

IV-5. ICT 技術等を活用したサンゴの 被度計測技術の開発

目 次

IV-5	ICT 技術等を活用したサンゴの被度計測技術の開発	
1.	目的	IV-5-1-1
2.	技術開発手法	IV-5-2-1
2.1	検証項目	IV-5-2-1
2.2	調査位置	IV-5-2-2
2.3	調査解析、検討の流れ	IV-5-2-4
3.	調査・解析結果	IV-5-3-1
3.1	現地計測結果	IV-5-3-1
3.2	計測効率化の検証	IV-5-3-3
3.3	撮影画像の高精度化の検証	IV-5-3-4
3.4	サンゴ被度分類結果	IV-5-3-5
3.5	分類作業の効率化の検証	IV-5-3-27
3.6	考察	IV-5-3-29
4.	結果のまとめと今後の課題	IV-5-4-1
5.	次年度の計画（案）	IV-5-5-1

IV-5 ICT 技術等を活用したサンゴの被度計測技術の開発

1 目的

広範囲のサンゴの分布を把握する手法として、船上水中カメラやリモコンボートを活用した効率的観測手法と、人工知能 (AI) を活用した効率的な解析手法の技術の開発を行う。

(1) サンゴ計測技術

令和 3 年度は実証海域（沖縄海域）及び沖ノ鳥島海域において、手振れ補正機能が向上したカメラを使用した高精度化の試行を行った。手振れ補正機能が向上したカメラを使用することで動画（60 フレーム/秒）の切り出し画像でもブレの少ない画像を取得でき、また、撮影時のカメラ設定を自動露出補正無しで撮影することで、“白飛び”が少なく、サンゴの色情報を捉えられる画像を取得できた。画像合成方法は、リモコンボートの測線方向に隣り合う画像同士をパノラマ写真のようにつなぎ合わせるモザイク処理による合成を行うことで、処理前の元の画像の視認性を維持し、効率的に合成画像を作成できた。

上記手法でのサンゴ計測を、実証海域（沖縄海域）では令和 2 年度から実施している。沖ノ鳥島海域では令和 3 年度から実施しており、質の高い教師データの取得、蓄積が課題となっている。

そこで、令和 4 年度は沖ノ鳥島海域において質の高い教師データを作成するため、継続して同じ撮影方法により画像を取得し、AI 学習モデルのサンゴ分類の高精度化の検証を行う。

(2) サンゴ分類技術

令和 3 年度は実証海域（沖縄）及び沖ノ鳥島海域において質の高い教師データを増やし解析を行った。過年度に比べて分類精度の向上はみられたが、事業計画目標とする分類精度 80%は一部を除いて未達成であり（図-IV.5.1.1）、AI 分類精度の低下要因を整理し、対応策を検討した。精度が向上しない AI が誤分類する要因は「モザイク処理した画像の色調は必ずしも一致するとは限らない」ことや「色見によって生死が違うサンゴの判別が難しい」ことなどが考えられた。

そこで、令和 4 年度は実証海域（沖縄）において令和 2 年度（2020 年）、令和 3 年度（2021 年）に撮影したモザイク画像を用いて誤分類への対応として画像の前処理（カラー調整等）や AI 学習モデルの改良（死サンゴのモデルの追加）を行い、サンゴ分類の高精度化、分類作業の効率化の検証を行う。

併せて、(1) で撮影した沖ノ鳥島海域の画像を使用して、教師データを作成し、学習データの蓄積を図る。

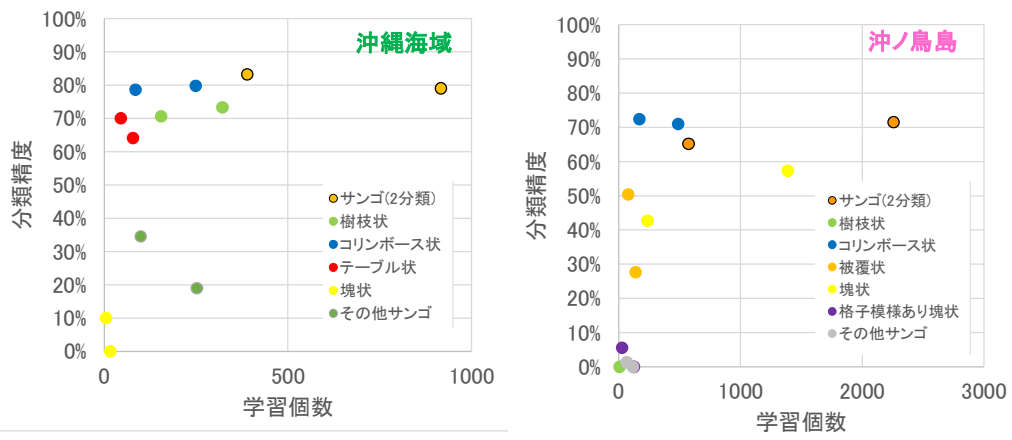


図-IV.5.1.1 昨年度のAI（深層学習モデル）分類結果

2 技術開発手法

2.1 検証項目

検証項目と手法を表-IV.5.2.1 に示す。

表-IV.5.2.1 検証項目と手法

項目		検証項目	検証手法
サンゴ計測技術 (沖ノ鳥島のみ)		<ul style="list-style-type: none"> リモコンボート取付水中カメラ撮影によるサンゴ被度計測 	<ul style="list-style-type: none"> 撮影画像の高精度化（ブレや白飛びを抑えた画像取得）の検証 ハリエダミドリイシやハマサンゴなど沖ノ鳥島でよくみられるサンゴが分布するエリアに測線を設定し、また計測方法の改善（重複のない測線の画像取得）し、正確な教師データ取得による AI 学習モデルのサンゴ分類の高精度化の検証 (昨年度までの実績において、10ha を 3.3 日で撮影でき、効率化の目標を達成している) 本年度も継続して撮影作業の効率を検証
サンゴ分類技術	沖縄海域	<ul style="list-style-type: none"> AI（深層学習）による分類 	<ul style="list-style-type: none"> モザイク画像のカラー調整や死サンゴの教師データ追加による AI 学習モデルの改良、個別分類するサンゴ種の絞り込みを行い、サンゴ分類の高精度化を検証 上記 AI 学習モデルの改良等を踏まえた、分類作業の効率化の検証
	沖ノ鳥島	<ul style="list-style-type: none"> AI（深層学習）による分類 	<ul style="list-style-type: none"> 今年度取得する画像からサンゴ種の教師データを作成し、学習データ蓄積による分類精度の高精度化を検証

2.2 調査位置

(1) 沖ノ鳥島

次年度以降にサンゴ幼生規模拡大技術の実証試験を行う礁内中央部の近くで、2017年の衛星画像解析の結果をもとに、サンゴの被度が高いエリアに測線(L-5-4)を設定し、撮影を実施した。調査対象位置図を図-IV.5.2.1に示す。

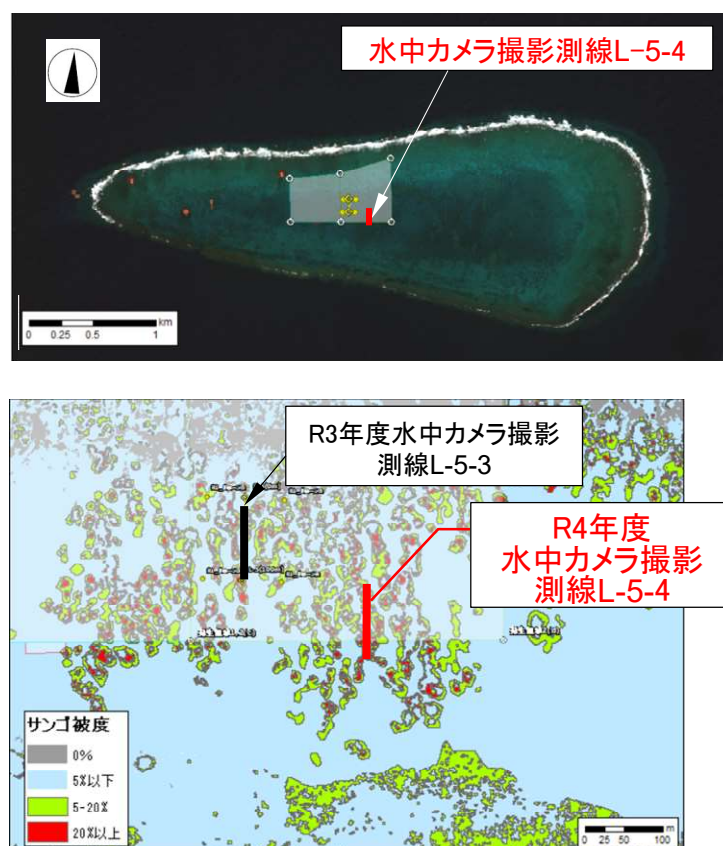


図-IV.5.2.1 R4年度調査対象位置図(沖ノ鳥島)

(2) 沖縄海域

浦底湾にて令和2年度(2020年)、令和3年度(2021年)に撮影した画像を使用して、サンゴ分類の高精度化、分類作業の効率化の検証を行った。調査対象位置図を図-IV.5.2.2に示す。

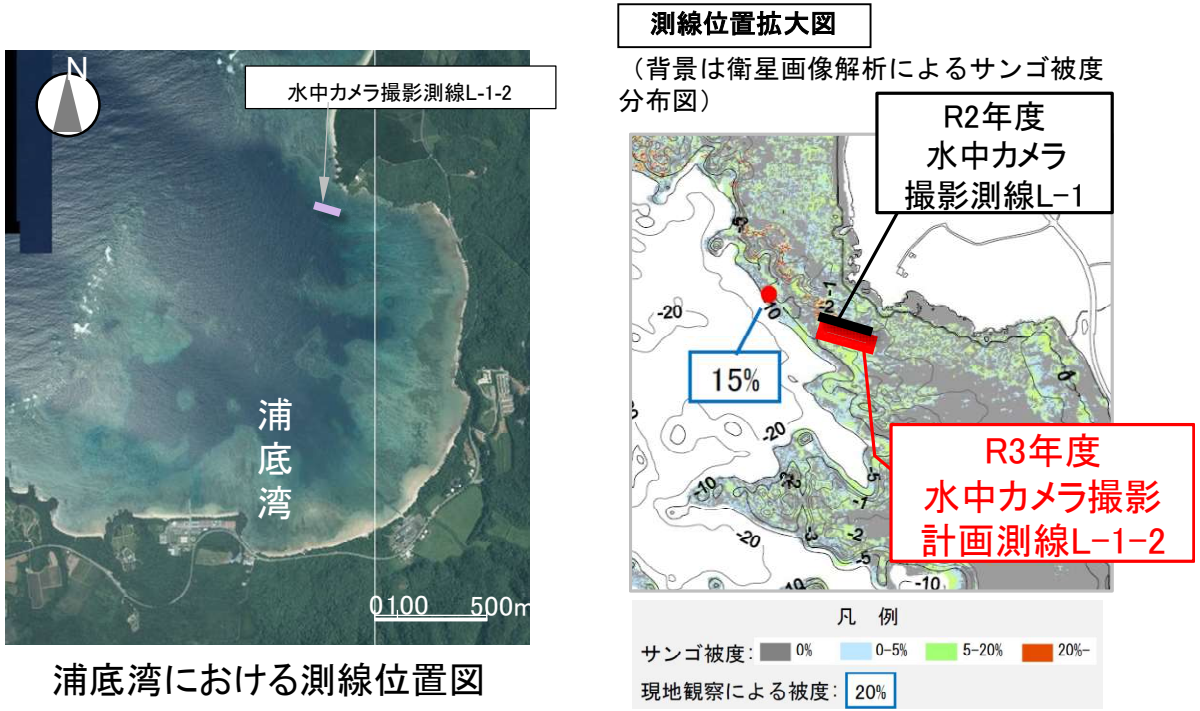


図-IV.5.2.2 調査対象位置図(沖縄海域:浦底湾)

2.3 調査解析、検討の流れ

令和4年度の調査解析、検討のフローを図-IV.5.2.3、5.2.4に示す。

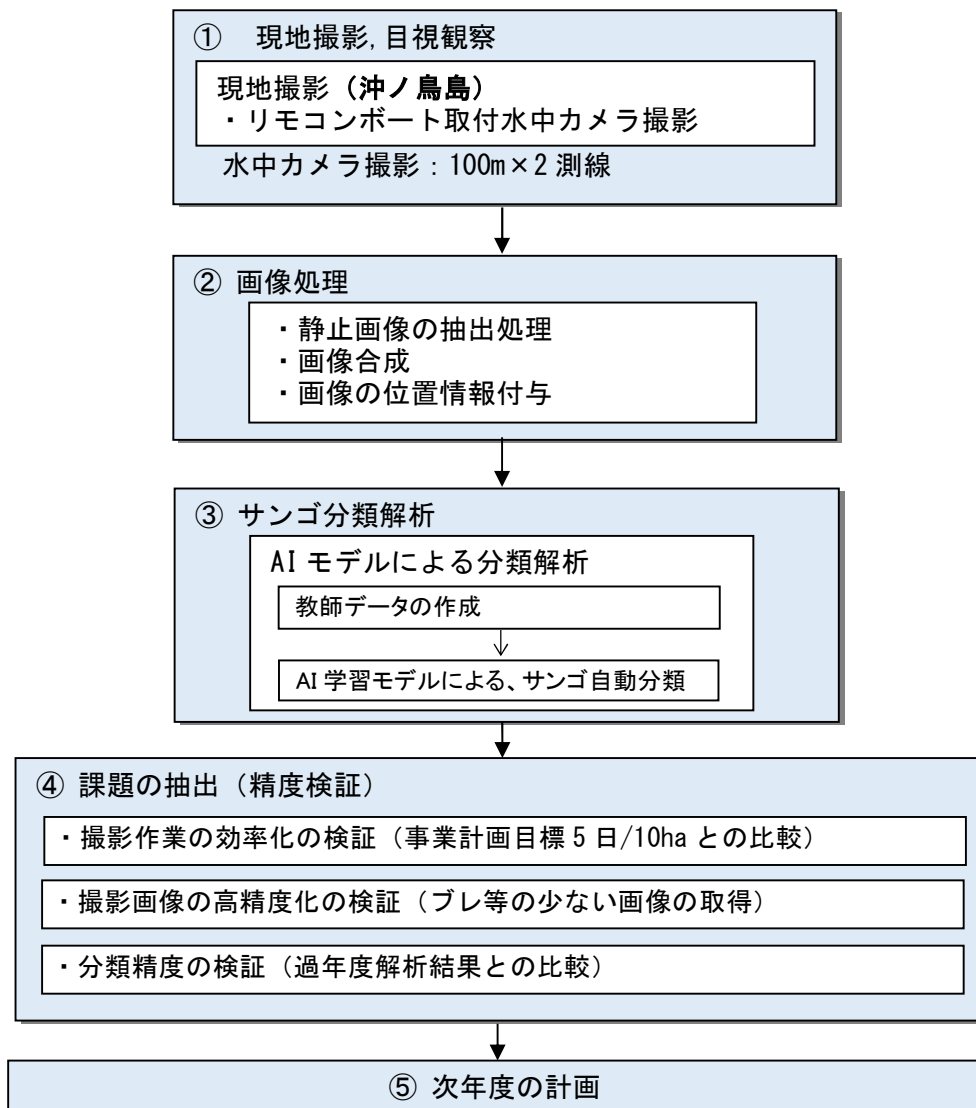


図-IV.5.2.3 サンゴ被度分類作業フロー (令和4年度: 沖ノ鳥島海域)

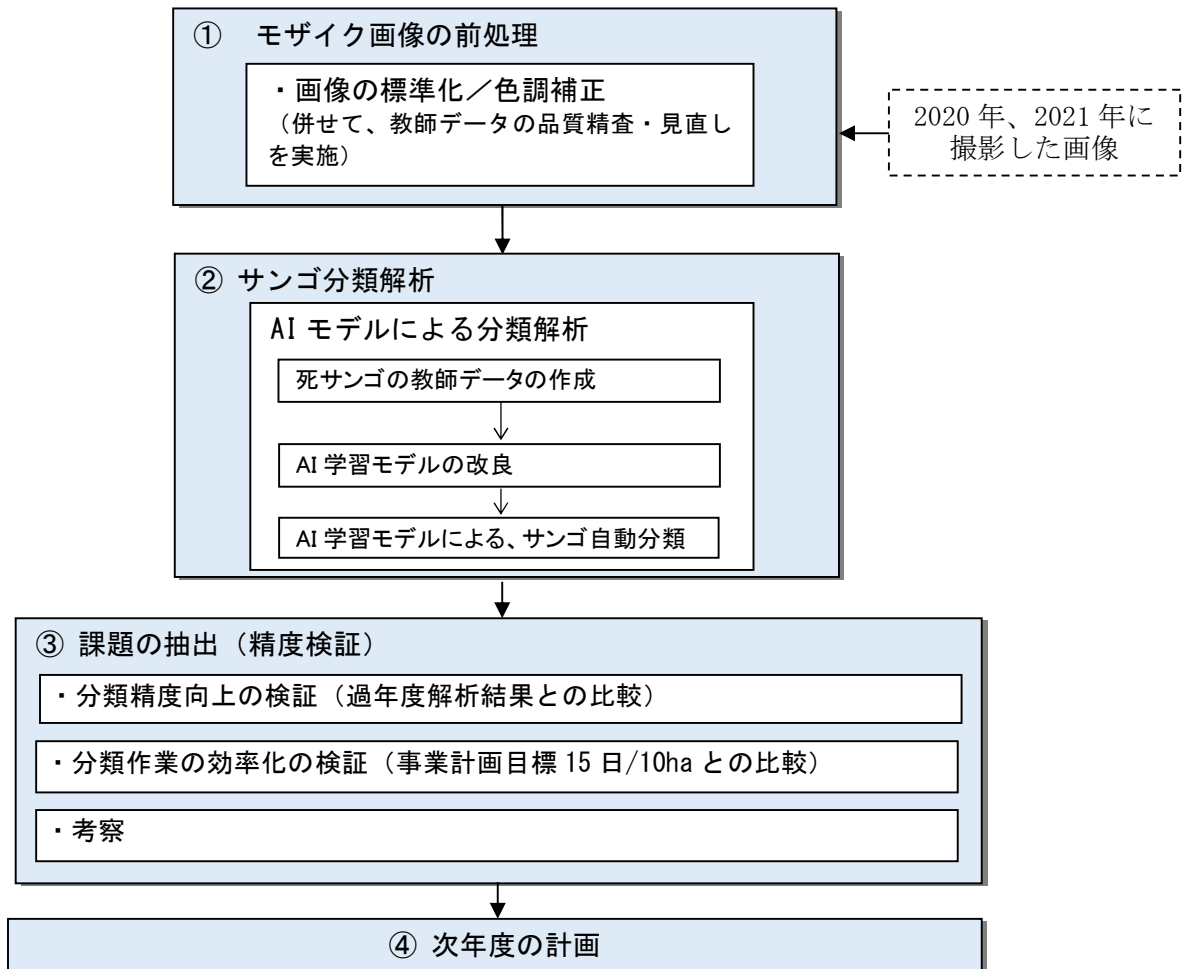


図-IV.5.2.4 サンゴ被度分類作業フロー（令和4年度：沖縄海域）

3. 調査・解析結果

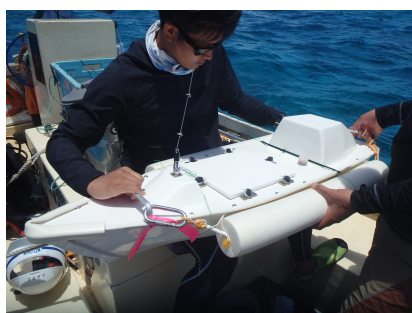
3.1 現地計測結果

沖ノ鳥島におけるリモコンボート取付水中カメラによる撮影は5月10日、12日に実施した。

調査で使用したボート、カメラ及び取得画像を図-IV.5.3.1に示す。

令和3年度からの撮影手法を継続し、ブレの少ないサンゴ画像を取得するため、高機能の撮影カメラによる撮影を行った。また、重複のない測線の画像を取得するため、100m区間を2測線で撮影した。

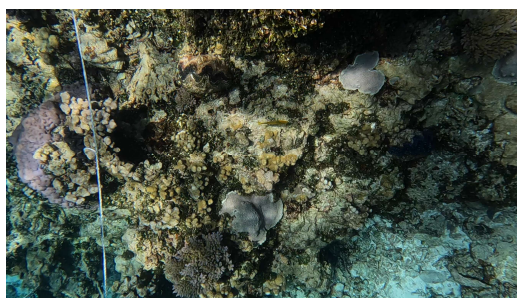
撮影に使用したカメラ機材の性能は表-IV.5.3.1に示すとおりである。



リモコンボート及びカメラ取付状況



リモコンボート撮影状況



リモコンボート撮影水中画像（沖ノ鳥島，5月12日）

図-IV.5.3.1 リモコンボート調査で使用したボート、カメラ、撮影状況及び取得画像（令和4年度）

表-IV.5.3.1 使用したカメラ機材の性能

	リモコンポート取付水中カメラ
機種名	GoPro, Inc. 製 GoPro HERO10
撮影区分	動画撮影 (60 枚/秒)
撮影画像	1920×1080

3.2 計測効率化の検証

今回実施したリモコンボート取付水中カメラによる撮影について、事業計画目標の5日/10haを達成できているかについて、現地の撮影時間から検討した。

検討した作業効率を以下の表-IV.5.3.2に示す。

リモコンボート取付水中撮影の作業効率は3.3日/10haとなり事業計画目標の5日/10haは達成できることを確認した。

なお、天候、気象条件が急変した場合は、船の航行を中止する必要があるため、遠隔地の沖ノ鳥島での撮影は余裕をもった撮影計画を立てる必要がある。

表-IV.5.3.2 サンゴ被度計測の効率化検討結果

撮影手法	対象海域(手法)	作業日数
水中カメラによる撮影 ※船の航行条件(波浪静穏で干潮時を除く/計測可能箇所は操縦者から800m以内)の撮影制約条件あり。	沖ノ鳥島 (リモコンボート取付水中撮影)	撮影面積: $2m \times 100m \times 2$ 測線 = 0.04ha(ラップなし) 0.04ha 撮影の所要時間: 0.1 時間 1ha 撮影の所要時間: 2.5 時間 1 時間当たりの撮影可能面積: 0.4ha 1 日(7.5h)当たりの撮影可能面積: 3ha (3ha 撮影に係る測線数: 測線長 100m の場合、約 150 測線) 10ha 撮影に必要な日数: 約 3.3 日間※ (※ラップなし撮影による。実質の作業効率は R2 年度と同じ)
参考値 潜水士による水中ビデオ撮影		撮影面積: $100m \times 100m = 1ha$ 1ha 撮影の所要時間: 13.8 時間 1 時間当たりの撮影可能面積: 0.07ha 1 日(7.5h)当たりの撮影可能面積: 0.53ha 10ha 撮影に必要な日数: 約 18 日間 ※有性生殖によるサンゴ増殖の手引き 技術ノート 3水中ビデオ画像によるサンゴ自動分類技術を参考に計算した。

3.3 撮影画像の高精度化の検証

今年度のリモコンボート撮影では、手振れ補正効果が向上したカメラ（GoPro, Inc. 製 GoPro HERO10）を使用した。手振れ補正効果が向上したカメラを使用することで、動画（60 フレーム/秒）の切り出し画像でもブレの少ない画像を取得できたことから、動画からの画像合成を行った。

画像合成の方法は、リモコンボートの測線方向に隣り合う画像同士をパノラマ写真のようにつなぎ合わせるモザイク処理による合成を行った。モザイク処理には市販の画像処理ソフト PhotoDirector（サイバーリンク社製）を使用した。

図-IV.5.3.2 にモザイク処理後の合成画像を示す。モザイク処理後も元の画像の視認性を維持した状態で合成ができた。

昨年度と同様に 3m 程度の間隔をあけて測線を設置し撮影を行うことで、水深が深い箇所でも重複しないモザイク画像を作成できた。

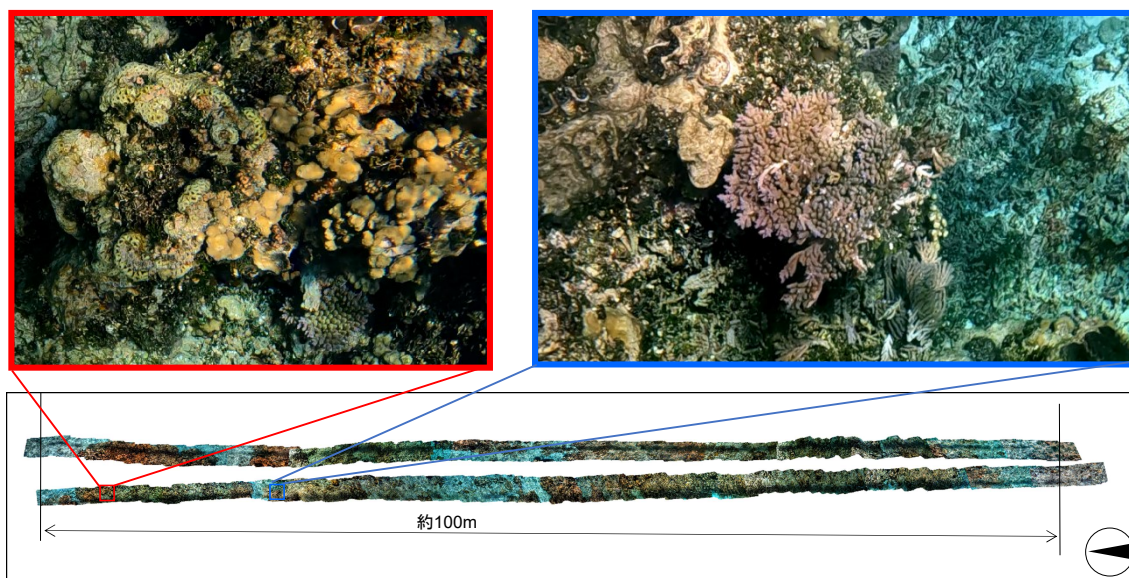


図-IV.5.3.2 リモコンボート撮影結果のモザイク画像
(沖ノ島島海域)

3.4 サンゴ被度分類結果

沖縄海域、沖ノ鳥島の中水カメラ撮影画像に対して、「AI モデルによる分類手法」によりサンゴ分類を実施した。

(1) 沖縄海域

1) AI モデル（深層学習）による分類手法

インスタンスセグメンテーション手法の一つ Mask R-CNN（物体検出と分類の一手法）により実施した。下図のように物体ごとに領域を抽出する。物体検出のアルゴリズムが基本になっているが、下図のように物体ごとの矩形（枠）・クラスに加えて、物体の領域も抽出する。

令和3年度の手法と同様に、サンゴ1種類ごとに学習するモデルを構築した。

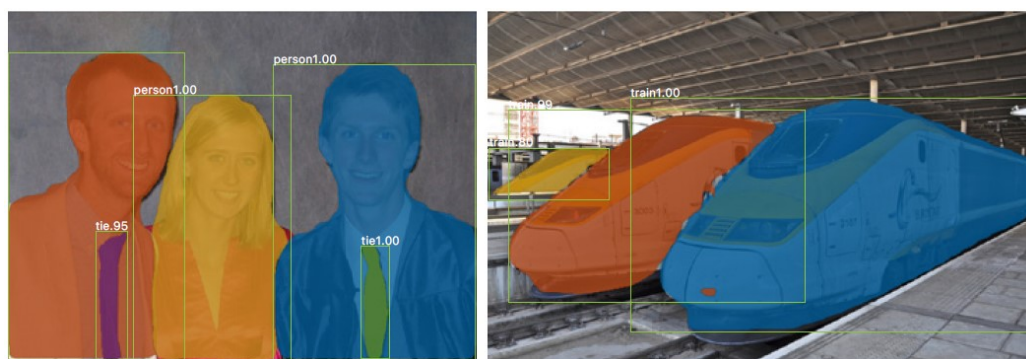


図-IV.5.3.3 インスタンスセグメンテーションの概要¹

[1] Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, Ross Girshick. Mask R-CNN.
<https://arxiv.org/abs/1703.06870>

[2] Zhaojin Huang et, al. Mask Scoring R-CNN

2) モザイク画像の前処理

1枚に結合する前のモザイク画像は、撮影時の光条件や映り込んだ対象物により、色調の違いが生じる。そのため、標準化（特徴量のスケールを揃える手法）により影響を緩和させたいので1枚に接合を行った。

標準化を行うことで、画像間での極端な色の差を抑えることができた。

調整の結果を図-IV.5.3.4に示す。

なお、画像の前処理の方法として、目視で調整する色調補正の手法も試行したが、AI解析の結果サンゴの輪郭を上手く抽出できなかった（3.6章参照）。

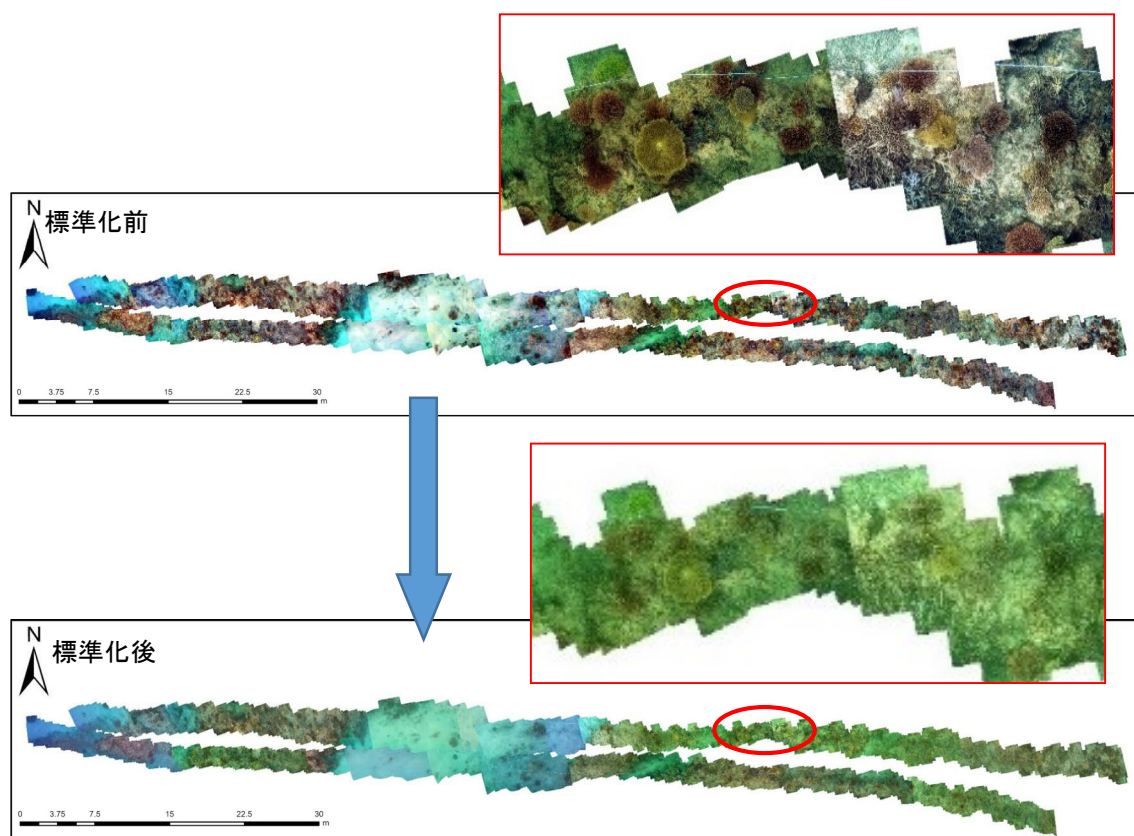


図-IV.5.3.4 標準化前後の画像

3) 死サンゴの教師データ作成

令和3年度のAI解析では、死サンゴを樹枝状サンゴと間違える結果がみられた。今年度は、同様の間違いを減少させるために、2020年、2021年撮影のモザイク画像を用いて藻の付着したサンゴを死サンゴとして教師データを作成し、それをモデルに組み込むことでAI学習モデルの改良を行った。

死サンゴの教師作成イメージを図-IV.5.3.5に示す。

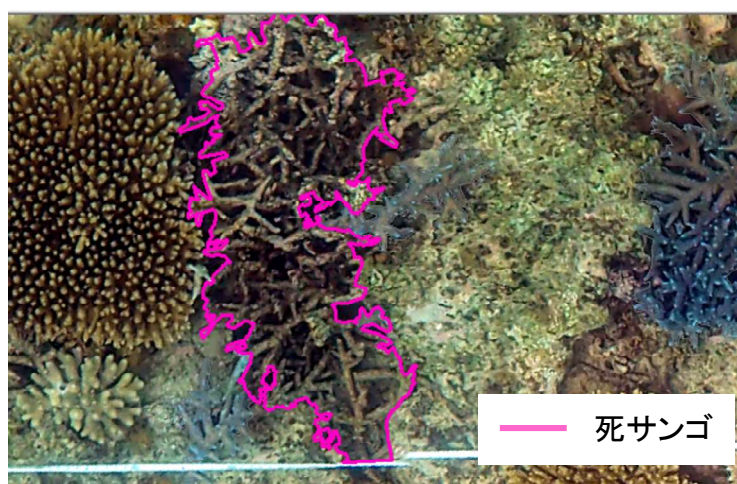


図-IV.5.3.5 死サンゴの教師作成イメージ

4) 教師・検証データの作成

教師データは、2020年、2021年に撮影・作成したモザイク画像から作成したものを使用し、画像の前処理と併せて、教師データの品質を精査し、一部見直しを行った。また、検証データは、2021年に撮影・作成したモザイク画像から作成し、同様に品質を精査し、一部見直しを行った。

沖縄海域のサンゴの教師データは、サンゴの形状の違いから以下の5分類とし、そのうち本海域での分布面積の大きな樹枝状、コリンボース状、テーブル状の3分類についてサンゴ種別のAI解析（個別分類）を実施した。

表-IV.5.3.3には教師データを作成したサンゴのイメージ写真を示す。

表-IV.5.3.3 (1) 沖縄海域におけるサンゴ分類

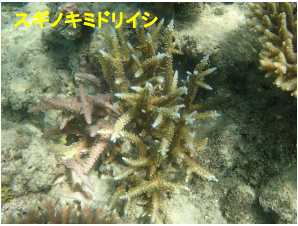





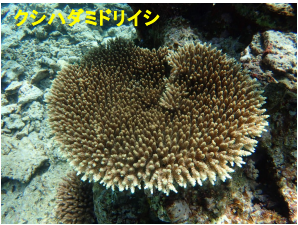

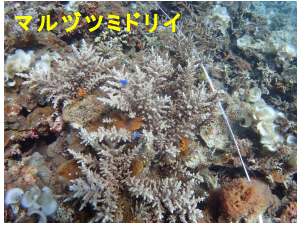
サンゴ分類	イメージ写真（2019年観察調査写真より）	
樹枝状 （スギノキミドリイシなど）		
コリンボース状 （ハナガサミドリイシ、コユビミドリイシなど）		
		
テーブル状 （クシハダミドリイシなど）		

表-IV.5.3.3 (2) 沖縄海域におけるサンゴ分類

サンゴ分類	イメージ写真 (2019年観察調査写真より)	
塊状 (ハマサンゴ属など)		
その他サンゴ	主なその他サンゴの一部	
		

本年度のサンゴ種別の AI 学習で使用した教師データ数は、以下のとおりである。

樹枝状 (スギノキミドリイシなど) : 387 個

コリンボース状 (ハナガサミドリイシ、コユビミドリイシなど) : 345 個

テーブル状 (クシハダミドリイシなど) : 106 個

死サンゴ : 35 個

AI 解析は下記の分類で解析を行った。

個別分類 : (サンゴ 3 分類+非サンゴ) :

樹枝状 (スギノキミドリイシなどなど)

コリンボース状 (ハナガサミドリイシ、コユビミドリイシなど)

テーブル状 (クシハダミドリイシなど)

非サンゴ

2 分類 : サンゴ、非サンゴ

5) 被度分類解析結果・分類精度のまとめ

1)～4)の作業を行ったAIモデルを用いて、検証エリアにおけるサンゴの2分類の解析結果を図-IV.5.3.6に、個別分類の解析結果を図-IV.5.3.7に示す。図には比較のため、過年度（令和3年度業務）の解析結果も併せて示す。

分類精度について、過年度と今年度を比較し整理した結果を表-IV.5.3.4に示す。

- ・2分類の分類精度は、今年度手法ではサンゴの分類精度は82%、非サンゴの分類精度は90%であり、過年度手法よりも精度が向上した。2分類では、事業計画目標の80%は達成した。
- ・個別分類の分類精度は、全てのサンゴ種で過年度より精度が向上し、コリンボース状サンゴで分類精度は85%、樹枝状サンゴで分類精度は79%であった。コリンボース状サンゴは事業計画目標の80%を達成し、樹枝状サンゴではおおむね達成した。

テーブル状のサンゴは樹枝状やコリンボース状より教師データが少ないことで目標の分類精度に達しなかったと推定される。

表-IV.5.3.4 分類精度の過年度比較

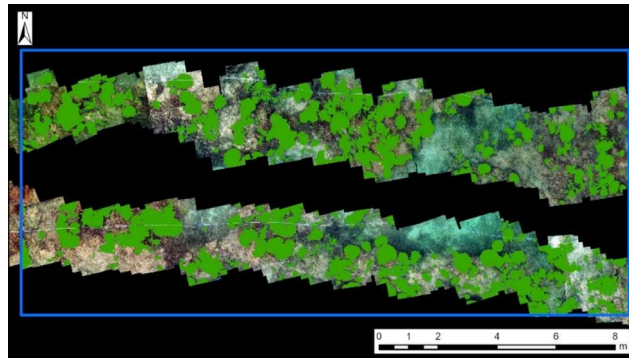
分類	プロデューサー精度	2020~2021年	
		過年度手法	今年度手法
個別分類	樹枝状 (スギノキミドリイシなど)	73%	79%
	コリンボース状 (ハガサミドリイシ、ユビミドリイシなど)	80%	85%
	テーブル状 (クシハダミドリイシなど)	64%	66%
	塊状 (ハマサンゴ属など)	0%	88%
	その他サンゴ	19%	
	非サンゴ	91%	
	全体精度	83%	85%
	kappa係数	0.68	0.71
2分類	サンゴ	79%	82%
	非サンゴ	88%	90%
	全体精度	85%	87%
	kappa係数	0.67	0.72

備考) 今年度手法の面積集計結果の詳細は表-IV.5.3.5～表-IV.5.3.6に示す。

全体精度:対象地の被度の中で、正しく画像分類された割合を表す比。(正しい分類面積/総面積)
 Kappa係数:1から-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 JR, Koch GG(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、0.81~1.00はほぼ完全な一致とされる。

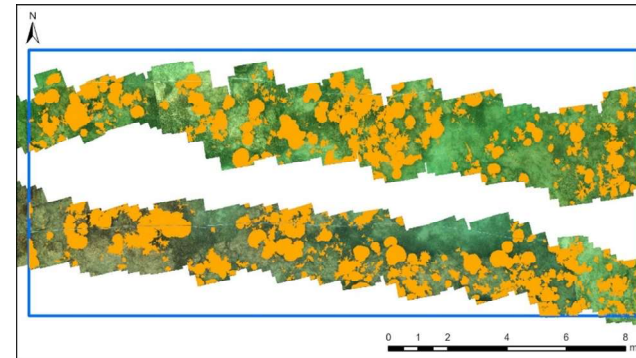
昨年度解析結果

正解
データ



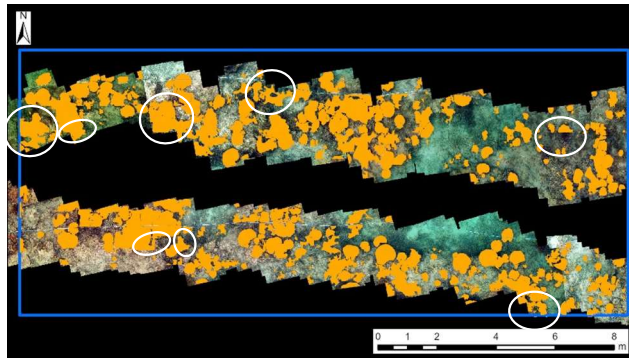
■ サング(検証)

今年度解析結果

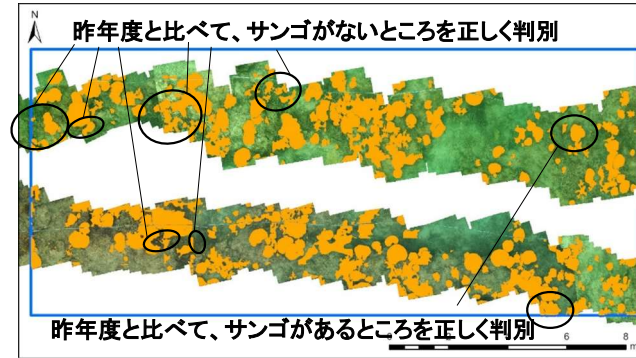


■ サング

AI分類
結果



■ サング(AI分類)



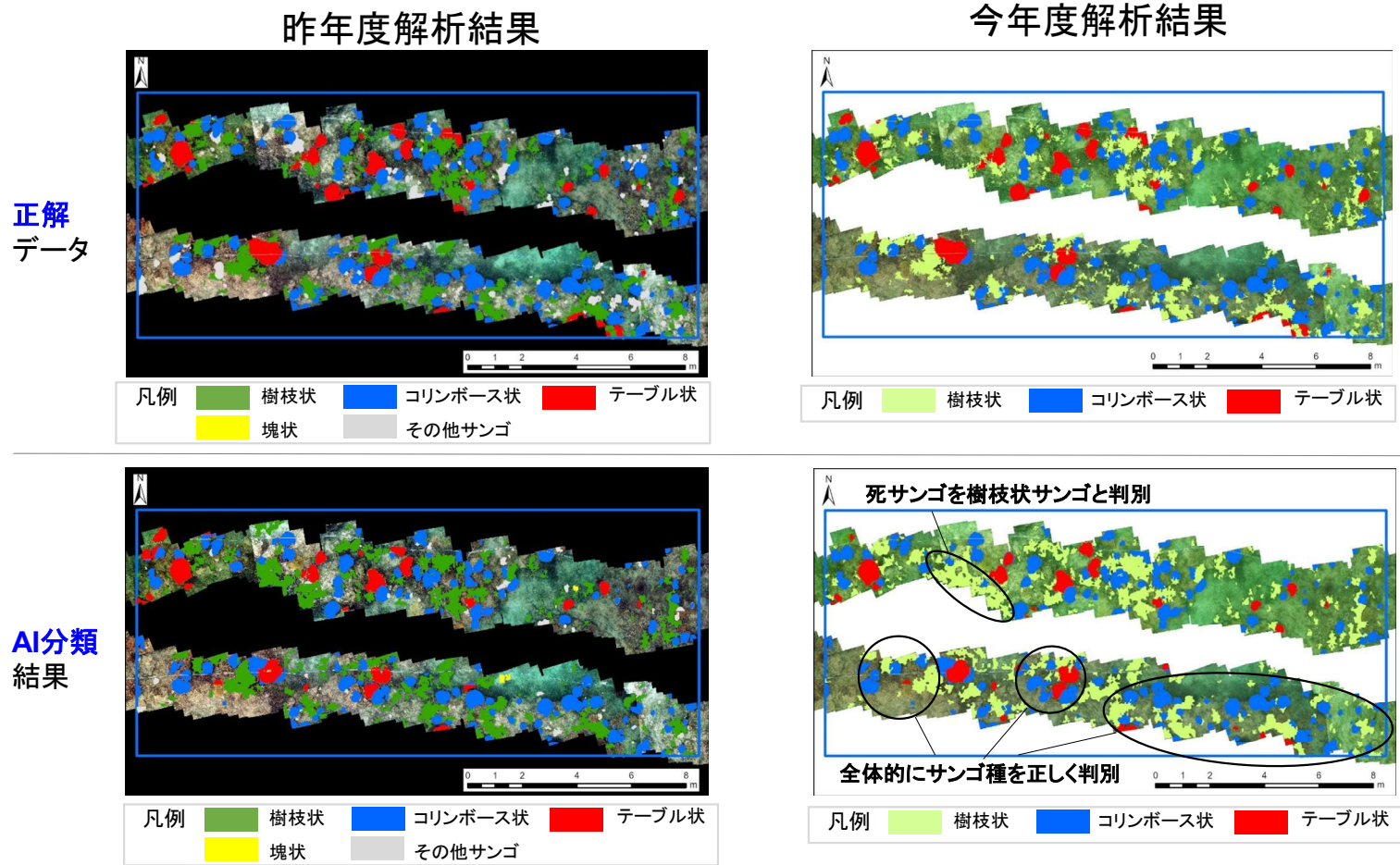
昨年度と比べて、サングがないところを正しく判別

昨年度と比べて、サングがあるところを正しく判別

■ サング

分類結果 昨年度と比べて非サングを正しく判別できたことにより、**分類精度80%以上を達成**

図-IV.5.3.6 水中カメラ撮影結果のモザイク画像に対するサング2分類解析結果〔沖縄海域の検証エリア、2020～2021年〕



分類結果 全体的にサンゴを概ね正しく判別できたことにより、コリンボース状サンゴは**事業計画目標の80%以上を達成**
 一部箇所で死サンゴが判別できていない箇所がみられ、死サンゴの教師データを増やすことで、更なる精度向上が期待できる。

図-IV.5.3.7 水中カメラ撮影結果のモザイク画像に対するサンゴ個別分類解析結果〔沖縄海域の検証エリア、2020～2021年〕

表-IV. 5. 3. 5 沖縄海域 2020-2021 年教師モデル : 5 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果				行方向総和	プロデューサ精度
		樹枝状	コリンボース状	テーブル状	塊状・その他・非サンゴ		
照合用クラス	樹枝状	10.08	0.06	0.02	2.60	12.77	79.0%
	コリンボース状	0.09	12.06	0.14	1.83	14.13	85.3%
	テーブル状	0.03	0.84	3.64	1.02	5.53	65.9%
	塊状・その他・非サンゴ	7.43	1.14	0.28	65.07	73.92	88.0%
列方向総和		17.63	14.10	4.08	70.52	106.35	
ユーザー精度		57.2%	85.5%	89.2%	92.3%		
						全体精度	85.4%
						kappa係数	0.71

表-IV. 5. 3. 6 沖縄海域 2020-2021 年教師モデル : 2 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	29.72	6.61	36.33	81.8%	
	非サンゴ	6.76	63.26	70.02	90.3%	
列方向総和		36.48	69.87	106.35		
ユーザー精度		81.5%	90.5%			
					全体精度	87.4%
					kappa係数	0.72

(2) 沖ノ鳥島

1) AI モデル（深層学習）による分類手法

沖縄海域と同じ Mask R-CNN（物体検出と分類の一手法）により実施した。また、令和3年度の手法と同様に、サンゴ1種類ごとに学習するモデルを構築した。

なお、今年度、沖ノ鳥島では昨年度までと同じ工程で AI 分類を実施しており、沖縄海域で実施した「画像の標準化」や「過年度に作成した教師データの見直し」、「死サンゴの追加」は実施していない。

2) 教師・検証データの作成

沖ノ鳥島のサンゴの教師データは、サンゴの形状の違いから以下の6分類とした。表-IV.5.3.7には教師データを作成したサンゴのイメージ写真を示す。

表-IV.5.3.7 (1) 沖ノ鳥島におけるサンゴ分類

サンゴ分類	イメージ写真 (2019・2020年観察調査写真より)
樹枝状 (Acropora donei など)	Acropora donei 
コリンボース状 (ハリエダミドリイシ、Acropora globiceps など)	ハリエダミドリイシ  Acropora globiceps 

表-IV.5.3.7 (2) 沖ノ鳥島におけるサンゴ分類

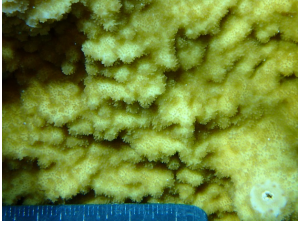
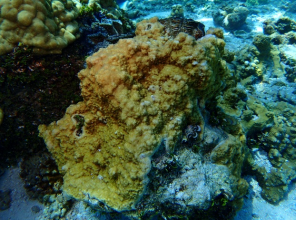
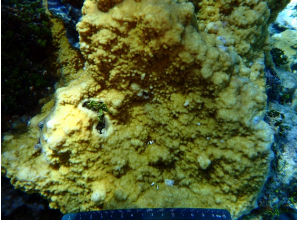

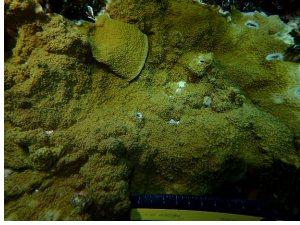

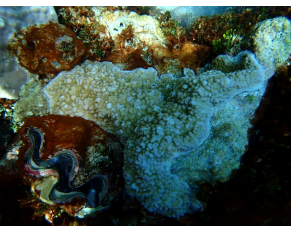

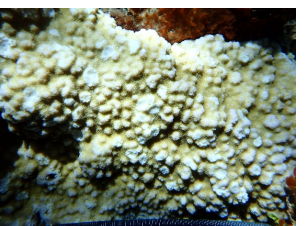
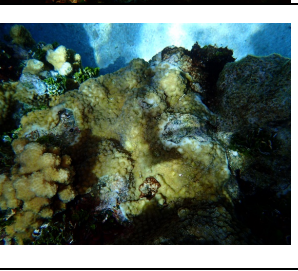

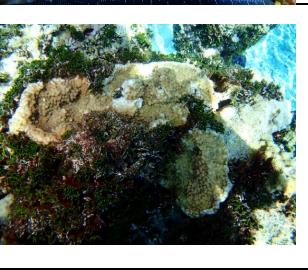


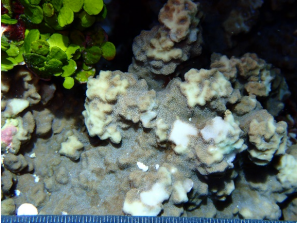
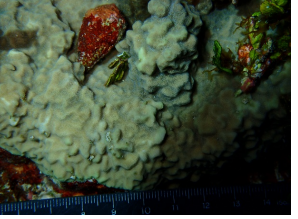
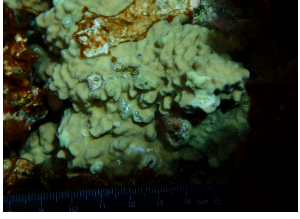

サンゴ分類	イメージ写真 (2019・2020年観察調査写真より)		
被覆状 (コモンサンゴ属、リュウキュウキツカサンゴ、アミメサンゴ属など)	シモコモンサンゴ		
			
	トゲコモンサンゴ		
			
	モリスコモンサンゴ		
			
			
	アミメサンゴ		
			
	アミメサンゴ属		
			

表-IV.5.3.7 (3) 沖ノ鳥島におけるサンゴ分類

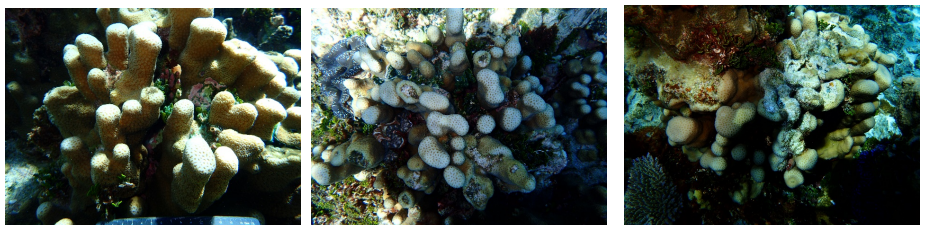

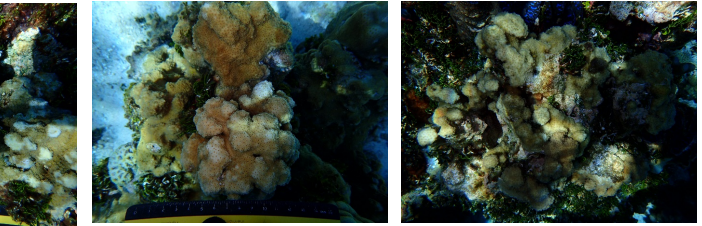
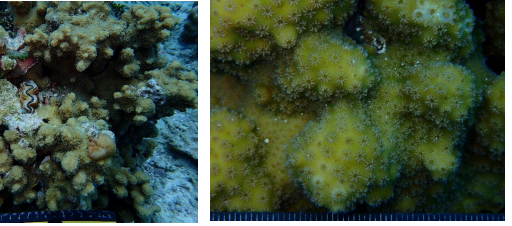


サンゴ分類	イメージ写真 (2019・2020年観察調査写真より)		
塊状 (キクメイシ属、ハマサンゴ属、ナガレサンゴ、オオサザナミサンゴ、ミダレノウサンゴ)	ホシキクメイシ		
			
	コトゲキクメイシ		
			
	トゲキクメイシ属		
			
トゲキクメイシ			
			
ベニハマサンゴ			
			
オオハマサンゴ			
			

表-IV.5.3.7 (4) 沖ノ鳥島におけるサンゴ分類

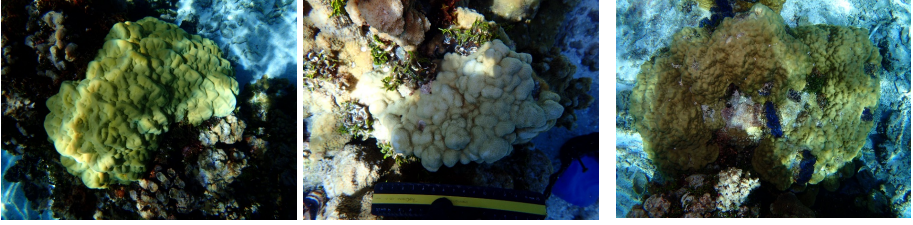


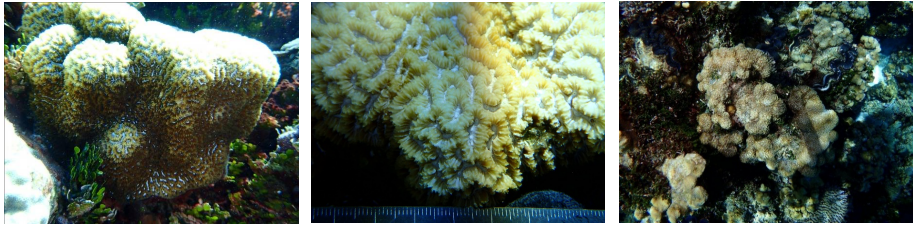


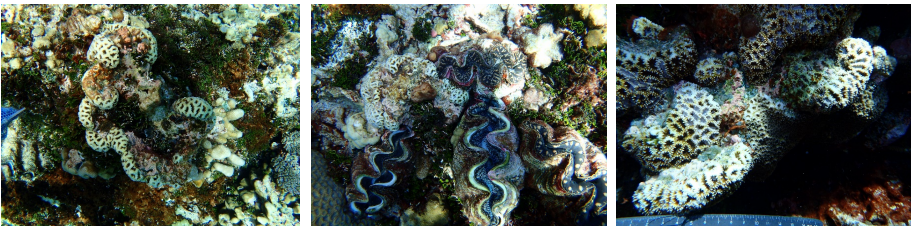
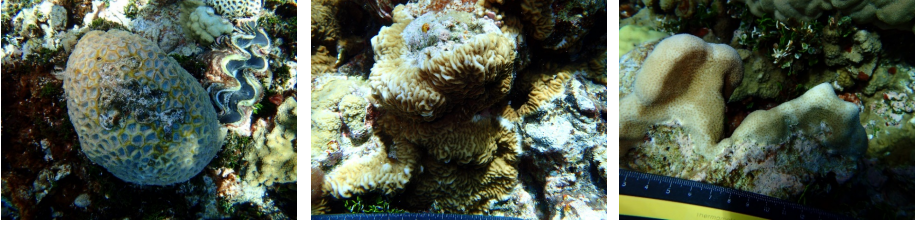
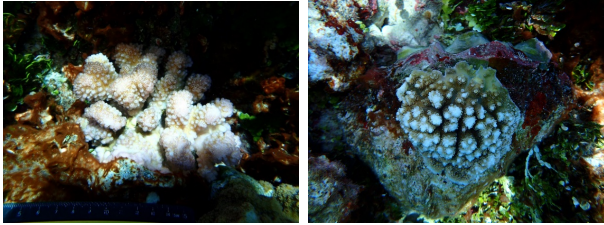
サンゴ分類	イメージ写真 (2019・2020年観察調査写真より)
塊状 (続き)	<p>ハマサンゴ属</p> 
	<p>ナガレサンゴ</p> 
	<p>オオサザナミサンゴ</p> 
	<p>ミダレノウサンゴ</p> 

表-IV.5.3.7 (5) 沖ノ鳥島におけるサンゴ分類

サンゴ分類	イメージ写真 (2019・2020年観察調査写真より)
格子模様あり塊状 (コカメノコキクメイシ、マルキクメイシ、ウスチャキクメイシ)	コカメノコキクメイシ 
	マルキクメイシ 
	ウスチャキクメイシ 
その他サンゴ	主なその他サンゴの一部 オオカメノコキクメイシ シワシコロサンゴ ハマシコロサンゴ  ハナヤサイサンゴ属 クシハダミドリイシ 

教師データの作成状況を図-IV.5.3.8 に示す。教師データは、図-IV.5.3.8 の赤枠領域内で作成するとともに、教師データ作成範囲で教師数が少なかったサンゴ種は、緑枠領域内の補足範囲でも教師データを作成した。

作成したサンゴの教師データ数は、以下のとおりである。

- 樹枝状 (Acropora donei など) : 0 個
- コリンボース状 (ハリエダミドリイシなど) : 93※個
- 被覆状 (コモンサンゴ属など) : 13 個
- 塊状 (キクメイシ属・ハマサンゴ属など) : 400 個
- 格子模様あり塊状 (マルキクメイシなど) : 21 個
- その他サンゴ : 3 個

※コリンボース状のサンゴは、補足エリアでも教師データを作成

AI 解析は下記の分類で解析を行った。

7 分類 : (サンゴ 6 分類+非サンゴ) :

- 樹枝状 (Acropora donei など)
- コリンボース状 (ハリエダミドリイシなど)
- 被覆状 (コモンサンゴ属など)
- 塊状 (キクメイシ属・ハマサンゴ属など)
- 格子模様あり塊状 (マルキクメイシなど)
- その他サンゴ
- 非サンゴ

2 分類 : サンゴ、非サンゴ

教師データ作成状況(着色部)

教師データ数	樹枝状(Acropora doneiなど): 0個
	コリンボース状(ハリエタミドリイシなど): 93個※
	被覆状(コモンサンゴ属など): 13個
	塊状(キクメイシ属・ハマサンゴ属など): 400個
	格子模様あり塊状(マルキクメイシなど): 21個
	その他サンゴ: 3個

※コリンボース状のサンゴは、補足エリアでも教師データを作成

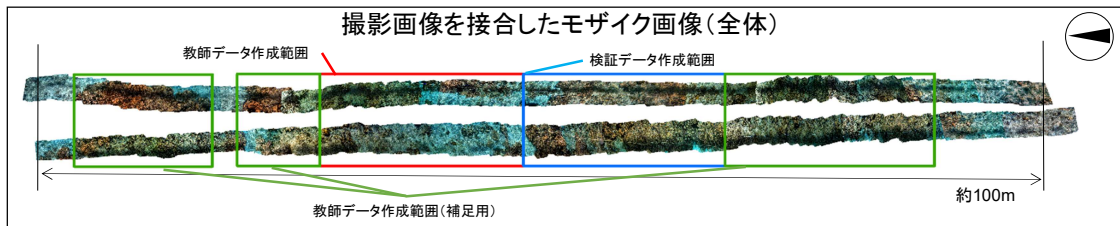
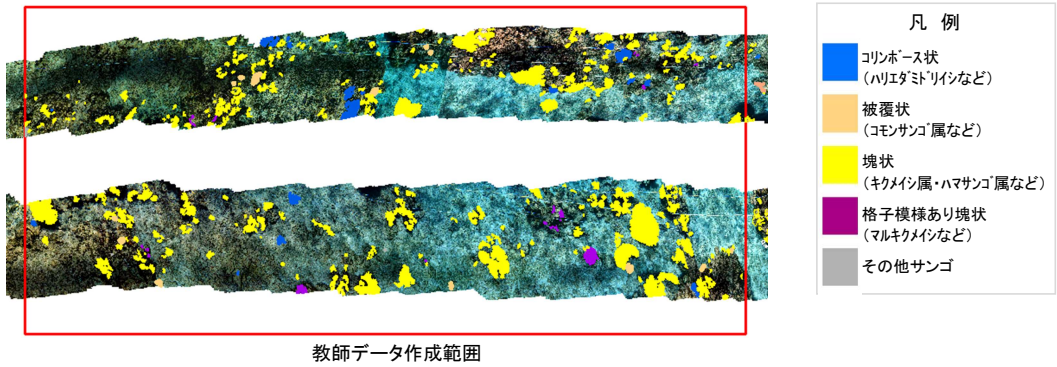


図-IV.5.3.8 教師データ作成状況と検証データ作成エリア(沖ノ鳥島海域)

3) 被度分類解析結果・分類精度のまとめ

2022 年撮影の沖ノ鳥島海域の水中画像で作成した教師データを用いて学習させたモデルの、検証エリアにおけるサンゴ分類結果を図-IV.5.3.9 に示す。

また、過年度業務（2019 年、2020 年、2021 年）で作成した教師データを追加し学習させたモデルの分類結果（2 分類のみ）を図-IV.5.3.10 に示す。

分類精度について、過年度と今年度を比較し整理した結果を表-IV.5.3.8 に示す。

- ・ 2 分類の分類精度は、2022 年単年の学習モデルでは、サンゴの分類精度は 56%と過年度と同程度の分類精度であった。
- ・ 2019～2022 年複数年の学習モデルでも、サンゴの分類精度は 57%と単年度の精度と比べて横ばいであった。
- ・ 6 分類の分類精度は、2022 年単年の学習モデルでは、コリンボース状のサンゴは 49%となり、過年度に比べて精度は低下した。一方、塊状サンゴは 60%と過年度より精度が向上した。
- ・ 今年度取得した画像は撮影した船の揺れの影響により、サンゴが斜めに写ったものが多くみられ、精度が上がらなかったと推定される。
- ・ 2 分類、6 分類ともに、事業計画目標の 80%は未達成であった。

また、今年度は 2019 年～2022 年の撮影画像より作成した教師データでモデルを作成した AI 分類結果によるサンゴ被度と、現地調査でダイバーが観察した被度の比較を行った（図-IV.5.3.11）。比較の結果、現地調査結果と AI 分類結果の間には相関があり（ $r=0.60$ ）、AI 分類結果は現地調査結果と同じ傾向を示すことが確認された。

表-IV.5.3.8 分類精度の過年度比較

分類	プロデューサー精度	2019年	2020年	2021年	2022年	2019～ 2022年
サンゴ 6分類+ 非サンゴ	樹枝状 (Acropora doneiなど)	0%	16%	検証データに存在しない	検証データに存在しない	-
	コリンボース状 (ハリエダミドリイシなど)	84%	69%	72%	49%	
	被覆状 (コモンサンゴ属など)	1%	0%	50%	4%	
	塊状 (キクメイシ属・ハマサンゴ属など)	31%	54%	43%	60%	
	格子模様あり塊状 (マルクメイシなど)	7%	0%	6%	1%	
	その他サンゴ	検証データに存在しない	0%	1%	検証データに存在しない	
	非サンゴ	99%	98%	96%	99%	
	全体精度	95%	92%	90%	98%	
	kappa係数	0.5	0.55	0.63	0.59	
2分類	サンゴ	49%	56%	65%	56%	57%
	非サンゴ	98%	95%	97%	99%	99%
	全体精度	95%	91%	92%	97%	97%
	kappa係数	0.53	0.53	0.68	0.57	0.58

備考) 2022年、2019～2022年の面積集計結果の詳細は表-IV.5.3.9～表-IV.5.3.11に示す。

全体精度:対象地の被度の中で、正しく画像分類された割合を表す比。(正しい分類面積/総面積)
 Kappa係数:1から-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 JR, Koch GG(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、0.81～1.00はほぼ完全な一致とされる。

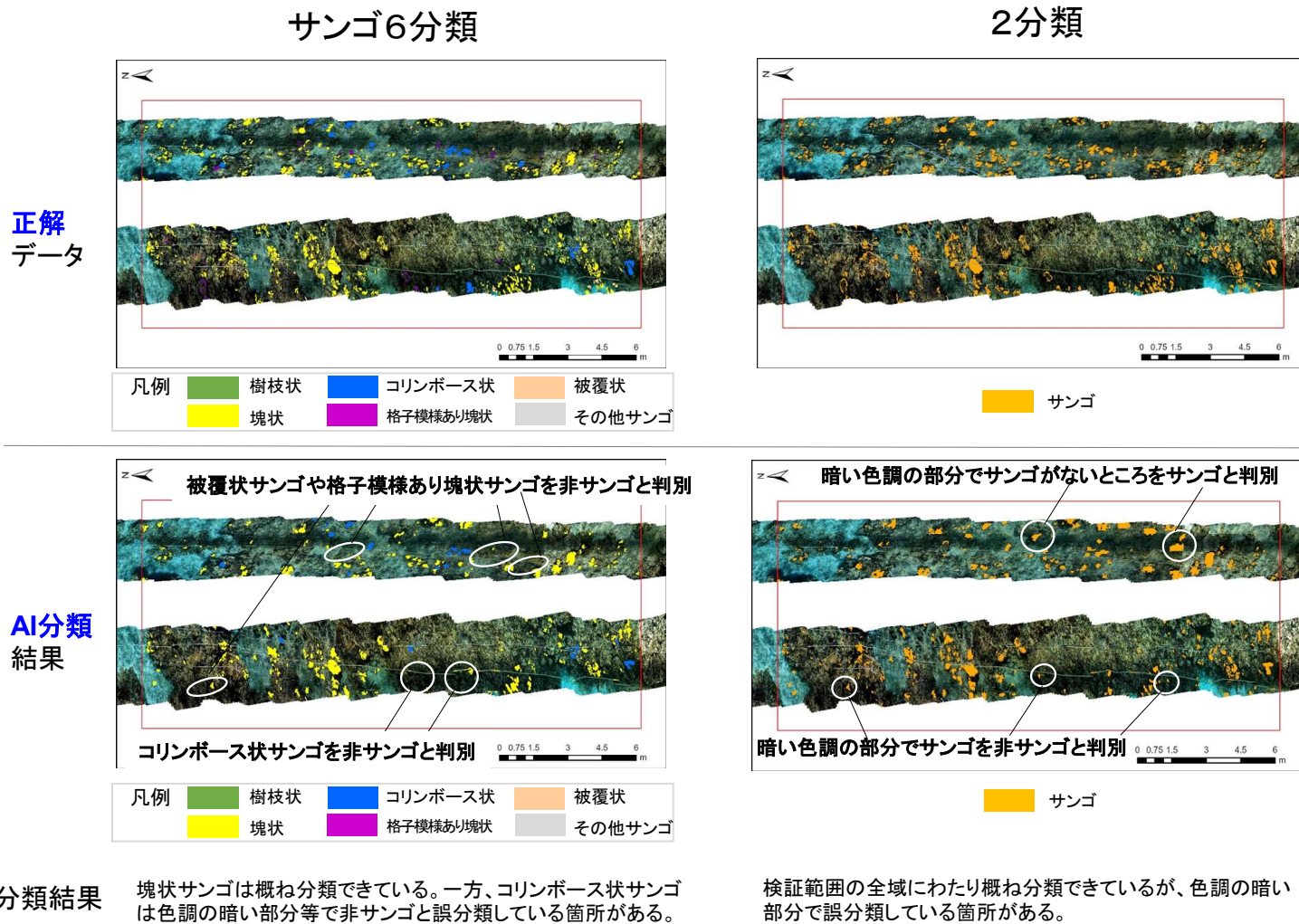
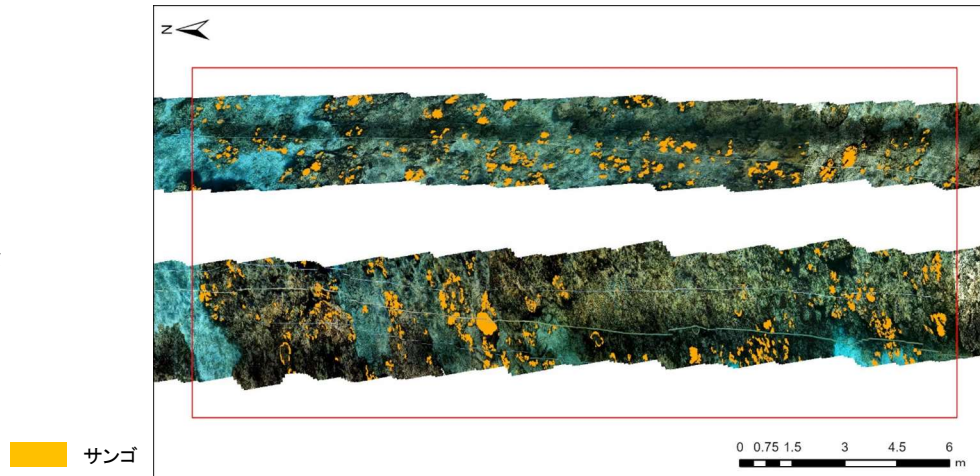


図-IV.5.3.9 水中カメラ撮影結果のモザイク画像に対するサンゴ分類解析結果〔沖ノ鳥島海域の検証エリア、2022年〕

2分類

正解
データ



分類結果

単年度で誤判別していたところを正しく判別できている箇所はあるが、単年度と同様に暗い色調の箇所で誤分類している。

AI分類
結果

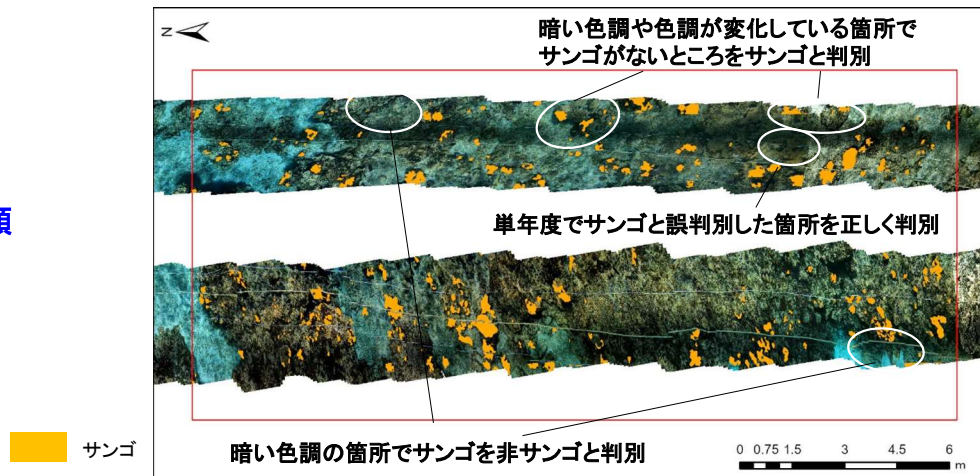


図-IV.5.3.10 水中カメラ撮影結果のモザイク画像に対するサンゴ分類解析結果〔沖ノ鳥島海域の検証エリア、2019～2022年〕

表-IV.5.3.9 沖ノ鳥島海域の検証エリア 2022年教師モデル 6分類精度表

分類精度表 (m ²)		分類結果							行方向総和	プロデューサ精度
		樹枝状	コリンボース状	被覆状	塊状	格子模様あり塊状	その他サンゴ	非サンゴ		
照合用 クラス	樹枝状	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!
	コリンボース状	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	1.10	49.3%
	被覆状	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.19	0.27	3.6%
	塊状	0.00	0.00	0.00	3.55	0.00	0.00	2.33	5.88	60.3%
	格子模様あり塊状	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.40	0.8%
	その他サンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!
	非サンゴ	0.00	0.19	0.00	1.72	0.00	0.00	209.44	211.36	99.1%
列方向総和		0.00	0.73	0.01	5.34	0.00	0.00	212.91	219.00	
ユーザー精度		#DIV/0!	74.0%	83.7%	66.4%	89.5%	#DIV/0!	98.4%		
		教師データがないため、分類対象外							十分教師データがないため、分類対象外	
									全体精度	97.5%
									kappa係数	0.59

表-IV.5.3.10 沖ノ鳥島海域の検証エリア 2022年教師モデル 2分類精度表

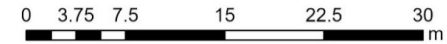
分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度
		サンゴ	非サンゴ		
照合用クラス	サンゴ	4.26	3.38	7.64	55.7%
	非サンゴ	2.64	208.71	211.36	98.8%
列方向総和		6.90	212.10	219.00	
ユーザー精度		61.7%	98.4%		
				全体精度	97.2%
				kappa係数	0.57

表-IV.5.3.11 沖ノ鳥島海域の検証エリア 2019~2022年教師モデル 2分類精度表

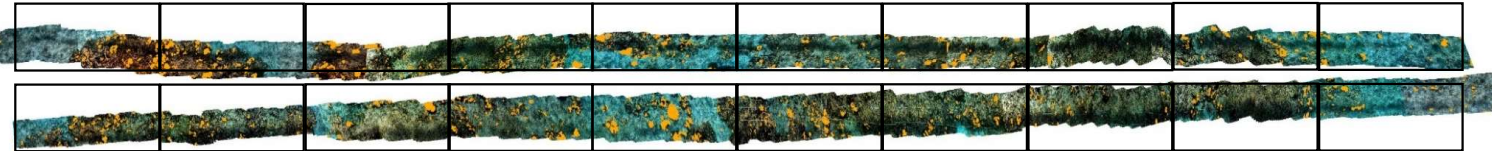
分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度
		サンゴ	非サンゴ		
照合用クラス	サンゴ	4.34	3.30	7.65	56.8%
	非サンゴ	2.68	208.67	211.35	98.7%
列方向総和		7.02	211.98	219.00	
ユーザー精度		61.8%	98.4%		
				全体精度	97.3%
				kappa係数	0.58



AI分類結果



東側測線



西側測線

サンゴ

現地調査結果による被度とAI分類結果による被度の比較

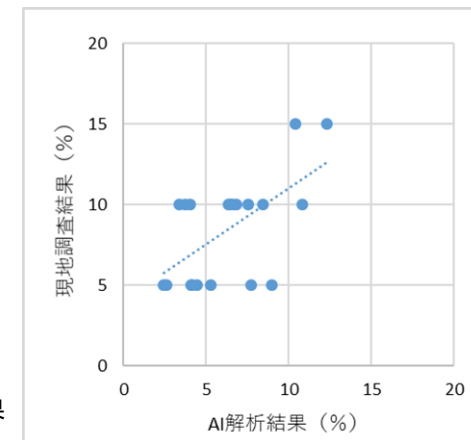
東側測線

現地調査	10	10	5	10	15	10	10	5	5	5
AI分類	10.78	6.82	8.93	6.36	10.39	3.70	7.51	4.10	2.62	7.70

西側測線

現地調査	10	10	5	10	15	10	10	5	5	5
AI分類	8.42	4.03	4.43	6.59	12.27	6.47	3.39	5.28	2.42	4.14

※現地調査結果：潜水士により10m×4mの範囲内における被度(%)を目視観察した結果



分類結果

現地調査結果とAI分類結果の間には相関があり($r=0.60$)、現地調査結果と同じ傾向を示すことができた。

図-IV.5.3.11 現地調査でダイバー観察による被度と AI 分類結果による被度の比較

3.5 分類作業の効率化の検証

分類作業に係る作業日数について、事業計画目標の 15 日/10ha を達成できるか、沖縄海域での分類作業の実績から検討した。

分類作業では、「モザイク画像作成」、「画像の前処理」「AI モデル構築」、「AI 解析」の手順を踏む。各工程に係る作業日数について、沖縄海域の作業実績より算出した結果を表-IV. 5. 3. 12 に示す。モザイク画像作成は測線長 200m あたり 9.33 時間となった。画像の前処理は測線長 200m あたり 1 時間となった。AI モデル構築は 72m² の教師データ作成には約 11 日間、作成した教師よりモデル構築にかかる日数は約 7.5 日間となった。AI 解析は 120m² あたり 0.02 時間となった。AI モデル構築は教師データが蓄積されモデルを構築できると、将来的には不要となる。モザイク画像の作成は撮影毎に作業が発生するため、事業目標 15 日/10ha を達成するためには、対象範囲を面的に効率的に計測、解析することが求められる。

そこで、10ha の現地計測を図-IV. 5. 3. 12 に示すような 50m 間隔の測線を配置し計測、AI 解析することをイメージして分類作業の日数を試算した（下式を参照）。50m 間隔の測線配置を想定した場合、作業日数は 14.6 日となり事業計画目標の 15 日/10ha は達成できる。

対象範囲 10ha の分類に係る日数の試算（50m 間隔の測線配置を想定）

< 既存の AI モデルを使用する場合（モデル構築含まず） >

- ・モザイク画像作成の所要時間

解析測線長 2100m 当たり： 約 14.5 日間・・・①

- ・AI 解析の所要時間

解析面積 4200m² 当たり： 約 0.1 日間・・・②

① + ② = 約 15 日間

表-IV. 5. 3. 12 分類作業に係る作業日数（実証海域の実績）

手法	対象海域	作業日数
モザイク画像の作成	沖縄海域・浦底湾	解析測線長：100m×2測線＝200m 測線長200m分のモザイク画像作成の所要時間：9.33時間 1時間当たりの解析測線長：21.4m、1日（7.5h）当たりの解析測線長：160.5m
画像の前処理	沖縄海域・浦底湾	解析測線長：100m×2測線＝200m 測線長200m分の画像の前処理の所要時間：1時間 1日（7.5h）当たりの解析測線長：1,500m
AIモデル構築 （教師データ作成含む）	沖縄海域・浦底湾	解析面積：（学習エリア12m×3m）×2領域＝72m ² 面積72m ² 分の教師データ作成の所要日数：約11日間 AIモデル構築の所要日数：約7.5日間
AI解析	沖縄海域・浦底湾	解析面積：（検証エリア20m×3m）×2領域＝120m ² 面積120m ² 分のAI解析の所要時間：0.024時間 1時間当たりの解析面積：5,000m ² 、1日（7.5h）当たりの解析面積：37,500m ²

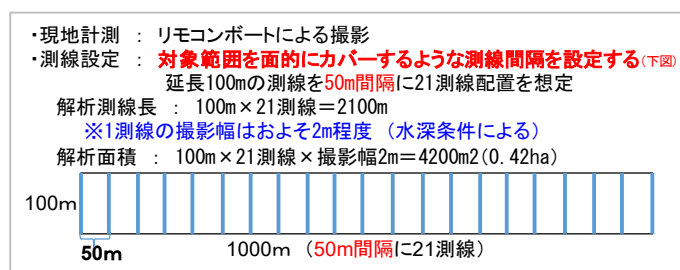


図-IV. 5. 3. 12 対象範囲 10ha の現地計測イメージ

3.6 考察

今年度は実証海域（沖縄海域）においてAI解析による誤分類への対応策として、画像の前処理やAI学習モデルの改良（死サンゴのモデルの追加）を新たに行った。これら対応策の有効性について解析結果を踏まえ考察した。

(1) 画像の前処理

画像の前処理の方法として、①色調の補正、②画像の標準化の2種類を試行した。

①色調の補正では、人の目で判断しやすい画像になったが、全体的に画像が明るくなったことで、サンゴ・非サンゴ間の色調差（画像の有する情報量の差）が少なくなり、AI解析結果はサンゴの輪郭を抽出できず、輪郭以外にも境界がみられた（図-IV.5.3.13）。分類精度をみると、色調補正前に比べて全体精度は1.4%低下し（表-IV.5.3.13）、色調の補正はAIには不適であると考えられた。

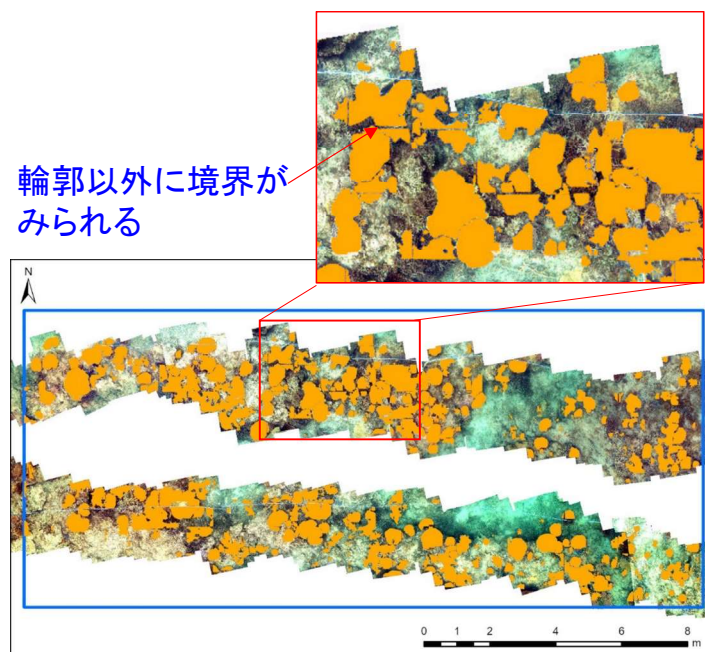


図-IV.5.3.13 ①色調補正後の画像を用いたサンゴ被度解析結果

表-IV.5.3.13 色調補正前後の分類精度

R02~R03年度 沖縄

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
色調補正前	照合用クラス	サンゴ	29.24	7.79	37.03	79.0%
		非サンゴ	8.04	61.28	69.32	88.4%
	列方向総和		37.28	69.07	106.35	
	ユーザー精度		78.4%	88.7%		
					全体精度	85.1%
					kappa係数	0.67

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
色調補正後	照合用クラス	サンゴ	25.71	11.33	37.03	69.4%
		非サンゴ	6.06	63.26	69.32	91.3%
	列方向総和		31.76	74.59	106.35	
	ユーザー精度		80.9%	84.8%		
					全体精度	83.7%
					kappa係数	0.63

②画像の標準化では、画像間の極端な色の差が抑えられ、AI 解析結果はサンゴの輪郭を正しく表現できた（図-IV.5.3.14）。分類精度も、標準化前に比べて非サンゴの分類精度は 3.2%、全体精度で 0.3%向上した（表-IV.5.3.14）。サンゴ画像の前処理方法として、色調補正に比べて標準化が有効であると考えられる。

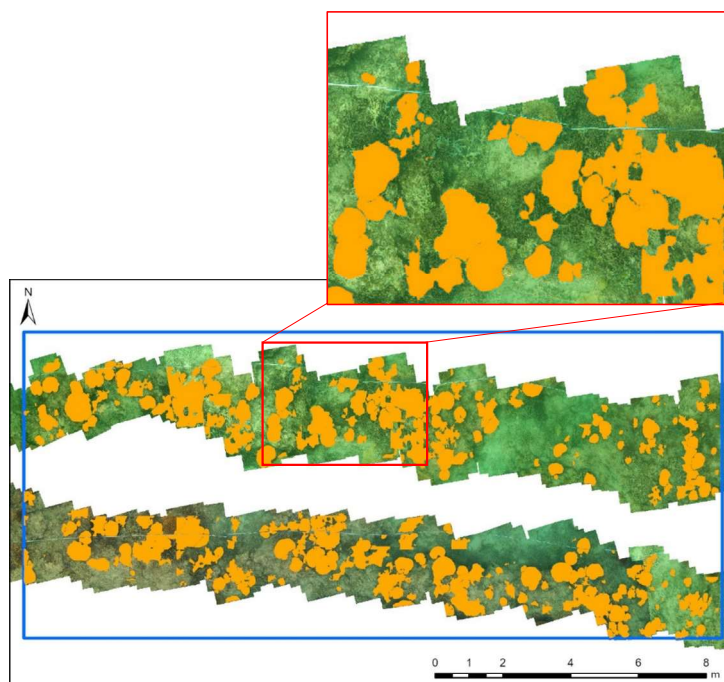


図-IV.5.3.14 ②標準化後の画像を用いたサンゴ被度解析結果

表-IV.5.3.14 標準化前後の分類精度

R02~R03年度 沖縄

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
標準化前	照合用クラス	サンゴ	29.24	7.79	37.03	79.0%
		非サンゴ	8.04	61.28	69.32	88.4%
		列方向総和	37.28	69.07	106.35	
		ユーザー精度	78.4%	88.7%		
				全体精度	85.1%	
				kappa係数	0.67	

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
標準化後	照合用クラス	サンゴ	27.30	9.74	37.03	73.7%
		非サンゴ	5.83	63.49	69.32	91.6%
		列方向総和	33.12	73.23	106.35	
		ユーザー精度	82.4%	86.7%		
				全体精度	85.4%	
				kappa係数	0.67	

(2) 死サンゴの教師データの追加

昨年度は死サンゴを樹枝状サンゴと間違えている結果がみられたため、今年度は死サンゴの教師も一緒に学習させる AI モデルに改良した。

死サンゴを加えた場合は、加えなかった場合よりも、全体精度が 1.7%、サンゴの分類精度が 0.9%、非サンゴの分類精度が 2.2%向上した（表-IV. 5. 3. 15）。このことから、分類精度の向上には、死サンゴの教師を追加することが有効であることが考えられる。

表-IV. 5. 3. 15 死サンゴの教師データの追加前後の分類精度

分類精度表 (m)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
死サンゴ追加前	照合用クラス	サンゴ	29.38	6.95	36.33	80.9%
		非サンゴ	8.30	61.71	70.01	88.1%
		列方向総和	37.68	68.66	106.35	
		ユーザー精度	78.0%	89.9%		
					全体精度	85.7%
					kappa係数	0.68

分類精度表 (m)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
死サンゴ追加後	照合用クラス	サンゴ	29.72	6.61	36.33	81.8%
		非サンゴ	6.76	63.26	70.02	90.3%
		列方向総和	36.48	69.87	106.35	
		ユーザー精度	81.5%	90.5%		
					全体精度	87.4%
					kappa係数	0.72

また、今年度実施した AI 解析の誤分類への対応策の検証の流れを図-IV. 5. 3. 15 に示し、検証過程ごとの分類精度を表-IV. 5. 3. 16～表-IV. 5. 3. 20 に示した。

前述の繰り返しになるが、「①R3年度結果」に対して、画像の前処理の手法として、「②色調補正」を行うと全体精度が 1.4%低下したが、「③標準化」を行うことで非サンゴの精度が 3.2%、全体精度が 0.3%向上した。本業務の AI モデルの精度を向上させるための画像の前処理としては、「③標準化」が適していることがわかる。

また、「③標準化」を行ったモザイク画像で「④教師見直し」を行うことで、全体精度が 0.3%向上し、さらに「⑤死サンゴ教師追加」を行うことで全体精度が 87.4%と、①時点と比較して全体精度が 2.3%向上した。このことから、標準化により画像間の極端な色調の違いを抑え、サンゴを見やすくしたモザイク画像を使用して教師データを精査することや、死サンゴの教師データをモデルに追加することが、本モデルの精度向上に寄与したことがわかる。

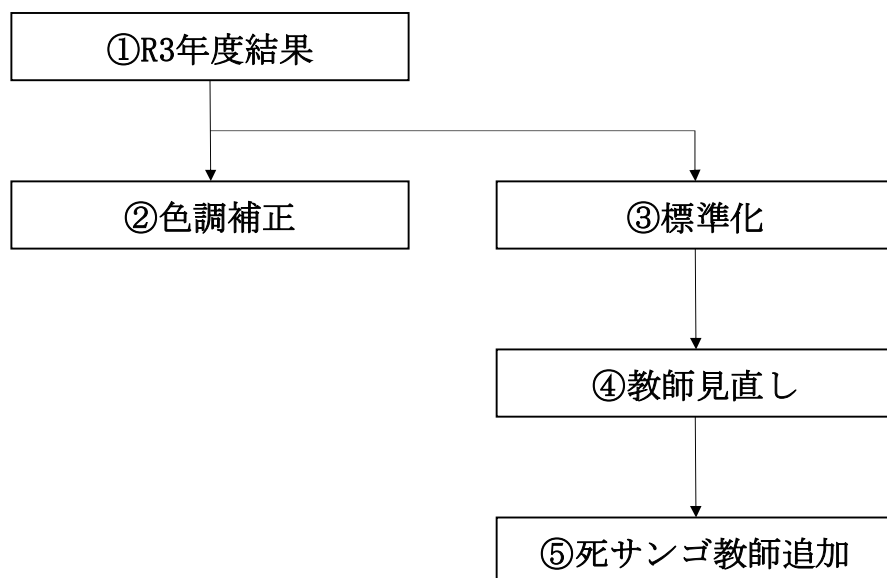


図-IV. 5. 3. 8 令和 4 年度の検証フロー

表-IV. 5. 3. 16 【①R3 年度結果】 沖縄海域 2020-2021 年 : 2 分類精度

R02-R03年度 沖縄

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	29.24	7.79	37.03	79.0%	
	非サンゴ	8.04	61.28	69.32	88.4%	
列方向総和		37.28	69.07	106.35		
ユーザー精度		78.4%	88.7%			
					全体精度	85.1%
					kappa係数	0.67

表-IV. 5. 3. 17 【②色調補正】 沖縄海域 2020-2021 年 : 2 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	25.71	11.33	37.03	69.4%	
	非サンゴ	6.06	63.26	69.32	91.3%	
列方向総和		31.76	74.59	106.35		
ユーザー精度		80.9%	84.8%			
					全体精度	83.7%
					kappa係数	0.63

表-IV. 5. 3. 18 【③標準化】 沖縄海域 2020-2021 年 : 2 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	27.30	9.74	37.03	73.7%	
	非サンゴ	5.83	63.49	69.32	91.6%	
列方向総和		33.12	73.23	106.35		
ユーザー精度		82.4%	86.7%			
					全体精度	85.4%
					kappa係数	0.67

表-IV. 5. 3. 19 【④教師見直し】 沖縄海域 2020-2021 年 : 2 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	29.38	6.95	36.33	80.9%	
	非サンゴ	8.30	61.71	70.01	88.1%	
列方向総和		37.68	68.66	106.35		
ユーザー精度		78.0%	89.9%			
					全体精度	85.7%
					kappa係数	0.68

表-IV. 5. 3. 20 【⑤死サンゴ教師追加】 沖縄海域 2020-2021 年 : 2 分類精度

分類精度表 (m ²)		分類結果		行方向総和	プロデューサ精度	
		サンゴ	非サンゴ			
照合用クラス	サンゴ	29.72	6.61	36.33	81.8%	
	非サンゴ	6.76	63.26	70.02	90.3%	
列方向総和		36.48	69.87	106.35		
ユーザー精度		81.5%	90.5%			
					全体精度	87.4%
					kappa係数	0.72

4. 結果のまとめと今後の課題

(1) 結果のまとめ

今年度実施したサンゴ分類の高精度化の検証結果のまとめを以下に示す。

1) 実証海域（沖縄海域）

- ・AI 解析による誤分類への対応策として、画像の前処理やAI 学習モデルの改良（死サンゴのモデルの追加）を新たに行った。
- ・2 分類の分類精度は、事業計画目標とする分類精度 80%を達成した。
- ・サンゴ種別では、画像の前処理や死サンゴの教師データの追加により精度が向上し、コリンボース状は事業計画目標を達成、樹枝状サンゴではおおむね達成した。テーブル状サンゴにおいても昨年度からの精度向上を達成した。

2) 沖ノ鳥島海域

- ・2 分類の分類精度は、2022 年単年、2019 年～2022 年複数年のいずれの学習モデルにおいても、過年度と同程度の分類精度であり、事業計画目標は未達であった。
- ・サンゴ種別では、2022 年単年の学習モデルでは、コリンボース状のサンゴは過年度から精度が低下したものの、塊状サンゴは精度が向上した。
- ・解析結果をみると、全域にわたり概ね分類できているが、モザイク画像の色調の暗い部分で誤分類している箇所があった。

(2) 今後の課題

今年度の実証海域（沖縄海域）における解析結果を踏まえ、沖ノ鳥島において「画像の標準化」や「死サンゴの追加」に加え、「質の高い教師データの蓄積」することで、分類精度の向上を図ることが課題となる。

また、沖ノ鳥島の主なサンゴ種（図-IV. 5. 4. 1）の教師データを増やすことで、AI 分類できるサンゴ種を増やし、実用的なモデルに発展させることも課題となる。



ハリエタミドリイシ



globiceps

図-IV. 5. 4. 1 沖ノ鳥島の主なコリンボース状サンゴ

5. 次年度の計画（案）

(1) 次年度の目的（案）

今年度の実証海域（沖縄海域）における AI 解析結果を踏まえ、次年度は沖ノ鳥島において、①画像の標準化、②死サンゴの追加を行うことに加え、「教師データの質と量」を改善することで、サンゴ種別の分類精度の向上を図る。

(2) 次年度の検証項目（案）

- ・モザイク画像の標準化の実施
 - ・死サンゴの教師データ追加による AI 学習モデルの改良
 - ・質の高い教師データの蓄積
- によるサンゴ分類の高精度化の検証

(3) 次年度アプローチ方法（案）

<沖ノ鳥島>

- ① 2021、2022 年撮影のモザイク画像を用いて、標準化の実施、死サンゴの教師データを作成
- ② 令和 3 年度に撮影した測線付近のサンゴ被度の高いエリアで、サンゴ画像の撮影、水中観察
- ③ 撮影画像のモザイク化、画像処理、教師データ・検証データの作成
- ④ 沖ノ鳥島の AI 学習モデルで分類解析を実施、精度検証

(4) 次年度スケジュール（案）

- 4 月～7 月：過年度取得画像の標準化、死サンゴの教師データ作成
5 月末～6 月：現地においてサンゴ被度計測、撮影画像の確認・検証
6 月～10 月：2023 年撮影画像のモザイク化、教師・検証データ作成
11 月～1 月：AI 学習モデル解析、精度検証