

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03953

研究課題名(和文) サンゴ礁生態系保全支援のための観測情報構築技術の研究

研究課題名(英文) Development of observation support technology for ecological system of the coral reef

研究代表者

川端 邦明 (Kawabata, Kuniaki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター  
・主任研究員

研究者番号：90301754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サンゴ礁における生態系保全のために水中環境のデータを収集することで観測作業支援に寄与する手法、システムの研究開発を行った。水中定点観測センサノードおよび水中移動観測センサノード、画像処理によるデータ計測姿勢変化推定技術、収集データを閲覧する技術について研究開発を行った。開発された技術は沖縄本島沿岸のサンゴを対象にした実証実験で検証された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop the methods and the system to support observation activities of ecological system of the coral reef. In this research project, we developed a prototype of underwater stationary sensor node for long-term sensory data collection, a prototype of underwater movable sensor node for collecting the data in the blind spot of the stationary sensor node, a measurement posture estimation method based on image processing for view presentation and a browsing system for collected sensory data. Developed prototypes, methods and system were tested at the coastal area of Sesoko island, Okinawa, Japan and demonstrated by using such collected data.

研究分野：システム科学

キーワード：システム工学 情報システム 海洋探査

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境保全に関する対策が急務であるとされ、実態を調査・分析するためにフィールドでの観測活動・データ収集が必要不可欠である。近年特に、海洋での環境変容に影響を受けた生態系の変質が指摘され、典型問題としては、サンゴ礁におけるオニヒトデの大量発生による浸食被害の進行や褐虫藻の排出によるサンゴの白化現象がある。一般にダイバーによるサンゴ礁の調査・観測は、主に目視による生態系の状態観測や水質データの記録・ロギングで行われているが、ダイバーの健康管理上の観点から潜水時間に制限があることから分かるように、人手による広範囲の連続的な水中調査では肉体的負担が大きく、効率的な観測作業の実施が難しい。このため、広範囲において効果的な観測作業を支援する枠組み、技術が必要となっていた。水中観測活動を支援するための機器として、ブイ等から携帯電話回線を用いて通信するものや、水中に長期間設置したロガーを回収してデータ収集するものがあるが、水質調査が中心となっている。また、海底等にカメラを固定することで海水中の状態を記録する試みもあるが、綿密な海中生態系の実態の調査支援を考えると、必要な場所に展開して海中環境データの収集を可能とする技術開発が必要である。このようにサンゴ礁の観測作業におけるデータ収集支援に関するニーズがあった。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、サンゴ礁の環境保全のための水中状態観測を支援するための基盤となる技術を研究開発することである。現在、主に人手により行われているサンゴ礁周辺環境状態や生態系の調査作業における負担軽減化および作業高効率化に寄与する技術・システム開発を行った。特に、実際に海中でのデータ収集を行うことを念頭に、水中定点観測および水中移動観測センサノード等の水中センサデータ収集技術開発とともに、センサノード群によるデータ収集システムの構築、画像処理によるデータ計測姿勢の変化量を推定技術、収集データを計算機上で閲覧する技術について研究開発を行う。

## 3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、水中定点観測センサノードに関する研究開発、水中移動観測センサノードに関する研究開発、水中画像処理技術の研究開発、収集したセンサデータを閲覧するシステムの開発、を行った。これらは沖縄県サンゴ礁領域において検証、実証を行うことで進めた。

## ① 水中定点観測センサノードに関する研究開発

サンゴ生態学および環境工学の研究者等へのヒアリング調査、および、センサネットワークの技術的要件から、定点センサノードの機能を検討し、試作・評価する。また、実

地実験により機能を確認するとともに情報収集を行う。特に、間欠的な観測を実現するためのシステム設計や長時間での海中定点データ収集を行う際に課題となる藻類等の付着による収集画像の質の低下の課題や、屋外において無線通信品質を維持する課題について取り組んだ。開発にあたっては沖縄県沿岸海域において、継続的な試験・実験を繰り返し実施した。さらに、長時間にわたる定点画像を基にして、サンゴ白化状態を検出するための方法についても研究開発を行った。

## ② 水中移動観測センサノードに関する研究開発

水中移動観測センサノードは網羅的な観測データの収集を実現するために、定点観測センサノードの死角となる空間にセンサを遠隔操作により移動させることでこれを実現するものである。これまでの水中ロボットおよび制御システムの開発経験に基づいて、小型で小回りが利く機動性を持ち、カメラ画像に基づいて遠隔操作可能な水中移動観測センサノードのハードウェアと制御システムの開発に取り組んだ。また、海中データ収集のためにネットワーク通信を介して、収集時間と整合した形式で画像データをオンラインで収集して送信する機能についても実装を行う事とした。

また、水中移動観測センサノードによるデータ収集において重要な、水中でのデータ取得位置を推定する方法項目について研究開発を行った。まず、センサノードの運動を測定する内界センサシステムを内蔵し、これに基づいて移動センサノードの位置を推定する手法について研究開発を行った。さらに長時間動作時には一般的に内界センサでの推定では誤差が蓄積していく可能性が高まることも考慮にいて、外界センサを利用した位置推定手法についても検討を行った。下向き単眼カメラにより海中を撮影し、画像処理によって水中移動センサノードの位置を計測するとともにカメラ位置をGPSにより捕捉することで推定位置を計算する手法についても研究開発を行った。

## ③ 画像処理による計測姿勢変化量推定手法の研究開発

海中動画像の特徴点の位置データを用いて、水中観測定点センサノードの姿勢変化量を推定する手法について研究開発を行った。まず、水中観測定点センサノードの姿勢推定に用いる評価関数の設計方法を記す。水中観測定点センサノード搭載の CCD カメラの各座標軸を  $Y_c$  軸、 $Z_c$  軸、 $X_c$  軸と定義し、各軸周りの各回転角をそれぞれ  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\psi$  とする。このカメラ座標系における時刻  $k$  と時刻  $k-1$  の特徴点位置を各々  $P_k^{(i)}$ 、 $P_{k-1}^{(i)}$  とする。時刻  $k$  の位置  $P_k^{(i)}$  と時刻  $k-1$  での位置  $P_{k-1}^{(i)}$  は、水中観測定点センサノードの姿勢を記述するパラメータである回転行列  $R_k(\theta, \varphi, \psi)$  と並進行列  $T_k$  を用い、式(1)のように対応付け可能である。

$$\mathbf{P}_k^{(i)} = \mathbf{R}_k \mathbf{P}_{k-1}^{(i)} + \mathbf{T}_k \quad (1)$$

式(1)は各時刻の全特徴点の重心位置  $\mathbf{P}_k^G$ 、 $\mathbf{P}_{k-1}^G$  においても成立し、式(1)における各特徴点の位置を重心からの相対位置として記述し、式(2)を得る。

$$\mathbf{P}_k^{(i)} - \mathbf{P}_k^G = \mathbf{R}_k (\mathbf{P}_{k-1}^{(i)} - \mathbf{P}_{k-1}^G) \quad (2)$$

式(2)の両辺の差を誤差ベクトル  $\Delta^{(i)}$  とおき、回転行列  $\mathbf{R}_k$  のみの推定問題に帰着させる。定点センサノードにより取得する画像群は、奥行き情報が未知なため、z成分  $\delta_z^{(i)}$  には追加の未知変数が含まれる。そこで、特徴点の位置データと各回転角で構成される x, y 成分  $\delta_x^{(i)}$ 、 $\delta_y^{(i)}$  成分を用いる。従って、特徴点の総数を  $W$  とし、評価関数  $E(\theta, \varphi, \psi)$  を  $\delta_z^{(i)}$  を除いた誤差ベクトル  $\Delta_{xy}^{(i)}$  の自乗和として式(3)を定義する。

$$E(\theta, \varphi, \psi) = \sum_{i=1}^W (\Delta_{xy}^{(i)\top} \cdot \Delta_{xy}^{(i)}) \quad (3)$$

式(3)の評価関数に対して、最急降下法を適用し、式(2)の両辺の誤差を最小にする水中観測定点センサノード姿勢変化量を推定可能とする手法を提案した。評価関数  $E(\theta, \varphi, \psi)$  の  $\theta, \varphi, \psi$  について偏微分を求める。このとき、偏微分を用いて探索回数  $r$  番目の最適解の候補値  $\varphi^r$  を更新する。よって、探索回数  $r+1$  番目の最適解の候補値  $\varphi^{r+1}$  は式(4)に従い算出される。

$$\varphi^{r+1} = \varphi^r - \beta \frac{\partial E}{\partial \varphi} \quad (4)$$

$\beta$  は候補値の更新量の大きさを調節するための任意の正の係数。 $\theta, \psi$  についても同様の計算を行う。そして、求めた各候補値  $\theta^{r+1}, \varphi^{r+1}, \psi^{r+1}$  を元の評価関数  $E(\theta, \varphi, \psi)$  に代入した値を任意の閾値  $\varepsilon$  を用いて判定する最急降下探索条件式を式(5)にて定義する。

$$E(\theta^{r+1}, \varphi^{r+1}, \psi^{r+1}) \leq \varepsilon \quad (5)$$

そして、式(5)により回転角の候補値が誤差ベクトルを最小にするかどうかを判定する。式(5)を満たす探索回数  $r+1$  番目の候補値  $\theta^{r+1}, \varphi^{r+1}, \psi^{r+1}$  を最適解、推定値として定める。

続いて、姿勢情報に従い、画像上の対象物体を定位置に位置合わせするための動画補正手法を述べる。さらに、動画補正精度向上のための連動画像補正アルゴリズムを紹介する。

推定した各回転角と海中ランドマークの重心位置を式(1)に代入し、並進項を算出する。このとき、算出した並進補正量は初期時刻における座標軸が回転角  $\varphi_k$  だけ傾いた座標系における値となるため、初期時刻の座標系に対する並進補正量に座標変換する。そして、推定した  $Z_c$  軸周りの回転角  $\varphi_k$  と座標変換した並進補正量  $T_{Xk}, T_{Yk}$  を用いて取得した動画の二次元補正を行う。このとき、初期時刻において計測対象が撮影された位置を基準位置とし、時刻毎に計測対象を基準位置に揃えるように動画補正を行う。補正前の座標位置を  $(x, y)$ 、補正後の座標位置を  $(X, Y)$  とし、式(6)に従い動画補正を行う。

$$\begin{cases} X = x - T_{Xk} \\ Y = y + T_{Yk} \end{cases} \quad (6)$$

これにより、初期時刻から時刻  $k$  までの間のカメラの移動量を修正する向きに画像補正を行うことが可能となる。

さらに、初期時刻の画像と補正回数  $m$  回目の時刻  $k$  の画像における  $n$  番目の特徴点の位置情報から平均ユークリッド誤差を式(7)で求める。

$$C_{ERROR}^m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{F} \sum_{k=1}^F \sqrt{(x_0^n - x_k^n)^2 + (y_0^n - y_k^n)^2} \right\} \quad (7)$$

画像枚数を  $F$ 、特徴点の個数を  $N$  とする。さらに、平均ユークリッド誤差に基づき補正回数  $m$  のときの誤差収束を式(8)にて判定する。

$$|C_{ERROR}^m - C_{ERROR}^{m-1}| < \varepsilon_C \quad (8)$$

$\varepsilon_C$  は誤差収束判定閾値を示す。式(8)を満たすまで、動画補正手法を繰り返すことで、高精度な補正画像の生成を行う。上述の提案手法は水中定点センサノードにおける動画補正手法であるが、同様のやり方を水中移動センサノードで得られる動画画像に応用し、水中画像に基づく水中マッピング作成へ適用する。但し、奥行き情報を得る手法については別途検討を要する。

#### ④ 観測情報閲覧システムの開発

前述の水中定点観測および水中移動観測センサノードで収集したセンサデータを海中に展開して収集した画像やセンサデータ等の観測情報を計算機に蓄積を行い、観測者が指定した情報を閲覧するためのシステムの開発を行った。ここでは、一般的な計算機で閲覧することを考慮して、Web ブラウザをベースとした閲覧システムを設計、開発した。

## 4. 研究成果

### ① 水中定点観測センサノードに関する研究開発

開発を行った水中定点観測センサノードの試作機の外観を図1に示す。情報収集(画像, GPS, 水温, 姿勢等), 情報処理, 通信, 自立駆動, 防水耐圧等の機能を有している。詳細な構成要素については図中に示した。本センサノードは、連続~20分間欠動作、各回1~3秒間隔で50回~連続のデータ取得、LED照明の on/off 等、様々な条件設定により海中でセンサデータの収集を行うことが可能になっている。



図1 水中定点観測センサノード試作機外観

また、基礎実験により長時間の海中観測では、定点センサノード表面に藻類等が付着することが判明した。これにより光の透過率が低下し、カメラによる画像が困難となることから、アクリル表面の親水加工による付着回避とワイパによる物理的な除去方法を考案し、プロトタイプによる長時間実験(図2)により間欠的に作動させることで付着状態が改善することを確認した。

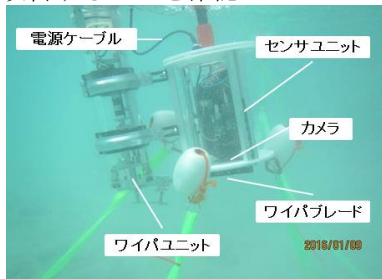


図2 ワイパ動作試験の様子

さらに、水位や波の影響により、海上と陸上の基地局の間でのWiFi通信(プロトタイプではIEEE802.11nを利用)が滞ることが基礎実験により確認されたため、WiFi通信とLTE通信モジュールを併用して通信を行うシステムを構成した。

また、水中定点観測センサノードにより収集されたデータ解析の一例として、取得した時系列画像からサンゴの成長や、白化や食害などの被害状況を評価するために、サンゴの生育部分の面積の定量的な計測手法を検討した。サンゴの蛍光特性を利用し、図3のように、通常画像から外形を、蛍光画像画像から蛍光領域(生育領域)を検出し比較することで、サンゴ全体に対する生育部分のみを計測する。

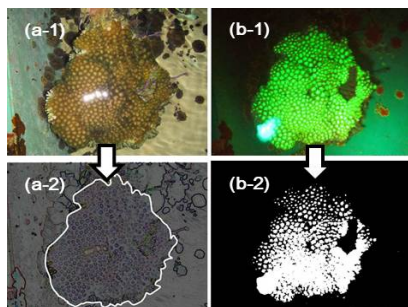


図3 蛍光画像によるサンゴ生育面積の評価

サンゴ模型を用いた検証実験では、実測値に対し、約3%の誤差で近似値が得られた。今後、収集した実画像を用いて計測を行う。

## ② 水中移動観測センサノードに関する研究開発

図4に本研究で開発を行った水中移動観測センサノードのプロトタイプを示す。上下方向に2基、水平方向に2基スラスタが搭載されており、ネットワークカメラ、温度センサ、角速度・加速度センサ、地磁気センサ、深度

センサ等を内蔵している。100mの有索で電源供給を行う画像に基づいた遠隔操縦が可能になっている。

またセンサノードに内蔵した内界センサのデータを活用して水中移動観測センサノードの位置推定を行う手法の開発を行った。位置推定は、加速度センサ、地磁気センサから得られる加速度、方位、傾きについてのデータを用いて行い、カルマンフィルタを用いて位置情報及び姿勢の推定値を計算した。検証実験により、長時間動作や外乱が多い動作の際に誤差が蓄積される結果となった。



図4 水中移動観測センサノード

この結果をうけて、外界センサを利用した水中移動観測センサノードの位置推定手法についても開発を行った。開発手法では図5に示すように、海上に浮かぶ移動体に単眼カメラを下向きに搭載して海中を撮影し、センサノードに搭載した計測用のマーカーを画像処理によって検出することで相対位置を計算するとともに、水上移動体の位置をGPSにより捕捉することで水中移動観測センサノードの位置を推定する。実際の海において、より正確な推定を行うためには波等により変動する水上移動体姿勢と水中移動観測センサノードから得られる深度データを利用することとした。

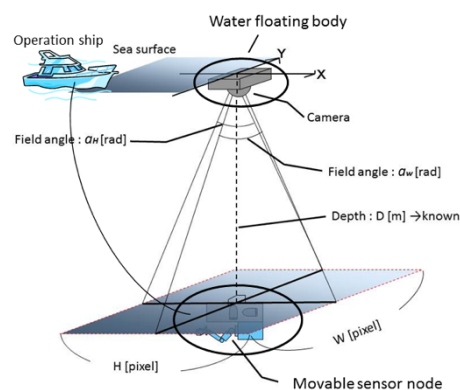


図5 画像に基づいた位置推定の模式図

開発した位置推定手法を用いて瀬底島沖にて位置計測実験を行った。LEDライトを3本搭載した移動センサノードを深度5m程度の海域で動作させ、その様子を図6に示す水上移動体に搭載した単眼カメラで撮影する。その後、オフラインにて画像処理、位置情報



を算出した。カメラから取得した画像より、画像中心付近で水中ロボットが作業している画像を選出し位置計測を行った。計測して得られた水中ロボットの緯度経度と、移動センサーノードの操作を行っている船舶の緯度経度を地図上にプロットした結果を図7に示す。プロット点は、計測した3つの時間帯ごとに色分けを行っている。画像中心の赤いピンは船舶の位置を示しており、その位置を中心に半径5m, 10m, 15mの円を描いている。図7より、移動センサーノードは船舶の半径15m以内で作業していたということが分かる。海底に1.5mのアルミ棒を沈めて、海上から水上移動体で移動センサーノードの位置を観察していた。そのときの静止画より移動センサーノードの大きな移動は把握することができた。その静止画と実験結果を比較すると移動範囲は概ね同等であった。



図6 水上移動体の外観

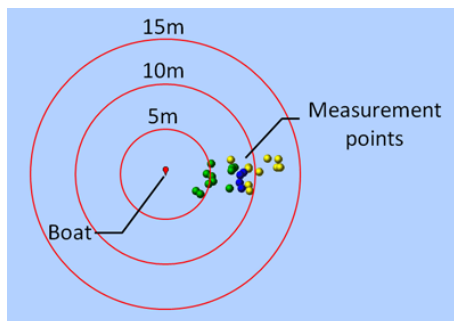
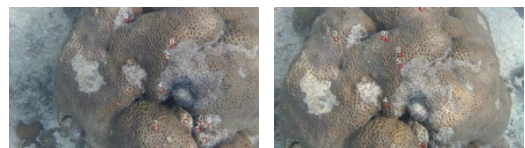


図7 世界座標系でのセンサーノード位置表示の例

### ③ 画像処理による計測姿勢変化量推定手法の研究開発

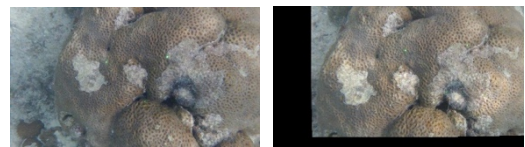
成果例として、沖縄県本部町瀬底海域で水中観測定点センサーノードにて撮影した動画画像を用い、提案手法の有効性を検証する。ここで、画像サイズは640×360[ピクセル×ピクセル]、フレーム数は30である。図8はk=29のときの特徴点の追跡結果を示す。このとき、特徴点は10個、テンプレートサイズは271×271[ピクセル×ピクセル]、探索領域は対象画像全体とする。図8より4番、5番、8番の特徴点は多少の誤差が生じたものの、概ね追跡が成されていることが分かる。次に、4番、5番、8番の特徴点を用い、動画画像補正を3回実施した結果を図9に示す。このとき、3回動画画像補正を行うことで、補正誤差が収

束している。なお、他の入力画像においても、3回補正にて誤差収束が成され、精度向上に向けた補正回数は概ね3回と定めることができる。



(a) 特徴点画像(k=0) (b) 特徴点追跡(k=29)

図8 特徴点の追跡



(a) 入力画像(k=0) (b) 3回補正画(k=29)

図9 動画画像補正結果

### ④ 観測情報閲覧システムの開発

収集した観測情報を常時閲覧できるように、センサーノードから地上サーバに保存した情報をオンライン上で閲覧可能なWebページを作成した。蓄積したデータは、データベースに登録して管理し、同一フォーマットでのデータ比較を可能とした。閲覧システムでは、地図画面上に表示された定点センサーノードを選択することで、時系列で取得画像および温度データグラフを確認することを可能とした(図10)。

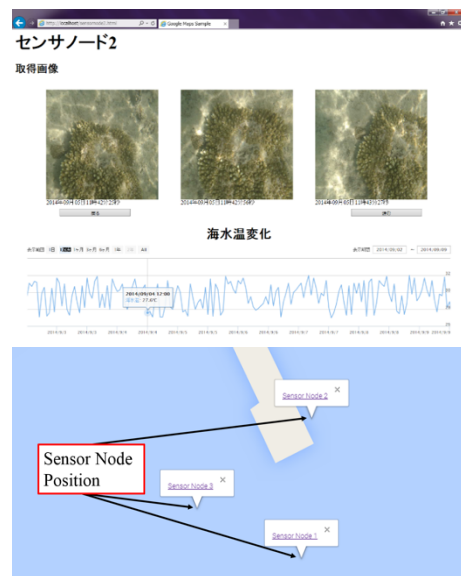


図10 閲覧システムにより収集データを画面表示した例

また、本研究で開発した海中環境でのデータ収集実験として、沖縄県瀬底島沿岸において水中定点観測および水中移動観測センサーノードによるデータ収集の実証実験を実施し、本研究で開発を行った水中定点観測センサーノードおよび水中移動観測センサーノードのプロトタイプを用いて、サンゴのデータ収集

実験を行った。図 11, 12 はその際にそれぞれのセンサノードから同時時間帯に収集された画像データを示している。これらの画像を含むセンサデータは、収集された後に前述の閲覧システムによって表示できることを確認している。



図 11 水中定点観測センサノードにより収集した画像の例(2018.01.10\_13.59.20)

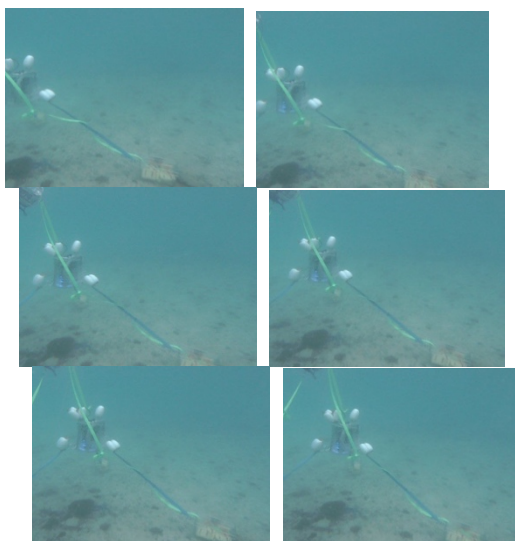


図 12 水中移動観測センサノードにより収集した画像の例(2018.01.10\_13.59.22 - 23の間)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① F. Takemura, S. Kobashigawa, K. Hirayama, K. Kawabata, S. Sagara, H. Yamashiro and E. Kuraya, “Development of an Acetic Acid Injection Device for Crown-of-Thorns Starfish Controlled by a Remotely Operated Underwater Robot”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 27, pp571-578, 2017, doi: 10.20965/jrm.2015.p0571 (査読有)
- ② 高橋 悟, 野田祥希, 松田朝陽, 川端邦明, 鈴木 剛, 武村史朗, 小笠原 敬, 金子俊一, “海洋観測に向けた海中ランドマークの生成手法”, *Journal of Signal Processing*, Vol.21, pp15-24, 2017, doi: 10.2299/jsp.21.15 (査読有)

他 1 件

[学会発表] (計 21 件)

- ① K. Kawabata, F. Takemura, T. Suzuki, S. Kobashigawa, K. Sawai, S. Takahashi and J. Xue, “Simultaneous underwater image gathering by using wireless stationary and movable camera nodes”, the Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2015

他 20 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川端 邦明 (KAWABATA, Kuniaki)  
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
 廃炉国際共同研究センター・主任研究員  
 研究者番号：90301754

### (2) 研究分担者

武村 史朗 (TAKEMURA, Fumiaki)  
 沖縄工業高等専門学校・その他部局等・准教授  
 研究者番号：70455187

鈴木 剛 (SUZUKI, Tsuyoshi)  
 東京電機大学・工学部・教授  
 研究者番号：00349789

高橋 悟 (TAKAHASHI, Satoru)  
 香川大学・工学部・教授  
 研究者番号：50297579

### (3) 連携研究者

山城 秀之 (YAMASHIRO, Hideyuki)  
 琉球大学・熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設・教授  
 研究者番号：80341676

磯村 尚子 (ISOMURA, Naoko)  
 沖縄工業高等専門学校・生物資源工学科・准教授  
 研究者番号：90376989