

調査時期の異なる空撮画像を用いた藻場分類手法

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

田村友行
菅原吉浩
西崎孝之

目次

1. はじめに	31	2-3 空撮画像の色調補正	32
2. 調査方法	31	3. 結果と考察	34
2-1 藻場調査	31	4. 広域空撮画像への適用	36
2-2 画像解析	32	5. まとめ	37

1. はじめに

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（以下、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。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、それらのデータは主にダイバーによる潜水調査によって取得してきたが、国内の潜水士の数は、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¹⁾。効率的な藻場調査への需要に応えるためには、潜水士に極力依存しない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²⁾、丸山ら³⁾）。空撮画像から藻場面積を推定するためには、教師データ（以下、教師）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、教師として利用することが困難である。

本山ら⁴⁾は、教師内を高解像度の空撮画像で細分化することにより、教師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

誤差で推定可能なことを示した。さらに、本山ら⁵⁾は、潜水士に極力依存しない藻場算定手法を目指して、調査時期の異なる教師の利用について検討を行ったが、従来の同時期の潜水データを教師とした場合に比べて海藻被度の分類精度は低い結果であった。

このため、本報告では、異なる時期の藻場調査データを教師に使用できるよう、本山ら⁵⁾の手法を改善し、さらなる分類精度の向上方策について報告するものである。

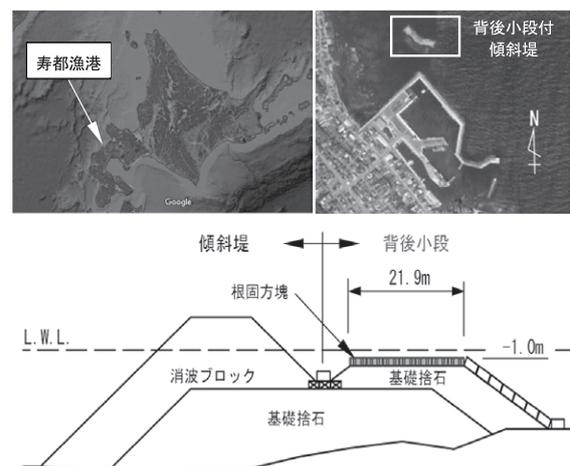


図-1 寿都漁港背後小段付傾斜堤

2. 調査方法

2-1 藻場調査

現地調査は、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、2020年6月、2022年6月に行った(図一1)。背後小段上には根固方塊(L: 2 m×B: 3 m×H:1.2m)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-1.0mに嵩上げされている。

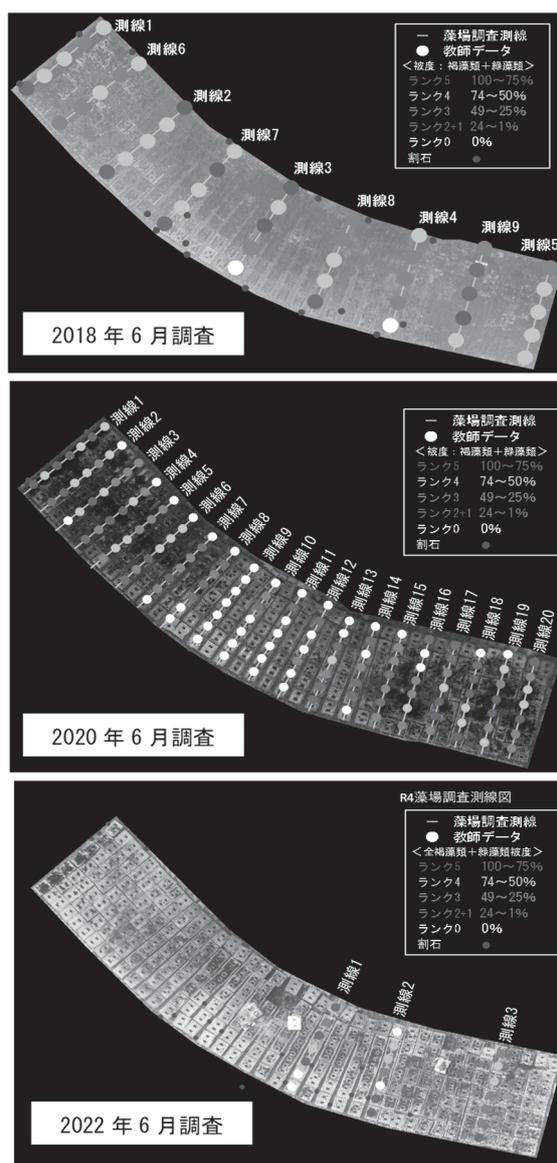
空撮には、各年ともに無人航空機(PHANTOM4 PRO, DJI社)を使用し、高度50mから藻場の空撮画像を取得した。海藻被度データは、各年ともに1 m×1 mの方形枠を用いた潜水土による目視観察により得た。各年で測線本数および海藻被度のデータ数は異なり、2018年は計45地点、2020年は計140地点、2021年は計21地点分の海藻被度データを取得した。(図一2)。海藻被度は、本山ら⁵⁾の検討結果から、褐藻類と緑藻類の被度の合計値に応じて、5つの階級(ランク5: 100~75%、ランク4: 74~50%、ランク3+2+1: 49~1%、ランク0: 0%、割石: 0%)に分類した。2018年の平均被度(計45地点)は、褐藻類58%、紅藻類14%、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。2022年の平均被度(計21地点)は褐藻類24%、紅藻類60%、緑藻類5%と紅藻が多く、例年繁茂しているホソメコンブは見られなかった。

2-2 画像解析

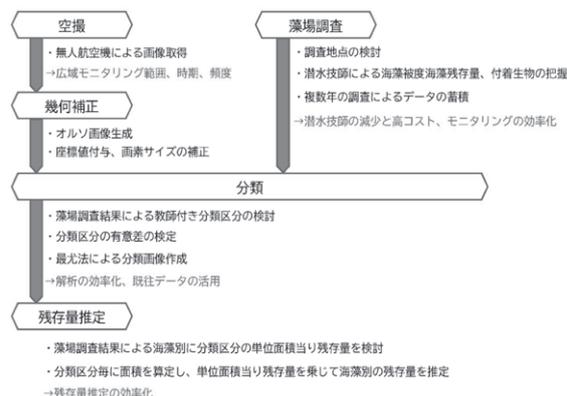
画像解析は、丸山ら³⁾の手法に倣い、空撮画像を画像解析ソフト(RSP ver. 3.06)で幾何補正を行い、潜水調査により測定した海藻被度と空撮画像の色データRed、Green、Blue(RGB値)をもとに、RSP上で最尤法により海藻被度の分類画像を作成した。(図一3)

2-3 空撮画像の色調補正

調査時期が異なる海藻被度を教師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⁷⁾。本山ら⁴⁾は、色調補正には、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



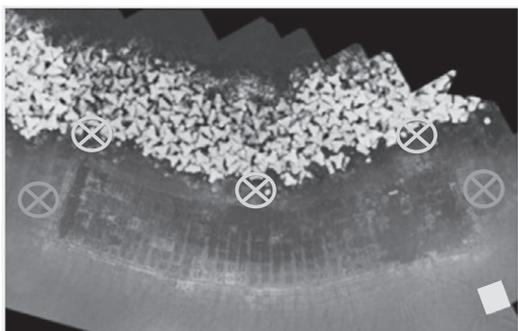
図一2 藻場調査地点のランク別海藻被度



図一3 画像解析の手順

み取り(図一4)、色毎に補正一次式を作成した(表一1)。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による濃度補正⁷⁾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（図一4中の右下の■）を選定し、補正対象地点のRGB値の平均値と標準偏差から（表一2）、以下の濃度補正式⁷⁾により濃度補正を行った。



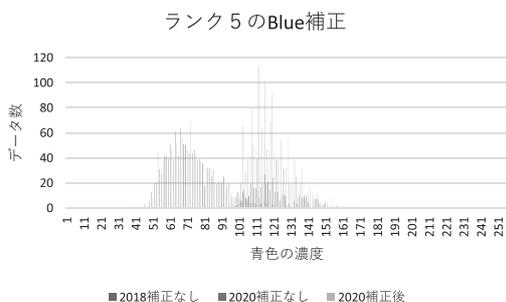
図一4 色調・濃度補正に用いた地点

表一1 色調補正一次式(本山ら⁴⁾)

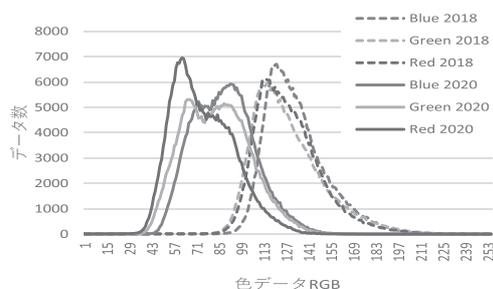
色	補正一次式	R ²
Red	y=1.2456x+3.5965	0.8621
Green	y=1.3627x+14.254	0.8642
Blue	y=1.3754x+21.249	0.8772

表一2 補正対象地点RGB値(本山ら⁴⁾)

色	2018年		2020年	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
	χ^1	σ_1	χ^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



図一5 濃度補正①のイメージ



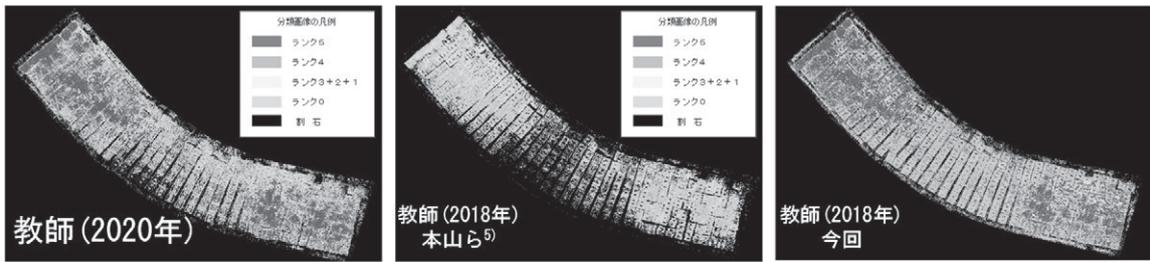
図一6 濃度補正②のイメージ

$$X'_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} X_2 + \frac{\sigma_2 \bar{X}_1 - \sigma_1 \bar{X}_2}{\sigma_2} \dots (1)$$

- 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
- \bar{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
- \bar{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

本山ら⁵⁾は、色調補正と濃度補正の2段階で補正を行っていたが、本検討では、この手法とは異なる方法で補正を行うこととした。まず、本検討では色毎の補正一次式の作成は行わないこととした。これは、色調補正後に濃度補正という2段階の補正を行うことにより、色調に大きな差が生じるのを回避するためである。次に、濃度補正については、本山ら⁵⁾は小段背後の水面（図一4中の右下の■）1地点でのみ補正を行っていたが、本検討では補正①：2018年と2020年教師同士の補正、補正②：背後小段全体での補正を行うこととした。図一5に補正①の一例を示す。2018年と2020年の補正なし同士では、色調に大きなずれがあるが、補正後は、色調の分布範囲およびピークを概ね一致させることができた。図一6に補正②のイメージを示す。背後小段全体の色調についても、2018年と2020年で色調に大きなずれがあるため、補正①と同様に2020年の色調を2018年に重ね合わせるように補正を行った。なお、補正①と補正②の手法の違いは、補正①は撮影時期の異なる年度それぞれにおいて、海藻被度の教師が必要であるが、補正②は教師が単年度しかない場合にも可能な手法である。

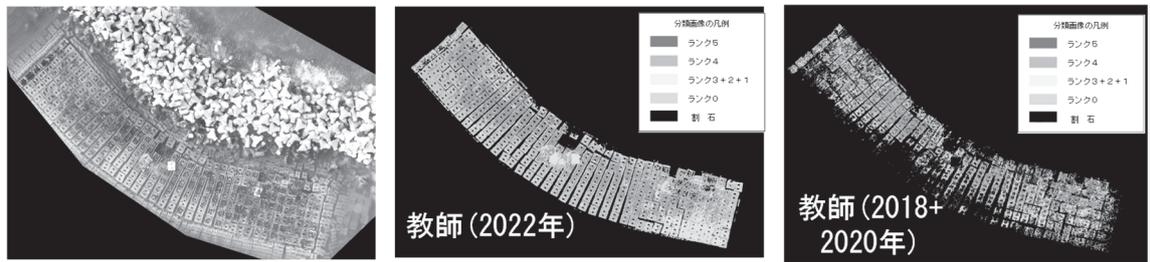
表一3に補正値を示す。表中のaとは式(1)の右辺第1項の係数 σ_1/σ_2 、bは右辺第2項としている。なお、補正①については、補正に使用する教師を3種類（ランク5と4、5～1、5～0）に分けて比較を行った。



図一八 2020年空撮の画像を異なる年の教師データにより分類した画像(補正①ランク5～4)



図一九 2018年空撮の画像を異なる年の教師データにより分類した画像(補正①ランク5～4)



図一〇 2022年空撮の画像を異なる年の教師データにより分類した画像(補正①ランク5～4)

3. 結果と考察

図一八、図一九に分類結果を示す。図一八より同時期の教師（一番左）と比べ、本山ら⁵⁾（中央）では、ランク5やランク4に分類された箇所がランク3+2+1やランク0に置き換わっていたが、本検討（一番右）では改善されている。図一九についても、本山ら⁵⁾では、ランク5の範囲が過剰に広がっていたが、本検討では同時期の教師（一番左）と比べてランク5の分類傾向も概ね同様な結果であった。

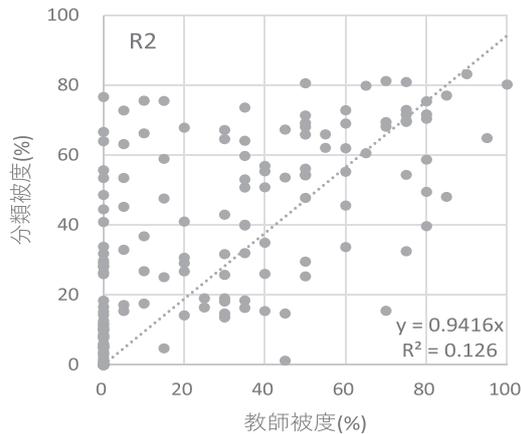
図一〇は、図一八における本検討での分類結果について、教師と分類結果を潜水箇所45地点の方形枠単位で整理した被度に、手で設定した割石の教師箇所17地点を加えた相関を示す。RSP上では、方形枠1単位において、0.1m四方の100個のデータが存在することから、各ランクの中央値とランクの個数により加重平均して方形枠単位の分類被度を算定した。決定係数 $R^2=0.126$ となっており、データにばらつきがある。これは1つの方形枠内の

表一三 補正①②の濃度補正值

		Blue		Green		Red	
		a	b	a	b	a	b
補正①	5と5	0.93	54.91	0.93	51.91	1.02	52.01
	5～1	0.98	49.91	1.02	44.47	1.06	50.19
	5～0	0.93	57.18	0.97	53.32	0.99	59.81
補正②		1.04	41.77	1.09	37.39	1.07	48.10

教師被度は全て同じにしているのに対して、分類結果では、海藻の濃い部分と海藻のない部分にばらつきが生じるためである。たとえばランク5において、方形枠内の海藻が全くない部分もランク5として教師が作成され、海藻がない部分もランク5に見なされる場合があるためと考えられる。データにばらつきはあるが近似直線の傾きについては1.0に近いことから、全体的な被度は再現されていると考えられる。

図一〇は2022年の空撮画像を対象に、2018年と2020年の教師を統合した場合の結果を示す。空撮画像と比較すると2018+2020年の教師については、海藻の分布傾向が再現されており、中央付近の被度が少ない範囲に加えて、小段の左端の海藻の濃い部分もランク5と

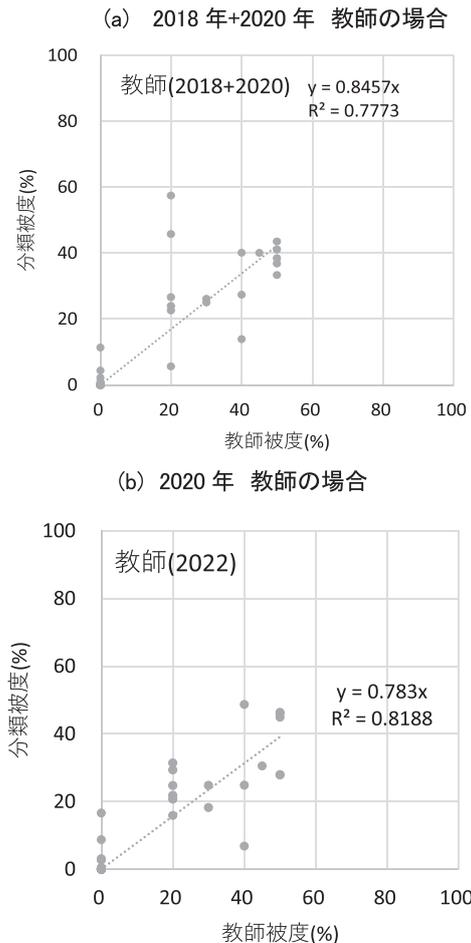


図一 10 2020年空撮の画像解析分類画像

して評価されている。しかし、一部で方塊が割石と分類されている部分も見られる。この理由としては、**図一 8**においても一部見られているが、石と方塊の色調の分布が重なる部分があったためと考えられる。一方、同一年(2022年)の教師を用いた場合では、海藻の分布範囲は概ね再現されてはいるが、左端の海藻の濃い部分は再現できていない。これは、2022年は海藻が少なく、方形枠位置でのランク5のデータが全く無かったことが要因と考えられる。

図一 12は方形枠単位で整理した被度の相関を示す。傾き84.57%、決定係数0.7773と、若干被度が低く評価されているが概ね相関が得られている。なお、全体的に分類被度が低くなった理由としては、2022年は、2018・2020年に比べて小段上の海藻が少なく、ランク5の教師が無かったこと、被度としては同じでも海藻の量(色合い)が異なるため、ランクの低い方に分類されたこと、例年と比べ海藻種別が異なり紅藻の多いこと等が要因と考えられる。**図一 12(b)**は同一年の教師を用いた場合である。傾き78.3%、決定係数0.8188と**図一 12(a)**と同様な傾向を示している。このことから、別な時期の教師を用いても、当該年の教師を用いる場合とほぼ同様に被度の分類が可能と考えられる。

表一 4に分類結果の一覧を示す。Case 1～4が本山ら⁵⁾の検討結果、case 5～7およびcase 9が**表一 3**に対応し、case 8が**図一 9**に対応している。コドラート単位での海藻の有無については、90%以上と高い精度となっている。Case 5～7における教師3種



図一 12 2022年空撮の画像解析分類画像

類(ランク5と4、5～1、5～0)の比較については、case 5精度が最も良かった。これは、海藻の少ない方形枠を教師に含めると、海藻がある部分の色調も海藻なしとして分類され、被度が過小に評価されるためと考えられる。また、本山ら⁵⁾のcase 3と比較しても、近似線の傾きや決定係数が大幅に改善されている。case 8は**図一 9**の一番右の図に対応するが、case 2と比較すると、近似線の傾きや決定係数が大幅に改善されている。また、case 1のように同一年度の教師を用いた場合と比べても同程度の精度となっている。case 9(補正②)については、潜水データが単年度(2018年)しかない状態で、別な時期(2020年)の分類を想定した手法である。海藻の有無については92%で良好な精度となっているが、近似線の傾きが0.756と被度については過小に評価されている。これは、**表一 3**の補正值を見ると、補正②は補正①に比べてaは大きい、bは小さくなってお

り、結果的に補正①に比べて補正值が小さくなったためである。補正②は簡易な方法として、背後小段全体の色調で補正したが、海藻以外の色調も含んでいるため、補正①に比べて精度が悪いことから、精度を高めるためには、海藻の多いエリア同士を空撮画像の目視により抽出して補正することで改善されると考えられる。

case10～13は2018年と2020年の教師を統合した場合の結果である。教師を単年度のみで別な時期へ適用するよりも複数年データを使用する場合の方が相関が良くなる傾向が見られる。また、case13のように過去2カ年の教師を別な時期へ用いても、同時期の教師を用いたcase14と比べ同程度の精度を有することが確認された。

表一4の下段には教師と分類の平均被度も示している。R4(2022年)を除いて補正①および補正②ともに平均被度は同程度となっている。なお、case13の2022年の空撮画像において、2018年と2020年の統合教師を用いた場合では分類13%と教師29%に比べ小さくなっている。この理由としては、各年によって同じ被度でも海藻の量(色合い)が異なることから、2022年よりも海藻が多い2018年や2020年を教師として用いたため、それらの時期の被度を基準とすると相対的に被度が低く評価されたことが要因と考えられる。

4. 広域空撮画像への適用

図一13に背後小段を含んだ2024年6月の広域の空撮画像を、図一14に画像分類の結果を示す。画像分類の教師データは背後小段上の海藻の繁茂状況が類似していた2020年の教師を用いた。なお、広域では背後小段上とは異なる海藻(ホンダワラ等)も見られたので、空撮画像の目視によりあらたな教師データ(岸側海藻)を追加した。図に示すように、過去の教師を用いても、潜水調査を行わずに、背後小段だけではなく、より広域の空撮画像の藻場分類が可能である。

図一15に2023年12月～2024年8月の広域藻場面積の推移を示す。藻場面積については画像分類結果から、各被度の分類データ数をカウントし、データ数に画像の解像度である1ピクセルの面積(0.1m四方)を乗じて算定した。海藻の濃い被度50～100%(褐藻・緑藻)は4月～6月にかけて増大した後、7月以降は急速に減少していることや、岸側海藻(ホンダワラ、アマモ等)については、冬期から夏期に増加傾向にあるが、4月～8月で各月の面積の変化が少ないことが確認できる。

図一16に2023年12月～2024年8月の背後小段上の藻場面積の推移を示す。海藻の濃い被度50～100%(褐藻・緑藻)は4月にピークとなり、以降は8月にかけて減少してい

表一4 分類結果一覧(まとめ)

case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
空撮画像	H30		R2		R2			H30	R2		H30	R2	R4			
色調補正の有無	無	無	有 (R5d)		無					無						
濃度補正の有無	無	無	有 (R5d)		補正①				補正②		補正①		無			
					rank 5~4	rank 5~1	rank 5~0	rank 5~4	背後小段全体		rank 5~4					
教師データ	H30	R2	H30	R2	H30			R2	H30	H30+R2 教師データ統合					R4	
本山ら ⁵⁾ 全体精度 (ランク完全一致精度)	33%	19%	15%	33%	28%	30%	31%	27%	29%	34%	30%	34%	35%	60%		
本山ら ⁵⁾ 海藻有無 (1ランクずれ)	84%	94%	43%	71%	71%	71%	69%	85%	71%	71%	85%	70%	61%	73%		
コードラ イト	海藻有無	99%	68%	95%	91%	90%	88%	90%	97%	87%	91%	96%	92%	96%	96%	
	被度相関 (分類÷教 師)	傾き	1.056	0.072	0.130	0.916	0.942	0.892	0.775	1.040	0.756	0.969	1.083	0.942	0.846	0.783
		決定係数R=2	0.611	0.195	0.087	0.347	0.126	-0.110	0.054	0.509	-0.517	0.326	0.522	0.345	0.826	0.819
	平均被度 (褐藻+緑 藻)	教師	65%	65%	30%	30%	30%	30%	30%	65%	30%	30%	65%	30%	29%	29%
分類		56%	73%	5%	36%	40%	40%	34%	57%	37%	38%	60%	37%	13%	21%	
備考	本山ら ⁵⁾				case5~7はcase3の改善。 Case8はcase2の改善。				case9はcase3の改善		case11はcase2の改善 case12はcase3の改善 教師データ2カ年分		別な時期における 適用性の検討			

る。これまでの潜水調査結果では背後小段上は複数の海藻種で構成されているが、褐藻（ホソメコンブ、ワカメ等）や緑藻（アオサやシオグサ等）で大半を占めていることが確認されている。また、空撮写真を見ると背後小段上において4月は褐藻（茶色）ではなく緑藻（緑色）が見られ、RGBの色合いを確認すると、G（緑）の色合いが他の時期に比べて値が小さく（緑色が濃い）なっていた。このことから、背後小段上では4月には緑藻が多く繁茂していたため、広域藻場の褐藻のピーク月とは異なる結果になったと推測される。

図-17に2018年6月～2024年6月の各年の背後小段上の藻場面積の推移を示すが、年々海藻が減少傾向となっている。

この海藻の減少要因を調べるために、図-18に2016年～2024年の寿都漁港近海の海面水温の推移を示す。水温データについては、NOAA Coral Reef Watchにて毎日更新される5km解像度のSSTデータから寿都漁港直近の値を用いた。海藻が最も多い2018年については、その前年の秋の水温や、海藻が発芽する1～2月の水温が低い傾向となっている。反対に海藻が最も少ない2024年については、その前年秋の水温や海藻が発芽する1～2月の水温が高くなっている。このことから、遊走子の放出時期や発芽時の水温が影響していると推測される。また、以上の2024年の広域藻場分布の結果から、Jブルークレジット認証申請の手引き⁶⁾に基づき、CO₂吸収量を試算したところ、寿都漁港における広域全体で年間12t程度のCO₂貯留効果があることが確認された。

5. まとめ

本報告では、藻場面積推定の省力化を目標に、調査時期の異なる潜水調査データを活用した画像解析による藻場分類手法について検討した。その結果、既往の潜水調査結果を教師として用いるとともに、空撮画像の色調（RGB）の補正を色調分布が重なり合うように行うことで、同一時期の潜水データを教師とした場合と同程度の精度で推定可能であることが確認された。このように、過去の潜水調



図-13 2024年6月の広域空撮画像



図-14 2024年6月の広域藻場分類

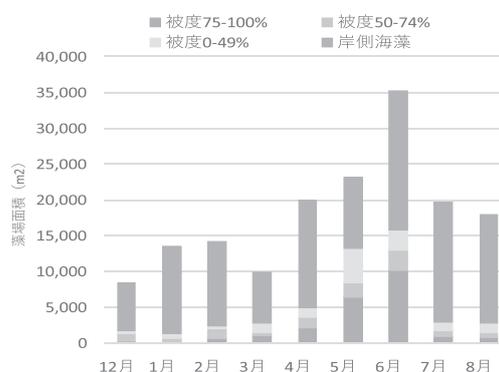
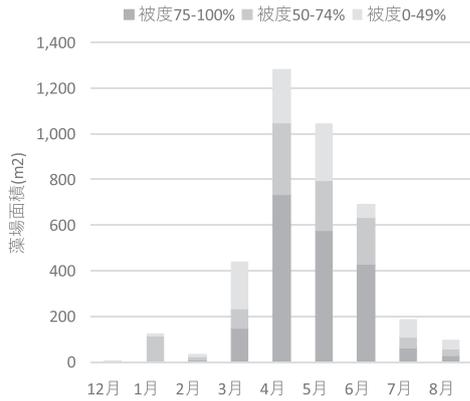
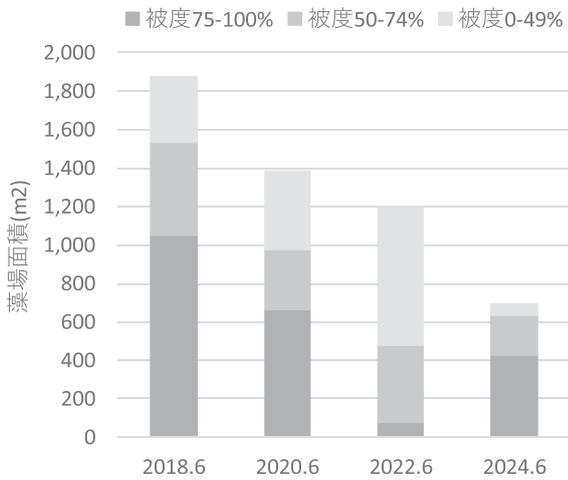


図-15 2023年12月～2024年8月の広域藻場面積

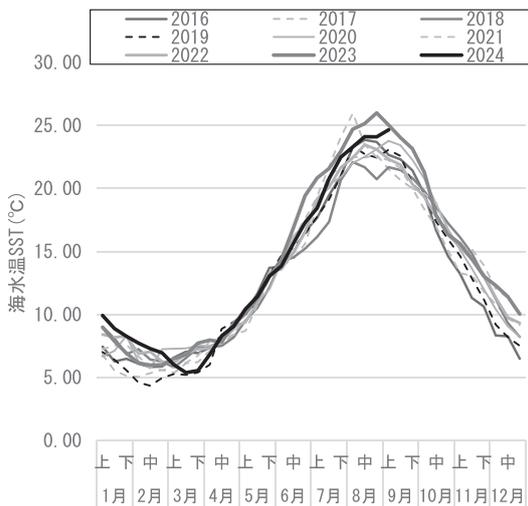
査データを活用することで、潜水作業の省力化が期待されるとともに、作成した教師を用い、広範囲の空撮画像を対象に海藻被度の分類を行うことで、広域のブルーカーボンの算定も可能となった。ただし、同じ面積や被度でも年度により海藻種別が大きく変わる場合には現存量にも影響することや、海藻種別や海域の水質（にごり、透明度等）や現地盤などによる色合いが異なる別な海域への適用については別途検討が必要である。



図一 16 2023年～2024年8月の背後小段の藻場面積



図一 17 2018年～2024年6月の背後小段の藻場面積



図一 18 2016年～2024年の寿都漁港周辺の海面水温

参考文献

- 1) 一般社団法人日本潜水協会：潜水士後継者育成・技術伝承、2017.
- 2) 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.
- 3) 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. 828-1 831、2020.
- 4) 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.
- 5) 本山賢司，松本卓真，森健二：複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—、第67回(2023年度)北海道開発技術研究発表会論文
- 6) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：Jブルークレジット認証申請の手引き—ブルーカーボンを活用した気候変動対策—、ver2. 4、令和6年3月.
- 7) 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.