

## 海洋温暖化および酸性化影響評価のためのサンゴ連携モニタリングに関する研究

## ＜サブテーマ＞

- (1) ダイバーによるサンゴ被度・白化度調査
  - (2) 船舶によるサンゴモニタリング手法の確立および調査
  - (3) 衛星画像によるサンゴのリモートセンシング調査
  - (4) サンゴモニタリングデータの一元化データベースの作成
- (全サブテーマを海技研が担当しているため、以下に全サブテーマを合わせたものを記す。)

## 独立行政法人海上技術安全研究所

|        |            |       |       |
|--------|------------|-------|-------|
| 運航・物流系 |            | 田村 兼吉 | 系長    |
| 運航・物流系 |            | 樋富 和夫 | 上席研究員 |
| 運航・物流系 | 計測技術研究グループ | 桐谷 伸夫 | グループ長 |
| 運航・物流系 | 計測技術研究グループ | 山之内 博 | 主任研究員 |
| 運航・物流系 | 計測技術研究グループ | 篠野 雅彦 | 主任研究員 |
| 運航・物流系 | 計測技術研究グループ | 松本 陽  | 研究員   |

## (独立行政法人海上技術安全研究所 客員研究員)

|               |                |       |       |
|---------------|----------------|-------|-------|
| 琉球大学          | 理学部            | 日高 道雄 | 教授    |
| 東京海洋大学        | 海洋科学部          | 荒川 久幸 | 教授    |
| 独立行政法人国立環境研究所 | 生物・生態系環境研究センター | 山野 博哉 | 主任研究員 |

## (独立行政法人海上技術安全研究所 内部評価委員)

|               |       |       |         |
|---------------|-------|-------|---------|
| 独立行政法人国立環境研究所 | 企画部   | 原島 省  | シニアスタッフ |
| 東京海洋大学        | 海洋工学部 | 村山 利幸 | 教授      |
| 東京海洋大学        | 海洋科学部 | 岡本 峰雄 | 教授      |

## (全サブテーマ合計)

|                  |           |
|------------------|-----------|
| 平成21～23年度合計予算額   | 56,256千円  |
| (うち、平成23年度当初予算額) | 17,683千円) |

## [要旨]

本研究では、まず、船舶搭載型イメージング蛍光ライダー（レーザーライダー）装置を用いた航行船舶によるサンゴの広域モニタリング手法を確立した。また、この手法と、現行のダイバーによる定点観測手法や、人工衛星によるリモートセンシング手法を組み合わせることにより、サンゴの詳細観測データから広域観測データまでを一元的に連携するための体制の整備を行った。

具体的には、本研究のサンゴモニタリング地点として、沖縄県石西礁湖海域に4点、千葉県館山市海域に1点の観測ポイントを設置した。これらの観測ポイントにおいてダイバー調査を行い、サンゴ被度・白化度等を調査した。また、蛍光ライダーと観測原理が同じである夜間UV励起蛍光コドラート調査法を開発し、小さなサンゴ群体の検出や、サンゴの生死判別に有効であることを示した。一方、日中に船舶から生きたサンゴの蛍光イメージの観測が可能な、船舶搭載型イメージング蛍光ライダー装置を開発し、上記観測ポイント3点を含む竹富島周辺海域で、グラスボートの航跡に沿ったサンゴの蛍光観測に成功した。さらに、衛星リモートセンシングとして、上記観測ポイント全てを含む高解像度衛星画像（空間分解能2~3mのマルチスペクトル画像）を現在から過去に遡って入手し、サンゴ礁海域のクラスター解析を行った。また、他手法観測データとの連携によって解析精度の向上を進めた。さらには、これらの観測データを連携させて一元的に利用できるGIS型のデータベースを構築し、サンゴ連携モニタリング体制を確立した。

[キーワード] 海洋温暖化、海洋酸性化、サンゴ、モニタリング、ライダー（レーザーライダー）

## 1. はじめに

IPCC第4次評価報告書によると、産業革命以降、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は4割程度増加した。この温室効果等によって、地上の気温は0.7度程度上昇し、海面から700mの深度までの海水温が0.1度程度上昇したと報告されている<sup>1)</sup>。また、海洋へのCO<sub>2</sub>の溶け込みにより、海洋表層がpH値で0.1程度酸性化したとも報告されており<sup>2)</sup>、IPCCでは、これらの海洋環境変動が今後も進行すると予測している<sup>3)</sup>。このような中、海洋温暖化、海洋酸性化のどちらに対しても脆弱な海洋生物としてサンゴが注目されており、海洋温暖化及び酸性化による生態系への環境影響評価のため、サンゴ被度を広域かつ長期的にモニタリングすることが重要視されている。

これまでの主なサンゴモニタリング法として、ダイバーによる潜水調査法と、高解像度衛星画像を用いたリモートセンシング法の2手法が挙げられる。

ダイバー調査法は、サンゴの被度、白化度、種類、状態等の詳細な観察を行うことが可能であるが、調査の実施が海象の影響を受けるため、サンゴ礁海域全域にわたる全調査は困難である。このため、対象とする調査海域に定点観測ポイントを点在させ、その調査結果を代表値としてサンプル調査を行うことが多い（点観測データ）<sup>4)</sup>。また、定期的な広域調査を行うためには、膨大な人手が必要となる。

一方、衛星リモートセンシングは対象とする調査海域全域のサンゴ分布を観測することが可能である（面観測データ）が、画像分解能が2~3m程度と低いため、小規模サンゴ群集の調査が難しい。また、水深5m程度以深（礁斜面等）の海域の調査が難しく、サンゴの

生死判別、サンゴと海藻の区別等も困難である<sup>5)</sup>。両モニタリング手法を連携させ、互いにデータを比較することができれば、モニタリングデータの信頼性が向上すると考えられるが、モニタリングのスケールが違いすぎるため、現状では連携モニタリングの体制が充分とは言えない。

本研究では、上記2手法を補完することを目的とし、船舶からのサンゴモニタリング手法の研究開発を計画した。この手法は、航行船舶から海底のサンゴを観測することで、船舶の航跡に沿ってサンゴ調査結果を得ることを目指している。このモニタリング手法の開発により、ダイバー調査による点観測データ（10 mスケール）、船舶観測による線観測データ（1 kmスケール）及び衛星リモートセンシングによる面観測データ（10 km～全球スケール）を組み合わせ、サンゴ連携モニタリング体制を整備することを目標とする。

これまで、海上技術安全研究所では、ヘリコプター搭載型イメージング蛍光ライダー装置を用いた油膜の2次元観測等を行ってきた経緯がある<sup>6)7)</sup>。本研究では、これらの技術と経験を生かし、船舶搭載型イメージング蛍光ライダー装置および航行船舶からのサンゴモニタリング手法を開発する。また、この手法を利用し、これまでのダイバー調査及び衛星リモートセンシングによるモニタリングデータを補完して、海洋温暖化および酸性化がサンゴに与える影響を、広域かつ長期的にモニタリングするための連携体制の整備を行う。

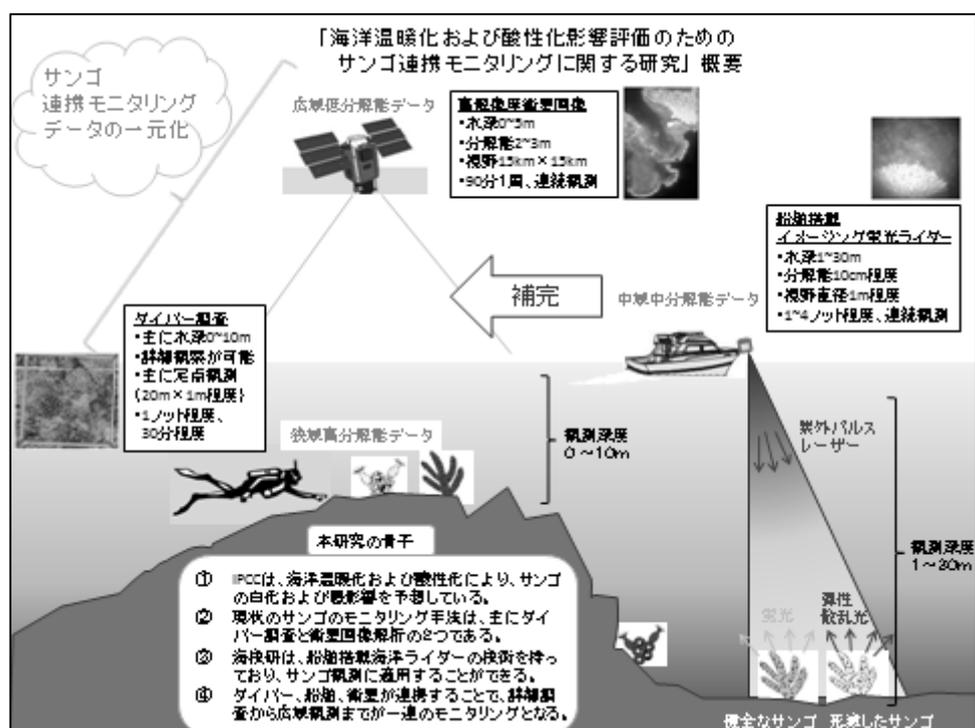


図1 本研究概要説明図

## 2. 研究目的

本研究は、広範囲のサンゴ生息海域を、長期的・連続的に観測するための体制を整備し、将来的に観測データを蓄積することで、海洋温暖化および酸性化の影響評価に資することを目的とする。

このため、まず、船舶搭載型イメージング蛍光ライダー（レーザーライダー）装置を用いた、航行船舶によるサンゴの広域モニタリング手法を確立する。イメージング蛍光ライダーは、生きているサンゴに含まれる蛍光タンパク質の紫外線励起蛍光性を利用するもので、これにより、中域中分解能のサンゴ被度観測データを得るとともに、これまでダイバー調査や衛星観測では困難であった中域中分解能のサンゴ観測データの取得を目標とする。

次に、ダイバーによるサンゴ調査、船舶によるサンゴ観測、人工衛星によるリモートセンシングの3つの手法による観測を実施する。ダイバー調査では、詳細で客観的なデータを得るため、ライントランセクト法・コドラート法（または夜間UV励起蛍光コドラート法）・写真解析法を用いる。衛星観測では、マルチスペクトルで分解能が2~3mである、IKONOS・QuickBird・WorldView-2等の高解像度衛星画像を用いる。これらの複数手法による観測で、狭域高分解能データから、広域低分解能データまでの多様なサンゴ観測データを得る。

上記サンゴの複数手法観測を実施するとともに、その観測データを連携して一元的に利用するためのデータベースを構築し、将来的に広範囲・長期的な観測データの解析を可能にする。

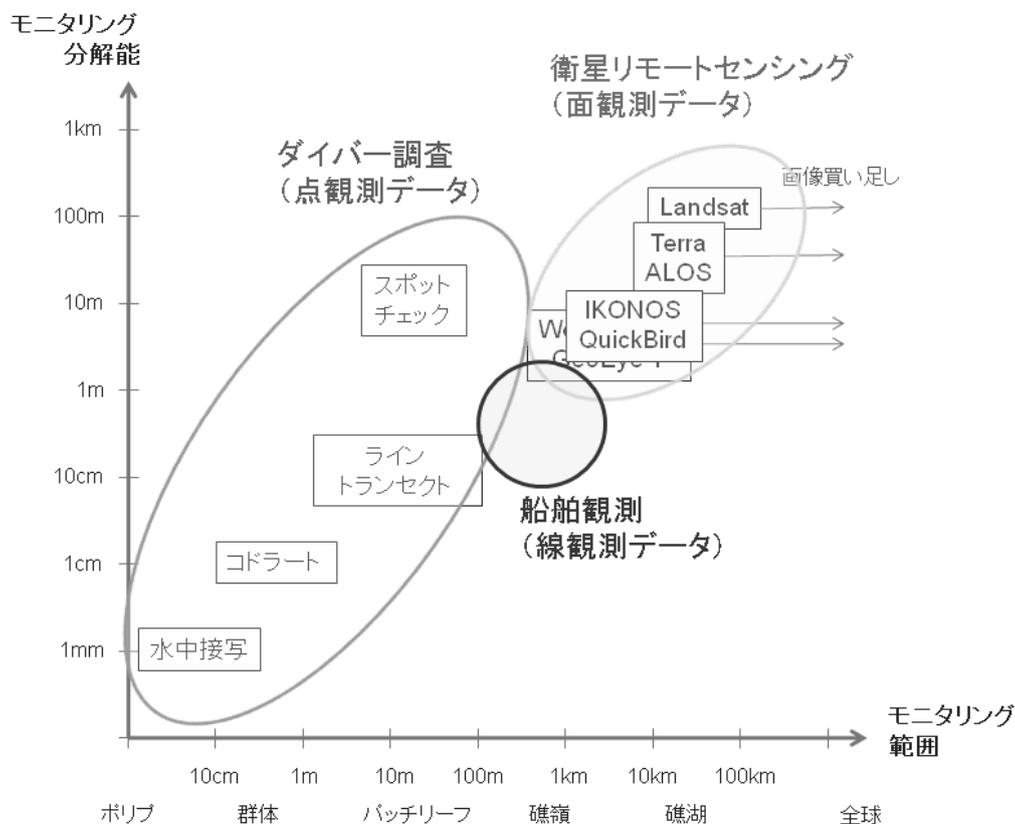


図2 サンゴモニタリング法のスケール比較図

### 3. 研究方法・結果

#### (1) ダイバーによるサンゴ被度・白化度調査

ライダーデータ（船舶観測データ）との比較検証のためのダイバー調査データの蓄積、蛍光を用いたサンゴ被度手法の検証、蛍光を用いたサンゴ白化および死滅の検証を目的として、ダイバー調査を行った。沖縄県竹富町沖及び千葉県館山市沖の定点観測ポイントにおいて、サンゴの水中カメラ撮影、及び水中紫外励起蛍光カメラ撮影を実施した。また、この調査によって得られる水中コドラート画像、及び水中コドラート蛍光画像について、昨年度までに確立した解析手法を用いてサンゴ被度・白化度調査を行い、またその調査結果を用いて解析手法の改良を行った。加えて、水中紫外励起蛍光分光器を用いて、上記定点観測ポイントに生息するサンゴの紫外励起蛍光スペクトルを測定し、サンゴの蛍光特性に係る観測データを蓄積した。本稿では、H21-23年度の館山と石垣島・竹富島周辺海域における定点でのダイバー調査結果の詳細を報告する。

#### ① 定点観測ポイント

千葉県館山市沖の1点と沖縄県竹富町沖の4点の計5点を定点観測ポイントとして、ダイバー調査を行った。沖縄県石垣島・竹富島周辺では、H21年度12月、2月、H22年度6月、10月、1月、H23年度9月の計6回のダイバー調査を行った。一方、千葉県館山市坂田地先では、H21年度11月、H22年度6月、11月、H23年度6月、11月の計5回のダイバー調査を行った。H21-23年度の研究期間中のポイントの消失や変更はなく、各ポイントの海底に設置・固定した目印用のロープを発見することにより、毎調査で常に同じ海底のサンゴ被度・白化度のダイバー調査を行った。表にH21-H23年度にかけての各ポイントでのダイバー調査実施状況を示す。H21年度、H22年度には天候および海況が悪く、ダイバー調査の実施が困難と判断され、データの取得を行わなかったポイントもあったが、概ね予定どおりダイバー調査を実施し、データ収集を行った。H23年度は、館山では6月と11月、竹富島周辺では9月にダイバー調査を計画し、当初の予定どおり実施した。

表1 定点観測ポイントの緯度経度および水深

| ポイント名           | 北緯         | 東経          | 水深    | 精度    |
|-----------------|------------|-------------|-------|-------|
| 竹富 N            | 24°20.910' | 124°05.080' | 約 10m | 約 10m |
| 竹富 NE           | 24°20.105' | 124°06.200' | 約 5m  | 約 2m  |
| 竹富 E            | 24°19.709' | 124°06.530' | 約 3m  | 約 2m  |
| 石垣港 S           | 24°19.370' | 124°10.150' | 約 8m  | 約 10m |
| ※竹富 S (JAMSTEC) | 24°17.993' | 124°06.027' | 約 10m | 約 10m |
| 館山坂田            | 34°58.619' | 139°46.607' | 約 5m  | 約 10m |

※ 竹富 S (JAMSTEC) では、ダイバー調査は行ってない。船舶観測の目標として使用。

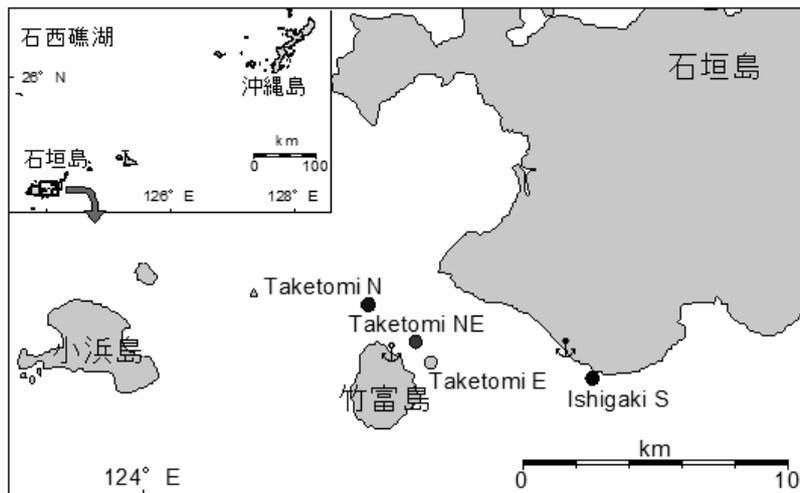


図 3 沖縄県竹富町沖の定点観測ポイント

表 2 沖縄県竹富町沖におけるダイバー調査実施状況 (H21-23 年度)

| ポイント名 | Dec-09 | Feb-10 | Jun-10 | Oct-10 | Jan-11 | Sep-11 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 竹富 N  | n.d.   | n.d.   | D/F    | D/F    | D/F    | D/F    |
| 竹富 NE | D      | D      | D/F    | D/F    | D/F    | D/F    |
| 竹富 E  | D/F    | D      | D/F    | D/F    | D      | D/F    |
| 石垣港 S | D/F    | n.d.   | n.d.   | D/F    | D/F    | D/F    |



図 4 千葉県館山市沖の定点観測ポイント

表 3 千葉県館山沖におけるダイバー調査実施状況 (H21-23 年度)

| ポイント名 | Nov-09 | Jun-10 | Nov-10 | Jun-11 | Nov-11 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 館山坂田  | ※D/F   | D/F    | D/F    | D/F    | D/F    |

※ Dは「コドラート画像」、Fは「コドラート蛍光画像」、n.d.は「データなし」を示す。

## ②被度・白化度調査手法

サンゴ種、被度、白化度などの客観的かつ正確なデータの収集が可能であるトランセクトに沿った Photo-quadrat 法（以下 PHOTS : Photo-quadrat analyzed by outlining coral colonies）によりサンゴ被度および白化度の観測を実施した<sup>8)</sup>。調査方法は、ハンディ GPS により各定点観測ポイントに小型船舶で移動した後、海底にトランセクトラインとして 20 m のメジャーを設置して、メジャーの両側を沿うように 0.5×0.5m の立体型コドラート（塩ビ製）を用いてコドラートの上部から撮影を行った。また、一般的な PHOTS とともに、夜間の蛍光 PHOTS も各ポイントで実施した。PHOTS および蛍光 PHOTS には、水中ハウジングに搭載したデジタルカメラ（D300、Nikon 社製）を用い、蛍光 PHOTS ではさらに水中 UV-LED ライト（FIX-LED52、フィッシュアイ社製）を用いて励起光源とした。デジタルカメラと水中 UV-LED ライトは、コドラートの上部に固定した。台風等の波浪の影響が強く調査の実施に危険を伴う場合は、現地ダイバーと協議の上で調査を行わないこととした。

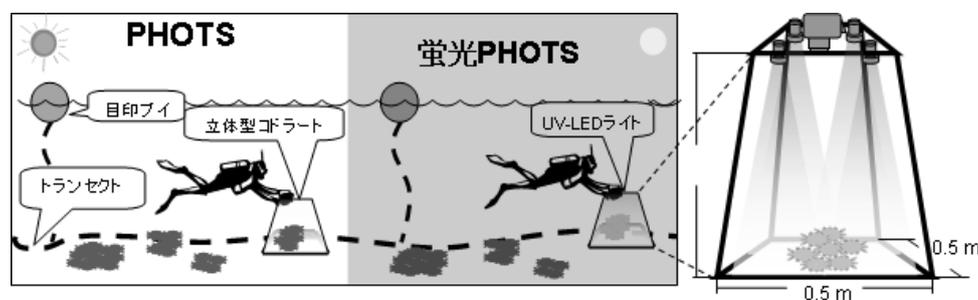


図 5 コドラートを使用した被度・白化度観測方法の模式図

## ③被度・白化度解析手法

PHOTS と蛍光 PHOTS の両手法により撮影されたそれぞれの画像から、群体 1 つ 1 つを識別し、各群体の輪郭をトレースして各群体の面積およびコドラート内の群体数を計測した<sup>8)9)</sup>。日中の PHOTS 画像については、ポインティングデバイスを使用し、目視により PC 画面上で群体の輪郭をトレース後、群体数と面積（0.01 cm<sup>2</sup> 単位）を計測した。サンゴ被度は、コドラート面積に対する群体の総面積の相対値として百分率で算出した（1 式）。蛍光 PHOTS 画像については、RGB 分解、閾値の調整、二値化処理を行い領域抽出した後、群体数、群体面積を計測した。また、サンゴの白化度の算出も行った（2 式）。日中に撮影したコドラート画像内で白色を呈する群体を白化群体として目視で判別し、カウントした。本報告では、ライン上で見られた総群体数に対する白化群体数の割合を白化度として百分率で算出した。全ての画像処理および計測には、画像処理ソフト ImageJ（ver. 1.41, National Institute of Health, USA）を用いた。

$$\text{被度 [\%]} = (\text{コドラート内の群体総面積} [\text{cm}^2] / \text{コドラート面積} [\text{cm}^2]) \times 100 \quad \dots (1)$$

$$\text{白化度 [\%]} = (\text{ライン上の白色群体数} / \text{ライン上の総群体数}) \times 100 \quad \dots (2)$$

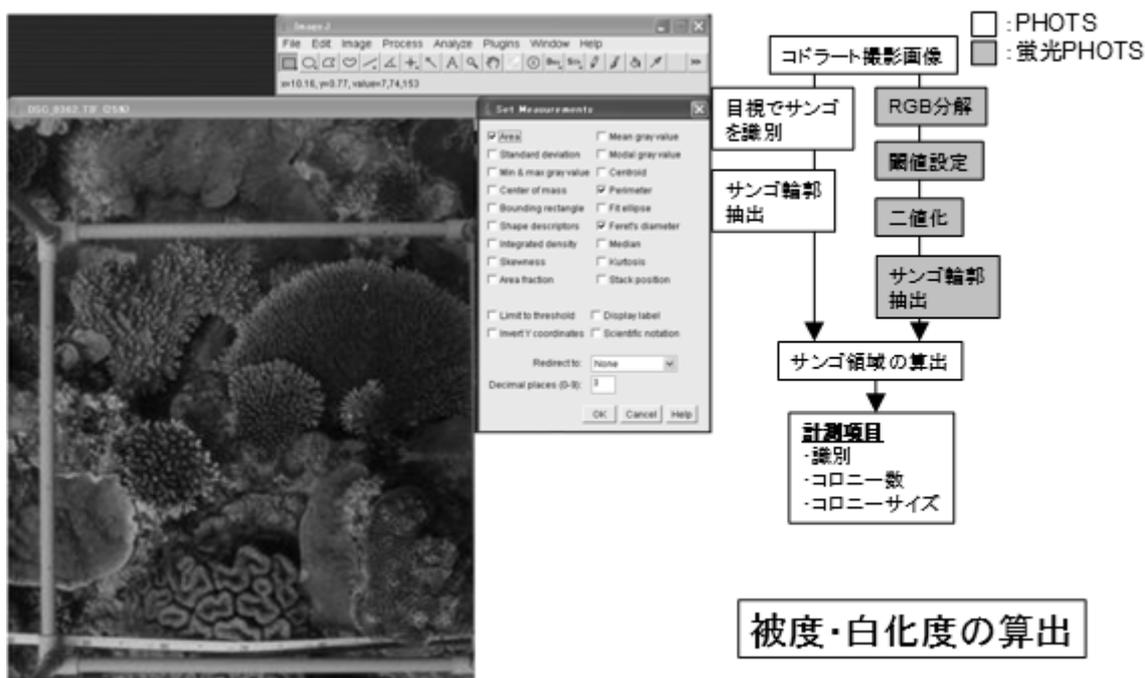


図 6 被度・白化度解析の方法 概要図

#### ④被度・白化度調査結果

H21年度からH23年度にかけて、沖縄県竹富町沖の定点観測ポイントでは6回、千葉県館山市沖では5回のダイバー調査を実施した。天候海況が悪く調査を断念した場合もあったが、概ね計画どおりデータ収集を行った。沖縄県竹富町沖のポイントの被度について見ると、竹富Nは57-60%、竹富NEは45-56%、竹富Eは29-44%、石垣港Sは4ポイントの中で最も被度が低い12-26%で変動していた。被度の値は、竹富N>竹富NE>竹富E>石垣港Sの順であり、この傾向は研究期間中に変わることは無かった。また、夜間の蛍光PHOTSの被度の値は、何れのポイントについても日中のPHOTSの値と類似していることから、蛍光を利用した場合も日中と同様にサンゴ群体を検出することが可能であると判断できる。

ポイントごとに見ると、竹富Nポイントでは、H22年度6月からの計4回の調査のうち、夏をまたいだH22年度6月-10月の間で被度は、60.68%(±20.93)から56.99%(±21.10)に減少する傾向が見られたが、H22年度1月-H23年度9月の間では顕著な減少傾向は見られなかった。また、このポイントではH22-23年度にかけて、ライン上で見られたテーブル状のミドリイシ属 *Acropora* sp. 群体の蛍光画像の季節的な変化から、蛍光により明らかな群体の死滅を検出した。この群体のサイズは536.96 cm<sup>2</sup>、長径は34.75 cmであり、竹富Nポイントのライン上の群体の中では比較的大きなサイズの群体であるにも関わらず、日中の画像からでは死滅の判別が困難である。しかしながら、夜間に撮影した蛍光画像では、H22年度10月から12月にかけて蛍光発光が消失していたため、死滅の判別が容易であった。その後、H23年度の9月の画像でもH22年度12月と同様に蛍光が見られないことから、本群体はH22年度10-12月の間に死滅し、骨格のみが残存してい

ることが明らかとなった。

竹富 NE ポイントでは、H21 年度 12 月から計 6 回の調査を行い、H21 年度から H22 年度の夏季をまたぐ 10 月にかけて被度は 53.40 % ( $\pm 23.90$ ) から 44.95 % ( $\pm 23.59$ ) に低下する傾向が見られたが、H23 年度 9 月までに 55.65 % ( $\pm 26.02$ ) に増加した。

竹富 E ポイント周辺では、H21 年度から H22 年度の夏季をまたいだ被度の値は、37.45 % ( $\pm 26.80$ ) から 35.48 % ( $\pm 25.55$ ) に変動したが、H23 年度の 9 月には 43.95 % ( $\pm 28.46$ ) に増加した。竹富 NE および竹富 E ポイントについての、H22 年度の被度の増加は、主に枝状ミドリイシの被度の増加が起因していた。

石垣港 S ポイントでは、欠測データのため明瞭な傾向について、論じることは困難であるが、H22 年度 10 月から H23 年度 9 月にかけて、上記の 3 点と同様にわずかながら増加傾向を示した。H21-23 年度にかけて大規模な白化および死滅によるサンゴ礁の衰退は見られなかった。本研究でのダイバー調査結果は、同時期にほぼ同じ海域で同様のコドラート法を用いて行われた、環境省生物多様性センターのモニタリングサイト 1000 におけるサンゴ被度調査結果と同様の増加傾向を示した<sup>10)</sup>。群体の白化について、H21-23 年度に観測ポイントで確認された白化群体数は、何れも 0-8 群体程度群体であり、算出した白化度の値も 0-1%程度と極めて小さく、被度の増減との明瞭な関係性を見出すには至らなかった。一方、死滅群体については、竹富 N ポイントにおいて H22 年度 10-12 月に明瞭な蛍光発光の消失を示した群体が見られ、蛍光特性を用いることで生存-死滅の判別が容易になることが示された。

本海域は、サンゴ種多様性が高く、種によるストレスに対する応答の違いが顕著に観察されることが想定される<sup>11)</sup>。今後、被度および白化度の変化を捉えるためには、時系列的な海洋環境データ（水温、塩分、濁度など）の収集、白化が想定される夏季のダイバー調査の実施と種や属レベルでの同定、ポイント間の群集解析を行う必要があると考えられる。

千葉県館山市坂田地先では、優占種がニホンアワサンゴ *Alveopora japonica* であることもあり<sup>12)</sup>、対象としたポイントではほぼ全てのサンゴはこの種のサンゴで占められていた。本種の被度は、1.5-3.5%の間で推移し、サンゴ个体群の大規模な白化や死滅等の顕著な変化は見られなかった。上記の竹富町沖のポイントとは対照的に、冬季をまたぐ 11 月から 6 月の間には被度が低下し、プラヌラ放出を行う 8、9 月をまたぐ 6 月と 11 月の間では被度が増加する傾向が見られた。しかしながら、夜間に観測を行った蛍光 PHOTS の被度の値と日中の値との明瞭な差を見てもわかるとおり、ニホンアワサンゴは、日中にポリプを伸長、夜間に収縮させる日周変化に伴い群体サイズも大きく変化するため<sup>13)</sup>、被度の算出とその季節変化についての解釈には群体サイズの変化を考慮する必要がある。一方、日中のポリプ伸長のため群体が重なり、1 つにカウントしていたものは、蛍光 PHOTS では正確に分離でき、さらに過去の知見と同様に<sup>14)</sup>、日中では見落としてしまう小型群体についても蛍光 PHOTS では検出感度が向上することから、群体密度については正確に計測が可能であることが示された。本種の个体群動態と被度の季節変化について明らかにするためには、群体サイズとポリプ収縮との関係を明らかにし、今後もモニタリングを継続する必要がある。

表 4 各定点観測ポイントにおける被度[%]の推移

| ポイント名 | D/F  | Dec-09 | Feb-10 | Jun-10 | Oct-10 | Jan-11 | Sep-11 |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 竹富 N  | D.   | n.d.   | n.d.   | 60.68  | 56.99  | 57.14  | 58.58  |
|       | s.d. | n.d.   | n.d.   | 20.93  | 21.10  | 18.74  | 18.29  |
|       | F.   | n.d.   | n.d.   | 61.04  | 56.82  | 55.59  | 58.05  |
|       | s.d. | n.d.   | n.d.   | 21.05  | 18.93  | 17.85  | 18.25  |
| 竹富 NE | D.   | 53.56  | 53.40  | 48.18  | 44.95  | 49.22  | 55.65  |
|       | s.d. | 27.22  | 23.90  | 27.64  | 23.59  | 25.56  | 26.02  |
|       | F.   | n.d.   | n.d.   | 49.12  | 44.26  | 49.44  | 56.16  |
|       | s.d. | n.d.   | n.d.   | 26.43  | 23.46  | 25.49  | 26.30  |
| 竹富 E  | D.   | 29.52  | 37.50  | 37.45  | 35.48  | 37.50  | 43.95  |
|       | s.d. | 22.16  | 26.71  | 26.80  | 25.55  | 27.73  | 28.46  |
|       | F.   | 34.01  | n.d.   | 37.47  | 35.40  | n.d.   | 42.86  |
|       | s.d. | 25.33  | n.d.   | 26.07  | 25.49  | n.d.   | 28.16  |
| 竹富 S  | D.   | 25.76  | n.d.   | n.d.   | 12.55  | 13.43  | 15.86  |
|       | s.d. | 22.68  | n.d.   | n.d.   | 15.43  | 16.77  | 17.87  |
|       | F.   | 17.93  | n.d.   | n.d.   | 12.87  | 13.00  | 14.07  |
|       | s.d. | 21.75  | n.d.   | n.d.   | 15.68  | 17.14  | 17.53  |

| ポイント名 | D/F  | Nov-09 | Jun-10 | Nov-10 | Jun-11 | Nov-11 |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 館山坂田  | D.   | 2.46   | 1.50   | 3.58   | 2.26   | 3.53   |
|       | s.d. | 3.10   | 2.14   | 4.58   | 3.46   | 4.19   |
|       | F.   | 2.38   | 1.01   | 1.52   | 1.62   | 2.12   |
|       | s.d. | 2.40   | 1.72   | 1.94   | 2.21   | 2.36   |

表 5 各定点観測ポイントにおける白化度[%]の推移

| ポイント名 | Dec-09 | Feb-10 | Jun-10 | Oct-10 | Jan-11 | Sep-11 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 竹富 N  | n.d.   | n.d.   | 0.10   | 0.10   | 0.08   | 0.34   |
| 竹富 NE | 0      | 0.34   | 0.42   | 0.16   | 0      | 1.09   |
| 竹富 E  | 0      | 0.44   | 0      | 0      | 0      | 0.20   |
| 石垣港 S | 0      | n.d.   | n.d.   | 0.33   | 0.20   | 0.85   |

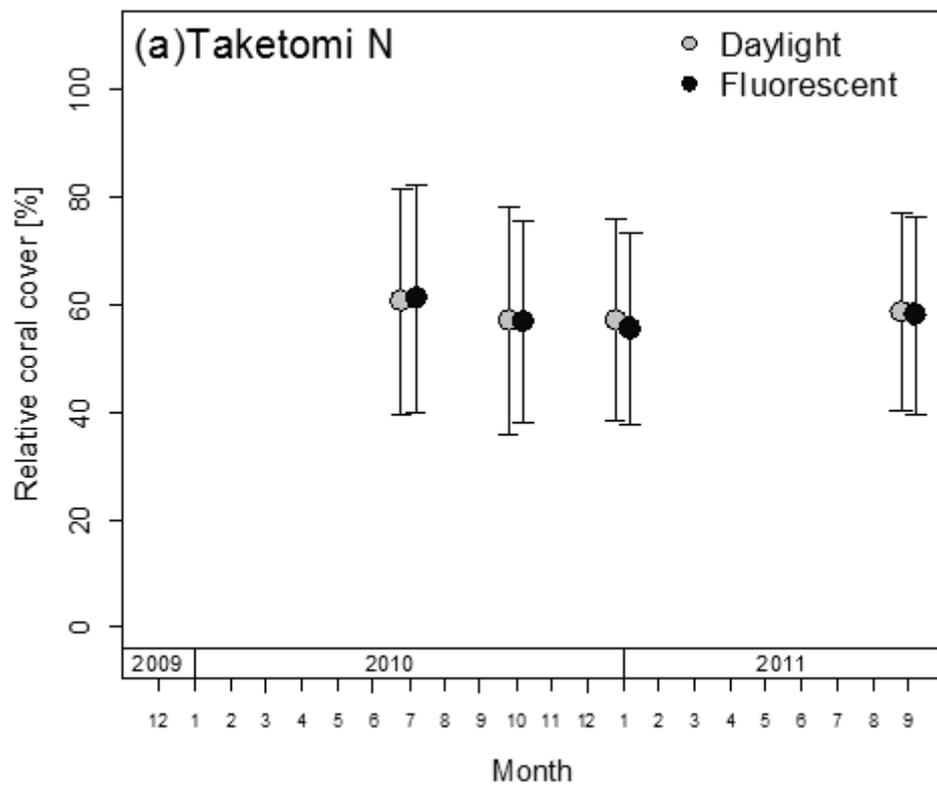


図 7 竹富 N ポイントにおけるサンゴ被度の季節変化

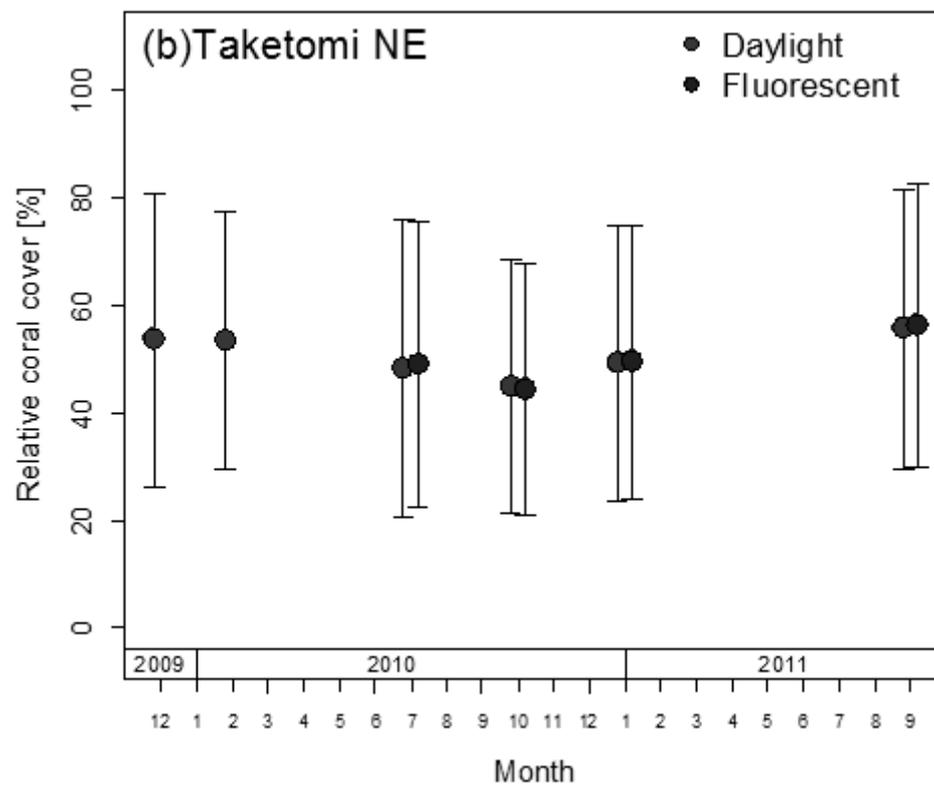


図 8 竹富 NE ポイントにおけるサンゴ被度の季節変化

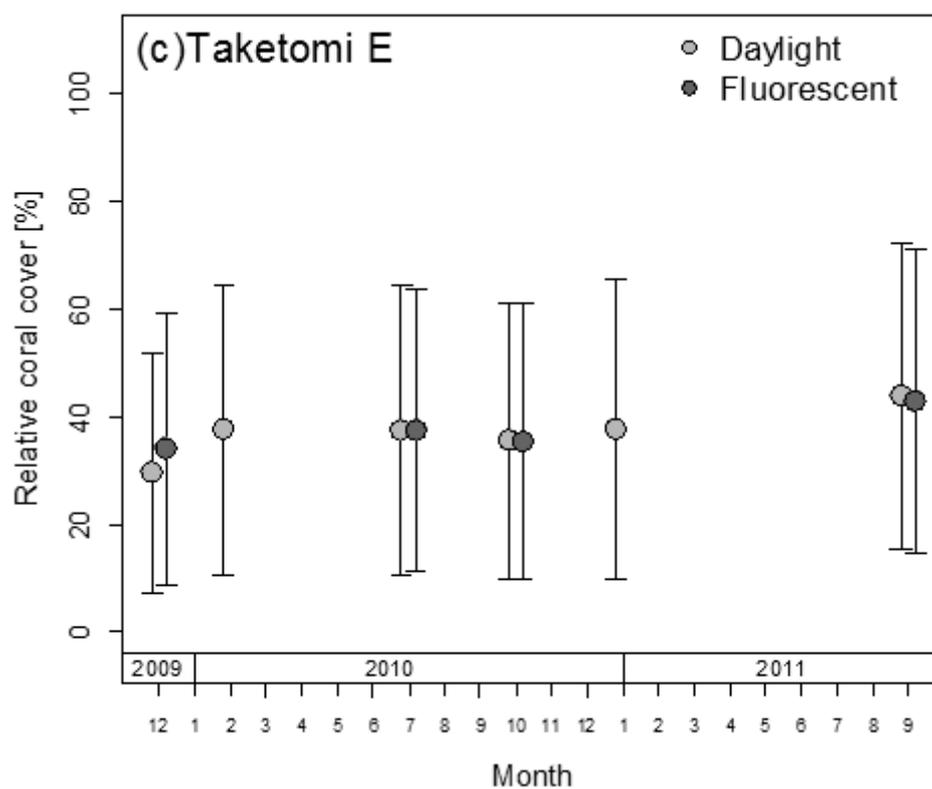


図9 竹富Eポイントにおけるサンゴ被度の季節変化

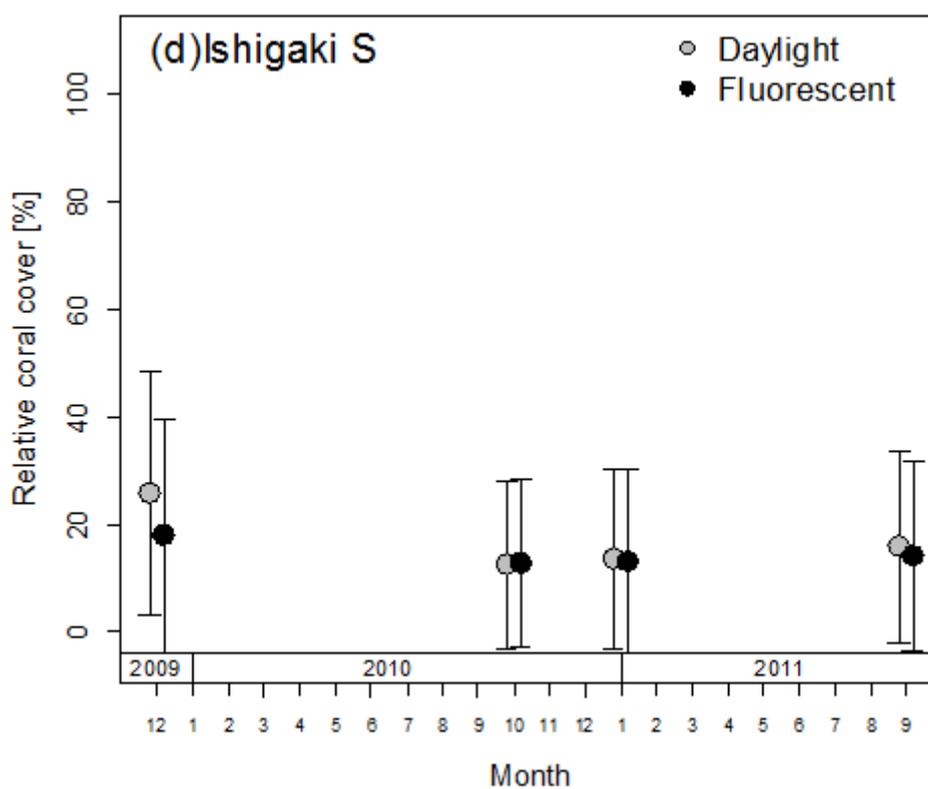


図10 石垣港Sポイントにおけるサンゴ被度の季節変化

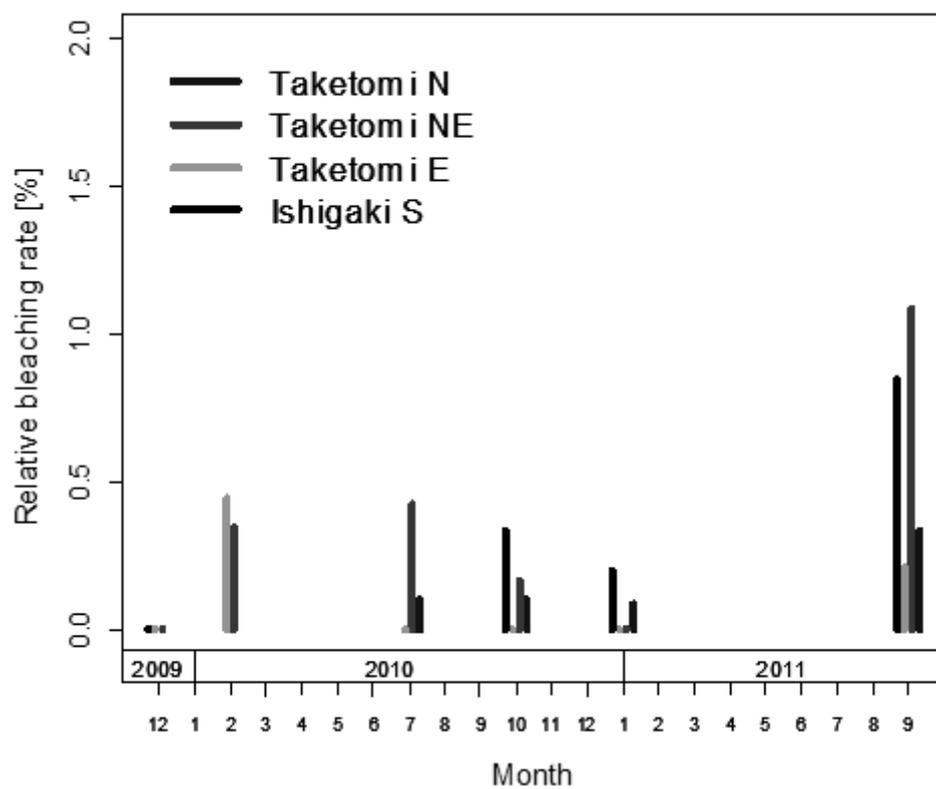


図 11 石垣島-竹富島周辺の定点観測ポイント（4地点）におけるサンゴ白化度の季節変化

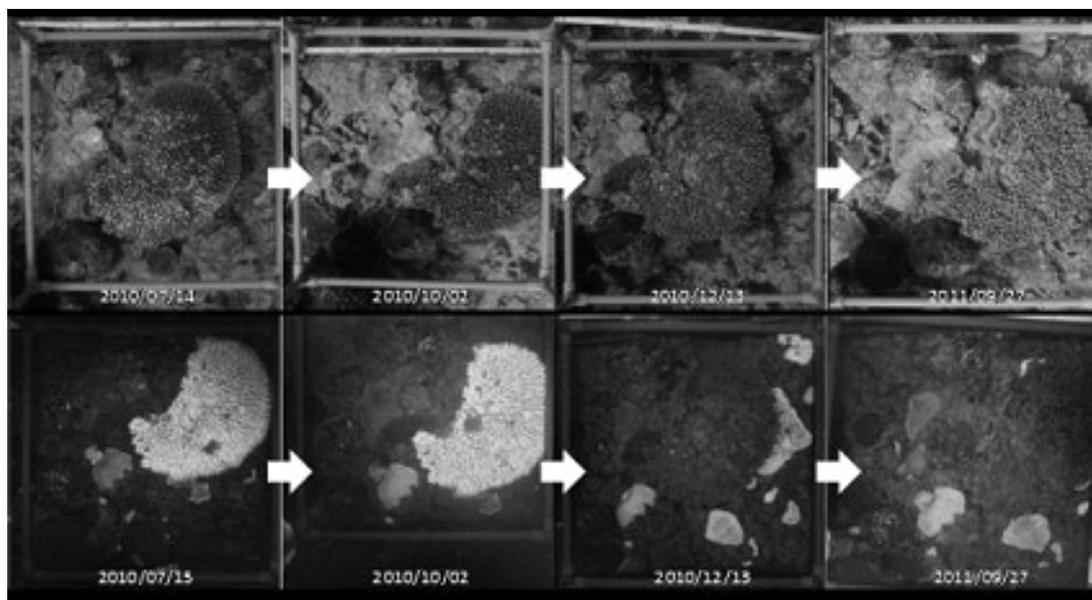


図 12 PHOTS（上段）および蛍光 PHOTS（下段）により撮影した同一のミドリイシ *Acropora* sp. 群体の季節変化

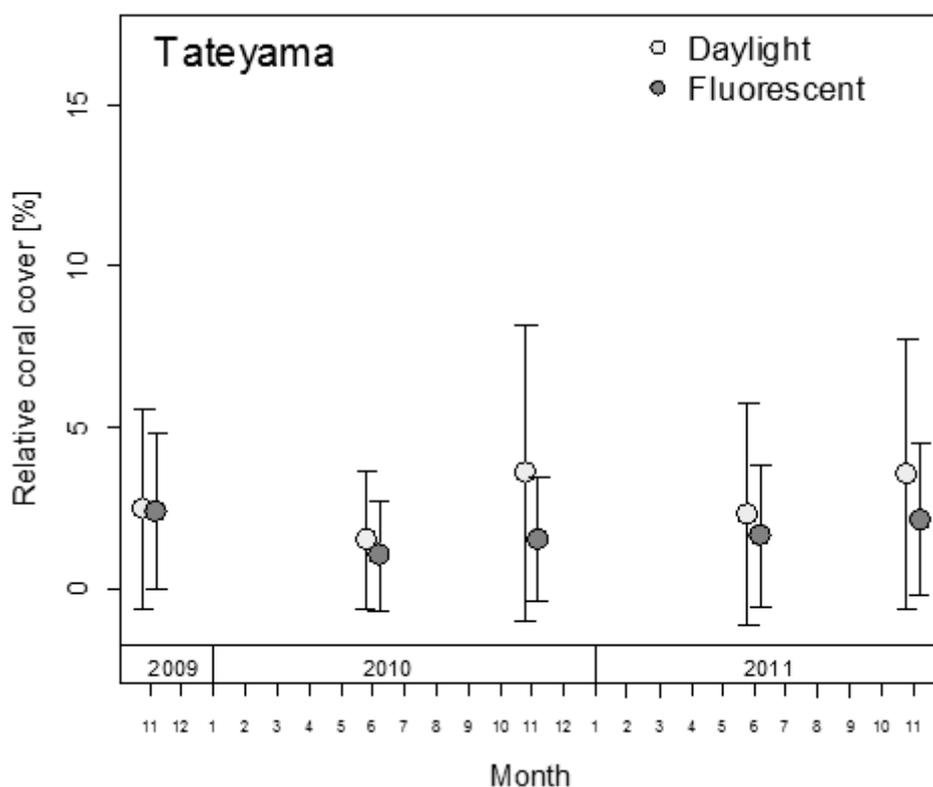


図 13 千葉県館山市坂田地先におけるニホンアワサンゴ *A. japonica* 被度の季節変化

#### ⑤紫外励起蛍光スペクトル観測手法

白化したサンゴの蛍光特性を検証することを目的として、石垣港 S ポイントにおいて、明瞭な白化が見て取れた 2 種のサンゴ群体（ダイオウサンゴ *Diploastrea heliopora* およびコカメノコキクメイシ属 *Goniastrea* sp.）の紫外励起蛍光スペクトル測定を行った。この測定には、励起光源として UV-LED（日亜化学社製 NCSU033AT、波長  $365 \pm 5$  nm）、受光装置として小型分光器（Ocean Optics 社製 Jaz）を、防水ハウジングに実装したものを使用した。UV 励起光を光ファイバ（Ocean Photonics 社製多線光ファイバ）に導入し、先端のプローブを手持ちにて白化群体の上約 1 cm の距離に近づけて照射し、群体からの蛍光を同プローブ受光部で受光して、受光用光ファイバを通して分光器に導入することで、スペクトルを記録した。図に、この測定の概略を示す。測定の波長範囲は 300-800 nm、波長分解能は 1 nm である。この測定は、太陽背景光の影響を避けるため、日没直後に実施した。

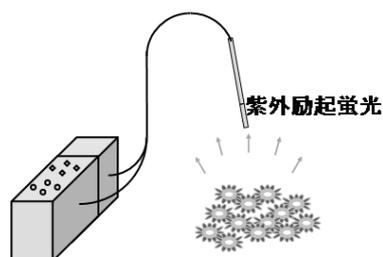


図 14 白化群体の紫外励起蛍光スペクトル測定の概略図

## ⑥紫外励起蛍光スペクトル観測結果

スペクトル測定を実施した 2 群体は、どちらも白色光下では、明瞭な色素消失を示していたが、夜間の紫外励起画像では青-緑色蛍光を示した。また、小型分光器により測定された紫外励起蛍光スペクトルを見ると、どちらの群体にも見られた 2 つのピークの内、680 nm 付近の蛍光は、共生藻類のクロロフィル a による蛍光であると考えられ、一方 500 nm 付近の蛍光は、群体が持つ蛍光タンパク質に由来すると考えられる。H22 年度まで、健全に見える群体と死滅した骨格について紫外励起蛍光スペクトルを測定し、健全な群体では 500 nm 付近と 680 nm 付近に 2 つのピークが見られたが、死滅した骨格では 500 nm 付近のピークは見られなくなった。H23 年度の結果は、健全な群体と同様に蛍光スペクトルに 2 つのピークが見られた。サンゴの白化は、サンゴからの共生藻類および藻類の光合成色素の消失により、白色の骨格が透けて見える現象であり、死滅していなければサンゴそのものの組織が存在する。サンゴの蛍光タンパク質は、サンゴの組織、特に外胚葉組織に含まれることが報告されている事から、白化段階の群体では組織を有し、蛍光タンパク質が存在するため、500nm 付近に蛍光のピークを示す可能性が高いと考えられる。すなわち、サンゴの蛍光特性を画像からの群体識別に適用する場合、群体の死滅を検出することは可能であるが、白化の識別には白化の程度や白化の進行状況の違い等、詳細な検証が必要であると考えられる。

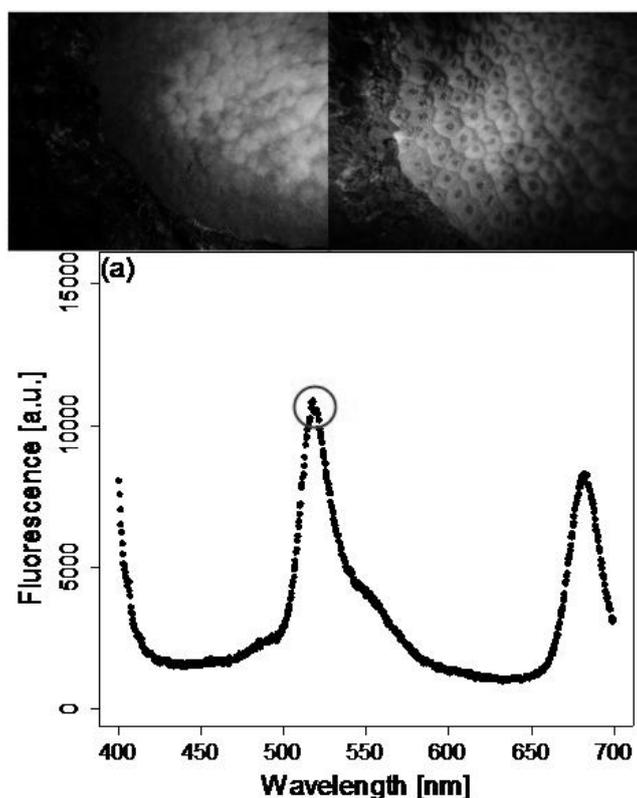


図 15 白化したダイオウサンゴ *Diploastrea heliopora* の白色灯画像（左上）および紫外励起蛍光画像（右上）と紫外励起蛍光スペクトル（下）

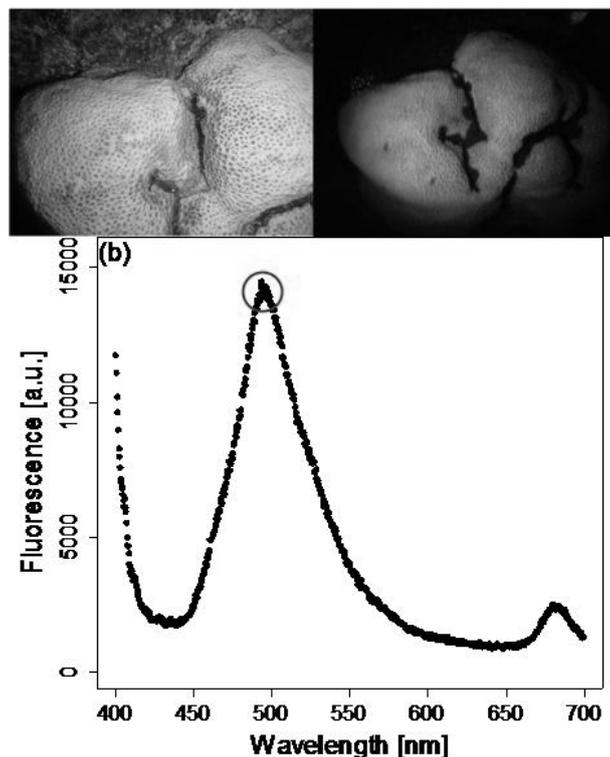


図 16 白化したココメノコキクメイシ属 *Goniastrea* sp. の白色灯画像（左上）  
および紫外励起蛍光画像（右上）と紫外励起蛍光スペクトル（下）

## (2) 船舶によるサンゴモニタリング手法の確立および調査

船舶によるサンゴモニタリング手法は、従来手法であるダイバー調査手法と衛星リモートセンシング手法の中間的観測領域および中間的モニタリング精度を担うことを期待できる新しい手法であり、本研究で用いる3つのモニタリング手法の連携の要となる手法である。船舶観測は、太陽高度・雲量に影響されず、波浪・潮流等にも影響されにくい観測法であるため、安定して広範囲を連続的に観測することが期待できる。本モニタリング手法が確立されることにより、各手法による連携が強化され、局所的で詳細なダイバー調査のデータから、広域的（全球的）で低解像度の衛星リモートセンシングのデータまでを一連のデータとして取り扱うことを目指す。本研究では、船舶搭載型イメージング蛍光ライダー装置を開発し、船体位置・姿勢計測機能、音響式水深計測機能を追加し、データ収集システムおよび船舶搭載用フレーム等も改良して、サンゴ観測性能を高めた。また、この装置の観測性能評価を、試験水槽（海技研深海水槽）で実施し、静水・清水での観測性能を確認した。さらに、沖縄県石垣島・竹富島周辺の定点観測ポイントを含む海域において、船舶ライダー観測を実施し、サンゴ調査データ（観測時刻、緯度経度、水深、サンゴ蛍光イメージ、サンゴ被度）を取得した。また、船舶によるサンゴ以外の海洋環境観測として、投入式CTDセンサーを用いて、沖縄県石垣島・竹富島の定点観測ポイント周辺海域の海洋環境データ（観測時刻、緯度経度、水深、水温、塩分、濁度、クロロフィル濃度、pH）を取得した。これらの研究成果について、本節で詳細説明を記す。また、図に、イメージング蛍光ライダー観測法の概要を示す。