

船舶観測による広域サンゴモニタリングに関する研究

- (1) 船舶搭載型イメージング蛍光ライダー装置によるサンゴ観測技術の整備
- (3) 国内造礁サンゴ生息海域の広域サンゴ船舶観測

独立行政法人海上技術安全研究所

水中工学センター

篠野雅彦・今里元信・

大西世紀・岡本章裕

海洋リスク評価系 システム安全技術研究グループ

澤田健一

洋上再生エネルギー開発系 研究統括主幹

田村兼吉

平成24～26年度合計予算額	52,544千円（全課題分）
（うち、平成26年度当初予算額	16,364千円（全課題分）

[要旨] 地球規模で海洋温暖化及び酸性化が進行しており、海洋生態系への影響が懸念されている。特にサンゴは、水温や水質の変動に敏感であり、熱帯海域での白化・大量死や、温帯への分布拡大等の変化が確認されつつある。このため、海洋温暖化及び酸性化がサンゴに与える影響をモニタリングすることを目指し、本研究期間の3年間で、船舶からの広域サンゴ観測技術を整備した。

本サブテーマ（（1）および（3））では、船舶からサンゴの生死判別が可能な、イメージング蛍光ライダー装置を中心とした、観測手法の整備を実施した。小型漁船やダイビングボート等、観測現地で手配可能な通常の小型船舶の利用を前提とし、ライダー装置を収容するための、小型船舶で曳航可能な観測窓付き海上ブイを開発した。また、海水水槽において、ブイ収容時のライダー装置の観測性能実験を行った。さらに、小型船舶の甲板上から海上へ、ブイの着水・揚収作業が容易となるように、小型船舶に搭載可能な小型の着水・揚収システムを開発した。

これらの開発により、船舶ライダー観測の実施可能な海域を拡大し、本研究期間内において、国内5海域（沖縄県八重山郡竹富島、沖縄県宮古島市下地島、高知県土佐清水市竜串、和歌山県東牟婁郡串本町、千葉県館山市坂田）でサンゴの船舶ライダー観測を実施し、広域サンゴ分布データを取得した。また、観測データについては、GISデータベース上に統合し、利用しやすい形式にまとめた。特に、沖縄県竹富島および高知県竜串の2海域においては、共同研究機関である国立環境研究所が開発したステレオカメラシステム（サブテーマ（2））と同時観測を行うことができ、船舶からサンゴの観測を総合的に実施する体制を整えることができた。

[キーワード] サンゴ、モニタリング、蛍光、船舶、ライダー

1. はじめに

造礁サンゴ（以下、サンゴ）は、熱帯地域の沿岸環境を形成し、さまざまな生態系サービスを提供する重要な生物である。サンゴは褐虫藻を共生させており、生態系の中で一次生産を担って、貧栄養の熱帯海域において高い生物多様性および生物生産性の確保に貢献している。サンゴ礁はサンゴ礁地域に住む人々に水産資源、観光資源を提供するとともに、サンゴ礁地形が天然の防波堤となり、砂浜や州島を浸食から守る役割を果たしている。さらに、サンゴ礁海域の環境に根差した人々の暮らしは、文化遺産でもある¹⁾。

産業革命以降、大気中のCO₂濃度は4割程度上昇し、この温室効果等によって海面から深度700mまでの平均海水温が、最近40年間で0.4℃程度上昇したと報告されている。また、海洋へのCO₂溶け込みにより、海洋表層がpH 0.1程度酸性化したとも報告されている²⁾。これらの海洋環境変化は、今後も進行すると予測されており、海水温上昇、海洋酸性化のどちらにも脆弱な海洋生態系として、サンゴの白化や大量死の拡大が懸念されている³⁾。また、熱帯地域の人口増加や埋め立て等、ローカルな陸域負荷の増大を起因とするサンゴの衰退も懸念されている⁴⁾。実際に、世界中の多くの造礁サンゴ分布海域で、生きたサンゴの分布が縮小し、保全の必要性が高まっているとの調査報告が存在する⁵⁾。また、冬季の海水温上昇に伴って、北半球での造礁サンゴの生息北限が北上するという海洋生態系変動も報告されている⁶⁾。このように、サンゴ礁は環境変動に対して急激に変化しており、観測による実態解明とモニタリングによる変化の把握を行い、それらに基づく保全活動を立案・実施することが急務である。

本報告書では、サブテーマ（1）とサブテーマ（3）の研究に沿って、ライダー技術を用いた新しいサンゴ観測法の整備と、船舶観測によるサンゴ分布の広域観測を行ったので、この結果について報告する。

2. 研究目的

船舶搭載イメージング蛍光ライダー装置によるサンゴ観測（以下、船舶ライダー観測）は、H21～23年度地球環境保全試験研究費(地球一括計上)「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」において独立行政法人海上技術安全研究所（以下、海技研）が開発した新しいサンゴ観測手法である⁷⁾⁸⁾。この観測手法整備により、従来手法である潜水調査と衛星リモートセンシング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が可能となった。

船舶ライダー観測は、船舶の航跡に沿って直下の造礁サンゴを連続的にライダー装置で観測する。船舶をプラットフォームとするため、比較的、波浪・潮流等に影響されにくく、安定して長い測線を確保することが可能である。船舶の機動力を利用する点は、マンタ法⁹⁾に類似しているが、マンタ法は観察者が海中に入り、ロープ等で曳航してサンゴ観察を行うのに対し、船舶ライダー観測は、船舶から観測装置によりサンゴを観測するため、比較的安全で、高速移動での観測が可能であり、観察者の主観も入りやすく、観測後の客観的なデータ検証も可能である。また、船舶ライダー観測はレーザーを用いたアクティブ観測であるため、昼夜、天候に影響されにくく、海水の透明度が良ければ、水深10m以上の比較的深い水深海域でも観測が可能である。さらに、UV励起蛍光を観測するため、高速

移動による観測であっても、客観的なサンゴの生死判別が可能である。

本研究課題は、船舶観測による広域サンゴモニタリングを目的とする。このため、サブテーマ（１）と（３）では、国内の多くの海域に船舶ライダー観測を適用し、広域サンゴモニタリングに役立てることを目指し、以下の項目を研究目的とした。

サブテーマ（１）：これまでグラスボートに搭載し船舶観測を実施していたライダー装置について、通常的小型船舶でも観測できるように、ライダー装置を内部に収容可能な曳航式の海上ブイを製作する。また、海水水槽において、海上ブイ収容時のライダー装置の観測性能を評価する。さらに、小型船舶甲板上でブイの着水・揚収作業ができるように、小型着水・揚収システムを製作する。

サブテーマ（３）：国立環境研究所（以下、国環研）と共同で、国内の５カ所の海域（沖縄県八重山郡竹富島、沖縄県宮古島市下地島、高知県土佐清水市竜串、和歌山県東牟婁郡串本町、千葉県館山市坂田）においてサンゴの広域船舶観測を実施する。得られた観測データについて、サンゴ分布情報として利用しやすいようにGISデータベース上に統合する。

3. 研究方法

本研究では、サンゴ分布観測のために、イメージング蛍光ライダー装置を用いる。ライダー（LIDAR: Light Detection and Ranging）はレーザーレーダーとも呼ばれ、パルスレーザー等を用いたアクティブリモートセンシング技術である。蛍光ライダーは、光学フィルタ等を用いてレーザー波長よりも長波長の光を受光波長とすることで、対象物の蛍光を観測する。蛍光の受光時刻 t は、パルスレーザー射出時刻 t_0 に、パルスレーザーが船舶から海底対象物に到達するまでの時間 nD/c 、レーザー励起された対象物が蛍光を発光するまでの時間 t_f 、および海底から船舶方向に発光された蛍光が船舶に到達するまでの時間 nD/c を足したものとなる。

$$t = t_0 + 2 \cdot nD/c + t_f \quad (1)$$

ここで、 c は真空中の光速、 n は海水の絶対屈折率で約1.34、 D は水深である。サンゴの蛍光たんぱく質による蛍光発光時間 t_f は1～3ns程度の瞬間的な現象であるため¹⁰⁾、パルスレーザーと、ゲート機能および波長フィルタを持つ光センサーを用い、レーザー射出時刻、露光開始時刻および露光終了時刻を調整すれば、水深に合わせた蛍光ライダー観測が可能となる。また、光センサーとしてゲート付ICCDカメラを用いれば、サンゴのイメージング蛍光ライダー観測が可能となる。特に、ゲート付ICCDカメラの露光時間を非常に短くすることができるため、取得イメージに対する太陽背景光の影響を大幅に軽減することができ、日中でもサンゴが発する弱いレーザー励起蛍光をイメージ観測することが可能である。イメージング蛍光ライダー観測法の概要図を図1に示す。また、タイミングチャートを図2に示す。この撮影装置は、露光時間が短いことにより、航行船舶のように動揺の激しいプラットフォーム上での観測においても、画像ブレが全く起こらないという特徴も併せ持つ。このため、船舶ライダー観測は、実際の日中の船舶観測に適した蛍光観測法であると言えることが出来る。

ライダー観測手法

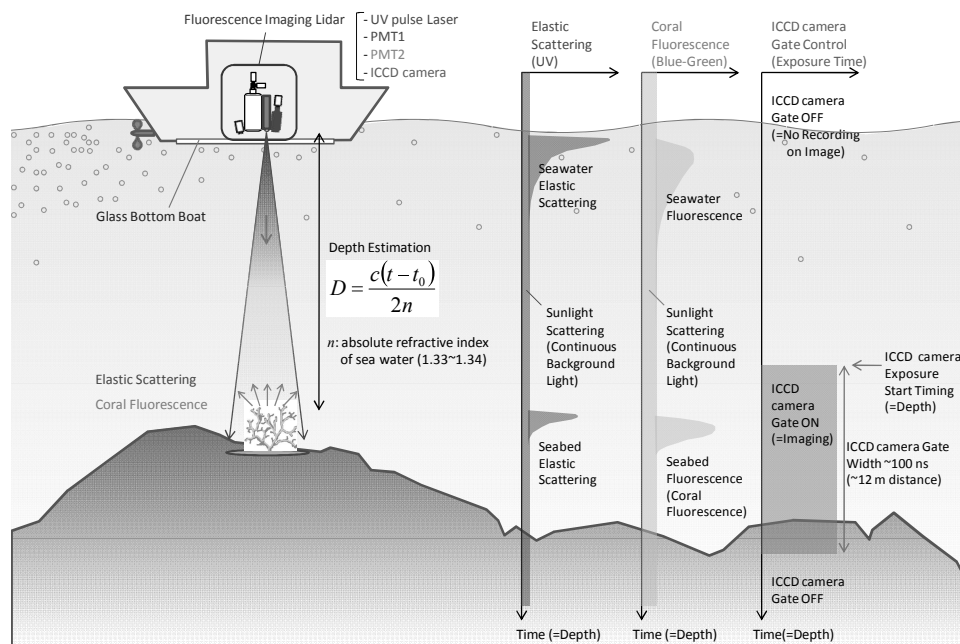


図1： イメージング蛍光ライダー観測法の概要図（グラスボート搭載の場合）

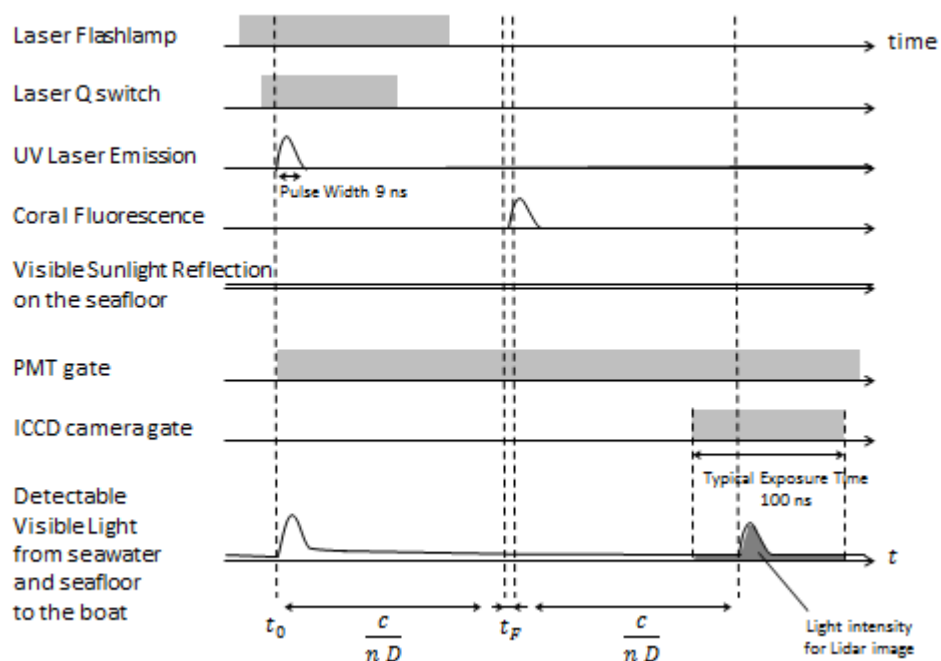


図2： イメージング蛍光ライダー装置のタイミングチャート

サブテーマ（１）：

イメージング蛍光ライダー装置を収納することのできる円筒形ブイを製作した。このブイは、小型船舶で安定して曳航するために、直径約0.21m、全長約1.8mと細長い形状をしており、底面に観測ガラス窓と調整おもり付フィンを取り付けている。また、ブイの直径を小さくするために、パルスレーザー光とICCDカメラ視野は、共に45° ミラーを通して下向きにしており、直接下向きに観測をしているのはビデオカメラだけとなっている。この円筒形ブイの概要を図3に示す。また、内部に収納したイメージング蛍光ライダーの概要を図4に示す。さらに実物の写真を図5に示す。

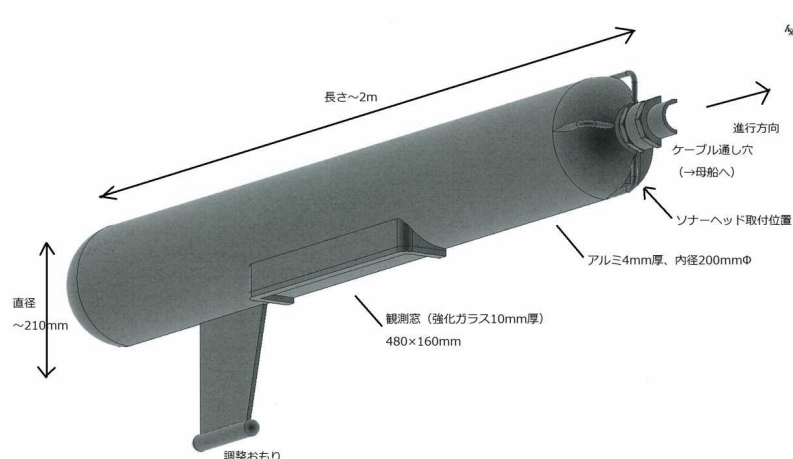


図 3： イメージング蛍光ライダー装置収納用円筒形ブイの概要図

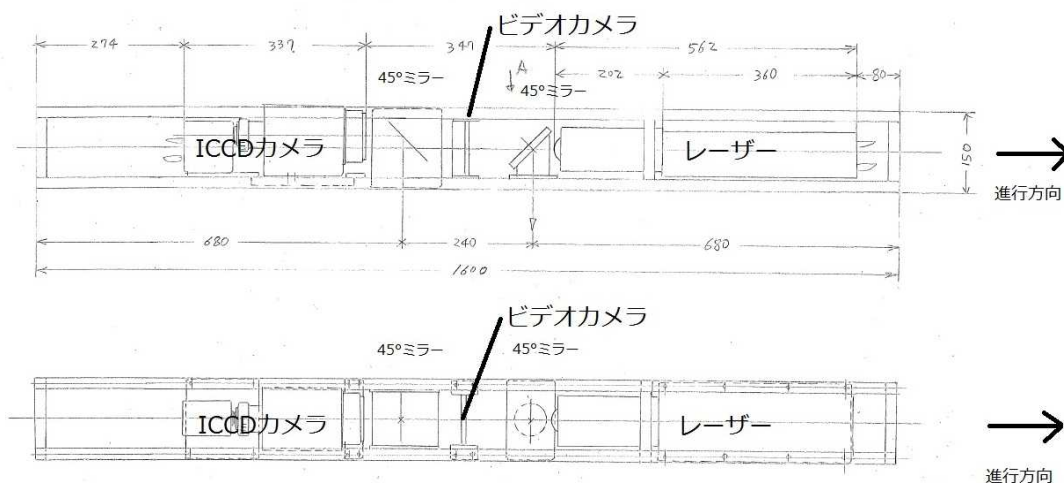


図 4： 円筒形ブイ収納時のイメージング蛍光ライダー装置の主要部概要図

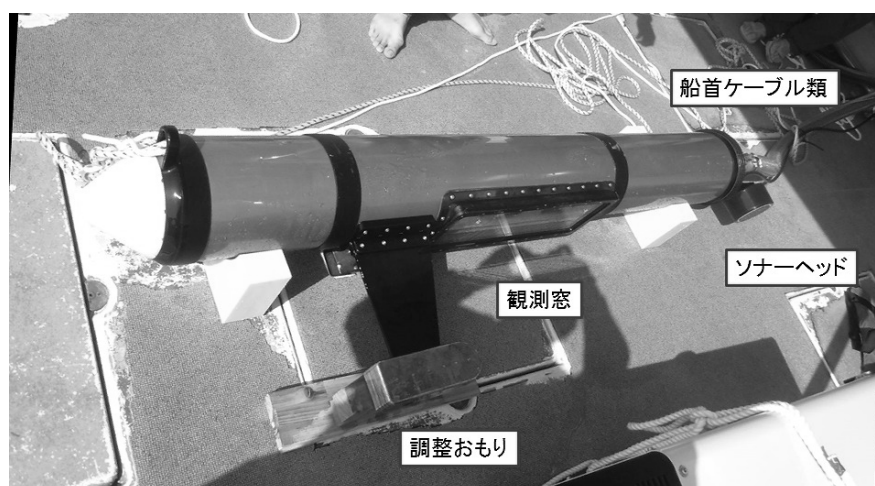


図 5： 円筒形ブイ収納イメージング蛍光ライダー装置の外観

このブイ搭載ライダー装置の観測性能評価のため、東京海洋大学館山ステーション海水水槽（直径約6m、水深約2.3mの円形水槽）において、底面に設置したプラスチック製疑似サンゴをターゲットとして観測試験を行った。この時の実験の様子を図6に示す。

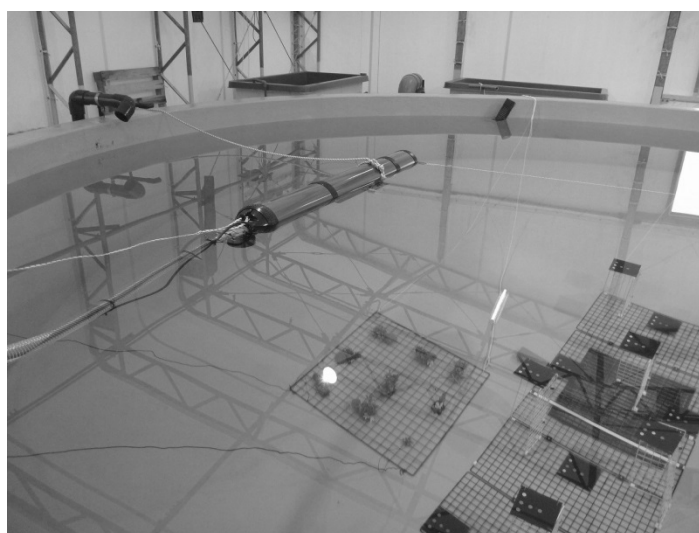


図 6： 東京海洋大学館山ステーション海水水槽における
ブイ収納イメージング蛍光ライダーの観測性能評価実験の様子（2014.1.9）

イメージング蛍光ライダー装置を収容した円筒形ブイは、重量が50kg程度となる。また、電源・信号ケーブルを通す防水ホースが接続しているため、小型船舶からの着水作業、および揚収作業は、取扱いに注意が必要となる。このため、小型船舶の甲板上で、ブイの着水作業および揚収作業を容易にすることを目的とし、小型船舶搭載可能な小型着水・揚収システムを製作した。このシステムの様子を図7に、着水し曳航している海上ブイの様子を図8に示す。



図 7： 小型船舶の甲板上に設置した小型着水・揚収システム
(2015.1.24 竹富島)

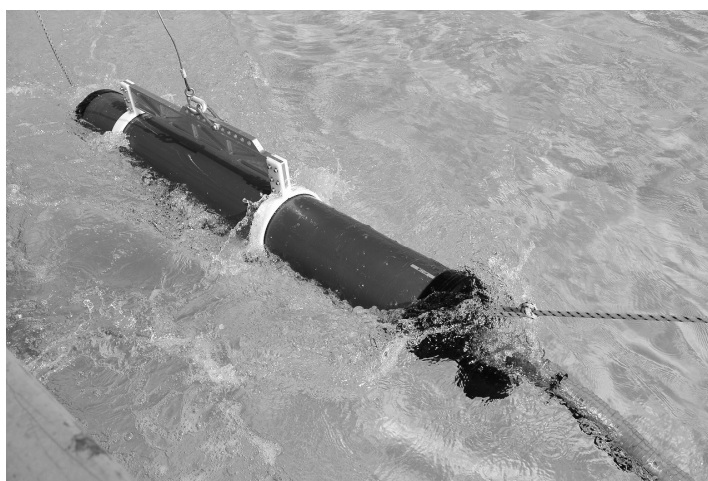


図 8： ブイを着水させ、小型船舶で曳航している時の様子
(2015.1.24 竹富島)

サブテーマ（3）：

3年間の本研究期間中、①沖縄県八重山郡竹富島、②沖縄県宮古島市下地島、③高知県土佐清水市竜串、④和歌山県東牟婁郡串本町、⑤千葉県館山市坂田の5カ所の海域において、船舶ライダー観測を実施した。5海域の位置を図9に、5海域での観測状況を表1にまとめて示す。また、5海域の現地小型船舶にライダー装置および着水・揚収システムを搭載している様子を図10に示す。

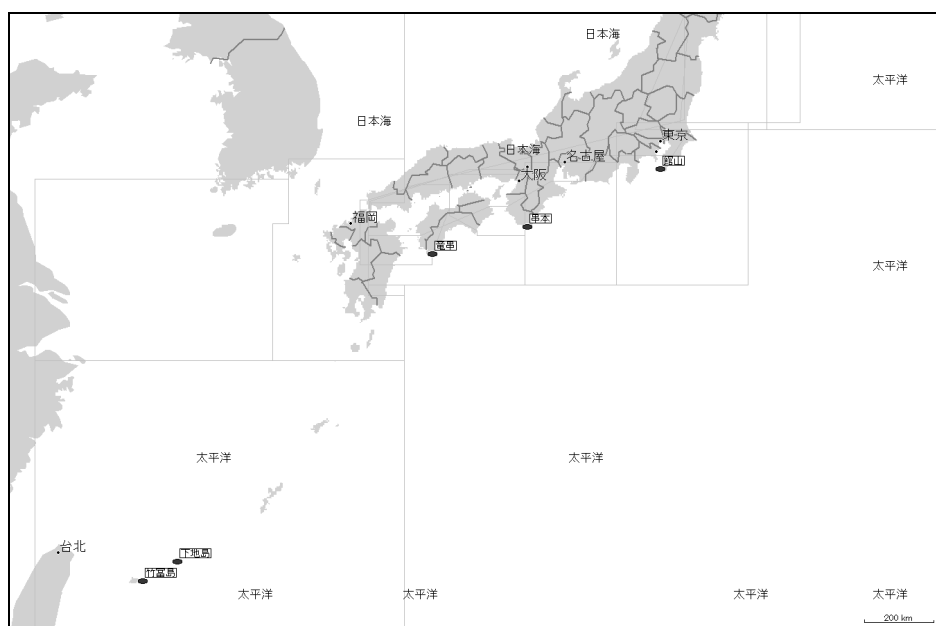


図9： 船舶ライダー観測実施5海域の位置

表1： 船舶ライダー観測による5海域のサンゴ調査

調査場所①	沖縄県八重山郡竹富島周辺海域 北緯 24° 19.5′ 東経 124° 05.3′ （竹富島）を中心とする 直径 4km 程度の円周海域 水深 2～15m、スギノキミドリイシ、クシハダミドリイシ等
調査期間	2014.1.28 14:20～16:29 2014.1.29 09:38～11:01, 12:04～14:23 2014.1.30 10:29～12:33, 13:18～14:30 2015.1.24 09:14～11:48, 13:03～15:36 2015.1.25 10:31～11:10, 13:36～14:14
使用船舶	有限会社マリンポイント所有ダイビングボート 「アスカ V 世」(H25 年度)、「キンカイ I 世」(H26 年度)
備考	国立環境研究所のステレオカメラと同時観測

調査場所②	沖縄県宮古島市伊良部佐和田漁港～下地島西海域 北緯 24° 51.0′ 東経 125° 09.0′ （佐和田漁港）～ 北緯 24° 50.0′ 東経 125° 07.5′ （礁嶺）～ 北緯 24° 49.3′ 東経 125° 08.0′ （下地島西）を結ぶ全長約 5km の海域 水深 2～10m、(礁池)：アマモ、(礁嶺)卓状ミドリイシ等
調査期間	2013.10.30 14:25～16:38 2013.10.31 10:38～12:05, 13:43～14:59
使用船舶	有限会社ズミヤー所有グラスボート 「ズミ 1 号」(H25 年度)
備考	現地グラスボートを利用した観測

調査場所③	高知県土佐清水市竜串海域公園第 1 号地 北緯 32° 47.00′ 東経 132° 51.30′ を中心とする 東西 100m、南北約 200m の海域 水深 2～15m、優占サンゴ種：クシハダミドリイシ
調査期間	2012.11.28 13:30～15:20 2013.12.17 14:30～16:00 2013.12.19 10:20～15:30 2014.12.03 15:32～16:10
使用船舶	竜串ダイビングセンター「ZIGZAG」(H24、H25 年度) 西本渡船所有の釣船 (H26 年度)
備考	国立環境研究所のステレオカメラと同時観測 国立環境研究所のコドラート潜水調査地点を含む観測

調査場所④	和歌山県東牟婁郡串本町 串本海中公園突堤付近 北緯 33.4803 度、東経 135.7463 度付近 公園内堤防付近、水深 2～4m、主に卓状ミドリイシが分布
調査期間	2014.9.19 14:28～14:55
使用船舶	松村渡船所有の釣船「文七丸」(H26 年度)
備考	国立環境研究所のコドラート潜水調査地点を含む観測

調査場所⑤	千葉県館山市坂田港沖 北緯 34.9773 度、東経 139.7771 度付近 水深 3～5m、優占サンゴ種：ニホンアワサンゴ
調査期間	2012.11.09 09:15～10:10 2014.10.30 11:00～11:50
使用船舶	東京海洋大学館山ステーション調査船「サジッタ VI」 (H24, H26 年度)



図 10： 現地小型船舶にライダー装置を搭載した時の様子
 上段左：①沖縄県竹富島（ダイビングボート）、上段右：②沖縄県下地島（グラスボート）、
 中段左：③高知県竜串（釣船）、中段右：④和歌山県串本（釣船）、
 下段：⑤千葉県館山（調査船）

4. 結果・考察

サブテーマ（1）：

小型船舶で曳航可能な観測窓付ブイを製作し、イメージング蛍光ライダー装置を収容した。また、東京海洋大学館山ステーション海水水槽において、疑似サンゴをターゲットとして、ブイ収容イメージング蛍光ライダーで観測実験を行った。レーザー拡がり角の制御値を変化させ、実際に得られた蛍光イメージのフットプリントとの詳細な関係を確認した。得られた画像を図 11 に示す。これにより、海水中でのブイ搭載イメージング蛍光ライダーの観測視野角の制御情報を得た。制御値とレーザー拡がり角の関係を図 12 に示す。

観測結果の図 12 を見ると、レーザー拡がり角制御により、ライダー観測視野角は全角で約 2° から 16° の範囲に調整されたことがわかる。これにより、目標としているライダー観測水深の範囲（1.5～20m）に対して、海底でのフットプリントを、浅い方で直径約 42cm、深い方で直径約 70cm の範囲に収められることが確認できた。この調整機能は、水深変化の大きいサンゴ礁海域においてサンゴ分布を観測する際に重要である。

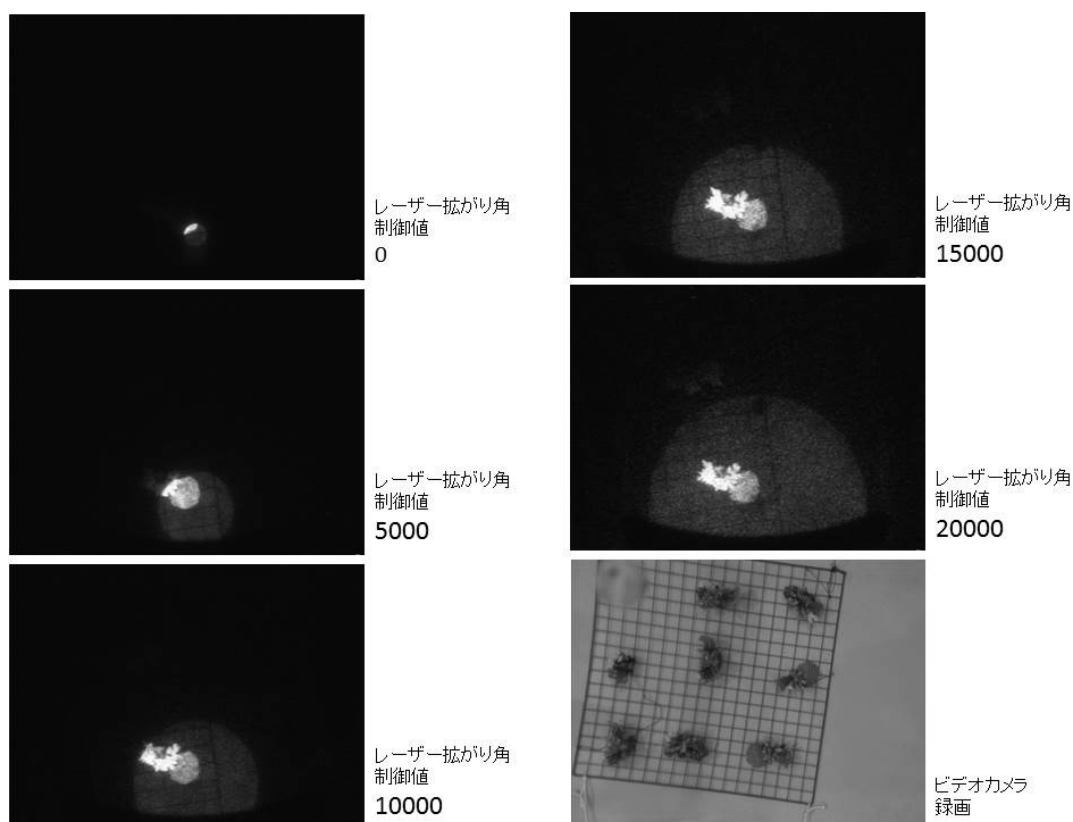


図 11 海水水槽底面に設置した疑似サンゴターゲットの
イメージング蛍光ライダー画像（レーザー拡がり角制御値5000毎）と
ビデオカメラ画像（右下）

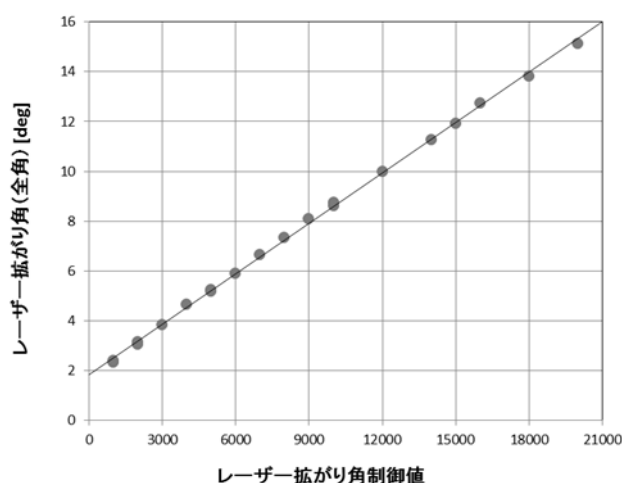


図 12 レーザー拡がり角制御値と蛍光ライダー観測視野の関係

また、小型船舶の甲板上に取付け可能な、ブイの着水・揚収システムを製作した。これにより、港から目的海域までは、ブイを甲板上に置いた状態で巡航速度により移動し、目的海域でブイを着水してライダー観測を行い、観測終了時点でブイを船舶甲板上に揚収して、目的海域から港まで巡航速度で帰港することが可能となった。この観測手順が確立したことで、サンゴの船舶ライダー観測の実施方法の幅が拡がり、適用可能な海域を増やすことができた。本研究期間の3年間で実施した5海域の船舶ライダー観測の中で、現地グラスボートの利用手配ができたのは1海域（沖縄県宮古島市伊良部）のみであり、残りの4海域では全て、小型船舶曳航型ブイおよび着水・揚収システムを用いた。

サブテーマ（3）：

①沖縄県八重山郡竹富島

日本の南端付近に位置する沖縄県八重山郡竹富島周辺海域で、現地ダイビングボートを用いてブイ搭載ライダー装置を曳航し、サンゴの船舶ライダー観測データを得た。2014年1月30日10時29分～12時33分の約33,000枚のライダー画像について、目視判断により分類し、DGPS位置情報およびソナー水深情報と合わせてGISデータベース上に統合した。ライダー画像および同時観測のビデオ画像の観測例を図13に示す。

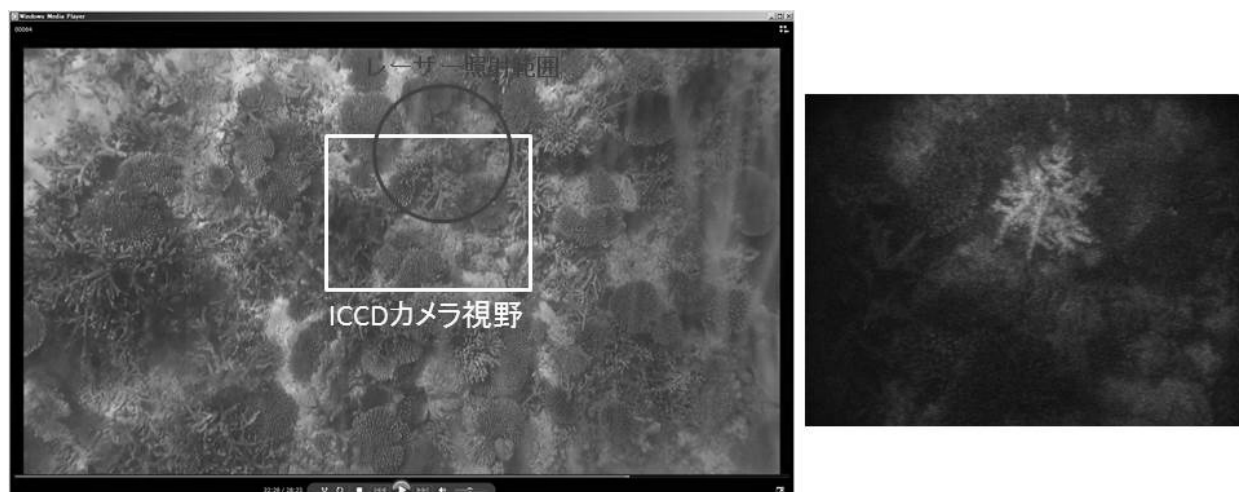


図13 沖縄県八重山郡竹富島東海域（水深 4.1m）におけるダイビングボート曳航ブイによるサンゴの船舶ライダー観測の例（2014.1.30 10:53）
（左）ビデオ撮影画像、（右）ライダー画像。生きた枝状サンゴ群体の蛍光が確認できる。

また、GISデータベース上に統合した広域サンゴ分布情報を、同海域の衛星画像と重ねたものを図14に示す。これにより、竹富島北海域の礁斜面には高被度のサンゴ礁領域が存在し、南海域の礁池には砂地が存在することがわかる。

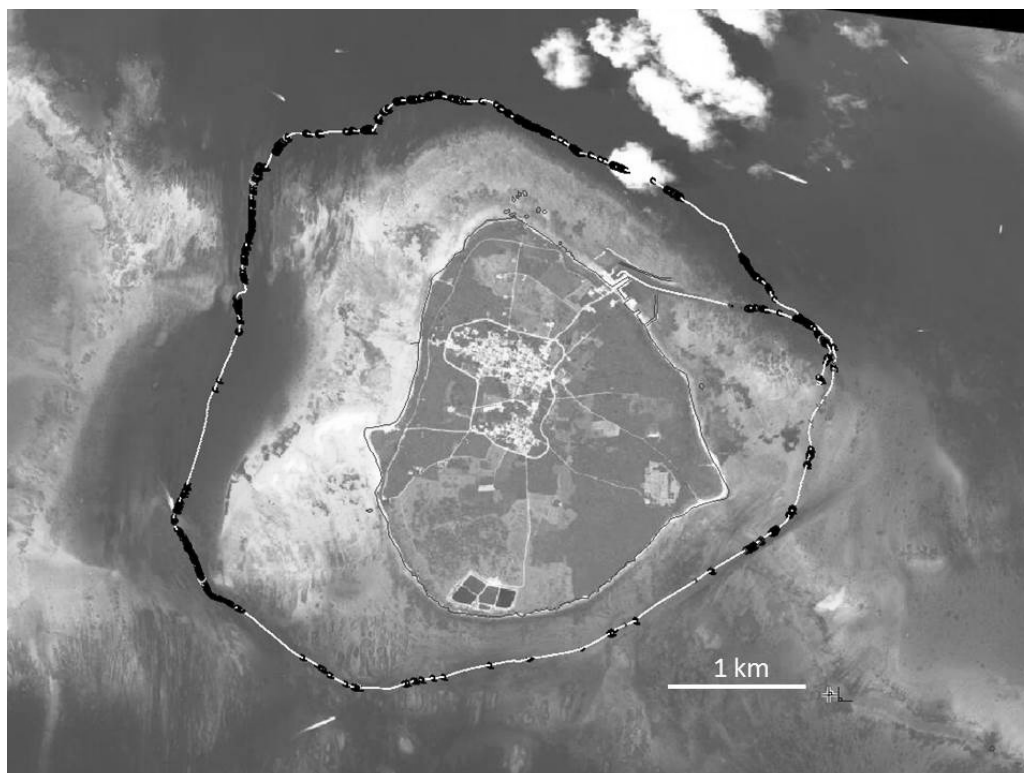


図14 沖縄県八重山郡竹富島周辺海域での船舶ライダー観測による生きたサンゴの分布観測結果（2014.1.30 10:29～12:33）
V：生きた枝状サンゴ、●：生きた卓状サンゴ、×：死んだサンゴの骨格
（背景は 2010.8.14 撮影の WorldView-2 衛星画像）

さらに、2015年1月24日10時20分～11時19分の間、竹富島の東海域にあるパッチリーフの1つを目標海域（100m×100m程度の範囲）とし、集中的に船舶ライダー観測を実施した。この時の約16,800枚のライダー画像について、目視判断することにより、生きた枝状サンゴ、生きた卓状サンゴ、死んだサンゴ骨格、砂等に分類し、GIS上にプロットしたものを図15に示す。衛星画像のパッチリーフの位置と、船舶ライダー観測の生きたサンゴ分布がよく一致していることがわかる。また、このパッチリーフは枝状サンゴと卓状サンゴが混生していることが確認できる。

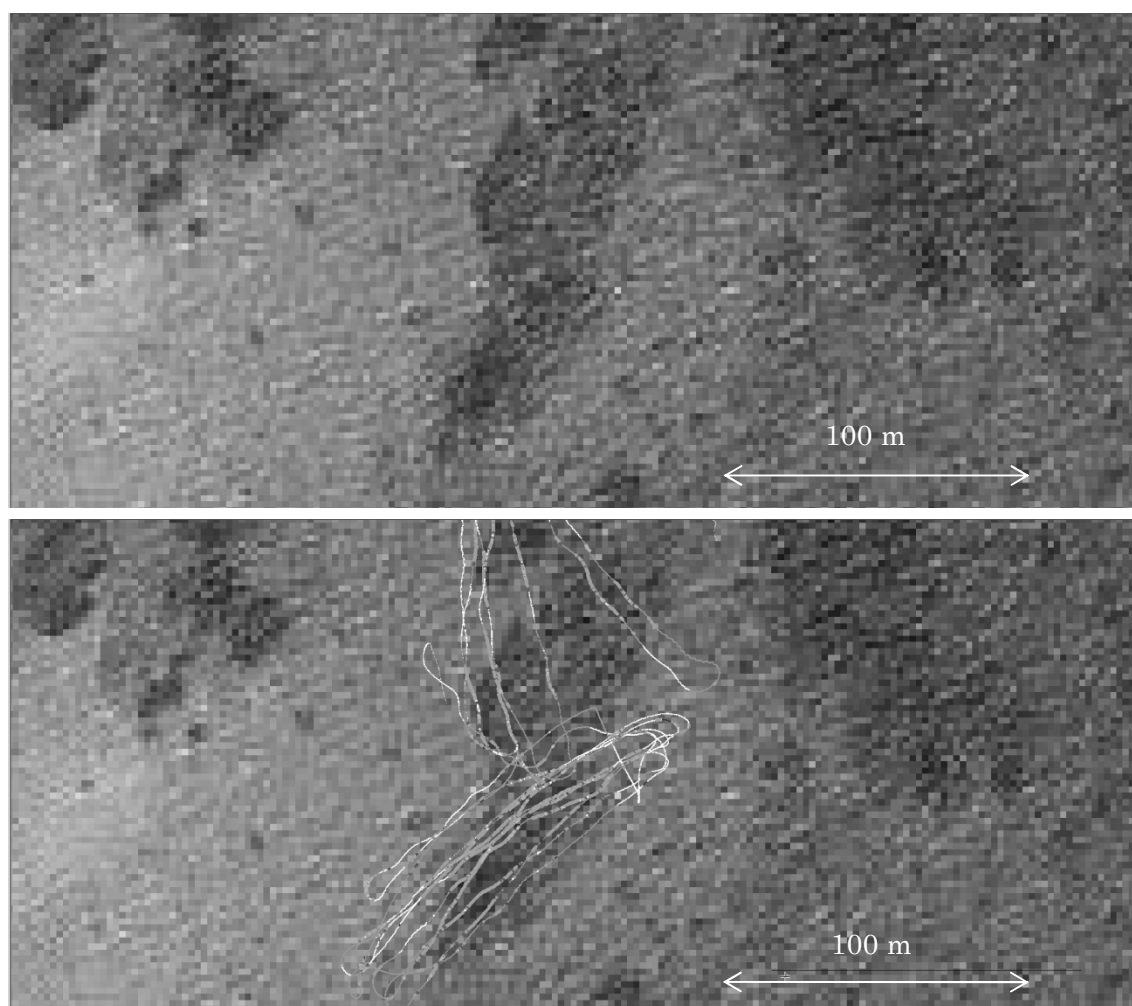


図15 沖縄県竹富島東海域の高解像度衛星画像
(WV-3 衛星画像 2014.11.28)

および船舶ライダー観測による生きたサンゴ観測位置の重ね合せ表示
(船舶ライダー観測データ 2015.1.24 10:20～11:19)

また、この海域について、共同研究機関の国環研と同日・同海域観測を実施した。その観測データの一部（距離10m程度）について、ステレオカメラで3次元合成したサンゴの自然光画像と、イメージング蛍光ライダーで観測したサンゴの蛍光画像について、目視で一致させたものを図16に示す。これにより、局所的な注目海域（100m×100m程度のスケール）において集中観測を行うことで、サンゴ群体数、サイズ、生死判別等を可能とする船舶観測

手法を確立した。また、自然光画像はサンゴの種判別に重要な情報であり、蛍光画像は小サイズのサンゴの正確な判別に重要な情報であることがわかる。

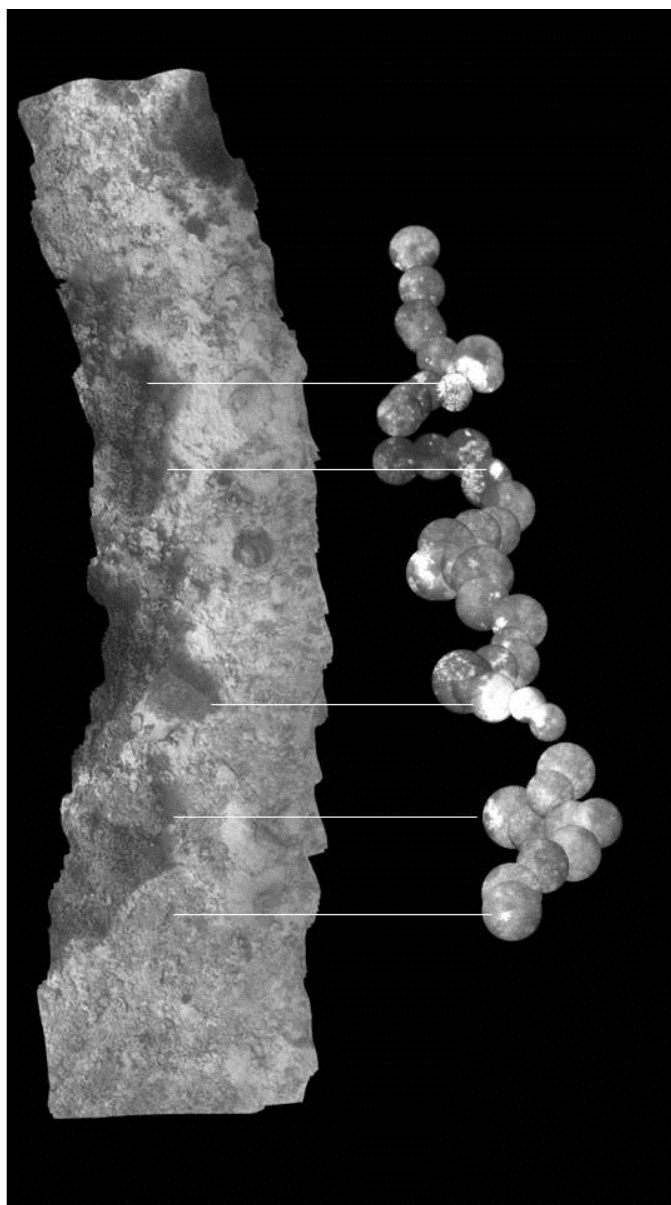


図 16 同海域におけるステレオカメラ観測データと
イメージング蛍光ライダー観測データの対応
(2015.01.24 竹富島東海域)

②沖縄県宮古島市下地島

日本の南端付近に位置する沖縄県宮古島市の伊良部島から下地島にかけての海域で、現地グラスボートを用いてサンゴの船舶ライダー観測データを得た。2013年10月31日午後1時43分～2時59分の約18,000枚のライダー画像について、目視判断により分類し、DGPS位置情報およびソナー水深情報と合わせてGISデータベース上に統合した。ライダー画像および同時観測のビデオ画像の観測例を図17及び図18に示す。



図 17 沖縄県宮古島市下地島西海域（水深 4.0m）における
グラスボートを利用したサンゴの船舶観測例（2013.10.31 14:31）。

（左）ビデオ撮影画像、（右）ライダー画像。

生きた卓状サンゴ群体の蛍光が白く浮かんで確認できる。

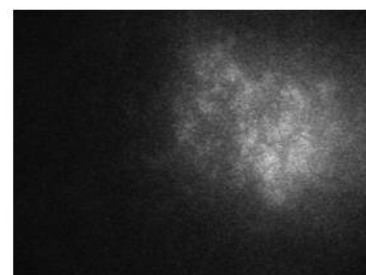
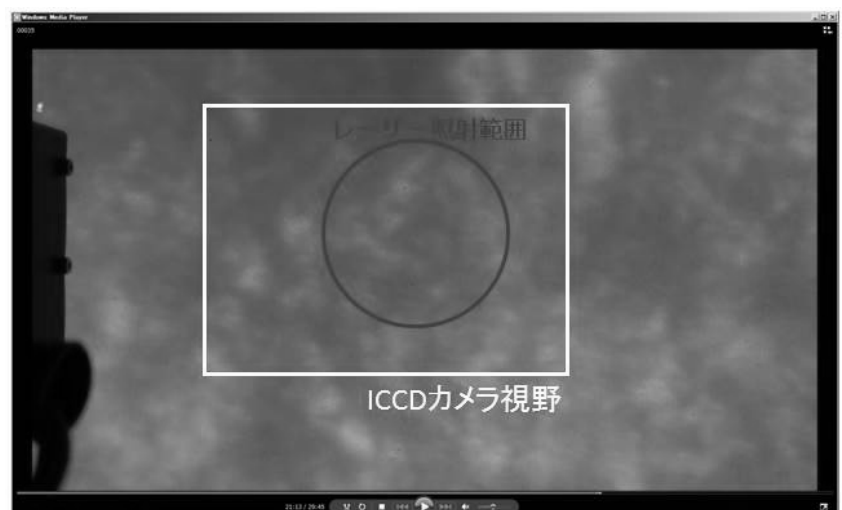


図18 沖縄県宮古島市下地島礁池（水深1.4m）における
グラスボートを利用した海草の船舶ライダー観測の例（2013.10.31 14:50）

（左）ビデオ撮影画像、（右）ライダー画像

海草は、蛍光を発する砂地を背景に、黒い線状の物体として確認することができる。

また、GISデータベース上に統合した広域サンゴ分布情報を、同海域の衛星画像と重ね合
せたものを図19に示す。これにより、礁池は海草の領域と砂地の領域があり、礁斜面には高
被度のサンゴ礁領域が存在することがわかる。

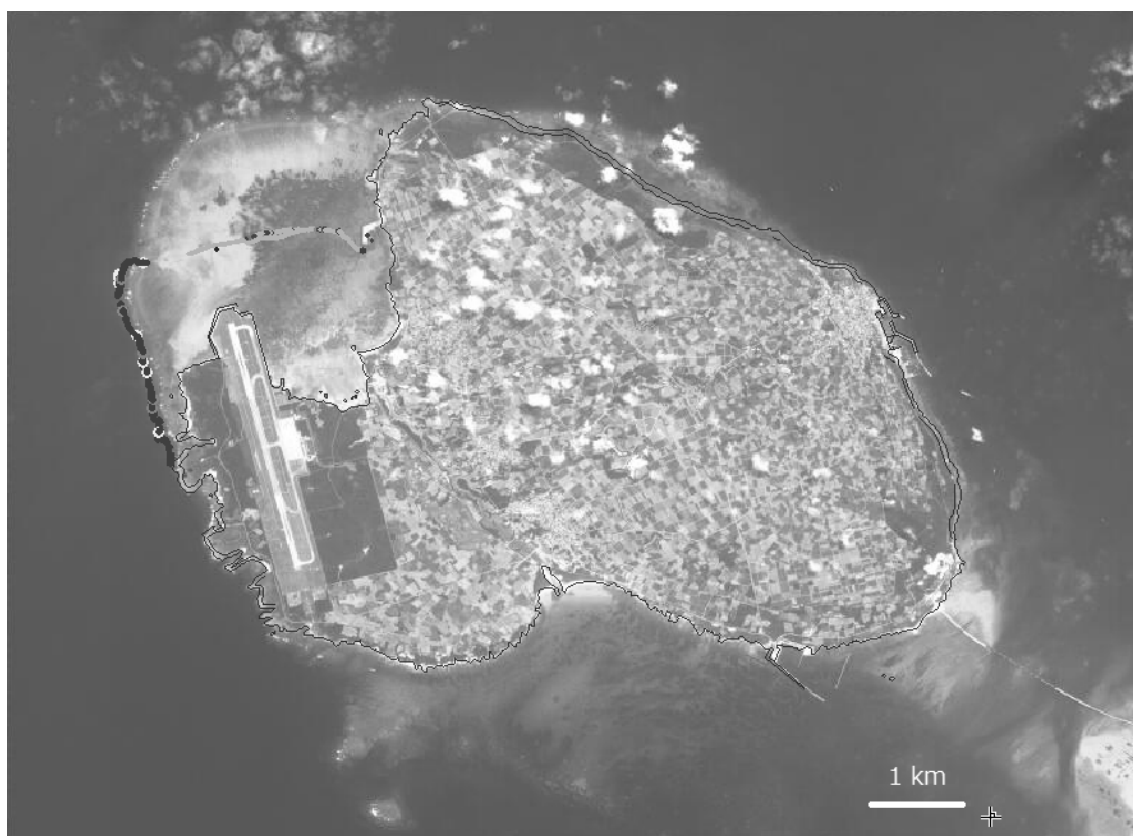


図19 沖縄県宮古島市伊良部島・下地島周辺のサンゴ礁海域での船舶ライダー観測による
生きたサンゴの分布観測結果（2013.10.31 13:43～14:59）

●：生きたサンゴ、●：海草、●：砂地

（背景は2013.4.18撮影のWorldView-2衛星画像）

③高知県土佐清水市竜串

四国最南端付近に位置する高知県土佐清水市竜串（竜串海中公園第1号地周辺海域）において、現地釣船を用いて、ブイ搭載ライダー装置を曳航し、サンゴの船舶ライダー観測データを得た。2014年12月3日15時32分～16時10分の約9,300枚のライダー画像について、目視確認により分類し、DGPS位置情報およびソナー水深情報と合わせてGISデータベース上に統合した。ライダー画像および同時観測のビデオ画像の観測例を図20に示す。



図 20 高知県土佐清水市竜串海中公園における
小型船舶曳航ブイによるサンゴの船舶ライダー観測の例
(2014.12.03、蛍光ライダー画像、水深約 5 m)
レーザー照射範囲の直径は約 50 cm。

また、ビデオカメラで撮影した海底の自然光画像と、ライダーで観測した蛍光画像の比較を図21に示す。本観測海域は国環研が潜水コドラート調査を実施している海域であり、コドラート内に生息するサンゴ群体については、長期間のモニタリングデータが得られている。蛍光画像では、蛍光のコントラストにより、小サイズのサンゴや、大サイズのサンゴの一部壊死部分を見つけやすいこと等がわかる。

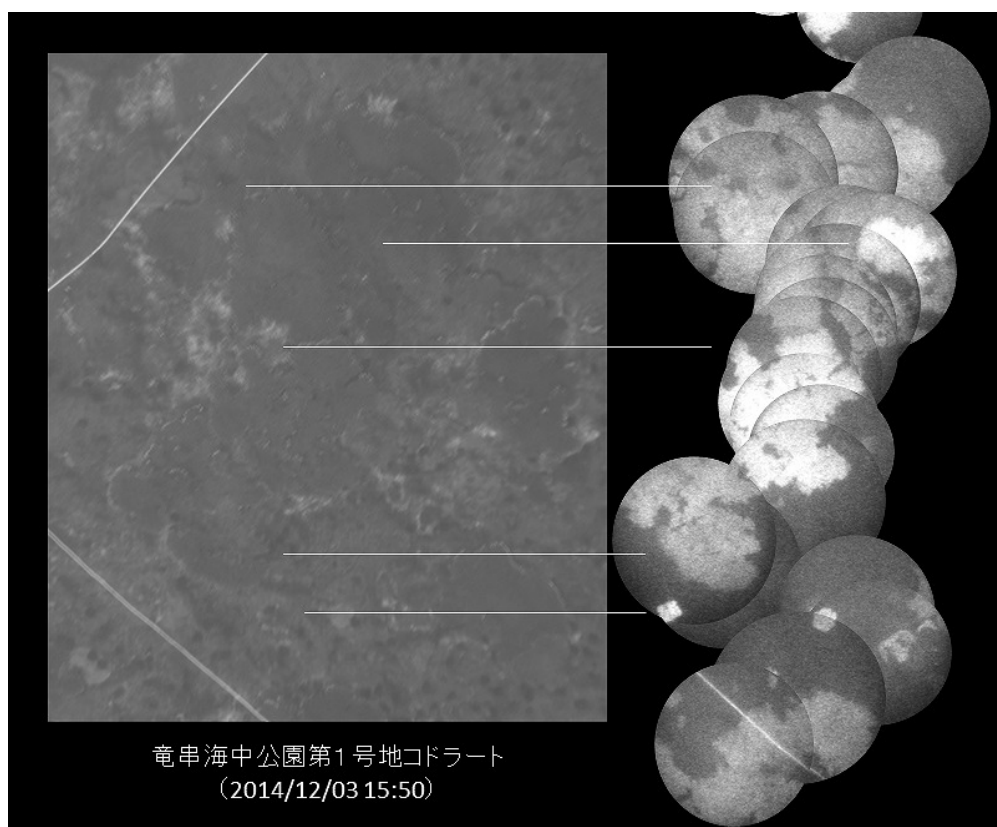


図 21 高知県土佐清水市竜串海中公園における
サンゴの自然光画像と蛍光画像の比較
(2014.12.03、潜水コドラート調査地点、水深約 5 m)

また、GISデータベース上に統合したサンゴ分布情報を、同海域の衛星画像と重ねたものを図22に示す。本観測海域はクシハダミドリイシが優占種の海域であり、観測データのほとんどが卓状サンゴであった。

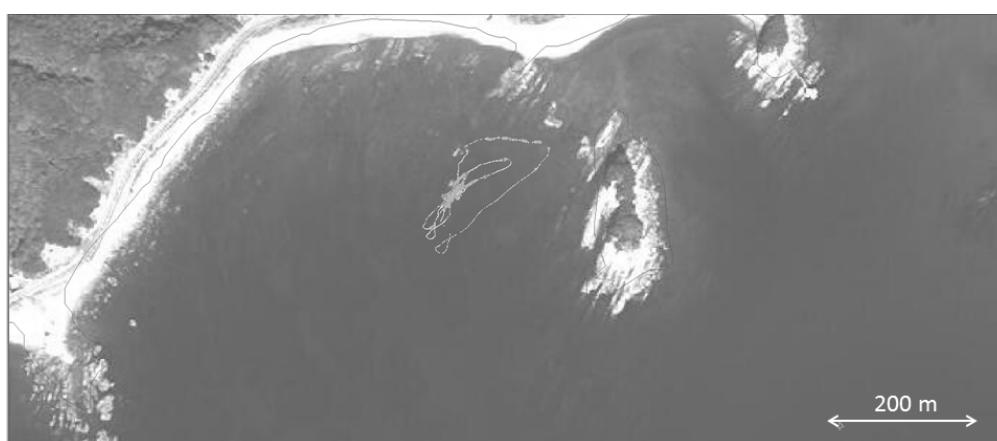


図 22 高知県土佐清水市竜串海中公園第1号地での
船舶ライダー観測による生きたサンゴ観測位置
(2014.12.03 15:32～16:10)
(背景は 2013.02.10 撮影の WorldView-2 衛星画像)

④和歌山県東牟婁郡串本町

本州最南端に位置する和歌山県東牟婁郡串本町（串本海中公園）において、現地釣船を用いて、ブイ搭載ライダー装置を曳航し、サンゴの船舶ライダー観測データを得た。2014年9月19日14時28分～55分の間に記録された約8,300枚のライダー画像について、自然光画像と蛍光画像の一例を図23に示す。この観測では、蛍光ライダー信号が弱かったことにより、蛍光イメージの解像度が悪くなり、サンゴ形状を判別することが困難であった。これは、本州付近の沿岸部の富栄養海水によってUVレーザーの透過率が下がり、イメージング蛍光ライダーの感度が低下する現象で、本州沿岸部での船舶ライダー観測の難しさを表していると考えられる。

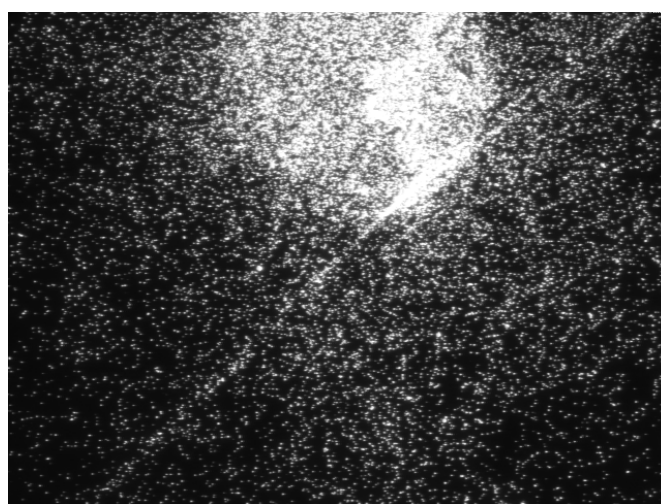


図23 和歌山県串本町串本海中公園（2014.9.19 14:54）における小型船舶曳航ブイによるサンゴの自然光画像および蛍光画像の例。蛍光ライダー信号が弱くなり、蛍光イメージの解像度が低下していることがわかる。

また、GIS データベース上に統合した広域サンゴ分布情報を、同海域の衛星画像と重ねたものを、図 24 に示す。本観測では、国環研が実施している潜水コドライト調査位置と合わせた観測位置としている。



図 24 和歌山県串本町串本海中公園での
船舶ライダー観測による生きたサンゴ観測位置
(2014.9.19 14:28～14:55)
(背景は 2013.11.14 撮影の WorldView-2 衛星画像)

⑤千葉県館山市坂田

本州太平洋側の造礁サンゴ生息北限域に位置する千葉県館山市の坂田漁港沖において、東京海洋大学館山ステーションの小型調査船を用いて、ミニボート搭載ライダー装置を曳航し、サンゴの船舶ライダー観測データを得た。2012年11月9日9時15分～10時10分の約11,000枚のライダー画像について、目視判断により分類し、DGPS 位置情報およびソナー水深情報と合わせて GIS データベース上に統合した。自然光画像と蛍光画像の一例を図 25 に示す。この海域のサンゴの優占種は、ニホンアワサンゴであることがわかっている。観測対象となったニホンアワサンゴの観測例として、2011 年 6 月に撮影した水中写真を図 26 に示す。左が自然光写真、右が夜間に UV 灯を照射して撮影した蛍光写真である。

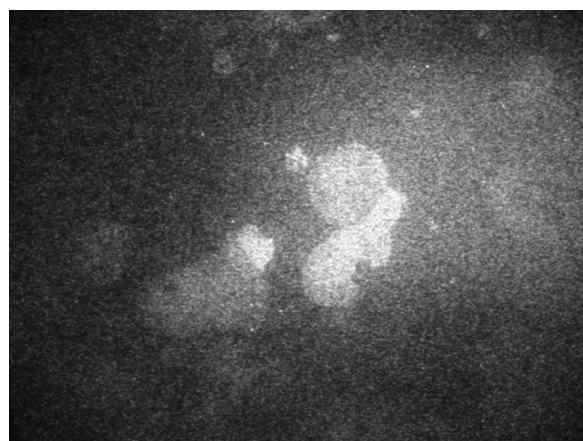
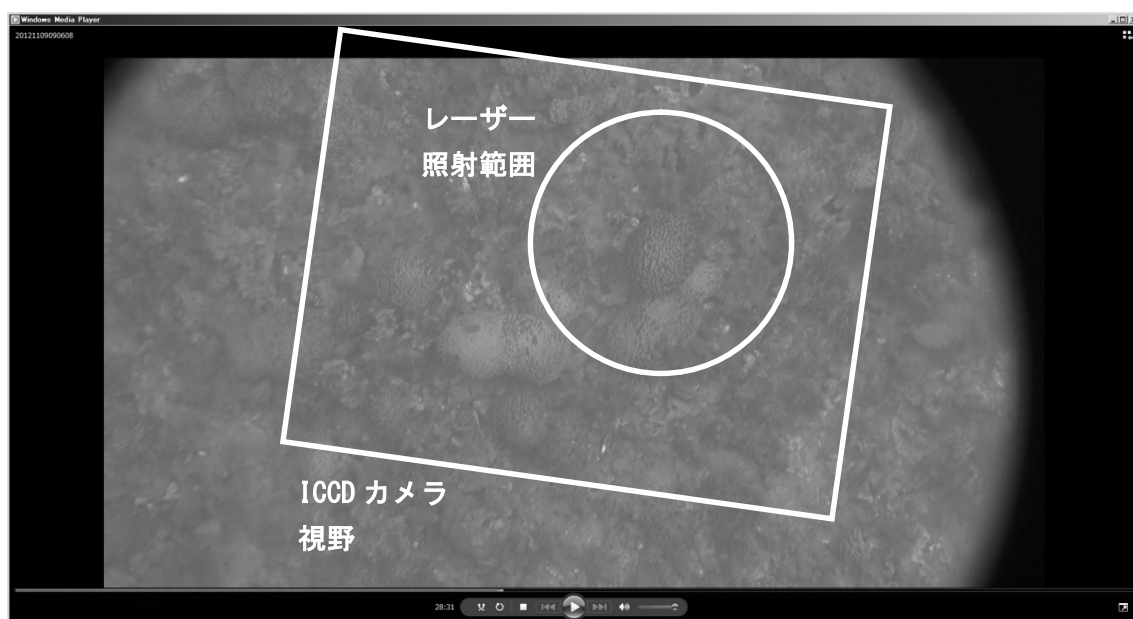


図 25 千葉県館山市坂田における
小型船舶曳航ミニボートによるサンゴの自然光画像および蛍光画像の例
(2012.11.9 09:34)

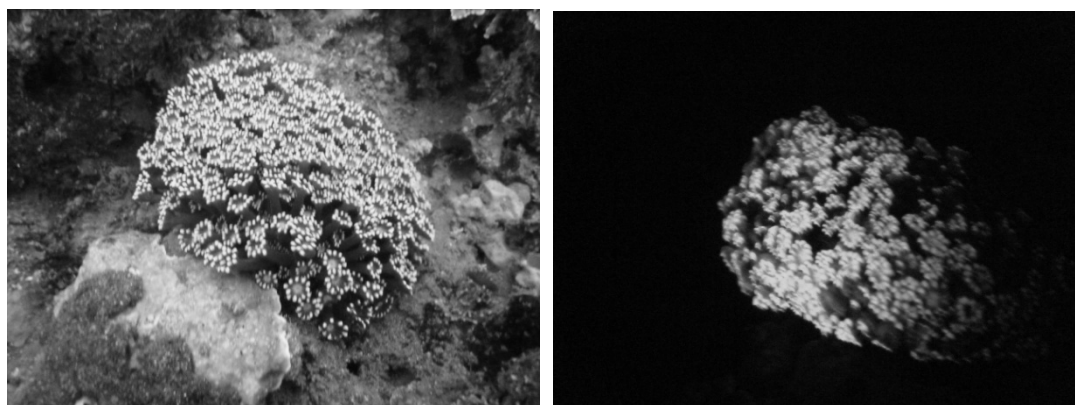


図 26 千葉県館山市坂田沖ニホンアワサンゴの潜水調査による
水中自然光写真（左）と夜間水中 UV 励起蛍光写真（右）
(2011 年 6 月 15 日撮影、夜間撮影は日没直後のもの)

また、GIS データベース上に統合した広域サンゴ分布情報を、同海域の衛星画像と重ねたものを、図 27 に示す。ニホンアワサンゴが、坂田港沖に集中して群落を形成している様子や、他の海岸沿いにも多少、分布している様子等がうかがえる。

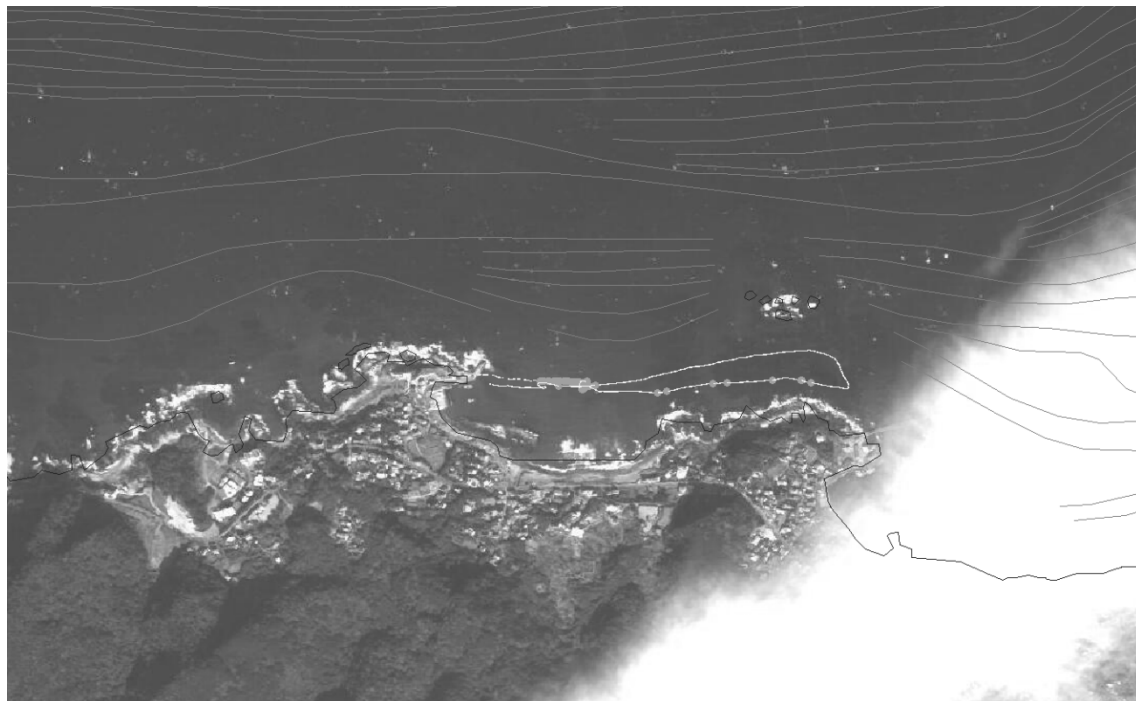


図 27 千葉県館山市坂田沖アワサンゴの船舶ライダー観測による分布観測結果
(2012 年 11 月 9 日 9:15~10:10)
(背景画像は 2010 年 1 月 16 日撮影の WorldView-2 衛星画像)

5. 本研究により得られた成果

本研究により、船舶からサンゴの生死判別が可能な、イメージング蛍光ライダー装置の整備を行った（サブテーマ（1））。現地で手配可能な通常の小型船舶を用いてライダー観測可能となるように、曳航用ブイを製作し、観測性能を確認した。

この装置整備の結果、ライダー観測の適用可能な海域が拡大し、国内 5 海域（沖縄県竹富島、沖縄県下地島、高知県竜串、和歌山県串本、千葉県館山）で、広域にサンゴの船舶ライダー観測を実施することに成功した（サブテーマ（3））。これらの船舶観測データについて解析を行い、高分解能衛星画像等のデータと併せて GIS データベース上に統合した。

特に、国内 2 海域（沖縄県竹富島、高知県竜串）では、国環研実施の船舶ステレオカメラ観測（サブテーマ（2））と同時観測を実施することができた。このため、船舶からのサンゴ観測により、サンゴの自然光画像、蛍光画像を取得することで、サンゴの群体数、サイズ、生死判別、成長速度等の情報を取得する体制が整った。

本研究によるサンゴの観測手法は、船舶航行速度約 1 ～ 4 ノット程度での移動による観

測が可能であり、また長時間の連続的な観測が可能であるため、従来手法である潜水調査と比較して安全であり、圧倒的に高速に広範囲のサンゴ調査データを取得することが可能となった。また、センチメートル以下の画像解像度を確保しており、従来手法である衛星観測と比較して1000倍程度の画像精度を達成した。

6. 引用文献

- 1) 豊島淳子, 土屋誠: サンゴ礁学 第13章 サンゴ礁の価値を評価する, pp.301-313, 東海大学出版, 神奈川, 2011.
- 2) IPCC: Annual Report 5, Working Group 1, 2014
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- 3) IPCC: Annual Report 5, Working Group 2, 2014.
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-PartB_FINAL.pdf
- 4) World Resources Institute: Reefs at Risk Revisited, 2011.
<http://www.wri.org/publication/reefs-at-risk-revisited>
- 5) Global Coral Reef Monitoring Network: Status of Coral Reefs of the World: 2008, 2008.
<http://gcrmn.org/gcrmn-publication/status-of-coral-reefs-of-the-world-2008/>
- 6) H.Yamano, K.Sugihara and K. Nomura: Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures, Geophysical Research Letters, 38, L04601, 2011.
- 7) 地球環境保全等試験研究費（地球一括計上）H23年度研究成果報告書.
- 8) M.Sasano, H.Yamanouchi, A.Matsumoto, N.Kiriya, K.Hitomi and K.Tamura: Development of boat-based fluorescence imaging lidar for coral monitoring, Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, 5A_7, 2012.
- 9) 沖縄県環境生活部自然保護課: サンゴ礁資源情報整備事業報告書, 2011.
http://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kankyo/shizenhogo/hogo/h21_sanngosyousigenn_jyouseibijigyou.html (2013.4.14)
- 10) 中村孝和, 太田信廣: 蛍光寿命イメージングを用いる単一細胞内計測の展開, 分析化学 58, pp.473-485, 2009.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① M.Sasano, H.Yamanouchi, A.Matsumoto, N.Kiriya, K.Hitomi and K.Tamura:
Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, 5A_7 (2012)
"Development of boat-based fluorescence imaging lidar for coral monitoring"
- ② 松本陽、篠野雅彦、樋富和夫、桐谷伸夫、山之内博、田村兼吉、増尾和彦、荒川久幸：
日本サンゴ礁学会誌、14, 5-17(2012)
「昼夜コドラート撮影によるニホンアワサンゴ *Alveopora japonica* のコロニー計測」
- ③ 松本陽：東京海洋大学大学院博士論文 (2013)
「紫外励起蛍光特性を利用したサンゴ計測に関する研究」
- ④ 篠野雅彦、松本陽、今里元信、山野博哉、小熊宏之：
日本リモートセンシング学会誌、33,5,337-389 (2013)
「グラスボート搭載イメージング蛍光ライダーによるサンゴ観測」
- ⑤ M.Sasano, M.Imasato, H.Yamano and H.Oguma:
Marine Productivity Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems
(Proceedings of the 15th French-Japanese Oceanography Symposium)
Springer ISBN 978-3-319-13877-0, 253-256 (2015)
"Coral Observation by the Boat-Based Fluorescence Imaging Lidar"

(2) 口頭発表

- ① 篠野雅彦、桐谷伸夫、今里元信、松本陽、田村兼吉
第12回海上技術安全研究所研究発表会(2012)
「船舶観測による広域サンゴモニタリングに関する研究」
- ② 篠野雅彦、桐谷伸夫、今里元信、松本陽、田村兼吉、山野博哉、小熊宏之
第30回レーザセンシングシンポジウム (2012)
「船舶搭載イメージング蛍光ライダーによる広域サンゴ分布観測」
- ③ 篠野雅彦、田村兼吉、桐谷伸夫、今里元信、松本陽、山野博哉、小熊宏之
日本サンゴ礁学会第15回大会 (2012)
「船舶搭載ライダー観測による広域サンゴモニタリング法の開発」
- ④ 篠野雅彦、田村兼吉、桐谷伸夫、今里元信、山野博哉、小熊宏之：
日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (2013)
「船舶観測による広域サンゴモニタリングと生死判別」
- ⑤ 篠野雅彦、今里元信、山野博哉、小熊宏之：
第31回レーザセンシングシンポジウム (2013)
「蛍光ライダーを用いた造礁サンゴ調査技術の開発」
- ⑥ Masahiko Sasano, Motonobu Imasato, Hiroya Yamano and Hiroyuki Oguma:
15th French-Japanese Oceanography Symposium (2013)
"Coral observation by the boat-based fluorescence imaging lidar"
- ⑦ 篠野雅彦、今里元信、山野博哉、小熊宏之：

日本サンゴ礁学会第16回大会（2013）

「小型船舶搭載イメージング蛍光ライダーによるサンゴ分布調査法の開発」

- ⑧ 篠野雅彦、今里元信、山野博哉、小熊宏之

第32回レーザセンシングシンポジウム（2014）

「造礁サンゴ観測用小型船舶曳航型海上ブイ搭載イメージング蛍光ライダーの開発」

- ⑨ 篠野雅彦、今里元信、山野博哉、小熊宏之

日本サンゴ礁学会第17回大会予稿集（2014）

「蛍光性を用いた造礁サンゴ分布の船舶観測システムの開発」

（3）出願特許

- ① 篠野雅彦：海上技術安全研究所；「対象物検出法及びライダー装置、環境測定方法」，特許第5500617号，平成26年3月20日（特許取得済）
- ② 篠野雅彦：海上技術安全研究所；「対象物検出法及びライダー装置、環境測定方法（蛍光で測深）」，特願2014-043423，平成26年3月6日（特許審査中）

（4）受賞等

- ① 日本リモートセンシング学会 平成26年度論文賞（2015年6月2日受賞予定）
篠野、松本、今里、山野、小熊
「グラスボート搭載イメージング蛍光ライダーによるサンゴ観測」
日本リモートセンシング学会誌 第33巻（2013年）第5号 pp.377-389

（5）一般への公表・報道等

- ① e-Book出版
T.Fukuchi, T.Shiina, M.Sasano and 13 others:
Bentham Science Publishers e-Book, eISBN 978-1-60805-340-7 (2012)
“Industrial Application of Laser Remote Sensing”
- ② 海技研一般公開（2013年4月21日）「⑧海洋センシング」展示
- ③ 海技研一般公開（2013年7月20日）「⑤海洋センシング」展示
- ④ SPIE（アメリカ応用光学会）WEB News
Masahiko Sasano, Motonobu Imasato, Hiroya Yamano and Hiroyuki Oguma:
SPIE Newsroom (<https://spie.org/x102940.xml>) (2013)
“Monitoring the viability of coral reefs”
- ⑤ 海技研一般公開（2014年4月20日）「⑥海洋センシング」展示
- ⑥ 光学業界誌
篠野雅彦、日本工業出版「光アライアンス」2月号（2015）
「蛍光ライダーを用いた造礁サンゴ調査技術」

（6）その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

水産総合研究センター／海上技術安全研究所合同セミナー「水産と工学の連携が開く

次世代の海洋産業」（2014年2月12日、海運クラブ2Fホール）中の講演、
「水産の未来に貢献する船舶海洋技術」（講演者：海技研 田村兼吉）において
本研究の成果が紹介された。