

空撮写真で藻場の海藻被度分布及び現存量評価の経年変化を検討するための画像解析について

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
須藤 賢哉
森 健二

藻場は豊かな生態系を育む場としての機能に加えて、二酸化炭素（CO₂）を吸収する機能を有しており、藻場の保全・創造は、今後の気候変動対策として大きく期待されている。本報文では、CO₂を吸収する機能の定量化に必要な海藻の現存量評価に関し、海藻被度分布および現存量の経年変化を把握するために行う藻場空撮の画像解析について考察する。

キーワード：藻場、画像解析、空撮、海藻被度

1. はじめに

藻場は、コンブ等有用種の生産場となっているだけでなく、魚介類の産卵場、幼稚仔の保育場、ウニ・アワビの餌場等、多様な生物の生息場としての機能や、窒素・リン等の栄養塩の吸収による水質浄化機能等様々な機能を有している¹⁾。近年、気候変動に伴う海水温上昇の影響等により、海藻類の衰退、藻場構成種の変化、分布域の北上等が懸念されており²⁾、北日本に分布する主要なコンブ11種を対象とした今後の地球温暖化シナリオに基づく分布域の推定では、今後分布域が大幅に北上する、もしくは育成適地が消失する可能性のあることが予測されている³⁾。一方、我が国は、2015年12月の第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定に参加し、2021年10月には2050年カーボンニュートラル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⁴⁾。この目標の達成に向けて、近年、海洋生物により炭素を隔離、貯留する「ブルーカーボン」の活用が注目されており、特に藻場は、海藻の光合成により海中へ溶け込んだCO₂を吸収し、海中に酸素を放出することから、ブルーカーボン生態系としてのCO₂削減効果が期待されている⁵⁾。こうした効果を定量的に評価するためには、海藻種、被度及び現存量の経年変化（写真-1）を把握する必要があり、現場における継続的なモニタリングが必要となっている。

藻場のモニタリングにはリモートセンシングの技術が多く用いられるが、リモートセンシングやGISを用いた生態系の研究は、1990年代から盛んに行われるようになった⁶⁾。北海道沿岸の衛星画像による藻場分布域の把握について、楠山ら⁷⁾、松田ら⁸⁾の詳細な報告があるものの、



令和元年6月26日撮影



令和2年6月29日撮影

写真-1 ホソメコンブ藻場（赤枠）の経年変化の例

海藻の被度や現存量の定量的な把握には至らなかった。また、佐藤ら⁹⁾は、ラジオコントロールヘリコプターを用いて藻場形成領域を撮影し、画像解析により色調による海藻の種類分け及び海藻の被度の算出を行った。これにより、過去に撮影された衛星画像を解析して、藻場状況を調査していない時期の定量的な数値把握の可能性を示した。近年は、廉価な無人航空機（以下、ドローン）の導入により、高解像度の空撮画像の取得が容易になったことから、丸山ら¹⁰⁾は、空撮写真を用いた簡易な藻場の現状把握手法をまとめ、空撮調査と潜水調査を組み合わせることで、少ない潜水調査地点で藻場のモニタリングが可能になることを示した。また、渡邊ら¹¹⁾は、画像解析による藻場の現状把握手法の課題として、潜水調査

回数を減らすために、撮影時期の異なる画像間での補正方法を挙げている。そのためには、過去の調査データで何が有効か検証し、追加すべきデータを明確にすることが必要と考える。

そこで、本検討では、空撮写真から海藻被度分布及び現存量を評価する手法において、経年でデータを補完する手法の確立に向けて、空撮写真による藻場の評価手法の課題を整理するとともに、寿都漁港の調査事例について画像解析等を行い、課題解決方法を考察するものである。

2. 画像解析による藻場の評価手法

図-1は、藻場の画像の取得から、藻場調査と画像解析により現存量を評価するまでの簡易作業フローである。本検討では、丸山ら¹⁰⁾の手法に倣った作業手順で検討した。

空撮は、飛行高度をカメラの仕様と画像解像度（又は画素サイズ）から決めることとなるが、対象から50m～100mの高度において撮影している事例が多い。太陽の反射光の映り込みを避ける目的もあり、晴天時の正午に近い時間帯での撮影を避けることが望ましい。撮影後にはオルソ画像を生成するために、写真毎のオーバーラップ率は、進行方向に80%以上、進行と直角の方向に60%以上を確保する¹²⁾。

幾何補正は、写真のゆがみを補正する前処理のことである。近年の空撮写真の撮影では、写真に位置情報を保

存するとともに、写真をつなぎ合わせる作業の過程で、画像解像度を調整したオルソ画像を生成できる。過剰な高精度の空撮画像の取得を避けることで、オルソ画像生成の時間ロスを減らすことができるため、空撮写真取得前に画像解析の精度と画像に求められる、画像解像度を事前に検討することが重要である。

分類は、海藻被度（表-1）と色調から教師付き分類区分を検討し、最尤法により分類した画像を作成した。教師とは、現地調査で得られた分類可能な海藻被度の階級を定めた空撮写真の色のデータである。区分する階級は、階級毎の色データで有意差があることをTukey-Kramer法による多重検定により確認し、決定する。

現存量は、藻場調査による海藻別の被度と現存量の関係を整理、蓄積し、分類した階級の面積に乗じることで推定できる。藻場の出現する海藻種、被度及び現存量は経年で変化していることから、データの補完を念頭に、藻場調査前に被度と現存量の関係を整理しておく必要がある。

この手順において、「有意差のない」データしかない場合にはどのように教師付き分類区分を作成するかが課題となる。このようなケースの解決方法として最も単純なものは、藻場調査で有意差のある教師データを取得することであるが、藻場の出現は経年で変化するため、適切な教師データを得られない場合も生じる。そこで、データを補って「有意差のある」データに調整する方法として、1地点の潜水調査結果から複数の教師データが得られるように、画像解像度の高いデータから色データを抽出することを試みることにした。

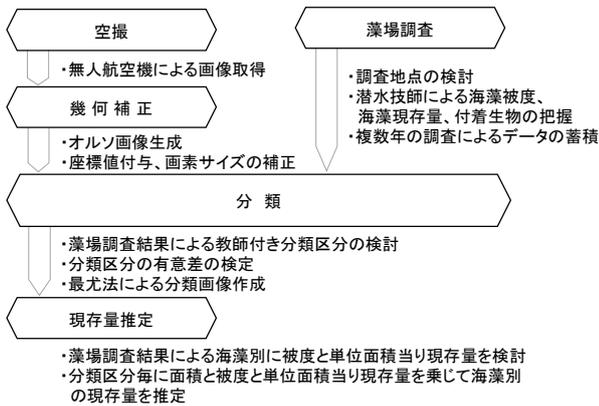


図-1 簡易的な画像解析のフロー図

表-1 海藻被度の区分¹³⁾

被度階級	区分	区分の基準	被度 (%)	写真でみる被度の状況	被度階級	区分	区分の基準	被度 (%)	写真でみる被度の状況
5	濃生	海藻面がほとんど見えぬ	>75		2	点生	藻生はまばらである	5~25	
4	密生	海藻面より雑生の方が多	50~75		1	稀く点生	藻生は稀くまばら	<5	
3	疎生	雑生より海藻面の方が多	25~50		0	なし	藻生はない	0	

3. 潜水調査結果と画像解析結果

(1) 潜水調査結果

対象とした藻場は、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である（図-2）。小段上には根固方塊（L2m×B3m×H1.2m）が縦7列横40列に並べられ、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。

藻場調査データは、2018年6月の調査結果を用いることとした。測線は9本、小段上0m～20mの範囲を5m毎に潜水技師が目視観測した1mの方形枠内の海藻被度を教師区分として利用することとした（図-3）。海藻は、ホソメコンブ、ワカメ、イソガラワ及びアオサが繁茂しており、各測線で1地点ずつ行った付着植物採取で最も現存量が多かったホソメコンブを対象に検討した。

(2) 空撮及び幾何補正

空撮は、無人航空機（PHANTOM4 PRO DJI社）を使用して、高度50mから無人航空機に搭載したカメラで写真を撮影し、写真を繋ぎ合わせてピクセルサイズ5cmのオルソ画像をTIFF形式ファイルで作成した。

幾何補正に使用する画像解析ソフトRSP (ver3.06) は TIFF形式ファイルを直接編集できないため、画像編集ソフトGIMP (ver.2.10.32) を用い、24bitのBMP形式ファイルに変換した。そして、画像解析ソフトRSPを使用して、

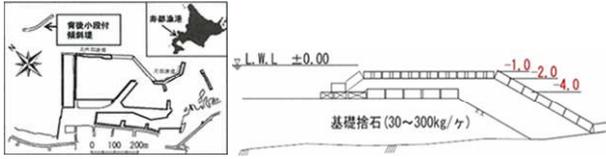


図-2 調査箇所図及び断面図 (寿都漁港背後小段付傾斜堤)

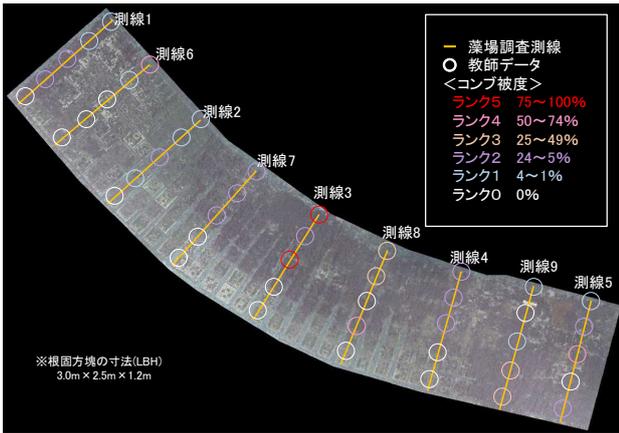
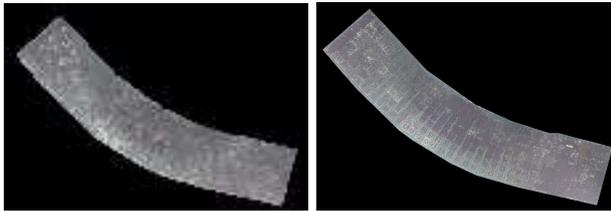


図-3 藻場調査における測線及び目視観察位置



(a) 空間解像度1m (b) 空間解像度0.1m

図-4 幾何補正後の画像

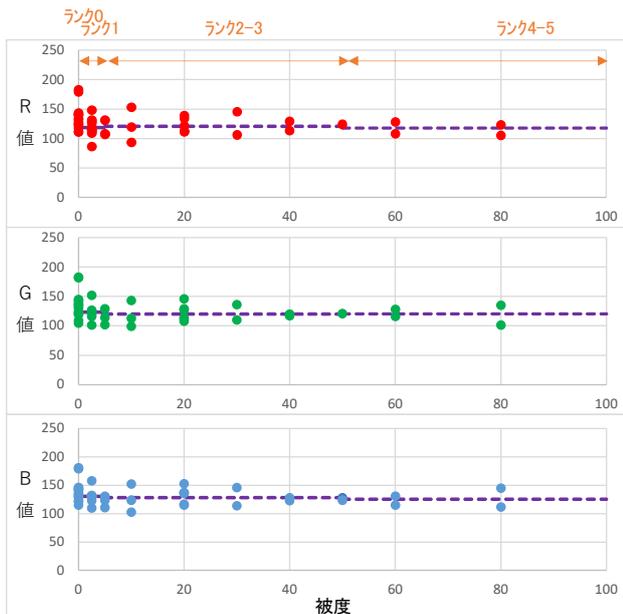


図-5 海藻被度と空撮(空間解像度 1m)RGB 値との関係

オルソ画像を幾何補正し、空間解像度 1m (図-4(a)) と 0.1m (図-4(b)) の2種類の画像を作成した。

(3) 教師データの検討

幾何補正後の画像から、図-3の藻場調査位置に対応する画素のRGB値を読み取り、藻場調査の海藻被度と関連付けて教師データとした。空間解像度1mの教師データ45点を図-5に、空間解像度0.1mの教師データ4,500点を図-6にそれぞれ示す。丸山ら¹⁰⁾の手法に倣い、画像解析の教師データの区分には、磯焼けガイドライン¹³⁾で示されている6段階の海藻被度区分を用いた。各区分の教師データ数が異なるため、有意差の評価は有意水準 $\alpha < 0.05$ として、Tukey-Kramer法による多重検定を用いた。具体的には、空間解像度1mのR値の教師データは6区分に別れており、検定は区分を相互に比較するため、全15ケースの比較となる。これをG値、B値でも行うこととなる。検定の結果、空間解像度1mの教師データは、全てのケースで有意差なしの判定となった。一方、空間解像度0.1mの教師データは、R値、B値は全て有意差ありの判定となり、G値のランク 2-1 以外の14ケースで有意差ありの判定となった。丸山ら¹⁰⁾の検討事例では、有意差がない区分が含まれていても分類が行えたことから、空間解像度0.1mのランク 2 とランク 1 の分類は可能と考えられる。図-5及び図-6の図中に教師データのランク毎の平均値を破線で示している。どちらの図においても、各ランクの平均値に大きな差は見受けられない。しかし、検定結果から画像解像度の高いデータから色データを抽出して、教師データを補完することでデータの有意差を確保できる場合があることを確認できた。

(4) 分類画像の作成

分類画像の作成は、RSPを用い、最尤法により各地点を分類し、その地点に予め定めた色を置いていく作業である。有意差の有無による違いを確認するため、空間解

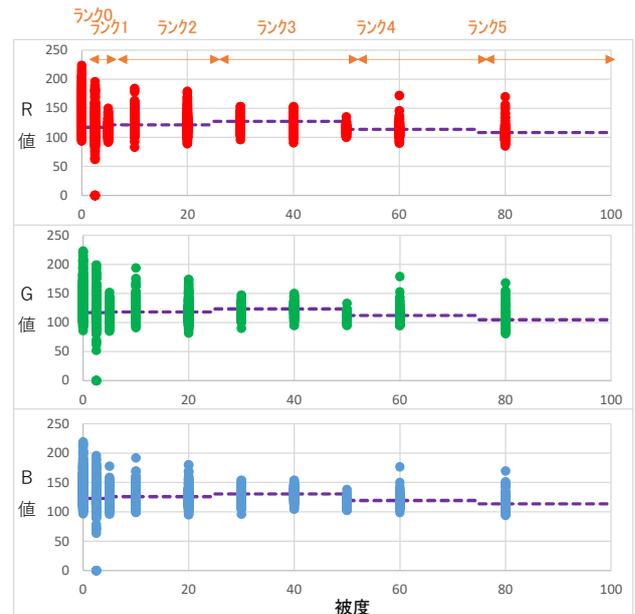


図-6 海藻被度と空撮(空間解像度0.1m)RGB値との関係

像度1mと0.1mの両方を作成した(図-7、図-8)。空間解像度1mの分類画像作成において、ランク0からランク5の6階級での分類を試みたが、最尤法で分類することができなかった。そこで、一部のランクを組み合わせを変えながらトライアンドエラーを繰り返し、教師データの区分を、ランク0、1、2-3、4-5の4分類とすることで分類画像の作成ができた。このことから、ランク毎のデータ数が5つ以上なければ最尤法の分類ができないことが明らかとなった。

(5) 精度評価

教師データの調査分類が正しく分類されているか、精度評価を行った(表-4(a)、(b))。全体の精度について、藻場の有無に対する精度は、空間解像度1mは45地点中33地点が正しく判別されて0.73、空間解像度0.1mは4,500地点中3,397地点が正しく判別されて0.75という結果が得られた。環境省では、藻場と藻場以外の区分や干潟と干潟以外の区分に対する画像解析の精度評価に60~80%の指標値を用いており¹⁴⁾、藻場の有無に関して、今回得られた精度には問題ないと考えられる。

次に、階級別分類の精度を考える。空間解像度1m(表-5)の場合、全45地点中17地点(被度0が6地点、被度1~4%が4地点、被度5~49%が6地点、被度50~100%が1地点)が正しく分類され、全体の精度は0.38となった。一方、空間解像度0.1m(表-6)の場合、全4,500地点中1,461地点(被度0が712地点、被度1~4%が165地点、被度5~24%が122地点、被度25~49%が213地点、被度50~74%が70地点、被度75~100%が179地点)が正しく分類され、全体の精度は0.32となった。階級別分類の精度全体としては差がない結果となっているが、被度50%以上の精度では、空間解像度1mの0.02よりも、空間解像度0.1mの0.06の方が高くなった。このような被度50%以上での精度向上は、データの密度を高くした効果と考えられる。また、部分的にはあるものの、ホソメコンブ以外にも被度が高い海藻種があることから、複数の海藻の分類が可能か検討したい。

次に、現存量算定の基礎となる藻場面積の算定精度について、表-7及び表-8に示す。藻場面積は、海藻被度の中央値に、分類された地点数と画素サイズを乗じて求めたものである。空間解像度1mの藻場面積は、教師と解析の藻場面積が近い値となっている。しかし、被度が高い50~100%の精度は低くなっており、さらに、海藻被度が50%未満では、根固方塊の有孔部やホソメコンブ以外の海藻種の影響があると予想され、これらの精度を高めると、算定面積が少なくなってゆく可能性がある。一方、空間解像度0.1mの藻場面積は、教師の2.5倍の面積が解析で算定された。しかし、海藻被度が25~100%の範囲では藻場面積の算定精度は高かった。また、教師データよりも多くの面積が算定されている海藻被度25%未満の面積は、根固方塊の有孔部やホソメコンブ以外の海藻種の影響があったと予想される。この部分を改善するこ

とで海藻面積が低くなることから、精度の向上が期待できる。今後は、海藻面積の精度向上についても図れるような検討が必要と考える。

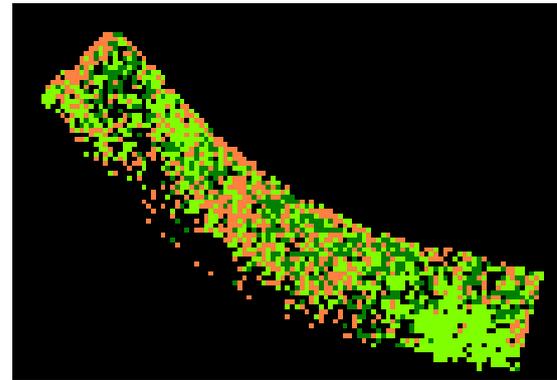


図-7 教師付き分類画像(空間解像度 1m×1m)

(黒:0%、橙:1~4%、黄緑:5~49%、緑:50~100%)

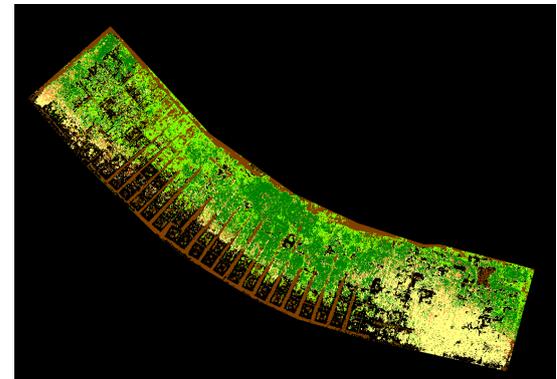


図-8 教師付き分類画像(空間解像度 0.1m)

(黒:0%、茶:1~4%、橙:5~24%、黄:25~49%、黄緑:50~74%、緑:75~100%)

表-4 海藻有無の判別に関する精度評価

(a) 空間解像度 1m				(b) 空間解像度 0.1m			
空間解像度 1m	参照データ			空間解像度 0.1m	参照データ		
	なし	あり	計		なし	あり	計
分類結果	なし	6	3	なし	712	315	1,027
	あり	9	27	あり	788	2,885	3,473
計	15	30	45	計	1,500	3,000	4,500
全体精度	0.73			全体精度	0.75		

表-5 階級別精度評価 (空間解像度 1m)

空間解像度 1m	参照データ					
	0	1~4	5~49	50~100	合計	
分類結果	0	6	2	1	0	9
	1~4	5	4	6	0	15
	5~49	4	3	6	4	17
	50~100	0	0	3	1	4
合計	15	9	16	5	45	
全体精度	0.38					

表-6 階級別精度評価 (空間解像度 0.1m)

空間解像度 0.1m	参照データ						
	0	1~4	5~24	25~49	50~74	75~100	合計
分類結果	0	712	148	119	28	14	1,027
	1~4	126	165	85	31	34	442
	5~24	118	77	122	9	7	338
	25~49	278	110	266	213	7	877
	50~74	122	250	272	71	70	791
	75~100	144	150	336	48	168	1,025
合計	1,500	900	1,200	400	300	200	4,500
全体精度	0.32						

表-7 藻場面積の算定結果（空間解像度 1m）

	0	1~4	5~49	50~100	合計
教師	0	22.5	432	375	829.5
解析	145	88.5	402	183	818.5
解析/教師	-	3.93	0.93	0.49	0.99

表-8 藻場面積の算定結果（空間解像度 0.1m）

	0	1~4	5~24	25~49	50~74	75~100	合計
教師	0	22.5	174	148	186	175	705.5
解析	324.8	342.2	580.9	166.9	194.9	162.2	1771.9
解析/教師	-	15.21	3.34	1.13	1.05	0.93	2.51

4. おわりに

空撮写真から海藻被度分布及び現存量を評価する手法において、経年でデータを補完する手法の確立に向けて検討した結果は、以下のとおり。

①空間解像度1mから0.1mに変更し、教師データを45点から4,500点に補完して、磯焼けガイドラインで示されている6段階の海藻被度区分でTukey-Kramer法による多重検定を行ったところ、当初のデータが有意差なしの評価だったものに対して、有意差ありの評価を得ることができた。

②有意差なしのデータを用い、最尤法による教師付き分類画像の作成を行ったところ、区分毎のデータ数が5以上なければ、分類画像を得ることができなかった。

③有意差なしのデータと有意差ありのデータで教師付き分類画像を作成し、教師データ位置の分類精度を評価したところ、海藻有無を判別する精度は73%と75%でほとんど差が無かった。この結果は、環境省が藻場と藻場以外の区分や干潟と干潟以外の区分に対する画像解析の精度評価60~80%と同程度の精度であった。

④全教師データに対する分類精度は、有意差なしのデータ38%と有意差ありのデータ32%で大きな違いが生じなかった。

⑤分類後の藻場面積は、有意差ありのデータが251%となり、有意差なしのデータ99%よりも再現性が低くな

った。しかし、有意差ありのデータは海藻被度25~100%の精度が高く、海藻被度25%未満においても根固方塊の有孔部やホソメコンブ以外の海藻種の影響を改善することで、今後の精度の向上が期待できる。

以上を踏まえ、引き続き、経年でデータを補完する手法の検討を進め、空撮写真による藻場の評価手法のデータ取得の効率化を図るとともに、現存量推定の精度向上に向けて検討をすすめる。

参考文献

- 1) 一般社団法人寒地港湾技術研究センター：寒冷地における沿岸構造物の環境調和型ガイドブック、p.5、2017.
- 2) 水産庁：気候変動に対応した漁場整備方策に関するガイドライン、p.70、2017.
- 3) Kenji Sudo, Kentaro Watanabe, Norishige Yotsukur, Masahiro Nakaoka : *Predictions of kelp distribution shifts along the northern coast of japan, Ecological Research*, Vol.35(1), pp.47-60, 2019.
- 4) 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
- 5) 水産庁：磯焼け対策ガイドライン、2021.
- 6) 本水産工学会：防波堤背後小段の藻場環境について、熊谷ら、平成21年度学術講演会、2009.
- 7) 楠山哲弘, 高木哲夫, 林誉命, 黄金崎清人, 袖野宏樹, 鳴海日出人：藻場（リシリコンブ）のリモートセンシングによる分布域の推定—網走港周辺海域—、海洋開発論文集、Vol.23, pp 555-560、2007.
- 8) 松田齊久, 吉田勝則, 丹羽幸一, 山田文人, 吉田徹, 鳴海日出人：衛星画像と音響測深機を利用したアマモ場分布域の把握—霧多布港周辺海域—、海洋開発論文集、Vol.23, pp 561-566、2007.
- 9) 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、第690号、2010.
- 10) 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), pp1 828-1 831、2020.
- 11) 渡邊浩二, 伊藤公人, 梶原瑠美子, 丸山修治：空撮写真の画像解析による藻場の現状把握手法について、寒地土木研究所月報、第814号、2021.
- 12) 国土交通省国土地理院（案）：UAVを活用した公共測量ガイドライン、pp25-26、平成29年3月改正
- 13) 水産庁：改訂磯焼け対策ガイドライン、pp150-1522015.
- 14) 環境省：瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査結果（西部海域）、2018.