

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。

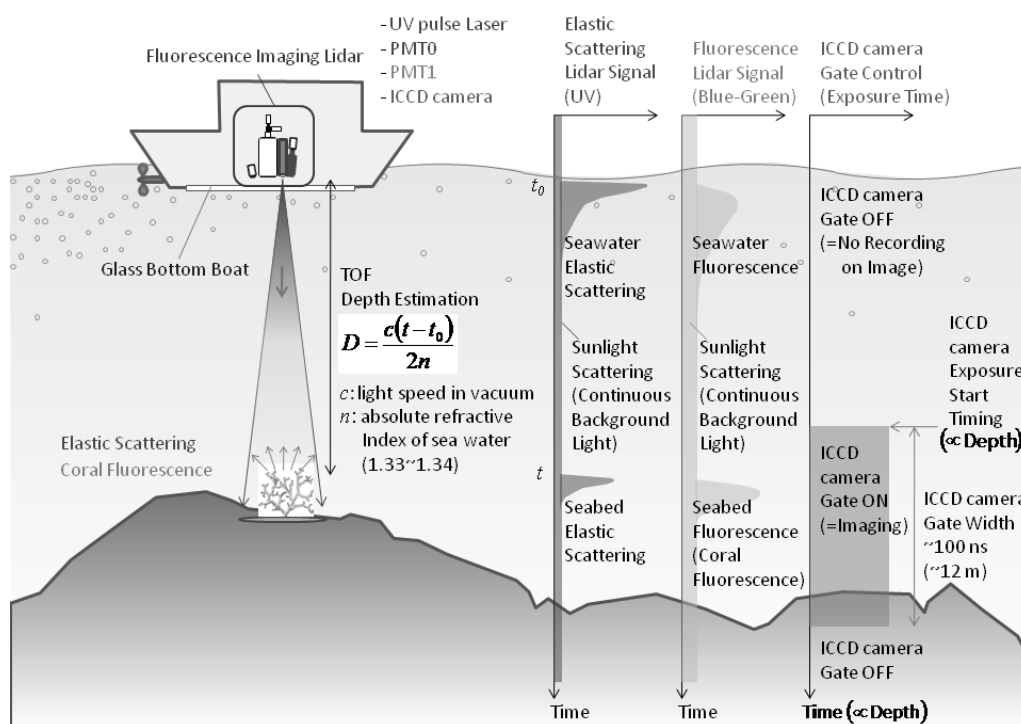


図 17 イメージング蛍光ライダー観測法の概要図

①船舶搭載型イメージング蛍光ライダーシステムの高度化

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た。また、この装置によるサンゴモニタリングの性能を向上するための高度化作業を進めた。具体的には、システムに以下の機能を付加した。

**船体位置姿勢計測：** DGPS 装置により、自船の位置を誤差 1m 程度で観測することが可能である。通常、海底観測方向は自船の直下であるとし、自船の緯度経度を海底観測位置として利用することができる。しかし、水深が深く、自船の船体動揺（ピッチ・ロール）が大きい場合、自船の位置と海底観測位置にずれが生じる。この問題を解決するために、DGPS アンテナ 3 台を用いた船体位置・姿勢計測装置を導入した。この装置は、3つの DGPS アンテナを L 字型に配置し、それぞれの DGPS 受信信号の差分を取ることによって、正確な時刻および誤差 1m 程度の位置情報に加えて、ピッチ・ロール・ヨーの姿勢情報を得ることができる。姿勢計測の際は、GPS 衛星および SBAS 衛星からの信号を受信できることが条件となるが、沿岸での船舶観測を目的とする本研究においては、上空に障害物がないため、計測に問題はない。また、姿勢計測精度は、アンテナ 3 台の基線長に依存する。船上において 5m 程度の基線長で設置した場合、誤差は 0.3°程度である。通常、姿勢計測は屋内でも使用可能なジャイロスコープ等を用いるが、得られる計測値が相対値であり、長時間計測ではヨー値のドリフトが顕著になるという問題点があった。本装置では、絶対値が得られるため、ヨー値のドリフト問題が発生しないというメリットがある。

**音響式水深計測：** 蛍光ライダー装置では、往復時間計測によるレーザー測深を行うこと



表 6 サンゴモニタリング用船舶搭載型イメージング蛍光ライダー装置の  
構成機器と諸元

紫外パルス レーザー (Quantel CFR400) <sup>15)</sup>	タイプ	Nd:YAG (THG)
	波長	355 nm
	エネルギー	90 mJ/パルス
	パルス幅	9 ns
	繰り返し	10 Hz (max)
	拡がり角調整機	45~350 mrad (調整可能)
ゲート機能付 ICCD カメラ (浜松ホトニクス C10054-22) <sup>16)</sup>	タイプ	I.I.・CCD・電源一体型、 光電面 GaAsP、 MCP2 段、常時 OFF
	量子効率	50% (Typ)
	映像ゲイン	5*10 <sup>6</sup> (Typ)
	測定波長域	280-720 nm
	最大感度波長	530 nm
	CCD 画素数	768×494
集光レンズ (フジノン C22-17A-M41) <sup>17)</sup>	タイプ	C マウント 大口径ズームレンズ
	口径	70 mm
	測定波長域	可視光域
	ICCD カメラの視野角	ワイド時：38° ズーム時：2°
遅延信号発生装置 (浜松ホトニクス C10149) <sup>18)</sup>	タイプ	TTL 信号発生機
	チャンネル数	3 Ch
	最小制御パルス幅	100 ns
ゲート機能付 PMT (浜松ホトニクス H10304-00NF) <sup>19)</sup>	タイプ	PMT・電源一体型、 光電面 GaAsP、 常時 OFF
	ゲイン	2*10 <sup>6</sup> (max)
	測定波長域	290-540 nm
	最大感度波長	420 nm
集光鏡 (ビクセン VMC200L) <sup>20)</sup>	タイプ	カタディオプトリック式反 射望遠鏡
	集光鏡直径	200 mm
	焦点距離	1950 mm
DGPS 測位機 (Septentrio PolaRx2e@) <sup>21)</sup>	タイプ	1 周波 SBAS 補正 GPS 受信 3 アンテナ システム
	水平位置計測精度	1 m 程度
	姿勢計測精度	0.3°程度
ソナー測深機 (タマヤ計測システム TDM-9000B) <sup>22)</sup>	水深計測可能範囲	1~100 m
	水深計測精度	0.02 m 程度



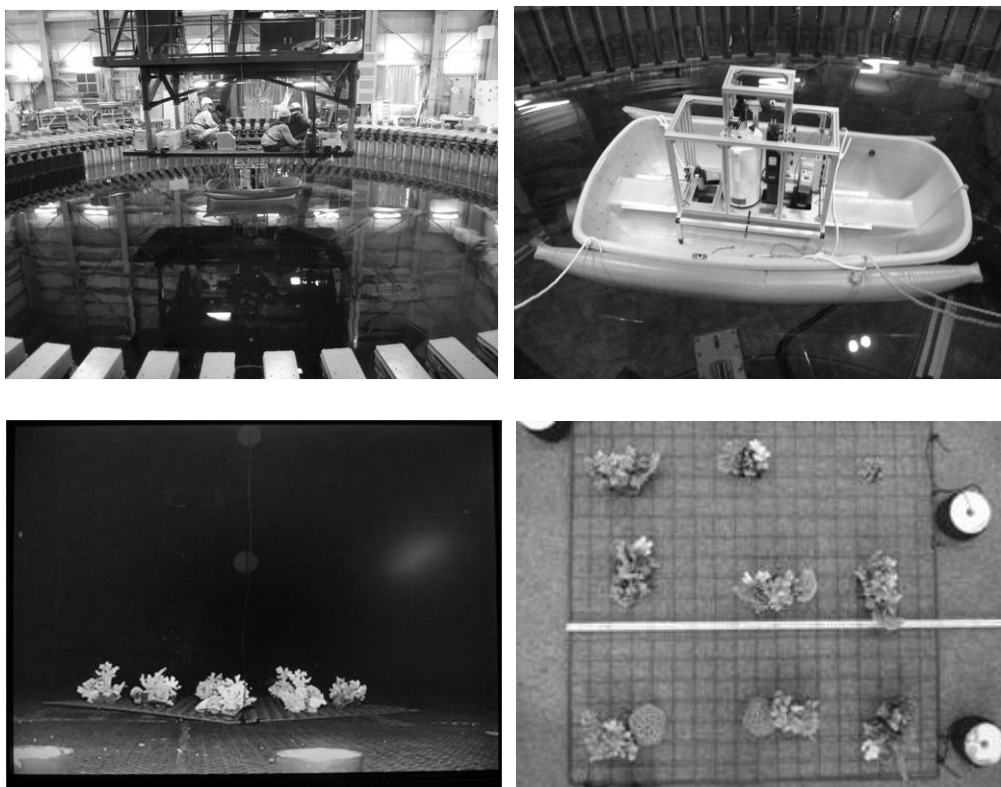


図 20 深海水槽実験の写真

下図に示すように、水深 5.5 m でターゲットの蛍光イメージが鮮明に観測可能であり、画角の変更もできていることがわかる。

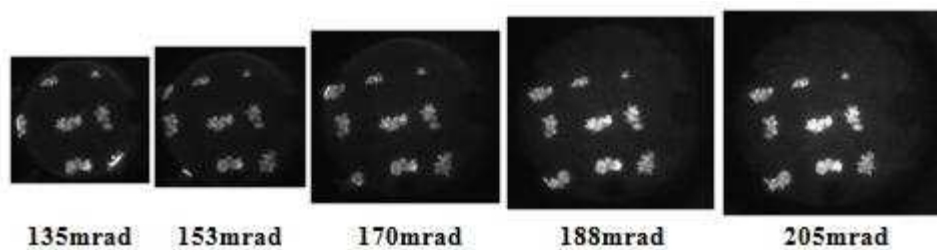


図 21 深海水槽実験、水深 5.5 m 疑似サンゴターゲットのイメージング蛍光ライダー観測画像（画角 135～205 mrad で調整）

また、水深を 5.5 m から 2.5 m ずつ深くする実験（初回だけ 2 m）では、水深 17.5 m および水深 20.0 m の蛍光イメージにおいてターゲット確認が難しく、水深 15 m 程度まで鮮明な蛍光イメージの観測が可能であることが確認できた。

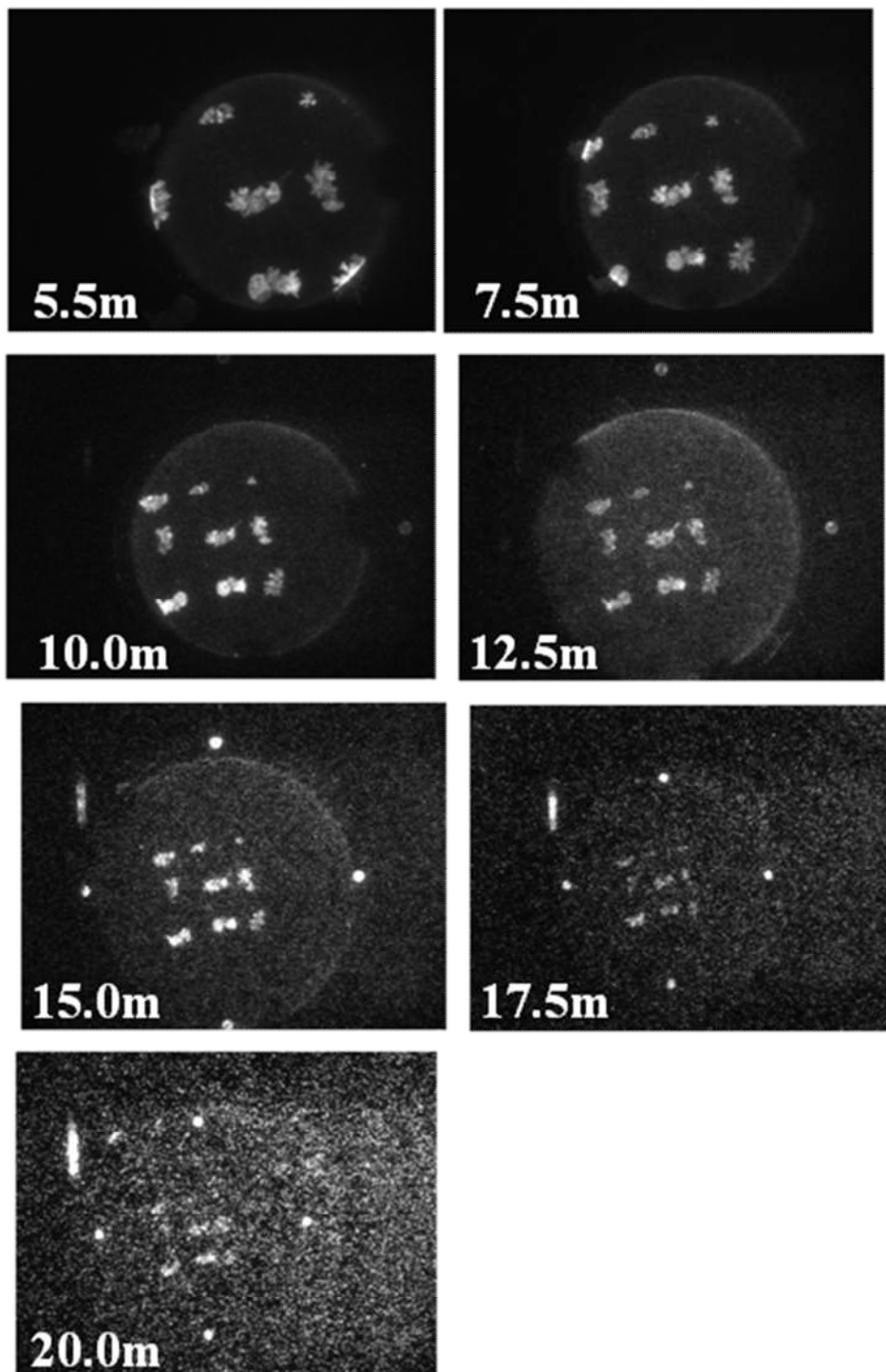


図 22 深海水槽実験、レーザー拡がり角 135 mrad の疑似サンゴターゲットのイメージング蛍光ライダー観測画像（水深 5.5～20.0 m で調整）

H22 年度の深海水槽での同様の観測実験では、水深 30 m まで観測可能であったのに対し、H23 年度には水深 15 m までと観測可能水深が減じた理由は、H22 年 5 月時点には、レーザー拡がり角を約 45 mrad の固定としていたのに対し、H23 年 4 月時点には、レーザー拡がり角調整機の導入に伴って、レーザー拡がり角の最小値を約 135 mrad と約

3 倍に広げたことで、水底でのレーザー照射密度が減少したためと考えられる。この点に対応するため、試験水槽観測実験および実海域観測実験終了後の H23 年度末に、レーザー拡がり角の調整機構は残したまま、レーザー拡がり角の最小値を約 45 mrad にもどし、レーザー拡がり角調整の範囲を約 45~230 mrad とする装置改造を行った。

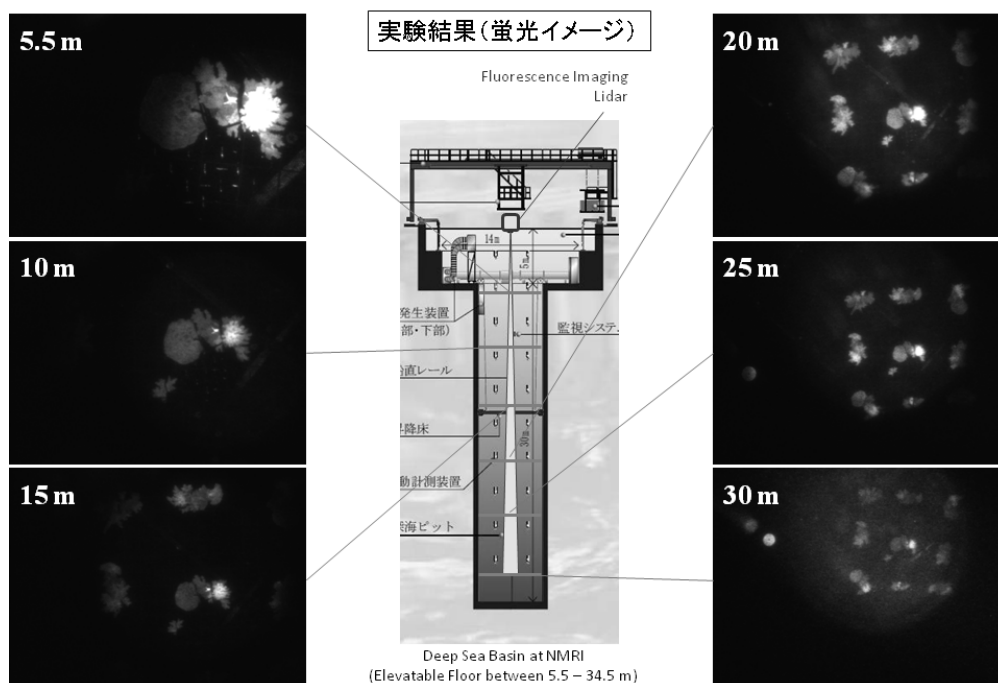


図 23 深海水槽実験、レーザー拡がり角 45 mrad の疑似サンゴターゲットのイメージング蛍光ライダー観測画像 (H22 年度実施、水深 5.5~30 m で調整)

以上の試験水槽での観測実験で、船舶を模擬した水面位置から清水を通して、水深 1 m から 15 m の範囲の疑似サンゴの観測で、鮮明な蛍光イメージを取得することが可能であり、水深に応じて蛍光イメージ画角の調整も可能であることを示した。なお、H22 年度の試験水槽の実験より、レーザー拡がり角が 45 mrad の状態では、水深 30 m まで疑似サンゴの観測が可能であることを確認している。

### ③実海域での観測実験及び性能評価

試験水槽にて、開発したイメージング蛍光ライダー装置の性能評価を行ったが、試験水槽での観測条件は、実際の実海域観測の条件と異なる点も存在する。イメージング蛍光ライダー装置による船舶観測にとって、試験水槽と実海域の違いについて重要と思われる条件を以下に挙げる。

船舶への装置取付状況、航行中の船体動揺、供給電源の安定度、太陽背景光の強度、ターゲットの蛍光発光効率、海水透明度、海水中の気泡、風雨・波飛沫対策、等。

これらの条件を含んだ観測性能の確認を行うため、造礁サンゴ生息海域において小型船舶に本システムを搭載し、実際にサンゴ観測を実施した。観測実験を実施した海域は、



以下の2カ所である。

- 沖縄県竹富町竹富島周辺海域（出航地：竹富港 N24°20.164'E124°05.667'）
  - （H22年度）実験期間：2011年1月18-20日
  - （H23年度）実験期間：2011年6月28-30日
  - （H23年度）実験期間：2011年12月13-15日
- 千葉県館山市坂田周辺海域（出航地：東京海洋大学館山ステーション N34°58.529'E139°46.175'）
  - （H23年度）実験期間：2011年10月25-27日

竹富島での船舶観測では、有限会社南西観光所有のグラスボートを用いた。また、館山での船舶観測では、東京海洋大学所有の海洋調査用小型船舶を用いた。現地でのライダー装置取付時の様子を図2-30に示す。船舶への装置取付は約2時間程度の設置作業および1時間程度の調整作業であった。ただし、館山では、上記実験期間中、海況が悪く、小型船舶を出航させることができなかった。このため、実海域で船舶観測により得られたサンゴ蛍光データは、全て竹富島周辺海域のものである。

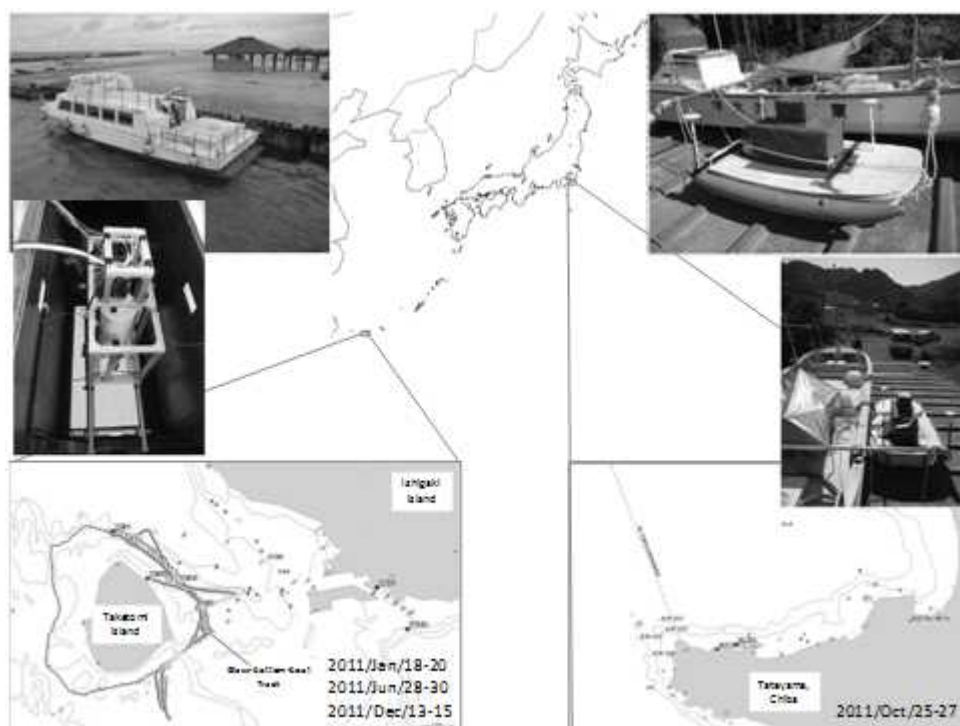


図 24 ライダー実海域観測実験の実施位置、概観および航跡

竹富島周辺海域で観測したサンゴ蛍光イメージを図に示す。これらの観測データから、上記に列挙した実海域条件をクリアし、日中に航行船舶からUV励起サンゴ蛍光イメージを取得できたことがわかる。また、蛍光イメージの中のサンゴ形状および蛍光コントラストより、サンゴの生死が判別できることもわかる。

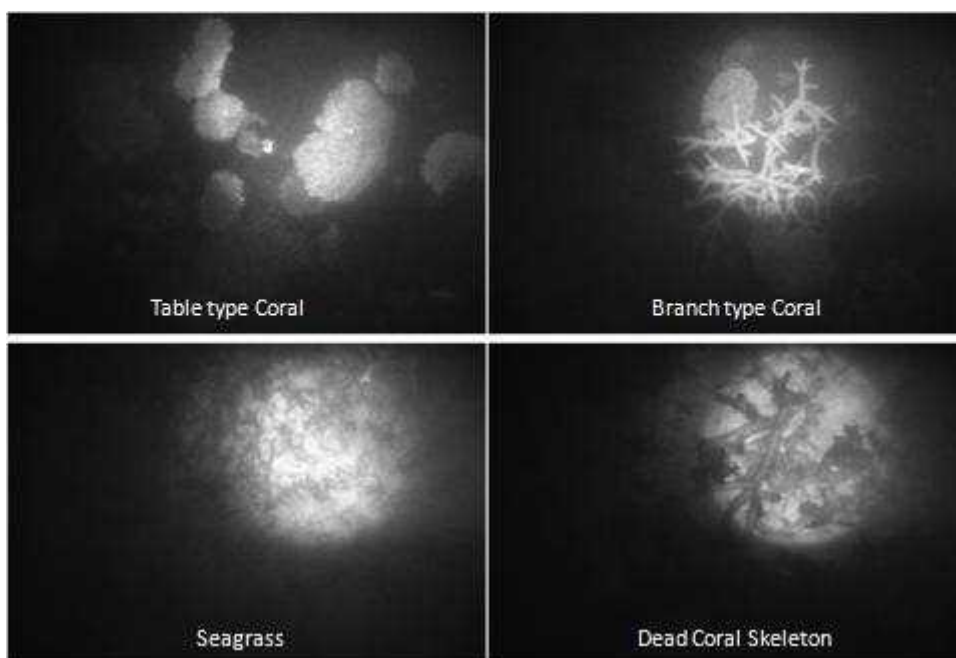


図 25 グラスボート搭載イメージング蛍光ライダー装置による  
実海域サンゴ観測例

(左上：生きた卓状サンゴ、左下：海草、右上：生きた枝状サンゴ、  
右下：死んだ枝状サンゴ骨格に海藻が付着したもの)

また、H22 年度に竹富島北東ポイントにて、同一サンゴに対して、ダイバー調査による日中コドラート写真、夜間 UV 励起蛍光コドラート写真、および日中イメージング蛍光ライダー観測画像の 3 枚の画像を比較し、夜間 UV 励起蛍光コドラート写真と日中イメージング蛍光ライダー観測画像の蛍光強度パターンが一致していることを確認している。

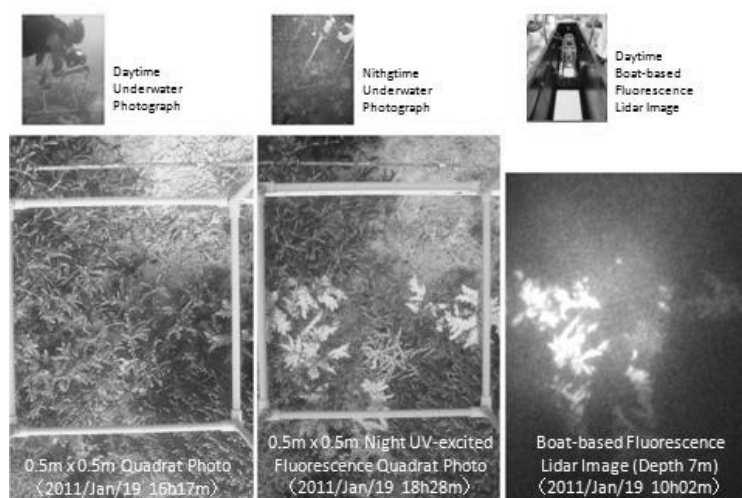
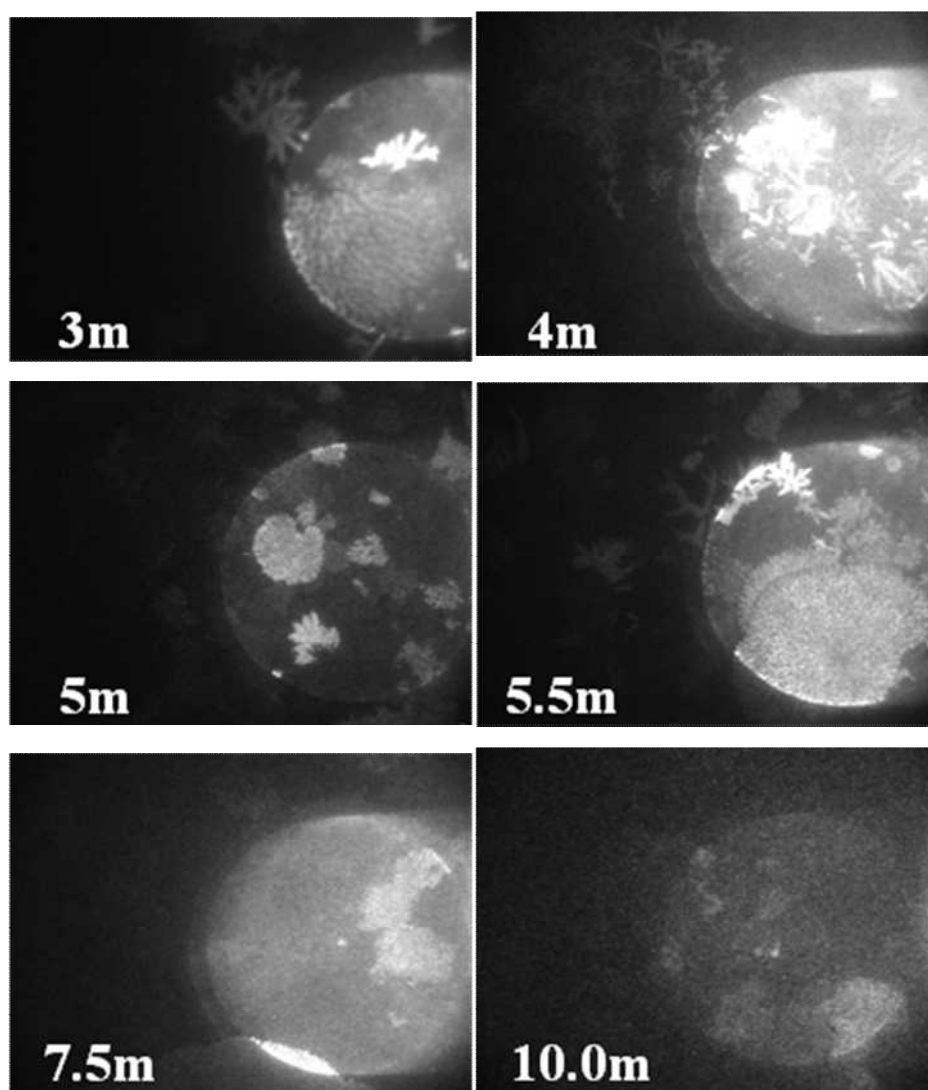


図 26 同一海域のサンゴ観測例

(左：日中コドラート写真、中：夜間 UV 励起蛍光コドラート写真、  
右：日中船舶搭載イメージング蛍光ライダー画像)

ソナー測深による水深毎のサンゴ蛍光イメージを図に示す。水深が深くなるにつれて、蛍光イメージの鮮明さが低下していくことが見て取れる。これは、海水中でレーザー励起光やサンゴ蛍光が散乱され、蛍光イメージに霧がかかったような状態になるためと考えられる。従って、海水の濁度が高い状態では、海水中に散乱物質が多いため、浅い海域のみ観測可能となる。逆に海水の透明度が高い状態では、海水中に散乱物質が少ないため、深い海域まで観測することが可能である。また、2011年12月の観測時には、レーザー拡がり角を約135 mradに調整して観測を行った。これは、2011年1月の観測時のレーザー拡がり角約45 mradの約3倍である。この状態で、水深10m程度までサンゴ蛍光イメージの観測が可能であることが図から見て取れる。このレーザー拡がり角を絞り込めば、蛍光イメージの画角は狭まるものの、観測可能深度をさらに深くすることができる。



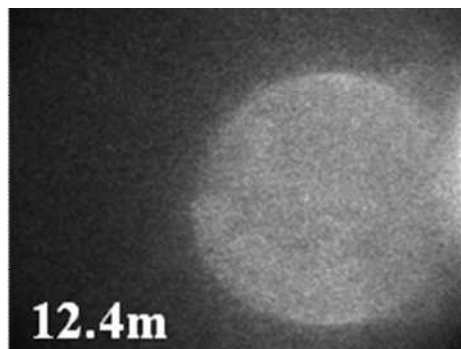


図 27 グラスボート搭載イメージング蛍光ライダー装置による  
 深度毎の実海域サンゴ観測画像例  
 (2011年12月14日、レーザー拡がり角 135 mrad)

2011年12月の船舶観測実験で、DGPSシステムにより観測したグラスボートの位置(緯度・経度)と、姿勢(ロール・ピッチ・ヨー)及びソナーにより観測した水深を図に示す。これらの合成により、海底観測方向の鉛直方向からのずれ(Off-Nadir角)の推定および海底観測位置の推定が可能となる。実際には、上記観測期間中、船体動揺は標準偏差 $2^{\circ}$ 以下であったため、Off-Nadir角のサンゴ蛍光イメージへの影響はほとんど無視できる程度であった。また、船体位置観測誤差が約1 m、船体姿勢観測誤差が約 $0.3^{\circ}$ 、水深観測誤差が約2 cmとなっており、上記観測期間中の平均水深が約10 mであったことから、海底観測位置の推定誤差に対しては、船体位置観測誤差の寄与がほとんどを占めることがわかる。

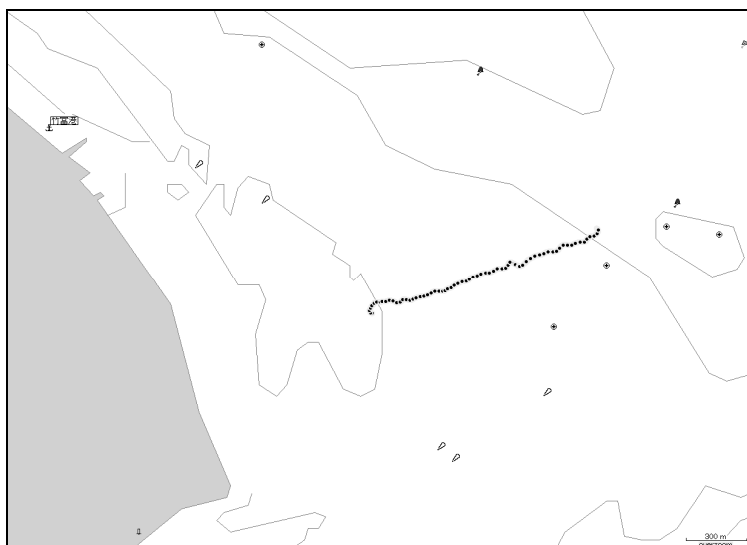


図 28 グラスボート搭載イメージング蛍光ライダー装置による  
 サンゴ観測位置 (2011年12月14日 10:42-11:05)

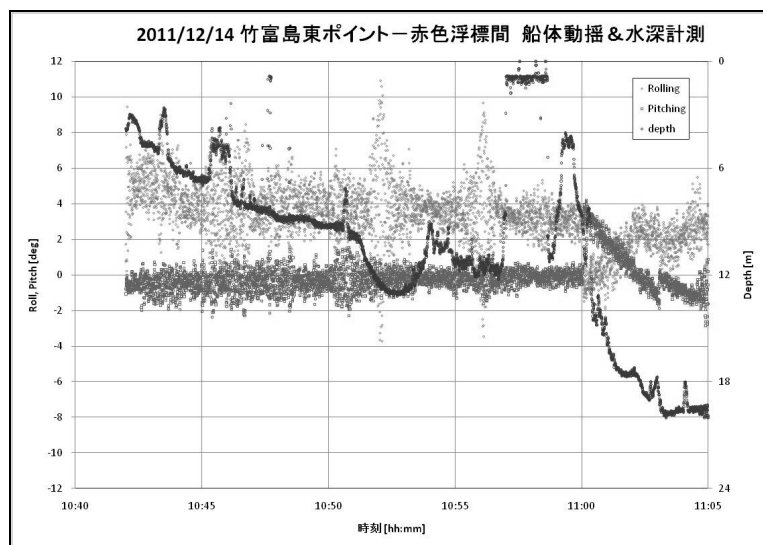


図 29 グラスボート姿勢（ロール、ピッチ、ヨー）及びソナー測深値（2011年12月14日10:42-11:05）

以上の実海域での観測実験で、船舶の位置・姿勢および水深を計測できることを確認した。また、日中の航行船舶から海水を通して、水深3 mから10 mの範囲のサンゴの蛍光イメージを取得できることが確認できた。なお、レーザー拡がり角は2011年12月の観測実験時には135 mradであったが、実験終了後、45 mradまで調整できるように改造したため、同条件での観測可能水深の範囲はより深くなっていると考えられる。さらに、取得した蛍光イメージの形状およびコントラストから、サンゴの生死判別が容易にできることが確認できた。

#### ④船舶搭載型イメージング蛍光ライダーによるサンゴ調査結果

航行船舶によるサンゴ観測として、竹富島周辺海域で3回の観測実験を行った。

- 2011年1月18-20日（竹富島周辺海域）
- 2011年6月28-30日（竹富島周辺海域）
- 2011年12月13-15日（竹富島周辺海域）

1月・6月・12月の3回の観測のうち、1月だけは蛍光イメージの画角が45 mrad（固定）であり、他の2回は主に135 mradの画角で観測を実施した。また、12月の観測のみ、従来のライダー観測に加えて、船体姿勢計測とソナー測深も同時計測を実施した。ライダー観測時の船体位置のマップ（航跡）を図に示す。



図 30 2011 年グラスボート搭載イメージング蛍光ライダー観測の位置  
(2011 年 1 月 18~20 日、6 月 28~30 日、12 月 13~15 日)  
及びダイバー調査の定点観測ポイントの位置

上記の 3 つの観測期間中、観測比較の容易な、ダイバー調査の定点観測ポイント（竹富島東ポイント）から東北東へ約 1 km の長さの観測線に沿った観測データについて、データ解析を実施した。このときの観測位置を図に示す。

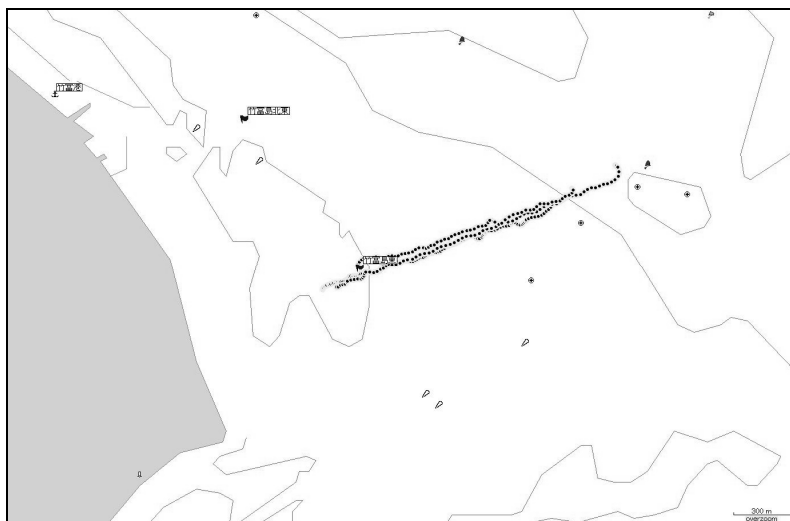


図 31 2011 年グラスボート搭載イメージング蛍光ライダー観測データの  
解析位置 (2011 年 1 月 18~20 日、6 月 28~30 日、12 月 13~15 日)  
及びダイバー調査の定点観測ポイントの位置

蛍光イメージの解析方法は、画像中に蛍光強度の強いサンゴが映っているかどうかで、生きたサンゴがいるかどうかを解析者が判断した。また、生きたサンゴが映っている場

合は、それが卓状サンゴ、枝状サンゴ、塊状サンゴのどれに当たるかを蛍光イメージから判断した。一方、生きたサンゴ以外の場合は、砂、岩、死んだサンゴ骨格のがれき、海藻・海草、魚、何が映っているか判定できない（イメージング蛍光ライダーの観測可能範囲外の場合を含む）のどれに当たるかを蛍光イメージから判断した。

解析の結果をマップ上に表したものを、図に示す。卓状サンゴ、枝状サンゴ、塊状サンゴ等の生きたサンゴを濃く大きな丸でプロットしている。また、砂、死んだサンゴ骨格のがれき等を白く小さな丸でプロットし、何が映っているか判定できない場合については、何もプロットしていない。また参考のため、同じ図に、海岸線データ、低潮位線データ、等深線データ、および2011年8月14日撮影のWorldView-2衛星画像と、ダイバー調査の定点観測ポイントを合わせて表示する。

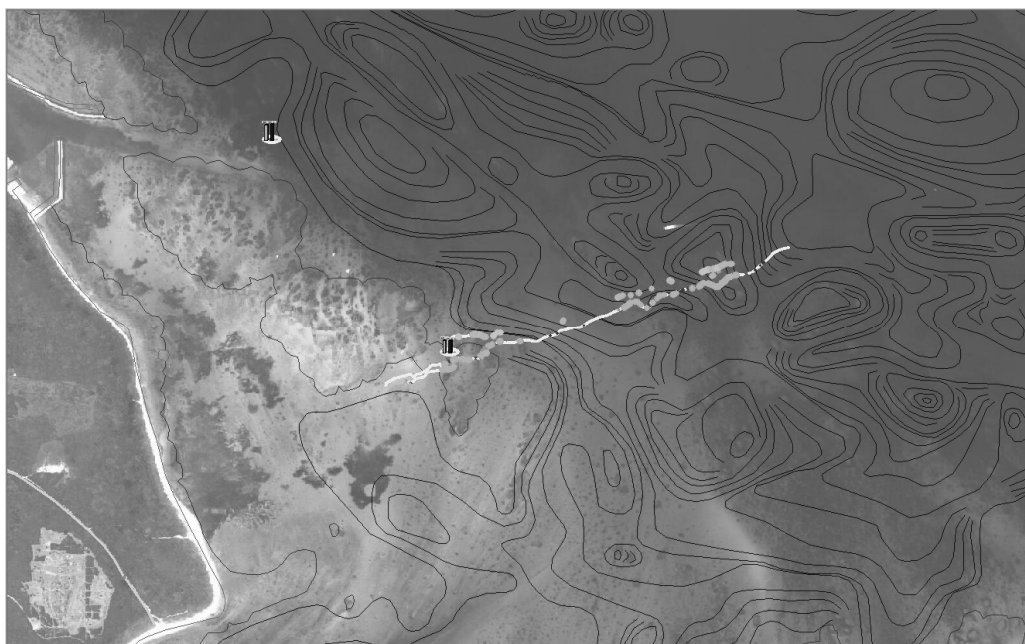


図 32 2011 年の 3 回のイメージング蛍光ライダー観測による  
竹富島東海域のサンゴ分布プロット

3回の観測実験について、サンゴ分布の時間変化を出すためには、同じ海底地点について比較する必要があるが、3回の観測はそれぞれ距離 10 m 程度のずれが見られ、同一地点の観測はできていないことがわかる。これは、海上の観測船にとって航行のための目標物がないこと、及び波浪・潮流・海上風等の影響により、操船者にとって同一海底上を航行することが難しいために生じたものである。このため、観測期間中、比較的海水透明度が高く、レーザー拡がり角も狭く設定していた1月のデータのみを用いて、深い観測点を含む海域についてサンゴ被度解析を行った。

サンゴ被度は、観測する海底の面積（水平投影面積）に対する、生きたサンゴの覆っている面積（水平投影面積）の比率として定義される。従って、船舶搭載イメージング蛍光ライダーで観測した蛍光イメージの、それぞれの画像データに対して、観測面積と生きたサンゴの被覆面積の比率を出す手法が、最もサンゴ被度の定義に忠実な解析方法と考えられる。H22年度に開発した同手法を図に示す。

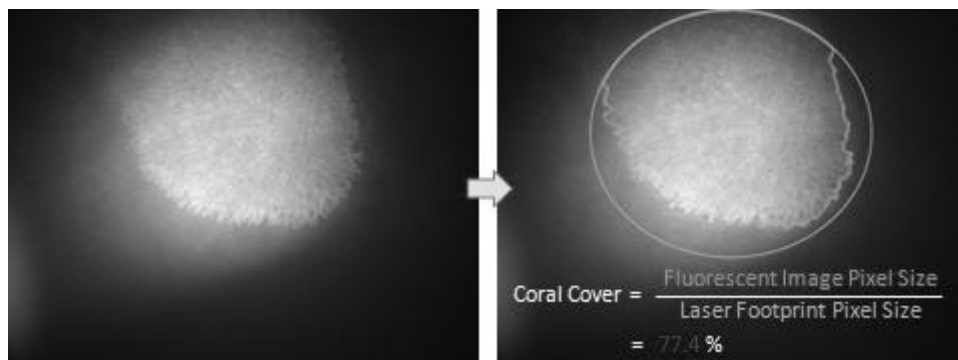


図 33 1 枚の蛍光イメージからのサンゴ被度算出方法

また、H23 年度には、広域のサンゴ分布を解析するための、新たな解析手法を開発した。船舶搭載イメージング蛍光ライダー観測によるサンゴ被度分布解析のため、まず、調査海域を適当な大きさ（緯度  $0.0001^\circ$ （約 11.1 m）刻み、経度  $0.0001^\circ$ （約 10.2 m）刻み）のメッシュ状に分割した。次に、得られた蛍光イメージについて、ライダー観測時刻と DGPS 情報から、観測場所を特定した。その上で、海底の蛍光イメージ中に生きたサンゴが観測されていれば①、観測されていなければ②、蛍光イメージ中に海底の様子が何も確認できなければ③と判定し、それぞれのメッシュエリアの中に分類される観測回数の比率、① / (① + ②) の値を、蛍光ライダーで観測するサンゴ被度とした。このサンゴ被度算出方法は、本来の定義や、ダイバー観測によるこれまでのモニタリング法とは異なる部分が存在する。しかし、船舶観測による簡易的なサンゴ被度観測法として、広域に適用するためには妥当な手法と考え、上記解析法を採用した。本観測期間中、船舶の航行速度は約 0.8 m/s であったため、それぞれのメッシュエリアを通過する際の観測点数は、平均的に 13 点程度であった。また、レーザー拡がり角が約 45 mrad であることより、例えば水深 10 m 地点でのライダー観測による海底蛍光イメージの直径は、約 0.45 m となる。このライダー観測およびサンゴ被度解析法によるサンゴ被度マップを表したものを図に示す。サンゴ被度が高いほど、濃い表示となっている。

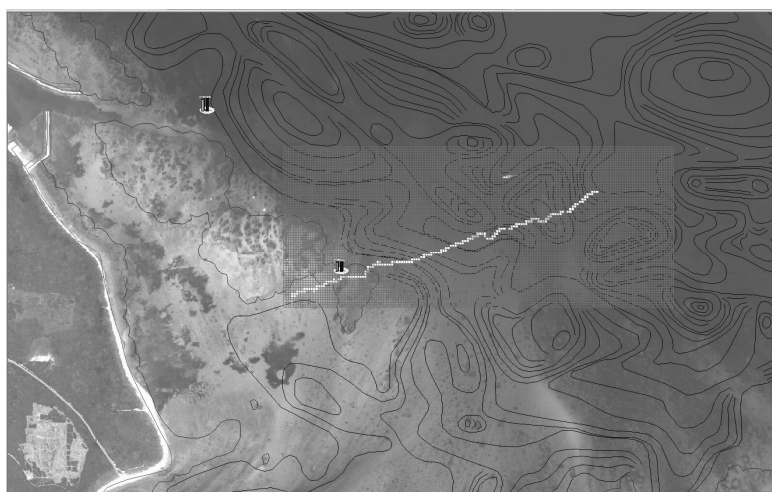


図 34 2011 年 1 月 20 日のイメージング蛍光ライダー観測による竹富島東海域のサンゴ被度マップ



## ⑤CTD センサーによる海洋環境調査結果

本研究では、サンゴ連携モニタリングの体制整備を行うことで、将来的に、海洋温暖化および海洋酸性化のサンゴへの影響評価を可能にすることを目的としている。このため、サンゴのモニタリングだけでなく、サンゴの周囲の海洋環境についても、同時にモニタリングを実施する体制が必要である。本研究では、投入式 CTD センサーを用意し、主に定点観測ポイント周辺海域において、停船中の船舶から海洋環境データ（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）を海面から海底までの鉛直プロファイルとして取得した。CTD センサーの諸元を表に示す。

表 7 投入式 CTD センサーの諸元

メーカー名	型番	計測項目	計測範囲	計測精度
JFE アドバンテック	ASTD102 <sup>23)</sup>	深度	0～600 m	±0.3 %
		水温	-5～40 °C	±0.01 °C
		塩分	0～40 ‰	±0.01 ‰
		クロロフィル	0～400 ppb (ウラニン基準)	±1 % または±0.1 ppb
		濁度	0～1000 FTU (ホルマジン基準)	±2 % または±0.3 FTU
IDRONAUT	Ocean Seven 305 <sup>24)</sup>	深度	0～1000 m	±0.05 %
		水温	-1～50 °C	0.005 °C
		pH	0～14 pH	0.01 pH

CTD 観測は、ダイバー調査および船舶観測で、船舶により定点観測ポイント付近に行く毎に実施した。深度毎に以下の 5 項目（2010 年 10 月までは 4 項目）を観測し、H22 年度および H23 年度の合計で 34 キャストの観測データを得た。

（水温、塩分、濁度、クロロフィル濃度）

- 2010 年 7 月 13～14 日（4 キャスト）
- 2010 年 10 月 1～3 日（4 キャスト）

（水温、塩分、濁度、クロロフィル濃度、pH）

- 2010 年 12 月 13～14 日（9 キャスト）
- 2011 年 1 月 19～20 日（4 キャスト）
- 2011 年 6 月 29 日（5 キャスト）
- 2011 年 9 月 27～30 日（5 キャスト）
- 2011 年 12 月 15 日（3 キャスト）

これらの観測結果として、水温の鉛直分布は、深度 0.5 m 以深ではほとんどのケースで海面付近も海底付近もあまり変化がないという結果が得られている。一方で、水温の季節変化が大きいこと、濁度・クロロフィル濃度にも季節変化が見られ、冬季の方が海水の濁度が低い（透明度が高い）こと等が CTD 観測データとして得られている。イメージング蛍光ライダーの観測にとって、海水透明度の影響は大きいこと、イメージング蛍光ライダーによるサンゴ観測は冬季の方が有利であることがわかる。