1979~2024年)

表 1 UAV の仕様

UAV(移動局)	DJI Matrice 400
最大ペイロード	6 kg
最大飛行時間	59 分
最大飛行速度	25 m s ⁻¹
GNSS	GPS / Galileo / BeiDou / GLONASS

表 2 LiDAR の仕様

LiDAR	DJI Zenmuse L2
レーザー波長	905 nm
システム精度	水平 5cm / 垂直 4cm (@150m)
測距精度	2 cm (@150m)
最大リターン	5 リターン
FOV	反復：水平 70°垂直 3° 非反復：水平 70°垂直 75°

表 3 ベースステーション（基地局）の仕様

ベースステーション	DJI D-RTK3 multi Station
測距精度	cm 級補正
GNSS	GPS / Galileo / BeiDou / GLONASS/QZSS

2. 2 観測日時・エリア

図 2 に示すように、2026 年 2 月 24 日から 3 月 3 日にかけて、北海道東部に位置するサロマ湖および知床ウトロ漁港において観測を実施した。サロマ湖は日本最大の汽水湖であり、海水と似た性質を持つ。冬季には湖面が結氷することで、海水研究のモデルフィールドとして広く利用されている。一方、ウトロ漁港は、冬季に本格的な流水が接岸するエリアであり、実際の流水環境における UAV-LiDAR 観測手法の検証に適したフィールドである。

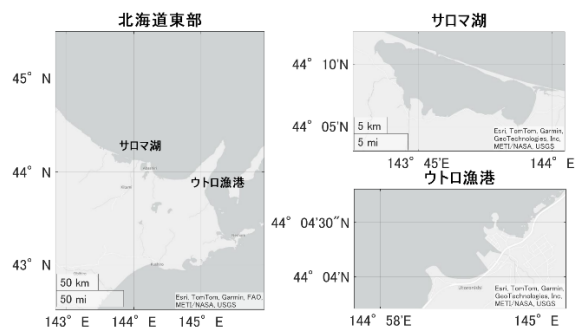


図 2 北海道東部（左）、サロマ湖（右上）、ウトロ漁港（右下）

3. 解析手法

3. 1 解析の流れ

取得した生データを点群処理ソフトウェア（DJI Terra）を用いて結合し、高密度 3 次元点群データを生成した。次に、点群データから開放水面およびニラスを抽出して海面高度を推定するとともに、海氷面との高度差からフリーボード h_f を算出した。さらに、海水密度 ρ_w と海氷密度 ρ_i を用いた静水圧平衡の式(1)に基づいて海氷厚 h_i を推定した³⁾。

$$h_i = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} h_f \quad (1)$$

3. 2 RANSAC による海水面高度の特定

観測に用いた DJI Zenmuse L2 のレーザー波長は 905nm（近赤外線）であり、水に吸収されやすい特徴を持つ。そのため、通常は開放水面からの反射は得られにくい。しかし、実際の氷海では、ニラス（海氷生成過程初期の薄氷）や小氷片、さらには波浪やレーザーの入射角の違いにより、一部の開放水面からレーザー反射を取得できることが分かった。一方で、抽出した開放水面の点群には外れ値や高度のばらつきが含まれたため、本研究では、RANSAC (Random Sample Consensus) を用いて海面を単一平面として推定した⁴⁾。RANSAC では、開放水面点群からランダムに 3 点を選択して平面モデルを生成し、全点との距離を計算した。平面から 3 cm 以内の点を *inliers* と定義し、5000 回の反復計算を行った。最も多くの *inliers* を有する平面を海水面とみなし、その高さを基準海面高度とした。

図 3 に RANSAC による海面平面推定結果の一例を示す。本事例では、168,460 点の海面候補点群に対して RANSAC を適用した結果、117,686 点が *inlier* として抽出された。推定された海面高度は 32.7656 m、標準偏差は 0.0172 m、推定平面の傾斜角は 0.1543°であった。

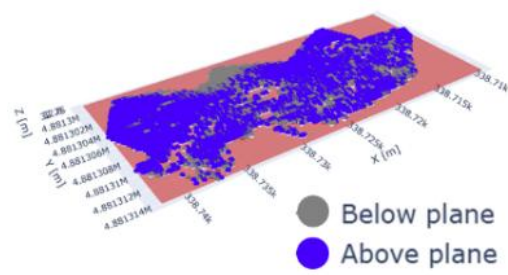


図 3 RANSAC により生成した海面の単一水面

4. 解析結果

4. 1 RANSACによる開放水面高度特定の妥当性検証

サロマ湖第2湖口付近において、開放水面およびニラスを対象に点群高度を比較した。海面およびニラスをそれぞれ抽出し、点群高度の分布を比較した結果を図4に示す。

両者とも高度のばらつきは1 cm程度と小さく、ニラスの平均高度(29.3653 m)が開放水面の平均高度(29.3536 m)より約1.2 cm高い値を示した。

ニラスは海面上に形成される薄氷であることから、この高度差は妥当な結果である。また、点群高度のばらつきも小さいことから、RANSACによる海面高度推定は高精度かつ安定して行われていることが確認された。

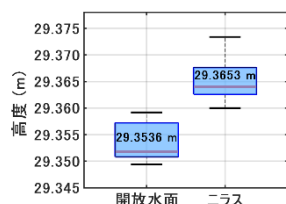


図4 開放水面とニラスの点群高度

4. 2 フリーボード計測

LiDARにより測定したフリーボードと実測値を比較した結果、両者には高い相関が認められ、決定係数は $R^2=0.869$ となった(図5)。

誤差評価の結果、RMSEは2.03 cm、MAEは1.77 cm、Biasは0.153 cmであった。Biasの値が非常に小さいことから、LiDARによるフリーボード推定には系統的な過大評価または過小評価は認められなかった。また、RMSEとMAEの差が小さいことから、顕著な外れ値の影響は小さいことが示された。

さらに、飛行高度と絶対誤差との関係を解析した結果、有意な相関は認められなかった($r=0.191$,

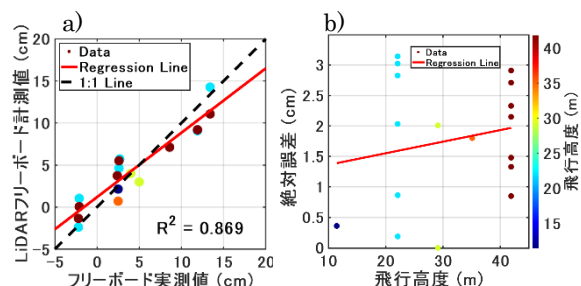


図5 a) フリーボードの実測値とLiDAR計測値の比較と b) 飛行高度と絶対誤差の関係

$p=0.462$)。このことから、本研究で設定した飛行高度範囲(11-42 m)では、飛行高度はフリーボード測定精度に大きな影響を及ぼさないことが示された。

4. 3 海水厚算出

フリーボードから換算したLiDAR推定海水厚と実測氷厚を比較した結果、決定係数は $R^2=0.451$ となり、海水厚の変動傾向を概ね捉えることに成功した(図6)。一方で、RMSEは28.6 cm、MAEは22.6 cm、Biasは-9.6 cmであり、推定海水厚には数十cm規模の誤差が含まれることが確認された。また、Biasが負の値を示したことから、全体として過小評価傾向が認められた。

海水厚と推定誤差との関係を解析した結果、有意な相関は認められなかった($r=0.334$, $p=0.224$)。また、フリーボード誤差と海水厚誤差の間にも有意な関係は認められなかった($r=0.029$, $p=0.545$)。

これらの結果から、LiDARによるフリーボード推定は高精度に実施できる一方で、フリーボードから海水厚へ変換する過程に誤差要因が存在することが示唆された。

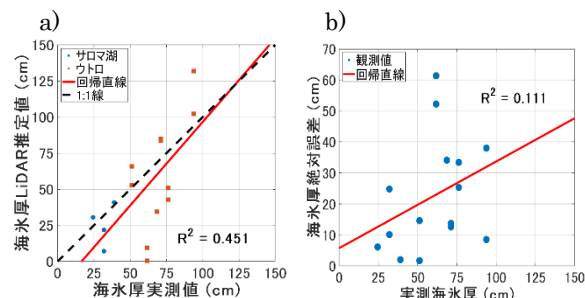


図6 a) 海水厚実測値とLiDAR推定値の比較
b) 海水厚実測値と絶対誤差の関係

5 考察

5. 1 フリーボード計測

フリーボード測定では実測値との高い一致が得られたが、その精度には海面高度推定の安定性に大きく依存すると考えられる。そこでフリーボード計測のさらなる精度向上のため、LiDARのスキャンアングルに着目し(図7a,b)、海面高度推定精度への影響を検討した。

その結果、スキャンアングル 70° で抽出した場合の海面高度の標準偏差は1.34 cmであったのに対し、 10° に制限した場合には0.96 cmまで低下した。一方、平均海面高度はそれぞれ

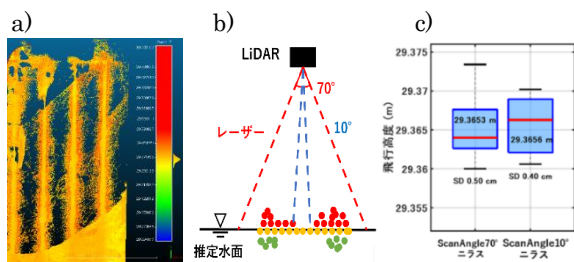


図7 a) 水面点群高度の高さ分布
b) スキャンアングルのイメージ
c) スキャンアングル別の点群高度

29.3653 m および 29.3656 m であり、両者に顕著な差は認められなかった (図7c)。

以上の結果から、スキャンアングルを制限することにより、海面高度そのものにはほとんど影響を与えることはなく、推定値のばらつきを低減できることが示された。これは飛行航路直下の点群ではレーザーの入射角が小さく、大きな入射角に起因する測距誤差の影響を受けにくいためと考えられる。一方で、スキャンアングルを過度に制限すると、一度の飛行で取得できる観測幅が狭くなり、観測効率が低下する可能性がある。そのため、今後は観測範囲と海面高度推定精度の両立を考慮した最適なスキャンアングルの検討が必要である。

5. 2 海氷厚算出

実測フリーボードと実測海氷厚の決定係数は $R^2 = 0.199$ と極めて低く、本研究の対象海氷ではフリーボードのみから氷厚を一意に推定することが困難であった。その主な原因として、式(1)で仮定している静水圧平衡が、観測地点の力学的、地理的条件によって十分に成立していなかったことが考えられる。サロマ湖では、海氷が湖岸や構造物に定着していたため、潮位変動に伴う海面の上下動に海氷が追従できず、局所的なフリーボードが純粋な浮力平衡から逸脱した可能性がある。一方、ウトロ漁港では防波堤などの影響で波浪が複雑に伝搬していたことに加え、観測前日の強風によって小氷片が氷盤上へ乗り上げていた。このため、LiDAR が計測した表面高度には、本来の氷盤表面だけでなく乗り上げた小氷片の影響が含まれ、静水圧平衡の前提条件から逸脱したフリーボードが観測された可能性がある。

6 まとめと氷海航行支援の実用化に向けて

本研究では、UAV-LiDAR により取得した点群

データに対して RANSAC を適用し、海面高度を推定するとともに、フリーボードおよび海氷厚の算出を行った。その結果、905 nm 帯の LiDAR を用いて海面高度を高精度に推定できることを示した。また、フリーボード計測値は実測値と高い一致を示し、高い精度で計測可能であることを確認した。さらに、スキャンアングルを制限することで海面高度推定のばらつきを低減できることを明らかにした。一方で、海氷厚推定には静水圧平衡の仮定が十分に成立しない観測条件では推定精度が低下することが示され、フリーボードから海氷厚への換算過程に改善が必要であることがわかった。

今後は海氷厚推定手法の高度化やリアルタイム解析技術の開発を進めることで、氷海を航行する船舶周辺の迅速かつ高精度な氷況把握が可能となり、航行支援への活用が期待される。

【謝辞】

本研究は、日本科学協会の笹川科学研究助成 (助成番号: 2026-2033) 及び、2026 年度 ArCSIII 若手人材海外派遣プログラムによる助成を受けて実施した。また、本研究における観測は「北極域研究強化プロジェクト「ArCSIII」北極海の保全と利用課題—サブ課題2: 氷海変動の実態把握—」の支援のもとで実施した。ここに記して、関係各位に深く感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 2) 渡邊達也, 舘山一孝 (2021): UAV-SfM 測量による海氷フリーボード計測の試み. 雪氷, **83** (4), 495-502.
- 3) Laxon, S. W., Giles, K. A., Padman, L. and Ricker, R. (2013): Satellite radar altimetry for sea ice thickness retrieval: Methods and validation. Journal of Geophysical Research: Oceans, **118** (4), 1925-1940.
- 4) Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981): Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, **24** (6), 381-395.