

沿岸域カルストのアンキアライン水文系における ROV 調査法の検討*

眞部広紀**1, 稲川直裕**2, 山田努**3, 長嶋豊**4

Study on ROV Survey Methods for Anchialine Hydrology System in Coastal Karst *

Hiroki MANABE**1, Naohiro INAGAWA**2, Tsutomu YAMADA**3, Yutaka NAGASHIMA**4

Key words: ROV, Anchialine Hydrology System, Underwater Cave, Coastal Karst

Abstracts

In this paper, we discuss survey methods for anchialine hydrology system with underwater caves in coastal karst using ROV (Remotely Operated Vehicle).

1. はじめに

沿岸域カルストにおいて、陸上の湧泉・水没部と海底洞窟はアンキアライン水文環境の一部を形成している。淡水・汽水層と海水層が隣接した塩水楔や淡水レンズが稀少種・未知種生物の生息域を包含する。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・人類史等の多くの分野に貢献できる。

水中洞窟や海底洞窟は時として透視度が極端に低下する視界不良環境であり、人間の呼吸に必要な空気と浮上可能な開放水面が無い閉鎖水面環境である。水中洞窟の調査手法は、単一の水中ライト・単一の空気ガスタンクの夜間スクーバ潜水装備から、複数化・冗長化した水中ライトや空気等の呼吸ガスタンク、近年ではリブリーザ（再循環呼吸器）により安全性と確実性を高めたスクーバ洞窟潜水装備に進化してきた。しかしながら、「有人」であることは「呼吸ガス」に起因する制限を受けるため調査機会は少なく、実質的に水中洞窟の殆どが未着手の状態である。「無人」の手法（小型水中ロボット）であれば「呼吸ガス」の制限がなく、費用対効果の向上と調査機会の増加を期待できる。

本研究グループの目的は、小型軽量水中ロボット (ROV) と地上ロボット (UGV, Unmanned Ground Vehicle) を基盤とした、閉鎖水面環境に対応可能な水中探査システムの開発にある。日本沿岸域学会の「研究グループ助成」による『海岸・沈水カルストを含む沿岸域洞窟地形の保全と海水準変動の編年に関する研

究』（2010～2011年度）を端緒として、キャノン財団の研究助成プログラム「理想の追求」第2回による『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』（2011～2013年度）、日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究(C)による『水没によって閉鎖された空間環境を探査する水中・非水中複合ロボットシステム』（2013～2016年度）の補助により研究を進めてきた¹⁾⁷⁾。近年、立ち上げた、ROV・UGV・UAVの研究者と専門家の横断的連携組織『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は国立高等専門学校機構の平成30年度「研究ネットワーク形成支援事業」にも採択され、様々なプロジェクトを進めている。

本稿では、本研究グループが ROV 調査を実施した水中洞窟の事例に基づいて、新たな対象に選んだ宮城県気仙沼市神明崎の「管絃窟」の調査手法の検討を行う。

2. 管絃窟

気仙沼市を含む宮城県北部から南部北上山地にかけての地域には、古生代および中生代に堆積した堆積岩類、特にシルル系から白亜系がほぼ連続して露出している。また、それら堆積岩類を貫く花崗岩類や変成岩類も広く分布している。気仙沼市中心部には日詰-気仙沼構造線が北北西-南南東方向に走っており、これに沿って鹿折川さらには気仙沼湾が形成されている⁸⁾。この構造線沿いには下部ペルム系坂本沢層群の小規模な石灰岩体（約2億8000万年前）が露出しており、それらの石灰岩体の一つが神明崎となっている。神明崎は南北に約120m、東西幅約50m、標高約14mの岬であり、大部分が五十鈴神社の境内である（図1,2）。石灰岩の層理面の走向傾斜はおおよそN33°E、50°Wであり、フズリナ類の化石も認められる⁹⁾。

* 原稿受付 平成30年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**2 日本文理大学 工学部

**3 東北大学大学院 理学研究科

**4 佐世保工業高等専門学校 地域共同テクノセンター

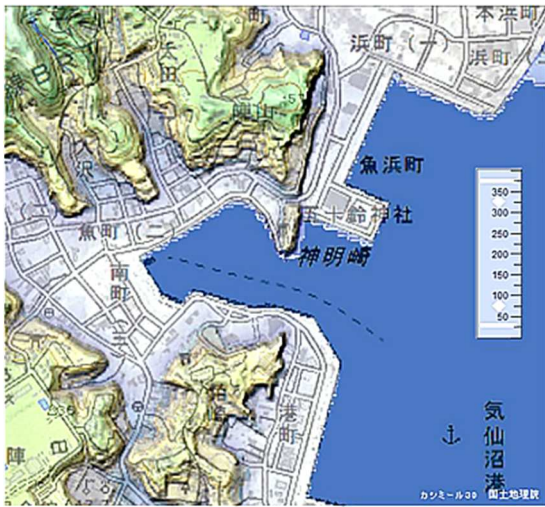


図1 神明崎

上 位置(カシ米尔 3D・地理院地図)
 下 外観(枠線内が管絃窟洞口付近)



図3 管絃窟洞口

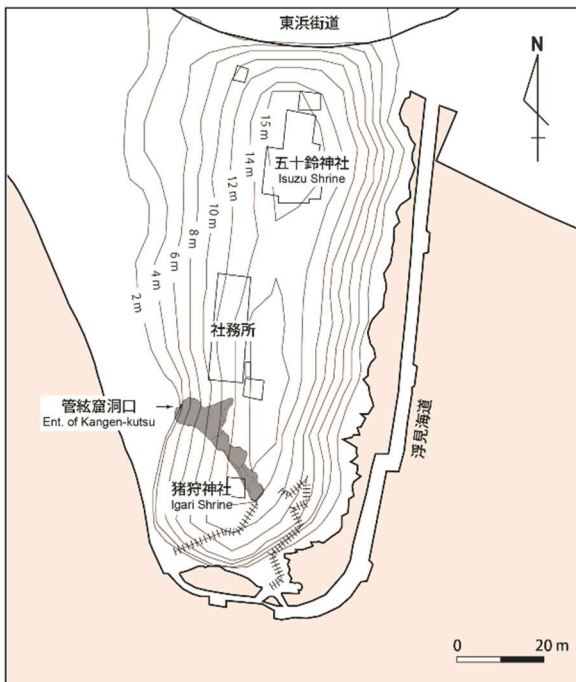


図2 神明崎と管絃窟



図4 管絃窟洞内

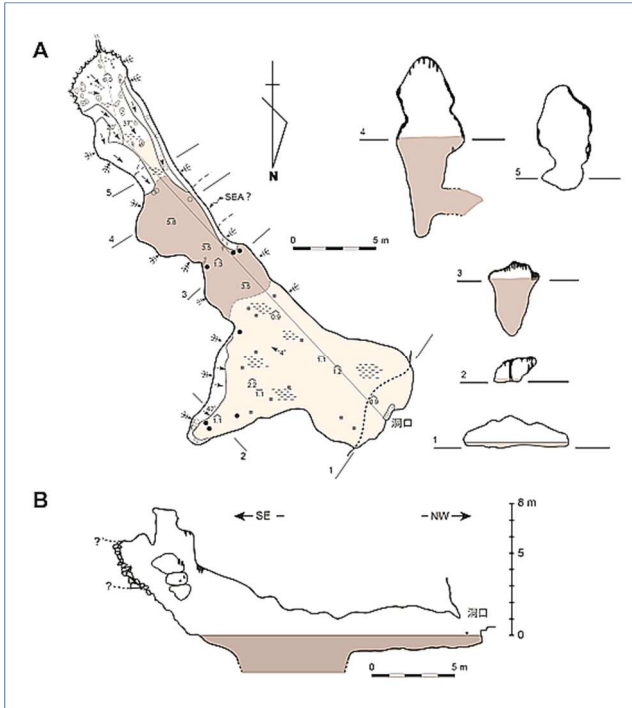


図5 管絃窟 (A 平面図 B 縦断面図)

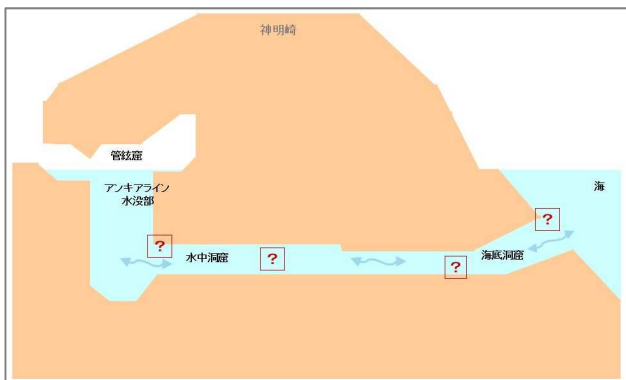


図6 「管絃窟」 (展開縦断面模式図)

神明崎を構成する石灰岩体には 7 つの洞窟が記載されており¹⁰⁾、これら洞窟をまとめて「神明崎洞穴群」と呼ぶ¹¹⁾。「管絃窟」はこの洞穴群の一つであり、神明崎南西端の海面近くに開口する半海中鍾乳洞である(図3)。洞口下端は平均海面以下、上端は標高約 0.8 m であり、洞窟最奥部を除く洞床の大部分は平均海面以下であり(図4,5)、ヒトデなどの海棲生物も生息している。

洞窟内には石筍、つらら石、石柱などの二次生成物(鍾乳石)が発達しているが、その一部は海面下に没している。例えば、洞窟中央部のプールとの洞口の間において北東方向に伸びるホールには、下部が水没した石柱がみられる。これらの石柱や石筍は、海面が現在よりも相対的に低かった時期に形成されたと考えられる。洞窟中央部のプールの水面下の壁面付近には石筍が認められる。

洞窟内の水面は潮汐と連動して上下するが、現在は洞口前には舗装道路(標高 0.4-0.5 m, 幅数 m)があるため、洞口からの海水の出入りはほとんど無いと考えられる¹¹⁾。海水の流入・流出は、洞窟中央部にある深さ 5-6 m 程度のプールの下部に気仙沼湾と通じる水路を通じて行われていると推測されている(図5)¹⁰⁾。ただし、その詳細は未確認であり、洞窟外の気仙沼湾海底付近においても管絃窟と通じる水路は確認されていない。

本研究グループでは、「管絃窟」の未確認水中部分(図5A「SEA?」、図5B下の点線部、図6の[?])の様相を解明することを目的として、水没部の ROV 調査を計画している。

3. 類似環境の調査例

海・湖・川などの広い開放水面を前提とした ROV 水中調査では、オペレータ基地(船上、海岸等)と ROV を繋ぐテザーケーブルに適切なテンションをかければ、おおよそ直線的な状態を維持できる。海底の地形の凹凸・構造物・海草等を除いて引っ掛かる可能性は少ない。一方、水中洞窟の閉鎖水面環境の ROV 調査では、ケーブルに適切なテンションをかけても、洞窟壁面の屈曲により、折れ線的、曲線的な状態にならざるをえない。さらに、狭窄部に引っ掛かり、摺動するケーブルが絡まる場合が少なくない。対策としては、

- ① 深刻な状況に陥らない範囲の長さにケーブル展開距離を保つ
- ② 屈曲点に摺動させやすい支点を設置する
- ③ 洞窟の形状に応じてケーブルを能動的に動かすシステムを装備する

が考えられる。本節では、①タイプの水中洞窟 ROV 調査の二例を挙げる。

3.1 徳之島浅間湾屋洞穴「ウンブキ」⁶⁾

鹿児島県徳之島(大島郡天城町)の湾屋海岸から約400mの位置に、浅間湾屋洞穴は開口する。陸側崖下の湧水が流入する水没部は、水面が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、地下で海との接続が推定されているアンキアライン洞窟であり、「ウンブキ」(海の谷)と呼ばれている(図7,8)。



図7 ウンブキ(外観)



図9 ROV(外観)佐世保工業高等専門学校 長嶋研究室



図10 鍾乳石 (ROV カメラ画像)
上 水面上 下 水中

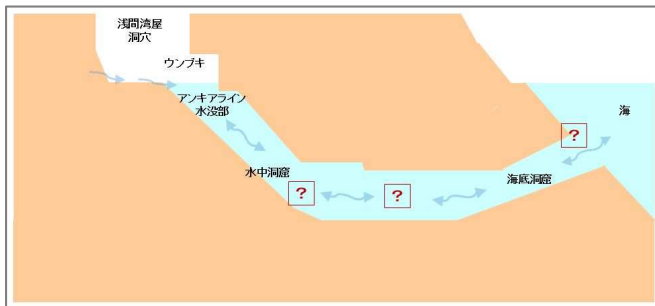


図8 「ウンブキ水中洞窟」の縦断面概念図

「ウンブキ」水面下の透視度が2m以下であったため、小型水中ロボット(ROV、図9)を手動モードによる有視界操縦から自律航行(AUVモード)に切り替えて、「深度一定」航行と「方位一定航行」等の実験を行った。数回目の潜航で西南西方向奥に進入させたとき、直下に未知の水中洞窟(以下、「ウンブキ水中洞窟」、図10)を発見した。さらに「ウンブキ水中洞窟」の奥にROVを進入させ、全ケーブル50mを展開して最奥到達点を撮影した。このときの深度は約11.3mで、水中洞窟の方位トレンドが向けて南南東方向(海側洞口(海底洞窟)の開口推定域の方向)に変化することを確認した。

3.2 稲積水中鍾乳洞

大分県豊後大野市三重町の「稲積水中鍾乳洞」は、およそ3億年前の古生代に形成され、8万5千年前の阿蘇山の火山大噴火により水没して水中鍾乳洞となった¹²⁾。総延長は約1kmであるが、ケイブダイバーによる近年の水中探索により未知の奥部が確認され、水中部分を含めた総延長はさらに伸びている¹³⁾。

※図11,図13下、図14の画像は

「© 2018 OITA KATETE.

(大分県商工労働部雇用労働政策課)」のご厚意による:

URL: https://oita-katete.pref.oita.jp/web_magazine/inazumi/



図11 「稲積水中鍾乳洞」 水中洞窟



図13 ROV システム(外観) 稲川研究室



図14 調査準備
上・中 セッティング 下 ROV 投入

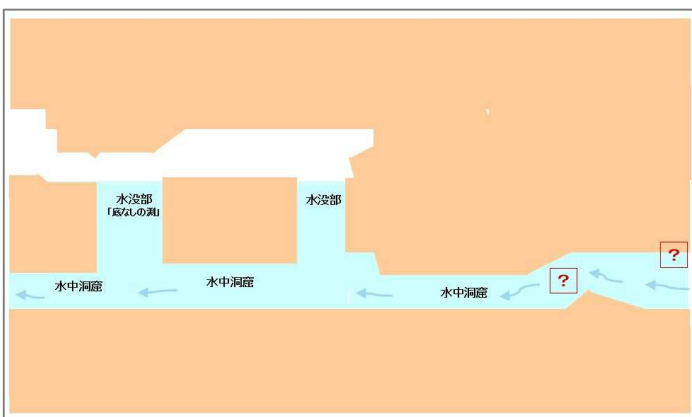


図12 「稲積水中鍾乳洞」 (縦断面模式図)

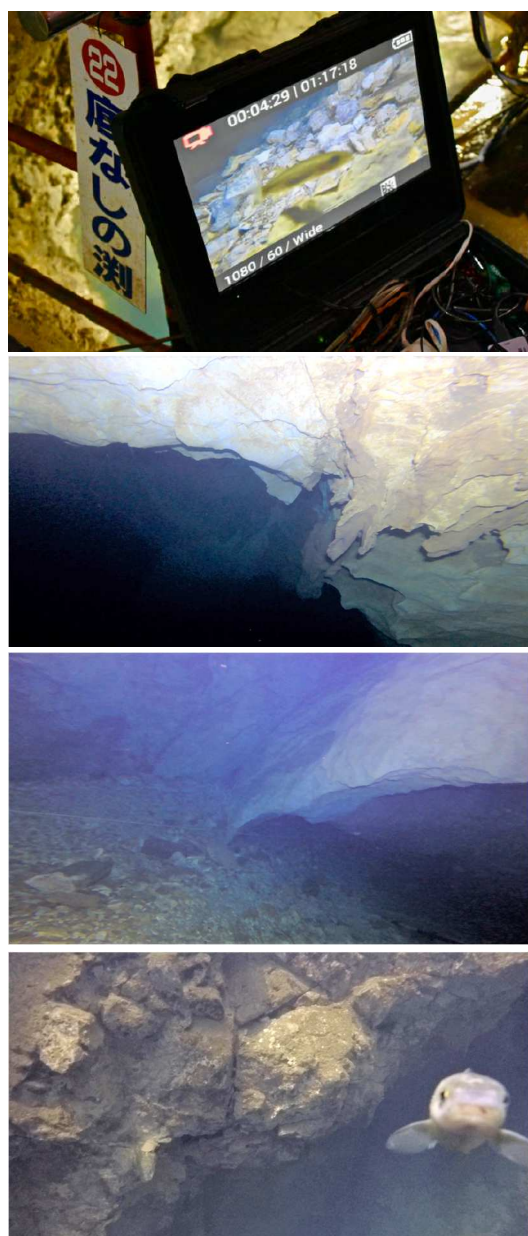


図 15 水中画像

上 モニター画面 中・下 ROV カメラ画像

「稲積水中鍾乳洞」の水中調査に使用した ROV は日本文理大学工学部稲川研究室が独自開発した耐水深 100m の水中観測ロボットシステムであり、搭載した強力な LED ライトにより、自然光がない水中洞窟で視界を確保できる。また、オペレータが片手で操作できる「操縦支援システム」により、水中洞窟の形状にあわせて細かく ROV の姿勢を制御できる。マイクロコンピュータを搭載した基地局は 3 秒で起動するため調整準備に必要な時間が少なく、機動的な調査ミッションを遂行できる。

4. 「管絃窟」水没部の ROV 調査計画

「テザーケーブルで基地局と ROV が繋がれている」という構成を基本とすれば、基地局の位置は調査対象に近い場所が有利である。その点では水没部直上水面が望ましい。しかしながら、筏等を仮設する選択肢を除くと、ゴムボート上に基地局の機器材を積載するしかなく、力学的に不安定であり、電源が確保しにくく、滴下水が機器材の電子電気機器に深刻な影響を与える。水没部から離れるが、洞口前の舗装路上であれば力学的に安定であり、電源が確保しやすく、滴下水の影響がない。洞口前に基地局を設営することを前提として、水没部への ROV の最大進入度に関して、以下のように 3 段階に分類する：

【調査レベル A】(図 16a)

構成: 基地局～テザーケーブル～ROV

進入度: 水没部の底部まで接近

目標: 石筍等の鍾乳石を撮影、横穴開口部の撮影

限界: 横穴接近時にテザーのテンションを緩めない、フリクションが生じる可能性がある。テンションを緩めるとケーブルが絡む可能性が出てくる。

【調査レベル B】(図 16b)

構成: 基地局～テザーケーブル(水没部直上水面に位置させたゴムボート等にケーブルをストックしておくか、滑車等の機構を積載する)～ROV

進入度: 水没部底の横穴開口部に接近

目標: 横穴奥の撮影、鍾乳石の有無の確認

限界: 横穴進入時にテザーのテンションを緩めない、フリクションが生じる可能性あり。

【調査レベル C】(図 16c)

構成: 基地局～テザーケーブル(水没部直上水面に位置させたゴムボート等にケーブルをストックしておくか、滑車等の機構を積載する。水没部底に位置させた ROV2 号機でケーブルを中継させる)～ROV1 号機

進入度: 水没部底の横穴奥

目標: 横穴奥部の撮影、鍾乳石の有無の確認

限界: 横穴奥に屈曲が有る場合は、テザーのテンションを緩めないとそこでフリクションが生じる可能性あり。

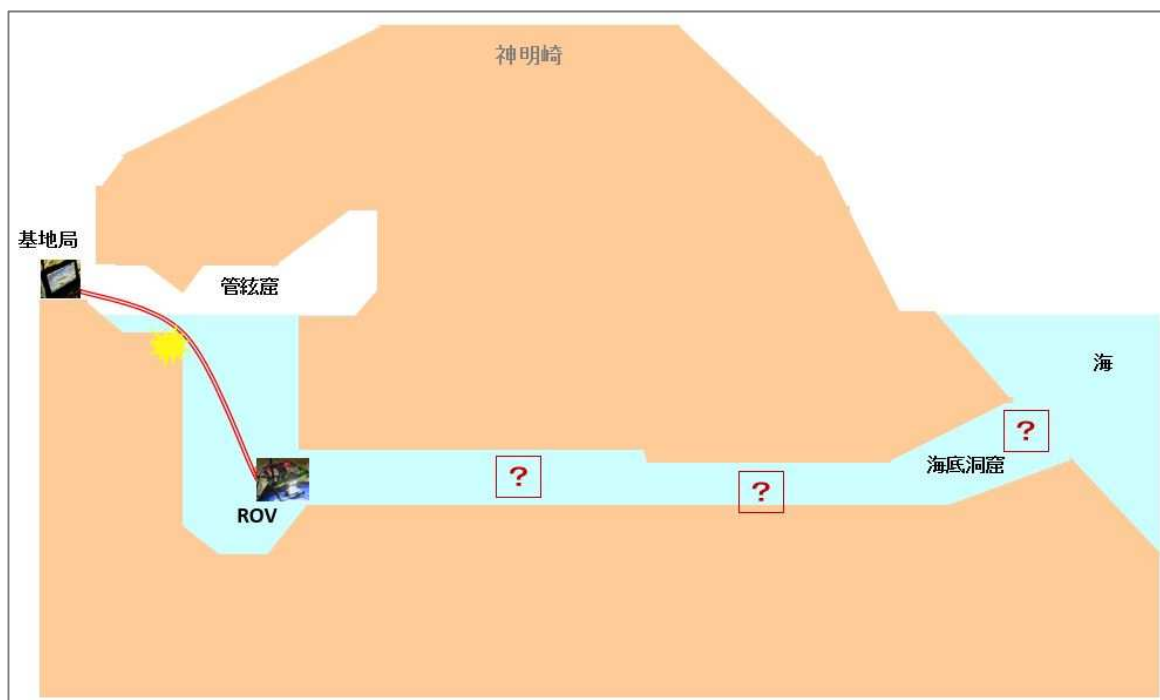
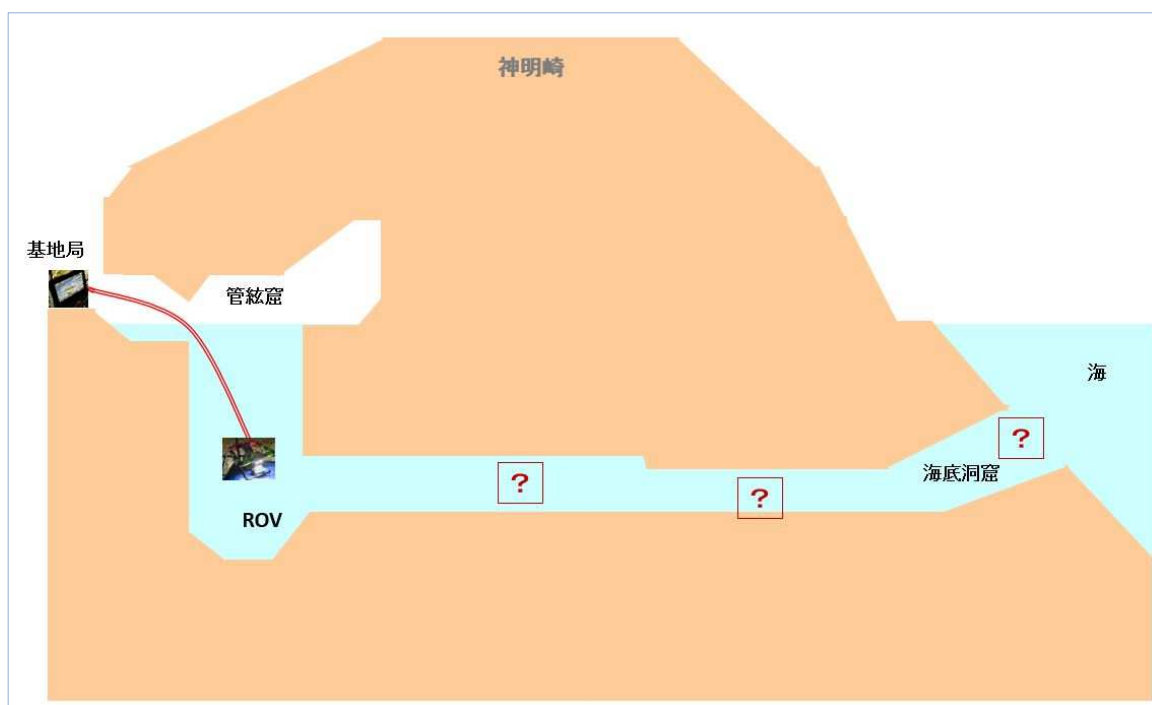


図 16a 「管絃窟」水没部 ROV 調査レベル A



図 16b 「管絃窟」水没部 ROV 調査レベル B



図 16c 「管絃窟」水没部 ROV 調査レベル C

調査レベル B、C の ROV システムは、ロープアクセス技術におけるディビジョン(角にロープが施触しないように取り付ける方法のひとつ)と同じ発想で、テザーケーブルを屈曲点の角に接触させないようにしている。

レベル C までの構成は、位置が既知である屈曲点 2 箇所を前提にしたが、さらに奥部への進入探査では、屈曲点の位置・数が未知であることが前提になる。ROV の機体数を増やす場合、機体数と同じ本数のテザーケーブルを使用することは、調査運用面から避けるべきである。対応策として、直列テザー方式による複数 ROV¹⁴⁾のシステム構成や、テザーケーブルを使用しない AUV (Autonomous Underwater Vehicle、自律型水中ロボット)の使用がある。後者による水中洞窟探査は、AUV の SLAM (Simultaneous Localization and Mapping、自己位置推定と環境地図作成)のために、3 次元写真測量(立体視)¹⁵⁾や、スキャンソナーによる 3 次元形状測定¹⁶⁾をリアルタイムで実行するための技術開発が不可欠である。

参考文献

- 1) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 宮本憲
水中洞窟探査ロボットの実証実験と予備調査,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 46 号 pp.43-48 (2009)
- 2) 真部広紀, 浦田健作, 長嶋豊他
白滝の穴水中洞窟における探査ロボットとサーベイスシステムの
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)
- 3) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝, 須田淳一郎他
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)
- 4) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他,
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)
- 5) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝, 原田明 福岡聡紀,
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
佐世保工業高等専門学校研究報告第 51 号 pp.19-27 (2015)
- 6) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 山本祐二, 近藤正義, 岡本涉,
宮古諸島下地島の西沿岸域におけるアンキアライン陥没ド
リーネ群の予備調査
佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号 pp.5-13 (2016)

7) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝, 山本祐二, 近藤正義, 白石香一,

ROV を援用した水中洞窟調査(短報)～宮古島平良ピキヤズと平尾台不動洞

日本洞窟学会第 42 回大会(苅田町平尾台大会)学術講演会

8) 神戸信和, 島津光夫,

5 万分の 1 地質図幅「気仙沼」および同説明書.

工業技術院地質調査所 (1961)

9) 平宗雄, 山田努, 菊地敏雄,

日本洞窟学会第 44 回宮城県気仙沼市大会地質巡検

気仙沼市の海岸に面した石灰岩地帯. 24pp. (2018)

10) 東山ケイビングクラブ・気仙沼市教育委員会

気仙沼市の洞穴 -気仙沼市洞穴地域調査報告書-

80pp.気仙沼市教育委員会, 気仙沼 (1995)

11) 山田努, 加藤大和,

東日本大震災による気仙沼神明崎洞穴群の被災状況

洞窟学雑誌, 第 38 巻 pp.37-51. (2013)

12) 吉村和久, 栗崎弘輔, 浦田健作, H. Schwarcz, D. Ford,

大分県稲積水中鍾乳洞と阿蘇巨大噴火

2005 年度日本地球化学会第 52 回年会講演要旨集

13) 近藤正義,

稲積水中鍾乳洞潜水調査報告書

沖縄潜水科学技術研究所、2014 年

14) 竹林亮, 足立吉隆, 佐藤良史, 佐藤正太郎,

鍾乳洞潜水調査 ROV の開発

2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集

15) N. Weidner, S. Rahman, A. Q. Li, I. Rekleitis,

Underwater cave mapping using stereo vision

2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation

DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989672>

16) M. Stipanov, V. Bakarić, Z. Eškinja,

ROV use for cave mapping and modeling,

IFAC Proceedings Volumes

Volume 41, Issue 1, pp.208-211 (2008)