

船舶カメラ画像を用いた海氷密接度とメルトポンド割合の 自動算出手法の検討

Automated estimation of sea ice concentration and melt pond fraction using ship-borne camera images

長尾 碧¹, 舘山 一孝²
Midori Nagao¹, Kazutaka Tateyama²

Corresponding author: m3265400156@std.kitami-it.ac.jp (M. Nagao)

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

This study developed an automated method for estimating sea ice concentration (SIC) and melt pond fraction (MPF) using ship-borne camera images acquired in the Arctic Ocean in 2024–2025. After applying a bird's-eye view transformation, open water areas were extracted based on brightness and color components, and SIC was estimated from the remaining ice-covered areas. In addition, MPF was estimated using color components and local image variance within ice-covered areas. The method performed stably under good visibility but tended to overestimate under foggy conditions and underestimate during twilight or when thin ice was present.

1. はじめに

1. 1 研究背景

1978 年以降, 地球温暖化の進行に伴い, 北極海の海氷は長期的な減少傾向を示しており¹⁾, その実態把握は気候変動予測において極めて重要な課題となっている. 海氷は海水に比べて高いアルベドを有するが, 融解に伴ってアルベドが低下し, 海洋への熱吸収を促進する正のフィードバックを引き起こす²⁾. また, 海氷表面の融解によって形成されるメルトポンドは, 海氷に比べてアルベドが低いため, 海氷融解を加速させる要因となる. よって, 気候変動のメカニズムを解明するためには, 海氷域における海氷密接度 (Sea Ice Concentration; SIC) およびメルトポンドの面積割合 (Melt Pond Fraction; MPF) を正確に把握することが重要である.

従来, 船上からの目視による海氷観測が行われてきた. しかし, 目視観測は観測者の経験や主観に依存するため, 判断結果にばらつきが生じる. 一方, 衛星観測は広域の海氷分布を把握できるものの, メルトポンド割合や小規模な開放水面などの詳細な海氷表面の状態を高い空間分解能で連続的に観測することは困難である³⁾.

このため, 船舶カメラ画像を用いて, 観測者の主観に依存しない, 客観的かつ自動的な氷況判別手法を確立することが求められている.

1. 2 研究目的

本研究の目的は, 船舶カメラ画像から SIC と MPF を自動算出する画像解析手法を開発し, その有効性を検証することである. 本研究で開発した手法を活用して教師データを自動生成するアノテーション手法を構築し, 将来的に高精度な機械学習モデルの開発基盤の確立を目指す. これにより, 従来の衛星観測や目視観測では把握が困難であった詳細な氷況観測を高精度かつ効率的に観測し, 北極海氷の融解実態の正確な把握に寄与することを目指す.

2. 使用データ

本研究では, カナダ沿岸警備隊の砕氷船 CCGS Louis S. St-Laurent に搭載した, 北見工業大学開発の氷況観測装置 (写真 1) によって撮影された連続画像を使用した. 解析対象は, 2024 年秋季および 2025 年夏季に行われた 2 回の北極海航海であり, 画像解析に用いた観測航路を図 1 に示す. 対象海域は, ボーフート海およびチュクチ海を航行した航路と, 北極点を縦断した航路である. これらの 2 航海から総数 28,381 枚の画像データが得られた.



写真1 氷況観測装置

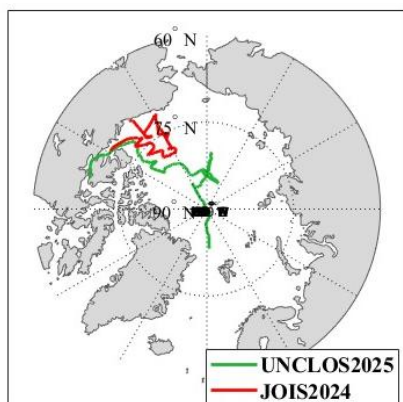


図1 観測航路図

3. 解析手法

船上カメラ画像から船体および空を除外した関心領域を切り出し、鳥瞰補正⁴⁾を適用した。次に、画像特徴量を用いた複数閾値処理により開放水面領域を抽出し、その反転領域を氷域としてSICを算出した。さらに氷域内に対してメルトポンド判別に有効な画像特徴量を適用し、MPFを推定した。

3. 1 鳥瞰補正

船上カメラ画像は海水表面を斜め方向から撮影するため遠近法による幾何学的な歪みが生じる。そこで、カメラの設置高度および俯角を用いて鳥瞰補正を行った。各画素を海水表面上へ射影することで視点依存の歪みを幾何補正し、真上から俯瞰した鳥瞰画像を生成した。

3. 2 分類指標

船上カメラ画像から、表1に示すように海水・開放水面・メルトポンドの判別に有効な特徴量を複数定義した。輝度は海水と開放水面の明暗差を利用した両者の判別に用いた。彩度は色調を持つ開放水面と低彩度な海水の特性差を利用した判別に用いた。さらに、水面の平滑性と氷面の粗さの違いによる構造差を評価するため、テクスチャ特徴量として局所分散および局所標準偏差を導

表1 画像特徴量と定義

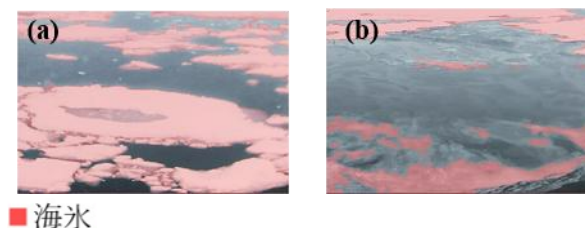
画像特徴量	定義
輝度 (Y)	明るさ成分 (RGB から算出)
彩度 (S)	色の鮮やかさ (RGB での近似)
Excess Blue (ExB)	青成分の 相対的な強さ
Excess Green (ExG)	緑成分の 相対的な強さ
局所分散 (localVar)	近傍画素の輝度の ばらつき
局所標準偏差 (σY)	近傍画素の 輝度標準偏差

入した。さらに、RGB 色成分の光学特性に注目し、海水とメルトポンドにおける B 成分の光吸収特性と、メルトポンドの抽出に有効な G 成分の光学特性⁵⁾を利用して抽出条件を設けた。

4. 結果

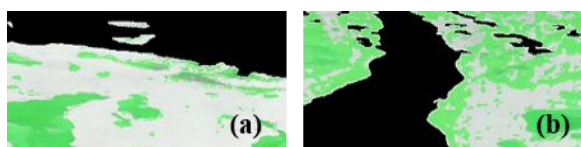
本研究で提案した手法による海水の判別結果の例を図2に示す。気象条件が良好な画像では、海水領域を安定して正確に抽出でき、良好に判別することができた(図2(a))。一方で、特定の撮影条件下における誤検出も確認された(図2(b))。薄氷、低照度、および船体の影が映り込む画像では、氷域を開放水面と誤認し、SICを過小評価する傾向が認められた。これに対し、海面の強い日射反射(サングレア)や霧が発生した条件下では、開放水面を海水と誤認し、SICの過大評価が課題となった。

メルトポンド判別の成功例を図3(a)、判別失敗例を図3(b)に示す。メルトポンド判別では、海水域の誤検出による過大評価が多くみられ、安定した推定精度を得るには至らなかった。一方で、撮影条件が良好な画像では、メルトポンドを適切に抽出できた事例も確認された。



■ 海水

図2 海水判別例 (a) 成功 (b) 失敗 (薄氷)



■ メルトポンド

図3 メルトポンド判別例 (a) 成功 (b) 失敗

5. 精度検証

提案手法の精度検証のため、解析対象画像の一部について、開放水面、海氷およびメルトポンド領域を手動でラベリングし、正解データ（真値）を作成した。この真値を基準として、算出された SIC および MPF の精度を評価した。

本手法による SIC を検証した結果を図 4 (a) に示す。SIC は真値と高い相関係数 $r = 0.872$ を示し、RMSE は 19.9 %, MAE は 7.93 %, Bias は +2.29 % と、高い精度を示した。一方で、一部の画像では真値から大きく乖離する外れ値が認められた。

MPF の検証結果を図 4 (b) に示す。相関係数は $r = 0.386$ と低く、RMSE は 12.0 %, MAE は 8.22 %, Bias は +2.39 % であった。画像間のばらつきが顕著で、特に大幅な誤差が生じる際は過大評価する傾向がみられた。

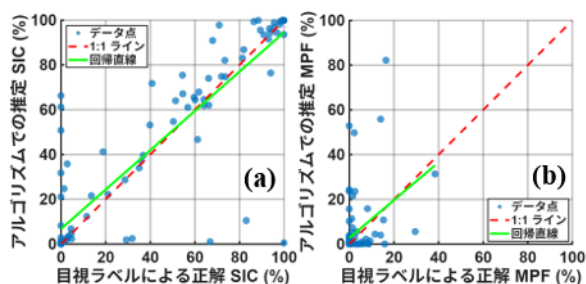


図4 目視ラベルとアルゴリズム算出の相関図
(a) SIC 算出 (b) MPF 算出

6. 考察

まず、SIC 算出における外れ値の要因について検討した。対象画像を分析した結果、過大評価は主に霧、過小評価は低照度や薄氷の影響によって生じることが確認された。これらはいずれも氷盤の輪郭が不鮮明となる共通の課題に起因していた。そこで、前処理としてコントラスト調整および輪郭強調を導入し、その効果を検証した。その結果、図 5 に示すように推定精度の向上が確認された。過小評価の外れ値は一部残ったものの、適

用前より正解値に近づき、RMSE は 15.5 %, MAE は 38.6 %, Bias は +2.14 %, r は 0.941 となり、全体として推定精度の向上が認められた。

次に、MPF の算出精度について考察する。平均誤差は小さいものの標準偏差が大きく、特に大きな誤差が生じる場合には過大評価となる傾向が認められた。この要因として、一部の海氷とメルトポンドでは輝度や RGB 色成分の比率が局所的に類似しており、両者の判別が困難であったことが挙げられる。

そこで、海氷域およびメルトポンド域における RGB 色成分の分布を解析した結果、海氷域では RGB の各波長成分が重なり合うのに対し、メルトポンド域では R 成分のみが他の 2 成分から分離する特徴を示した。また、メルトポンドは G 成分の反射が相対的に強いことが確認された。さらに、従来手法では画像全体の明るさを考慮していないため、低照度条件ではメルトポンド固有の特徴量が埋没し、誤検出や未検出が生じやすいという課題が明らかになった。

これらの知見に基づき、R 成分の分離条件の追加、画像の平均輝度に応じた 2 段階閾値処理の適用、および G 成分に対する膨張処理を導入した。しかしながら、本改善策を適用した結果、図 6 に示すように、RMSE は 18.0 %, MAE は 18.7 %, Bias は +5.48 %, r は 0.390 となり、全体的な精度向上は限定的であった。特に MPF が小さい画像において過大評価が顕著となった。これは、G 成分の膨張処理により、メルトポンドだけでなく隣接する海氷領域まで誤って抽出されたためであると考えられる。

以上の結果から、低 MPF 環境における過大評価の抑制が今後の重要課題であることが明らかとなった。閾値処理による判別には限界があることから、今後は機械学習モデルの導入によってさらなる高精度化を目指したい。

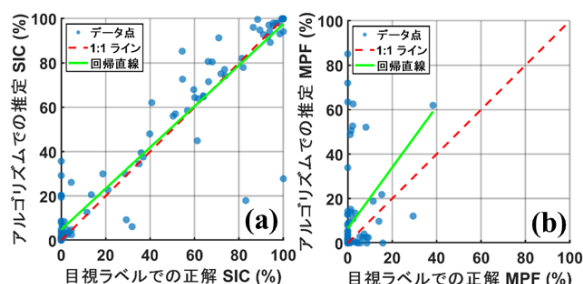


図5 目視ラベルとアルゴリズム算出の相関図
(改善策適用後) (a) SIC 算出 (b) MPF 算出

7. 船上目視観測データとの精度検証

提案手法の実用可能性を評価するため、船上目視観測データとの比較による SIC の精度検証を行った。その結果、RMSE は 39.2 %, MAE は 25.6 %, Bias は -29.9 %, r は 0.642 となり、一定の相関は得られたものの、真値を用いた検証結果と比較して誤差は全体的に増加した (図 7)。この主な要因として、画像解析と目視観測の観測範囲および観測時間の違いが挙げられる。船上目視観測では周囲 360°の海域全体を対象として評価するのにに対し、本手法は前方カメラで撮影された領域のみを解析対象としているためである。さらに、目視観測は 1 時間に 1 回 (約 15~20 分間) 実施されるのにに対し、画像解析では 3 分に 1 回撮影された画像を目視観測の前後 15 分間の平均値を使用している。この時空間的な不一致が誤差を生むと推察される。以上のことから、本手法の実用化に向けて、全方位 (360 度) を撮影するカメラシステムを構築することで、目視観測との整合性の向上を目指す。

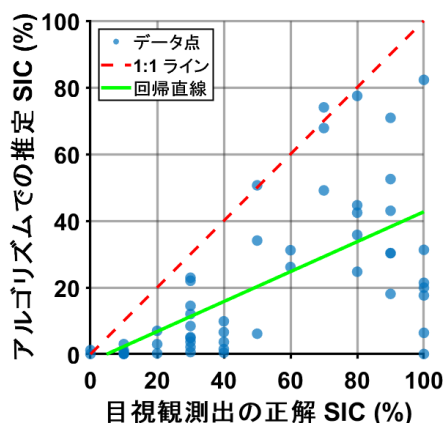


図 7 船上目視観測とアルゴリズム算出の SIC 相関図

8. まとめ

本研究では、氷況把握の自動化と高精度化を将来の目標に、船舶カメラ画像による SIC および MPF の自動算出手法を構築・検証し、その結果から手法の改良を試みた。その結果、SIC は特定環境時に誤判定が生じること、MPF は光学特性の重複から限定的な精度にとどまった。しかし、SIC の算出は、霧や反射の影響が小さい画像では高精度なデータ生成が可能であった。今後は判別精度向上のため機械学習セグメンテーションを導入する。さらに、北極域研究船みらいIIの全方位カ

メラ画像を用いた AI 自動判別を試み、実用化を目指す。

【謝辞】

本研究は、北極域研究強化プロジェクト「ArCS III」北極域の保全と利用課題 サブ課題 2「氷海変動の実態把握」の支援を受けて実施した。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) 国立極地研究所 (2026): Arctic Winter Sea Ice Extent Fails to Expand and Sets a New Record Low in 2026.
<https://www.nipr.ac.jp/english/info/notice/20260430.html> (2026 年 6 月 18 日閲覧)
- 2) Curry, J. A., Schramm, J. L., and Ebert, E. E. (1995): Sea ice-albedo climate feedback mechanism, *Journal of Climate*, **8**, 240–247pp.
- 3) Heyn, H. -M., Zhang, Q., Knoche, M. and Skjetne, R. (2017): A System for Automated Vision-Based Sea-Ice Concentration Detection and Floe-Size Distribution Indication From an Icebreaker, *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2017)*, **8**, Paper No. OMAE2017-61822,
- 4) doi:10.1115/OMAE2017-61822.
- 5) Bertozzi, M., Broggi, A. and Fascioli, A. (1998): Stereo inverse perspective mapping: theory and applications. *Image and Vision Computing*, **16**(8), 585-5901pp.
- 6) 田中康弘 (2020): 夏季北極海における氷況把握のための画像解析法の改良. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 76 (1), 22-32.