

広域藻場モニタリングの手引き

令和3年3月

水産庁

広域藻場モニタリングの手引き

目次

1	手引きの目的	1
2	手引きの構成	2
	(1) 手引きの構成と使い方	2
	(2) 広域藻場調査手法を選択するためのフローチャート	3
3	広域藻場の調査方法	4
	(1) ドローン空撮	4
	(2) 音響測量	13
	(3) 衛星画像	24
	(4) 航空写真	31
4	広域藻場調査の教師・検証データの取得	34
	(1) 潜水調査	34
	(2) 船上調査	39
5	藻場調査手法の特徴とコスト比較	48
	(1) 藻場調査手法の特徴	48
	(2) 調査手法のコスト比較	50
参考資料		
	用語説明	53
	引用文献	54
	深層学習による水中画像からの海藻判別の手順	57
コラム		
	【コラム1】 Google Earth Pro の利用	8
	【コラム2】 GIS ソフトの利用	12
	【コラム3】 カシミール 3D の利用	14
	【コラム4】 緯度経度の 10 進法 (度) と 60 進法 (度分秒) 表示	17
	【コラム5】 測地系・座標系	22
	【コラム6】 航空レーザー測深による藻場分布の把握	33
	【コラム7】 水中ドローンと潜水で撮影した画像の比較	43
	【コラム8】 深層学習による水中画像からの海藻判別	45
	【コラム9】 潜水観察・船上調査による広域藻場の把握	47

1. 手引きの目的

近年、磯焼けは全国的に進行しており、前年には健全な藻場であったところで急激に藻場の衰退や消失がみとめられるといった事例が増えている。しかし、多くの地域では、漁業者等からの情報により局所的な藻場の状況は把握しつつも、海域全体の状況までは詳細に把握できていない。気候変動やそれに伴う植食生物の摂餌の活発化による藻場の分布の変化を市町村、都道府県、国単位で検証するためには、局所だけでなく広域的に藻場の分布や広がり把握することが必要となる。また、地震や津波などの大きな災害が突発的に起きたときにも迅速に広範囲の藻場を把握することが求められる場合もある。

近年、人工衛星、航空機、無人航空機（ドローン等）による空中写真から広域の海洋環境を把握する技術が飛躍的に発展し、藻場の調査にも適用されている。また、「改訂磯焼け対策ガイドライン」以降、水産基盤整備調査委託事業「藻場回復・保全技術の高度化検討調査」を含めた様々な調査・研究により、広域的な藻場の把握手法が発展してきた。水産庁は漁業者自らが主体となって藻場の回復を計画・実行できる具体的な対応策をまとめた「改訂 磯焼け対策ガイドライン」を平成 27 年 3 月に示したが、この中では地先の局所的な範囲を対象とした藻場の調査手法（潜水観察、船上観察、音響測量）の紹介に留まっている。本手引きでは、衛星画像・航空写真・ドローン空撮・音響測量を用いた藻場把握手法について紹介し、広域の藻場調査を行う方法について整理した。この広域藻場モニタリングの手引きが、地先や市町村、都道府県で藻場を管理・モニタリングを担当する方（手引きの利用者）たちが藻場のモニタリングをする際に役立つことを期待したい。

2. 手引きの構成

(1) 手引きの構成と使い方

本手引きでは3章において広域藻場の調査方法を、4章においてその広域調査に必要な教師・検証用データを取得する方法について説明する。3章の広域藻場の調査方法として、ドローン空撮・音響測量といった地先の比較的狭い範囲で藻場の広がり調べの手法と、衛星画像・航空写真により市町村・都道府県単位といったより広い範囲で藻場を調べる手法を分けて扱う。(図2-(1)-1)。4章では、広域藻場の調査で藻場分布を推定する際に必要となる教師(事前に藻場分類の正解を学ぶためのデータ)・検証(藻場分類の推定結果を検証するためのデータ)に用いる現地データを潜水観察・船上観察で取得する方法について説明する。また、5章では本手引きで紹介する藻場調査の手法について取得情報や調査範囲、調査水深、コストや民間委託の概算を整理した。

次ページに調査範囲と環境条件によりどの広域藻場の調査方法を選択すればよいか決めるためのフローチャートを示した。フローチャートで最適な広域藻場の調査方法を選択し、該当ページだけを読むといった使い方もできる。また、5章の「藻場調査手法の特徴とコスト比較」だけを読んでも、藻場の調査手法やコストの概要を知ることができるだろう。

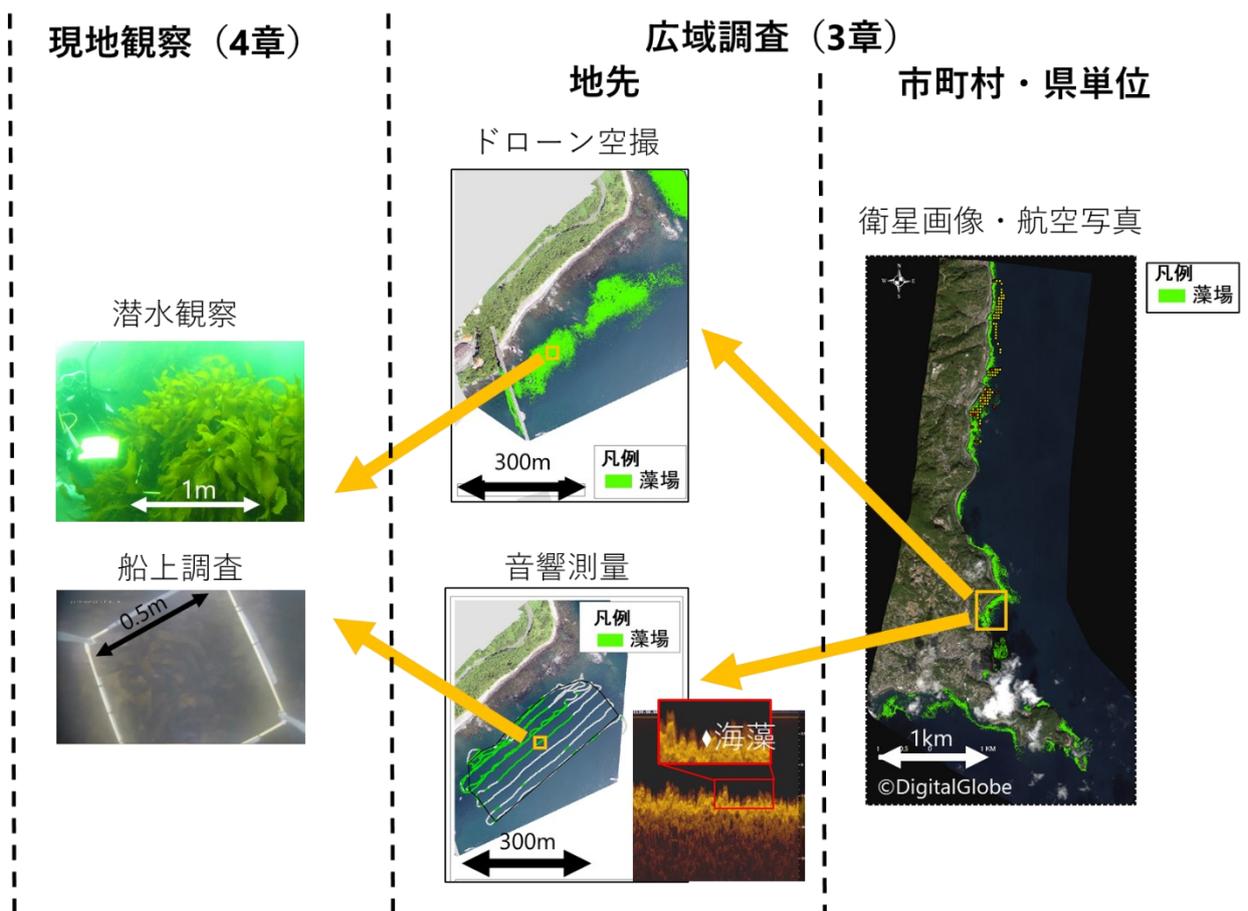
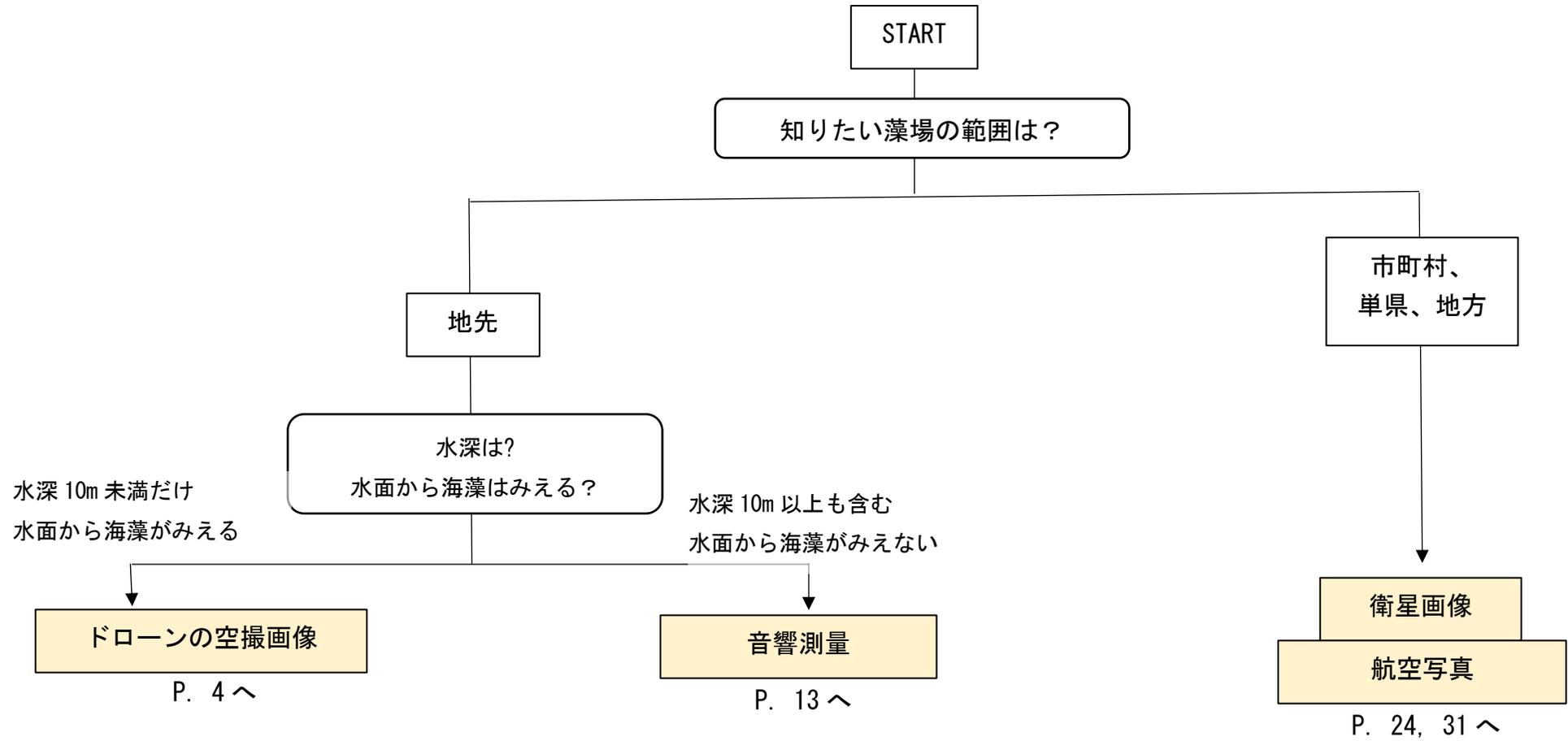


図 2-(1)-1 各調査手法で取得できる藻場情報のイメージ。海藻を間近で観察し現地データを取得する手法と広域調査の手法に分類される。さらに広域調査でも対象範囲により地先と市町村・県単位以上の広さで調査方法が分けられる。

(2) 広域藻場の調査手法選定のためのフローチャート



3 広域藻場の調査方法

広域藻場の調査方法として、地先を対象とした（１）ドローン空撮と（２）音響測量、それ以上の広さの市町村単位や単県レベルを調べる（３）衛星画像、航空写真について説明する。

（１）ドローン空撮

ドローン空撮は地先（0.004～5km²）で、水面から海藻が見える主に水深が10m以下を対象とする[23-26]。基本的に藻場の有無が空撮画像からわかるが、アラメ・カジメ場、コンブ場、ガラモ場、アマモ場など大まかな判別ができる場合もある。藻場の判別の精度（正答率）は70-90%程度である[3, 23, 24]。調査の手順を図3-(1)-1に示した。

必要な調査機材

- ・ドローン＋リモコン
- ・プロペラガード
- ・バッテリー予備＋バッテリー充電器
- ・帽子、サングラス
- ・双眼鏡
- ・風速計
- ・記録野帳、鉛筆

調査計画

ドローン（無人飛行機）による藻場調査では、許可申請が必要な場合がある（図3-(1)-2）。目視外飛行（モニター監視による自動操縦やFPV操縦も含む）や人口密集地域・第三者の人や物までの距離が30m以内の飛行を行う場合、管轄の航空局への許可申請が必要となる（許可取得まで通常10営業日ほど）。

また、制限空域（高度150m以上や空港近く）での飛行も管轄の空港事務所へ許可申請しなくてはならない（許可取得まで通常10営業日ほど）。

高度150m以上の飛行では航空管制部との調整も必要となる（空港事務所から指示がもらえる）。これらの許可申請は国土交通省のドローン情報基盤システム（DIPS）を用いて、オンライン上で行うことができる（www.dips.mlit.go.jp）。許可取得後に無人航空機の運航者が事前に飛行日時・経路・高度等の飛行計画情報をDIPSの「飛行情報共有機能（FISS）」システムに登録し、共有することが必要となる（www.fiss.mlit.go.jp/top）。また、調査地が自衛隊・米軍の訓練空域に含まれる場合は各所に照会が必要である。その場所が制限区域かどうかはウェブサイト（国土地理院地図、

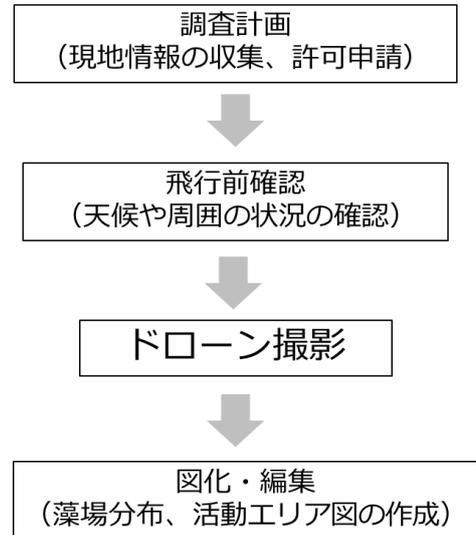


図3-(1)-1 無人航空機（ドローン）による藻場調査の手順

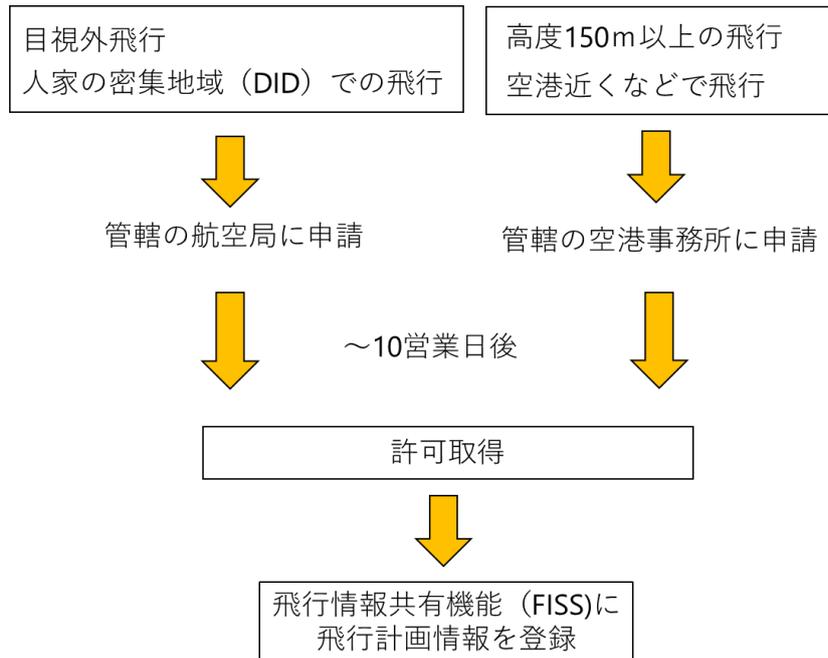


図3-(1)-2 ドローン飛行のために国交省管轄の許可申請する場合の流れ

DJI 安全飛行マップ、ソラパス) やスマートフォンのアプリ (例、ドローンフライトナビ、ドローン飛行チェックなど) を利用して確認できる。

飛行前の確認

天候・海況を確認し、風が強い場合 (風速 5m/s 以上) や雨が降りそうな場合は、機体墜落や故障を防ぐためにも飛行させない方がよい。特に風が強いと船上での離着陸の難易度が高くなる。

通常、空撮画像から藻場を判別できるのは水深 10m 以浅だが、海の濁りが強い場合は水深 10m やそれより浅い場所でも藻場が見えないことがある。調査地点の藻場の水深から判断して、どの程度の透明度が必要か考える必要がある。例えば、水深 5m にある藻場を明確に判別したければ、透明度 5m 程度が必要となる。

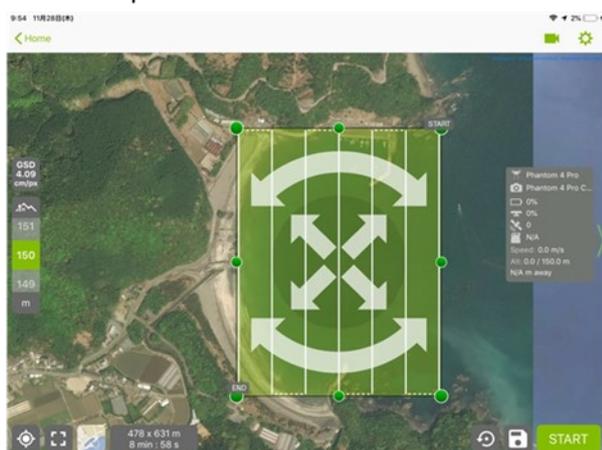
空撮は対象とする沿岸が影にならない時間帯を選ぶべきである。例えば、陸地の東岸にある藻場ならば太陽光が差す午前中に、西岸にある藻場の場合は太陽がある程度上がってからが良い。ただし、南中前後の太陽の高度が高いときは海面でハレーションが起りやすいため、現場での判断が必要となる。

ドローンによる調査

・自動操縦ソフトについて

ドローンの自動飛行アプリ (Pix4D capture, DroneDeploy, Litch, DJI DS PRO など) を用いて、藻場の空撮を簡易に行うことができる。これらのアプリでは撮影範囲を決めることで最適なルートを自動で作ってくれ、自動で撮影してくれる。また、撮影画像間のオーバーラップ率 (写真の重なり具合、通常 60% 以上は必要) を設定するとそれに合わせたルートや撮影間隔となる (図 3-(1)-3)。ただし、自動飛行は目視外飛行に含まれるため、許可申請が必要になる (図 3-(1)-2)。

Pix4D capture 経路設定画面



Drone Deploy 経路設定画面

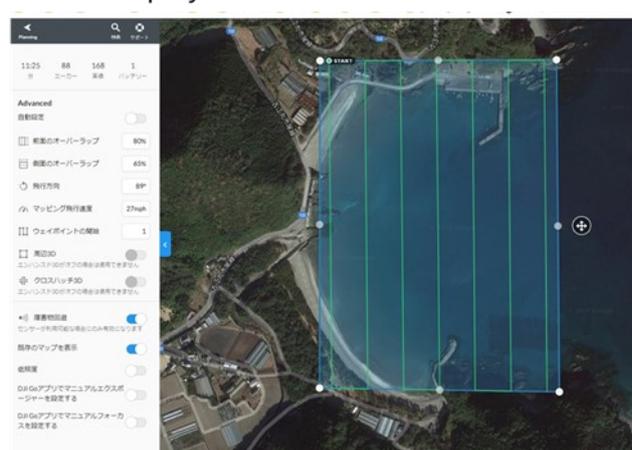


図 3-(1)-3. 自動飛行アプリ (Pix4D capture 及び DroneDeploy) による飛行経路の設定画面

・ドローンによる撮影

ドローンの飛行は通常アプリなどを用いて、プロポ (コントローラー) のモニター上に表示される位置やカメラ画像を確認しながら手動でも行うことができる。ドローンのバッテリーの持ちによるが、1回の撮影は数分から長くても 15 分ほどにする。藻場面積を計測したい場合は、実際の長さがわかるもの (船や岩) が映るように撮影する。

・オルソモザイク画像の作成と飛行高度

1 枚の撮影画像では収まらない広さの藻場分布を把握するには、複数の空撮画像を合成

して写真の位置ずれをなくした1枚の画像を作るオルソモザイク化が必要となる。海面及び均質な砂地などしか映っていない画像ではモザイク処理（複数の写真画像を1枚の画像にする）を行うための目印（岩礁などの地形や漁港、消波ブロックなど）がないため、うまく画像が合成されない。沖合の藻場までが映ったオルソモザイク画像を作りたい場合、許可申請のいない150mまでの高さで目印となる陸地部分が映るように撮影するか、高度150m以上の飛行許可を取得し、陸地と藻場が同じ画像内に入るように撮影するなど工夫が必要となる。

・陸でのドローンの離着陸

陸上から調査地にアクセスできる場合、陸上でドローンを離着陸した方が船上に比べて遥かに簡単である。調査地の近くの漁港の岸壁や車道の脇などで離着陸することが多くなるため、周囲の人や車、送電線を確認する。

・船上でのドローンの離着陸

陸上からドローンがアクセスできない調査地では船で近くまで行き、船上で離着陸する。この方法では離着陸時に補助者がドローンをリリース・キャッチすると安定する。離陸では障害物のない船首などで補助者がドローンを上に掲げて、プロペラが回り始めてから手を放す(図3-(1)-4)。アンカーで船を固定できる場合は、着陸の際に船首など広いスペースがある場所にドローンを移動させ、補助者の位置まで降してキャッチしてもらう。一方、アンカーを打てない場合の着陸は、まずドローンを船の前方まで移動させる。その後、ドローンの高度をキャッチする補助者の手と同じ高さまで下げ、その位置でホバリングさせる。そして、船をドローンの方向に動かし、補助者がドローンをキャッチする。海上では船を静止させようとしても波や風の影響で縦横に動くため、船を進行させたほうが安定してドローンに近づくことができる。この離着陸の方法は、操縦者、補助者、船長との連携が必要なため、飛行の前に打ち合わせをした方がよい。船上でのドローンの離着陸は特に不安定になりやすいため、ドローンにプロペラガードは必須である。

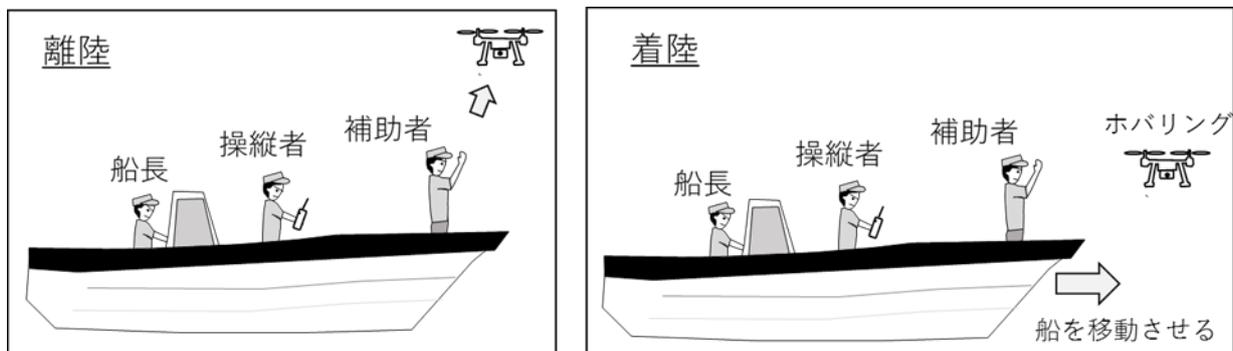


図3-(1)-4. アンカーが打てない場合の船上での安全なドローンの離着陸の方法

調査結果の取りまとめ

(1) 画像一枚からの藻場分布の判定

空撮画像はパソコンなどに取り込み、調査データと照らし合わせることで藻場分布を把握することができる。例えば、図3-(1)-5のように画像から藻場の位置がはっきりわかる場合はフリーハンドで藻場の境界部分をなぞって藻場の範囲を大まかに見積もることができる。ただし、ドローン画像はカメラのレンズの中心から対象物までの距離の違いにより写真上の像に位置ズレが生じ、位置情報を持っていないので正しい藻場の広さは計測できない。Google Earth Proを用いて、このずれの補正と画像の位置合わせ（幾何補正：ジオ

リファレンス) が簡易的にできる (図 3-(1)-6)。さらにジオリファレンスした画像内の藻場を”ポリゴン”で囲めば藻場の面積を計測できる。この方法を用いれば、毎回同じ場所で同じ高度からドローンで撮影することで特定の藻場の変化を追跡できる。現地の藻場の観察データを教師として見ながら画像内の藻場を手書きで囲む方法でも藻場とその他の底質をうまく判別できる (正答率 70%) という報告があり [1]、海藻が良く映った画像ならば許容できる精度 (正答率 70%程度) で判別できると考えられる。



図 3-(1)-5. 高度 150mのドローン空撮による藻場の確認 (大分県名護屋湾)

(a)

1. ドローン撮影した場所に地図を合わせる
2. “オーバーレイ”マークを選択
3. オーバーレイの“名前”を付ける
4. “リンク”の参照でPCに取り込んだドローンの画像を選択
5. 下の緑枠内にドローン画像が表示される
6. ドローン画像の“透過度”を調整して背景の画像が見えるようにする
7. マウスで緑枠を動かしてドローン画像の大きさや位置を調整し、背景と合わせる

(b)

1. “ポリゴン”マークを選択
2. クリックしながら藻場を囲む
3. ポリゴンの“測定”項目で、“面積”が算出される

ジオリファレンスされたドローン画像

図 3-(1)-6. (a) Google earth pro のオーバーレイ機能を用いたジオリファレンスの方法と (b) ジオリファレンスされたドローン画像から藻場面積を計測する方法

【コラム1】 Google Earth Pro の利用

Google Earth は Google 社がインターネット環境を前提として開発したバーチャル地球儀システムであり、世界中の衛星画像を閲覧できる。Google Earth Pro は無料で利用できる (<https://support.google.com/earth/answer/21955?hl=ja>)、緯度経度の GPS データの読み込み・ドローン画像の読み込み・距離や面積の測定などを行うことができる。下記に Google Earth Pro の画面構成と各機能を示す。このアプリ上の衛星写真から調査地の下見や現在・過去の藻場の確認（過去の衛星写真も見られる）などに活用でき、藻場の調査点の設定などにも利用できる。

Google Earth Pro の画面構成

- ① “ファイル” の選択や保存、“表示”、“編集”、“追加” で目印やポリゴンの追加などができる。
- ② アイコンを用いて地図上に目印、ポリゴン、レイヤ（写真など）の表示、過去の衛星写真の表示、距離や面積の表示ができる。
- ③ 地名などを入力し、見たい場所の衛星画像を表示できる。
- ④ 衛星画像画面に表示されているデータの表示順、表示非表示の切り替え及び削除
- ⑤ 衛星画像画面の拡大や縮小、方位の方向の調整などができる。
- ⑥ 衛星画像の取得日や緯度経度、高度などが表示される。



図. Google Earth Pro (バージョン 7.3.3) の画面構成. (衛星画像画面は神奈川県真鶴町沿岸を表示)

(2) オルソモザイク画像の作成

上述のように空中写真の像には位置ズレが生じるため、正確な藻場面積の判定には写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換（幾何補正、オルソ補正）する必要がある[2]。また、撮影した複数の画像を一括で処理したい場合、モザイク処理（複数の写真画像を1枚の画像にする）が必要である。Pix4D mapper (Pix4D 社) や Metashape (Agisoft 社)、DroneDeploy (DroneDeploy 社) といったソフトを用いて、パラメータなどを設定すれば自動でオルソモザイク処理をしてくれる。ただし、Pix4D と Metashape は永久ライセンス購入で50~70万円、DroneDeploy はProPlanで月額3万円ほどかかる（2020年12月）。作成したオルソモザイク画像はGeoTIFF形式なのでArcGISやQGIS（コラム2）といったソフト上で緯度経度を合わせて表示できる。図3-(1)-7にドローンによる空撮から藻場分布推定までの一連の流れを示す。オルソモザイク処理の際にGoogle Earth用のKMLファイルを作成すれば、上述のようにGoogle Earth Pro上で空撮写真を表示させ、フリーハンドで面積を計測できる。もし撮影範囲が広く目視による判定が煩雑であったり、目視以上の精度が必要になるならば専門的な知識が必要な画像解析が必要となる。画像解析の流れは衛星画像と共通なため3章の(3) 衛星画像（P.26-30）で示す。

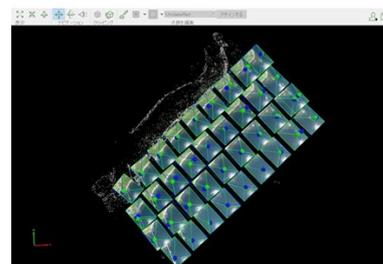
1. ドローンによる空撮



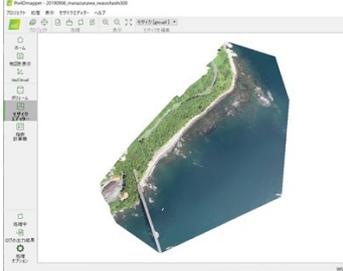
2. 空撮画像



3. オルソモザイク処理



4. オルソモザイク画像の作成



5. 藻場の判定方法を選択し、判別

- 現地データを教師に使い、ドローン写真上で目視により藻場判別
- 画像解析による藻場判別

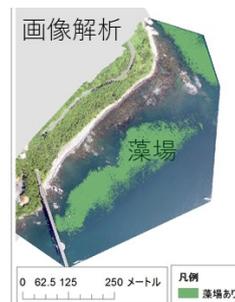


図3-(1)-7. ドローン空撮した画像から作ったオルソモザイク画像を用いた藻場分布推定の流れ

調査の実施例

- ・ドローン空撮画像からのカジメ場の推定：フリーハンドと画像解析の比較

神奈川県真鶴町沿岸に2019年までは大きなカジメ場が広がっていた。この場所で2019年9月に高度300m（高度150m以上での飛行許可を取得）からドローンにより空撮を行った[3]。この空撮画像を用いてPix4D mapperによりオルソモザイク画像を作成した。この画像をGoogle earth上に配置し船上カメラで藻場を観察したデータ（現地データ）と見比べて藻場範囲をフリーハンドで推定したものと、水深による画像の見え方を補正（水柱補正）した後に現地データを用いて教師付き分類により藻場範囲を推定したもの（画像解析したもの）を作成した（図3-(1)-8）。現地データの海藻の有無（被度25%以上で有）と推定結果を比較したところ、フリーハンドでも正答率は比較的高く78%となり、画像解析では正答率は86%であった（表3-(1)-1）。また、推定された藻場面積（被度 $\geq 25\%$ ）はフリーハンドでは29202 m^2 、画像解析では45494 m^2 と違いがあり、今回は前者では過小評価の割合（船上カメラで藻場があるところに空撮画像ではなしが18/61）が高く、後者では過大評価の割合（船上カメラで藻場がないところに空撮画像でありが9/36）が高かった（表3-(1)-1）。このように手法により違いがあるので、経時的に藻場をモニタリングするには毎回同じ手法で分析した方が良い。

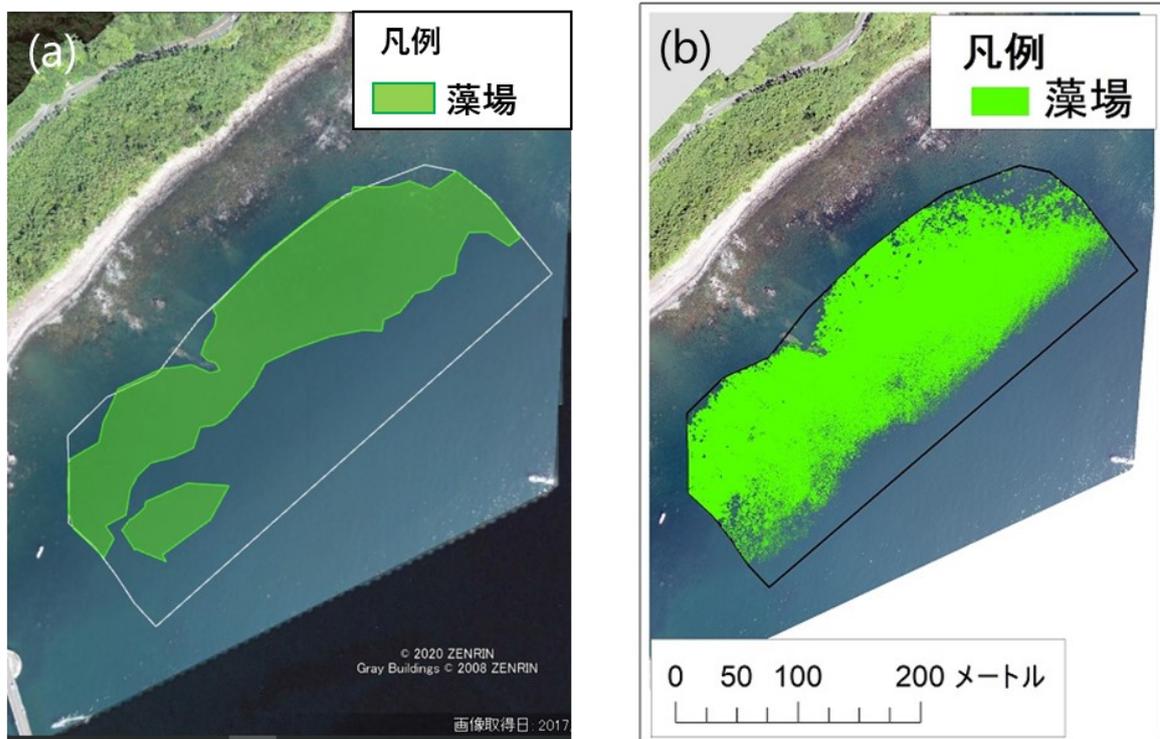


図3-(1)-8. 神奈川県真鶴町沿岸においてドローン空撮した画像から (a) Google earth を用いてフリーハンドで推定した藻場と (b) 画像解析により推定した藻場（枠内が対象範囲）

表3-(1)-1. ドローンによる空撮画像から (a) Google earth を用いてフリーハンドで推定したカジメ場と (b) 画像解析により推定した藻場の正答率

(a)	ドローン空撮				(b)	ドローン空撮			
	船上カメラ調査	藻場あり	藻場なし			合計	船上カメラ調査	藻場あり	
藻場あり		43	18	61	藻場あり	56	5	61	
藻場なし		3	33	36	藻場なし	9	27	36	
合計		46	51	97	合計	65	32	97	

正答率： $(43+33)/97 \times 100 = 78.3\%$

正答率： $(56+27)/97 \times 100 = 85.6\%$

- ・ドローン空撮が捉えたカジメ場の磯焼け

真鶴町沿岸で 2019 年 9 月と同様のドローン空撮を 2020 年 10 月にも行い、同様に被度 25%以上を藻場有として画像解析により藻場分布を推定した。そして、2019 年と 2020 年の推定結果から 1 年間の藻場分布の変化を調べた (図 3-(1)-9)。2020 年 10 月の画像では沖合でうまくモザイク画像が作成されなかった部分もあるが、藻場面積は 2019 年の 45494m² から 2020 年の 4840 m² に大きく減少していた。この結果は 2019 年の秋の台風とその後の植食魚による食害の影響が大きかったことを示唆している。磯焼け対策により今後藻場が復活する可能性もあり、経時的にモニタリングしていくことが重要である。

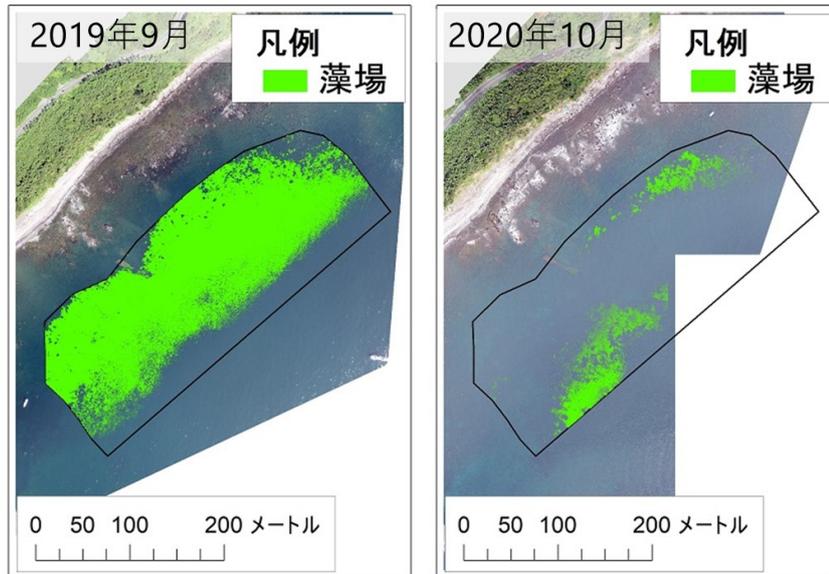


図 3-(1)-9. 2019 年と 2020 年の秋にドローン空撮画像から推定された神奈川県真鶴町沿岸の藻場分布.

- ・ドローン空撮画像からの藻場の種類別・被度別の判別

大分県名護屋湾で 2019 年 2 月に高度 400m (飛行許可を取得) からドローンにより空撮したところ、水底までよく見える画像を取得できた。この空撮画像から作成したオルソモザイク画像を水柱補正し、その底質指標から紅藻類、クロメ、シオミドロといった海藻種類の判別と海藻の被度 (被度<25%、25%-50%、50%-75%、 $\geq 75\%$ の 4 区分) の判別を教師付き分類により試みた。その結果、海藻種類及び海藻被度ともにそれぞれ正答率 82% (19/23) で判別できた (図 3-(1)-10)。海水の透明度の高いときに取得した空撮画像ならば、高い精度で海藻の大まかな種類や被度の判別ができることがわかった。

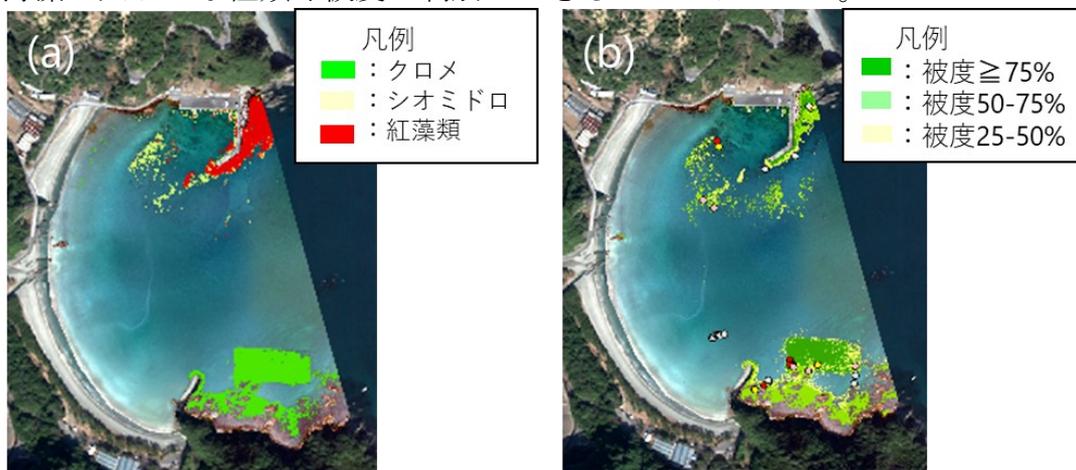


図 3-(1)-10. 大分県名護屋湾波当津の空撮画像を用いた、(a)海藻の種類及び (b)海藻の被度の判別

【コラム2】GISソフトの利用

GIS (Geographic Information System:地理情報システム) ソフトとして有名なものに ArcGIS と QGIS があり、大学や国・地方公共団体の公的研究機関などで利用されている。藻場のモニタリングでは、緯度経度のついた現地調査や音響測量データ、空中写真の位置づけ(画像の幾何補正も)に利用でき、藻場分布の把握や面積の計測に役立つ。ArcGIS はベーシックライセンス購入で 39 万円(2021 年 1 月)かかり、機能の追加にはさらにエクステンション(有料)が必要となる(www.esri.com/products/arcgis-desktop/prices/)。QGIS は無料のオープンソースソフトであり、有料な GIS ソフトに近い機能や操作性をもち、機能の追加も無料のプラグインで行うことができる(<https://qgis.org/ja/site/about/index.html>)。また、ネット上に多くの説明サイトやセミナー資料があり、初歩から勉強できる環境が整いつつある。下記に QGIS の画面構成と各部分の機能を紹介する。

QGIS の画面構成(株式会社 MIERUNE の QGIS 説明資料を参考)

- ・メニューバーとツールバー

表示するファイルの選択や表示、編集など。ツールバーはその機能をアイコンで表示。

- ・レイヤパネル

地図キャンパスに表示されているデータの表示順、表示非表示の切り替え及び削除

- ・地図キャンパス

地図の描画領域

- ・ブラウザパネル

PC のローカルフォルダからレイヤパネルにデータを移し、地図キャンパスに表示できる。

- ・プロセッシングツールボックス

様々な機能を選択し、使うことができる。

- ・ステータスバー

縮尺や座標などの情報を表示

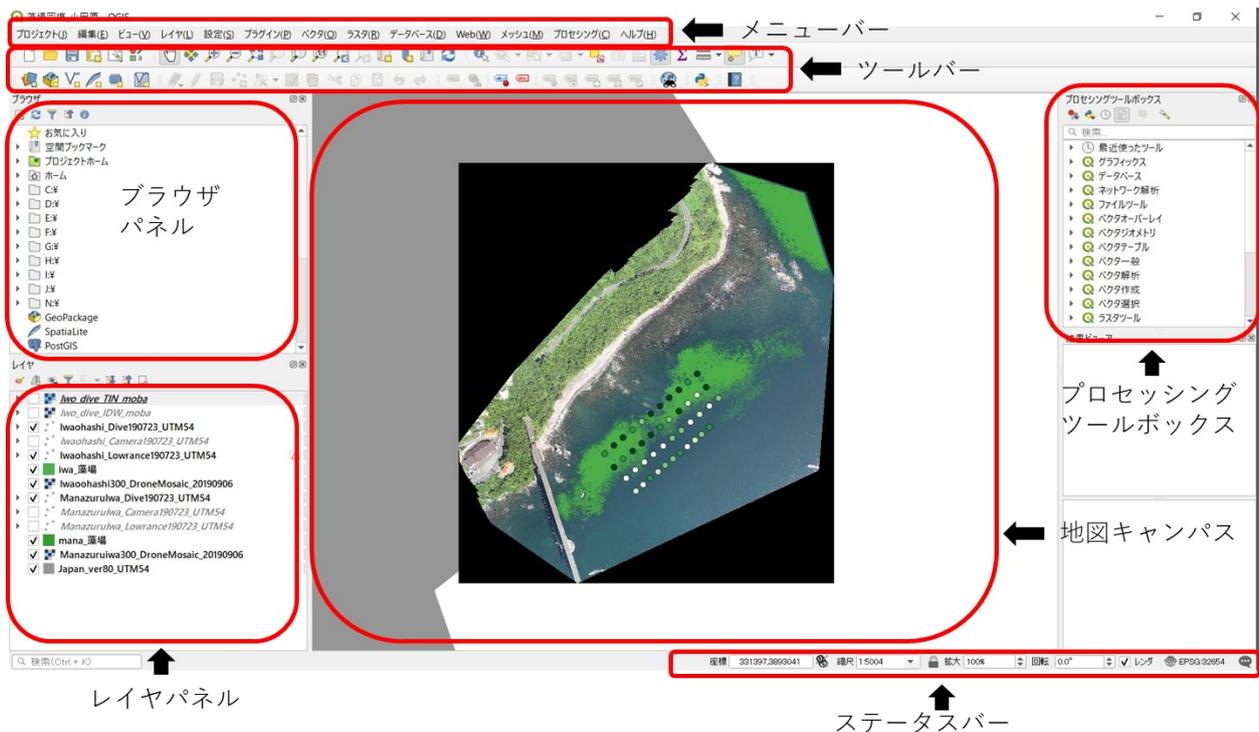


図. QGIS (バージョン 3.10.14) の画面構成。(地図キャンパスには 2019 年の神奈川県真鶴町の藻場分布を表示)

(2) 音響測量

音響測量では海藻と地面の反射の違いから海藻の分布を把握する。ドローン空撮と同様に地先 (0.03~12km²) が対象範囲となるが[3-8]、水の濁った状態や水面から海藻が見えにくい 10m 以深も調査することができる。そのため、ドローン空撮で海藻がみえない深場などで調査するのも適している。藻場有無の判別精度は 70-90%程度である[3, 4]。丈が短い幼体や小型海藻の判別は難しいが、草丈の違いから大型海藻と小型海藻を分別した事例もある[9]。

調査機材

- ・GPS 付き魚群探知機 (魚探本体および振動子) (図 3-(2)-1)
- ・魚探の振動子の船への固定装置
- ・記録用の野帳
- ・小型船 (水深が浅い藻場を調査するため 1 トン未満の船外機船が適している)



図 3-(2)-1. 魚群探知機の各種の名称と船上での調査の様子

調査計画の立案

初めに調査点やラインを設定する。カシミール 3D や Google Earth の新規パスの機能を用いることで、調査ラインを設定する(コラム 3)。ライン間の間隔は 10-30m の調査が多い[4, 6]。

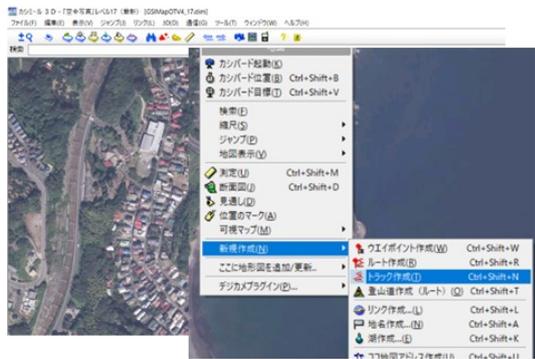
調査の実施方法

設定した調査点・ラインを SD カードなどで魚探本体に取り込み、画面上に表示させる(図 3-(2)-2)。魚探の記録ボタンを押して調査をスタートさせ、その時の時刻を記録しておく。調査点・ラインに沿って船を 3 ノット (時速 5.6km/h) 程度で走らせ、魚探やダウンスキャン、サイドスキャンのデータを記録する。サイドスキャンでは左右に水深の 3~4 倍の幅で海底反射情報が得られるが、その画像からの海藻の判別は難しい (ただし、砂地と岩礁の区別は可能)。調査は船を操縦する船長、前方の岩礁や障害物を監視する 1 人、メモや魚探本体でウェイポイントを記録する 1 人の 3 名以上で行うことが望ましい。6 時間の調査ならば、約 34km (3 ノット=5.6km/h ×6 時間=33.6km) のラインデータを取得できる。簡易音響測器 (Lowrance) の詳細な操作方法については水産技術研究所・水産工学部のマニュアル[10]が参照できる。また、海藻が生えていることを確認するために、測線の測線上で船上から水中カメラなどを用いて現地データを複数点取ることが必要となる。

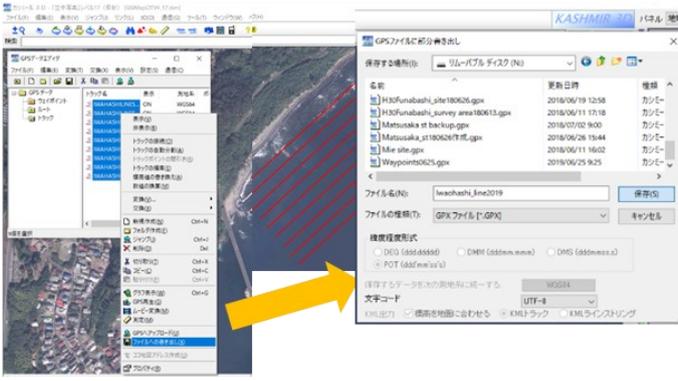
【コラム3】カシミール3Dの利用

カシミール3Dは登山者向けの地図ソフトであるが、無料機能だけでもいくつかの地図を読み込むことができる。また、Google Earthのように調査点の設定し、そのままGPXファイルとして魚探やハンディGPSへ転送することができる(図1)。

1. 地図上で右クリックし、新規作成→トラック作成から測定の調査ラインをつくる



2. GPSデータ編集から作成した調査ラインを選んで、→ファイルへの書き出し、SDカードにGPXファイルとして保存



3. SDカードに保存したデータを、魚群探知機に取り込む



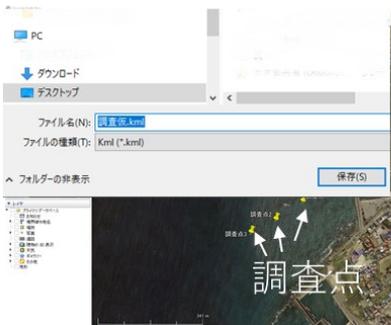
4. 作成した調査ラインが魚探画面上に表示される



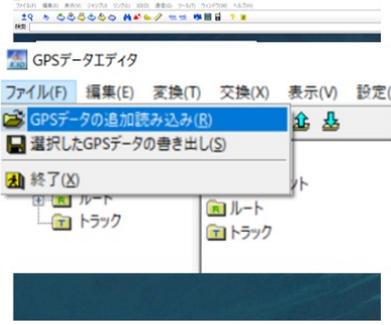
図1. カシミール3Dによる調査ラインの設定と魚探への取り込み

Google Earthでは衛星地図の上で調査点や調査ラインを作成できとても便利だが、kmlファイル(もしくはkmzファイル)でしか保存できず、そのままでは魚探やハンディGPSで利用できない。そこで、カシミール3DでkmlファイルをGPXファイルに変更してGPSに取り込むと現場でも利用できる(図2)。

1. Google Earthで調査点を設定し、kmlファイルで保存



2. カシミール3Dで調査点のkmlファイルを読み込む



3. 通信→調査点のウェイポイントをハンディGPSへアップロード

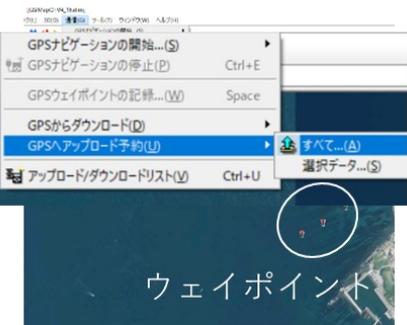


図2 Google Earthによる調査点の設定とカシミール3Dを介したGPSへのアップロード

調査結果の取りまとめ

(1) 音響測量データの確認

簡易音響測器で記録し、SonarTRX(Leraand Engineering Inc.製、2021年1月で29000円)にPC上に取り込んだ2つの藻場のダウンスキャンの画像(s12ファイル)を示す(図3-(2)-3) [9]。ダウンスキャン画像では底質を詳細に確認することができる。左図は砂地に転石の上にクロメが藻長約1m、被度100%近くで繁茂しているところの画像である。右図は藻長1~1.5mのホンダワラ科のヨレモクモドキが被度60%程度で繁茂している場所である。測量時の時系列でみると各画像の左側が古いデータになり、右側のものほど時間が進んだ新しいデータとなる。反射の強弱は、白黒の濃淡で表され、反射の小さい水中は黒く表示されている。上部の白横線は海表面、そして下部の白線が海底面の反射となる。



図3-(2)-2. 測量中のストラクチャスキャン付きGPS魚探(Lowrance)画面上のサイドスキャンの地形画像(左)、ダウンスキャンの地形画像(右上)、船の位置と調査点とラインの図(右下)

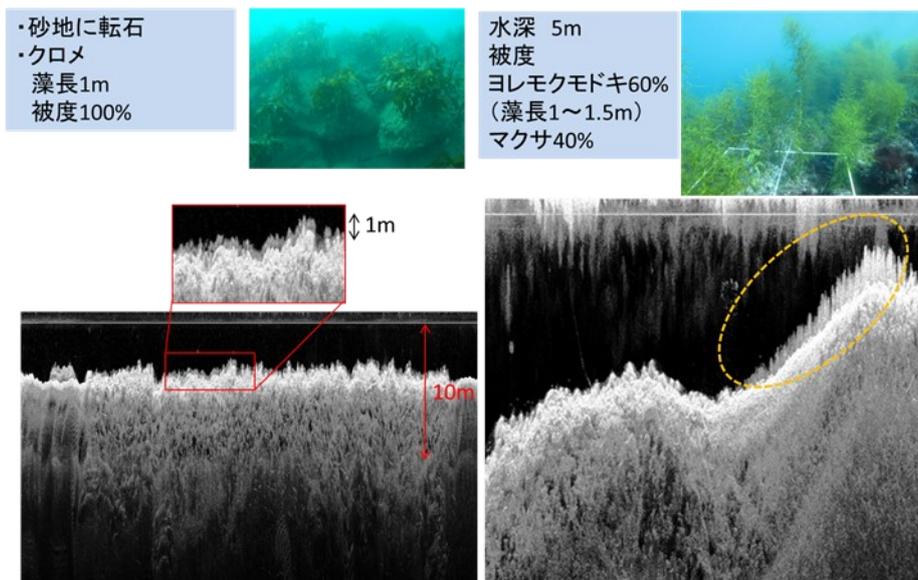


図3-(2)-3. GPS魚探(Lowrance)で記録したクロメとヨレモクモドキの藻場(大分県名護屋湾)のダウンスキャンの地形画像[27]

(1) 藻場の判別とデータ入力

記録したダウンスキャン画像から藻場判別した手順を説明する。ソフトウェアReefMaster(ReefMaster Software Ltd.社製、2021年1月で18000円)でダウンスキャンのデータを取り込んで(SonarTRXでも可)、目視で判別する(図3-(2)-4)。ReefMasterから読みだした緯度、経度、観測時間のデータをエクセルファイルで表示し、ReefMaster上の表示時間と合う行に藻場判別(藻場あり=1、なし=0)を記録する。ただし、ダウンスキャン画像から藻場の種類や被度までを判別するのは難しい。

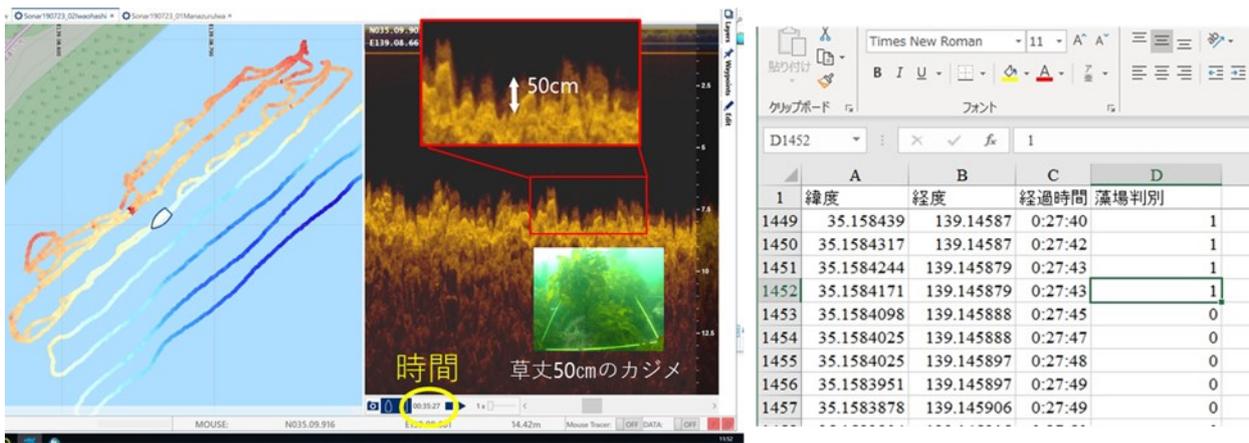


図 3-(2)-4. 魚探(Lowrance)で記録したカジメ場のダウンスキャンの地形画像と藻場判別の記録 (Reefmaster 及び Excel を利用)

(2) GIS ソフト上でのプロジェクトの CRS 設定

入力した藻場判別のエクセルデータ (図 3-(2)-4) を GIS に読み込む前に、新規プロジェクトを作成し、「座標参照系」(CRS:Coordinate Reference System)を設定する必要がある(ここでは無料のオープンソースソフト QGIS を利用すると仮定)。米国製の魚探 Lowrance など取得した緯度経度は世界測地系 1984 (WGS84) で記録されており、それに合わせてプロジェクトの CRS を設定する (図 3-(2)-5) (P22 コラム 5 も参照)。

(3) 藻場分布のマッピング

入力した藻場判別のエクセルデータ (図 3-(2)-4) を csv 形式に変換し、GIS ソフトで読み込むことでその結果を地図上に示すことができる。ここでは QGIS 上に藻場判別データを追加する方法を説明する (図 3-(2)-6)。このデータを内挿(データがある場所から、ない場所を推定すること)することで、対象範囲の藻場分布が推定できる (図 3-(2)-7)。また、QGIS のプロセッシングツールボックス→ラスタ解析→ラスタレイヤの統計量で、この推定された藻場の面積を算出できる。

【コラム4】緯度経度の10進法(度)と60進法(度分秒)表示

藻場調査を行うときの調査点の設定やデータ取得の際に緯度経度を記録することはよくある。調査データをGISソフトや統計解析ソフトで用いる際には緯度経度の10進法(度)が便利だが、現地調査で調査点を知らせるときなどは60進法(度分秒)を使うことが多い。データ処理の際などに使う場面が多いが両者の変換の方法はなかなか覚えにくいいため、ここで紹介する。

60進法(度分秒)→10進法(度)への変換

- ・60進法(度分秒)表示(例)

緯度：34度59分6.36秒(34° 59' 6.36")

経度：139度46分54.36秒(139° 46' 54.36")

- ・60進法(度分秒)から10進法(度)への変換

緯度：34 + 59×1/60 + 6.36×1/3600 = 34.985100(度)

経度：139 + 46×1/60 + 54.36×1/3600 = 139.7817667(度)

10進法(度)→60進法(度分秒)への変換

- ・10進法(度)表示(例)

緯度：34.985100度(34.985100°)

経度：139.7817667度(139.7817667°)

- ・10進法(度)から60進法(度分秒)への変換

緯度：

度の取り出しは34.985100から整数値を取り出し→34度

分の取り出しは(34.985100-34)×60 = 59.106から整数値を取り出し→59分

秒の取り出しは(59.106-59)×60 = 6.36により→6.36秒

よって、34度59分6.36秒(34° 59' 6.36")と変換される。

経度：

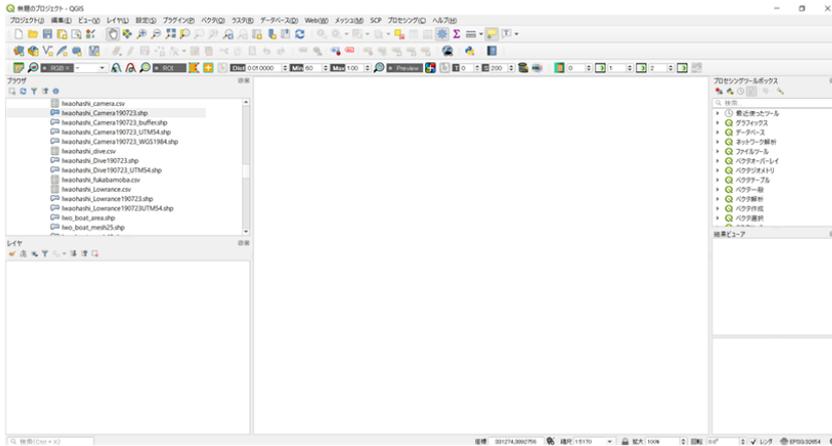
度の取り出しは139.7817667から整数値を取り出し→139度

分の取り出しは(139.7817667-139)×60 = 46.906から整数値を取り出し→46分

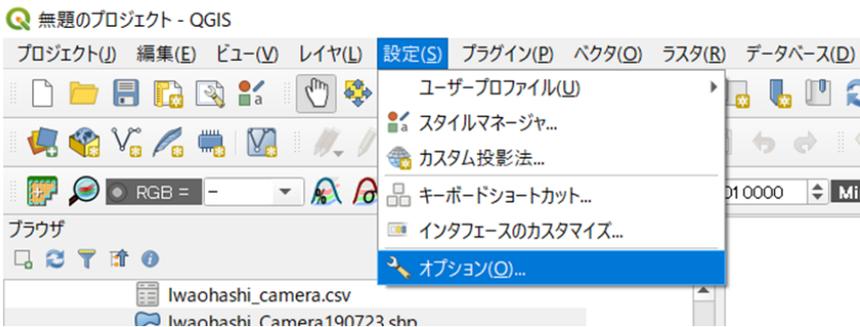
秒の取り出しは(46.906-46)×60 = 54.36により→54.36秒

よって、139度46分54.36秒(139° 46' 54.36")と変換される。

1新しいプロジェクトを開く



2 設定のオプションを選択



3 オプションの座標参照系からプロジェクトのCRSを選ぶ

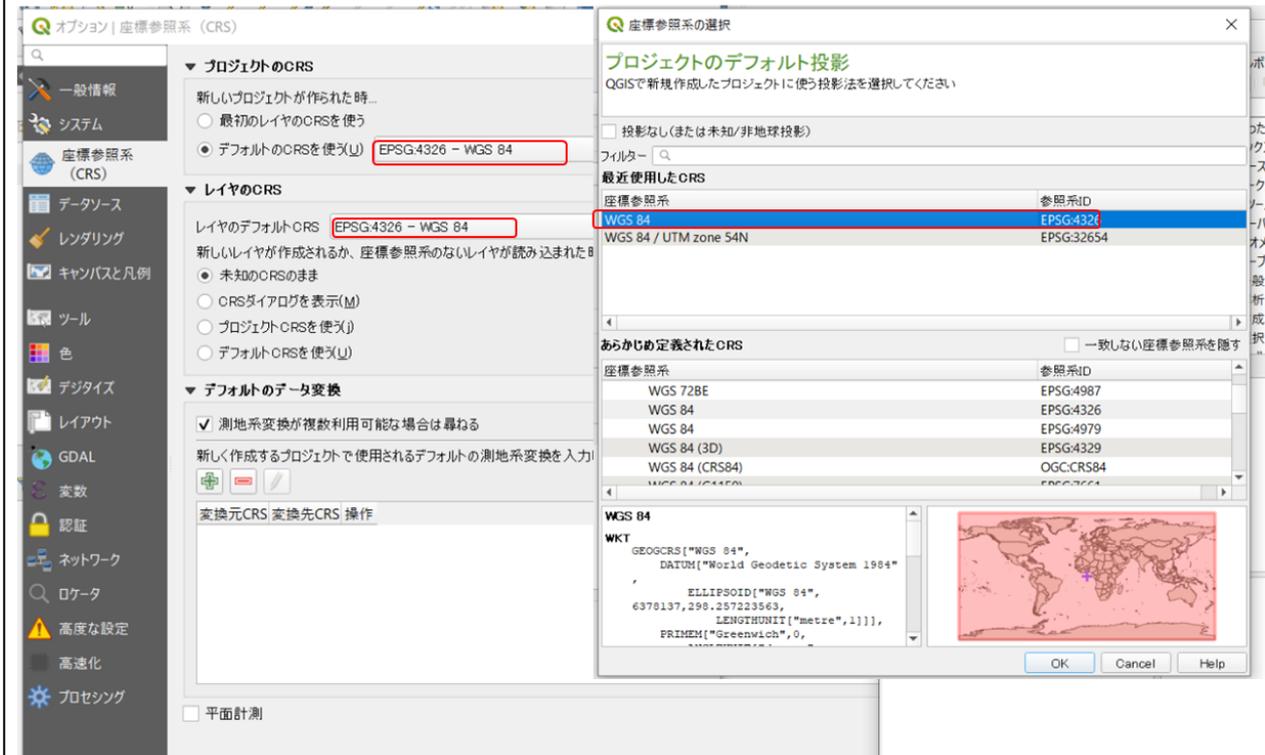
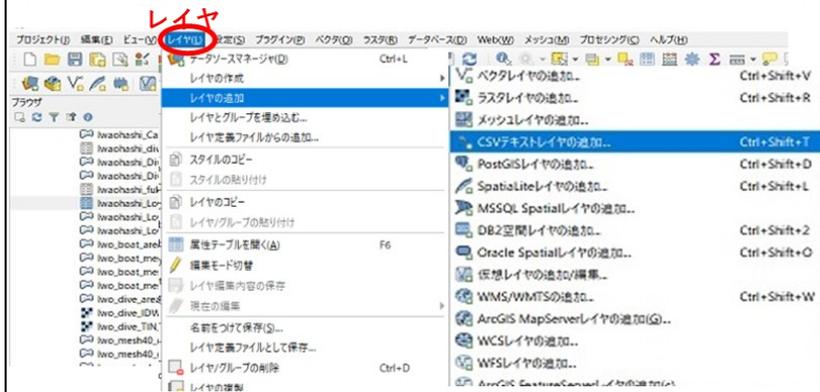
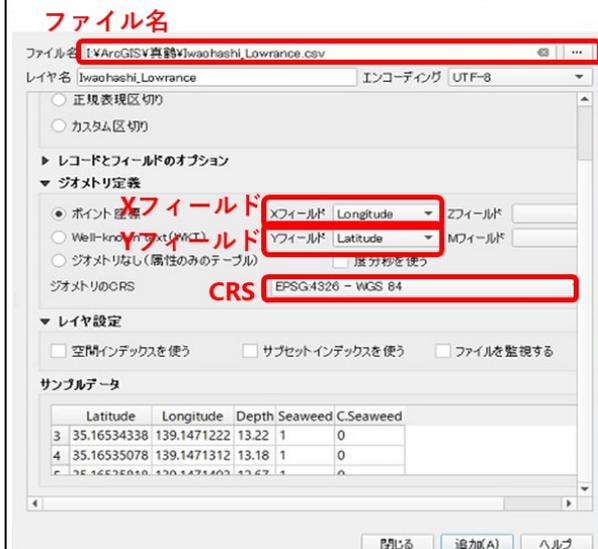


図 3-(2)-5. QGIS 上で新規プロジェクトを開き、座標参照系 (CRS) を設定する方法 (QGIS バージョン 3.10.0)

1 レイヤ→レイヤの追加→CSVテキストレイヤの追加...
を選択する



2 ファイル名から該当のCSVファイルを選択し、Xフィールド・YフィールドやCRSを設定し、追加する



3 追加されたLowranceのデータが表示される

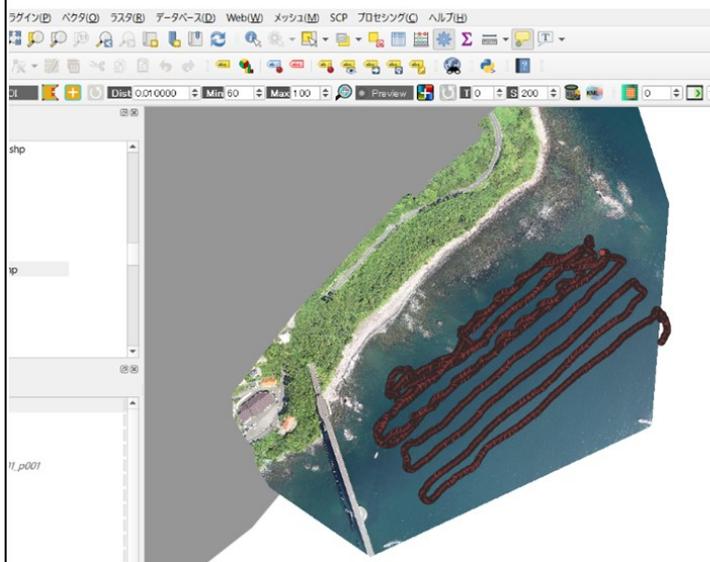


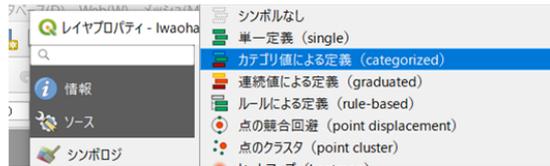
図 3-(2)-6. QGIS 上に CSV ファイルをレイヤとして追加する手順 (QGIS バージョン 3.10.0)

4 藻場をわかりやすくするために、Lowranceのデータの各地点のデータを藻場あるを緑になしを白に設定する。

- ・レイヤを右クリックし、プロパティを選んで開く。シンポロジを選択



- ・シンポロジの単一定義→カテゴリ値による定義に



- ・"値"を藻場判別のある・なしデータ（画像上ではC_seaweed）のものに設定



- ・"分類"をクリックするとシンボルが出てくる



- ・シンボルの色を緑と白に変更する。



5 藻場ある・なしで色分けされたLowranceのデータ

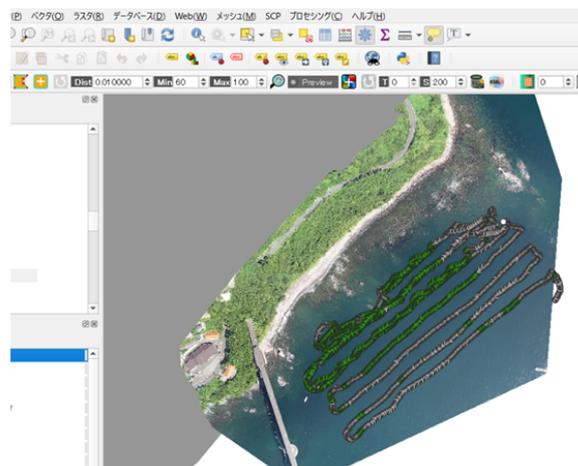


図 3-(2)-6. つづき



図 3-(2)-7. 魚探データから藻場分布を内挿して推定する手順 (QGIS バージョン 3.10.0)

【コラム5】測地系・座標系

GIS を使う上で必要となる知識の一つに、「座標参照系」(CRS:Coordinate Reference System) というものがある。「座標参照系」とはGIS の中で一般的に使用されている位置を表す決まりのことで測地系と座標系から成り、これを指定することでGIS 上で地球上の特定の場所の位置を示すことができる。特にGIS 上で位置情報を扱う際には“同一”の「座標参照系」(測地系と座標系)を用いることが基本となる。

・測地系とは

地球上の位置を経緯度(経度・緯度)および標高による座標によって表すための系(システム)を指す。Google マップやMapionが採用している世界測地系1984(WGS84)や日本で構築されている日本測地系2011(JGD2011、世界測地系でもある)などがある。GarminのGPSなどではWGS84で緯度経度を取得している。ただし、WGS84とJGD2011の緯度経度の値の間でほとんどズレはない。

・座標系(測地座標系)とは

地球上の特定の位置を示すための方法と数値の組み合わせである。

地理座標系

地理座標系は地球を球体とみなし、単位が「度」(例. 緯度, 経度=北32°, 東132°)で示されているものである。公表されているデータは世界測地系(WGS84など)の緯度経度で示されるものが多い。距離・面積の評価には不向きである。

投影座標系

地球の一部を平面に投影したもので、よく使われるものにUTM(ユニバーサル横メルカトル図法)座標系や平面直角座標系などがある。単位が「m」(例. $(x, y) = (15000m, 2000m)$)なので、距離・面積の測定に適している。GIS場で藻場の面積を計測する際などにも地理座標系から投影座標系によく変換される。また、国土地理院発行の地図の1:25000地形図などでもUTMが使用されている。投影座標系では日本国内でもゾーンに分かれているので、GIS上に投影する際には対象地域がどのゾーンなのか確認して座標参照系を選ぶ必要がある。

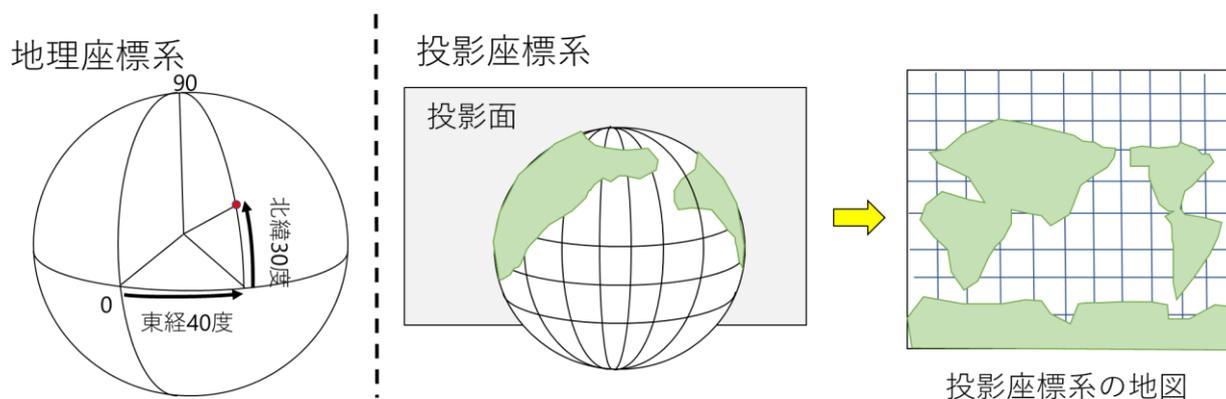


図. 地理座標系と投影座標系のイメージ図

調査の実施例

・音響魚探を用いたカジメ場分布の推定

神奈川県真鶴町沿岸の岩大橋側において約400mのラインを7本、真鶴側において約400mのラインを9本設定し、音響魚探のLowranceを用いてライン調査を行った[3]。その音響データから判別した藻場の有無をもとに調査データを空間内挿することにより、対象範囲全体の藻場分布を推定した(図3-(2)-8)。岩大橋側では黒枠大の中のカジメ場面積は26926 m²、真鶴側の黒枠大の中のカジメ場面積は20600 m²と推定された。

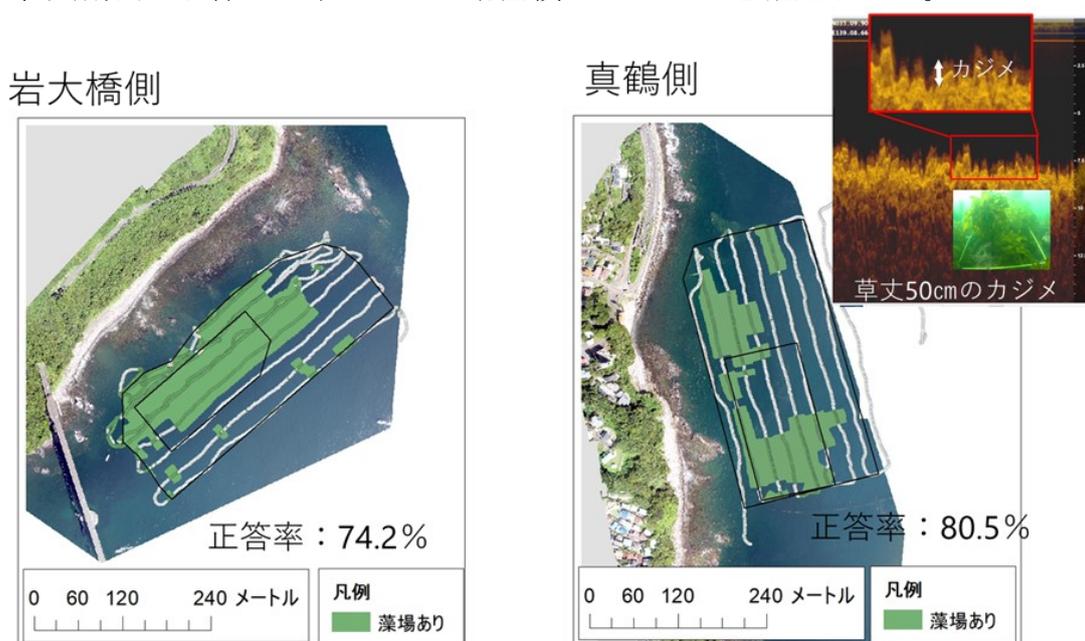


図3-(2)-8. 音響測量により推定された神奈川県真鶴町沿岸の藻場の分布

音響測量と船上カメラ調査によるカジメ藻場の有無(カジメ被度 $\geq 50\%$ を有り)の結果を同一地点で比較し、船上カメラ調査の結果に対する音響測量の正答率を計算したところ、カジメ藻場の有無では音響測量の正答率は70-80%程度となった(表3-(2)-1)。

表3-(2)-1. 音響測量と船上カメラ調査のカジメ場有無(被度50%以上を有)の比較による正答率(精度)の計算

船上カメラ調査	音響測量		合計
	藻場あり	藻場なし	
藻場あり	24	2	26
藻場なし	23	48	71
合計	47	50	97

$$\text{正答率} : (24+48)/97 \times 100 = 74.2\%$$

船上カメラ調査	音響測量		合計
	藻場あり	藻場なし	
藻場あり	17	3	20
藻場なし	19	74	93
合計	36	77	113

$$\text{正答率} : (17+74)/113 \times 100 = 80.5\%$$

(3) 衛星画像

衛星画像ではドローン空撮や音響測量よりも広い市町村、県、地方の範囲（25 km²～）で藻場を把握できる（図 3-(3)-1）。温帯域では水面から海藻が見える限界の水深 10m 程度より浅い範囲が対象となる[11-15]。基本的に藻場の有無が判別できるが、褐藻、緑藻、紅藻、アマモ類などの大まかな分類や被度の粗密がわかる場合もある[11-14, 16, 17]。藻場有無の判別精度は 60-90%程度である[11, 12, 14, 15]。

調査計画の立案（現地情報の収集）

まず現地情報を収集し、どの場所・時期の藻場分布を把握するかを決める。一般に海藻の繁茂期である冬から初夏の期間の藻場分布を知りたいことが多いと思うが、潜水観察・船上調査による現地データ（教師・検証データ）がある時期に近い画像を選ぶことが重要である。画像解析で藻場分布を推定する場合、現地データの数は多ければ多いほど良いが、多くの論文で教師用と検証用にそれぞれ 1 画像当たり 30 点以上（合計 60 点）を利用している[3, 11, 12, 18, 19]。その他、水深、底質、水質等も有用な情報となる。

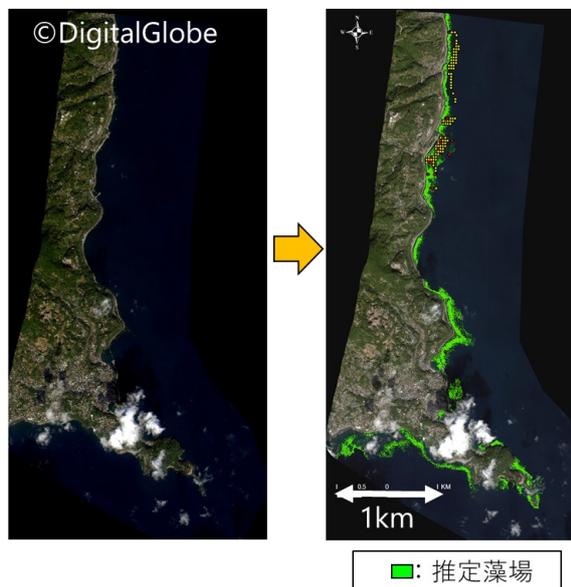


図 3-(3)-1. 衛星画像（左）から推定された藻場の範囲（右）（神奈川県相模湾西部を 2017 年 11 月撮影した画像）

衛星画像の入手

・アーカイブサイト

藻場判読に適用可能な解像度の衛星画像の種類を人工衛星ごとに表 3-(3)-1 に整理した。また、衛星画像のアーカイブサイトの URL を表 3-(3)-2 にまとめた。アーカイブサイトで藻場分布を把握したい地域、年月、画像に映る雲量（少ないほど海面が見える）を設定し、撮影画像の有無を確認する（図 3-(3)-2）。なお、撮影時期について、ピンポイントの画像があることは少なく、3ヶ月程度の幅を持って検索する。アーカイブ画像の価格は幅があり、高解像度なほど価格が高くなる（表 3-(3)-1）。また、最低購入面積が決まっており、購入の際に注意が必要である。

衛星画像の光学センサーでは可視光線（青+緑+赤の BGR など）と人間の視覚では捉えきれない近赤外線、赤外線の波長などを観測できる。センサーでは、一つの機器で複数の波長帯を同時に観測でき、それぞれの波長帯毎に「バンド」という単位で分けられている[20]。すべての人工衛星の光学センサーはバンド数が 3 種類上あり、バンド数が多くなるほど藻場判別に有効な場合もあるが、その分衛星画像の価格も高くなる。ただし、近赤外、赤外の波長は水中ではすぐに減衰してしまうので、藻場判別にはあまり使われない。購入前に衛星画像にどのバンドが含まれているか確認する必要がある。

購入価格は、例えば Worldview-2 の 8 バンド画像（コースタルブルー+青+緑+黄+赤+レッドエッジ+近赤外 1+ 近赤外 2）では少なくとも 3700 円/km²×25km²（最低面積）= 92,500 円となる。衛星写真は 4 バンド（青、緑、赤、近赤外）や 8 バンドのオルソ画像データとして納品される。

表 3-(3)-1. 衛星画像の特徴と購入価格の目安 (2021 年 2 月現在)

人工衛星	運営会社	解像度 (マルチ)	バンド数	打ち上げ時期	運用終了時期	アーカイブ価格 (1km ² あたり)	新規撮影価格 (1km ² あたり)	最低購入面積 (アーカイブ/新規)
WorldView-2	Maxar Technologies 社 (米国)	1.85m	8	2009年10月	運用中	3700円 ^a	5200円~ ^a	25km ² /100km ²
WorldView-3	Maxar Technologies 社 (米国)	1.24m	8	2014年8月	運用中	3700円 ^a	5200円~ ^a	25km ² /100km ²
WorldView-4	Maxar Technologies 社 (米国)	1.24m	8	2016年11月	運用中	3700円 ^a	5200円~ ^a	25km ² /100km ²
GeoEye-1	Maxar Technologies 社 (米国)	1.64m	4	2008年9月	運用中	3400円 ^a	4900円~ ^a	25km ² /100km ²
IKONOS	Maxar Technologies 社 (米国)	3.28m	4	1999年9月	2015 年 3月終了	1900円 ^a	-	25km ²
ALOS	JAXA (日本)	10m	4	2006年1月	2011 年 5月終了	無料	-	-
Sentinel-2A /Sentinel-2B	European Space Agency (EU)	10, 20m	8	2015 年 6 月 /2017年3月	運用中	無料	-	-
Pleiades-HR	CNES (フランス)	2.8m	4	2011年12月	運用中	2400円 ^c	3000円~ ^c	25km ² /100km ²
SPOT-6	Spot Image社 (フランス)	6m	4	2012年9月	運用中	220円 ^c	340-680円 ^d	100km ² /500km ²
SPOT-7	Spot Image社 (フランス)	6m	4	2014年6月	運用中	220円 ^c	340-680円 ^d	100km ² /500km ²
RapidEye	Planet Labs社 (米国)	5m	5	2008年8月	2020 年 4月終了	140円 ^d	-	500km ²

^a<https://www.aw3d.jp/news/201908/00896/>

^b<https://www.restec.or.jp/solution/product/product-alos/alos-price.html>

^chttps://www.restec.or.jp/ja/wp-content/uploads/2016/10/SPOT_Pleiades_price_201512.pdf

^dhttp://www.eotec.com/images/Pricing_RapidEye_products_ver1.pdf

表 3-(3)-2. 衛星画像のアーカイブサイトと閲覧できる衛星 (2021 年 2 月現在)

サイト名	URL	閲覧できる衛星
日本スペースイメーシング社 (JSI社) 画像検索サービス	https://iss.jsicorp.jp/map/ https://www.jsicorp.jp/satellite_image/search_buy/search.html	WorldView-3, WorldView-4, WorldView-2, GeoEye-1, IKONOS, QuickBird
Maxar Technologies Discover	https://discover.digitalglobe.com/ https://www.jsicorp.jp/satellite_image/search_buy/search.html	WorldView-3, WorldView-4, WorldView-2, GeoEye-1, IKONOS, QuickBird
AIRBUS DEFENCE&SPACE社 サイト	https://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-geostore-or	Pleiades-HR SPOT-6 SPOT-7
Sentinel ウェブサイト	https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/	Sentinel-2A Sentinel-2B
ALOS オルソ補正画像プロダクト (ALOS-ORI)	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/alos-ori/index.html	ALOS PRISM

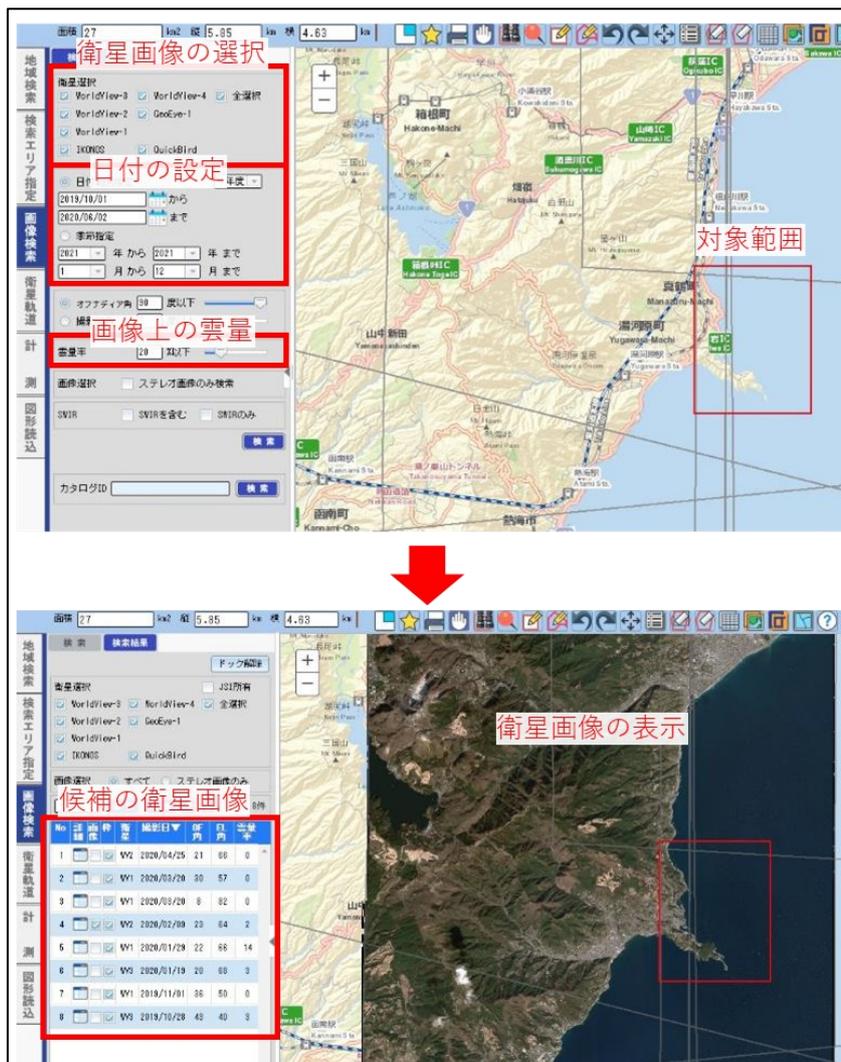


図 3-(3)-2. アーカイブサイト（JSI 社）で衛星画像を検索する例

・新規撮影

ほしい時期の写真がアーカイブにない場合、代理店に依頼して新規撮影する。ほしい解像度やバンド数から人工衛星の種類を決めて、撮影範囲（面積）、撮影時期を設定し、新規撮影を発注する。撮影時期については、撮影計画立案から実施に要する期間を見込んで発注する必要がある、年度当初の春季や天候障害の多い冬季で計画する場合は特に留意が必要である。

必要な精度と事業予算から適切な仕様を決定した上で、航空写真とのコスト比較を行う。成果は4バンド（青、緑、赤、近赤外）や8バンドのオルソ画像データとして納品される。

オルソ補正とマスク処理

ここからの先の処理は航空写真・ドローン空撮画像と共通である。通常、オルソ補正済みの衛星画像を購入できるが、補正していない画像に対しては、傾きやズレがない正しい大きさと位置に表示される画像に補正（オルソ補正）する必要がある。次に藻場に関係のない陸域、雲域、大水深域等をマスク処理で除外し、解析範囲を限定する（図 3-(3)-3）。

オリジナル空中写真（衛星画像・航空写真・ドローン空撮画像）から大気や水の影響を取り除き、海底からの反射光を抽出し、底質の違いを増幅させた指標を用いて藻場判別

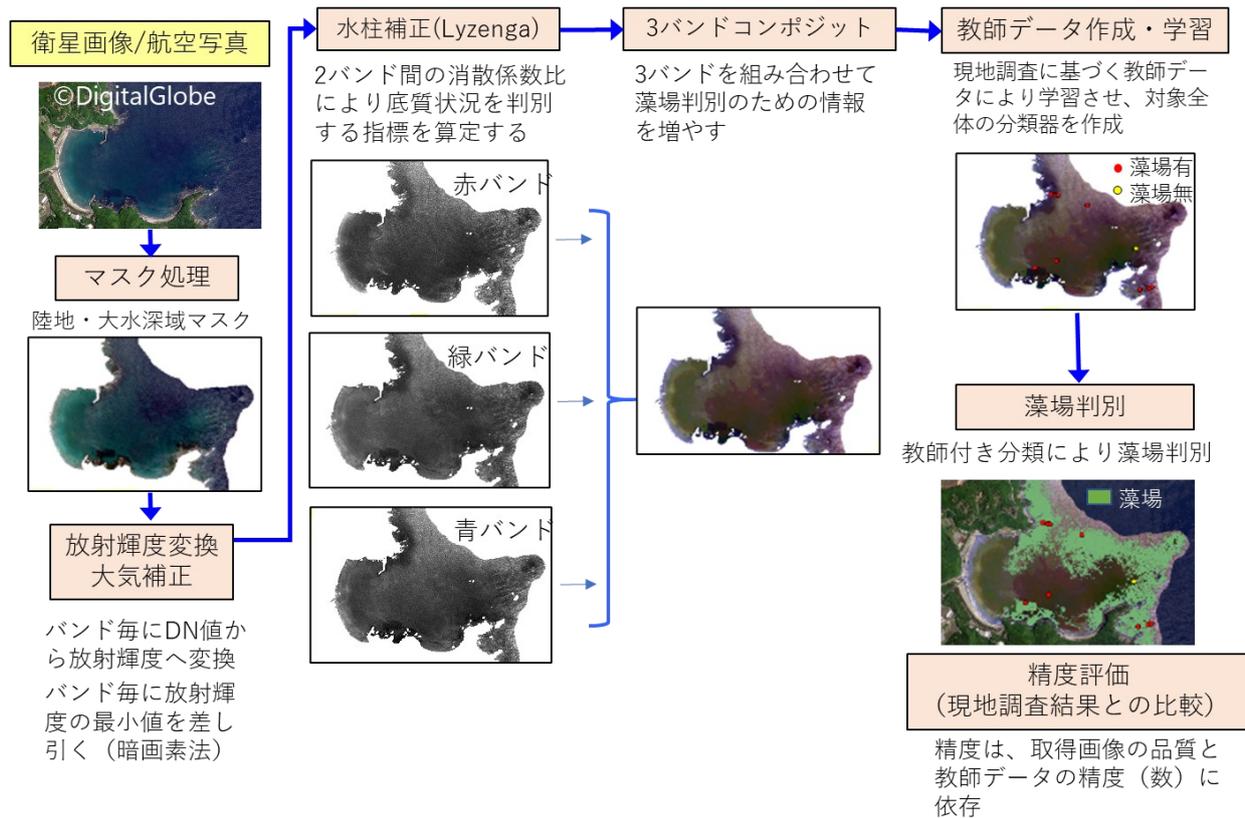


図 3-(3)-3. 空中写真（衛星画像・航空写真・ドローン空撮画像）の解析手順について

放射輝度への変換と大気補正

空撮画像（特に衛星画像）が複数枚に及ぶ場合は画像毎に記録された DN（デジタルナンバー）値から放射輝度へ変換する必要がある（図 3-(3)-3）。変換式は衛星画像ごとに決まっており、その係数の情報は衛星画像と一緒に納品される。

変換した放射輝度から大気や水中での光の散乱や吸収の影響を取り除き、海底面の反射率のみの放射輝度データに補正することで、海底面の反射率の違いから、藻場、砂地、岩場などを分類できる（図 3-(3)-4）。大気補正の簡易的な方法として、水深が十分に大きく海底からの反射の影響がないと考えられる海域で観測される輝度を画像のすべてのピクセルの放射輝度から差し引いて補正する暗画素法がある。

水柱補正

水深によって画像上の海底面の見え方は異なるので、水柱補正は藻場判別の精度確保において重要な工程である。藻場判読における水中補正は、Lyzenga（1981）の方法または Sagawa et al. (2010)の方法がよく用いられる。Lyzenga（1981）の方法は、画像のバンド（例．光学カメラで撮影した画像ならば R、G、B の 3 バンド）のうち 2 バンド間の放射輝度の消散係数の比により算定される DII (Depth-Invariant Index) と呼ばれる指標に変換することで水深の影響を除去するものである（式 1）。Sagawa et al. (2010)の方法は、同様の底質地点（海藻がない砂質など）から抽出したバンド毎の放射輝度と水深との相関（比例定数）を求め、これを解消対象海域の各画素地点の水深に応じて BRI (Bottom surface Reflectance Index) と呼ばれる指数に変換することで、海底面の違いを表す（式 2）。なお、消散係数は、画像データから底質が同様の地点（砂地、藻場なしなど）を抽出して求める。

$$DII_{ij} = \ln(L_j - L_{Sj}) - (K_j/K_i) \cdot \ln(L_i - L_{Si}) \cdots \cdots \cdots \text{(式 1)}$$

$$BRI_i = (L_i - L_{Si}) \cdot \exp(K_i \cdot g \cdot Z) \cdots \cdots \cdots \text{(式 2)}$$

ここで、

L_i, L_j : 衛星センサやカメラで観測されたiバンドとjバンドの分光放射輝度の値

L_{Si}, L_{Sj} : 水深が十分に大きく海底からの反射の影響がないと考えられる海域で観測されるiバンドとjバンドの分光放射輝度(水面からの反射光と大気中での散乱光)

K_i, K_j : iバンドとjバンドの水柱の光の消散係数(m^{-1})

g : 水中での光の通過距離を考慮する幾何的係数

Z : 水深(m)

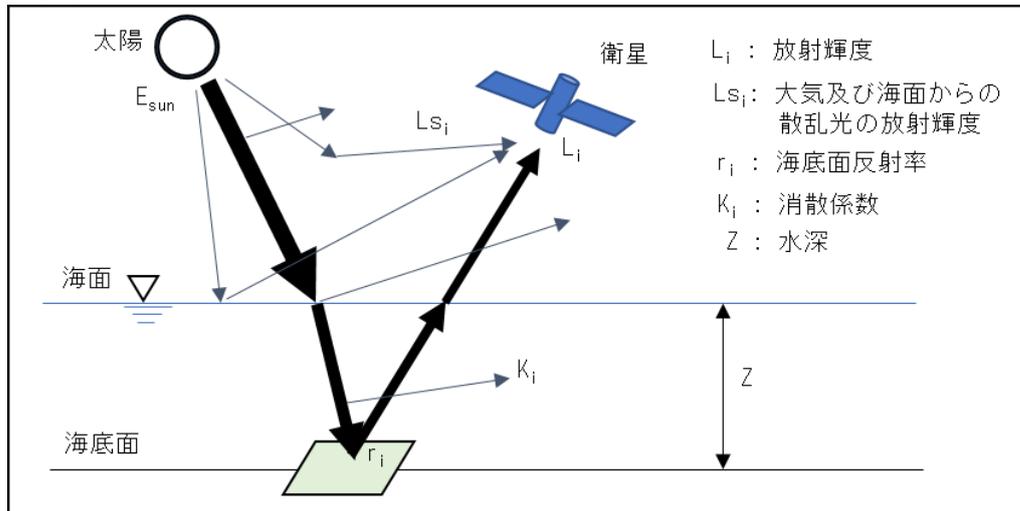


図 3-(3)-4. 人工衛星で観測される放射輝度の模式図

Sagawa et al. (2010) の BRI の算出には水深データが必要になるが、DII に比べて海底面の反射率に関する情報量が多く、より高精度での藻場判読が期待される。水深データとしてよく利用される海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ (日本水路協会) は、藻場が多く形成される水深数 m 以浅の極浅水域のデータが含まれない場合が多く、Sagawa et al. (2010) の方法が適用できない海域もある。ただし、近年、WorldView-2 など 8 バンドを有する人工衛星についても水深を求める実用的研究が進められている。また、航空レーザー測深 (ALB) では、浅海部の水深を計測 (約 5m メッシュ単位、水深 10m で約 0.3m の精度) でき、Sagawa et al (2010) の水柱補正が適用できる。

画像分類

画像分類は、一般に教師付き分類 (最尤法、SVM、ランダムフォレストなど) と呼ばれる手法により行われる (図 3-(3)-3)。これは代表地点における画像の放射輝度 (波長データ) と現地調査による藻場有無の情報を関連付けて、調査範囲全体の藻場分布を推定するものである。藻場の有無の判別基準は明確に定まっていないが、海藻の被度 1~50% の値を藻場有の閾値とする場合が多い [23-26]。藻場判読結果から GIS ソフトを活用して藻場分布図を作成する。なお、現地データ情報も活用して、藻場の有無だけでなく、海藻藻場とアマモ場などの種類別、被度別の藻場分布図を作成した事例もある [11, 16, 17]。

評価検証・修正

画像による藻場判読結果を教師として利用したもの以外の潜水や船上調査による現地データと比較し、判別精度 (正答率) を評価・検証する。調査地点毎の藻場有無や海藻分類ごとの正答率を算定する (P. 30 の調査の実施例を参照)。正答率 70~80% 程度を目標とする。評価検証に用いるデータは藻場分布を推定した範囲全体に均等にあるのが理想的である。最後に、有識者や漁業者へのヒアリングをもとに判読結果の妥当性を評価し、必要に

応じて修正を行う。

過去の藻場調査との比較

・他手法による調査との比較

現在と過去の藻場面積を比較する際に、過去の結果で他の調査手法が用いられている場合は注意が必要である。例えば、環境省の第4回自然環境保全基礎調査（1989-1990年）の聞き取りにより算定した藻場面積と空撮画像（衛星画像など）で算定した現在の面積をそのまま比較すると、その面積の差は経年変化なのか手法による違いなのか区別がつかない。実際、2015年から2017年に実施された環境省による瀬戸内海の藻場調査では、衛星画像から算定される藻場面積は聞き取りのものの0.5-0.8倍になることが報告されている[15]。そのため、現在の空撮画像による

藻場面積と過去のものを比較する場合、対象地域の一部で過去と同じ調査手法で藻場面積を算定し、空撮と他手法の藻場面積の差を評価することをおすすめる（図3-(3)-5）。これにより対象地の一部で空撮画像の面積(x_1)と他手法の面積(y_1)の関係($y_1=ax_1$)の係数 a を求めて、現在の空撮画像による対象地全体の藻場面積(X_1)に a をかけた(aX_1)を過去の他手法の面積(Y_0)と比較すれば、手法差を補正して経年変化を示すことができる。そのような検証をせずに、過去（他手法）と現在（空撮画像）の結果をそのまま比較すると、誤った結論を導きかねない（例. 図3-(3)-5の場合、実際は藻場が減っていないのに空撮画像の結果と比較すると藻場が減っていると判断される）。

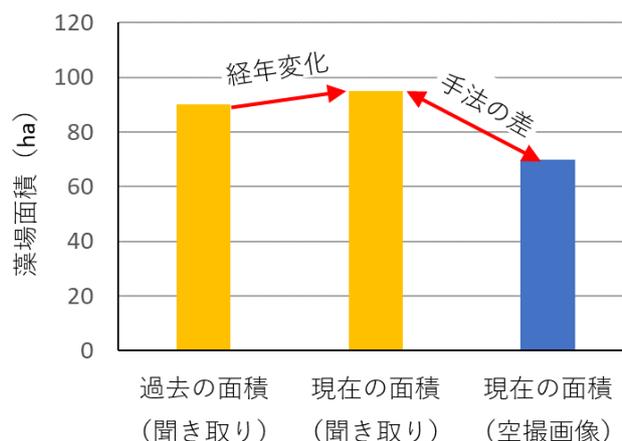


図 3-(3)-5. 過去調査と現在の調査の藻場面積の比較の例 ([15]を参考)

・空撮画像の画素サイズの設定

過去の藻場面積と比較を行う場合、対象藻場の最小面積の設定にも留意が必要である。これまで10,000m² (1ha) (環境省[27])、100m² (0.01ha) (ALOS画像を利用[11])を最小単位とした広域の藻場面積の算定事例がある。最近の中高解像度の衛星画像を用いると、1画素は4~25m²程度である。過年度の衛星画像は1画素辺り100~900m²のこともあり、現在と過去の面積をそのまま比較すると現在の評価が過大となる恐れがある。そのため、経年比較する場合は過年度の画像に合わせて入手した画像の画素サイズを大きくする（ダウングレード）することが必要になる。これは航空写真やドローン空撮画像を過年度の衛星画像などと比較する場合も共通に行う必要がある。

調査の実施例

衛星画像による藻場分布の経年比較

大分県佐伯市名護屋湾を対象に 2014 年と 2016 年の 2 時期の Worldview-2, 3 衛星画像を用いて、Sagawa et al. (2010) により水柱補正を行い、教師付き分類の SVM 法で藻場分布を判別した。推定された藻場面積（被度 25%以上を藻場と定義）は 2014 年で 133.7ha、2016 年で 134.9ha となっており、微増していることが明らかになった（図 3-(3)-6）。2014 年 11 月の画像は 2015 年 3 月の現地 69 地点のデータに対して（表 3-(3)-3）、2016 年の画像は 2016 年 3 月の現地 69 地点のデータに対して藻場有無の判別精度（正答率）を計算したところ、それぞれ正答率は 83%と 96%となった。

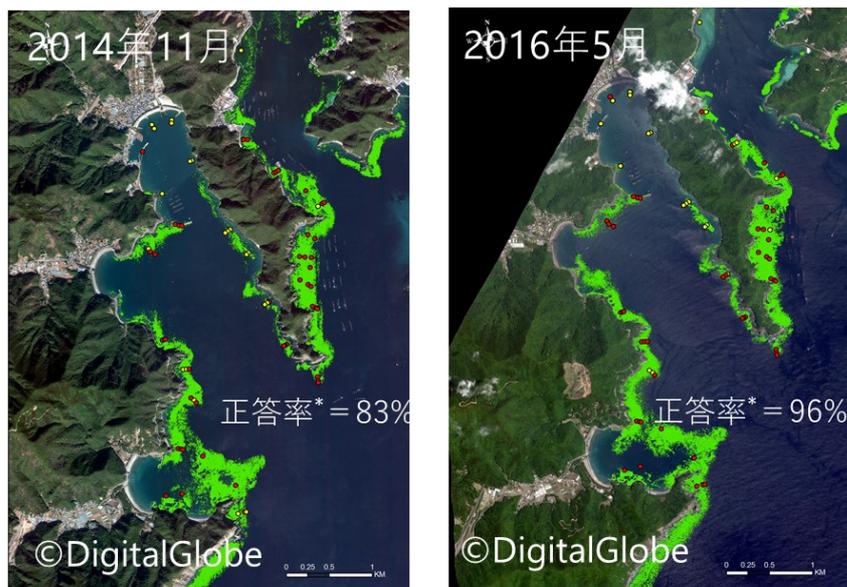


図 3-(3)-6. 衛星画像から判別した 2014 年と 2016 年の名護屋湾の藻場分布

表 3-(3)-3. 衛星画像から判別した 2014 年の名護屋湾の藻場有無（被度 25%以上を有）と現地データの比較による正答率の計算

現地調査	衛星画像		合計
	藻場あり	藻場なし	
藻場あり	40	7	47
藻場なし	5	17	22
合計	45	24	69

藻場有無の正答率： $(40+17)/69 \times 100 = 82.6 (\%)$

(4) 航空写真

航空機から RGB、モノクロ、近赤外などのセンサーを備えた Digital Mapping Camera (図 3-(4)-1) を用いて航空写真を取得し、画像から藻場を判読する方法である。市町村・都道府県といった広域 (～600km²) で調査ができる [18, 28-30]。衛星画像と同様に基本的に藻場の有無の判別となるが、褐藻、緑藻、紅藻、アマモ類などの分類ができる場合もある。藻場の判別の精度 (正答率) は 65～90% である [11, 14, 18, 29, 30]。



図 3-(4)-1. 測量用の航空機と Digital mapping camera (国際航業株式会社運営解説サイト MoGIST より)

ここでは航空写真の入手方法について説明する。このデータを用いた調査計画の立案や画とオルソ補正以降の手順は、衛星画像と共通するため、P. 24-27 を参照すること。

年の設定

検索結果

地図範囲で撮影された空中写真の候補

空中写真が表示

高解像度画像が閲覧・購入できる

No.	作成日時	撮影機	分幅	縦横
1	2012/02/21	DMC	2.5	2
2	2012/02/21	DMC	2.5	2
3	2012/02/21	DMC	2.5	2
4	2012/02/21	DMC	2.5	2
5	2012/02/21	DMC	2.5	2
6	2012/02/21	DMC	2.5	2
7	2012/02/21	DMC	2.5	2
8	2012/02/21	DMC	2.5	2
9	2012/02/21	DMC	2.5	2
10	2012/02/21	DMC	2.5	2

図 3-(4)-2. 国土地理院の地図・空中写真閲覧サービスにおける撮影済みの空中写真の確認方法

航空写真の選定と入手

・アーカイブサイト

地図・空中写真閲覧サービス (<https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>) が航空写真のアーカイブサイト (撮影済み写真の閲覧サイト、国土地理院) としてある。衛星画像と同様に藻場分布を推定したい地域、年月を設定し、撮影画像の有無を確認する (図 3-(4)-2)。なお、衛星画像以上に撮影時期がピンポイントの画像があることは少ないが、1枚 4000円程度で購入できる。

・新規撮影

ほしい時期の写真がない場合、航空測量会社に依頼して新規撮影する。撮影範囲 (面積)、撮影時期、解像度、撮影縮尺 (高度) を決めて、写真撮影を発注する。撮影に用いる航空デジタルカメラにはエリアセンサとラインセンサの 2 種類があり、前者の代表的なものとしてインタグラフ社の DMC シリーズやマイクロソフト社の UltraCam シリーズ、後者の代表的なものとしてライカジオシステムズ社の ADS シリーズがある。航空測量会社によって保有機器は異なるが、各社とも藻場判読に必要な機能は満たしているため、カメラ機種まで指定する必要はない。

航空写真は高度 300m~3,000m 程度で撮影され、撮影画角は 500m 四方~数 km 四方、地上解像度は数 cm~数十 cm、撮影縮尺は 1/2,500~1/20,000 程度であり、必要な精度と事業予算から適切な仕様を決定した上で、衛星画像とのコスト比較を行う。撮影時期については、撮影計画立案から実施に要する期間を見込んで発注する必要があり、年度当初の春季や天候障害の多い冬季で計画する場合は特に留意が必要である。成果は青、緑、赤、近赤外のオルソ画像データとして納品される。

画像解析までのフロー

画像解析までのフローは衛星画像と共通なため、衛星画像の「オルソ補正とマスク処理」(P. 26-29) から参照すること。

【コラム6】航空レーザー測深による藻場分布の把握

近年、航空レーザー測量 (ALB: Airborne LiDAR Bathymetry) により海底地形を把握する試みが日本国内で進められている [31]。この方法では航空機から海面で反射する近赤外レーザーと水中を透過するグリーンレーザーを投射し、海底で反射するグリーン

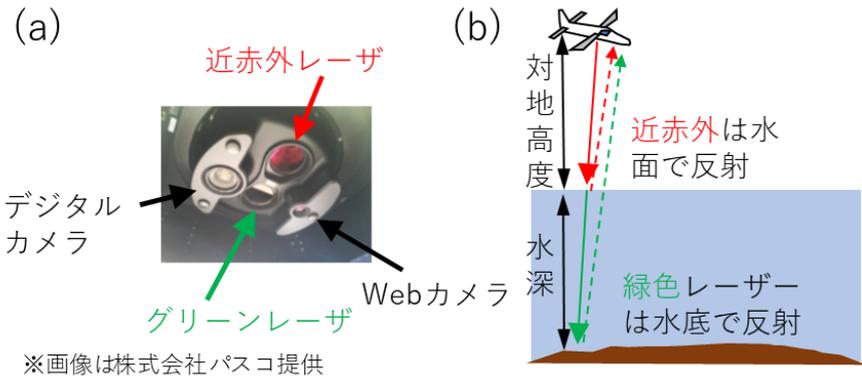


図. (a) 航空レーザー測深 (ALB) のセンサーと (b) 計測の仕組み

レーザーを観測することで水深を計測し、地形を把握することができる。海外ではこの仕組みを利用して湾、沿岸 (~110km²) の海藻の分布状況を把握する事例が発表されている [32, 33]。一方、航空写真や衛星よりも費用がかかることから、まだ日本国内では藻場調査への利用は実証段階である。この手法では砕波帯やひどい濁りでは計測できないが、通常、透明度の 1.5 倍程度の深さまでデータを取得でき、形状の違いから褐藻やアマモ類を分類できる。藻場の分類精度 (正答率) は 70~90%と研究報告がある [19, 33, 34]。また、水深情報も取得できるので、航空写真などと組み合わせることで画像のピクセルごとの水深値を用いた水柱補正から藻場判別を行うこともできる [24]。

ALB 調査の民間委託について

- ・ ALB の適用を検討する場合は、対象海域に極端な濁りがなく一定の透明度が確保されていること、低高度 (500m 前後) での航空機の飛行が可能であることを確かめる。
- ・ 撮影に用いるレーザーには、Riegl、Leica、Optech などがあり、航空測量会社によって保有機器は異なるが、各社とも必要な機能は満たしているため、カメラ機種まで指定する必要はない。
- ・ 使用するカメラによっても異なるが、測深精度は 0.15m 程度、透明度の 1.5 倍 (最大測深 15m) 程度まで計測することができる。
- ・ アーカイブ提供サービスはなく、新規にデータ取得する必要がある。
- ・ ALB による航空写真撮影の発注にあたっては航空写真と同様に、撮影範囲 (面積)、撮影時期、解像度、撮影縮尺 (高度) を決定する。
- ・ 航空写真に比べて低高度飛行が必要なため、費用的には割高になる。
- ・ 撮影時期は、基本的に航空写真と同様に海藻の繁茂時期を考慮の上、波浪の影響がない静穏な時期での実施を計画する必要がある。
- ・ 成果は基本的に青、緑、赤、近赤外のデジタルオルソ画像データ及び水深データとして納品される。

4 広域藻場調査の教師・検証用データの取得

3章の広域調査で藻場分布を推定する際に必要となる教師や検証用のデータを取得する現地調査の方法として（1）潜水調査と（2）船上調査について説明する。

（1）潜水調査

潜水調査で藻場を直接観察することで広域調査の教師・検証データを取得できる。専門的な技術が必要で安全上バディ潜水（2名潜水）となり、調査範囲も限られるが、海藻を最も近くで観察できる手法として古くから用いられてきた。

必要な調査機材

- ・潜水用具（①フード、②マスク＋スノーケル、⑤手袋、⑦ダイビングナイフ、⑧ウェットスーツ、⑨マリンスーツ、⑩フィン、⑪ウェイトベルト、⑫レギュレーター、⑬BCD、⑭空気ボンベ）（図4-(1)-1.）
- ・③方形枠（50cm、1m角など）
- ・④プラスチック版＋耐水紙＋鉛筆
- ・⑥カメラ＋防水ハウジング
- ・測量ロープ（50～200m）と浮き＋ひも＋おもり（ライン調査の際）
- ・ハンディGPSやGPS付き魚探
- ・小型船（水深が浅い藻場を調査するため1トン未満の船外機船が適している）



図4-(1)-1. 潜水調査に必要な機材

調査計画の立案

- ・調査点の設定

広域調査の教師データおよび検証データとして、どれくらいの調査点が必要か調査前に決めておく。画像解析で藻場分布を推定する場合、多くの論文で教師・検証用データとして画像当たり各30点（合計60点）以上を取得している[3, 11, 12, 18, 19]。また、音響測量でも30点以上取得している[4, 6]。

調査点はカシミール3Dなどを用いて広域調査を行う範囲内に設定する（P.14のコラム3）。その緯度経度ファイル(gpxファイル)をハンディGPSなどに入れて、現場で利用する



図4-(1)-2 カシミール3Dによる調査ポイントの設定とGPSへのアップロード

と便利である（図 4-(1)-2）。また、Google Earth でも調査点を設定し、kml ファイルとして保存できるが、ハンディ GPS で使用するには kml ファイルから GPX ファイルに変換して GPS に取り込む必要がある（P. 14 のコラム 3）。

・記録項目

調査前にどのような項目を記録するか決め、データの記録用紙を作成しておく。日付、地点（緯度経度）、時刻、水深、海藻分類（褐藻、緑藻、紅藻）ごとや海藻種ごとの被度、底質の状況（岩盤、岩、礫、砂など）を記録する（表 4-(1)-1）。このような表を耐水紙に印刷し、プラスチック板などに張り付けて潜水中の記録に用いると便利である。

表 4-(1)-1 潜水調査のときに用いる耐水紙に印刷する記録野帳の例

調査日	調査場所																			
地点名																				
GPSポイント名																				
時間																				
水深																				
海藻種 (被度%)																				
底質 (被度%)																				
備考																				

調査の実施方法

・ポイント調査

広域調査の範囲内で前もって決めた地点か、現場の海上で設定し、GPS に記録した地点で、方形枠を置き、その中に含まれる海藻分類（大型海藻か小型海藻）や海藻種ごとの被度、底質などを記録する（図 4-(1)-4）。方形枠を置いた状態の写真を真上から撮影しておけば、調査後に海藻と被度を確認することができる。音響測量や衛星画像・航空写真で藻場分布を推定する場合、海藻の種まで判別できることは少なく、粗い海藻分類のデータでも多地点で教師・検証データを取得した方が良い場合もある。また、海藻がある地点だけでなく、生えていない裸地や砂地の地点の教師・検証データも重要である。各点での水中作業を、地点名、時刻、水深の記録と方形枠内の海藻のカメラ撮影だけにし、調査後に写真から海藻を判別する方が多くの地点のデータを取得できる。この手法をとる場合は、写真から各地点がわかるように工夫が必要である（例、ダイビングスレートに地点番号を書いて方形枠と一緒に撮影するなど）（図 4-(1)-4）。また、水深が 3m 以下で水面から藻場が見える場所ではタンクなしでスノーケリングした方が効率的であり、漁港などの防波堤そばの藻場なら陸上から観察して現地データの数を増やすこともできる。

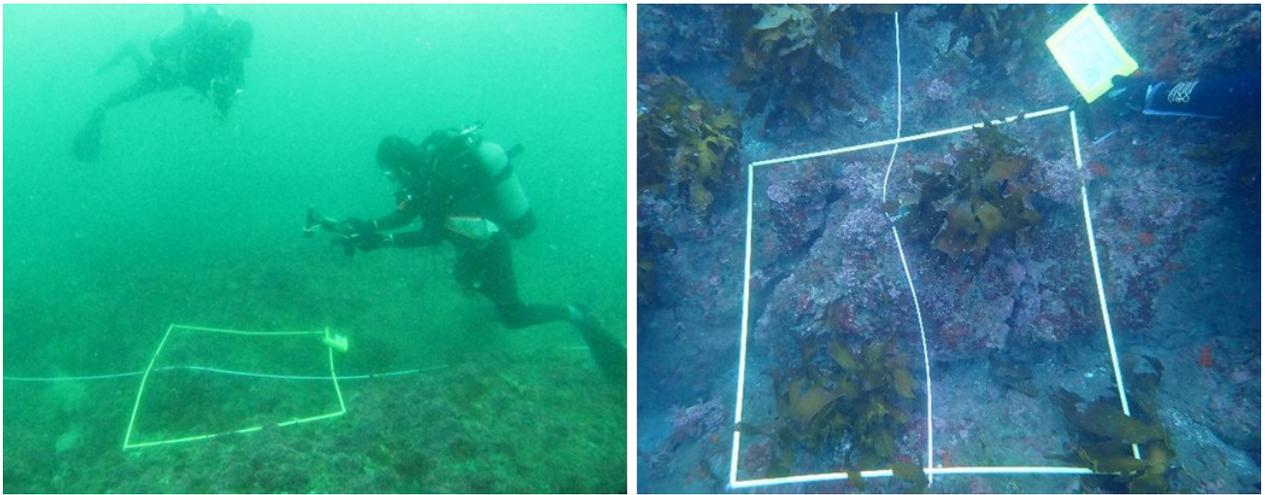


図 4-(1)-4 藻場の潜水調査の様子と方形枠内の海藻の撮影

・ライン調査

この手法では複数点でより効率よく藻場を調べることができる（図 4-(1)-5）。目的に合わせて岸沖方向の水深帯ごとや岸と水平方向にラインの始点と終点に浮きとおもりつけて海中に沈め、調査ラインを作る。海面上からラインの始点と終点の浮きを目印に緯度経度を GPS で記録し、ラインの初めの位置からその距離ごとに方形枠を置いて記録する。ラインの途中の位置の緯度経度は始点からの距離を基に算出できる。ポイント調査と同様に、水中作業を地点名、時刻、水深の記録と方形枠を置いた状態の写真撮影だけにすれば、効率よく調査できる。

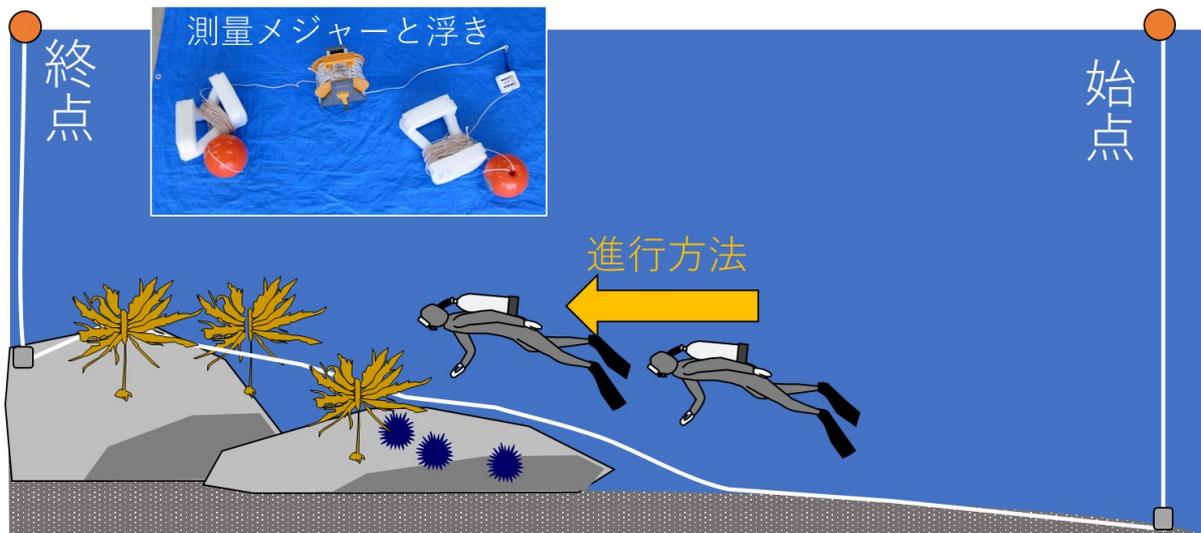


図 4-(1)-5 潜水によるライン調査の模式図と使用する測量メジャーと浮き

・海藻の景観被度について

広域調査の教師・検証用のデータを取得する場合は、海底に方形枠を置いて上から見た海藻が占める面積の割合を景観被度として記録する（図 4-(1)-6）。被度の値は個人差が出るため、モニタリング開始時に調査参加者で同じ場所を見て、個人差を少なくすることが必要である。目視だと誤差があるため、被度 20%単位の記録で十分である。

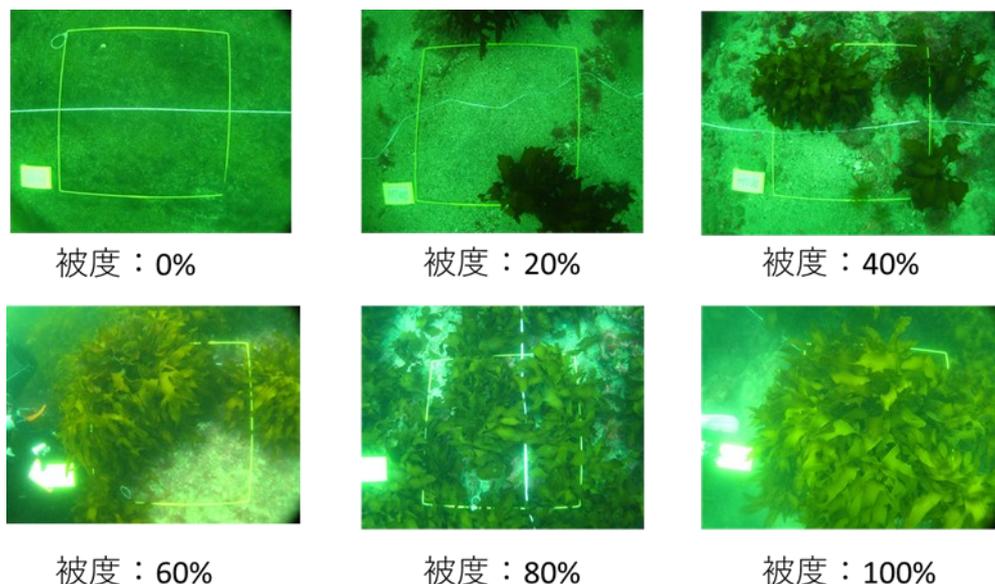


図 4-(1)-6 方形枠内の海藻（カジメ）の景観被度

調査結果の取りまとめ

潜水調査で記録したデータ（表 4-(1)-1）はそのままエクセルなどに記入する。その後、GIS ソフトなどに取り込んで使うためにはデータの成型が必要になる。データの成型の形式は、一番上の行に入力する項目の名前を入れ、その下にデータを打ち込んでいく形が良く用いられる（表 4-(1)-2）。このデータをエクセルの CSV 形式のファイルで保存すれば、GIS ソフトに読み込むことができる（P19. の図 3-(2)-6 参照）

表 4-(1)-2 GIS に取り込むための調査データの形式

入力項目名

ライン	記録者	日付	時刻	スレート名	地点	緯度	経度	水深(m)	カジメ	ウミウチワ類	サンゴ藻	テングサ類	底質
L2	XXX	2019/7/24	13:12	0	L2-09	XXX	XXX	6.2	25	0	50	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:15	20	L2-10	XXX	XXX	6.3	10	0	50	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:18	40	L2-11	XXX	XXX	7.3	10	0	50	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:22	60	L2-12	XXX	XXX	8.5	0	0	0	0	砂/礫
L2	XXX	2019/7/24	13:24	80	L2-13	XXX	XXX	8.7	25	0	30	1	砂/岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:27	100	L2-14	XXX	XXX	7.8	25	0	50	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:30	120	L2-15	XXX	XXX	8.0	25	0	50	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:34	140	L2-16	XXX	XXX	7.5	75	0	20	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:37	160	L2-17	XXX	XXX	8.5	90	0	1	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:43	180	L2-18	XXX	XXX	7.0	10	0	75	1	岩盤
L2	XXX	2019/7/24	13:47	200	L2-19	XXX	XXX	8.0	25	0	50	10	岩盤
L3	XXX	2019/7/24	13:12	0	L3-09	XXX	XXX	8.3	40	0	25	0	岩、砂
L3	XXX	2019/7/24	13:15	20	L3-10	XXX	XXX	9.5	0	0	0	0	砂地
L3	XXX	2019/7/24	13:17	40	L3-11	XXX	XXX	9.5	0	0	0	0	砂地
L3	XXX	2019/7/24	13:20	60	L3-12	XXX	XXX	9.7	0	0	0	0	砂地
L3	XXX	2019/7/24	13:22	80	L3-13	XXX	XXX	9.7	0	0	0	0	砂地

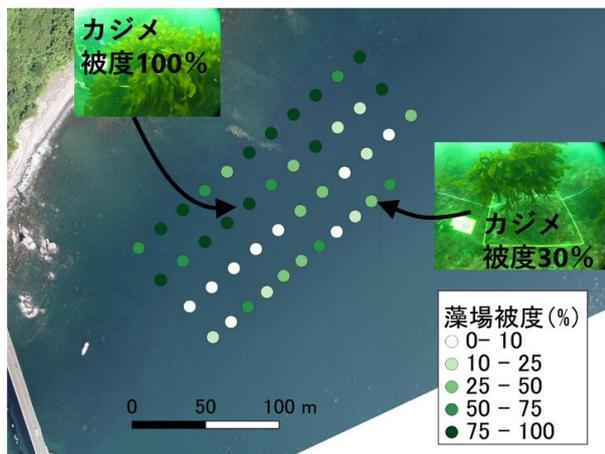
データ

調査の実施例

・カジメ場における潜水のライン調査

実施例として、2019年7月23日～25日に神奈川県真鶴町沿岸の2地点において潜水によるライン調査を行った[35]。岩大橋側において200mのラインを4本（44調査点）、真鶴側において200mのラインを5本（52調査点）水中に設定し、そのライン上で20mごとに1m×1mのコドラートを置いて写真を撮影し、海藻種、その被度、底質を記録した。このデータを表4-(1)-2の形式で整理し、GISソフトに読み込んで海藻の被度を表示させると図4-(1)-7のようになり、大まかにどのあたりに藻場があるのかわかる。このデータをドローン画像や音響測量、衛星写真による藻場把握の教師や検証用に利用できる。

岩大橋側（44点）



真鶴側（52点）

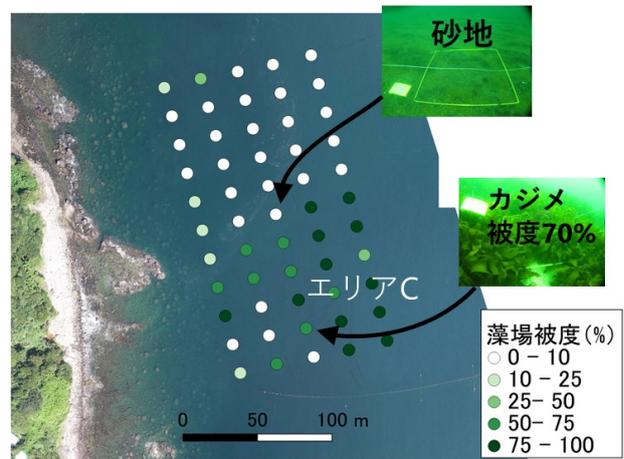


図 4-(1)-7. 潜水によるライン調査点の藻場の被度の分布（2019年7月）。背景写真は2019年9月に撮影したドローン空撮によるもの。

(2) 船上調査

船上調査では地先の地点やライン上の海底を目視やカメラで観察することで広域の藻場調査の教師・検証用のデータを取得できる。一方、この調査では潜水調査よりもかなり広範囲（80km, 160 km）の海岸線を調査した事例もある[36, 37]。箱メガネは古くから用いられてきたが、最近は水中カメラや水中ドローンの利用も多い。

調査機材

- ・箱メガネ（図 4-(2)-1a)
- ・ケーブル水中カメラ（4-(2)-1b)
- ・水中ドローン（4-(2)-1c)
- ・ハンディ GPS（防水パックがあると便利）または GPS 付き魚群探知機等（図 4-(2)-1a)
- ・測深計（図 4-(2)-1a）または測深ロープ
- ・野帳と筆記用具
- ・小型船（藻場は概して水深が浅いため、1 トン未満の船外機船が適している）

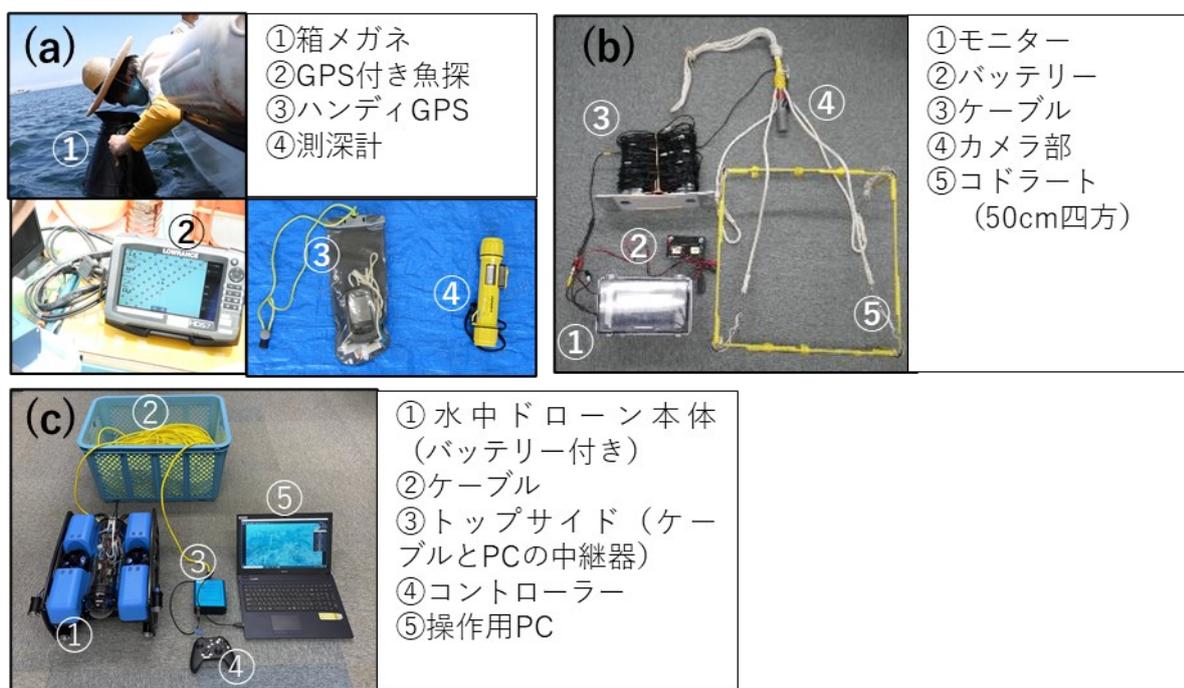


図 4-(2)-1 船上調査の際に (a) 共通に用いる機材、(b) 水中カメラの機材、(c) 水中ドローンの機材

・箱メガネ及びケーブル水中カメラ

箱メガネは予備調査や下見にも便利なため、船上調査の際には常に持っていくとよい(図 4-(2)-1a)。ケーブル水中カメラでは、箱メガネよりも深い水深や水面が多少濁っている状況でも調査ができる(図 4-(2)-1b)。

ケーブル水中ビデオカメラの購入に当たっては解像度、データの保存方法、ケーブル長について注意する。解像度の低い機種は低価格であるが、海藻の種によっては判別することが難しくなるので、適切な解像度の機種を選択する(図 4-(2)-2b の解像度は 1920×1080 のフル HD)。船上での調査中に静止画を撮影するのは労力がかかるため、動画撮影のほうが好ましい。ケーブル長は、潮流でカメラ部分が流されることを考慮して、調査水深より余裕を持たせる。

- ・水中ドローン

水中ドローンは、遠隔操作により水中を移動し観測等を行う機器である（図 4-(2)-1c）。ケーブルによって船上ユニットと繋がれている。ROV (Remotely operated vehicle) の名称でも知られる。近年、様々な水中ドローンが各社から発売され、予算と用途に応じて選択できるようになった。ただし機種によっては操作性や耐久性に難があることも考えられるので、十分な比較検討が望ましい。ここに紹介する BlueROV2 を始めとして、機材一式がコンパクトな機種も多く、1 トン弱の船外機船で調査を行うことができ、岩礁性藻場が分布する水深や浅い暗礁がある海域に適している（図 4-(2)-2c）。

なお、機種によってはオプションでトランスポンダを装備でき、調査船の GPS 位置情報を元に水中ドローンの正確な位置情報が得られる。またソナーを装備すれば数十メートル先の岩礁や人工礁を探知できる。



図 4-(2)-2 (a) 箱メガネ、(b) 水中カメラ、(c) 水中ドローンの景色

- ・GPS

広域調査の教師・検証データの取得を目的とした船上調査では GPS の利用は必須である。ハンディ GPS がよく利用されるが、GPS 付き魚探（振動子は付けなくてもよい）は画面が大きく操船者が調査点を確認しながら操船できる（図 4-(2)-1a）。

- ・測深機

船上から調査海域の水深を把握できるため、ポータブル測深計があると便利である（図 4-(2)-1a）。なお、魚探を用いても測深可能（この場合は振動子が必要）で、連続的に海底地形を把握できる。

調査計画の立案

- ・調査点

潜水調査と同様に広域調査の教師データおよび検証データとしてどれくらいの調査点を調べるか調査前に決めておく。多くの研究で藻場の画像解析や音響測量では教師・検証用に各 30 点（合計 60 点）以上を取得している[3, 11, 12, 18, 19]。

調査点は潜水調査と同様にカシミール 3D や Google Earth などで広域調査を行う範囲内に設定する。その緯度経度ファイル(gpx ファイル)をハンディ GPS などに入れて、現場で利用すると便利である（図 4-(2)-3）。

- ・記録項目

基本的な調査項目は潜水調査と同様で、地点名、時刻、水深、海藻の種類、種類ごとの被度、底質の



図 4-(2)-3 調査点の設定例

状況などである。同様に記録用紙（野帳）を用いてもよい（P. 35 の表 4-(1)-1）。

調査の実施方法

・箱メガネ・ケーブル水中カメラによるポイント調査

予め、調査対象海域に等間隔に調査点を設定し、箱メガネまたはケーブル水中カメラで藻場を観察する。野帳に水深や種名、被度等を記録するとともに、水中カメラの場合は映像を録画する。ただし、調査点が多数ある場合や船上で酔いやすいときは、地点名と時刻の記録だけを行い、録画した映像をもとに研究室で詳細な被度等を測定したほうが良い。この際、地点毎に地点番号を書いた紙などをカメラで映してから海藻を撮影すると、研究室で映像を見直した時に調査点がわかりやすい。

作業に要する人数は、最低計 3 名（船の操船 1 名、測深及びカメラの上げ下げ作業 1 名、ビデオ撮影及び野帳の記録 1 名）で、1 点あたり数分で観察できる（図 4-(2)-4）。カメラの上げ下げは岩にカメラが引っかかるときがあるので注意が必要である。小型船の場合、波高 1m ほどになると船上の機器などが波を被ることになるので、調査地の波高が 1 m 未満のときに調査する。



図 4-(2)-4 船上での水中カメラによる調査の様子（これは 19 トン船だが、1 トン以下の小型船で調査できる）。(a) コドラート、(b) 水中カメラのモニターの設置、(c) モニターの画像、(d) と (e) 海中にコドラートを降ろす様子

・水中ドローンによるライン調査

作業に要する人員は最低計 3 名（船の操船 1 名、水中ドローンのケーブル捌き作業 1 名、水中ドローンの操縦と記録 1 名）である（図 4-(2)-5）。水中ドローンに水中 GPS が付いていれば潜水中の正確な緯度経度がとれるが、なければその位置を推定できる工夫が必要である。ライン調査では調査海域に予めラインを設定し、始点と終点の GPS 位置情報を船上で取得し、ライン沿いに水中ドローンを動かし、藻場の映像を記録する（図 4-(2)-5）。ライン上に 5~10m おきなどに目印を付けて後からその位置の緯度経度を推定できるようにしておけば、正確な緯度経度と紐づけたデータを取得できる。また、船の位置情報を GPS でトラックすることで水中ドローンのおおよその位置も推定できるが、ケーブルの出し具合で船からのずれが生じるので注意が必要である。。

PC や外部モニターを用いる機種では、小型蓄電池で電源を供給する。直射日光下ではモニターが見えにくいので、暗箱や遮光幕等を用いると良い(図 4-(2)-6bc)。水中ドローンの操縦は習熟が必要であるとともに、操船者およびケーブル捌きを担当する者との、十分な意思疎通も欠かせない。ケーブルは水中ドローンの行動を

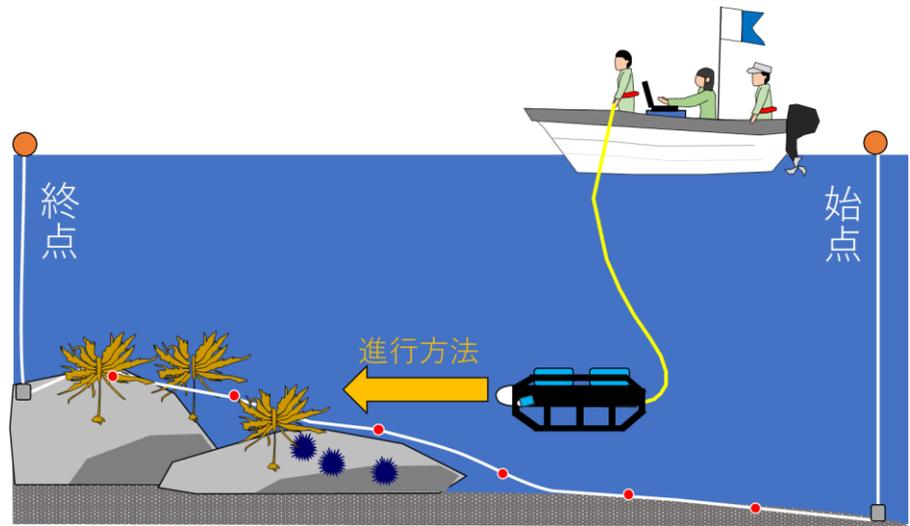


図 4-(2)-5 水中ドローンを用いたライン調査の模式図

妨げない程度に張った状態とする。弛むと水中拘束の原因となる(図 4-(2)-6b)。

藻場調査で想定されるトラブルとして、ケーブル及び水中ドローン本体の岩礁や海中投棄物への拘束、水中ドローンのスラスターへの海藻やロープ等の巻き込み、調査船のスクリューやサイドスラスターへのケーブルの巻き込み、本体の水密不良による漏水等が考えられる。また船上ユニットが防水でない機種では、海水や雨水で濡れると故障の原因となる。万一、水中拘束により戻れなくなった場合は、船上ユニットに繋がったケーブルを取り外し、ビニール袋等で接続部を密閉し、浮きを付けて船から離し海上の目印とする。その後速やかに潜水士により回収する。調査可能な波浪条件について、水中カメラと同様、調査地の波高が1m未満である。小型船の場合、波高1mほどになると船上の機器などが波を被ることになる。

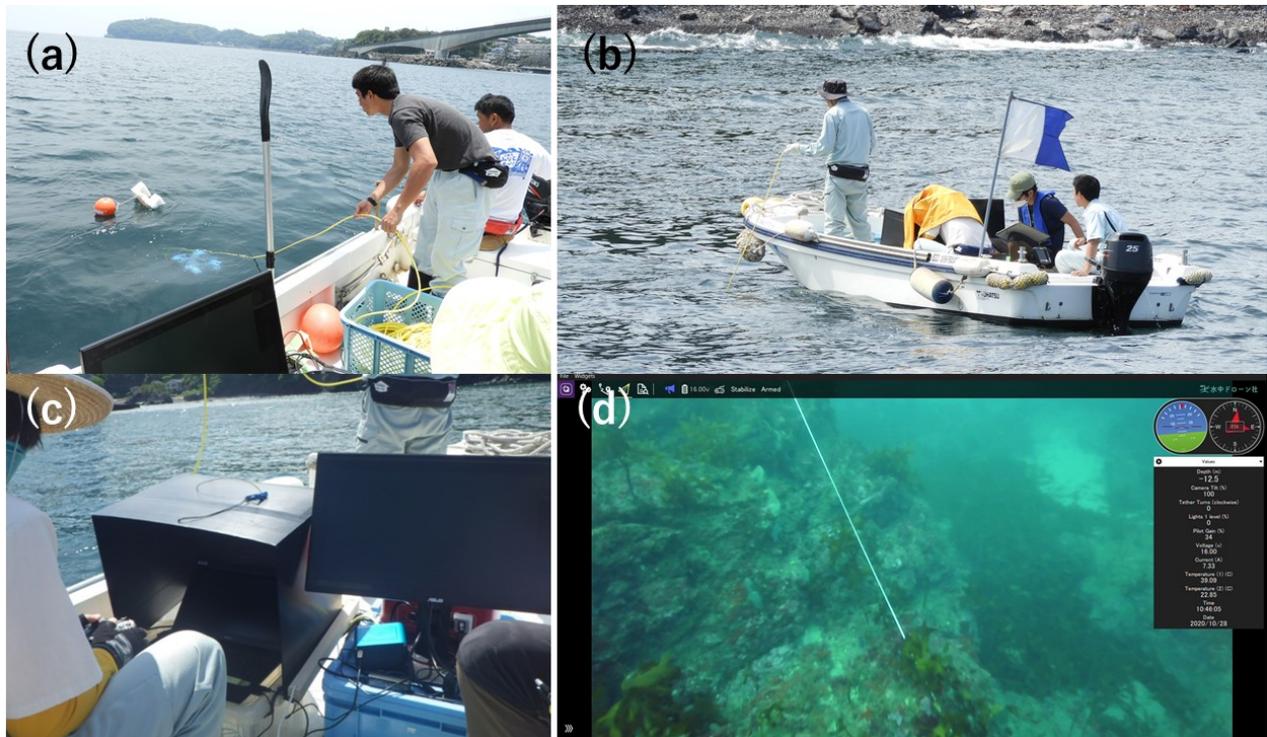


図 4-(2)-6 船外機船(0.7トン)を用いた水中ドローン調査の様子。(a) 調査ラインの始点から水中ドローンを投入する様子、(b) 調査中の船上(モニターを見るためにカップを遮光幕として利用)、(c) 船上で水中ドローン进行操作の様子、(d) 水中ドローンの潜水中の映像

【コラム7】 水中ドローンと潜水で撮影した画像の比較

潜水観察や水中カメラ調査では海藻被度を真上から評価するが、水中ドローンの調査ではライン上を水平方向に進みながら撮影する。そのため、取得した海藻の見え方が異なる可能性がある。そこで水中ドローンと潜水で同等の海藻の被度が取得できるか検証するために、神奈川県真鶴町沿岸のカジメ場を両手法で観察した。この際に水中ドローンでは潜水時の撮影と近づけるためにできる限り下向きで撮影した。

潜水調査と水中ドローンで撮影した画像（各 n=7）を比較したところ、撮影方向や角度の違いはあるが生育していたカジメ及びサンゴ藻で同等の被度を算出できた（褐藻：正答率 7/7=100%、紅藻：正答率 7/7=100%）。そのため、水中ドローンによる撮影でも潜水調査と同等のデータが取得できると考えられた。ただし、水中ドローンのカメラをなるべく下に向けることが必要と考えられた。

表. 潜水調査と水中ドローンによる海藻被度判別の比較

カジメ	水中ドローンでの被度区分0-20%	水中ドローンでの被度区分20-40%
潜水での被度区分0-20%	5	0
潜水での被度区分20-40%	0	2

サンゴ藻	水中ドローンでの被度区分0-20%	水中ドローンでの被度区分20-40%
潜水での被度区分0-20%	7	0
潜水での被度区分20-40%	0	0

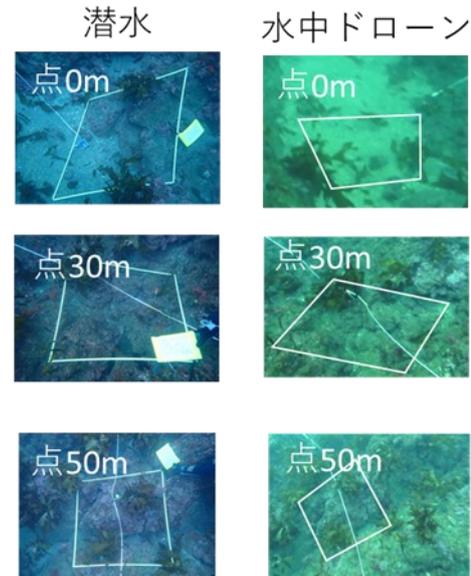


図. 潜水調査と水中ドローンで撮影した画像の比較

調査結果の取りまとめ

- ・箱メガネ・ケーブル水中カメラによるポイント調査

潜水調査と同様に、データの成型の形式は、一番上の行に入力する項目名である地点、緯度、経度、海藻の被度、底質などを入れ、その下にデータを打ち込んでいく形が良く用いられる（P. 37 の表 4-(1)-2）。これをエクセルの csv ファイルで保存することで、GIS で読み込んで地図上にプロットできる（P. 19 の図 3-(2)-6）。

- ・水中ドローンによるライン調査

得られる画像（動画）データは、ダイバーによる潜水調査や箱メガネ・水中ケーブルカメラ調査に準じて取りまとめればよい（P. 37 の表 4-(1)-2）。水中 GPS により位置情報を取得できる機種であれば付属 PC 等に収録された位置情報を、映像と合わせて記録できる。図 4-(2)-7 に藻場調査で得た画像の一例を示す。カジメ群落の状況だけでなく、アイゴがカジメを摂食する様子なども観察できる。

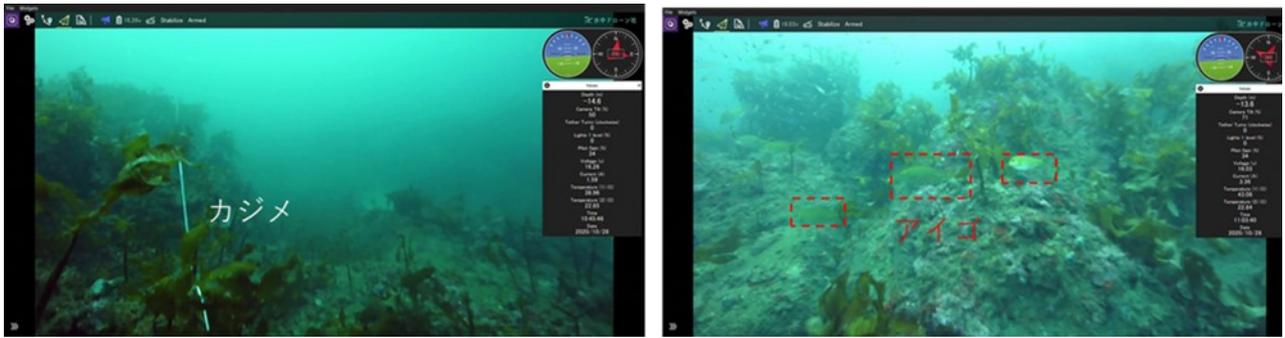


図 4-(2)-7 藻場調査時の水中ドローンの画像. 左画像ではラインとカジメが映っており、右画像ではカジメを摂食するアイゴが撮影されている.

・水中ドローンによる現地データの大量取得

水中ドローンの撮影動画と GPS の緯度経度を基に大量に現地データを取得する方法について紹介する (図 4-(2)-8、P. 57 の参考資料)。まず、(1) 通常通り、水中ドローンでライン調査を行い、藻場を撮影する。次に、(2) 撮影した動画を研究室に持ち帰り、数秒おきの静止画に切り出す。(3) この静止画を基に目視また画像解析により海藻を分類し、被度を算出する。(4) 魚探などの GPS の緯度経度の取得時刻と水中ドローンの静止画の時刻のずれを調整することで、緯度経度と紐づけた海藻の被度のデータが作成できる。ただし、船上の GPS の緯度経度を基にした場合、水中ドローンの実際の位置と数 m から十数 m のずれが生じる。この場合、藻場の縁辺 (エッジ) などでデータを取ると影響が大きい (実際には藻場がない場所で藻場があるといった結果やその逆になりやすい) ので、調査ラインをなるべく藻場の中心近くにするなど工夫した方が良い。

1 水中ドローンによる動画撮影

2 動画を静止画に切り出し

3 静止画から藻場を判別

4 緯度経度と紐づけてデータ作成

GPSから 水中ドローンから

日付	緯度	経度	時間	水深 (m)	カジメ (%)	海藻その	緑藻 (%)	紅藻 (%)
2020.6.	35.163366	139.143693	13:38:06	8	0	10	0	20
2020.6.	35.163352	139.143675	13:38:10	8.3	5	10	0	25
2020.6.	35.163352	139.143684	13:38:42	7.6	0	0	0	10
2020.6.	35.163306	139.143723	13:39:42	8.8	0	0	0	5
2020.6.	35.163573	139.143797	13:40:06	8.5	0	0	0	10
2020.6.	35.163588	139.143783	13:40:10	8.6	5	5	0	20
2020.6.	35.163595	139.143783	13:40:11					
2020.6.	35.163602	139.143783	13:40:11					
2020.6.	35.163617	139.143792	13:40:21					
2020.6.	35.163617	139.143792	13:40:21					
2020.6.	35.163595	139.143803	13:40:31					
2020.6.	35.163543	139.143774	13:40:31					
2020.6.	35.163536	139.143753	13:40:31					
2020.6.	35.163757	139.143765	13:43:11					
2020.6.	35.163742	139.143756	13:43:11					
2020.6.	35.163375	139.143756	13:44:21					
2020.6.	35.16361	139.14377	13:44:27					
2020.6.	35.163551	139.143611	13:45:11					

時刻の紐づけ

	時刻	時刻
ROV PC 時計	11:07:27	
腕時計	11:08:06	10:55:14
Lowrance		13:24:27
時間差	0:00:39	2:29:13

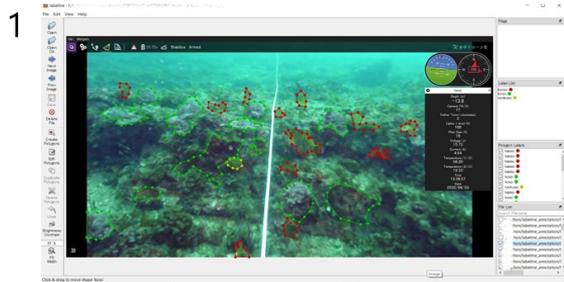
図 4-(2)-8 水中ドローンの撮影動画を用いたデータ取得方法

【コラム8】 深層学習による水中画像からの海藻判別

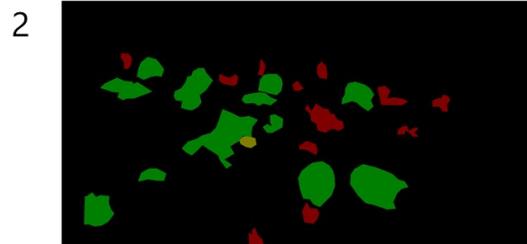
水中ドローンや潜水調査で撮影した画像は、通常、調査者などが目視で海藻の判別や被度の算出を行う。一方、画像が多いと作業量が膨大になるため、撮影画像から自動で海藻を判別し、被度が算出できるようになると作業の省力化につながる。そこで、水産基盤整備調査委託事業「藻場回復技術の高度化検討調査」では、水中ドローンの撮影画像と潜水時に撮影した画像を用いて深層学習による海藻の判別と被度の算出を試みた。

この手法の手順を下図に示す。まず、水中ドローンの映像から数秒おきに切り抜いた静止画または潜水時に撮影した画像を基に、アノテーションツール labelme[38]を用いて、静止画上の海藻の範囲を目視で指定し、各海藻門（褐藻、紅藻、緑藻）の区別を付与（アノテーション）した学習データを作成した。次に、labelmeで作成したアノテーション画像とアノテーション情報が格納されたファイル(.json)のデータセットを、Pythonスクリプトを用いてPascalVOC形式の画像データを変換した。そして、深層学習の完全畳み込みネットワークの一つであるU-Net[39]を用いて、地域ごとの画像データを教師として各地域の新規の静止画に対して海藻をセグメンテーション（画像内のどこにあるかを推定）した（手順の詳細はP.57の参考資料）。

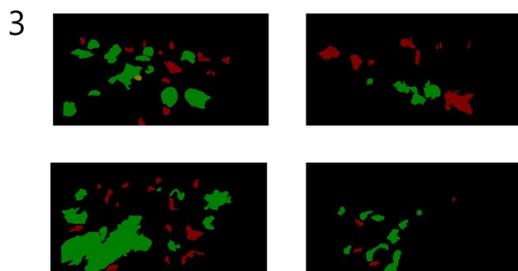
その結果、深層学習による藻場判別でも人間の目による判別と同程度の各海藻の被度が算出できた。ただし、現時点では地域ごとの結果であり、どこの地域の実用性の高い深層学習のモデルはできていない。また、撮影時の透明度などによる画像の違いの影響で毎回教師データの作成が必要である。より多くの教師データが収集できれば、様々な地域の写真から海藻の被度を算出できるシステムが構築できるだろう。



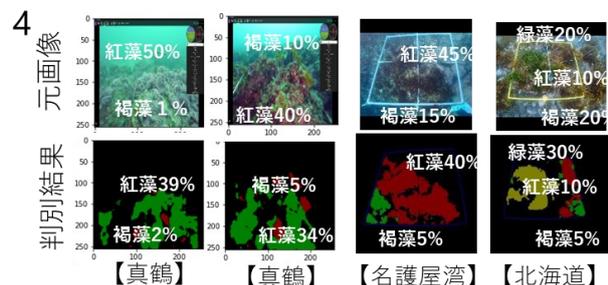
1 labelmeのアノテーション（海藻部分をなぞって学習データを作成）画面



2 深層学習の教師データとして利用するためにPascalVOCのデータセット形式に変換



3 複数の学習データセットを作成



4 深層学習の一つであるU-Net法により、新規の画像に対してセグメンテーション（藻場判別）
上段が元画像を人の目で算出した被度、下段が深層学習による算出した被度となっている。

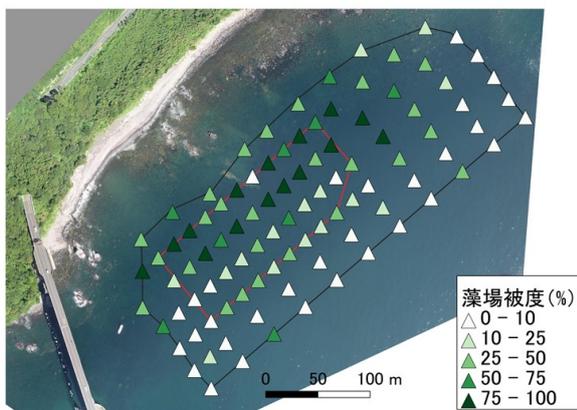
図 深層学習により水中画像から藻場の海藻分類（褐藻、緑藻、紅藻）と被度算出を行う手順

調査の実施例

・船上カメラによる調査

2019年の7月から9月の間に神奈川県の実鶴町沿岸の岩大橋側において約400mのラインを7本（97調査点）、真鶴側において約400mのラインを9本（113調査点）を設定し、水中カメラによる藻場調査を行った。そのライン上の20m距離ごとのポイントで水中カメラに取り付けた0.5m×0.5mの枠内の画像を撮影し、海藻種、その被度、底質を記録した。このデータをエクセルなどで表4-(1)-2の形式で整理し、CSV形式にしてGISソフトに読み込むことで海藻の被度を表示させた（図4-(2)-9）。この調査では潜水調査に比べて広い範囲をカバーでき、大まかな藻場（カジメ場）分布も把握できた。また、このデータは音響測量や空撮画像による藻場分布把握の教師や検証に利用できる。

岩大橋側（97点）



真鶴側（113点）

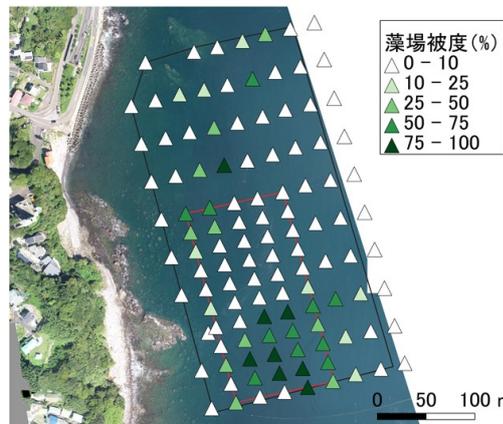


図4-(2)-9. 水中カメラを用いた調査の地点と観察されたカジメ（藻場）の被度（2019年7～9月；赤枠は潜水調査の範囲）。背景写真は2019年9月に撮影したドローン空撮によるもの。

・水中ドローンによるライン調査

水中カメラ調査の翌年2020年の6月から9月の間に岩大橋側において300～400mのラインを3本設定し、水中ドローンによるライン調査を行った。ライン上では水中ドローンのカメラで動画を撮影した。その動画から静止画を数秒おきに抽出し、海藻種（カジメ、褐藻その他、緑藻、紅藻）、その被度、底質を記録した。船のGPSと静止画を時刻で紐づけて緯度経度をデータに割り当て、GISソフトに読み込んで海藻の被度を表示した（図4-(2)-10）。2019年に比べて磯焼けにより大きく藻場（カジメ場）の被度が減少していることがわかる。この手法では動画を撮影することで大量のデータを取得できるが、水中ドローンに水中GPSが付いていないため、実際の調査点には数メートルから十数メートルのずれが予想される。

岩大橋側（247点）

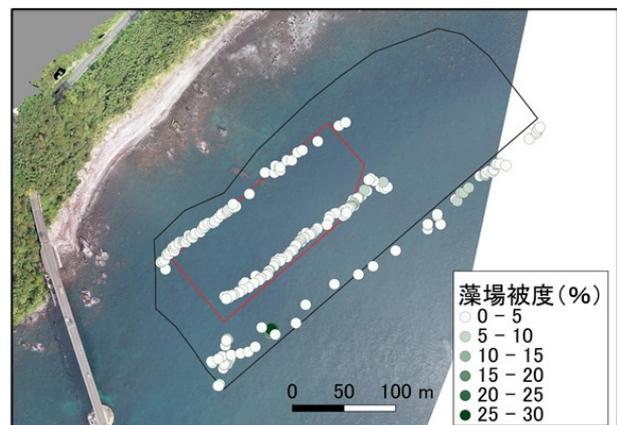


図4-(2)-10. 水中ドローンによる調査で観察されたカジメ被度（2020年6～9月）

【コラム9】潜水観察・船上調査による広域藻場の把握

この手引きでは潜水観察や船上調査は広域調査手法（ドローン空撮、音響測量、衛星画像、航空写真）の教師・検証データを取得する手法として紹介しているが、これらの手法でも広域に藻場を調査した事例がある。

Fujita et al. (2006)では富山県のテングサ群落を岸沖方向に横断する形でチェーンのラインを引き、潜水調査で群落の端の位置を記録することでその範囲を把握した(図1)。また、他にもハンディGPSを使って、藻場の縁辺に沿って移動し、逐次位置を押さえて記録することで藻場の広がり調べた事例もある(図2)。これらの手法でも地先の藻場の範囲と面積の経時変化を把握することができる。

船上調査では徳島県の海岸線160kmで2007年と2017年に箱メガネで海域を観察し、藻場の種類と被度(%)を記録して10年間の藻場の変化を把握した事例がある[36](図3)。このように船上調査でもかなりの広範囲を調査し、藻場の面積を把握することができる。この調査結果から、徳島県の北部では藻場の変化が小さいが、水温上昇が大きい中部・南部ではアラメ・カジメ場が減少し、テングサ場が増えていることが明らかになった。

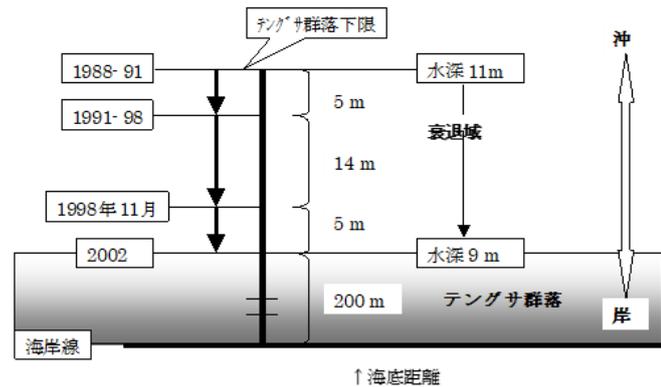


図1 テングサ群落衰退のモニタリング調査(富山県滑川市)[40]。群落の下限に目印として土嚢やステンレス製チェーンを置いている。



図2 ハンディGPSによる藻場範囲の計測と表示例。(a)藻場の輪郭を視認できる場合は、海面を泳ぎながら位置を記録する。(b)記録した位置データを用いて、経年的な藻場範囲の変化を表した例。



図3 2007年と2017年の徳島県志和岐地区の藻場分布([36]を改変)

5. 藻場調査手法の概要とコスト比較

これまで紹介した調査手法（図 5-(1)-1）の取得情報、調査範囲、コスト、時間について整理した。また、現地調査を委託した場合の費用の概算を示した。

（1）藻場調査手法の特徴

潜水調査と船上調査は最も近くで海藻を観察でき、広域調査（ドローン空撮や音響測量、航空写真、衛星画像）の教師・検証用のデータを取得できる手法である

（図 5-(1)-1）。潜水調査の調査範囲は地先程度だが取得できる情報が最も多く、海藻の種や被度、底質、植食者の存在など周囲の環境まで把握できる（図 5-(1)-2）。船上調査では箱めがねや水中カメラ、水中ドローンを用いて、地先だけでなく広い範囲を調査した例（海岸線 80km~160 km）もある[36, 37]。海藻種の同定や海藻被度、底質の判定が可能だが、潜水に比べて同定できる海藻種が限られる。また、船が入れない浅瀬（1~2m）では調査ができない。

ドローン空撮、音響測量、航空写真及び衛星画像を用いた解析（図 5-(1)-1）では広域の藻場分布（藻場の有無や海藻の大きな分類）を把握できる。ドローン空撮では藻場有無の判別の正答率は比較的高いが、適用水深が温帯域で 10m 程度までである。一方、音響測量では浅瀬（1~2m）は船が入れないため調査できないが、水深 3m 程度から深場の藻場（水深 30m 以上も）まで調査できる。これらの手法の調査範囲は地先程度である（図 5-(1)-2）。一方、航空写真や人工衛星は市町村、都道府県や地方などの広範囲を一度に調査でき（図 5-(1)-2）、ドローンと同様に透明度がよければ水深 10m 程度までの藻場を判別できる。藻場判別の正答率はドローンよりも若干落ちる（60~85%）。通常、これらの広域調査で取得できる情報は藻場の有無だが、その海域に小数の海藻しか生育していない場合や詳細なデータが取れた場合は海藻の分類（褐藻、紅藻、緑藻など）や、被度の粗密がわかることもある。

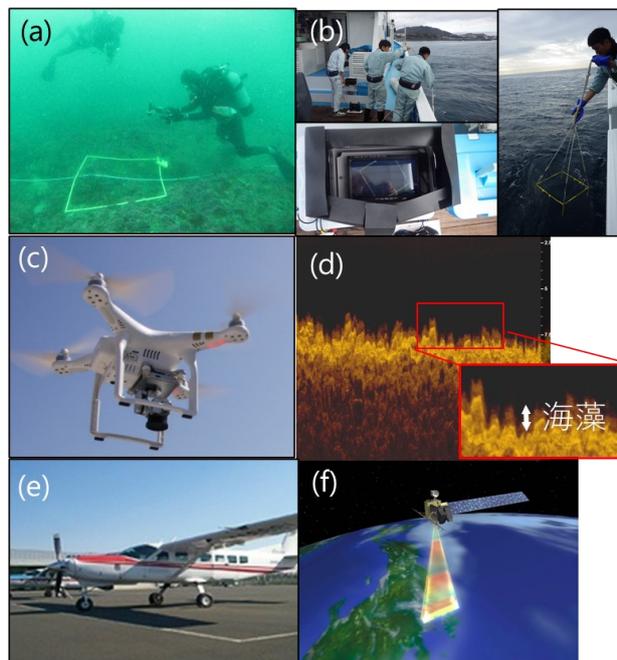


図 5-(1)-1. 藻場調査の各手法 (a) 潜水調査、(b) 船上調査、(c) ドローン空撮、(d) 音響測量、(e) 航空写真（国際航業株式会社運営解説サイト MoGIST より）、(f) 衛星画像（衛星だいち 提供：宇宙航空研究開発機構（JAXA））

一方、音響測量では浅瀬（1~2m）は船が入れないため調査できないが、水深 3m 程度から深場の藻場（水深 30m 以上も）まで調査できる。

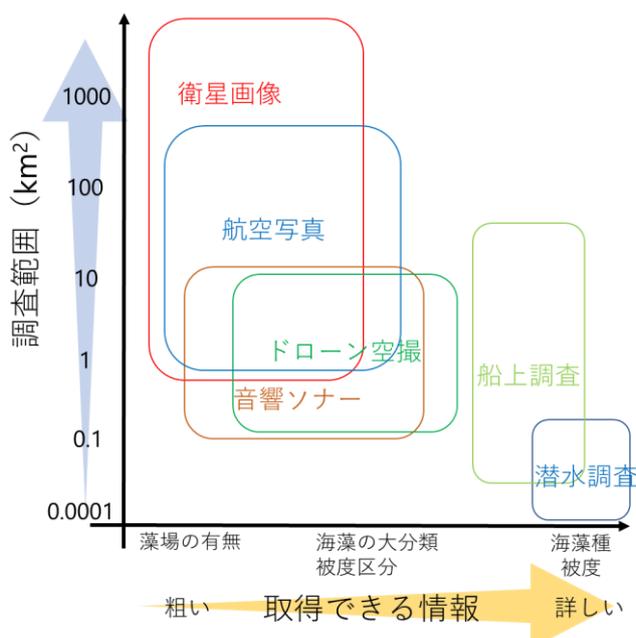


図 5-(1)-2. 調査方法の精度・取得可能情報と調査範囲の関係の簡易図

調査範囲と得られる対象項目や精度（正答率など）の関係を簡単に表すと、取得できる情報が詳細になるほど調査範囲が狭くなるトレードオフの関係にある（図 5-(1)-2）。そのため、どのような範囲を対象にするか、どれくらい細かい藻場の情報が必要か、利点と欠点を認識して調査手法を選択する必要がある。

既往事例を基に調査の対象項目、調査範囲、適用水深、コストなどを表に整理した（表 5-(1)-1）。コストは現有機器の有無、調査範囲や検討すべき内容等により変化するため、実際に調査を行う場合や委託する場合と異なることもあり注意してほしい。例えば、潜水や船上調査の場合は水深分布やその場の作業効率により、調査範囲が同じでも委託費用は大きく変動する。また、水中ドローンは潜水可能水深やバッテリーの駆動時間、水中 GPS の有無により値段が異なる。特に水中 GPS を付けると値段が高くなる。どのような仕様が必要か、よく吟味すること。

表 5-(1)-1. 藻場調査手法の特徴とコストの整理

調査種類	調査名	対象項目と判別精度	調査範囲	水深	コスト事例	調査時間
現地調査	潜水調査	種判別、被度、底質、植食動物	地先 (<1km ²)	0-30m	自前：10~20万円（潜水機材購入） 委託：10万円/日（現地調査補助） 1650万円/km ² （現地調査）	~30地点/2人・日 （10点/40-60分） 3ライン/2人・日 （200mライン/40-60分）
現地調査	船上調査（箱メガネ、水中カメラ）	種・属判別、被度、底質	地先~県 (~50km ²)	3-40m	自前：10万円（水中カメラ購入） 委託：280万円+190万円/0.1km ² （現地調査+解析）	20~30地点/時間
現地調査	船上調査（水中ドローン）	種・属判別、被度、底質、植食動物	地先~県 (~50km ²)	3-150m	自前：10~400万円（水中ドローン購入） 委託：180万円+220万円/0.1km ² （現地調査+解析）	20~300地点/時間
広域調査（地先）	音響測量	藻場の有無、草丈、形状の異なるもの 74~92%	地先 (0.03~12km ²)	3-100m	自前：20~40万円（魚探購入） 委託：300万円+190万円/0.1km ² （調査+解析で藻場判別）	1.5-4km ² /4-9時間
広域調査（地先）	ドローン空撮	藻場有無、被度区分、大まかな分類 70~90%	地先 (0.004~5km ²)	0-10m	自前：5~40万円（ドローン購入） 委託：180万円+240万円/0.1km ² （撮影+画像解析で藻場判別）	撮影：0.3-0.5km ² /30分
広域調査	航空写真	藻場有無、被度区分、大まかな分類 65~85%	市町村、県 (~600km ²)	0-10m	委託：550万円/133km ² （撮影+オルソ画像作成） 1530万円/270km ² （撮影+画像解析で藻場判別）	撮影：13-554km ² /6時間
広域調査	衛星画像	藻場有無、被度区分、大まかな分類 60~85%	市町村、県、地方 (1 km ² ~)	0-10m	自前：無料~20万円/25km ² （画像入手） 委託：300万円/30km ² （画像取得+画像解析で藻場判別） 3350万円/6600km ² （現地調査+画像取得+画像解析で藻場判別）	無料画像はすぐDL 画像購入の場合は約1週間~10日間で納品

(2) 調査手法のコスト比較

神奈川県真鶴町地先の岩大橋と真鶴港近くの 2 地点（図 5-(2)-1）で潜水、水中カメラ、水中ドローン、音響測量、ドローン空撮による調査を行った（図 5-(2)-2）。下記に調査の内容と委託した場合の費用の概算方法を示す。

調査の内容

・潜水

両地点で海中に調査ラインを引いてライン上で 20m おきに方形枠を置き、その中の海藻種と被度を記録する（P. 38 に詳細あり）。

・水中カメラ（船上調査）

両地点内で調査ポイントを設定し、そのポイント上で水中カメラを降ろし、海藻種と被度を記録する（P46. に詳細あり）。

・水中ドローン（船上調査）

両地点で海中に調査ラインを引いてライン上で動画を撮影し、その動画から静止画を切り出し、中の海藻種と被度を記録する。調査中に GPS でトラックし、動画の静止画と緯度経度を紐づけられるようにする（P46 に詳細あり）。

・音響測量

両地点で GPS により調査測線を設定し、測線上で魚群探知機により音響測量して、そのダウンスキャン画像を用いて藻場分布を推定する（P. 23 に詳細あり）。

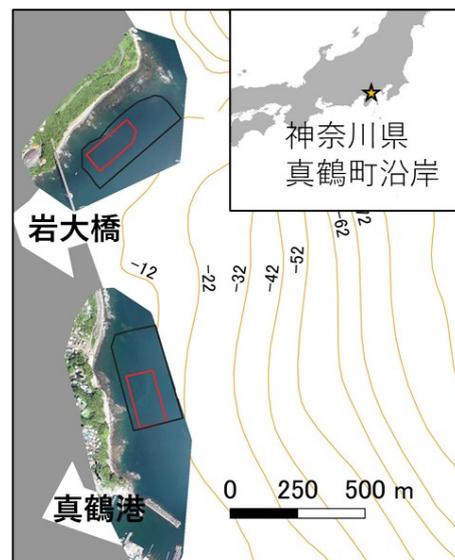


図 5-(2)-1. 神奈川県真鶴町沿岸の岩大橋側と真鶴側の調査範囲（赤枠が潜水調査の範囲と黒枠が他調査の範囲）

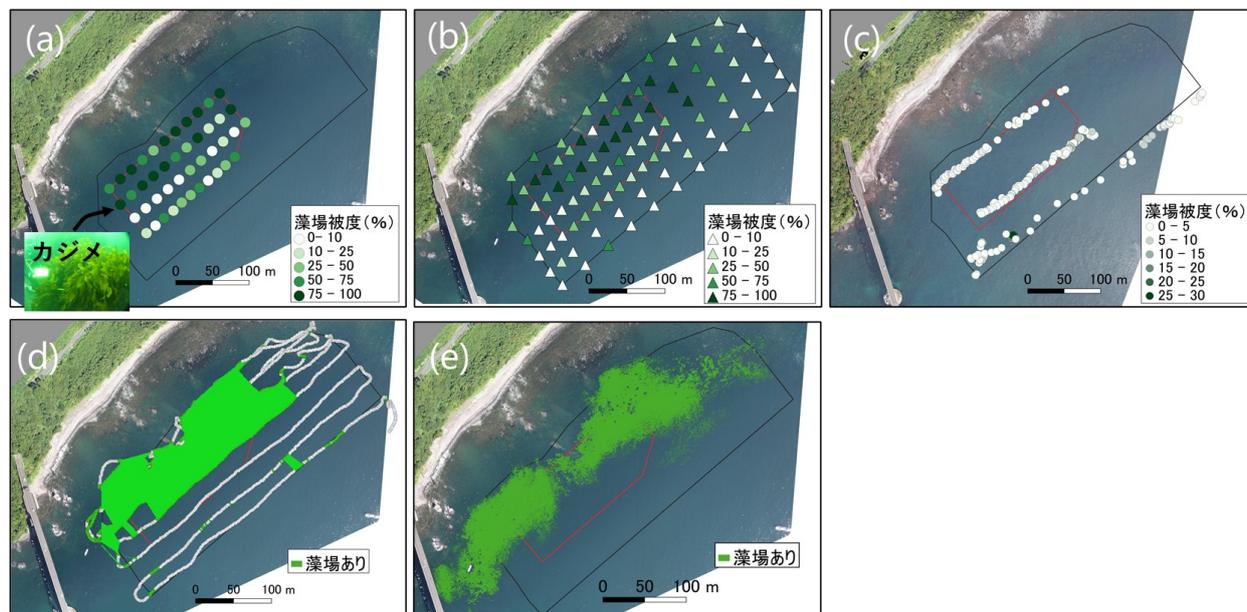


図 5-(2)-2. (a)潜水調査、(b)船上カメラ調査、(c)水中ドローンで取得した藻場データ、(d)音響測量及び (e) ドローン空撮により推定された藻場分布 (a, b, d, e は 2019 年、c は 2020 年の調査結果)

- ・ドローン空撮

両地点で高度 300mからドローン空撮を行い、その画像を用いて藻場分布を推定する (P. 10 に詳細あり)。

測量費用 (解析費用は除く) の概算

上記の調査をすべて民間委託する場合の見積もりを基に、測量費用については調査努力量あたりの換算式を作成した。各調査を委託する場合の費用 (税抜き) = 測量 + 測量準備・成果品 + 諸経費となっており、調査を委託する際の目安を計算できる。数値は中央値と最小値-最大値で示している。ただし、調査地までの旅費については会社の場所により変わるため除いている。また、音響測量とドローン空撮については教師・検証用の現地データ取得の費用は入っていないので、別途現地データが必要となる。

- ・潜水観察

測量 : 399 円 (318-870 円/m) × ライン長 (m)

測量準備・成果品 : 70 万円 (66-71 万円)

諸経費 : 0.81 (0.73-0.82) × (測量 + 測量準備・成果品)

- ・水中カメラ (船上調査)

測量 : 0.3 万円 (0.2-0.5 万円/点) × 調査点数

測量準備・成果品 : 70 万円 (28-71 万円)

諸経費 : 0.81 (0.73-0.82) × (測量 + 測量準備・成果品)

- ・水中ドローン (船上調査)

測量 : 31.8 万円 (21.0-35.5 万円/km) × ライン長

測量準備・成果品 : 36.6 万円 (12.3-59.0 万円)

諸経費 : 0.82 (0.82-0.90) × (測量 + 測量準備・成果品)

- ・音響測量

測量 : 4.3 万円 (1.0-5.6 万円/km) × ライン長 (km) + 27 万円 (24-74 万円)

測量準備・成果品 : 127 万円 (70-160 万円)

諸経費 : 0.73 (0.69-0.80) × (測量 + 測量準備・成果品)

- ・ドローン空撮

測量 : 354 万円 (340-393 万円/km²) × 面積 (km²) + 5 万円 (0.4-11.9 万円)

測量準備・成果品 : 71 万円 (49-74 万円)

諸経費 : 0.73 (0.71-0.85) × (測量 + 測量準備・成果品)

各調査の取得情報、調査点数、現地調査時間、民間委託した場合の調査 (測量) 費用と解析 (設計) 費用について表 5-(2)-1 に整理した。

表 5-(2)-1. 調査により取得可能な情報、調査時間（左が岩大橋側、右が真鶴側、準備の時間などは除く）、委託費用（税抜き）（中央値と最値-最大値）

手法	取得情報	調査点数 (/10ha)	調査時間 (分/ha)	民間委託の調査費用 (10haあたり)	民間委託の解析 費用
潜水調査	種判別・被度	270	164, 180	558万円 (494-893万円)	176万円 (155-189万円)
水中カメラ	種判別・被度	270	29, 29	281万円 (267-298万円)	189万円 (141-232万円)
水中ドローン	海藻分類（褐藻、紅藻、緑藻）・被度	397	36, 42	177万円 (96-225万円)	224万円 (200-271万円)
音響測量	藻場の有無	-	15, 21	298万円 (270-475万円)	189万円 (174-214万円)
ドローン空撮	藻場の有無	-	7, 7	181万円 (176-277万円)	237万円 (172-309万円)

用語説明

マニュアルで使用されている用語の解説は次のとおりである。

用語	解説
オルソモザイク化	空中写真の像には位置ズレが生じる。正確な藻場面積の判定には写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのないものにする必要がある。標高データも用いて正しい大きさと位置に表示される画像に変換することオルソ化（補正）という。加えて、撮影した複数の画像を一括で処理したい場合、複数の写真画像を1枚の画像（モザイク処理）すること。両者を合わせてオルソモザイク化と呼ぶ。
幾何補正	オルソ化と同様の意味で、地図や画像などの空間位置の誤差を除き、基準点を用いて正確な地理座標を与えること。
教師	事前に与えられた現地データをいわば「例題（＝先生からの助言）」とみなすこと。
教師あり分類	事前に与えられたデータをいわば「例題（＝先生からの助言）」とみなして、それをガイドに藻場の分布などを推定する方法
検証	潜水観察や船上調査などの現地調査で得られる情報を用いて、他の調査（衛星画像、航空写真、ドローン空撮、音響測量）で得られた情報の正答率を算出すること。
深層学習	人間が自然に行うタスクをコンピュータに学習させる機械学習の手法の一つで、ニューラルネットワークを多層に結合して表現・学習能力を高めた手法である。近年、藻場の画像解析などにも使われ始めている。
振動子	音響測量に用いる魚群探知機などの超音波を発射して反射してきた音波を感知するセンサーのこと。
正答率（精度）	潜水観察や船上調査などの現地調査で得られる情報を用いて、他の調査（衛星画像、航空写真、ドローン空撮、音響測量）で得られた情報がどの程度あっているか算出した値。通常、70～80%程度の正答率があればよいとされる。
手引きの利用者	漁業者：漁業者、漁業協同組合、漁業者が組織する研究会等 行政機関：国、都道府県、市町村で試験研究機関を除いたもの 研究機関：大学、国・都道府県、独立行政法人等の試験研究機関 NPO：藻場の保全回復活動を行う組織を言う。
バンド	衛星画像の光学センサーでは一つの機器で複数の波長帯を同時に観測でき、それぞれの波長帯毎に「バンド」という単位で分けられている。バンドとして可視光線（青バンド+緑バンド+赤バンドのBGRなど）と人間の視覚では捉えきれない近赤外線、赤外線の波長などがある。
藻場	浅海域において海藻あるいは海草が繁茂している場所、あるいはそれらの群落群や群落内の動物を含めた群集のことをいう。

引用文献

1. 濱岡秀樹 (2020) 航空写真を用いた藻場判別における解析手法間での精度比較. 新水海研報 16:11-16
2. 国土地理院 オルソ画像について.
<https://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa40002.html>
3. 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所, 東北区水産研究所, 西海区水産研究所, 他(2020) 平成31年度水産基盤整備調査委託事業報告書 「藻場回復・保全技術の高度化検討調査」
4. Sonoki S, Shao H, Morita Y, et al (2016) Using acoustics to determine eelgrass bed distribution and to assess the seasonal variation of ecosystem service. PLoS One 11:1-15.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150890>
5. 奥村宏征, 浅海茂, 森松秀治, 他 (2006) マルチビームソナーを用いたアマモ群落現存量推定法の開発. 海岸工学論文集 53:1436-1440
6. Shao H, Minami K, Shirakawa H, et al (2017) Verification of echosounder measurements of thickness and spatial distribution of kelp forests. J Mar Sci Technol 25:343-351. <https://doi.org/10.6119/JMST-016-1229-1>
7. 南憲吏, 安間洋樹, 濱野明, 他 (2015) 音響反射強度測定による来留見ノ瀬のホンダワラ科藻場の現存量推定と季節変化. 海洋音響学会誌 42:1-10.
<https://doi.org/10.3135/jmasj.42.1>
8. Abukawa K, Yamamuro M, Kikvidze Z, et al (2013) Assessing the biomass and distribution of submerged aquatic vegetation using multibeam echo sounding in Lake Towada, Japan. Limnology 14:39-42. <https://doi.org/10.1007/s10201-012-0383-7>
9. 梶原瑠美子, 桑原久実, 濱田保夫, 中嶋泰 (2015) 藻場や磯焼け域の把握に関わる新たな装置や技術～廉価版サイドスキャンソナー, ラジコンヘリ, 間欠撮影カメラの利用～. 水産工学 51:221-226
10. 水産工学研究所 (2011) 簡単に行える音響測器を用いた漁場調査に関する手引き.
http://nrife.fra.affrc.go.jp/topics/onnyoukiki_tebiki/onnyou_tebiki.pdf
11. Hamaoka H, Kamiyama T, Hori M (2020) Estimating the change in regional scale distribution of seagrass and macroalgal beds using discrete local distribution data analyzed from aerial images. Ecol Res 35:76-94.
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12087>
12. Setyawidati NAR, Puspita M, Kaimuddin AH, et al (2018) Seasonal biomass and algininate stock assessment of three abundant genera of brown macroalgae using multispectral high resolution satellite remote sensing: A case study at Ekas Bay (Lombok, Indonesia). Mar Pollut Bull 131:40-48.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.068>
13. Vahtmae E, Kutser T (2007) Mapping Bottom Type and Water Depth in Shallow Coastal Waters with Satellite Remote Sensing. J Coast Res 185-189
14. Mumby PJ, Edwards AJ (2002) Mapping marine environments with IKONOS imagery: Enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. Remote Sens Environ 82:248-257. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00041-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00041-X)
15. 環境省 (2018) 瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査について.
http://www.env.go.jp/water/heisa/survey/result_setonaikai.html

16. Cavanaugh KC, Siegel DA, Kinlan BP, Reed DC (2010) Scaling giant kelp field measurements to regional scales using satellite observations. *Mar Ecol Prog Ser* 403:13-27. <https://doi.org/10.3354/meps08467>
17. Wilson KL, Skinner MA, Lotze HK (2019) Eelgrass (*Zostera marina*) and benthic habitat mapping in Atlantic Canada using high-resolution SPOT 6/7 satellite imagery. *Estuar Coast Shelf Sci* 226:106292. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106292>
18. Yamakita T, Watanabe K, Nakaoka M (2011) Asynchronous local dynamics contributes to stability of a seagrass bed in Tokyo Bay. *Ecography (Cop)* 34:519-528. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06490.x>
19. Zavalas R, Ierodiaconou Daniel D, Ryan D, et al (2014) Habitat classification of temperate marine macroalgal communities using bathymetric LiDAR. *Remote Sens* 6:2154-2175. <https://doi.org/10.3390/rs6032154>
20. JAXA 衛星データを利用したカラー合成. <https://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/dataproc/>
21. Lyzenga DR (1981) Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and landsat data. *Int J Remote Sens* 2:71-82. <https://doi.org/10.1080/01431168108948342>
22. Sagawa T, Boissier E, Komatsu T, et al (2010) Using bottom surface reflectance to map coastal marine areas: A new application method for Lyzenga's model. *Int J Remote Sens* 31:3051-3064. <https://doi.org/10.1080/01431160903154341>
23. Yamakita T, Sodeyama F, Whanpetch N, et al (2019) Application of deep learning techniques for determining the spatial extent and classification of seagrass beds, Trang, Thailand. *Bot Mar* 62:291-307. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0017>
24. Ishiguro S, Yamada K, Yamakita T, et al (2016) Classification of Seagrass Beds by Coupling Airborne LiDAR Bathymetry Data and Digital Aerial Photographs. 59-70. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0780-4_5
25. 梶原瑠美子, 大橋正臣, 三上信雄, 他 (2016) 衛星画像による海底被覆物マップを用いた 漁場環境評価手法の検討. *土木学会論文集B3 (海洋開発)* 72:
26. 京田潤一, 細川真也, 渡辺健太郎, 他 (2012) 現地観測データと衛星画像を用いた海草藻場の分布域と被度の推定. *土木学会論文集B2 (海岸工学)* 68:I_1466-I_1470. https://doi.org/10.2208/kaigan.68.i_1466
27. 環境庁自然保護局 (1994) 第4回自然環境保全基礎調査海辺調査 総合報告書
28. 二宮順一, 森信人, 矢持進 (2006) 高解像度画像を用いた光学理論による藻場分布推定法の開発. *海岸工学論文集* 53:1426-1430
29. Uhrin A V., Townsend PA (2016) Improved seagrass mapping using linear spectral unmixing of aerial photographs. *Estuar Coast Shelf Sci* 171:11-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.021>
30. Lathrop RG, Montesano P, Haag S (2013) A Multi-scale Segmentation Approach to Mapping Seagrass Habitats Using Airborne Digital Camera Imagery. *Photogramm Eng Remote Sens* 72:665-675. <https://doi.org/10.14358/pers.72.6.665>
31. 宇野女草太, 吉田夏樹, 高野正範, 他 (2018) 航空機搭載型センサを用いた沿岸環

- 境調査事例の紹介. *J Remote Sens Soc Japan* 38:219-224
32. Zhao J, Zhao X, Zhang H, Zhou F (2017) Shallow water measurements using a single green laser corrected by building a near water surface penetration model. *Remote Sens* 9:1-18. <https://doi.org/10.3390/rs9050426>
 33. Webster T, McGuigan K, Crowell N, et al (2016) Optimization of Data Collection and Refinement of Post-processing Techniques for Maritime Canada's First Shallow Water Topographic-bathymetric Lidar Survey. *J Coast Res* 76:31-43. <https://doi.org/10.2112/SI76-004>
 34. Collin A, Long B, Archambault P (2012) Merging land-marine realms: Spatial patterns of seamless coastal habitats using a multispectral LiDAR. *Remote Sens Environ* 123:390-399. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.015>
 35. 国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産工学研究所, 東北区水産研究所, 西海区水産研究所, 他(2020) 平成31年度水産基盤整備調査委託事業報告書 「藻場回復・保全技術の高度化検討調査」
 36. 中西達也, 棚田教生, 北野慎容, 他 (2019) 徳島県南部海部郡沿岸の2007年から2017年における藻場の変遷. *徳島県水産研究報告* 34:1-34
 37. 押野明夫, 斎藤憲次郎, 芳賀圭悟, 他 (2011) 宮城県北部岩礁域における藻場とキタムラサキウニの分布態様. *宮城県水産研究報告* 11:43-64
 38. Wada K (2016) labelme: Image Polygonal Annotation with Python
 39. Ronneberger O, Fischer P, Brox T (2015) U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. pp 234-241
 40. Fujita D, Ishikawa T, Kodama S, et al (2006) Distribution and recent reduction of *Gelidium* beds in Toyama Bay, Japan. *J Appl Phycol* 18:591-598. <https://doi.org/10.1007/s10811-006-9060-8>

深層学習による水中画像（水中ドローン、潜水撮影画像）からの海藻判別の手順

・利用したシステム

Windows 10 pro 64 bit
プロセッサ：Intel® Core(TM) i7-8700 CPU@3.70GHz
実装メモリ（RAM）：16.0 GB
GPU：NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB
CUDA：Cuda version 10.1
conda version 4.9.2
python version 3.8.3
Spyder 4.1.4

手順

水中ドローンで撮影した動画から静止画を数秒おきに取り出す

（動画切り出し参考：<https://note.nkmk.me/python-opencv-video-to-still-image/>）

```
#python 動画から静止画切り出しプログラム
import cv2
import datetime
import os

os.chdir("動画のあるディレクトリへのパス")

# 時間（秒）で静止画切り出し範囲を指定する関数の作成-----
--
def save_frame_range_sec(video_path, start_sec, stop_sec, step_sec,
                          dir_path, basename, ext='jpg'):
    cap = cv2.VideoCapture(video_path)

    if not cap.isOpened():
        return

    os.makedirs(dir_path, exist_ok=True)
    base_path = os.path.join(dir_path, basename)

    digit = len(str(int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT))))

    fps = cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS)
    fps_inv = 1 / fps

    sec = start_sec
    while sec < stop_sec:
        n = round(fps * sec)
        cap.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, n)
        ret, frame = cap.read()
        dt=datetime.datetime(2020, 10, 28, 10, 40, 22)#動画ファイルごとの開始時刻を設定（年、月、日、時間、分、秒）
        td=datetime.timedelta(seconds=round(n * fps_inv))
        if ret:
            cv2.imwrite(
                '{}_{}_{}.{}'.format(
                    base_path, str(n).zfill(digit), (dt+td).strftime('%H%M%S'),
                    ext
                )
            )
    ext
```

```

        ),
        frame
    )
else:
    return
    sec += step_sec
# 時間 (秒) で範囲指定する関数の実行----
save_frame_range_sec(video_path, start_sec, stop_sec, step_sec,
                      dir_path, basename, ext='jpg')
# video_path は動画のあるディレクトリ、start_sec は切り抜きの開始時刻、stop_sec
# は切り抜きの終了時刻、step_sec は切り抜きの間隔 (秒)、basename は切り抜き静止画
# につける共通名、ext='jpg' は静止画の拡張子の設定

save_frame_range_sec('C:/Python/video/xxx.mp4',
                     127, 1701, 1,
                     'C:/Python/yyyy', '1028Iwafukaba')
#127 秒から 1701 秒後までで 1 秒ごとに静止画切り抜きする例

```

水中画像からのアノテーション (学習データ) の作成

水中ドローン静止画像および潜水撮影画像からアノテーションソフト labelme

(<https://github.com/hellok/icrawler>) を用いて、画像上の海藻をアノテーション (画像上の分類したい物体を指定し、教師データを作る) し、このアノテーションデータを基に新規の画像に対して海藻 (褐藻、紅藻、緑藻) の判別を行う。

anaconda prompt 上で labelme をインストールする。

(参考サイト : <https://qiita.com/mucchyoy/items/d21993abee5e6e44efad>)

P45 のコラム 8 の図のように labelme を使うと、判別したい藻場部分を囲んでアノテーションデータ (教師データ) を作成できる。今回の深層学習の方法では作成したアノテーションデータセット (json ファイル) を PascalVOC 形式 (アノテーションされた png ファイル) に変換しなくてはならない。

labelme のソースから以下の PascalVOC 変換用のコードを手に入れて利用する。

labelme¥examples¥semantic_segmentation¥labelme2voc.py

以下を anaconda prompt 上で実行 (labelme が最新バージョンであることを確認)。

```
python labelme2voc.py "dataset" "VOC2012" --labels labels.txt
```

labelme2voc.py [input_dir] [output_dir] --labels [labels]

input_dir: labelme でアノテーションした画像と json セットのディレクトリへのパス

output_dir: 出力ディレクトリへのパス

labels: ラベル情報テキストへのパス

labels.txt は labelme でアノテーションした分類名を同じように入れる (kasso を Kasso などにするとう設定できない)

```

labels.txt の例
__ignore__
_background_
kasso
koso
ryokuso

```

Unet を使った深層学習による判別

VOC のフォルダの下に、深層学習用の該当フォルダを作ってその中に” train” フォルダと” test” フォルダを作る (図 S1)。” train” フォルダには images フォルダを作ってその中に train 用の jpg ファイルを入れ、もう一つ” seg_images” フォルダを作って、その中に VOC 変換で作成した SegmentationClassPNG フォルダ内の png ファイルを入れる。test フォルダ内に” images” フォルダを作ってその中に深層学習により判別する新規の jpeg 画像を入れる。

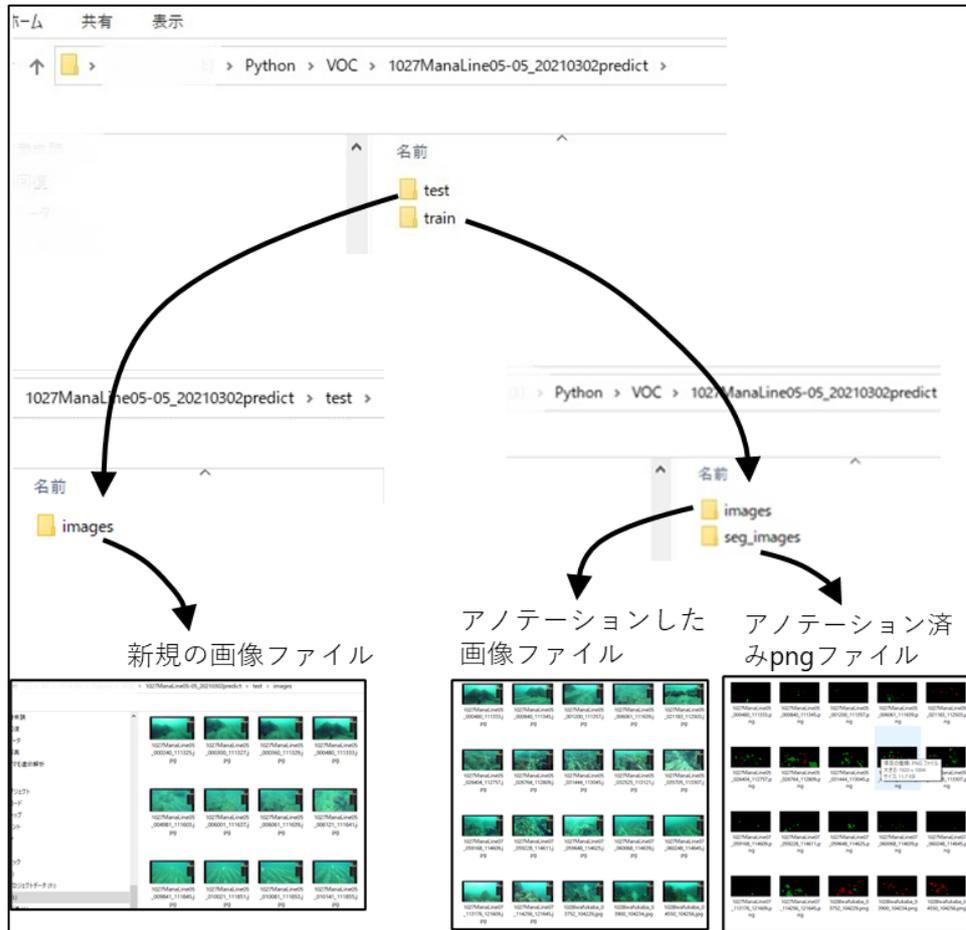


図 S1. Unet を使った深層学習の際の学習用の画像と判別する新規画像のフォルダ分け

spyder (python 分析向けの統合開発環境) を用いて、下記の python コードを実行し、深層学習による海藻判別を行う。

```
import os
import torch
import torch.nn.functional as F
import argparse
import cv2
import numpy as np
from glob import glob
import matplotlib.pyplot as plt
from copy import copy
from tqdm import tqdm

os.chdir("C:xxx")#パスの設定

# class config
```

```

class_label = {'koso' : [0, 0, 128], 'kasso' : [0, 128, 0], 'ryokuso' :
[0, 128, 128]}
class_N = len(class_label) + 1 # class + background

# config
img_height, img_width = 256, 256 #572, 572
out_height, out_width = 256, 256 #388, 388
channel = 3

# GPU
GPU = "cuda" #or True CPU の場合は False
#####
device = torch.device("cuda" if GPU and torch.cuda.is_available() else
"cpu")

# other
model_path = 'UNet1213.pt'

# random seed
torch.manual_seed(0)

class UNet(torch.nn.Module):
    def __init__(self):

        class UNet_block(torch.nn.Module):
            def __init__(self, dim1, dim2):
                super(UNet_block, self).__init__()

                _module = []

                for i in range(2):
                    f = dim1 if i == 0 else dim2
                    _module.append(torch.nn.Conv2d(f, dim2, kernel_size=3,
padding=1, stride=1))
                    _module.append(torch.nn.BatchNorm2d(dim2))
                    _module.append(torch.nn.ReLU())

                self.module = torch.nn.Sequential(*_module)

            def forward(self, x):
                x = self.module(x)
                return x

        class UNet_deconv_block(torch.nn.Module):
            def __init__(self, dim1, dim2):
                super(UNet_deconv_block, self).__init__()

                self.module = torch.nn.Sequential(
                    torch.nn.ConvTranspose2d(dim1, dim2, kernel_size=2,
stride=2),

```

```

        torch.nn.BatchNorm2d(dim2)
    )

    def forward(self, x):
        x = self.module(x)
        return x

super(UNet, self).__init__()

base = 16

self.enc1 = UNet_block(3, base)
self.enc2 = UNet_block(base, base * 2)
self.enc3 = UNet_block(base * 2, base * 4)
self.enc4 = UNet_block(base * 4, base * 8)
self.enc5 = UNet_block(base * 8, base * 16)

self.tconv4 = UNet_deconv_block(base * 16, base * 8)
self.tconv3 = UNet_deconv_block(base * 8, base * 4)
self.tconv2 = UNet_deconv_block(base * 4, base * 2)
self.tconv1 = UNet_deconv_block(base * 2, base)

self.dec4 = UNet_block(base * 16, base * 8)
self.dec3 = UNet_block(base * 8, base * 4)
self.dec2 = UNet_block(base * 4, base * 2)
self.dec1 = UNet_block(base * 2, base)

self.out = torch.nn.Conv2d(base, class_N, kernel_size=1, padding=0,
stride=1)

def forward(self, x):
    # block conv1
    x_enc1 = self.enc1(x)
    x = F.max_pool2d(x_enc1, 2, stride=2, padding=0)

    # block conv2
    x_enc2 = self.enc2(x)
    x = F.max_pool2d(x_enc2, 2, stride=2, padding=0)

    # block conv3
    x_enc3 = self.enc3(x)
    x = F.max_pool2d(x_enc3, 2, stride=2, padding=0)

    # block conv4
    x_enc4 = self.enc4(x)
    x = F.max_pool2d(x_enc4, 2, stride=2, padding=0)

    # block conv5
    x = self.enc5(x)

```

```

        x = self.tconv4(x)

        x = torch.cat((x, x_enc4), dim=1)
        x = self.dec4(x)

        x = self.tconv3(x)

        x = torch.cat((x, x_enc3), dim=1)
        x = self.dec3(x)

        x = self.tconv2(x)
        x = torch.cat((x, x_enc2), dim=1)
        x = self.dec2(x)

        x = self.tconv1(x)
        x = torch.cat((x, x_enc1), dim=1)
        x = self.dec1(x)

        x = self.out(x)
        x = F.softmax(x, dim=1)

    return x

# get train data
def data_load(path, hf=False, vf=False, rot=False):
    if (rot == 0) and (rot != False):
        raise Exception('invalid rot >> ', rot, ' should be [1, 359] or
False')

    paths = []
    paths_gt = []

    data_num = 0
    for dir_path in glob(path + '*'):
        data_num += len(glob(dir_path + "*"))

    pbar = tqdm(total = data_num)

    for dir_path in glob(path + '*'):
        for path in glob(dir_path + '*'):
            for i, cls in enumerate(class_label):
                if cls in path:
                    t = i

                    paths.append({'path': path, 'hf': False, 'vf': False, 'rot':
0})

                    gt_path = path.replace("images", "seg_images").replace(".jpg",
".png")

```

```

        paths_gt.append({'path': gt_path, 'hf': False, 'vf': False,
'rot': 0})

        # horizontal flip
        if hf:
            paths.append({'path': path, 'hf': True, 'vf': False, 'rot':
0})
            paths_gt.append({'path': gt_path, 'hf': True, 'vf': False,
'rot': 0})

        # vertical flip
        if vf:
            paths.append({'path': path, 'hf': False, 'vf': True, 'rot':
0})
            paths_gt.append({'path': gt_path, 'hf': False, 'vf': True,
'rot': 0})

        # horizontal and vertical flip
        if hf and vf:
            paths.append({'path': path, 'hf': True, 'vf': True, 'rot':
0})
            paths_gt.append({'path': gt_path, 'hf': True, 'vf': True,
'rot': 0})

        # rotation
        if rot is not False:
            angle = rot
            while angle < 360:
                paths.append({'path': path, 'hf': False, 'vf': False,
'rot': rot})
                paths_gt.append({'path': gt_path, 'hf': False, 'vf':
False, 'rot': rot})
                angle += rot

        pbar.update(1)

    pbar.close()

    return np.array(paths), np.array(paths_gt)

def get_image(infos, gt=False):
    xs = []

    for info in infos:
        path = info['path']
        hf = info['hf']
        vf = info['vf']
        rot = info['rot']
        x = cv2.imread(path)

        # resize
        if gt:
            x = cv2.resize(x, (img_width, img_height)).astype(np.float32)

```

```

else:
    x = cv2.resize(x, (out_width, out_height)).astype(np.float32)

# channel BGR -> Gray
if channel == 1:
    x = cv2.cvtColor(x, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    x = np.expand_dims(x, axis=-1)

# horizontal flip
if hf:
    x = x[:, ::-1]

# vertical flip
if vf:
    x = x[::-1]

# rotation
scale = 1
_h, _w, _c = x.shape
max_side = max(_h, _w)
tmp = np.zeros((max_side, max_side, _c))
tx = int((max_side - _w) / 2)
ty = int((max_side - _h) / 2)
tmp[ty: ty+_h, tx: tx+_w] = x.copy()
M = cv2.getRotationMatrix2D((max_side / 2, max_side / 2), rot,
scale)
_x = cv2.warpAffine(tmp, M, (max_side, max_side))
x = _x[tx:tx+_w, ty:ty+_h]

if gt:
    _x = x
    x = np.zeros((out_height, out_width), dtype=np.int)

    for i, (_, vs) in enumerate(class_label.items()):
        ind = (_x[..., 0] == vs[0]) * (_x[..., 1] == vs[1]) *
(_x[..., 2] == vs[2])
        x[ind] = i + 1
else:
    # normalization [0, 255] -> [-1, 1]
    x = x / 127.5 - 1

    # channel BGR -> RGB
    if channel == 3:
        x = x[:, :, ::-1]

xs.append(x)

xs = np.array(xs, dtype=np.float32)

if not gt:

```

```

        xs = np.transpose(xs, (0, 3, 1, 2))

    return xs

# train
def train():
    # model
    model = UNet().to(device)
    model.train()

    opt = torch.optim.SGD(model.parameters(), lr=0.01, momentum=0.9)

    paths, paths_gt = data_load('./XXX/xxx/train/images/', hf=True,
vf=True, rot=False) ##### train データフォルダ

    # training
    mb = 8 # batch size
    mbi = 0
    train_N = len(paths)
    train_ind = np.arange(train_N)
    np.random.seed(0)
    np.random.shuffle(train_ind)

    loss_fn = torch.nn.NLLLoss()

    for i in range(1000):
        if mbi + mb > train_N:
            mb_ind = copy(train_ind[mbi:])
            np.random.shuffle(train_ind)
            mb_ind = np.hstack((mb_ind, train_ind[ : (mb - (train_N -
mbi))]))
            mbi = mb - (train_N - mbi)
        else:
            mb_ind = train_ind[mbi : mbi + mb]
            mbi += mb

        # data load
        x = torch.tensor(get_image(paths[mb_ind]),
dtype=torch.float).to(device)
        t = torch.tensor(get_image(paths_gt[mb_ind], gt=True),
dtype=torch.long).to(device)

        opt.zero_grad()
        y = model(x)

        # reshape gt
        y = y.permute(0, 2, 3, 1).contiguous()
        y = y.view(-1, class_N)
        t = t.view(-1)

```

```

    loss = loss_fn(torch.log(y), t)
    loss.backward()
    opt.step()

    pred = y.argmax(dim=1, keepdim=True)
    acc = pred.eq(t.view_as(pred)).sum().item() / mb / out_height /
out_width

    if (i + 1) % 10 == 0:
        print('Iter : {} , Loss : {} , Accuracy : {}'.format(i + 1,
loss.item(), acc))

    torch.save(model.state_dict(), model_path)

# test
def test():
    model = UNet().to(device)
    model.load_state_dict(torch.load(model_path,
map_location=torch.device(device)))
    model.eval()

    paths, path_gt = data_load('./XXX/xxx /test/images/') ##### test デ
ータフォルダ

    with torch.no_grad():
        for i in range(len(paths)):
            path = paths[[i]]
            x = get_image(path)

            x = torch.tensor(get_image(paths[[i]]),
dtype=torch.float).to(device)

            pred = model(x)

            #pred = pred.permute(0, 2, 3, 1).reshape(-1, class_num+1)
            pred = pred.detach().cpu().numpy()[0]
            pred = pred.argmax(axis=0)

            # prediction -> RGB
            out = np.zeros((out_height, out_width, 3), dtype=np.uint8)
            for i, (_, vs) in enumerate(class_label.items()):
                out[pred == (i + 1)] = vs

            print(">> {}".format(path[0]['path']))

            plt.subplot(1, 2, 1)
            plt.imshow((x.detach().cpu().numpy()[0].transpose(1, 2, 0) *
127.5 + 127.5).astype(np.uint8))
            plt.subplot(1, 2, 2)

```

```

plt.imshow(out[... , :-1])
plt.show()

def arg_parse():
    parser = argparse.ArgumentParser(description='')
    parser.add_argument('--train', default='--train', dest='train',
action='store_true')
    parser.add_argument('--test', default='--test', dest='test',
action='store_true')
    args = parser.parse_args()
    return args

# main
if __name__ == '__main__':
    args = arg_parse()

    if args.train:
        train()
    if args.test:
        test()

    if not (args.train or args.test):
        print("please select train or test flag")
        print("train: python main.py --train")
        print("test: python main.py --test")
        print("both: python main.py --train --test")

```

このコードを spyder で実行すると、spyder のプロットペイン（右上）で元画像と判別結果の画像が出てくるので保存する。プロットペイン内ですべての結果を画像として一括保存できる（図 S2）。ただし、ファイル名が保存した時間になってしまい（例. Figure 2021-03-02 151522 (1).png）、元ファイルとの紐づけがなくなってしまう。元ファイル名への修正方法については後述する。

- ・エラーが出た時の対応

```

RuntimeError: CUDA out of memory. Tried to allocate 16.00 MiB (GPU 0; 3.00 GiB total capacity; 1.94 GiB already allocated; 11.86 MiB free; 1.97 GiB reserved in total by PyTorch)

```

→上記のコード上でバッチサイズを設定できるので、サイズを小さくして対応する。

mb=16 to mb=8

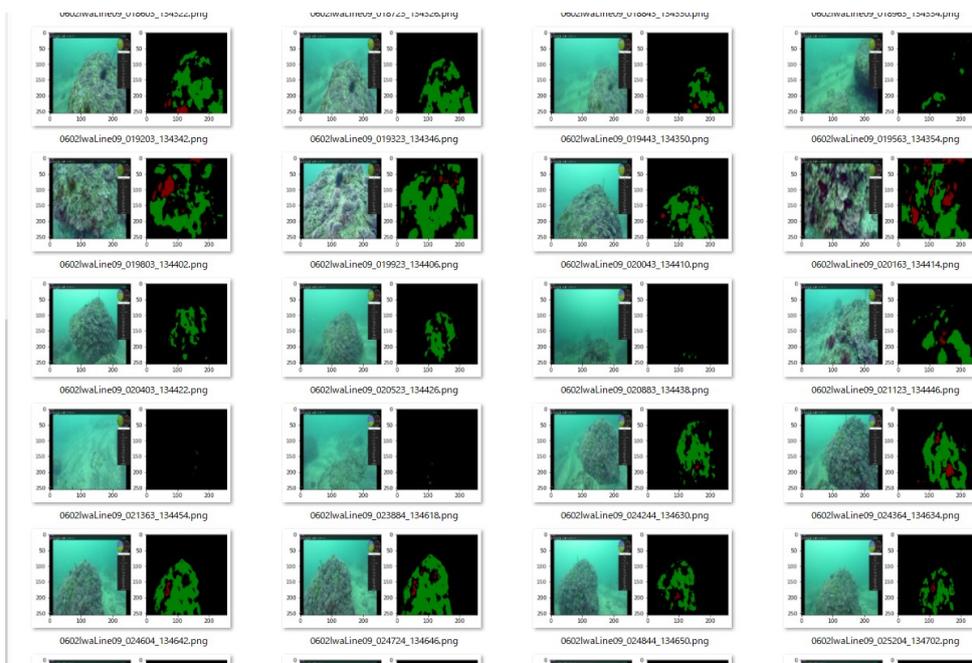


図 S2. Unet を使った深層学習の海藻判別結果. 元画像と判別画像が結合されている

判別結果からの被度の算出

- ファイル名の一括修正

深層学習の segmentation 結果の png ファイルを一括保存すると、元ファイルの名前から変わり、上記のようにファイル名が保存した時間になる。

うまく segmentation 結果に元ファイル名が付くようにするには以下の手順を踏む。

ファイル名をエクスプローラーの shift+右クリック→パスのコピーで一括コピーする。同様に変更先のファイル名（元のファイル名）もこの方法で一括コピーする。この時両者の順番が合うように画像を確認する。エクセルなどにコマンドプロンプトの名前変更コマンドの ren *元ファイル名* 変更ファイル名を列に並べる。*で元ファイル名を囲んだのは元ファイル名の中に半角スペースがあって、そのままだとコマンドプロンプトでコマンドを読めないためである。メモ帳にコピーペーストし、その後”（ダブルクォーテーション）に変更し、列間のタブを半角スペースに置換する。（エクセルでは”（ダブルクォーテーション）は使えないので、代わりに*を使っている）

例. txt ファイルにコピペしたファイル名変更のコード

```
ren *Figure 2021-02-26 191002 (0). png* 1027ManaLine05_000240_11132. png
ren *Figure 2021-02-26 191002 (1). png* 1027ManaLine05_000300_11132. png
ren *Figure 2021-02-26 191002 (2). png* 1027ManaLine05_000360_11132. png
```

これをコマンドプロンプトにコピーしてすべてのファイル名を元ファイル名にする。

- 判別画像のクリップ（抜き出し）

判別結果は元画像と海藻判別画像が結合されている（図 S2）ため、そこから判別（segmentation）部分だけを下記の python コードを用いて抜き出す。

```
import os
import glob
from PIL import Image

os.chdir("C:/Python/xxxx/xxxx ")#ディレクトリのパスを設定
```

```

def imgcrop(img):
    yield img.crop((216, 41, 345, 163)) # yield 関数の処理を一旦停止して、
    戻り値を返す画像中の 切り出す領域を引数 box=(left, upper, right, lower)で設
    定。

files = glob.glob('*.*png')#ディレクトリ中のファイルを取得
for x in files:
    img = Image.open(x)
    for ig in imgcrop(img) :
        # 保存先フォルダの指定
        ig.save("C:/Python/xxx/xxxx" +x+"")# yield +x+はファイル名

```

・被度の計算

クリップした判別領域から BGR で褐藻 (0, 0, 128)、紅藻(0, 128, 0)、緑藻(0, 128, 128)の色ごとにセグメンテーションされているので (図 S3)、下記の python コードでその色ごとに被度を計算し、txt ファイルに保存する。



図 S3. 海藻判別のセグメンテーション結果 (褐藻が赤色、紅藻が緑色、緑藻が黄土色、裸地が黒色)

```

#海藻の被度計算のための3値画像(褐藻、紅藻、緑藻)からの被度算出
import os
import cv2
import glob

os.chdir("C:/Python/xxxx/xxxx")
#切り抜き画像のディレクトリのパスに設定へ

#被度計算プログラム
def coverage_cal(img):
    height=122#画像の縦の画素数を任意に設定
    width=129 #画像の横の画素数を任意に設定
    whole_area=15738#全体の画素数(縦の画素数×横の画素数)
    rachi_area=0 #裸地の面積(初期=0)

```

```

koso_area=0#紅藻(緑色)の面積(初期=0)
kasso_area=0 #褐藻(赤色)の面積(初期=0)
ryokuso_area=0#緑藻(黄緑色)の面積(初期=0)
other_area=0
#各色の面積比を求める
for i in range(height):
    for j in range(width):
        if all(img[i, j]<[5, 5, 5]):
            rachi_area+=1 #裸地
        elif all([0, 5, 0]<=img[i, j]) and all(img[i, j]<=[0, 128, 0]):
            koso_area+=1 # (BGR)の緑は紅藻
        elif all([0, 0, 5]<=img[i, j]) and all(img[i, j]<=[0, 0, 128]):
            kasso_area+=1 # (BGR)の赤は褐藻
        elif all([0, 5, 5]<=img[i, j]) and all(img[i, j]<=[0, 128, 128]):
            ryokuso_area+=1 # (BGR)の黄緑は緑藻
        else :
            other_area+=1 # その他
kasso=str(kasso_area/whole_area*100)#褐藻
koso=str(koso_area/whole_area*100)#紅藻
ryokuso=str(ryokuso_area/whole_area*100)#緑藻
other=str(other_area/whole_area*100)#その他
rachi=str(rachi_area/whole_area*100)#裸地
with open('results00.txt', 'a') as f:#"a"は追記モード、"w"は書き込みモード
    print(x, kasso, koso, ryokuso, other, rachi, file=f)
with open('results00.txt') as f:
    print(f.readlines())

files = glob.glob('*.*png')#ディレクトリ中のファイルを取得
for x in files:
    img=cv2.imread(x)#画像ファイル読み込み
    coverage_cal(img)

```