

徳之島浅間湾屋のウンブキ水中洞窟における ロボット探査とソナーによる形態計測の予備実験*

眞部広紀**1、長嶋豊**2、浦田健作**3、染谷孝**4、原田明**5、福岡聡紀**5

Preliminary Experiments for Robotic Exploration and Sonar Morphometry in Unbuki Underwater Cave, Wanya, Asama, Tokunoshima

Hiroki MANABE, Yutaka NAGASHIMA, Kensaku URATA, Takashi SOMEYA,
Akira HARADA, Toshiki FUKUOKA

Key words: Underwater Cave, ROV, Sonar, Morphometry, Three-Dimensional Modeling

Abstracts

In this paper, we discuss the methods of underwater cave morphometry; robotic exploration by remotely operated vehicle equipped with sonar measurement system for three-dimensional modeling, and show the preliminary experiment in anchialine cave, Tokunoshima, Kagoshima Prefecture, Japan.

1. はじめに

カルスト水文系の地下に形成された水中洞窟は、呼吸に必要な空気が無く、浮上可能な開放水面が無く、時として透視度が極端に落ちる極限環境であり、人間の進入を容易に受けつけなかった。これらの調査を行うことにより、水文地形・古環境・古生物・自然史・人類史等の多くの関係分野に貢献することができる。ケイブダイバーの洞窟潜水によって数々の水中洞窟の概容が解明されてきたが、殆どは未着手のフィールドとして残されている。海水準が時代とともに変動する沿岸域カルストの地下では、水中洞窟系を通じて陸上の湧泉・水没部と海底洞窟の水文系がつながる。この領域は淡水・汽水層と海水層が隣接したアンキアライン環境を形成し、塩水楔や淡水レンズ、稀少種・未知種生物の生息域を包含するため、水文地質・生物地理等の分野にも関係する。

高い費用対効果を期待できる水中洞窟の調査手法の一つとして小型無人機(水中ロボット)が挙げられる。洞窟外にいる研究者に代わって、未知の水中極限環境の科学的探査ミッションを行う RSA(遠隔操作型科学者代理ロボット Remote-controlled Scientist Agent) への期待は大きく、技術開発と実証が急務である。本研究グループでは、キャノン財団「理想の追求」助成第2回採択テーマ『陸海域カルスト水文系の追跡によるロボット探査とマッピング』(平成23~25年度)の一部により、ロボットに搭載した測距ソナーによる断面計測システムと、3次元概形モデル・環境地図作成の研究を進めてきた。日本洞窟学会との連携活動の一環である本プロジェクトは、アンキアライン水中洞窟を調査対象とし、3次元概形モデルの作成を第一段階の目標に設定している。

平成26年(2014年)5月に、鹿児島県徳之島浅間湾屋洞穴(あきまわんやどうけつ)のアンキアライン水没部「ウンブキ」において予備実験を実施した。測距ソナー・電子コンパス・傾斜センサーによる水中洞窟断面計測、自律航行、及び3次元概形モデル作成など、水中洞窟ロボット探査におけるミッション要素の検証を目的としている。本稿では「ウンブキ」水面下に発見した未知の水中洞窟、自律航行制御、計測データをもとにした3次元概形モデルについて報告する。

* 原稿受付 平成26年11月28日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**2 佐世保工業高等専門学校 地域共同テクノセンター

**3 大阪経済法科大学 地域総合研究所

**4 佐賀大学 農学部

**5 佐世保工業高等専門学校 専攻科2年

2. これまでの水中洞窟ロボット探査

陸上などの非水中環境で動作するロボットとは異なり、水中ロボットは防水・耐圧・流体力等などへの対応・仕様が要求され、潜航ミッションの開始時・終了時にロボットは水面を通過する。とくに、緊急時には水面までロボットを強制浮上させて機体を揚収するなど、海・川・湖沼など大きな水面を有する開放水面環境（オープンウォーター環境）における運用を前提にしている。

ところが、水中洞窟のような固体の天井によって開放水面が塞がれている閉鎖水面環境（オーバーヘッド環境）では、緊急回収時の対応オプションとして水面を使ロボットが回収不能になる可能性はゼロにできない。システム開発には現場での実証実験が不可欠であるが、それが実証実験を行う上で障壁となり、水中洞窟に対するロボット探査はほとんど行われてこなかった。

そこで、『校長裁量経費（融合研究）』の補助により、本校（佐世保工業高等専門学校）の浅海域用小型軽量水中ロボット研究チームと日本洞窟学会が連携して、国内初の試みとなる閉鎖水面環境対応型水中ロボットシステムの開発、実験地の選定・難易度評価・機体回収の枠組みの構築に着手した。

フィールドの予備調査の結果から選定した福岡県平尾台の「牡鹿洞」水没部と熊本県五木村の「白滝の穴」湧泉における水中ロボット探査実証実験により、二つの未知の水中洞窟を発見し撮影記録に成功した¹⁾。また、熊本県球磨村の「岩戸洞」洞外湧泉の水中洞窟において、方位計測・姿勢計測実験、ラインレーザーの水中投射実験、移動軌跡の概形モデル試作を行った³⁾。

3. アンキアライン洞窟

「アンキアライン(anchialine, anchihaline)」はギリシャ語の「ankhialos (海岸に近接する)」に由来し、「地表では海につながっていないが、地下水文系はつながっている」という意味で広く使われている⁴⁾⁵⁾。当初は、海岸に近くに位置する水溜り(プールや池)に対して使われていたものが、水没部・湧泉を含む洞窟に対しても適用されるようになった。本稿では正確を期して、水中洞窟が発見され存在が判明する

までは「アンキアライン洞窟」、判明した後から「アンキアライン水中洞窟」と呼ぶことにする。

アンキアライン洞窟の水文環境では、陸からの淡水と海からの塩水が混合して汽水が貯留したり、淡水と塩水が上下二層に併存する塩分躍層・塩淡境界層が形成されたりする。また、外海との水理学的な連結により、潮汐の影響を受けて水位が上下動する。水文環境の特殊性から、生息分布が限られる起源の古い生物が、新種を含めて多数発見されているため、フィールドの価値は極めて高い⁶⁾⁷⁾。

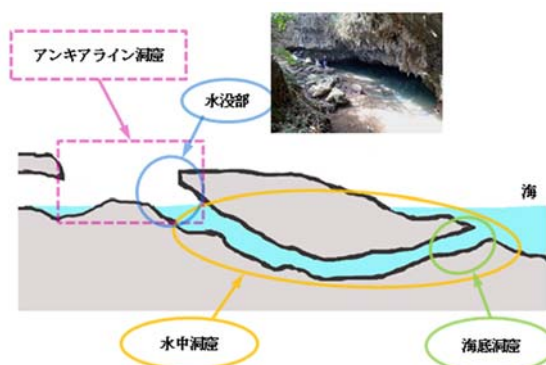


図1 アンキアライン洞窟（概念図）

4. 探査ミッションの検討

沿岸域カルストのアンキアライン洞窟の調査を進めるにあたり、当初、以下のようなミッション要求を設定した：

- ・水没部・湧泉に対して水中ロボット探査を行い、水面下の形状を撮影記録する。
- ・水中洞窟の存在が確認できた場合、その3次元の基盤地図を作成する。

アンキアライン洞窟では、プランクトンや微細粒子の後方散乱、塩淡境界層の透明度低下が想定されるため、カメラ・レーザー等の光学システムに依存しない操縦・計測の方法が必要になる。深度センサー・方位センサーによる自律航行制御、測距ソナーによる洞窟断面計測を採用し、ミッション要求を再設定した：

- ・透明度低下による視界悪化に対応するため、操縦オプションとして深度・方位による自律制御を採用する。
- ・水没部・湧泉の水面下奥部の地形をソナーによって断面計測する。水中洞窟の存在が確認できた場合、その3次元の基盤地図を作成する。

キヤノン財団「理想の追求」助成第2回採択課題『陸海域カルスト水文系の追跡によるロボット探査とマッピング』（平成23～25年度）の助成費の一部によって、水中ロボットの自律航行制御、測距ソナーによる断面計測、3次元概形モデル・環境地図作成の研究を進めた⁸⁾。

5. システム構成

本研究で開発した水中ロボットは、未知のアンキアライン洞窟を探索し、未知の水中洞窟を発見して3次元概形モデルを作成するミッションを実現する目的で製作された。全長670mm、高さ300mm、幅440mm、乾燥質量20Kgで、円筒状の亚克力管体と浮力材、センサー、スラスタ等機器から構成される(写真1)。制御用マイコンとしてPSoC3を用いており、各種センサーの計測データ情報を統合することで水中ロボットの現状把握と自律制御を可能としている(図2)。推進用と昇降用として、左右に二つつつ水中スラスタを装備しており、潜降・浮上、旋回、前進・後進の3つの自由度がある。電源にはニッケル水素電池(4300mAh、1.2V)を用いており、10セル直列接続したものを制御用に、14セル直列接続したものをスラスタ駆動用に使用している。



写真1 水中ロボット(外観)

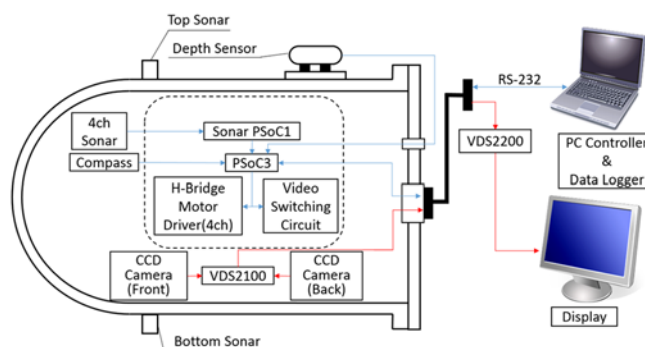


図2 水中ロボットシステム構成図

5.1 センサー

目視操縦用の CCD カメラはロボットの前後に1機ずつ搭載している。前進進入時に前部カメラを、後退帰還時に後部カメラを使用することができる。

水中洞窟において水中ロボットを操作する際に方位と深度を一定化しホバリングができれば位置・姿勢の静止保持が可能となり、周囲の環境の計測が容易になる。そのために、方位・ピッチ・ロールの計測ができる電子コンパス(TCM2.5)、深度センサーとして防水処理を施した圧力センサー(PDCR4010)を搭載して自律制御に必要な現在値を取得している。また、断面計測用の測距ソナーを搭載している(後述)。

5.2 通信システム

水中ロボットと操縦者(PC)の間の通信方式は、操作コマンドやセンサーデータを電氣的に通信するシリアル通信と、JOBLE社製映像伝送機器VDS2100/2200を用いた同軸ケーブル伝送を採用している。

5.3 操縦システム

水中ロボットはPC上で動作するソフトウェアで操作可能である。ソフトウェアはVisualBasic2010で作成したものを使用している。コントローラーでは水中ロボットの操作のほかに、制御定数や、自律制御の目標値の変更、方位や深度などの値をエクセルファイルに出力することが可能となっている。PC側では、Princeton社製デジ造を用いて CCD カメラの映像を撮影表示・記録している。

5.4 航行制御システム

本システムは4基の水中スラスターとPSoC3から構成され、ROV(Remotely Operated Vehicle)モードとAUV(Autonomous Underwater Vehicle)モードをコントローラーからの入力によって切り替えることができる。ROVモードでは、前進・旋回・潜降・浮上など10種類のコマンドにしたがって、操縦者がリアルタイムで制御することができる。AUVモードでは、深度センサーと電子コンパスの計測データをPSoC3が抽出・統合し、PID制御方式の速度形アルゴリズムにより操作量を計算した上で水中スラスターを制御する。また、「深度のみ一定」、「方位のみ一定」、「深度一定かつ方位一定」の3つの制御方式を選択することができる。

5.5 水中洞窟の断面計測システム

水中洞窟の断面概形を計測するために、ロボットに搭載した4ch測距ソナーは機体の上下左右方向に向けている(写真1, 図3)。ケーブルを1[m]延ばす毎に、深度・方位と洞壁までの上下左右の距離を記録する。ケーブル長と深度のデータから三角法で算出した移動距離と方位データと統合し、3D-CADソフトを使用して3次元概形モデル作成する(図4)。

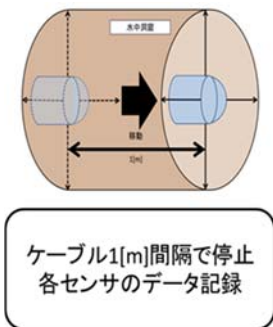


図3 水中洞窟内部空間の測距 (概念図)

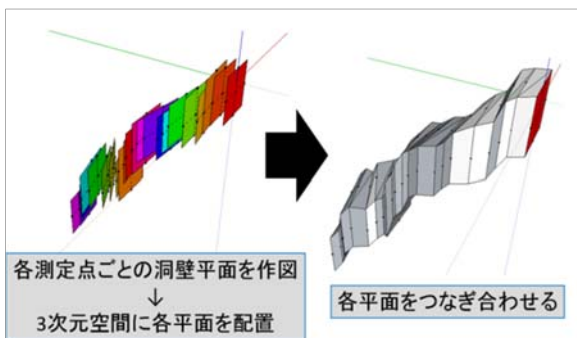


図4 水中洞窟3次元概形モデル作成

6. ウンブキ水中ロボット探査

奄美群島徳之島(鹿児島県大島郡)の天城町湾屋海岸から約400m内陸側に、浅間湾屋洞穴は開口する(図5, 6, 7)。陸側崖下の湧水が流入する水没部は汽水を湛え、その水面は近隣の海面とほぼ同じ水準で潮汐に連動して上下することから「ウンブキ」(海の谷)と呼ばれている。地表では海とつながっていないが、地下で海との接続が推測される。その意味で「ウンブキ」はアンキアライン洞窟であり、ウンブキアナゴなど稀種の生物が生息している⁹⁾。



図5

徳之島天城町と浅間湾屋



図6 上：浅間湾屋の海岸線 下：「ウンブキ」

写真2
浅間湾屋洞穴

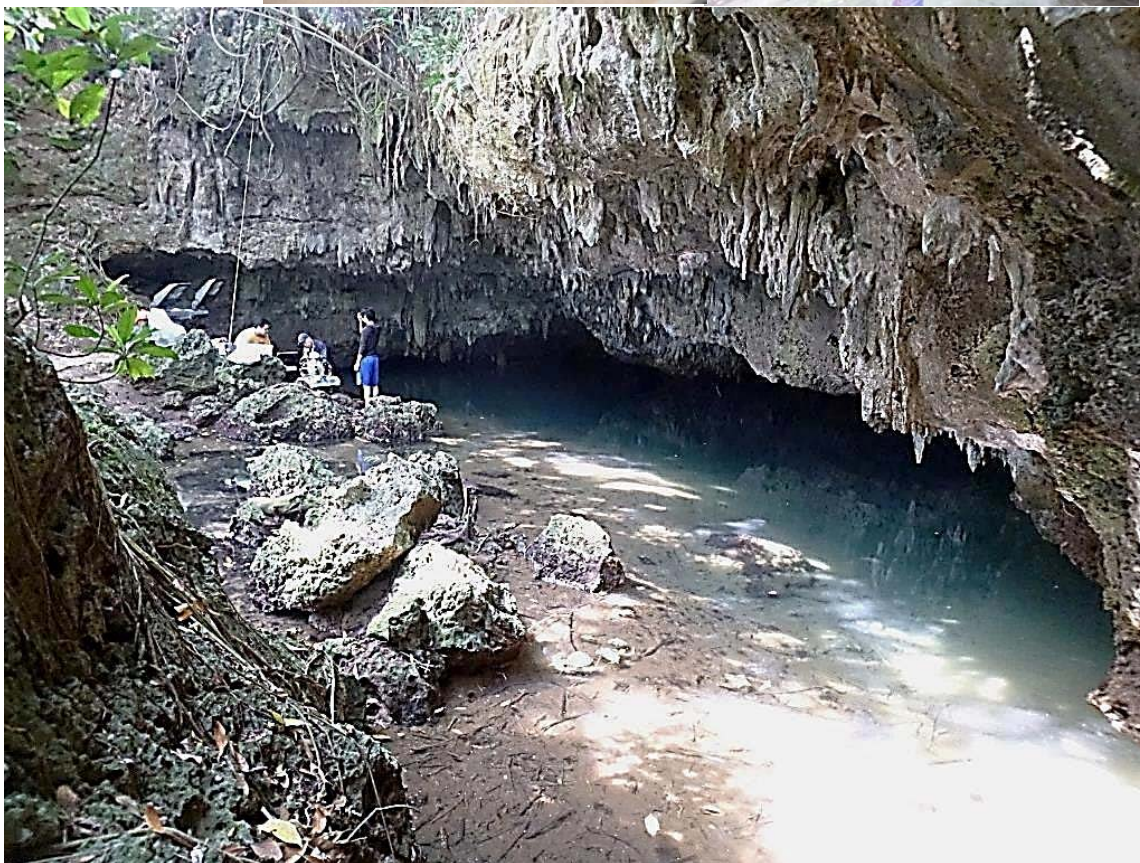


写真3 「ウンブキ」



写真4 水中ロボットの調整とシステムチェック



写真5 「ウンブキ」探査開始



写真6 水面上



写真7 水面下



写真8 水面下に発見した「ウンブキ水中洞窟(鍾乳洞)」



写真9 水中洞窟の洞床とエビ

6.1 探査実験

「ウンブキ」の水面下は透明度2m以下の不良視界であったため、ROVモードによる有視界操縦からAUVモードに切り替えて、「深度一定」航行、「方位一定航行」等の自律航行実験を行った。

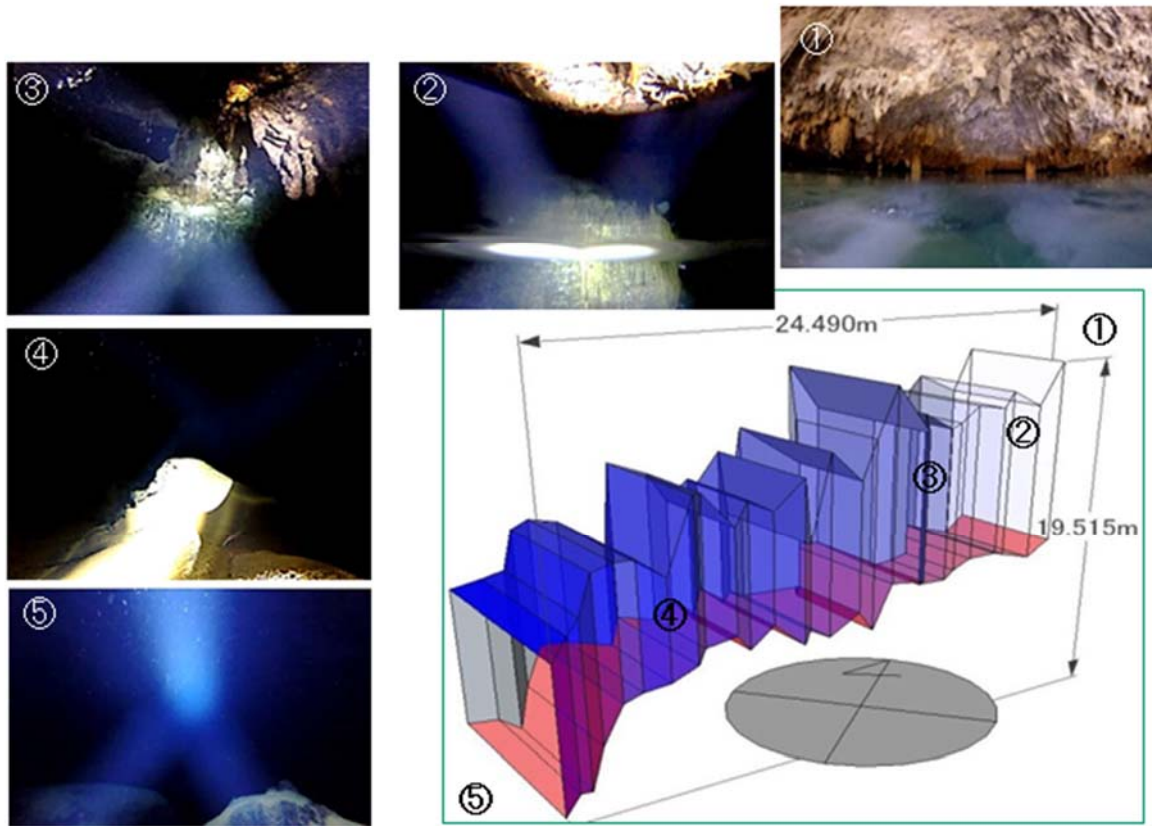
次に、奥行と水深が増大する方向を探索する目的で、進行方位を固定して水中ロボットに一定のケーブル長の範囲内を往還させた。方位を少しずつ変更しながら往還を繰り返す中で、数回目のミッションの途中で、西南西方向の突き当り直下に未知の水中洞窟が広がっていることを発見した。

(以下、「ウンブキ水中洞窟」と仮称する。本校が発見した水中洞窟では3番目になる。)

「ウンブキ水中洞窟」の奥に水中ロボットを進入させて探索を行い、全ケーブル50mを投入して最奥到達点(図7⑤)を撮影した。このときのロボットの深度は約11.3mで、水中洞窟のトレンドが海側洞口(海底洞窟)の開口推定域に向けて南南東に変化することを示すデータを得た。

6.2 ウンブキ水中洞窟の形態計測

ケーブル長で1m潜航する毎に、深度と方位、洞壁内面までの4方向の距離を記録した。後処理により、記録したケーブル長と深度データから、三角法により算出した水中ロボットの進入距離と方位データと統合し、3D-CADソフトを使用して3次元概形モデルを描画した(図7,8)。



※⑤は今回探査の最奥到達点

図7 「ウンブキ水中洞窟」と3次元概形モデルとの対応

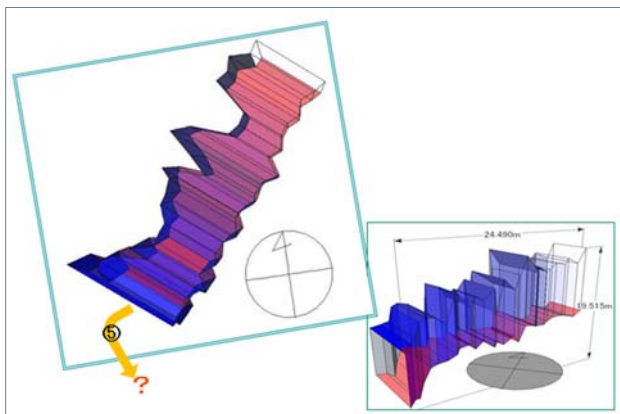


図8 平面投影図(上面図)と3次元概形モデル



図9 地図に重ねた平面投影図

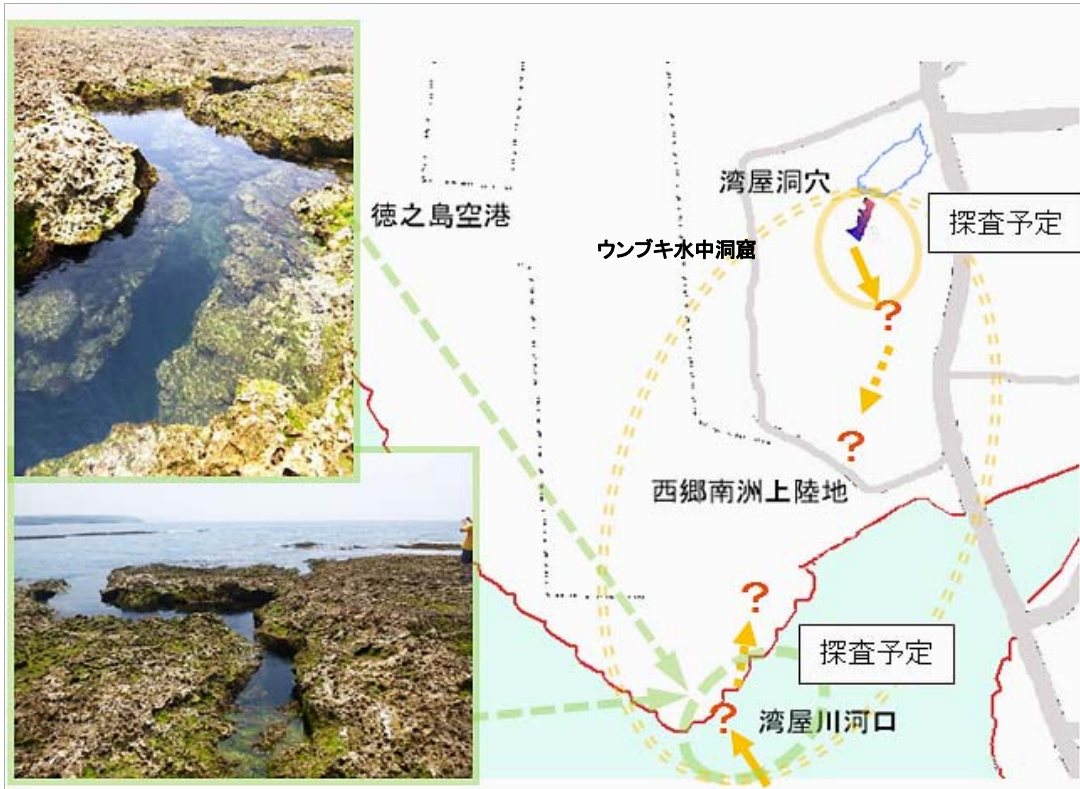


図 10 「ウンプキ水中洞窟」探査予定範囲

7. まとめと課題

本研究グループは、小型水中ロボットに搭載した測距ソナーによる断面計測システムの構築と、3次元概形モデル・環境地図作成の研究を進めてきた。鹿児島県徳之島のアンキアライン洞窟である浅間湾屋洞穴の水没部「ウンプキ」において、水中領域の横断面計測と自律航行制御の予備実験を実施した。「ウンプキ」水面下深奥部に未知の水中洞窟を発見し、ロボット最奥到達点を越えて水中洞窟が続いていることを確認した。また、測距ソナーの計測データによる3次元概形モデルを作成した。

直近の課題として、「ウンプキ水中洞窟」については、ロボットの最奥到達点を越えた未踏領域の探査を進める(図 10)。ロボットシステムについては、長距離ケーブルへの換装に伴う伝送システムの性能向上、深度センサーに含まれる高周波ノイズの低減、I 制御による安定性の向上、塩分濃度センサーやサンプル採取機構の搭載が挙げられる。3次元概形モデルに関しては、リアルタイム生成、GIS による地形・地質データとの統合を進めていく。

8. 今後の展開

ロボットの最奥到達点を越えた未踏領域の方向トレンドは南南西から南南東に変化しているが、概ね南方向にある湾屋川北岸を指している(図 9,10)。浅間湾屋洞穴周辺の石灰岩は湾屋川北岸まで覆っているため、「ウンプキ」の地下水文系は水中洞窟の形態で海まで続き、海底に洞口が開いていると考えられる。湾屋川河口周辺に設定した「ウンプキ水中洞窟」の海側洞口推定域の河床探索を行う(図 10)。

南西諸島における未探査のアンキアライン石灰洞として、浅間湾屋洞穴の他に沖縄県沖縄本島「スーガー(塩川)」「都屋ティラヌガマ」、同県宮古諸島下地島のブルーホール群¹⁰⁾などが挙げられる。アンキアライン溶岩チューブは、長崎県五島列島福江島の「先不知井坑(さきしらずのいあな)」が知られている⁷⁾¹²⁾。これらの候補地の予備調査を進め、水中ロボット探査実験を行う。

謝辞

本研究はキヤノン財団の研究助成プログラム「理想の追求」により進めることができました。財団のご支援に深く感謝申し上げます。

九州大学応用力学研究所には、共同利用研究として深海機器力学実験水槽の施設を使用させていただきました。感謝申し上げます。

「ウンブキ」水中ロボット探査を実施するにあたり、浅間湾屋洞穴園地を管理されている徳之島天城町商工水産観光課にご理解とご許可をいただきました。感謝申し上げます。また、情報収集にご協力くださり、現地の案内をしてくださった山田文彦さんには、大変お世話になりました。ありがとうございます。

本研究は本校電気電子工学科と地域共同センターのご支援のもとに進めることができました。感謝致します。

参考文献

- 1) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 宮本憲 :
水中洞窟探査ロボットの検証実験と予備調査,
佐世保工業高等専門学校研究報告
第46号 pp.43-48, 2009年
- 2) 眞部広紀, 浦田健作, 長嶋豊,
山口卓哉, 山口拓朗, 木村昌生, 滝川大介 :
**白滝の穴水中洞窟における
探査ロボットとサーベシステムの実証実験,**
佐世保工業高等専門学校研究報告
第47号 pp.39-44, 2010年
- 3) 眞部広紀, 浦田健作, 長嶋豊, 染谷孝, 須田淳一郎,
山口卓哉, 山口拓朗, 浅田優紀, 川田駿也 :
**岩戸洞水中洞窟におけるロボット探査と
球磨カルストの水文地質予備調査,**
佐世保工業高等専門学校研究報告
第48号 pp.33-44, 2011年
- 4) L.B. Holthuis :
**Caridean Shrimps Found in Land-Locked Saltwater Pools
at Four Indo-West Pacific localities (Sinai Peninsula,
Funafuti Atoll, Maui and Hawaii Islands), with the
Description of One New Genus and Four New Species,**
Zoologische Verhandlungen 128:pp.1-48, plus 1-7, 1973
- 5) J.H. Stock, T.M. Iliffe, D. Williams :
The Concept of “Anchialine” Reconsidered,
Stygologia 2(1/2), pp.90-92, 1986

- 6) 瀬能宏, 日比野友亮, 山田文彦 :
**奄美群島徳之島のアンキアライン洞窟から得られた
日本初記録のイワアナゴ科の稀種ウンブキアナゴ(新称)**
神奈川県立博物館研究報告自然科学 pp.1-6, 2014
- 7) 村井嘉克:
**五島列島富江町の溶岩トンネル内にすむ
ドウクツミミズハゼ,**
長崎県生物学会誌, 第3号: pp.1-8, 1972
- 8) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝,
下尾浩正, 前田貴信, 三宅飛翔, 柴田裕貴,
原崎芳加, 原田明, 白川知秀, 福岡聡紀 :
**水中洞窟系のロボット探査と
ソナーによる形態計測の予備実験,**
佐世保工業高等専門学校研究報告
第49号 pp.51-64, 2013年
- 9) 原田明, 長嶋豊, 眞部広紀, 川下智幸 :
**3Dモデリングを目指した
水中洞窟探査用自律型水中ロボットの開発,**
日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
2014 in Toyama, 講演要旨集 1A1-G08
- 10) 安谷屋昭 :
**沖縄県下地島の石灰岩段丘地形について,
— 陥没ドリーネ・入江水道の形成発達 —**
宮古島市総合博物館紀要第18号, pp.1-23, 2014年
- 11) 川原 歴:
富江溶岩隧道の研究,
地球, vol. 2, pp. 664-673, 1924
- 12) 松本徂夫他:
**長崎県福江島富江半島溶岩トンネル
—とくに地質・形態および二次鉱物生成物について—,**
洞窟研究, no. 4, 山口ケイビングクラブ,
秋吉台科学博物館. 1971