

第Ⅲ編 参考資料

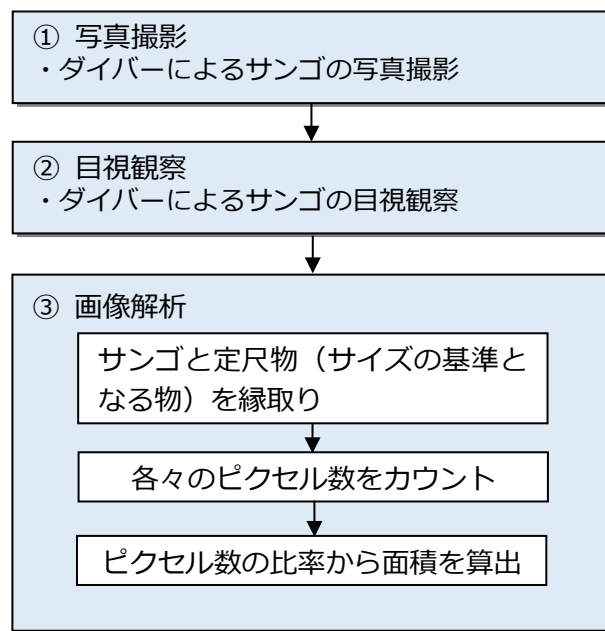
1. 【技術ノート1】中間育成中のサンゴの成長面積の簡易算定手法

従来、植え付け後のサンゴ成長量の把握は、ダイバーによる目視観察で被度（%）を記録するケースが多い。しかし、潜水目視では観察力に個人差が生じやすく、さらに、植え付けたサンゴの数が多い場合、多大な労力と時間を必要とすることから、効率的に観測し、正確にデータを記録できるモニタリング調査手法の確立が求められている。

以下に、現場で写真撮影によるモニタリングを行い、撮影画像の解析からサンゴの面積を算定する方法について整理した。

（1）調査・解析手順

調査・解析の流れは、図Ⅲ.1-1 に示す通り、「①写真撮影」、「②目視観察」、「③画像解析」の3つの工程に区分される。「①写真撮影」では、現地でダイバーによりモニタリング対象サンゴの撮影を行う。「②目視観察」では、撮影画像からでは判別が困難なサンゴの生死を現地で記録する。最後に、「③画像解析」では、撮影画像からサンゴの面積（cm²）の算出を行う。各工程の詳細は以下に示すとおりである。

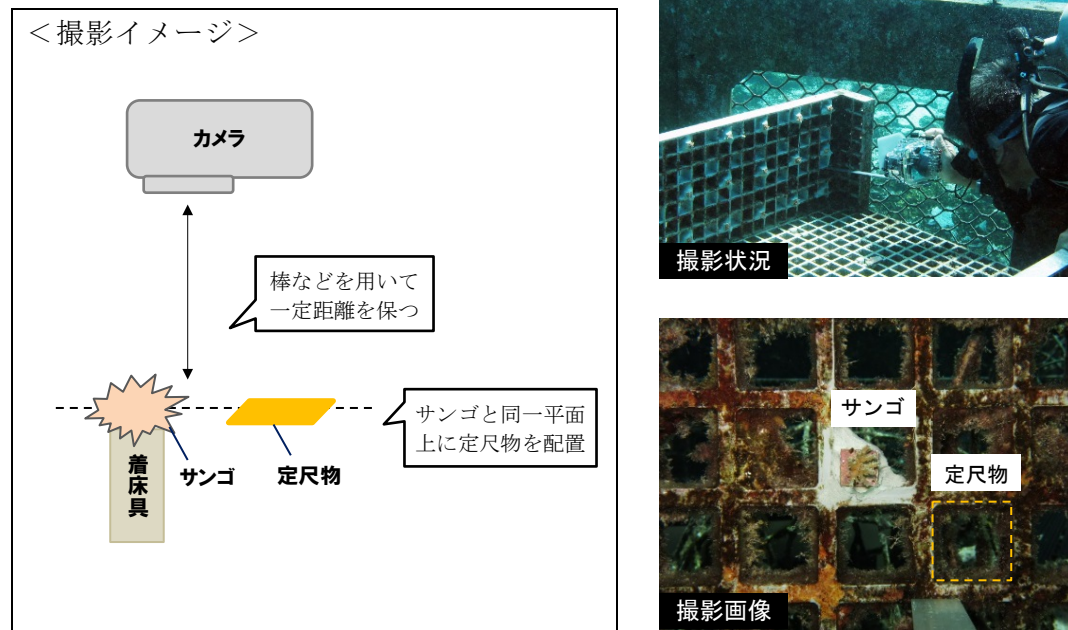


図Ⅲ.1-1 画像解析による面積算出方法の手順

① 写真撮影

撮影画角内に定尺物（サイズの基準となる物）をサンゴと同一平面上に配置して、サンゴを着床具面に対して平行で撮影する。沖ノ鳥島の実証事例では、サンゴを植え付ける中間育成施設の格子状基盤 1 マス（4×4cm）を定尺物とした。

なお、棒などを用いて一定の距離を保ちながら撮影すると、撮影時の平行も確認できるため、複数のサンゴに対する撮影作業が容易となり効率的に行える。

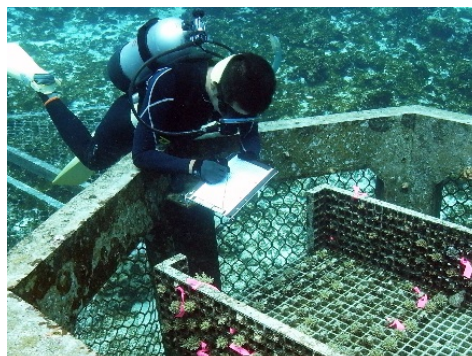


図Ⅲ.1-2 サンゴの写真撮影

② 目視観察

撮影画像ではサンゴの生死の判別が困難であるため、現場での目視観察により生残状況や外観変化を記録して、画像解析時の補足資料として活用する。

生残状況のモニタリングについては「第Ⅱ編 2.3.4 育成管理」の表Ⅱ.2-9を参照。



図Ⅲ.1-3 サンゴの目視観察（生残状況の確認）

③ サンゴの面積算出

画像解析ソフト（Adobe Photoshop 等）を用いて、撮影画像からサンゴと定尺物のピクセル数を比較して、サンゴの面積を算定する。

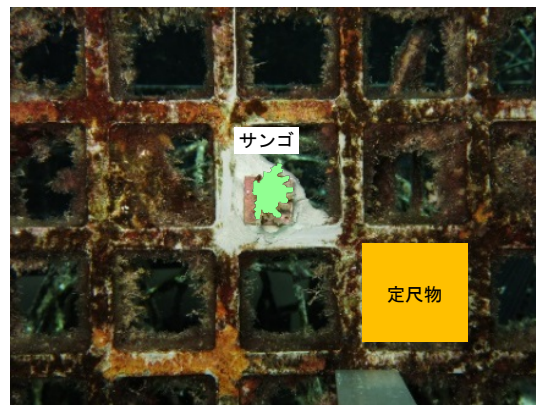
デジタル画像は、色情報（色調や階調）を持つ小さな点の集合体である。この点を「ピクセル（＝画素）」と言い、画像解析ソフトを用いてピクセルの数（画面上でのサイズ）を計測できる。サンゴと定尺物のピクセル数が判明すれば、定尺物の面積が既知であるため、比率計算によりサンゴの面積を算定できる。

画像解析によるサンゴ面積の算定手順を以下に示す。

【算定手順】

1. 画像解析用のソフトを起動して写真を開く。
2. サンゴと定尺物を縁取りし、それぞれの縁取った範囲内のピクセル数を計測する（計測方法はソフトに準拠）。
3. 比率計算より導かれる下記の計算式により、サンゴ面積を算定する。

$$\text{サンゴ面積} = \text{サンゴピクセル数} / \text{定尺物ピクセル数} \times \text{定尺物面積}$$



図Ⅲ.1-4 サンゴの画像解析イメージ

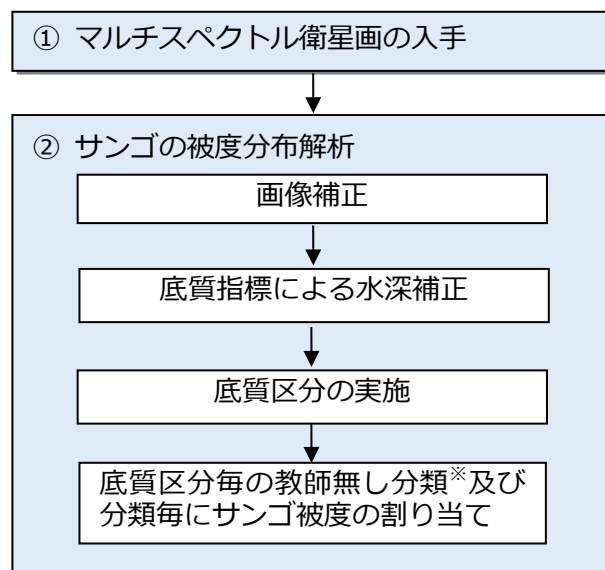
2. 【技術ノート2】衛星画像によるサンゴ被度分布解析手法

サンゴの成長や被度を把握する上では、従来のダイバーによる潜水調査や ROV 調査が一般的な方法であるが、数 km～数十 km 規模のサンゴ礁のサンゴ分布を広域に把握する場合、ダイバーによる潜水調査では多大な労力と時間を必要とすることから、広域的なサンゴの被度や分布などのモニタリングを効率的に行える調査手法の確立が求められている。

ここでは、「衛星画像によるサンゴ被度分布解析」に関する調査結果を総括し、本技術の実調査への活用の考え方について検討・整理する。

1) 衛星画像解析手順

衛星画像解析の手順は図Ⅲ. 2-1 に示すとおりであり、「①マルチスペクトル衛星画像等の入手」、「②サンゴ被度分布解析」の2つの工程に区分される。「①マルチスペクトル衛星画像等の入手」では、解析対象となる撮影時期や解析に耐えうる画質を確認したうえで画像を入手する。「②サンゴ被度分布解析」では、撮影画像毎に水蒸気や天気に応じた色調の影響等の補正や画像の歪みを補正する画像補正を行った上で、画像解析によりサンゴ被度解析を行う。各工程の詳細は以下に示すとおりである。



図Ⅲ. 2-1 衛星画像解析の手順

※ 教師無し分類とは、教師データ（画像と区分したい分類を紐付けるデータ）を用いずに、画像毎の持つ特徴の類似した集団毎に分類する手法。

(1) マルチスペクトル衛星画像の入手

解析を行いたい対象箇所、時期の衛星画像を入手する必要がある。1 時期の画像のみを対象とする場合は、現地調査による検証データと同時期の画像を選択する。複数時期の画像を対象とする場合は、その内 1 時期は、現地の検証データと同時期の画像を含むよう選択する。画像解析の対象となる代表的な衛星を表Ⅲ. 2-1 に示す。ノル等の微細な構造の把握に耐える精度として解像度 1m より高精度のものが望ましく、大まかな分布解析であれば解像度 10m 程度でも利用可能である。なお、同様の画像解析は、航空写真でも可能であり、衛星画像に比べて航空写真は解像度が高い場合が多い。国土地理院やその他機関が保有する航空写真を入手するか、新たに航空写真撮影を行って画像を入手することにより、高精度の画像解析を行うことが可能となる。

衛星画像の選択・購入時の留意点は以下に示すとおりである。

表Ⅲ. 2-1 画像解析の対象となる代表的な衛星

衛星種類	パンシャープンオルソ画像※2（4 バンド）の解像度と価格の例	
	解像度の例	価格※4
IKONOS	0.8m ※3	4,500 円
GeoEye-1	0.5m ※3	6,000 円
WorldView-2、WorldView-3、WorldView-4	0.5m ※3	6,000 円
Pleiades	0.5m	2,400 円

【衛星画像の選択・購入時の留意事項】

- 対象範囲全域が解析できるよう、雲の影響が少ない画像を選択する。
- 波浪の影響がある場合、ハレーションや白波により解析ができない箇所が発生しやすいため、波の影響の小さい画像を選択する。
- 衛星画像によるサンゴ画像解析が可能な水深帯は、海底面が透過して撮影されている範囲である。よって、現地の透明度等を勘案し画像解析の可否を判断する必要がある。なお、今回実施した沖ノ鳥島では、水深 0～5m の水深帯を解析している。
- 衛星の種類が異なっても解析は可能であるため、複数年の画像解析を行う場合は、上記 2 項目に留意した衛星画像を選択する。

※1 マルチスペクトル衛星画像とは、複数の波長帯（バンド）の情報を有した衛星画像。例えば IKONOS は青、緑、赤、近赤外の 4 バンドを有している。

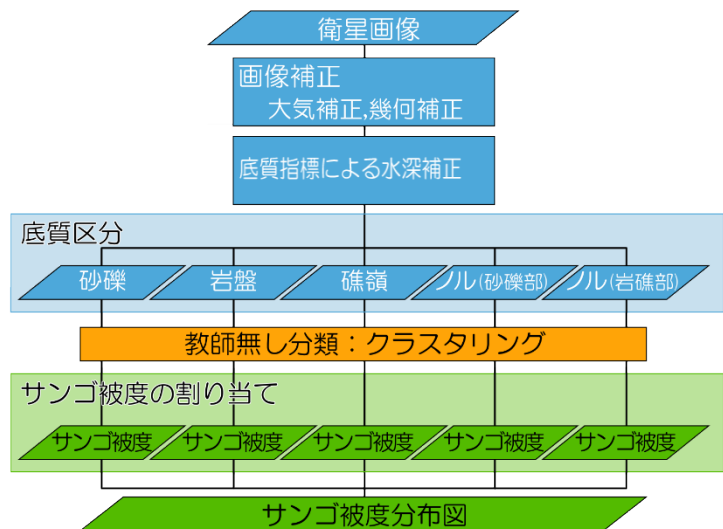
※2 マルチスペクトル画像よりも分解能が高いパンクロマチック画像と、マルチスペクトル画像を合成し、オルソ化した画像。

※3 各衛星の代表的な解像度であり、他の解像度データもある。

※4 衛星画像データ最小購入面積は 25k m² であるが、それを 1km² に割り戻したアーカイブ画像の価格（2017 年 12 月 7 日時点）。

(2) サンゴの被度分布解析

サンゴ被度分布解析は、画像補正、底質指標による水深補正を行った上で、画像解析によりサンゴ被度解析を行う。これらの工程には一般的に、ERDAS IMAGINE、ArcGIS、SIS 等のソフトウェアが用いられており、本調査では、ERDAS IMAGINE を利用している。



図Ⅲ. 2-2 サンゴ被度分布解析の手順

①画像補正

衛星画像は、水蒸気による影響を軽減するための「大気補正」と、画像の歪みやズレを補正する「幾何補正」を行う。

大気補正は、暗画素法と呼ばれる、画像から大気上層で反射した光を除去する方法を用いて補正する。次に、幾何補正は、画像の空間位置の誤差を除き、基準点（経年変化の少ない構造物等）を用いて正確な地理座標を与える。

【画像補正時の留意事項】

- 幾何補正に地上基準点（GCP：Ground Control Point）を用いる場合は、GCP を対象範囲内で偏りなく分布させる。

②底質指標（Bottom Index）による水深補正

海などの水域を観測した衛星画像データには水深の影響が含まれている。この水深の影響を除去する方法として底質指標（Lyzenga 1978）を用いる。この底質指標は、「同じ底質であれば異なる 2 バンドの底質反射率比は一定になる」という理論（ルイ ソチエーほか 2008）にもとづいており、衛星画像データに含まれるデジタル値（DN）を用いて下式で表される。

$$BI_{ij} = LN(DN_i - DN_{si}) - k_{ij}LN(DN_j - DN_{sj})$$

BI_{ij} : バンド i, j から求まる底質指標、 DN_i 、 DN_j : バンド i, j の DN 値、

DN_{si} 、 DN_{sj} : バンド i, j での水深が深いと思われる箇所の DN 値、 k_{ij} : 水中消散係数比

水中消散係数比は、底質が同じと思われる画素の DN 値の自然対数を算出し、バンド間の回帰直線を求め、その傾きから求まる（池間ほか 2003）。この消散係数比を用いることで 2 バンド間の反射率比に対して水深の影響を補正した底質指標が導出される。なお、浅い海域を中心に分類を行う場合、底質指標を用いない方が良い場合もある。

③底質区分の実施

作成した底質指標画像と衛星画像を重ね合わせ、底質区分毎に画像を分類する。

沖ノ鳥島では、沖ノ鳥島礁内の画像を、砂礫、岩盤、礁嶺、ノル（砂礫部）、ノル（岩盤部）の5区分に分類している。

【底質区分時の留意事項】

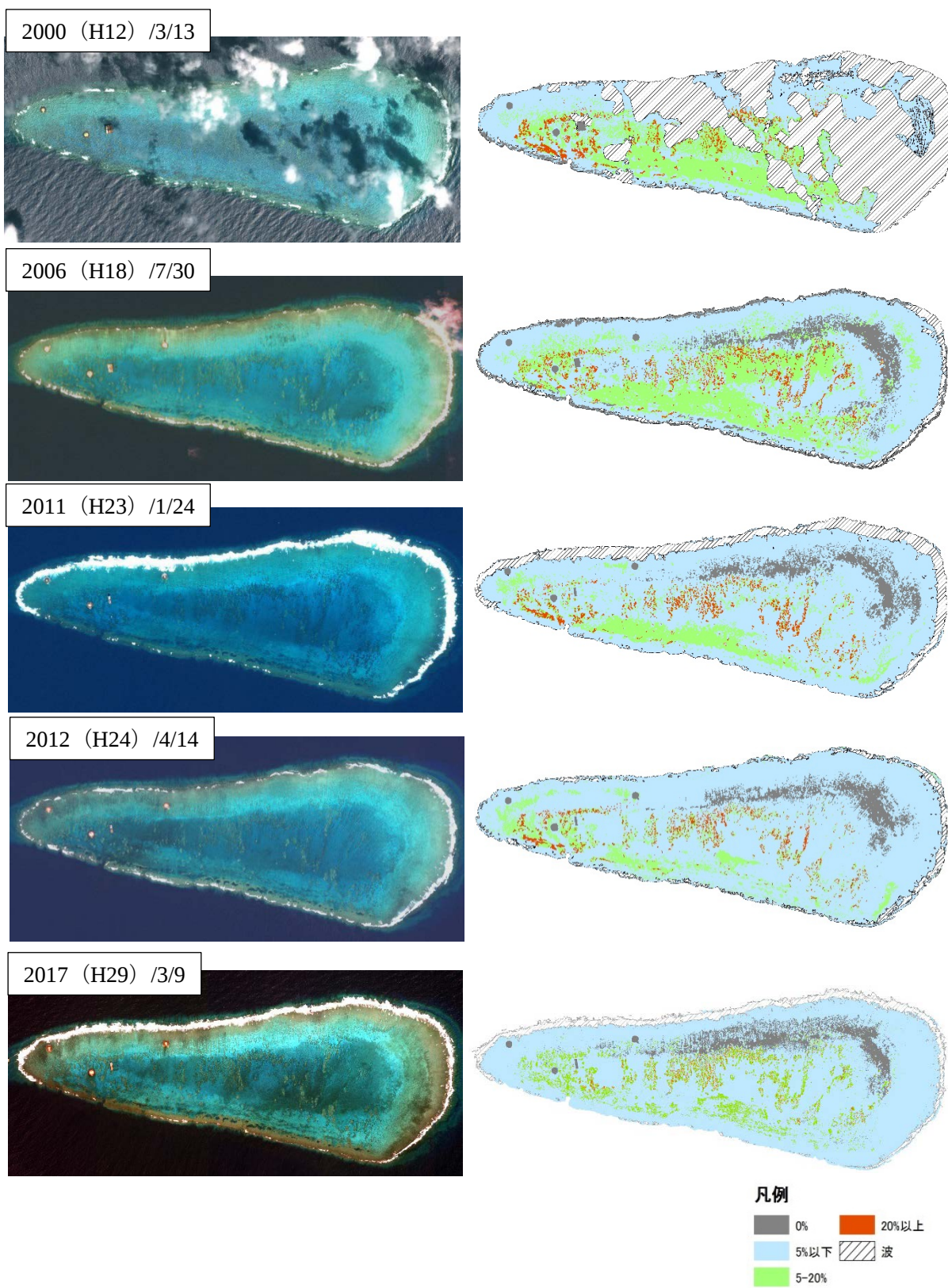
- ・ 現地調査等による底質調査結果が存在する場合には、底質区分時に底質調査結果をさらに重ね合わせるにより、より高精度の底質区分を行うことが可能となるため、事前に底質の分布状況を把握しておくことが望ましい。
- ・ 底質指標の算出は、Lyzenga(1978)に基づき算出する。この手法は、異なる2バンド※を用いるため、算出の際に分類に適したバンドを選定することが重要である。本事例では、一般に用いられる青バンドと緑バンドを利用した。
- ・ 底質指標を算出するためのサンプルポイントは、同じ底質から適切に抽出する。

※バンドとは、画像の波長帯を意味し、赤、青、緑等の波長分割等が代表的である。

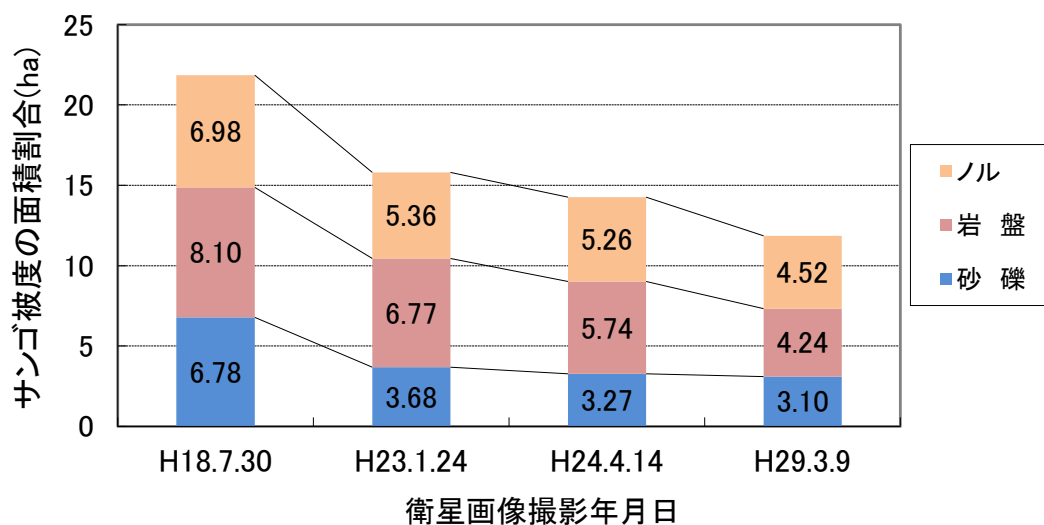
④底質区分毎の教師無し分類及び分類毎のサンゴ被度割り当て

底質区分毎に分類した画像に対して、教師なし分類（クラスタリング）と呼ばれる、画像の一定の特徴をもとに自動分類を行う。分類後の各クラスに対して、現地確認したサンゴの被度調査結果をもとに、サンゴ被度を付与してサンゴ被度分布図を作成する。

なお、沖ノ鳥島では、現地確認したサンゴ被度調査結果を有する2006年の画像にサンゴ被度を付与してサンゴ被度分布図を作成している。2000年、2011年、2012年並びに2017年の衛星画像にも、人工物を基準に明るさの補正を行った上で2006年のサンゴ被度を参考に、教師無し分類により被度を付与している。このようにして作成したサンゴ被度分布図を図Ⅲ.2-3に示す。本解析により経年的なサンゴ被度の変遷を把握することも可能である（Ⅲ.2-4参照）（片山ほか 2014）。



図Ⅲ.2-3 サンゴ被度解析結果（沖ノ島島の事例）

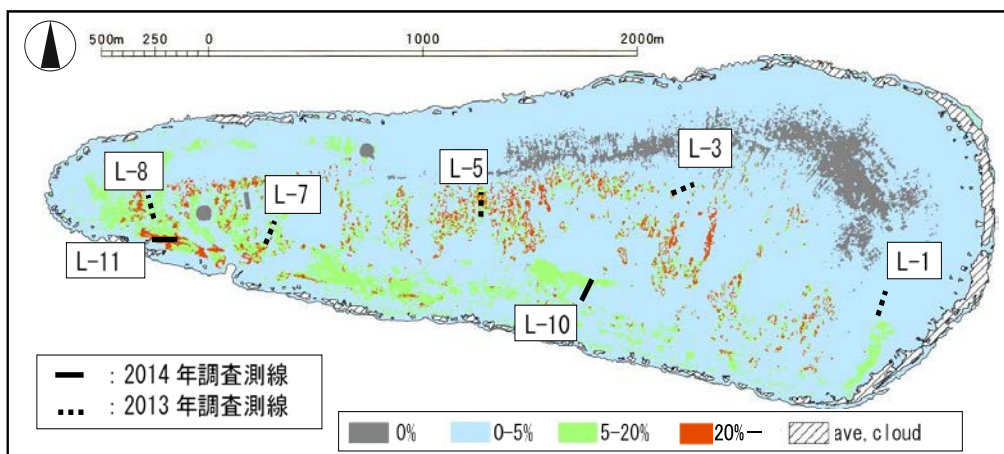


図Ⅲ. 2-4 沖ノ鳥島における底質区分毎のサンゴ面積の推移

2) 衛星画像解析の精度

衛星画像解析の精度検証は、2012 年の衛星画像を解析した結果と 2013 年～2014 年の現地調査結果を用いて実施した。精度検証のための現地調査は、図Ⅲ. 2-5 に示す沖ノ鳥島の 7 測線について、サンゴ被度の測線調査を行った。画像分類の精度検証結果を図Ⅲ. 2-6、図Ⅲ. 2-7、図Ⅲ. 2-8 並びに表Ⅲ. 2-2 に示す。

現地検証データに対する、衛星画像によるサンゴ被度解析結果の精度は、RMSE（平均二乗誤差）による評価で約±3%の精度であり、全体精度は 80%、Kappa 係数は 0.7（高度の一致）を得た。ただし、図Ⅲ. 2-7 の例に示すように、現地調査で 5%被度の地点に対し 2.5～12.5%と自動分類し、最大 7.5 ポイントの誤差が生じることもあるため結果の使用には留意が必要である。

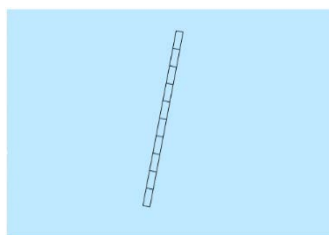


図Ⅲ. 2-5 精度検証に用いた現地調査測線位置図

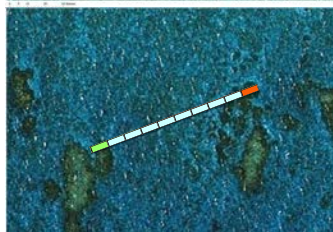
現地調査結果（衛星画像上に表示）

画像解析結果（現地測線を表示）

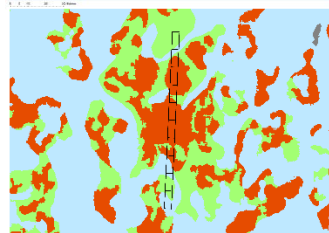
L-1



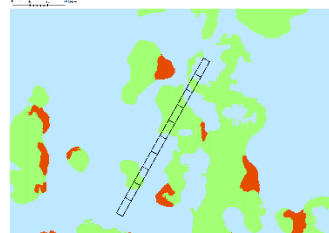
L-3



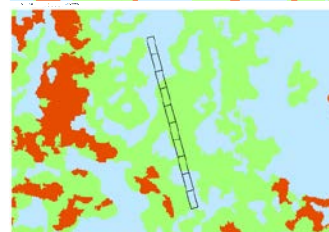
L-5



L-7



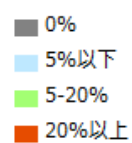
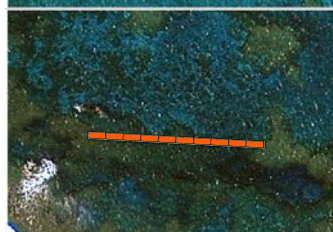
L-8



L-10



L-11



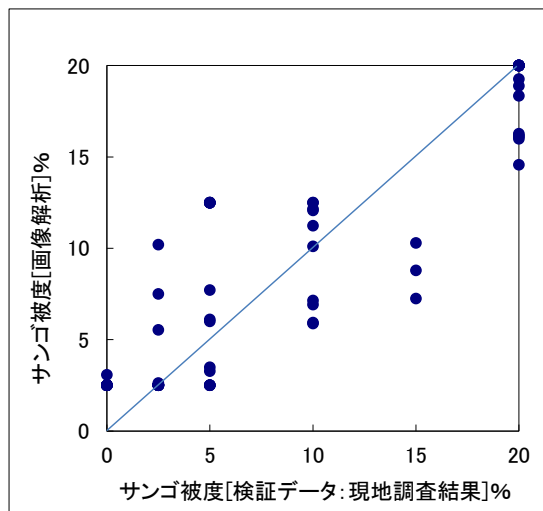
図Ⅲ. 2-6 被度調査結果と衛星画像解析結果との比較
(現地調査：2013, 2014年、衛星画像：2012年)

◆RMSE（平均二乗誤差）による解析誤差の確認

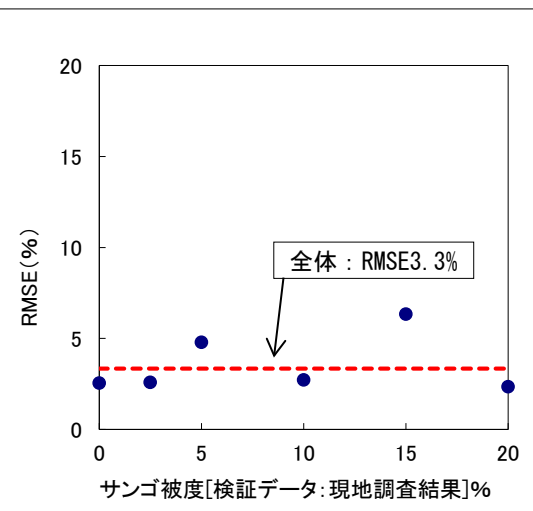
RMSE（Root Mean Squared Error：平均二乗誤差）とは、衛星画像解析の被度が正解（現地調査）被度とどの程度乖離しているかを示す精度評価指標であり、以下の式で表される。

RMSE（平均二乗誤差）の算出式：

$$RMSE = \sqrt{(\sum (\text{画像解析値} - \text{検証値})^2 \div \text{個数})}$$



図Ⅲ. 2-7 サンゴ被度の検証データと画像解析結果の比較（衛星画像 2012 年、現地調査 2013・2014 年）



図Ⅲ. 2-8 画像解析結果の誤差（RMSE）（衛星画像 2012 年、現地調査 2013・2014 年）

- ※1 画像解析によるサンゴ被度は、観察範囲 4m×10m 内の全画素（40 画素）がもつ被度情報の集計値（平均）を示す。
- ※2 現地調査及び画像解析によるサンゴ被度は、変化幅のある範囲のデータとして求めている。そのため、解析誤差の算出にあたっては、被度を下記のように整数値化した上で、比較・誤差算出を行った。
被度 1%未満⇒0%、1～5%未満⇒2.5%、5～20%⇒12.5%、20%以上⇒20%

◆分類精度検定（Kappa 係数、全体精度）

分類精度検定とは、画像解析結果の確からしさに関する検定方法である。ここでは全体精度及び Kappa 係数という、リモートセンシング分野における一般的な精度検定手法を用いた。

Kappa 係数：1～-1 の値をとり、1 に近いほど予測結果が良いとされ、0 以下は偶然の一致とされる。Landis and Koch(1977)の基準によれば、0.41～0.60 は中程度の一致、0.61～0.80 は高度の一致、0.81～1 はほぼ完全な一致とされる。

全体精度：対象地の被度の中で、正しく衛星画像分類された割合を表す比。（正しい分類面積/総面積）

表Ⅲ. 2-2 分類精度検定結果（衛星画像：2012年、現地調査2013・2014年）

全体精度	Kappa 係数
80%	0.7（高度の一致）

3) 衛星画像解析の適用条件

衛星画像からのサンゴ被度分類について、サンゴの被度を概ね 80%の精度で自動分類できることが判明した。

また、以下の表Ⅲ. 2-4 に示すように、ダイバーにより観察する目視調査と、衛星画像による画像分類では、観察対象面積が 0.5km² 程度を上回ると衛星画像分類のコストがダイバーによる目視調査より安くなり、面積が大きくなるほど差が顕著になる。

ここでは、実海域で行われているサンゴ調査において、当該手法の特徴や精度を踏まえ、有効に活用できる適用条件を以下のとおり整理した。

表Ⅲ. 2-3 衛星画像サンゴ被度分布解析と潜水観察の摘要条件の比較

	衛星画像サンゴ被度分布解析	潜水観測
調査範囲	数 km～数十 km 規模	数百 m 規模
観察項目	サンゴ被度	サンゴ被度、種
観察時期	1 時期で現地と衛星画像の検証ができれば、その他の時期は、現地データが無くとも分類可能	観察した時期のみ

【衛星画像によるサンゴ分布解析を適用できる調査内容】

- ・ サンゴの増減傾向の把握（サンゴ被度、面積の大まかな推移など）
- ・ サンゴ分布の状況や変化の把握など

【対象とする調査海域、調査規模】

- ・ 数 km～数十 km 四方規模の広範囲を対象に、概略的なサンゴ被度を把握したい場合に有効である。また、サンゴ被度の変遷を把握したい場合、画像分類が可能な衛星画像が入手できれば、過去に遡って把握が可能である。

【留意事項】

- ・ 衛星画像の選択・入手に際しては、気象・海象条件（雲、ハレーション、白波の有無等）に留意する必要がある。
- ・ 衛星画像の幾何補正に地上基準点（GCP）を用いる場合は、GCPを対象範囲内で偏りなく分布させる必要がある。
- ・ 底質区分に際しては、現地調査結果を重ね合わせることでより精度を向上させることが出来るため、事前に底質の分布状況を把握しておくことが望ましい。
- ・ 底質指標の算出は、Lyzenga (1978) に基づき算出するが、異なる2バンドを用いるため、算出の際に分類に適したバンドを選定することが重要である（本事例では青バンドと緑バンドを利用）。
- ・ 底質指標を算出するためのサンプルポイントは、同じ底質から適切に抽出する。
- ・ 衛星画像による画像分類では、サンゴ被度の分類精度は80%程度であるため、利用に際しては誤差を含むことに留意する必要がある。また、種構成の分類は困難なため、種構成の把握に際しては、潜水目視調査を併せて実施する必要がある。

表Ⅲ. 2-4 調査面積の違いによる衛星画像サンゴ被度分布解析と潜水観察のコスト試算

		調査面積	(km ²)	0.1	0.5	1	10	100
		長さ例		0.5×0.2km	0.5×1km	1×1km	2.5×4km	10×10km
ダイバー 目視分類	現地調査	測線距離	(km)	0.5	2	3	24	210
		現地調査時間	(日)	2.2	8.7	13.0	104.3	913.0
		船舶	(日)	3	9	14	105	914
		費用	(円)	455,000	1,625,000	2,470,000	19,305,000	168,610,000
	結果整理	作業時間	(日)	1	4	6	48	420
		費用	(円)	30,300	121,200	181,800	1,454,400	12,726,000
	現地及び整理合計費用		(円)	485,300	1,746,200	2,651,800	20,759,400	181,336,000
衛星画像 サンゴ被 度分類	現地調査	現地調査時間	(km)	0.5	1	1	2	5
			(日)	2.2	4.3	4.3	8.7	21.7
		船舶	(日)	3	5	5	9	22
		費用	(円)	455,000	845,000	845,000	1,625,000	4,030,000
	結果整理	作業時間	(日)	1	2	2	4	10
		費用	(円)	30,300	60,600	60,600	121,200	303,000
	画像購入	費用	(円)	87,500	87,500	87,500	87,500	350,000
		作業時間	(日)	4	4.5	6	8	15
	補正・解析	PC稼働時間	(日)	4	5	6	8	15
		費用	(円)	126,400	142,200	189,600	252,800	474,000
	現地及び整理合計費用		(円)	699,200	1,135,300	1,182,700	2,086,500	5,157,000

※1: ダイバー目視分類の現地調査時間は、標準観察延長が230m(作業時間:6時間) 漁港漁場関係工事積算基準下巻第2部第2編 藻場調査 参照

※2: 現地調査の費用は、作業員3名(ダイバー2名、船上作業員1名)を想定し、ダイバー46,400円/日 国土交通省単価(潜水深度10m未満)、船上作業員26,800円/日 公共労務単価(東京都)、船舶65,000/日を用いる。船舶は調査船(借上)(FRP D 70PS型 3.0t 51kW)、重油A単価は52.5円/ℓ 積算資料2017年8月号(東京都)、船員は、公共労務単価(東京都)を想定(千円以下切捨)して用いる。

※3: 結果整理の費用は、技術者単価の技師Cを想定し、30,000円/日 平成29年度設計業務技術者単価、標準PCの損料300円/日を用いる。

※4: 衛星画像サンゴ被度分類の現地調査は、教師データと検証データの取得を目的として、1測線×100mとして総延長距離を記載。

※5: 衛星画像は、解像度0.5mの高分解能衛星画像1シーン(4バンド)あたりで試算。最小25km²の面積から購入可能であり87,500円、その後1km²増えるごとに3,500円増額。

※6: 分類の費用は、技術者単価の技師Cを想定し、30,000円/日 平成29年度設計業務技術者単価を用いる。またPC稼働時間にソフトの費用7,200円/日を用いる。

※7: ※6の分類に用いるソフトに関する費用は、日単価で計算しているが、購入時には数十万～数百万の初期費用が発生する。

※8: 上記費用は、現地までの移動費や宿泊費等は含まれていない。

※9: 上記費用は、直接費であり、諸経費等は含まれていない。