

論文

北極海における氷況把握のための画像解析法の開発 —自動化した表面状態判別とその測定結果—

田中 康弘^{1*}, 舘山 一孝¹, 高橋 修平², 亀田 貴雄¹, 榎本 浩之³

要 旨

メルトポンドは氷や雪より低いアルベドを持ち、日射吸収量が増加するとアイスアルベドフィードバックが進行する。本研究では北極航海観測で得られた船前方の氷況を撮影したカメラ画像から開放水面、メルトポンド、海水を検出する画像解析法を開発した。この手法ではまず、画像の明度ヒストグラムを平滑化するためフーリエ領域におけるフィルタリングを行い、表面状態を3つに分類した。目視による表面状態の判別を真値としてこの結果と検討すると、高い正答率が得られたのはブラックマン窓を用いて遮断周波数を0.05ならびにフィルタ長を51とした低域通過フィルタであった。この正答率は開放水面と海水の一方が存在する1ピークで89.5%、開放水面と海水またはメルトポンドと海水の2種類が混在する2ピークで80.5%、開放水面、メルトポンドと海水の3種類が混在する3ピークで64.0%であった。さらに、1ピークでは明度の閾値、2ピークでは赤および緑成分のヒストグラムの関係から表面状態をそれぞれ2つに判別し、メルトポンドが存在する2ピークの正答率は88.2%であった。以上の手法から航跡上の表面状態を自動的に把握することが可能になった。

キーワード：北極、海水、画像解析、メルトポンド

Key words: Arctic, Sea ice, Image analysis, Melt pond

1. はじめに

海水は、気候システムの重要な構成要素であり、北極域の放射バランスに重要な影響を与えている。衛星マイクロ波観測によれば1978年以降、夏期北極の海水面積は減少傾向を示しており(Comiso, 2012)、その海水面積の減少は、低気圧活動が活発化すること(Simmonds and Keay, 2009)、海洋表面の熱フラックスの変化や北極温暖化を促進すると指摘されている(Screen and Simmonds, 2010)。

アルベドの高い海水が減少すると低いアルベド

の開放水面が増加し、日射吸収量が増加する。開放水面に吸収された日射は海水の側部と底面の融解熱となり(*e.g.*, Maykut and McPhee, 1995; Nihashi *et al.*, 2005)、急速に海水面積が減少するアイスアルベドフィードバックがはたらく。このフィードバックに関連するアルベドの変化は、メルトポンドの割合や深さ、氷表面の状態などの影響を受けており(Grenfell and Perovich, 2004; Eicken *et al.*, 2004)、特に夏のアルベドはメルトポンドの割合に最も強く依存する(Eicken *et al.*, 2004; Polashenski *et al.*, 2012)。

メルトポンドのアルベド(0.29)は、裸氷や新雪のアルベド(0.64, 0.87)の半分以下である(*e.g.*, Perovich, 1996; Perovich *et al.*, 2002)ため、海水域のアルベドを低下させる。この影響で海水表面でより多くの日射を吸収し、海水融解(Tschudi *et al.*, 2008; Ehn *et al.*, 2011; Itoh *et al.*, 2011)に影響を与える。つまり、メルトポンドの定量的な評

1 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

2 オホーツク流水科学センター

〒094-0023 北海道紋別市元紋別 11 番地 6

3 国立極地研究所

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

* 連絡先: tikyuu_green@yahoo.co.jp

価は地球や北極の気候変動を理解するため、海水のアルベドを精度良く評価することやメルトボンドの分布を正確に測定することが必要である(Perovich *et al.*, 2011; Curry *et al.*, 1995; 2001).

光学センサおよびマイクロ波放射計などを用いた衛星観測は、広域の海水面積を評価する上で有効な手段である。例えば、Rosel and Kaleschke (2012) と Rösel *et al.* (2012) は、雲の影響が50%以下の中分解能分光放射計(MODIS: Moderate Resolution Image Spectrometer) データと既存研究の結果を利用し、メルトボンド割合の検出アルゴリズムを開発した。しかし、夏の北極海では曇りが続くため(Inoue *et al.*, 2005; Schweiger, 2004), 光学センサによる観測は制限されている。一方、マイクロ波放射計は昼夜や天候に左右されることなく、海水分布の観測が可能である。このセンサは空間分解能が数キロメートルと粗いため、衛星観測データの精度を検証する上で地上のメルトボンド分布を正確に把握する必要がある。

これまでに地上のメルトボンド割合を正確に把握するため、様々な手法が報告されている。例えば、カラー画像のヒストグラムから手作業で4つの表面状態のカテゴリに分類し、閾値によってメルトボンドの領域を決定する手法(Perovich *et al.*, 2002), 画像毎にヒストグラムの閾値を決定し開放水面・メルトボンド・海水の3つを判別する方法(Inoue *et al.*, 2008) などがある。近年では砕氷船から撮影したカラー画像ヒストグラムから天候別に閾値を決定し、メルトボンドと海水(氷または積雪)の2種類を判別する研究(Sankelo *et al.*, 2010) が行われている。このようにヒストグラムによる領域分割の研究は進んでいるものの、表面状態の判別は手法によって判断基準が異なり、メルトボンドの測定結果に違いが生じることになる。そのため、表面状態を自動的に判別できれば、現在や過去の画像データから得られたメルトボンド割合などの測定結果との比較が行いやすい。また、Fetterer and Untersteiner (1998) は航空写真の2つのピーク(峰)を持つ二峰性ヒストグラムをメルトボンドと海水で構成された表面と仮定したが、開放水面と海水で構成された表面も二峰性になる。この開放水面とメルトボンドを自動的に判別できれば、アルベドの季節変化をより

正確に捉えるだけでなく、衛星観測データとの比較をより精度よく行うことが可能である。

本研究では画像ヒストグラムから開放水面、メルトボンド、海水の3種類の検出を目的として、2005年より2012年まで夏から秋にかけて実施された砕氷船による北極海観測で得られた前方の海水状況を撮影したカメラ画像から表面状態を5つのタイプ(タイプ1: 開放水面のみ, タイプ2: 海水のみ, タイプ3: 開放水面と海水, タイプ4: メルトボンドと海水, タイプ5: 開放水面, メルトボンドと海水)に判別する画像解析法の開発を行った。その上で、画像解析法の精度検証の結果と各年における開放水面、メルトボンド、海水の割合の測定結果を報告する。

2. 北極海における海水の盛衰

夏期の海水上には積雪が融解水として水溜りとなったメルトボンドが形成される。メルトボンドは夏期の北極海では最大で海水面積の50%から60%にまで広がることが知られており(Fetterer and Untersteiner, 1998; Eicken *et al.*, 2004), 一年氷上でもメルトボンドは生じる。一年氷は多年氷よりも表面が滑らかで、より広い範囲でメルトボンドが広がる傾向があり(*e.g.*, Perovich *et al.*, 2009), 一年氷の平らな氷面上ではメルトボンドの割合が90%まで上昇する観測例も示されている(Perovich *et al.*, 2011)。

図1に北極海の気温、日射量およびアルベドの変動と海水の盛衰を示す。図1aは1986年から2010年および70°Nから80°NにおけるNCEP(National Center for Environmental Prediction)再解析データの気温および日射量の月平均値である。図1bはアルベドの季節変化の概念を示している。ここで、アルベドは開放水面で0.06, メルトボンドで0.2から0.4, 新雪の0.87の値を参考にした(*e.g.*, Perovich, 1996; Perovich *et al.*, 2002)。図1cは北極海における海水の盛衰の概念を表したものである。メルトボンドは6月上旬頃から現れ始め、発達するにしたがって水平方向と鉛直方向に拡大し、0.2から0.4のアルベドを示すため、海水が存在しているにも関わらず日射を吸収する。また、海中への透過光も増えるため、海水の表面だけでなく、底面の融解の促進させており、

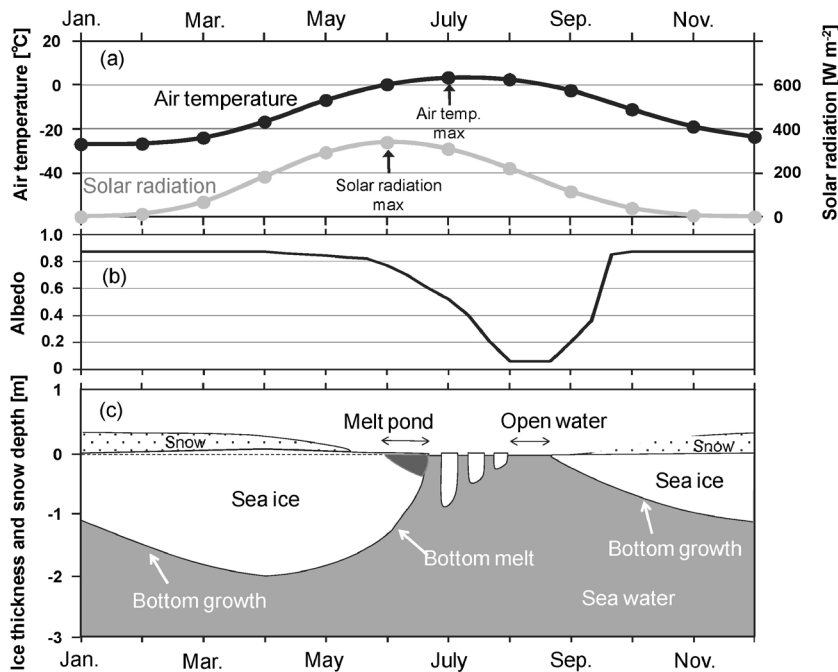


図 1 北極海における気温と日射量 (a), アルベド (b), 海水の盛衰の概念図 (c).
(a) は 1986-2010 年, 70° N-80° N の NCEP 再解析データを用いた.

メルトポンドが発達すると底面融解部分と繋がる。つまり、メルトポンドの底が抜けるとアルベドが約 0.1 まで低下し、開放水面と同じ値を示す。

7 月から 8 月になると気温と日射量は減少し始めるが、開放水面に日射が入射することにより、正のアイスアルベドフィードバックが進行する。9 月になると気温が氷点下を下回り、結氷期に入る。この時期のアルベドは 6 月から 8 月の融解期とは異なり、海面にニラス（厚さ数 cm から 10 cm の薄く張った海水）が形成され、その上に雪が積もると急激にアルベドが上昇する。なお、本研究で使用している画像データは 7 月から 9 月の融解後期から結氷期が始まる時期の航海観測から得られたものである。

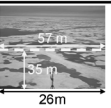
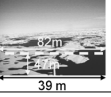
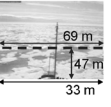
3. 観測概要

本研究は、2005 年の国際観測プロジェクト HOTRAX (Healy-Oden TRans-Arctic EXpedition), 2008 年の CHINARE (CHInese National Arctic Research Expedition), 2009 年から 2012 年のカナダの観測プロジェクト JOIS (Joint Ocean Ice

Study) で得られた前方カメラ画像を用いた。HOTRAX は米国沿岸警備隊のヒーリー (U.S. Coast Guard Cutter Healy), CHINARE は中国極地研究所の雪龍 (MV Xue Long), JOIS はカナダ沿岸警備隊のルイス・サローラン (CGC Louis S. St-Laurent) を使用した。

表 1 に各航海で取得されたカメラ画像の詳細を示す。各航海では船前方の海水状況を撮影したカメラ画像を取得した。ここで、カメラ画像とは静止画である。この画像のサンプリング間隔について、Lu *et al.* (2010) ではおよそ 8 分間隔で撮影された航空写真 (98 m × 67 m スケール) が取得された。これを用いた海水密接度の解析結果は、衛星観測データから推定された海水密接度とよく一致することを示した。ここで海水密接度とは海水の割合だけでなく、表面にメルトポンドがある海水の割合も含めたものである。本研究ではこの結果を考慮し、各年 10 分以下の間隔で画像のサンプリングを行った (表 1)。また、気象データ (日射量 [2008 年のみ], 気温, 湿度, 風速, 風向, 気圧), 海面または海水表面の輝度温度および赤外

表 1 各年における観測期間とカメラの撮影設定.

Year	Observation period	Days	Camera	Interval (min)	Images	Image size (pixel)	Planimetric scale (m)	Observer
2005	4 Aug. — 23 Sep.	50	KADEC 21-EYE II	5	14,400	1280 × 1024		Kazutaka Tateyama (KIT)
2008	9 Aug. — 4 Sep.	25	Blink Shot	10	3,600	320 × 240		
2009	25 Sep. — 12 Oct.	18	NetCam XL	1 or 5 or 10	11,756	1024 × 768		University of Alaska
2010	22 Sep. — 14 Oct.	23			4,060			
2011	15 Jul. — 11 Sep.	59			34,233			
2012	10 Aug. — 8 Sep.	29			4,871			

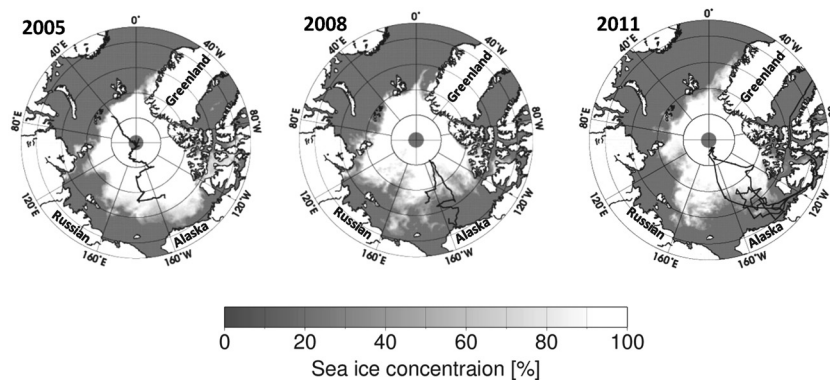


図 2 砕氷船の航跡 (実線) と 8 月の平均海水氷接度の衛星画像 (AMSR-E).

放射温度を観測した. 2011 年は本研究グループメンバーが乗船した JOIS のカナダ海盆区間 (7 月 23 日から 8 月 18 日) のほか, アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター (IARC) の共同研究者が乗船して前方カメラと気象の観測を行った. 北西航路区間 (7 月 15 日から 7 月 22 日) と北極点観測区間 (8 月 19 日から 9 月 11 日) のデータも使用した.

2009 年と 2010 年は観測開始が 9 月中旬以降と遅かったため, ほとんどのメルトポンドは再凍結していた. また, 2012 年は衛星観測史上最少の夏期海水面積を示した年で, 8 月上旬以降の観測海

域の海水は消失してしまっていた. これらの観測年についても画像解析を行ったが, メルトポンドがほとんどなかったため, 本研究では 2005 年, 2008 年, 2011 年の画像データを使用した画像解析の精度検証およびメルトポンドの測定結果について報告する.

図 2 に画像データの取得が行われた砕氷船の航跡と, 海水状況を把握するため衛星マイクロ波放射計 AMSR-E から得られた各年 8 月の平均海水氷接度の分布を示す. 図 2 より 2005 年は他の年より海水氷接度 90% 以上 (高氷接度海水域) の地域を長い期間観測した. また, 2008 年と 2011 年

は緯度が低くなるにつれて海水密度度が低くなる海域を観測, 緯度 80 度以上では高密度度海水域を観測した。

4. 解析方法

4.1 画像解析法による表面状態の判別

(1) 概要

図 3 にカメラの撮影範囲と表面状態の解析範囲を示す。北極海観測では砕氷船に破碎されていない自然状態の海水を把握するため, 船の進行方向に向けて海水状況を撮影した。ここで, θ は水平線以下の撮影範囲の角度, $\theta/2$ は本研究での解析範囲を示す。また, 解析範囲は撮影した海面全体に対して解析を行うと, 遠方の海面は画像解析精度が低下する(村本ら, 1991; Weissling *et al.*, 2009) ため, 算出精度が高い(船に近い)範囲と考えられる図 3 の $\theta/2$ のみとした。

図 4 に本研究における画像解析法を示す。これは平滑化した画像の明度ヒストグラムから得られたピーク数およびピーク時の明度値 (B_p) の閾値, 赤 (R) 成分と緑 (G) 成分のヒストグラムの関係によるアルゴリズムによりヒストグラムを領域分割し, 開放水面, メルトポンド, 海水の領域を比率で表す方法(画像解析法)をフローチャートで表したものである。本研究における明度とは色の明るさを 0 から 255 (256 階調) で示す尺度, 明度

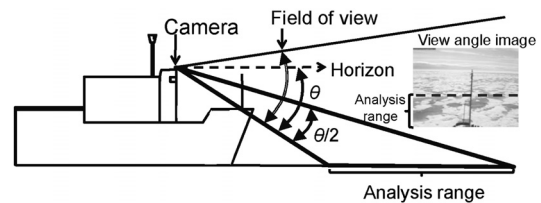
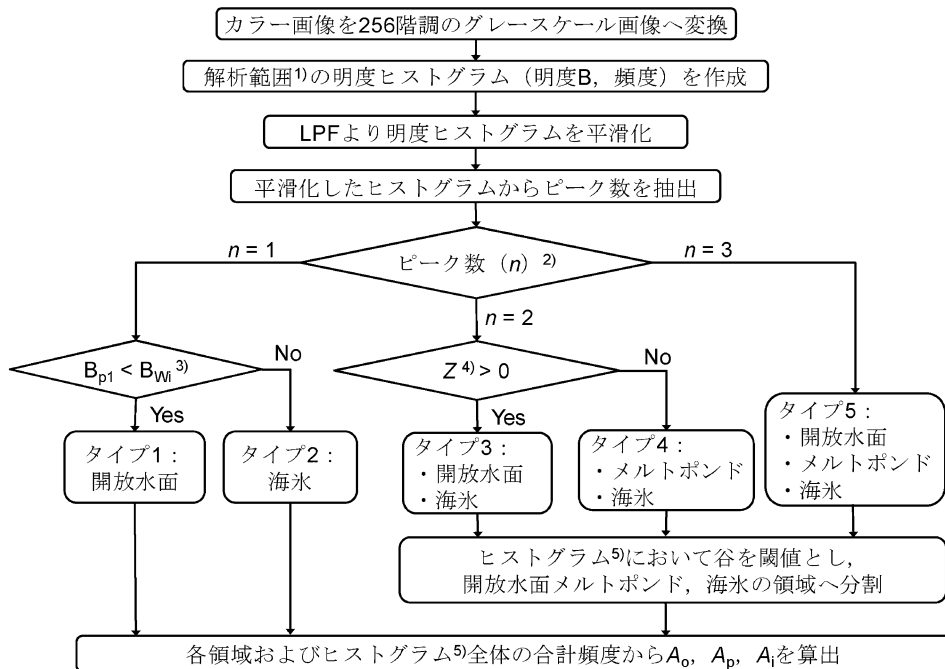


図 3 カメラの撮影範囲と表面状態の解析範囲。



- 1) 図 3 の $\theta/2$ の範囲。
- 2) $n = 4$ 以上は未検出とする。
- 3) B_{wi} の値はタイプ 1 と 2 の判別閾値。
- 4) Z はタイプ 3 とタイプ 4 を判別する変量を示す。
- 5) 平滑化した明度ヒストグラムを示す。

図 4 表面状態を判別する画像解析法のフローチャート。

値 (B_p) とは平滑化した明度ヒストグラムのピーク時の明度としてそれぞれ定義する. ここではまず, ヒストグラムは細かい凹凸によって多くのピークを持っている. これは非線形関数と見なすことができ, 最小二乗法を用いて曲線をフィッティングさせ, 最大で3つのピークを与えた. その結果, 対象とするヒストグラムによって明度の分布範囲や次数などを任意に設定しなければならないという問題が生じた.

次に, 本研究では明度ヒストグラムの不連続信号を一連の空間周波数成分と見なした. そのためには, 最初に波形特性を把握する必要がある. このような処理を行う場合, ウェーブレット変換や窓フーリエ変換が考えられるが(中野ら, 1999), 窓フーリエ変換の方が空間周波数の分解能力に優れており, 本研究のようなサンプル数が制約された波形に対して有効である. この波形は多くの振動データを含んでおり, 多くのピークを持っている. そこで, 本研究ではヒストグラムを平滑化するため, 窓フーリエ変換によるフィルタリングを行う. このフィルタリングに使用した低域通過フィルタ (LPF: Low Pass Filter) の仕様については4.1節(2)で述べる.

ここで, n は平滑化されたヒストグラムの極大値の数を示しており, 本研究ではこれをピーク数と定義した. n が1の1ピークはタイプ1またはタイプ2, n が2の2ピークはタイプ3, またはタイプ4, n が3の3ピークはタイプ5に分類される. この時点では1ピークと2ピークはそれぞれ2種類のタイプ(タイプ1と2, タイプ3と4)が混在しており, さらに2種類のタイプへの分類が必要である. ただし, 3ピークはタイプ5の1種類のみであるため分類を行う必要がない.

まず, 1ピークではタイプ1とタイプ2のそれぞれ(100データ)のピークの平均明度の中央を閾値としてピーク時の明度値による1変数の判別分析を行う. 以下, タイプ1(w: open water)と2(i: sea ice)を判別する閾値を B_{wi} と表記する.

次に, 2ピークではタイプ3とタイプ4のそれぞれ一つ目のピークが開放水面またはメルトボンドのどちらに属するかの判別を試みた. しかし, 1ピークと同様に明度値を用いたが, 霧の影響で開放水面とメルトボンドの判別が困難であった.

一方, カラー情報のRGB値ではメルトボンドが存在すると, RとGおよびRのヒストグラムのピーク間の差が大きくなるため, この特性を利用して両タイプの判別を行う. この2要素はそれぞれ次式から得られる.

$$X_1 = \frac{R_1 - G_1}{R_1 + G_1} \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (2)$$

ここで, X_1 は R_1 と G_1 の差を R_1 と G_1 の和, X_2 は R_2 と R_1 の差を R_2 と R_1 の和でそれぞれ正規化した値, R_1 と R_2 は, R成分のヒストグラムを平滑化したヒストグラムにおける一つおよび二つ目のピークの濃度値をそれぞれ示し, G_1 も同様である. 本研究における濃度とは, RGBの濃さをそれぞれ0から255(256階調)で示す尺度と定義する. 両タイプの判別方法は, 得られたデータと2要素の特徴空間から最も遠い距離に引かれる基準線(線形判別式)との距離からタイプ3とタイプ4を判別した. ここであるサンプルと判別式までの距離を判別得点 Z といい, 統計分類などの多変量解析などにおいて定量的に評価することができる尺度である. 一般的な距離とは異なり, 既知の両タイプの分散共分散行列に基づいて得られた線形判別式との距離である. この判別式は次式から得られる.

$$Z = aX_1 + bX_2 + c \quad (3)$$

ここで, Z は判別得点, a , b および c は係数である. a , b および c は分散と共分散行列を用いて求めることができる(中村, 1971). この時得られる Z が正であればタイプ3, 負であればタイプ4に判別される.

最後に, 平滑化した明度ヒストグラムの領域を開放水面, メルトボンド, 海氷に分割し, 各領域および平滑化したヒストグラム全体の頻度から開放水面の割合 A_o , メルトボンドの割合 A_p , 開放水面の割合 A_i を算出する. ここでは領域分割する手法として, 閾値はヒストグラムの谷付近に存在すると考え, 谷を閾値とするモード法を用いた. このモード法による領域分割については6章で述べる. ただし, タイプ1とタイプ2は谷が存在せず, ピーク数により分類された時点で割合は100%

となる。なお、本研究において n が 4 以上の場合は未検出となり、各割合の算出結果に含まれない。

(2) LPF による明度ヒストグラムの平滑化

FIR (Finite Impulse Response) フィルタは歪のない直線位相で波形を出力することができるため、5.2 節で述べるヒストグラムのピーク数を利用した表面状態の判別のように、位相特性を重視した出力に有効である。ここでは多くの振動データを含むヒストグラムを平滑化するため、窓関数を用いたフーリエ級数法を使用した。その上で、ヒストグラムを FIR フィルタの低域通過フィルタ (LPF) を用いて出力した波形のピーク数 n から観測海域における表面状態の判別を行った。 n は LPF フィルタの設計仕様または周波数特性によって異なり、遮断周波数 f_{cut} 、フィルタ長 N および窓関数によって決まる。

256 階調のヒストグラムはサンプリング数を 256 と扱うことができ、その逆数がサンプリングレート ($1/256=0.003906$) になる。ここで単位は無次元である。また、原波形を完全に再現するため、原波形の最大周波数 (1) の 2 倍以上の周波数でサンプリングする必要がある (サンプリング定理)。しかし、本研究ではサンプリング数に制約があるため、 f_{cut} は最大周波数の半分 (0.5) までしか波形を再現できない。

例として図 5 に遮断周波数 0.2 の周波数応答を示す。 N を 13 から 83 まで増加させると、通過域と阻止域が広く、遷移域が狭くなり、周波数応答が良くなる。しかし、周波数応答を良くしてもリップル (Ripple) を減少させることはできない。特に、阻止域にリップルがあると必要な周波数帯の波形が出力に現れ、精度良くヒストグラムを平滑化できない可能性がある。しかし、窓関数を用いるとリップルを軽減させることができる。窓関数には様々な種類があり、それぞれフィルタ特性に与える性質が異なる (三上, 2005)。

本研究では遮断周波数、フィルタ長および窓関数を変化させ、平滑化したヒストグラムから最適なピーク数が得られる画像解析法の開発を目指した。なお、画像解析法の精度検証には目視判別法を使用した。

4.2 目視判別法

本研究における目視判別法は、解析領域に対し

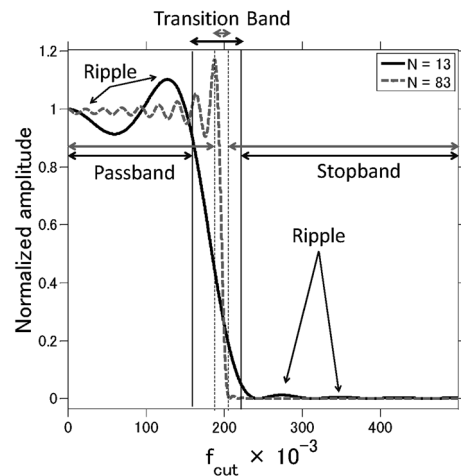


図 5 N の違いによる遮断周波数 0.2 の周波数応答。

て画像を視覚的に判別し、開放水面 (A_o)、メルトポンド (A_p)、海水 (A_i) の割合を 10 分の 1 単位で表したものとする。一年氷上のメルトポンドは、この深さに依存して明度の異なる灰色を呈するのに対して、多年氷上のメルトポンドは、池の底面にある氷の状況によって青から緑色の特徴を持つ。この特徴を A_p の目視算出の判断基準とした。また、9 月上旬以降のデータに海水の成長過程に分類されるニラスと新生氷を確認した。特に、ニラスは暗いニラスと明るいニラスに分類され、それぞれ画像解析法において海水と開放水面に近い特徴を持っていることが考えられる。本研究の目視判別法では、暗いニラスは開放水面、明るいニラスを海水とした。

A_o 、 A_i については、ASPeCT (Antarctic Sea ice Processes and Climate) protocol (Worby and Allison, 1999) を参考に海水密度度 (C : Ice concentration) を決定し、 $A_o (=10-C)$ 、 $A_i (=C-A_p)$ を算出する。ASPeCT protocol は本来、現場 (船上目視) 観測で用いられるが、本研究では画像解析法と同様の範囲の海水状況の画像に対して C と A_p を目視算出する判断基準に用いた。

本研究では、開放水面のみ ($A_o=100\%$) をタイプ 1、海水のみ ($A_i=100\%$) をタイプ 2、開放水面と海水 ($A_o+A_i=100\%$) をタイプ 3、メルトポンドと海水 ($A_p+A_i=100\%$) をタイプ 4、開放水面、メルトポンドと海水 ($A_o+A_p+A_i=100\%$) をタ

表2 窓関数とヒストグラムの違いによる正答率.

		Rectangular			Hamming			Blackman		
		1 peak	2 peaks	3 peaks	1 peak	2 peaks	3 peaks	1 peak	2 peaks	3 peaks
Brightness	2005	99.5	86.5	57	99.5	86	59	99.5	86.5	59
	2008	100	88	72	100	86.5	74	100	87	75
	2011	98.5	82	72	98.5	83.5	74	99	83.5	75
	Mean	99.3	85.5	67.0	99.3	85.3	69.0	99.3	85.5	69.7
Red	2005	99.5	83.5	61	99.5	84.5	65	99.5	85.0	65
	2008	100	86.5	49	100	86	71	100.0	86	57
	2011	98.5	77	70	98.5	78	71	99	78	71
	Mean	99.3	82.3	60.0	99.3	82.8	69.0	99.3	83.0	64.3
Green	2005	99.5	86.5	66	99.5	85.5	61	99.5	85.5	61
	2008	100	87.5	74	100	86	77	100	86.5	77
	2011	98.5	80.5	67	98.5	81.5	69	98.5	82	69
	Mean	99.3	84.8	69.0	99.3	84.3	69.0	99.3	84.7	69.0
Blue	2005	99.5	88	60	99.5	87.5	64	99.5	88.5	64
	2008	100	86.5	74	100	85	74.0	100	85.5	73
	2011	98.5	73.5	61.0	98.5	74.5	64.0	98.5	74.0	64
	Mean	99.3	82.7	65.0	99.3	82.3	67.3	99.3	82.7	67.0

イプ5とした。次節で、画像解析法による表面状態の判別正答率を正確に検証するため、砕氷船で強制的に破碎された海水を含むものやカメラのレンズに水滴、着氷や着雪が生じた際の視界不良、日没前などの目視では判別が困難な画像データは除外し、タイプ1からタイプ5において、それぞれランダム抽出した画像を100データを使用した。

5. 目視判別法と画像解析法の比較

本章では表面状態の判別精度を検証するため、画像解析法と目視判別法による表面状態判別の比較を行った。

5.1 最高正答率時の窓関数

本節における正答率とは、目視判別法と画像解析法によるピーク1(タイプ1またはタイプ2)、2ピーク(タイプ3またはタイプ4)、3ピーク(タイプ5)の判別の一致率である。例えば、ある画像に対して目視判別法を用いて開放水面と海水が混在するタイプ3、またはメルトポンドと海水が混在するタイプ4と判別し、画像解析法において n が2となった場合は正答となる。ここで判別の精度検証に用いた窓関数は一般的な矩形窓(Rectangular)、ハミング窓(Hamming)およびブラックマン窓(Blackman)、画像ヒストグラムは明度成分、RGB成分である。本研究において明度成分は色の明るさを、RGB成分は赤(R)、緑(G)、青(B)の濃さをそれぞれ0から255(256階

調)で表した頻度分布である。

表2に窓関数とヒストグラムの違いによる正答率を示す。ヒストグラムの成分別の平均正答率はそれほど大きな違いは見られないが、明度成分で正答率が高く、B成分で低い傾向がある。

1ピークのような単一表面状態の平均正答率は、各成分のヒストグラムおよび各窓関数で99.3%を示し、良好な結果となった。また、2ピークのような開放水面と海水、またはメルトポンドと海水が混在する表面状態でも平均正答率は、80%以上を得ることができ、最も高い正答率は明度成分の矩形窓とブラックマン窓を使用した場合の85.5%であった。さらに、3ピークの平均正答率は、他の成分に比べて明度成分のブラックマン窓で最も良い69.7%を示し、すべてのピークで明度成分が高い正答率を示す傾向がある。

本研究では表2の平均正答率を考慮し、明度ヒストグラムの平滑化をブラックマン窓で行うことにした。一般に、ブラックマン窓は、離れた周波数成分の影響を受けにくい。また、この窓関数は周波数分析の精度(周波数分解能)を良くするために、他の窓関数より N を増加させる必要があるが、明度領域での分析精度(明度分解能)が低下する。しかし、表2のブラックマン窓で最も高い正答率を得られたことから、明度領域での分析精度の低下は正答率にそれほど影響はなかったものと考えられる。

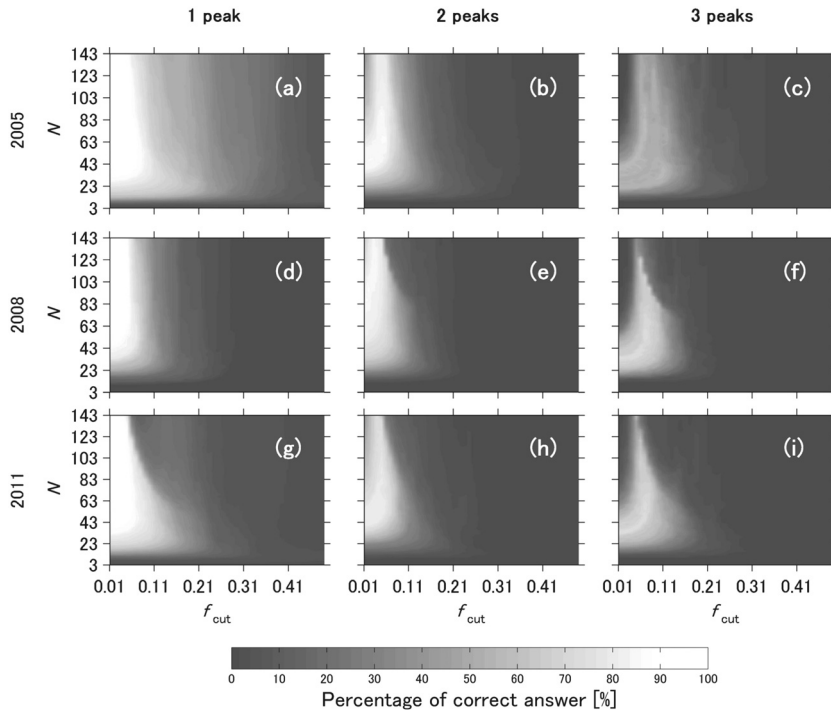


図 6 遮断周波数 (f_{cut}), フィルタ長 (N) における正答率分布. 左列は 2 ピーク, 右列は 3 ピークを示す.

5.2 遮断周波数とフィルタ長と正答率の関係

図 6 に f_{cut} と N における正答率分布を示す. それぞれの年における正答率を見ると, 全体的に f_{cut} が 0.01 から 0.1 程度と N が 23 以上で良い正答率が得られた. また, 各年の正答率分布の特徴に大きな違いはみられない.

図 6 から 1 ピークにおいて最高正答率が得られた f_{cut} は各年共通して 0.01 から 0.03 であった. また, 2 ピークにおいて最高正答率が得られた f_{cut} は 2005 年と 2011 年で共通して 0.05, 2008 年で 0.01 と 0.02 となり, 2008 年のみ違う傾向を示した. 一般的に, 2008 年のような画像分解能の低い画像データは低い周波数成分の波形を多く含んでおり, 高い周波数成分の波形が少なく, 画像が劣化している (中野ら, 1999). そのため, 2008 年の画像データは他の年に比べて低周波成分を多く含んでいることが考えられる. さらに, 3 ピークでは最高正答率が得られた f_{cut} は各年共通して 0.07 であることがわかった. しかし, 2008 年の 2 ピークで良い正答率を得るためには, f_{cut} を 0.01 または 0.02 にしなければならないが, このとき 3

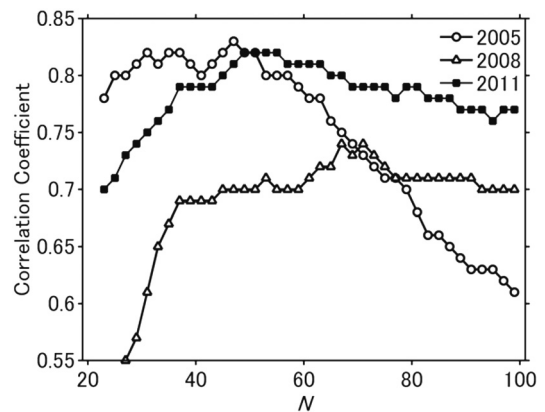


図 7 目視判別法のタイプ判別とピーク数 n と相関 ($f_{\text{cut}}=0.05$).

ピークの正答率 (最高 75%) は 2% から 45% まで低下する.

図 7 に各フィルタ長 N における目視判別法のタイプ判別とピーク数 n (1 から 3) と相関関係 (f_{cut} が 0.05) を示す. 図 7 より 2005 年と 2011 年は共通して N が 49 と 51 での相関が高く, 相関

係数は0.82であった。一方、2008年では N が67と71で相関係数は0.74である。つまり、2008年のように低周波成分を多く含む画像は、各ピークに共通して高い正答率を示す f_{cut} と N の組み合わせを得ることは難しいことがわかった。本研究では2005年と2011年において相関係数と各ピークの正答率が高い f_{cut} が0.05、 N が51の組み合わせを採用した。このとき1ピークから3ピークの正答率はそれぞれ2005年で94%、84.5%、59%、2008年で84%、74%と65%、2011年で90.5%、83%と68%である。

これらの結果から2005年は2ピークと3ピークの正答率の差が、他の年より大きい25.5%であった。2005年の3ピークで誤答だったケースを検証すると、検証サンプル100データ中、誤答数は43データで、そのうち目視判別法で開放水面、またはメルトポンドを1割と判断したデータは、27データであり、誤答だった中の割合で62.7%であった。このようなデータの場合、例えばメルトポンドが数%存在していれば目視判別法で1割と判別されるが、画像解析法では数%のメルトポンドはピークとして検知されなかった。つまり、3ピークにおいてメルトポンドを検出するためには、1割以上存在する必要があると考えられる。そのため、この目視判別法における1割以下の判別の曖昧さが3ピークで誤答された原因の一つと考えられる。また、誤答データ中、12データ(27.9%)は目視判別法により表面状態を判別する際に、比較的濃い霧の状態であった。霧によるコントラストの低下(光学的なぼやけ)で劣化している画像データは、高周波成分を減少させてしまうため、目視判別法では高周波成分を多く含む3ピークとした場合でも、画像解析法では低周波成分を多く含む2ピーク以下と判別されたと考えられる。

以上より、3ピークにおいて水面(開放水面またはメルトポンド)が1割程度のとき、目視判別法の曖昧さや霧が原因で表面状態の判別精度はやや低くなったものの、自動的に画像のヒストグラムから水面と海水を検知することができる。なお、次節では開放水面、メルトポンド、海水を検出するため、1ピークで開放水面と海水、2ピークで開放水面とメルトポンドの判別手法を検討し

た。

5.3 判別分析によるタイプ判別

図8に代表的な海水状況のカメラ画像と明度ヒストグラムを示す。aは開放水面のみ(タイプ1: $A_o=100\%$)、bは海水のみ(タイプ2: $A_i=100\%$)、cは開放水面と海水が混在(タイプ3: $A_o+A_i=100\%$)、dはメルトポンドと海水が混在(タイプ4: $A_p+A_i=100\%$)、eは開放水面、メルトポンド、海水の3種類が混在(タイプ5: $A_o+A_p+A_i=100\%$)する場合である。1は晴れ、2は曇りの状態を示す。

(1) 1ピークにおける判別

単一の表面状態である開放水面(タイプ1)は晴れ(図8a₁)の方が、曇り(図8a₂)よりもピーク値 B_{p1} は小さい。これは曇りや霧の時、海面に雲の色が反射することや霧により海面が白く写ることが原因と考えられる。また、タイプ1(図8a₁と図8a₂)とタイプ2(図8b₁と図8b₂)において、 B_{p1} の違いは80以上であることがわかる。この1ピークではタイプ1とタイプ2のそれぞれ(100データ)のピークの平均明度の中央である閾値 B_{wi} とし、 B_{p1} が B_{wi} より小さければタイプ1(開放水面のみ)と判別される。ここで、 B_{wi} は、2005年104、2011年で122である。ただし、2008年においては、タイプ2(海水みの)のサンプルが存在しなかったため、検証サンプル中のタイプ1において B_{p1} の最大値を B_{wi} とした。

(2) 2ピークにおける判別

ここでの正答率とは、画像解析法を用いて2ピークに混在する開放水面と海水(タイプ3)とメルトポンドと海水(タイプ4)を判別した結果と目視判別法のタイプ判別の一致率である。

図8cと図8dはそれぞれ開放水面と海水、メルトポンドと海水が2種類混在する場合の画像である。El Naggar *et al.* (1998)は、画像の明度ヒストグラムの解析結果からメルトポンドの明度が51から128であることを示した。しかし、本研究では図8c₁とc₂のように、開放水面のピークの明度値 B_{p1} がそれぞれ75と77を示している。つまり、使用した画像は撮影時のカメラの種類や気象条件が異なり、ピーク時の明度値によるタイプ3とタイプ4の判別は困難である。

図8では晴れと曇りの画像およびヒストグラム

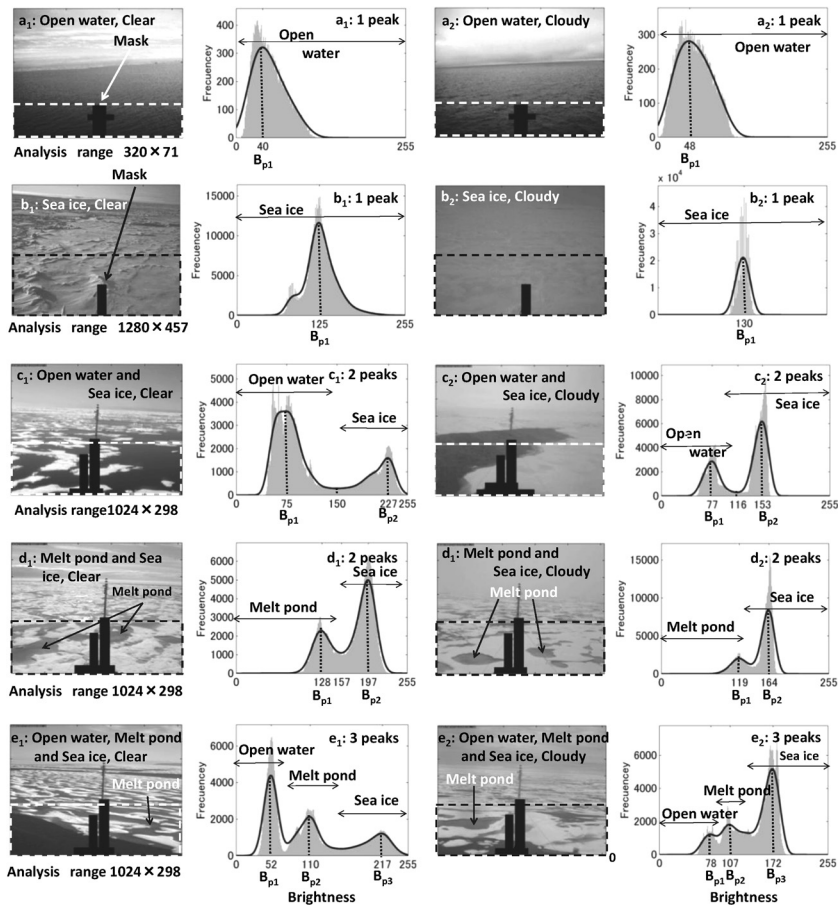


図 8 代表的な海水状況のカメラ画像と明度ヒストグラム (灰色). 上から順に a: 開放水面 (a₁ は晴れ, a₂ は曇りの状態を示す. 以下同様), b: 海水, c: 開放水面と海水, d: メルトポンドと海水, e: 開放水面とメルトポンドと海水. 黒い曲線は, 灰色のヒストグラムを LPF により平滑化したヒストグラム.

を示したが, 霧になるとさらにコントラストが悪くなり, ピーク間の差が小さくなるので, 結果としてピーク時の明度値によるタイプ 3 とタイプ 4 の判別は困難であった. そこで, 本研究では RGB 成分のヒストグラムに着目し, 未知の画像がどちらのタイプに属するかを推定する判別分析を行った.

図 9 に 2 ピークにおけるカメラ画像と各成分のヒストグラムを示す. 図 9a は開放水面と海水 (タイプ 3), 図 9b はメルトポンドと海水 (タイプ 4) の曇りにおける画像データである. 図 9 のヒストグラムはそれぞれ上の画像に対応しており, 上から順に明度, R (赤) 成分, G (緑) 成分, B (青) 成分である. 図 9a の RGB 成分のヒストグラム

は, 明度ヒストグラムと同じ形状を持ち, 図 9b もそれぞれ同じ形状のヒストグラムを持つ. しかし, 図 9a の R_1 と R_2 の差 ($181 - 88 = 93$) は, 図 9b の R_1 と R_2 の差 ($155 - 93 = 62$) と比べて大きい. G 成分および B 成分のヒストグラムでも同様の特徴を持ち, B 成分が最もピーク間の差 ($161 - 111 = 50$) が狭くなる. また, 図 9b では R_1 , G_1 , B_1 の順に, 濃度が大きくなる. この濃度の違いは, 可視域において水とメルトポンドの反射率が青の波長域で最も高く, 波長が長くなるほど低くなるのが原因と考えられる. さらに, R 成分と G 成分の関係は図 9a のヒストグラムにおいて違いは見られないが, 図 9b は R_1 (93) より G_1 (106) の方が大きくなるのがわかる. ここではメルト

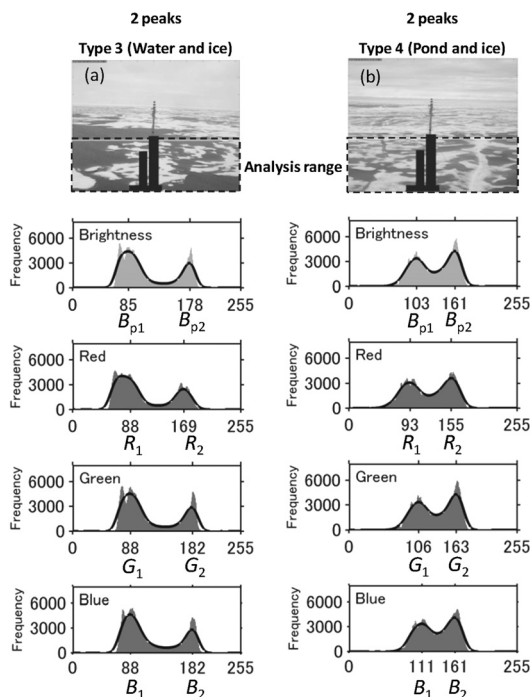


図 9 2 ピークにおけるカメラ画像と各成分のヒストグラム。曲線は、各成分のヒストグラムを LPF により平滑化したヒストグラム、a と b は両者とも曇りにおける画像データ。

ポンドが存在すると、 R_1 と G_1 および R_1 と R_2 の差が大きくなる特性を用いて判別分析を行った。なお、B 成分は R および G 成分よりコントラストが悪くなるにつれて 2 ピークが 1 ピークとなるため、この判別に用いることができなかった。

図 10 に 2 ピークにおける $X_1 = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1)$ と $X_2 = (R_1 - G_1) / (R_1 + G_1)$ の関係とその関係から得られた線形判別式を示す。 R_1 と R_2 は、R 成分のヒストグラムを LPF により平滑化したヒストグラムにおける一つおよび二つのピーク時の濃度値をそれぞれ示している。 G_1 も同様である。また、本研究で利用した画像データはカメラの種類や撮影時の気象条件が異なるため、 $R_2 - R_1$ を $R_2 + R_1$ 、 $R_1 - G_1$ を $R_1 + G_1$ でそれぞれ正規化した。

ここではまず、式 (1) と式 (2) から得られた X_1 と X_2 の 2 要素の集合において、タイプ 3 とタイプ 4 の集合から最も遠い距離に引かれる基準線である線形判別式を求める。次に、ある画像ヒスト

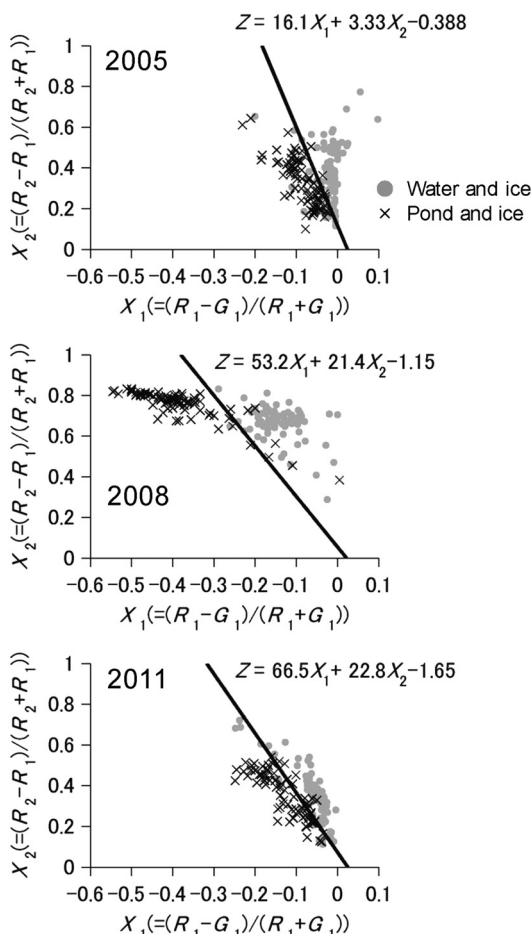


図 10 2 ピークにおける X_1 と X_2 の関係。 R_1 と R_2 は、R 成分のヒストグラムを LPF により平滑化したヒストグラムにおける一つおよび二つのピークの濃度をそれぞれ示す。 G_1 も同様。直線はタイプ 3 とタイプ 4 の集合から最も遠い引かれる基準線（線形判別式）を示し、あるデータの X_1 , X_2 とその式より Z が正であればタイプ 3、負であればタイプ 4 となる。

グラムから得られた X_1 と X_2 を求める。これらと式 (3) より判別得点 Z が正となればタイプ 3、負でタイプ 4 に判別される。すでに述べたように 3 ピークはタイプ 5 のみであるため、判別分析を行う必要はない。

その結果、タイプ 3 とタイプ 4 の集合は各年で異なる分布を示した。そのため、各年別々の線形判別式を用いた。この時の判別正答率は 2005 年で 85.9%、2008 年で 95.1%、2011 年で 84.2% を示

した。いずれの年でも正答率は、80%を超え、平均正答率は88.2%となった。2ピークの2変数によるタイプ3とタイプ4の判別の誤答のケース(2005年)を検証すると、以下の2つが原因であることがわかった。一つは目視判別法により暗いニラス(開放水面)と海水が混在する場合(タイプ3)に、メルトポンドと海水(タイプ4)と誤答される場合である。このときの天候は曇りおよび霧であり、霧により暗いニラスが白くなることが原因であると考えられる。つまり、暗いニラスをメルトポンドとして判別してしまう。もう一つは天候が曇りおよび濃い霧のとき、タイプ4がタイプ3と誤答される場合である。このとき、目視判別法においてメルトポンドと判別できるが、暗い画像ではヒストグラムにおいて開放水面とほとんど同じ明度および濃度を持つことがわかった。

以上のように、 X_1 と X_2 の関係からタイプ3とタイプ4の集合が異なる分布を示したものの、2ピークで良好な判別正答率を得ることができた。また、 X_1 と X_2 の関係が異なる原因としてカメラの種類によってRGB成分の分光感度が異なるため、各年のRおよびG成分の頻度分布の関係に違いが生じたと考えられる。このような場合、あらかじめ明度分布などの正規化を行うと撮影時の天候やカメラの種類が異なる場合でもヒストグラムの解析が行いやすい(高木・下田, 1991)。

5.4 入力画像の正規化について

すでに述べたようにヒストグラムを正規化しておく、ヒストグラムの解析が行いやすい。これに対して、本研究では図10のように正規化した $R_2 - R_1$ と $R_1 - G_1$ の関係から同じ特徴の分布を得ることができず、各年別々の線形判別式を用いた(5.3節(2))。また、本研究では図7より相関の高かったフィルタ長 N を用いているが、それぞれのピークに対して必ずしも最適の N とは限らない。例えば、3ピークのような最も複雑な形状を持つヒストグラムは、霧が原因でピーク間の距離が狭くなりやすいため、遮断周波数 F_{cut} を大きくするか、 N をより狭くする必要がある(5.2節)。このように明度ヒストグラムなどの分布範囲が異なるとき、分布の正規化を行うことで最適な F_{cut} や N を得やすいと考えられる。

これらの問題点を解決するため、ヒストグラム

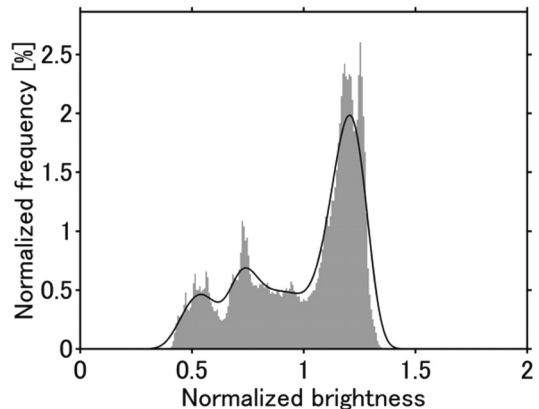


図 11 正規化した明度ヒストグラム(灰色)。曲線は正規化したヒストグラムをLPFにより平滑化したヒストグラム。

の平滑化前に分布の正規化を行う必要がある。しかし、正規化前と後で検出されるピーク数に違いが生じる可能性があるため、正規化前および後のヒストグラムを用いてピーク数の違いを検証した。例として図11に正規化した明度ヒストグラム(灰色)を示す。図11の灰色は図8e₂のヒストグラムの明度を入力画像の平均明度で正規化した。また、頻度は各明度の頻度を全頻度で正規化した。図11より平滑化したヒストグラムは、正規化前のヒストグラム(図8e₂)と同様、3ピークと検出され、それぞれの結果に違いはなかった。このように正規化後のピーク検出の結果と本研究の結果にはそれほど違いはないものと考えられる。今後は明度分布の正規化などにより有用性を高めた画像解析法に改良することが課題である。

6. メルトポンドの測定結果

本研究で提案する手法は、画像ヒストグラムから海水の表面状態を5つのタイプに判別した後、開放水面の割合 A_0 、メルトポンドの割合 A_p 、海水の割合 A_i を算出する。しかし、平滑化した明度ヒストグラムの谷を閾値とするモード法を用いて領域分割を行っているが、図8c₁のようにピーク間(B_{p1} と B_{p2})の谷がはっきりしない場合、必ずしも最適な閾値が得られるとは限らない。ここで、例として図8c₁の閾値を ± 10 した場合の A_i の誤差を求めた。その結果、 A_i の誤差は ± 0.5

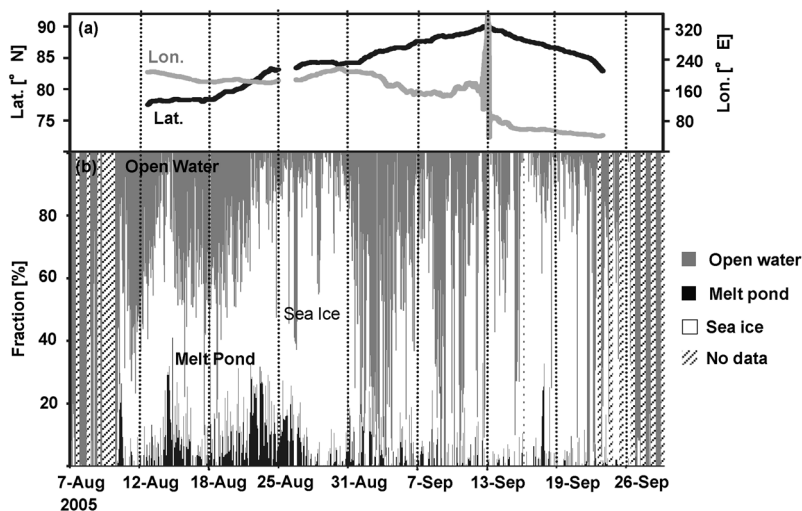


図 12 2005 年航海中の海水状況. a は米砕氷船の緯度経度, b は海水状況 (開放水面: 灰色, メルトポンド: 黒, 海水: 白).

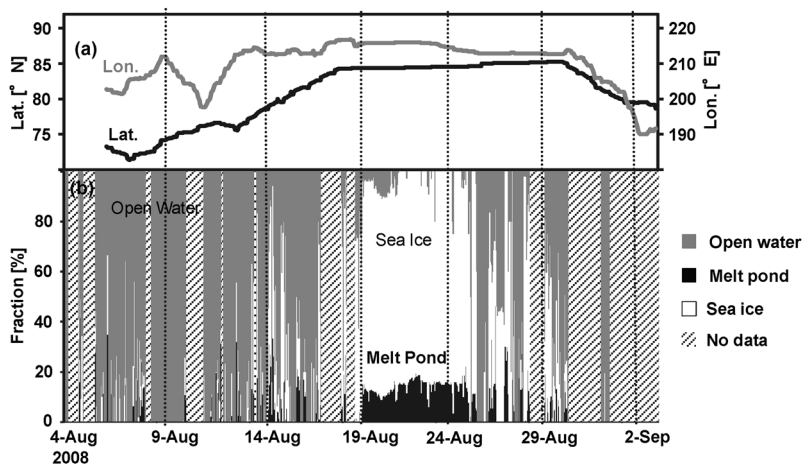


図 13 2008 年航海中の海水状況. a は中国砕氷船の緯度経度, b は海水状況 (開放水面: 灰色, メルトポンド: 黒, 海水: 白).

%であった. さらに, 図 8c₁ と同様に, 図 8e₁ のメルトポンドと海水のピーク (B_{p2} と B_{p3}) 間も同じ特徴が見られたため, A_p と A_i の誤差を求めた. その結果, 両者ともに $\pm 0.7\%$ であった. したがって, 閾値の設定による誤差は 1% 程度であると考えられる.

図 12 から図 14 に画像解析法による開放水面, メルトポンド, 海水の測定結果を示す. それぞれの図において, (a) は砕氷船の緯度経度, (b) は

海水状況 (A_o (%), A_p (%), A_i (%), 斜線 (No data) はデータの欠損を表す. なお, メルトポンドと海水の割合は, 開放水面を含めた観測 (解析範囲) エリア全体に対する割合である.

2005 年 (図 12b) と 2011 年 (図 14b) において, メルトポンドは北極点付近まで形成されている. しかし, A_p は 2005 年のボーフォート海側で数 % から 30 %, 大西洋側で数 % から 10 % 程度を示し, ボーフォート海側から大西洋側に向かうに連

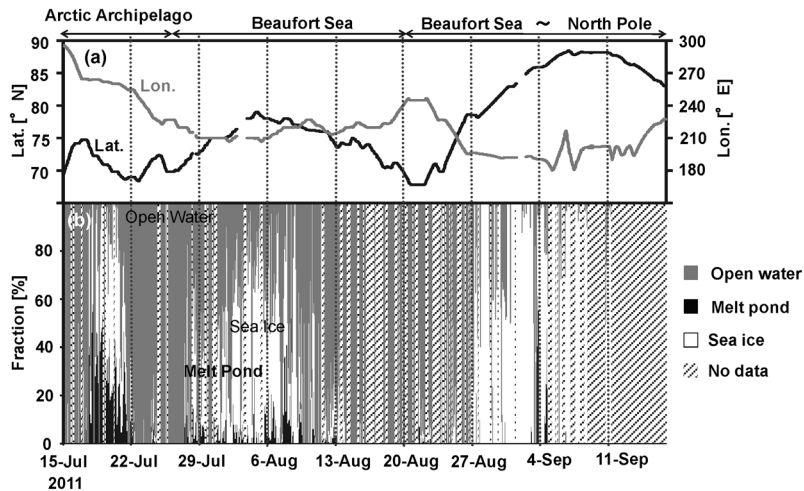


図 14 2011 年航海中の海水状況. a はカナダ砕氷船の緯度経度, b は海水状況 (開放水面: 灰色, メルトポンド: 黒, 海水: 白).

れてメルトポンドが減少傾向を示した. また, 2011 年の 8 月下旬以降ではほとんど形成されていない. これは気温が氷点下になり, メルトポンド表面が凍ったためと考えられる.

一方, 2008 年 (図 13b) は 2005 年と 2011 年と比べて, 高密度度海水域 ($A_p + A_i > 90\%$) をほとんど観測することができなかったが, A_p は 20% を超える地点も存在する. ただし, 8 月 20 日から 26 日の停船期間 (84.5° N から 85° N, 同じ海水を観測) では, 海水密度度 ($A_p + A_i$) が 90% から 100% であることがわかる.

この海水密度度の情報は, 図 2 のような衛星マイクロ波観測データからも得ることができる. また, 地上観測データをもとに衛星搭載型の合成開口レーダーやマイクロ波放射計から氷厚推定する研究が進みつつある. これらのデータは気候変動を理解する上で重要である. 特に, 海水密度度は海水表面が乾いた地域で 10% から 15%, 夏においてメルトポンドが形成される地域で 15% 以上の誤差があることがわかっている. これはマイクロ波の特性上, メルトポンドを開放水面と判別されるためである. さらに Rösler *et al.* (2012) では, 衛星マイクロ波放射計からの海水密度度と, これより分解能に優れた衛星光学センサからの海水密度度を比較すると, 前者においてメルトポンドを開放水面と判別してしまったため, 密度度を 40%

過小評価することを示した. つまり, メルトポンドの割合を把握できれば, 衛星マイクロ波放射計を用いた海水密度度の推定精度の向上させることができると思われる.

第一節でも述べたが, 近年では光学センサ (Rösler *et al.*, 2012) や合成開口レーダー (Kim *et al.*, 2013) からメルトポンド分布を推定する研究が行われつつある. しかし, これらのセンサは雲による観測地域および空間分解能の制約を受ける. 将来的に衛星マイクロ波放射計データと本研究の結果を検討し, 広域のメルトポンド分布を定量的に把握するアルゴリズムの開発および精度評価を行うことが課題である. また, 本研究ではフィードバックに関連してアルベドの季節変化に最も強く依存するメルトポンドの割合を求めたが, このサイズ, 形状や深さ等の測定が可能になれば, より正確なアルベドの季節変化を捉えることができる. さらに, サイズや形状を捉えるためには平面補正の必要があるため, カメラの設置高等のデータ取得も必要である.

7. まとめ

本研究では, 砕氷船による北極海観測で得られた前方の海水状況を撮影したカメラ画像を用いて表面状態を判別する画像解析法の開発と精度検証を行った.

各表面状態におけるヒストグラムのピーク数とこのときの閾値 (B_{wi} , $R_1 - G_1$, $R_2 - R_1$) の関係を解析し, 自動的に開放水面, メルトポンド, 海水の3種類を検出する画像解析法を開発した. ピーク数の検出には, 明度ヒストグラムに対して低域通過フィルタ (LPF) を用いて平滑化を行った結果から表面状態を1ピーク (タイプ1と2), 2ピーク (タイプ3と4), 3ピーク (タイプ5) に分類した. ここで目視判別の結果を正答として高い正答率が得られた LPF 仕様は, ブラックマン窓を用いて遮断周波数を 0.05 ならびにフィルタ長を 51 に設定した場合である. この仕様による正答率は, 1ピークで 89.5%, 2ピークで 80.5%, 3ピークで 64.0% であった. また, 2ピークにおいて赤成分と緑成分のヒストグラムの関係から開放水面とメルトポンドを判別し, 正答率は 88.2% を示した.

3種類が混在する表面状態 (3ピーク) において誤答のケースは, 水面の割合が1割程度と霧のケースがほとんどであった. この誤答の原因は, 目視判別法における1割以下の判別精度とコントラストの低下による高周波成分の減少が考えられる. 一方, 2ピークの開放水面とメルトポンドの判別では開放水面をメルトポンドと判別されることが多く, 霧が原因であることがほとんどであった. 今後は霧の状況下におけるメルトポンドの判別精度を向上させるだけでなく, 明度分布の正規化などにより有用性を高めた画像解析法に改良することが今後の課題である.

また, 画像解析法によるメルトポンド割合の測定結果から, 2005年は北極点付近まで形成されているが, 2011年ではほとんど形成されていない. この原因は気温の影響が考えられるが, 地上データは時期や海域が異なるため, 原因を把握することが難しい. 将来的には天候の影響を受けにくい衛星搭載型マイクロ波放射計データとの比較を行い, 広域のメルトポンド分布を検知するアルゴリズムの開発を行いたい.

謝 辞

本研究は第3期および第4期 IARC-JAXA 北極研究プロジェクトの助成を受けて行ったもので

す. 2009年から2012年のルイスサンローランに設置したカメラから得られた画像データは IARC の Jennifer Hutchings 博士から提供いただいたものです. 本研究を行うにあたり, ご指導いただいた国立極地研究所の牛尾収輝博士, 北見工業大学の富山和也博士ならびに原田康浩博士, 白川龍生博士, 現地観測にてご協力いただいた柴田啓貴博士, ならびに共同研究者, 関係者の皆様に, 大変お世話になりました. 匿名の2名の査読者からは適切な指摘をいただくことができ, 本原稿に反映させることができました. ここに記して感謝申し上げます.

文 献

- Comiso, Josefino C., 2012 : Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover. *J. Climate*, **25**, 1176–1193.
- Curry, J. A., J. L. Schramm and E. E. Ebert, 1995 : Sea ice-albedo climate feedback mechanism, *J. Climate*, **8**, 240–247.
- Curry, J. A., J. L. Schramm, D. K. Perovich and J. O. Pint, 2001 : Applications of SHEBA/FIRE data to evaluation of snow/ice albedo parameterizations, *J. Geophys. Res.*, **106** (D14), 15, 345–15, 356.
- Ehn, J. K., C. J. Mundy, D. G. Barber, H. Hop, A. Rossnagel, and J. Stewart, 2011 : Impact of horizontal spreading on light propagation in melt pond covered seasonal sea ice in the Canadian Arctic, *J. Geophys. Res.*, **116**, C00G02, doi : 10.1029/2010JC006908.
- Eicken, H., T. C. Grenfell, D. K. Perovich, J. A. Richter-Menge and K. Frey, 2004 : Hydraulic controls of summer Arctic pack ice albedo, *J. Geophys. Res.*, **109**, C08007, doi : 10.1029/2003JC001989.
- El Naggar, S., C. Garrity, R. O. Ramseier, 1998 : The modeling of sea ice melt-water ponds for the High Arctic using an Airborne line scan camera, and applied to the Satellite Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 2373–2394, doi : 10.1080/014311698214785.
- Fetterer, F. and N. Untersteiner, 1998 : Observations of melt ponds on Arctic sea ice, *J. Geophys. Res.*, **103**, 24, 821–24, 835.
- Grenfell, T. C. and D. K. Perovich, 2004 : Seasonal and spatial evolution of albedo in a snow-ice-land-ocean environment, *J. Geophys. Res.*, **109**, C01001, doi : 10.1029/2003JC001866.
- Inoue, J., B. Kosovic, and J. A. Curry, 2005 : Evolution

- of a storm driven cloudy boundary layer in the Arctic. *Boundary-Layer Meteorology*, **117**, 213–230.
- Inoue, J., J.A. Curry and J.A. Maslanik, 2008 : Application of Aerosondes to melt-pond observation over Arctic sea ice, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **25** (2), 327–334.
- Itoh, M., J. Inoue, K. Shimada, S. Zimmermann, T. Kikuchi, J. Hutchings, F. McLaughlin and E. Carmack (2011) Acceleration of sea-ice melting due to transmission of solar radiation through ponded ice area in the Arctic ocean : Results of in situ observation from icebreakers in 2006 and 2007, *Annals of Glaciology*, **52** (57), 249–260
- Kim, D.J., Hwang, B., Chung K., H. Lee, S.H, Jung H.S and Moon W.M., 2013 : Melt pond mapping with high-resolution SAR : The first view, *Proceedings of the IEEE*, **101** (3), 748–758, doi : 10.1109/JPROC.2012.2226411.
- Lu, P., Li, Z., Cheng, B., Lei, R. and Zhang, R., 2010 : Sea ice surface features in Arctic summer 2008 : Aerial observations, *Remote Sensing of Environment*, **114**, 693–699.
- Maykut, G. A. and M. G. McPhee, 1995 : Solar heating of the Arctic mixed layer, *J. Geophys. Res.*, **100**(C12), 24, 691–24, 703, doi : 10.1029/95JC02554.
- 三上直樹, 2005 : はじめて学ぶディジタル・フィルタと高速フーリエ変換, CQ 出版株式会社, 195 pp.
- 村本健一郎, 松浦弘毅, 小杉正貴, 遠藤辰雄, 1991 : 氷状況観測映像の画像処理, 信学技報, **E91**–11.
- 中村正一, 1971 : 例解 多変量解析入門, 日刊工業新聞社, 178–179.
- 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫, 1999 : ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版株式会社, 150.
- Nihashi, S., K. I. Ohshima, M. O. Jeffries and T. Kawamura, 2005 : Sea-ice melting processes inferred from ice-upper ocean relationships in the Ross Sea, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, **110**, C02002, doi : 10.1029/2003JC002235.
- Perovich, D. K., 1996 : The optical properties of sea ice, *Monograph*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, **96-1**, 25 pp., Hanover, N.H.
- Perovich, D. K., T. C. Grenfell, B. Light, and P. V. Hobbs, 2002 : Seasonal evolution of the albedo of multiyear Arctic sea ice, *J. Geophys. Res.*, **107**(C10), 8044, doi : 10.1029/2000JC000438.
- Perovich, D. K., T. C. Grenfell, B. Light, B. C. Elder, J. Harbeck, C. Polashenski, W. B. Tucker III and C. Stelmach, 2009 : Transpolar observations of the morphological properties of Arctic sea ice-albedo, *J. Geophys. Res.*, **114**, C00A04, doi : 10.1029/2008JC004892.
- Perovich, D. K., K. F. Jones, B. Light, H. Eicken, T. Markus, J. Stroeve and R. Lindsay, 2011 : Solar partitioning in a changing Arctic sea-ice cover, *Annals of Glaciology*, **52** (57), 192–196.
- Polashenski, C., D. Perovich, and Z. Courville, 2012 : The mechanisms of sea ice melt pond formation and evolution, *J. Geophys. Res.*, **117**, C01001, doi : 10.1029/2011JC007231.
- Rösel, A., and L. Kaleschke, 2012 : Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data, *J. Geophys. Res.*, **117**, C05018, doi : 10.1029/2011JC007869.
- Rösel, A., L. Kaleschke, and G. Birnbaum, 2012 : Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neuronal network, *The Cryosphere*, **6**, 431–446, doi : 10.5194/tc-6-1-2012.
- Sankelo, P., J. Haapala, I. Heiler and R. Eero, 2010 : Melt pond formation and temporal evolution at the station Tara during summer 2007, *Polar Research*, **29**, 311–321, doi : 10.1111/j.1751-8369.2010.00161.x.
- Schweiger, A. J., 2004 : Changes in seasonal cloud cover over the Arctic seas from satellite and surface observations, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12207, doi : 10.1029/2004GL020067.
- Screen, J. A. and I. Simmonds, 2010 : Increasing fall winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L16707, doi : 10.1029/2010GL044136.
- Simmonds, I. and K. Keay, 2009 : Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19715, doi : 10.1029/2009GL039810.
- 高木幹雄, 下田陽久, 1991 : 画像解析ハンドブック, 東京大学出版, 475.
- Tschudi, M. A., J. A. Maslanik, and D. K. Perovich, 2008 : Derivation of melt pond coverage on arctic sea ice using MODIS observation, *Remote Sensing of Environment*, **112**, 2605–2614.
- Weissling, B., Ackley, S., Wagner, P. and Xie, H., 2009 : EISCAM - Digital image acquisition and processing for sea ice parameters from ships, *Cold Regions Science and Technology*, **57** (1), 49–60.
- Worby, A. P. and Allison, I., 1999 : A technique for making ship-based observations of Antarctic sea ice thickness and characteristics : Part I. Observational Techniques and Results, *Research Report*, Antarctic Cooperative Research centre, **14**, 2–3.

Development of an automatic image analysis method for recognizing sea ice conditions on the Arctic Ocean

Yasuhiro TANAKA^{1*}, Kazutaka TATEYAMA¹, Shuhei TAKAHASHI²,
Takao KAMEDA¹ and Hiroyuki ENOMOTO³

¹ *Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507*

² *Okhotsk Sea Ice Museum of Hokkaido, 11-6 Motomonbetsu, Monbetsu, Hokkaido 094-0023*

³ *National Institute of Polar Research, 10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518*

* Corresponding author: tikyuu_green@yahoo.co.jp

Abstract: Because melt ponds have lower albedo than snow and ice, the ice albedo feedback process accelerates to increase the amount of solar absorption and sea ice melt. In this study, an automatic image analysis method is developed in order to detect open water, sea ice, and melt ponds using the forward looking camera images obtained from observations of the Arctic Ocean ice during summer and autumn. Comparing an automatic image analysis to visual observations of the images, we can detect melt ponds on the sea ice. First, this method performs filtering in the Fourier domain to smooth the brightness histogram of the image, and sea ice conditions are classified into three categories. The low pass filter (LPF) specifications for obtaining a high concordance rate were a cutoff frequency of 0.05 and a filter head of 51 using a Blackman window. Then, the concordance rate was 89.5 % at one peak (for open water or sea ice only), 80.5 % at two peaks (for open water and sea ice, or melt pond and sea ice), and 64.0 % at three peaks (for open water, melt pond, and sea ice). Second, the surface conditions are classified into two types by using the brightness threshold at one peak, and making a relationship of the red and green histogram at two peaks. As a result, the concordance rate of two peaks achieved 88.2 %. Finally, our image analysis method automatically enabled surface condition distinctions on cruise tracks in the Arctic Ocean.

(2014年7月5日受付, 2014年12月12日改稿受付, 2015年2月2日最終改稿受付,
2015年2月24日受理, 討論期限2015年9月15日)