

第2回「理想の追求」研究成果報告

研究期間：2011年4月1日～2014年5月31日

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

リーダー： 眞部広紀 佐世保工業高等専門学校

メンバー： 長嶋 豊 佐世保工業高等専門学校

浦田健作 大阪経済法科大学

須田淳一郎 佐世保工業高等専門学校



鹿児島県奄美群島徳之島の浅間湾屋洞穴「ウンブキ」（海の谷、陸の中の海）

1. 背景および目標

地殻の隆起・沈降や海水準の上昇・下降の影響により陸海域の境界は時代とともに変動し、沿岸域のカルスト地下には陸域と海域に跨った水中洞窟系が形成される。陸上の湧泉・水没部と海底の洞窟を連ねるその内部は、淡水と海水が境界するアンキアライン環境であり、波浪・流れ・生物によって攪乱されにくく、二次生成物・堆積物・希少種生物・化石・古人骨・遺物等の調査を行えば、水文地形・古環境・自然史・生物・人類史等の多くの関係学術分野に貢献することができる。しかしながら、水中洞窟系は自然光が届かず、呼吸に必要な空気が無く、浮上可能な開放水面が無く、時として視界不良な低透明度となる進入・帰還が困難な極限環境である。その一部はケイブダイバーの洞窟潜水によって解明されているが、殆どは未発見・未確認・未調査のフィールドとして残されている。これらの豊かな研究資源に着手するには、より一層の安全性と費用対効果を期待できる探検調査手法が必要であり、有望な選択肢の一つに小型無人機(水中ロボット)がある。水中洞窟の関連分野の研究者たちは熱烈に無人機を要望していたが、水中ロボットの研究者たちは機体が回収不能になることを危惧し非常に慎重であった。この停滞状況をブレイクスルーするためには、実験フィールドの選定・難易評価・機体回収の枠組みが不可欠である。そこで、佐世保工業高等専門学校(現佐世保大学)の浅海域用小型軽量水中ロボット研究チームと、日本洞窟学会の研究グループが協同して、閉鎖水面環境対応型水中ロボットの開発プロジェクトを開始した。予備調査によって選定した福岡県平尾台「牡鹿洞」水没部や熊本県五木村「白滝の穴」湧泉において、水中ロボット探査により未知の水中洞窟を発見し撮影記録に成功した。熊本県球磨村「岩戸洞」洞外湧泉の水中洞窟においては、電子コンパスによる方位・姿勢計測実験、ルート視認用ラインレーザーの水中投射実験を行った。

本研究課題は、アンキアライン水中洞窟系の基盤地図となる3次元概形モデル作成とマッピングを目標に置き、そのための測距データを取得する水中ロボット探査ミッションを目指した。カメラ・レーザー等の光学システムが使用できない低透明度環境を想定して、測距センサーはソナーを採用した。また、調査価値の観点から新規フィールド開拓を見据えて、南西諸島の未知の水中洞窟系を対象とすることにした。

2. 主な研究成果

[ロボットのシステム] 電子コンパス・傾斜計、深度センサー、4方向ソナーを搭載した小型水中ロボット(ROV)を製作し性能評価を行った。「岩戸洞」洞外湧泉においてソナーによる横断面計測実験を行い、水中洞窟の3次元概形モデルを作成した。

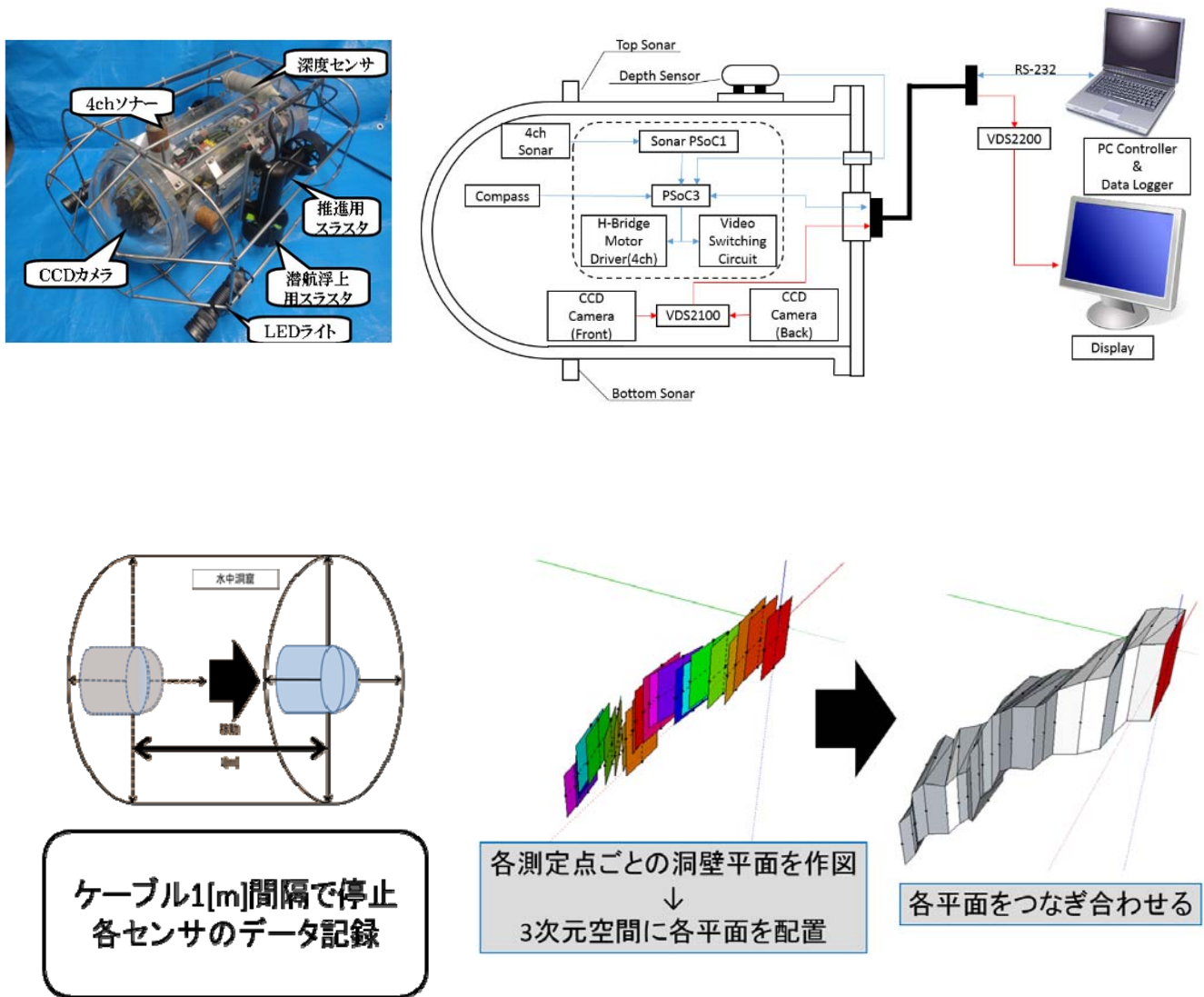
[予備調査] 南西諸島沿岸の予備調査を行い、探査候補地を選定した。

[探査ミッション] 第一候補地である鹿児島県徳之島天城町浅間湾屋洞穴の水没部「ウンブキ」(海の谷、陸の中の海)において水中ロボット探査を実施し、未知の水中洞窟(水中鍾乳洞)を発見し撮影記録した。並行してソナーによる横断面計測を行い、3次元概形モデルを作成した。ロボットの最奥到達点付近において、海側洞口(海底洞窟)の開口推定域に向けて水中洞窟の方向トレンドが変化することを示すデータを得た。

※ 2014年5月現在までに、海側洞口の推定域が画定した候補地は「ウンブキ」だけである。

3. 研究成果

[ロボットのシステム] 1年目(2011年度)では、電子コンパス・傾斜計、深度(水圧)センサー、4方向ソナーを搭載したROV方式の小型水中ロボットを製作し、潜航運動性能試験と測距ソナーの校正試験を実施した。2年目(2012年度)では、深度センサーによる水深設定自律航行試験、電子コンパスによる方位設定自律航行試験、IMUによるロボットの位置・姿勢軌跡の計測実験を行った。3年目(2013年度)では、本校(佐世保工業高等専門学校)の海洋実験水槽と九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において、4方向ソナーによる測距試験と深度・方位設定自律航行実験を実施し性能の評価を行った。「岩戸洞」洞外湧泉においてソナーによる横断面計測実験を行い、水中洞窟の3次元概形モデルを作成した。4年目(2014年度)4月に、大分県豊後大野市三重「稲積水中鍾乳洞」において、水中ロボットの操縦・計測システム馴致訓練と水中ロボットの複数機運用による効果の評価を行った。



左上：水中ロボット外観、右上：ロボットのシステム構成
下：4方向ソナーによる横断面計測と3次元概形モデル化

第2回「理想の追求」研究成果報告

[予備調査] 沖縄県の石垣島、宮古諸島、沖縄本島、南大東島、鹿児島県の沖永良部島、徳之島に対して、沿岸のカルスト地形やアンキアライン環境の予備調査と情報収集を行い、水中ロボット探査の候補地を選定した。



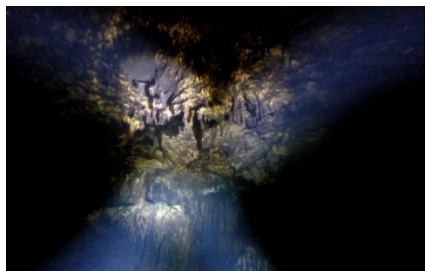
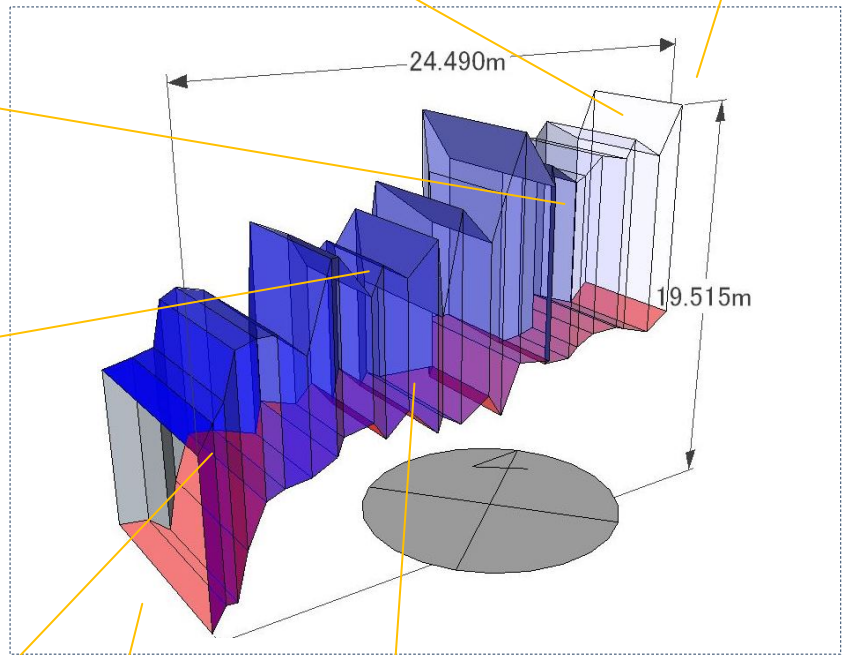
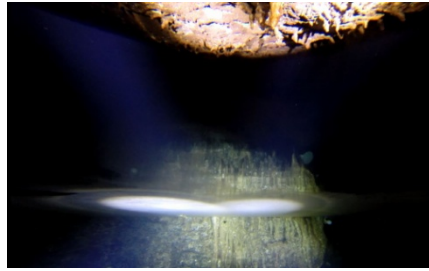
[探査ミッション] 鹿児島県徳之島天城町の浅間湾屋洞穴下流水没部「ウンブキ」は、水位の干満があるアンキアライン環境であり、近隣の海と地下水系の接続が推定されている。その接続形態が水中洞窟系であることを立証するため、4年目(2014年度)の5月に水中ロボット探査を実施した。透明度2m以下の不良視界でロボットの操縦は困難であったが、数回の往還ミッションによって西南西の方向に未知の水中洞窟を発見し、撮影記録を行った。4方向ソナーによる横断面計測を行い、「ウンブキ」水中洞窟の3次元概形モデルを作成した。全ケーブル50mを投入した最奥到達点におけるロボットの深度は約11.3mで、水中洞窟のトレンドが海側洞口(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。



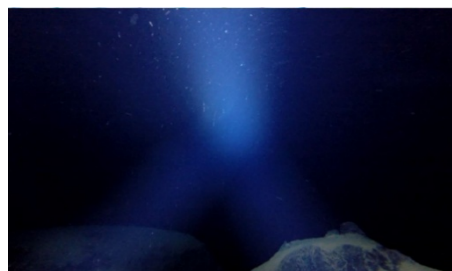
左：ロボットシステムの組上げ、 右：「ウンブキ」探査開始

「ウンブキ」水中洞窟の3次元概形モデル

水面下においても、つらら石やフローストーンなどの鍾乳石が多い



ライトを避けて亀裂に隠れるエビらしき生物



ロボット最奥到達点から臨む未知領域の闇

4. 今後の取り組み

[探査・調査] アンキアライン水中洞窟系の陸側部分調査として、徳之島「ウンブキ」の第2次ロボット探査を予定している。海側部分については、「ウンブキ」の海側洞口推定域に設定した湾屋川河口の河床地形調査と洞口探索を準備している。また、宮古諸島、沖縄本島、南大東島等の予備調査によって発見した、水底奥に未知の水中洞窟が開口しているアンキアライン環境に対して、水中ロボット探査を予定している。

[ロボットシステム] 今回のロボット最奥到達点を越えた未知領域の水中洞窟探査を行うために、長距離ケーブルに対応した信号伝送システムの準備を進める。既知の水中洞窟内におけるオートパイロット機能を実現するために、ロボットの深度・方位プロフィールや3D概形モデルをもとにした自律制御の研究を進めて、AUV化を図る。

5. 発表実績

[学会発表]

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,

原田明、長嶋豊、眞部広紀、川下智幸、

ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 in Toyama, 2014年5月

熊本県岩戸洞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、浦田健作、染谷孝、長嶋豊、

日本洞窟学会平成25年度学術講演会, 2013年11月

コンパクトで柔軟性の高い水中ロボットの開発,

三宅飛翔、下尾浩正、長嶋豊、眞部広紀、

第65回連合大会 電気関係学会九州支部連合大会, 2012年9月

[研究報告]

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,

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

佐世保工業高等専門学校第49号研究報告, pp51-64, 2013年1月

[新聞報道記事]

水中ロボットで「ウンブキ」探査=構造把握期待、遠隔で初カメラ=天城町で佐世保高専チーム,

奄美新聞, 2014年5月3日

「ウンブキ」にロボット投入=海とのつながり? 解明へ=研究者ら来島調査—天城町浅間湾屋洞窟,

南海日日新聞, 2014年5月3日
