

既往藻場調査データを活用した 藻場空撮画像解析による藻場面積の推定手法 —調査時期の異なる教師データの活用について—

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム ○本山 賢司
松本 卓真
森 健二

近年、ブルーカーボンのCO₂固定効果への期待の高まりを受け、今後のCO₂固定効果を確認する藻場調査の需要増加が見込まれる。他方、藻場調査を担うダイバーが減少し、効率的な藻場調査手法の開発が急務である。藻場面積は藻場空撮と同時期に行った藻場調査を教師データとした画像解析で推定するが、本研究では、調査時期が異なる藻場調査の結果を教師データとして利用する方法を検討したので、その概要について紹介する。

キーワード：藻場、画像解析、省力化、ブルーカーボン

1. はじめに

日本は、2015年12月の第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で採択された温室効果ガス排出削減等のための国際枠組みであるパリ協定に参加し、その後2021年10月に2050年までのカーボンニュートラル達成に向けた基本的な考え方を示す「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定し、国連へ提出したり¹⁾。近年、大気中のCO₂の新たな吸収源として、ブルーカーボン生態系（海草藻場、海藻藻場、マングローブ、干潟）に国際的に大きな関心が寄せられている。日本においては、国家戦略として、農林水産省の「みどりの食料システム戦略」における「ブルーカーボンの推進」²⁾、国土交通省港湾局の「命を育むみなとのブルーインフラ拡大プロジェクト」³⁾など、ブルーカーボン生態系の活用が注目されており、北海道内においても、ブルーカーボン生態系によるCO₂吸収量の検討事例⁴⁾やブルーカーボンクレジットの認証事例が増えてきている^{5,6)}。日本国内の藻場面積のうち、海藻藻場が全体の75%（1,225.7 km²）を占めており⁷⁾、日本全国のブルーカーボン生態系による年間CO₂吸収量においても54%と半数以上を占めている⁸⁾。これらのことから、海藻藻場による大気中のCO₂吸収量の検討は今後特に重要となると考えられる。

海藻藻場（以下、藻場）の炭素吸収量を算定する上で、藻場面積や海藻の被度・現存量を把握する必要がある。従来、それらのデータはダイバーによる潜水調査によって取得してきたが、国内の潜watersの数は、高齢化による離職者の増加と若手後継者の不足により、長期にわたって減少していると考えられている⁹⁾。今後増加すること

が予想される藻場調査への需要に応えるためには、潜watersに極力依存しない、効率的な藻場面積推定手法の開発が急務である。水産土木チームでは、無人航空機を用いた空撮による省力的な藻場面積推定手法の開発に取り組んできている（佐藤ら¹⁰⁾、丸山ら¹¹⁾）。空撮画像から藻場面積を推定するためには、教師データとなる海藻被度の実測値が必要であるが、海藻被度のデータ数が不十分であると、教師データとして利用することが困難である。本山ら¹²⁾は、教師データ内を高解像度の空撮画像で細分化することにより、教師データ数の不足を補う手法を検討した結果、従来使用されている海藻の有無の分類精度（60～80%）と同等の精度を確保した上で、藻場面積を約20%の誤差で推定でき、既存の藻場調査データの活用による精度を確保した藻場面積の推定が可能であることを示した。この手法により、これまで面的に必要なであった藻場調査を教師地点のみに絞った調査にすることが可能となり、省力化とコスト削減が期待できるものの、依然として空撮と海藻被度の調査を同時期に実施し続けなければならない。藻場調査の更なる省力化を図るためには、藻場空撮のみで藻場面積や海藻被度分類画像の作成を可能にする手法の開発が必要である。そこで、本研究では、調査時期の異なる海藻被度データと空撮画像の組み合わせにより藻場面積を推定する手法の検討を行った。

2. 材料・方法

(1) 藻場調査

調査は、北海道南西部日本海側に位置する寿都漁港の背後小段付傾斜堤の小段上の藻場を対象として、2018年

6月と2020年6月に行った（図-1）。当該小段上には根固方塊（L:2 m×B:3 m×H:1.2 m）が縦に7列、横に40列に並べられており、上面はウニの食圧を減らす目的で-1.0 mに嵩上げされている。空撮には、2018年・2020年ともに無人航空機（PHANTOM4 PRO, DJI社）を使用し、高度50 mから藻場の空撮画像を取得した。海藻被度データは、両年ともに1 m×1 mの方形枠を用いた潜水士による目視観察により得た。2018年は小段上を縦断する測線を9本設定し、各測線上5 m間隔で目視観察を行ったのに対し、2020年は小段上を縦断する20本の測線を設定し、測線上の根固方塊ごとの海藻被度を調べたため、各年で海藻被度のデータ数は異なり、2018年は計45地点、2020年は計140地点分の海藻被度データを取得した（図-2）。海藻被度は、本山ら¹³⁾の検計結果から、褐藻類と緑藻類の被度の合計値に応じて、5つの階級（ランク5：100～75%、ランク4：74～50%、ランク3：49～25%、ランク2+1：24～1%、ランク0：0%）に分類した。2018年の平均被度（計45地点）は、褐藻類42%、紅藻類19%、緑藻類7%であった。2020年の平均被度（計140地点）は褐藻類28%、紅藻類25%、緑藻類2%であり、2018年と比較すると、紅藻類を除いて平均被度は低い値であった。褐藻類と緑藻類の被度を合計した値をランク別に整理すると、2018年では小段上全体に海藻が繁茂しており、ランク5は全体の11.1%、ランク4は44.4%、ランク3+2+1は40.0%、ランク0は全体の4.4%であった。他方、2020年では小段中央部分の海藻繁茂に衰退が見られ、ランク5は12.9%、ランク4は16.4%、ランク3+2+1は40.0%、ランク0は30.7%であり、2018年と比較して、ランク0の割合が増加した一方で、ランク4の割合が減少していた。

(2) 画像解析

画像解析は、丸山ら¹¹⁾の手法に倣った作業手順で行った（図-3）。まず、無人航空機により撮影した写真を繋ぎ合わせ、ピクセルサイズ5 cmのオルソ画像を作成した。写真毎のオーバーラップ率は、進行方向に80%以上、進行方向の直角方向に60%以上とした¹³⁾。次に、画像編集ソフト（GIMP ver.2.10.32）を用いて、TIFFファイル形式のオルソ画像を24bitのBMPファイルに変換した後、画像解析ソフト（RSP ver.3.06）で幾何補正を行い、空間解像度0.1 mの画像を作成した。そして、潜水調査により測定した海藻被度と空撮画像の色データ（RGB値）をもとに、各海藻被度ランクおよび割石の色データの差が統計的に有意（ $p < 0.05$ 、Tukey-Kramer 検定）となるように分類区分を設定し、上記の画像解析ソフト上で、最尤推定法により海藻被度分類画像を作成した。

藻場面積は、海藻被度分類画像における分類ランク毎の海藻被度の中央値（%）、各ランクに分類された画素数およびデータの画素サイズ（1画素：0.01 m²）から算出した。

丸山ら¹¹⁾の手法と異なる点として、本研究では、幾何

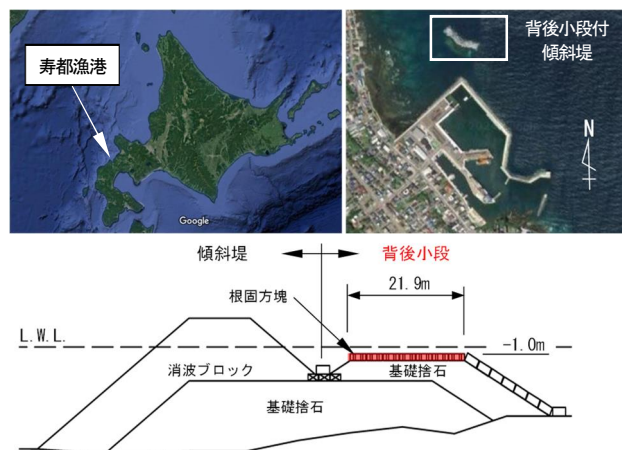


図-1 寿都漁港背後小段付傾斜堤

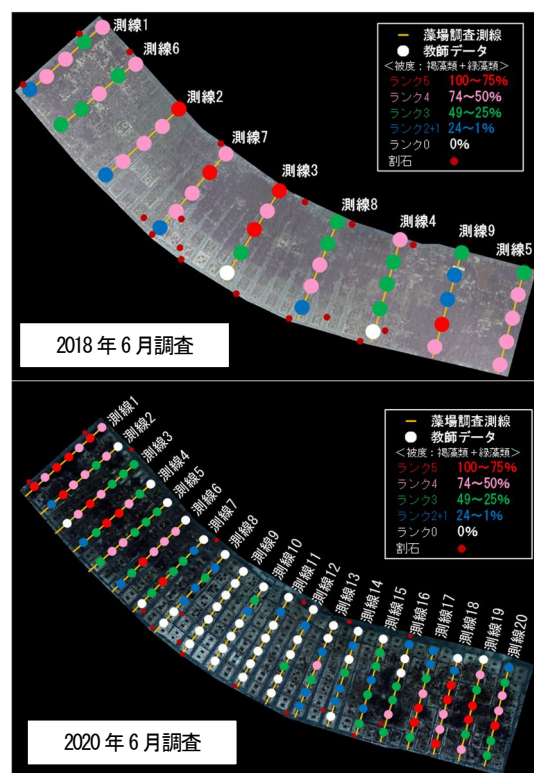


図-2 藻場調査地点のランク別海藻被度

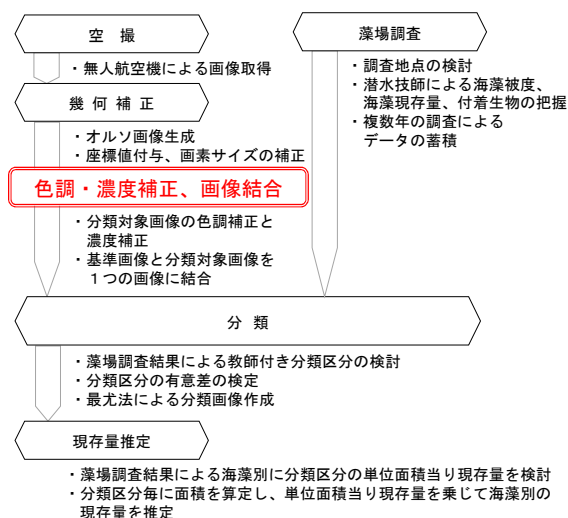


図-3 画像解析の手順

補正後の画像を対象に、色調・濃度補正および画像の結合を行った（図-3）。

調査時期が異なる藻場調査の海藻被度を教師データとして利用する場合は、基準となる教師側の画像（基準画像）と分類対象側の画像（分類対象画像）の色調を合わせる必要がある¹⁴⁾。本研究では、2011年の画像解析事例¹⁵⁾を参考に、2018年の画像を基準とした色調補正を行った。本研究で使った画像の色データは、Red、Green、Blue（R、G、B）の3色から構成される。補正には、2018年と2020年の両方の画像に写っている固定物（コンクリートブロックとブロックによる陰）の色データを読み取り（図-4）、色毎に補正一次式を作成した（表-1）。

さらに、観測時期の異なる画像データを接合するために、画像間の海水の色調の統一による濃度補正¹⁴⁾を行った。補正の対象地点（トレーニングエリア）は、色調補正との重複を避けるために、水中に工作物や海底が映り込んでいない小段背後の水面（図-4中の右下の■）を選び、補正対象地点のRGB値の平均値と標準偏差から（表-2）、以下の濃度補正式¹⁴⁾により濃度補正を行った。

$$X_2' = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} X_2 + \frac{\overline{\sigma_2 X_1} - \sigma_1 \overline{X_2}}{\sigma_2}$$

X_2' ：補正対象画像の補正後のRGB値

X_2 ：補正対象画像の補正前のRGB値

$\overline{X_2}$ ：補正対象画像のトレーニングエリア内のRGB値の平均値

$\overline{X_1}$ ：基準となる画像のトレーニングエリア内のRGB値の平均値

σ_2 ：補正対象画像のトレーニングエリア内のRGB値の標準偏差

σ_1 ：基準となる画像のトレーニングエリア内のRGB値の標準偏差

本研究が参考に行っている丸山ら¹¹⁾の画像解析手法は、ある画像内の教師データ地点の色データを参照して、同一の画像内の藻場（分類対象）の海藻被度ランクを分類する手法であるため、本研究のように、基準と分類対象が異なる画像上にある場合には、そのまま適用することができない。そこで、本研究では基準画像と分類対象画像を結合することにより、同一の画像内に基準と分類対象が配置されるようにした。さらに、本研究では、藻場調査地点の色データを高解像度で細分化しており、幾何補正後の2つの画像ファイルを正確な位置で貼り合わせる必要があるため、画像ファイルの色データ毎に分割後再度データファイル上で1つの画像に結合した（図-5）。

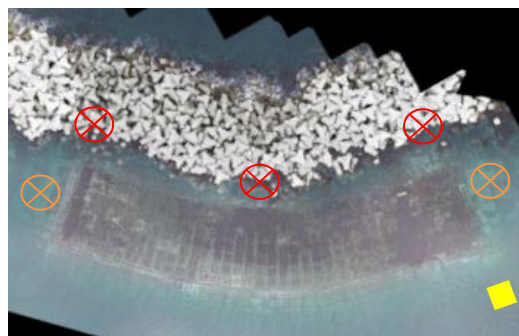


図-4 色調・濃度補正に用いた地点

表-1 色調補正一次式

色	補正一次式	R ²
Red	y=1.2456 x +3.5965	0.8621
Green	y=1.3627 x +14.254	0.8642
Blue	y=1.3754 x +21.249	0.8772

表-2 補正対象地点RGB値の平均値・標準偏差

色	2018年		2020年	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
	$\bar{x}_1$	σ_1	$\bar{x}_2$	σ_2
Red	136.92	6.42	73.86	13.27
Green	150.44	5.48	111.13	11.87
Blue	158.65	5.54	105.47	10.01

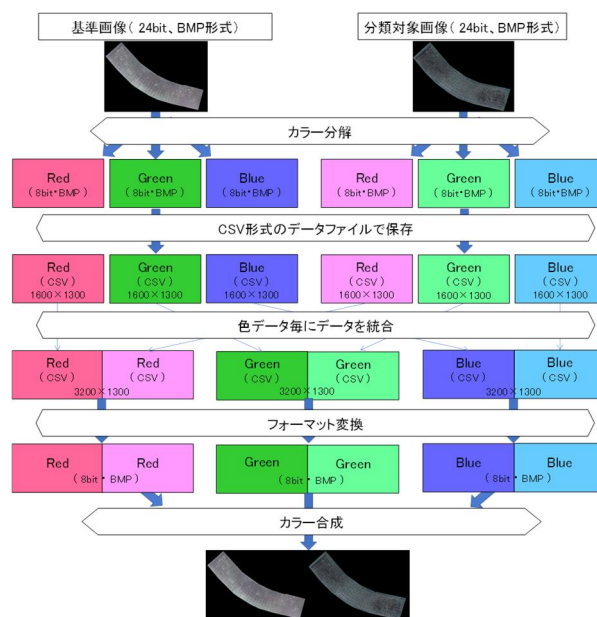


図-5 基準画像と分類対象画像の結合手順

3. 結果と考察

本研究では、2018年と2020年の藻場空撮を結合した画像に対して、2018年と2020年の藻場調査を教師データとした画像解析を行い、計4パターンの海藻被度分類画像を作成した（図-6、図-7）。

2018年の分類結果では、同時期の2018年と2020年の調

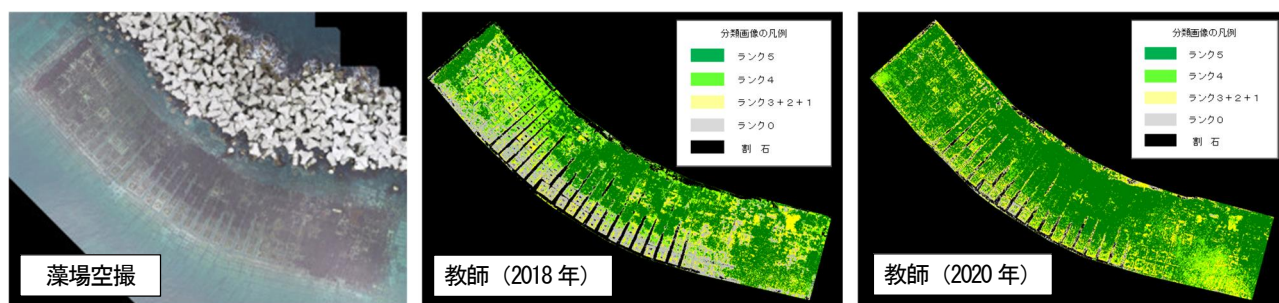


図-6 2018年空撮の画像解析により作成した分類画像

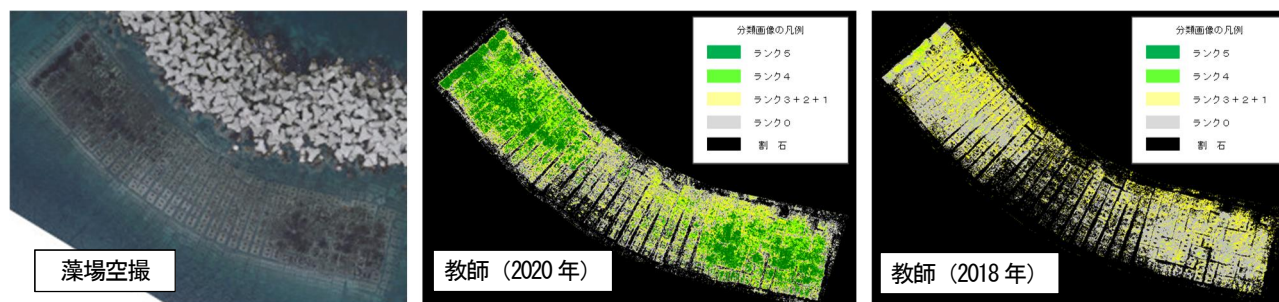


図-7 2020年空撮の画像解析により作成した分類画像

査結果を教師データとした分類画像を比較すると、2020年を教師とした分類画像の方が2018年を教師とした場合よりもランク5の範囲が広がっていた（図-6）。それに対して、2020年の分類結果を見ると、同時期（2020年）の調査を教師データとした分類画像上でランク5やランク4に分類された箇所が、2018年の分類画像では、ランク3+2+1やランク0に置き換わっていた（図-7）。

教師データ地点の藻場面積（教師面積）と分類結果から推定した藻場面積（推定面積）を比較すると、2018年の分類結果では、同時期（2018年）の調査を教師データとした場合、2018年の教師面積21.3m²に対して、推定面積は26.1m²で約1.2倍であったのに対して、異なる時期の2020年の調査を教師データとした場合では、約1.6倍の33.8m²であり、異なる時期の調査を教師とした推定面積の方が教師面積との差が大きかった。

他方、2020年の分類結果では、同時期の2020年を教師とすると、推定面積は50.6m²と教師面積（44.1m²）の約1.2倍となったのに対して、2018年を教師とすると、推定面積は7.6m²となり、教師面積の約0.2倍と非常に低い値となった。2018年および2020年の分類画像内のランク分類と使用した教師データ（2018年、2020年）におけるランク分類の対応関係を表-3および表-4に示す。分類画像に基づくランク（分類ランク）が、教師データにおける実際のランク（教師ランク）よりも低い被度ランクであれば過小評価、教師ランクよりも高い被度であれば過大評価ということになる。2018年の分類結果において、2018年および2020年を教師とした際の過小・過大評価の割合を比較すると、異なる時期の2020年を教師とした場合、過大評価となっているデータの割合が72.6%と2018年を教師とした際の割合（45.6%）よりも大きい値であり、過大評価の傾向が大きかった。一方、2020年の分類

表-3 2018年画像の分類結果

教師 ランク	2018教師分類結果					2020年教師分類結果				
	5	4	3+2+1	0	割石	5	4	3+2+1	0	割石
5	435	44	7	4	10	395	70	35	0	0
4	1033	440	248	231	48	1605	171	199	23	2
3+2+1	803	262	324	395	16	1219	323	226	30	2
0	1	8	17	164	10	78	16	99	7	0
割石	0	0	0	3	150	11	1	27	38	76

表-4 2020年画像の分類結果

教師 ランク	2018教師分類結果					2020年教師分類結果				
	5	4	3+2+1	0	割石	5	4	3+2+1	0	割石
5	0	99	367	1103	231	1070	281	233	183	33
4	0	52	682	1234	332	990	629	320	271	90
3+2+1	0	26	1034	2485	2055	1362	812	1150	1563	713
0	0	2	553	877	2768	274	250	719	1599	1358
割石	0	0	4	2	147	1	1	2	25	124

結果において、過小・過大評価の割合を見ると、異なる時期の2018年を教師とした場合、過大評価が4.2%であったのに対して、過小評価が61.1%であり、過小評価の傾向が大きかった。特に、分類ランクにおいてランク5に分類された地点はひとつもなかった。しかし、同時期の2020年を教師とした場合には、過小評価の割合が26.2%、過大評価の割合は31.4%であり、2018年を教師とした場合と比較して、過度な過小または過大評価の傾向は見られなかった。このように、異なる時期の調査を教師した場合の推定面積は、同時期の調査を教師とした場合よりも教師面積からの誤差が大きく、2018年の分類結果では過大評価、2020年の分類結果では過小評価となっていた。

図-8は、各教師データにおけるランク5のBlueの色データのヒストグラムである。横軸は色データの数値を表しており、0を黒色とし、値が大きくなるにつれて白色（255）に近づく、すなわち色が薄くなることを意味する。2018年のランク5の教師データ数は500点あり、色データは94～152の範囲に分布し、平均値は119.4であった。

他方、2020年のランク5の教師データ数は1,800点あり、色データの分布範囲は37～155、平均値は72.9であった。この2020年の色データに色調・濃度補正した分布範囲は、122～213、平均値は147.1となっていた。本研究の色調・濃度補正は、2018年の画像の色合いに合致するように行ったものであるが、実際には、2020年の教師データの色データの分布範囲は、2018年の分布よりも白色側に大きく寄ってしまっていた

図-9は、2020年の色調・濃度補正後の教師データと2018年分類対象画像のGreenの色データのヒストグラムである。2020年のランク5の教師データの色データの平均値が147.1、ランク4が150.8、ランク3+2+1が157.2であったのに対して、2018年分類対象画像のランク5、ランク4、ランク3+2+1の色データの平均値は、それぞれ110.1、127.4、131.7と2020年の教師データのランク5の平均値よりも低く、より黒色側の範囲に分布していた。そのため2020年を教師とすると、2018年分類画像のランク4やランク3+2+1のデータもランク5に分類されやすく、これが2020年を教師とした際の2018年の推定面積の過大評価につながったと推測される。

図-10は、2018年教師データと2020年色調・濃度補正後の分類対象画像のBlueの色データのヒストグラムである。2018年のランク5の教師データの色データの平均値が119.4、ランク4が127.4、ランク3+2+1が131.7であったのに対して、分類対象である2020年の色調・濃度補正後のランク5の色データの平均値は147.1であり、教師データ（2018年）のランク5よりも、ランク4およびランク3+2+1の平均値と近い値であった。このため、分類対象の2020年のランク5が実際よりも低いランクに分類されやすく、ランク4以下に関しても、同様の現象が生じていたと考えられ、その結果、2018年を教師にした際に、2020年の推定面積が過小に評価されたと推察される。

以上より、本研究において、異なる時期の調査結果を教師とした際に推定面積が教師面積よりも過大または過小に評価されたのは、色調・濃度補正による教師画像と分類対象画像の色データの分布のずれが主要因となっていた可能性が高い。異なる時期の調査データを教師として用いた藻場面積推定手法の精度を向上させるためには、適切な色調・濃度補正手法の検討が必要不可欠である。

4. まとめ

本研究では、藻場面積推定の省力化を目標に、調査時期の異なる藻場調査データを活用した画像解析による藻場面積の推定手法を検討した。

その結果、異なる時期の藻場調査データを教師としても藻場面積の推定自体は可能であることが確認されたが、

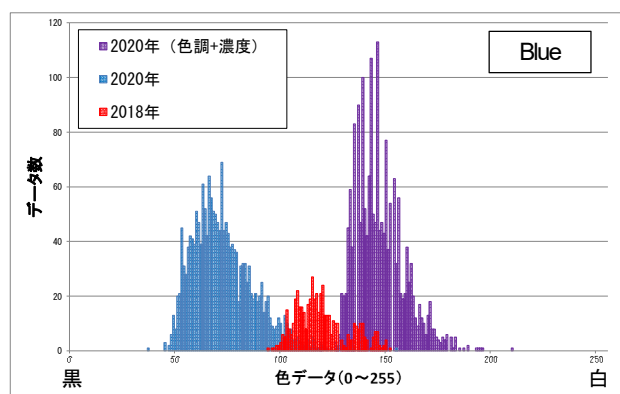


図-8 各教師データのランク5 (Blue) の色データのヒストグラム

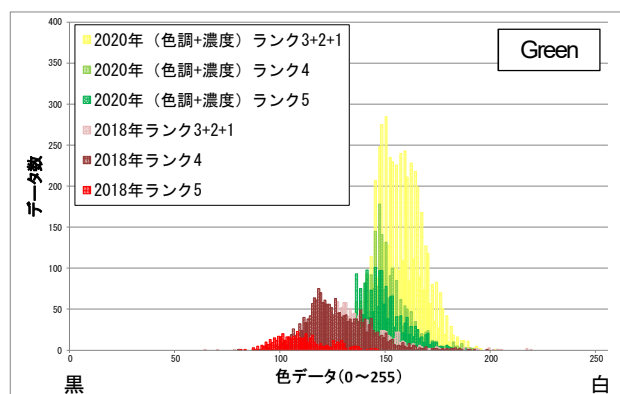


図-9 2020年色調・濃度補正後の教師データと2018年分類対象画像のランク別色データ (Green) のヒストグラム

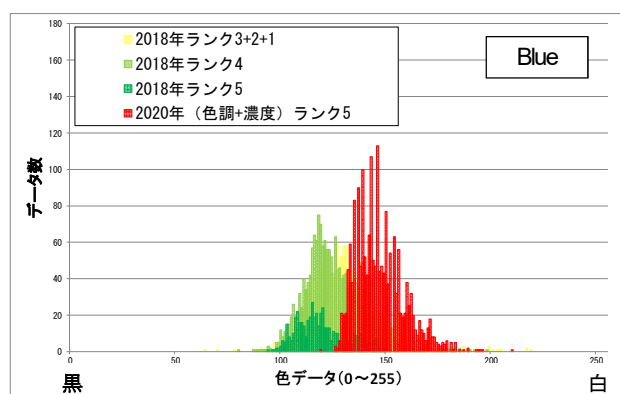


図-10 2018年教師データと2020年色調・濃度補正後の分類対象画像のランク別色データ (Blue) のヒストグラム

従来の同時期の調査データを教師とした場合よりも海藻被度の分類精度は低かった。その主要因としては、本研究で採用した色調・濃度補正の手法が適切ではなかったことが考えられる。今後、色調・濃度補正手法を検討・確立し、分類精度を向上させることにより、空撮画像のみを使用した精度の高い藻場面積の推定および海藻被度分類画像の作成手法の開発に貢献したい。

参考文献

- 1) 外務省：「2020年以降の枠組み：パリ協定」
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html
(2024年1月12日確認)
- 2) 農林水産省：「みどりの食料システム戦略」、2021年。
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
(2024年1月12日確認)
- 3) 国土交通省：「命を育むみなとのブルーインフラ拡大プロジェクト」、2022年。
https://www.mlit.go.jp/report/press/port06_hh_000265.html
(2024年1月12日確認)
- 4) 北海道開発局：「釧路港島防波堤での藻場の創出によるCO₂貯留効果を確認!」、2022。
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/release/slo5pa00000050th-att/slo5pa000000i8ax.pdf> (2024年1月12日確認)
- 5) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：「令和4年度(2022年度) Jブルークレジット®認証・発行について」、「北海道増毛町地先における鉄鋼スラグ施肥材による海藻藻場造成」、2022。
<https://www.blueeconomy.jp/archives/2022-jbc-register/> (2024年1月12日確認)
- 6) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：「令和5年度(2023年度) 第1回 Jブルークレジット®認証・発行について」、「循環型藻場造成「積丹しゃこたん方式」によるウニ増殖サイクルとブルーカーボン創出プロジェクト」、「昭和から続く北海道えりもの天日干し日高コンブの生産と藻場再生によるCO₂吸収」、2023。
<https://www.blueeconomy.jp/archives/2023-1-jbc-register/#04> (2024年1月12日確認)
- 7) 環境省：藻場調査(2018~2020年度)の結果概要、2021。
<https://www.env.go.jp/press/109943.html>
- 8) 桑江朝比呂、吉田吾郎、堀正和、渡辺謙太、棚谷灯子、岡田智也、梅澤有、佐々木淳：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.75、No.1、pp.10-20、2019。
- 9) 一般社団法人日本潜水協会：潜水土後継者育成・技術伝承、2017。
<https://www.sensui.or.jp/20170913174544> (2024年1月12日確認)
- 10) 佐藤仁、渡辺光弘、山本潤：画像解析による海藻現存量の経年変化算定の試み、寒地土木研究所月報、No.690、2010。
- 11) 丸山修治、梶原瑠美子、石井馨：空撮写真を用いた簡易的な面的海藻被度の把握、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol.76(2)、pp.828-1831、2020。
- 12) 本山賢司、須藤賢哉、森健二：複数の種で構成された藻場における海藻被度分類画像を用いた海藻面積の推定法、寒地土木研究所月報、No.851、pp.26-35、2023。
- 13) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル(案)、pp.25-26、平成29年3月改正。
- 14) 大林成行、小島尚人編著：全頁カラーによる最新実務者のためのリモートセンシング：データ処理/解析の基礎から見積書・仕様書の作成まで、pp.201-202、2002。
- 15) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：平成22年度画像解析による藻場分布把握システム検討業務報告書、pp.28-43、2011。