

水没した陥没ドリーネのアンキアライン水文系における UAV-ROV 調査法の検討*

眞部広紀**1, 松見豊**2, 岡本渉**2, 稲川直裕**3, 山田努**4, 長嶋豊**5, 長谷川均**6

Study on UAV-ROV Survey Methods for Anchialine Hydrology System of Submerged Collapse Dolines*

Hiroki MANABE**1, Yutaka MATSUMI**2, Wataru OKAMOTO**2, Naohiro INAGAWA**3, Tsutomu YAMADA**4, Yutaka NAGASHIMA**5, Hitoshi HASEGAWA**5

Key words: UAV, ROV, Submerged Collapse Doline, Underwater Cave

Abstracts

In this paper, we discuss survey methods for submerged collapse dolines with underwater caves using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and ROV (Remotely Operated Vehicle).

1. はじめに

沿岸域の地下では海水が海底から陸域側に浸透して、陸域の池・沼の水面高が近隣海域の潮汐と連動するものがある。このようなアンキアライン水文環境をもつ洞窟、アンキアライン洞窟の国内例には、宮城県気仙沼市「管絃窟」¹⁾、長崎県五島市「先不知井坑」^{2,3)}がある。沖縄県宮古島市下地島の国指定名勝・天然記念物「通り池」は、沿岸域カルストの洞窟の天井崩落開口部（陥没ドリーネ）が海水準の上昇により水没して海底とつながっている。その南には、「通り池」と同様に海底洞窟を通り抜けて池の水面に浮上できるダイビングポイントである「鍋底（鍋）」、「パサマイキ」、「アカムタイキ」があり、地形派ダイバーに人気がある⁴⁾。また、「通り池」の北にも、潮汐と連動する池（「オコイキ」、「ククルイキ」、「ガーナイキ」、「ナガビダイキ」）⁴⁾が点在する（図1）。これらの周囲に密集した植生が接近を困難にするため、水文環境の調査は行われていない。垂直壁やオーバーハングに取り巻かれた「通り池」（図2）は水面までの高低差が、測量作業や水面への水中計測機器材の上げ下ろしを困難にしているため、詳細な3次元地形情報は得られていない。

本研究グループは、水中ロボット(ROV)と地上ロボット(ROV)を基盤とした、閉鎖水面環境に対応可能な水中洞窟探索システムの開発を目的として結成された。日本沿岸域学会の研究グループ助成『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）を端緒に、キャノン財団の研究助成プログラム「理想の追求」第2回『陸海域カルスト水文系の追跡によるロボット探索とマッピング』（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)『水没によって閉鎖された空間環境を探索する水中・非水中複合ロボットシステム』（2013～2016年度）により研究を進めてきた^{5)~11)}。

近年、電子制御技術の発達により急速に普及してきた小型軽量のドローン（UAV）は SfM/MVS 写真測量に使用されるだけでなく、運搬機（キャリア）の役割も担うようになってきた。ROV や水中計測機器材を UAV のペイロードとすれば、陥没ドリーネのアンキアライン水文環境を機動的かつ効率的に調査することができる。本研究グループは、ROV・UGV・UAV の研究者と専門家を中心とした横断的連携組織「洞窟計測探索シミュレーションプログラム」を立ち上げ、様々なプロジェクトを進めることにした。この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』にも採択されている。

本稿では、本研究グループが計画・実施した予備調査、ROV 探索実験、潜水調査、UAV 空中撮影・写真測量等の事例に基づいて、「通り池」と北西沿岸域の池について地形測量・水中調査の方法の検討を行う。

* 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 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

**3 日本文理大学 工学部

**4 東北大学大学院 理学研究科

**5 佐世保工業高等専門学校 地域共同テクノセンター

**6 国士舘大学 文学部

2. 下地島西沿岸域¹⁰⁾

このエリアの水文環境を詳細に調査するには、各池までのアプローチのルートが課題となる。以前に実施した予備調査¹⁰⁾では、下地島空港の西側を南北に通る車道を自動車で移動した。

2.1 北西沿岸域（予備調査）

各池の最寄り地点からハンディ GPS を使用して踏査を行った。アプローチに成功した①、③が迂回路になったのは、最短距離ルート（図1の矢印）には樹木が密生して、通過できない状態であったからである。



図1 下地島北西沿岸域

- ① ナガビダイキ ② ガーナイキ
③ ククルイキ ④ オコイキ

(国土地理院空中写真 OCK9411-C18A-2 より抜粋して加筆)

【1. ナガビダイキ】車道の北端近くの未舗装道入口 a から西進し、海岸に出る手前 b で南進する。途中で踏み分け道 c を東進すると「ナガビダイキ」（東西約 30 m、南北約 20m）の西岸 d に到達する（図1）。

【2. ガーナイキ】植生に阻まれてアプローチ出来ず。

【3. ククルイキ】未舗装道入口 e から西進して、林の中の記念杭 f から北進すると「ククルイキ」（東西約 35m、南北約 55m）の南東岸 g に到達する（図1）。

【4. オコイキ】植生に阻まれてアプローチ出来ず。



図2 上 「ナガビダイキ」下 「ククルイキ」



図3 下地島北西岸アンキアライン池の縦断面模式図

2.2 「通り池」(予備調査)

〔地形・水文の概要〕⁴⁾「通り池」は2つの池(壺型の陥没ドリーネ)が横穴で海底と連結した「縦孔・地下空洞」構造をもつ(図4~6)。一の池は最大径約77m、二の池は最大径約55mある。池の底は、天井部分から崩落したと推定される岩石や砂泥などの堆積物で盛り上がっている(図6)。「通り池」のドリーネ壁面には成長がほとんど止まった鍾乳石があることから、水没した鍾乳洞と考えられている。最大水深は約40mあり、おおよそ三分の二が水面下にある。一の池と二の池をつなぐ貫通洞(陸橋の地下)は、満潮時でも約1.0~1.5mほど天井が空いている。海底洞窟の開口部のサイズは、縦約12~13m、横約20~25mで、海面下約35mの崖に開口している。

自動車で「通り池」駐車場まで移動し、そこから遊歩道を使えば、一の池と二の池の間にある陸橋の展望所まで容易にアプローチできる。しかしながら、段丘の上面から水面まで垂直壁とオーバーハングで10m以上の高低差がある。人員や調査機器の上げ下ろしには、懸垂下降／登昇の装備・器材が必要になる。海側からのアプローチについては、海から「通り池」まで連続した開放水面がないため、船舶は「通り池」に進入できない。ダイバーの場合、海から通り池までの潜水移動距離・深度が大きくなり、携行する呼吸ガスのタンク数に制限される。また、減圧等の潜水深度のプロフィール管理の観点から往復潜水することは望ましくない。ROVの場合、テザーケーブルの展開長が大きくなり、機体の動きが束縛される。

2.3 調査を実施するための“壁”

下地島北西沿岸域の池や「通り池」の詳細な水中環境情報は、現在まで、公開されているものがない。北西沿岸域では密集した樹木が、「通り池」では高低差が人員や機器材の移動・運搬を妨げるため、調査の効率や実質活動時間を低下させる。費用対効果が悪いことがネックとなり、調査が実施されない状況が続いている。本研究グループは、北西沿岸域の池や「通り池」の詳細な(水中部分を含めた)地形データの獲得を目的として、測量と水中調査を計画している。実施するには、類似環境での経験と実績に加え、“壁”である「密集した樹木」と「高低差」の克服手段が必要になる。本研究グループではその手段を「空中」に求めた。



図4「通り池」 I：一の池 II：二の池
(国土地理院空中写真 OCK9411-C19A-2 より抜粋)



図5「通り池」 上 一の池 下 二の池

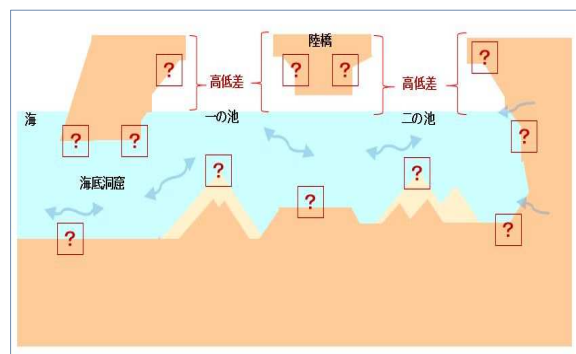


図6「通り池」の縦断面模式図

3. 類似環境における調査・実験の例

本節では、UAV 写真測量とROV 探査(開放水面環境、最大水深約 38m)、ROV・ケイブダイバー調査(閉鎖水面環境、最大水深約 11m)の三例を挙げる。

3.1 阿蘇「米塚」(UAV 写真測量)¹²⁾

近年、低価格帯のマルチロータ式小型ドローンの機種が増え、画像データを処理する SfM/MVS(Structure from Motion / Multi View Stereo)ソフトウェアの種類が揃ってきて、範囲を小さくすれば、人工衛星や有人航空機の撮影画像よりも費用対効果が良く精細な画像を取得できるようになった。本研究グループは、熊本県阿蘇カルデラのスコリア丘「米塚」に対して小型ドローンによる SfM/MVS 測量空中撮影(GCP なし)を実施し、Terra Drone 社の SfM/MVS ソフトウェア「Terra Mapper」(クラウド無料体験版)により、2 次元モザイク画像と 3 次元点群モデルを作成した。

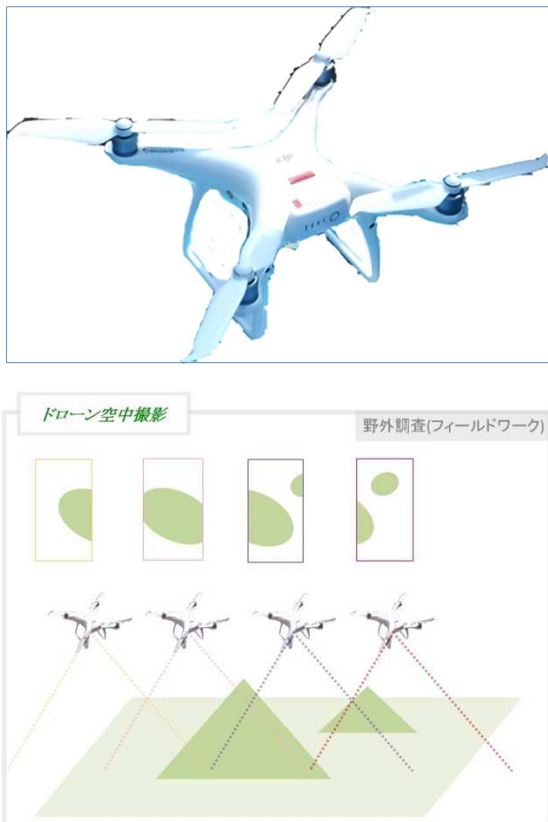


図 7 上 使用ドローン外観 (DJI Phantom3)

下 写真測量用ドローン空中撮影模式図



図 8 「米塚」(ドローン搭載カメラ画像)

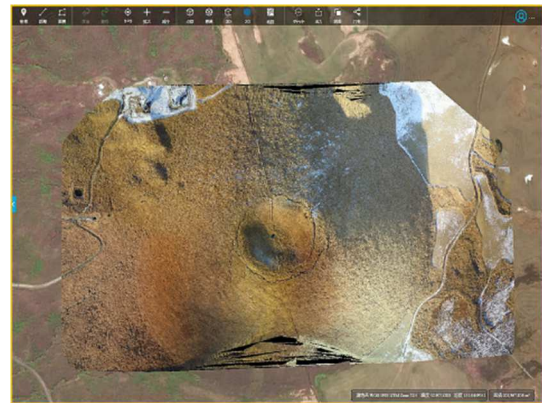


図 9 「米塚」の 2D モザイク画像

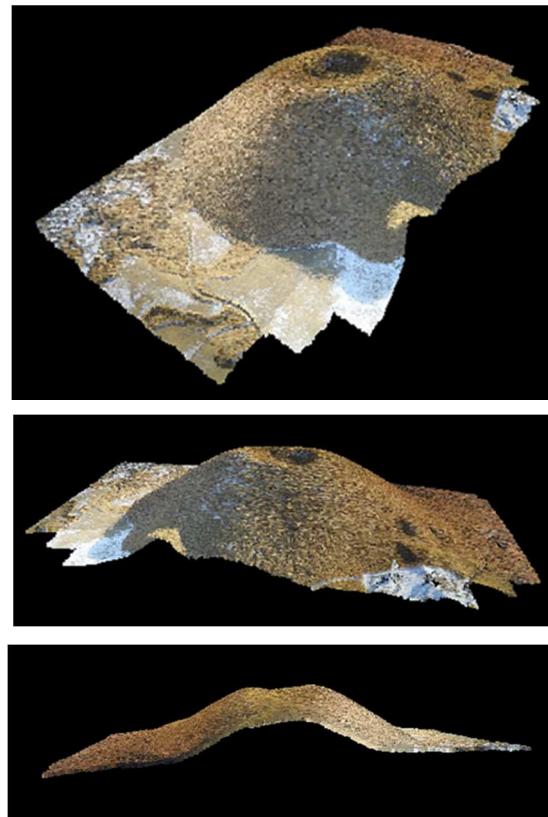


図 10 「米塚」の 3D 点群モデル

3.2 大分県「芹川ダム」(ROV 探査) ¹³⁾

無人水中観測ロボットは、水中作業中の人身事故のリスク排除と高品質な観測情報の獲得を両立できる。日本文理大学工学部の稲川研究室では、大分県竹田市の芹川ダムにおいて、従来では観測が困難であったダムの「発電用取水ロスクリーン」「汚濁防止フェンス」「水循環装置」の水中状態観測を目的とした、ROV の実証動作試験を実施した。この ROV は水深 100m まで探査できる。



図 11 芹川ダム湖（水上風景）
上 ダム堤体
中・下 水循環装置（水上部分）に係留



図 12 使用 ROV（外観）

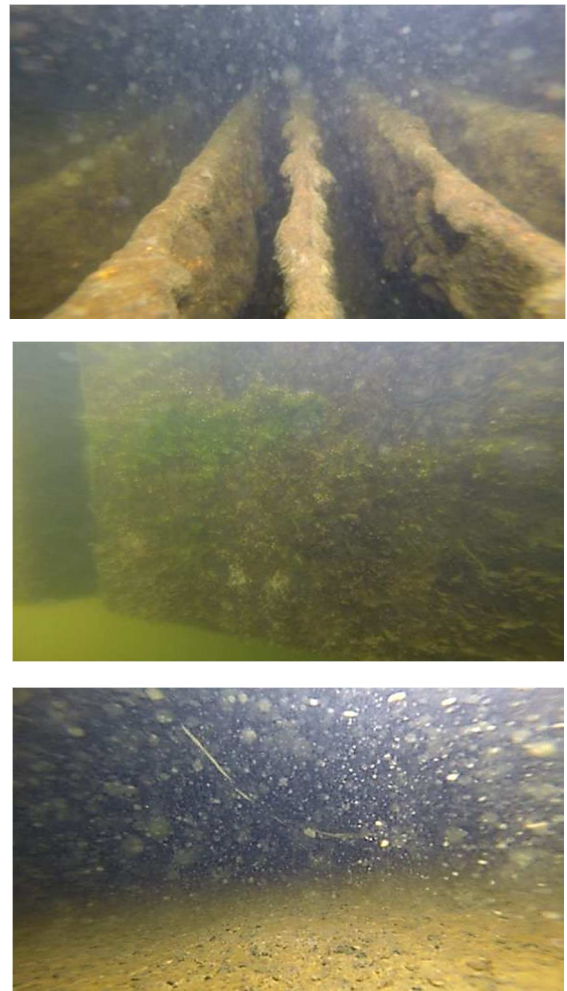


図 13 ROV 搭載カメラ画像
上 取水ロスクリーン（水深約 5m）
中 水循環装置（水深約 8m）
下 水循環装置～堤体の中間地点（水深約 38m）

3.3 宮古島「ピキャズ」(ROV 探査/潜水調査)¹¹⁾

宮古島北西部平良の海岸にある海面下湧泉「ピキャズ」(「(潮が)引かず」)は、腰原断層系の延長線と交わる位置にあり、壺状の陥没ドリーネの形状(図14、東西約14m、南北約15m)をもつ。このことから、本研究グループは、「ピキャズ」がカルスト地下水文系の一部であり、深部にはアンキアライン水中洞窟が続くことを推定した(図15)。

調査では、佐世保工業高等専門学校長嶋研究室が製作した ROV2 機と沖縄潜水科学技術研究所の CCR (Closed Circuit Rebreather) ケイブダイバーを「ピキャズ」に潜航・潜降させ、未知の水中洞窟を発見した(「ピキャズ水中洞窟」)。湧泉水面から約20m、東～東北東の方向、水深約11mがこの調査の到達点であり、奥から水流を確認した。到達点ではシルトが天井近くまで厚く堆積していたため、透明度を悪化させずにさらに奥部に進入することは困難と判断して引き返した。

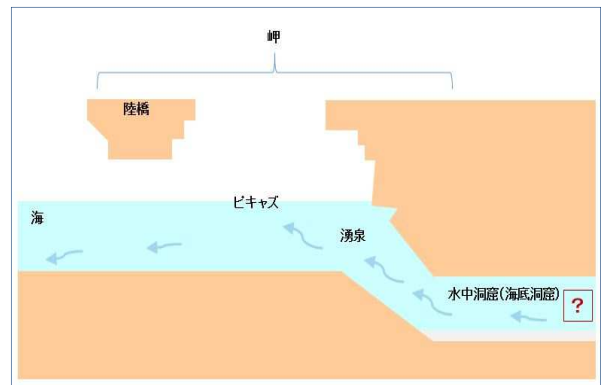


図15 「ピキャズ」縦断面模式図



図14 「ピキャズ」(外観)

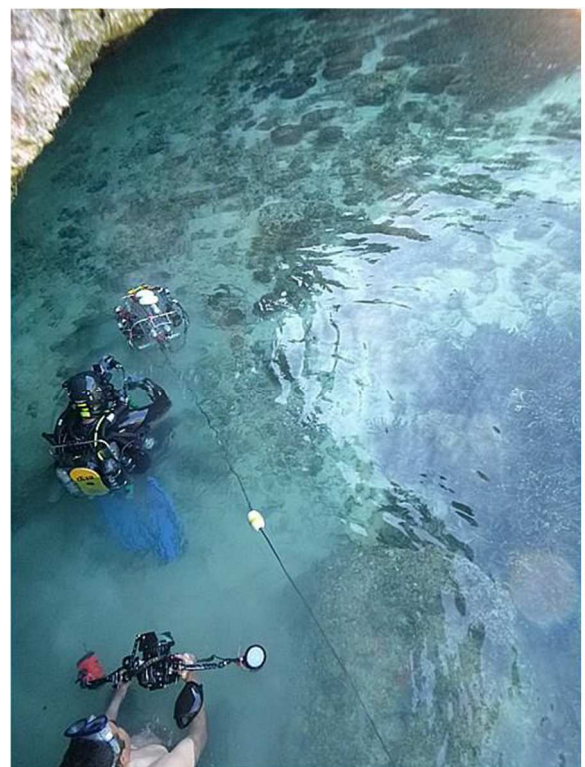


図16 潜航・潜降の準備

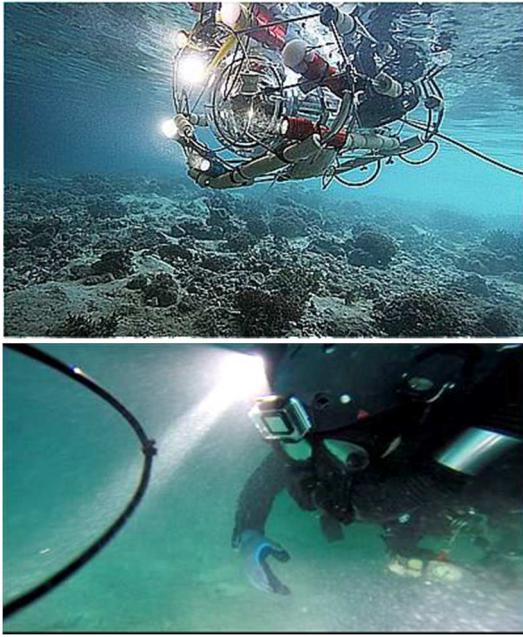


図 17 上 ROV 潜航開始 (撮影：山本祐司)
下 CCR ケイブダイバー潜降開始

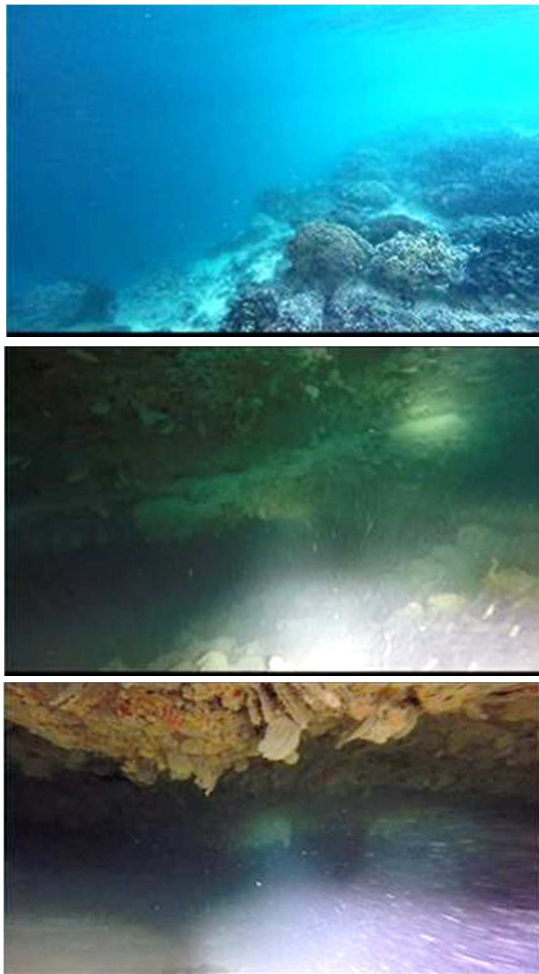


図 18 「ピキャズ水中洞窟」(ROV 搭載カメラ画像)

4. 下地島西沿岸域における調査法の検討

北西沿岸域の池や「通り池」の詳細な測量と水中調査の「壁」となる、「密集した樹木」と「高低差」を克服するために、本研究グループはドローン (UAV) を前提に調査を計画する。SfM/MVS 写真測量のカメラプラットフォームとしての実績については前節で述べた。水中ロボットや機器材のペイロードキャリアについては、ドローンに大気観測装置を吊り下げて輸送・空中観測を行った実績がある¹⁴⁾。

国内でドローンを飛行させる場合、様々な法的規制を遵守しなければならない。下地島西沿岸域は下地空港の近隣であるため、国土交通省、那覇空港、下地空港、使用ドローンのメーカー(DJI 社など)に許可申請を行い、事前に許可を得ておく必要がある。飛行高度についても、水平表面や円錐表面等に配慮して慎重に設定する。また、ドローンの操縦者と補助者(1人以上)の2人以上の体制で調査を行う。

4.1 ドローンの飛行

ドローンの飛行には、仮設ヘリポートの役割を担う離発着場所(HP、Home Position)の確保が必要になる。飛行前の準備として、起動後にコンパスキャリブレーション、モニターに表示される各種情報(バッテリー残量、コントローラの信号、GPS 受信強度など)のチェック、3~5m上昇させたテスト飛行を行う。近年のドローンは離陸前に搭載 GPS で HP の位置を記憶し、飛行中に制御通信途絶やバッテリー残量の急激な低下等が発生すると、HP に自動帰還飛行する性能がある。安全上の理由からドローンと人との接触機会を減らすため、HP は周囲に人がいない状態を保てる場所が望ましい。また、業務でドローンを飛行させるときには、目視飛行が基本であるため、操縦者が位置する HP と飛行範囲の距離は小さくすることが望ましい。以上の理由から、調査対象とする各池の近くに HP 候補場所を選定した(図 19~22)。「ナガビダイキ」、「ガーナイキ」、「オコイキ」用の HP は近くにある砂浜に設定している。

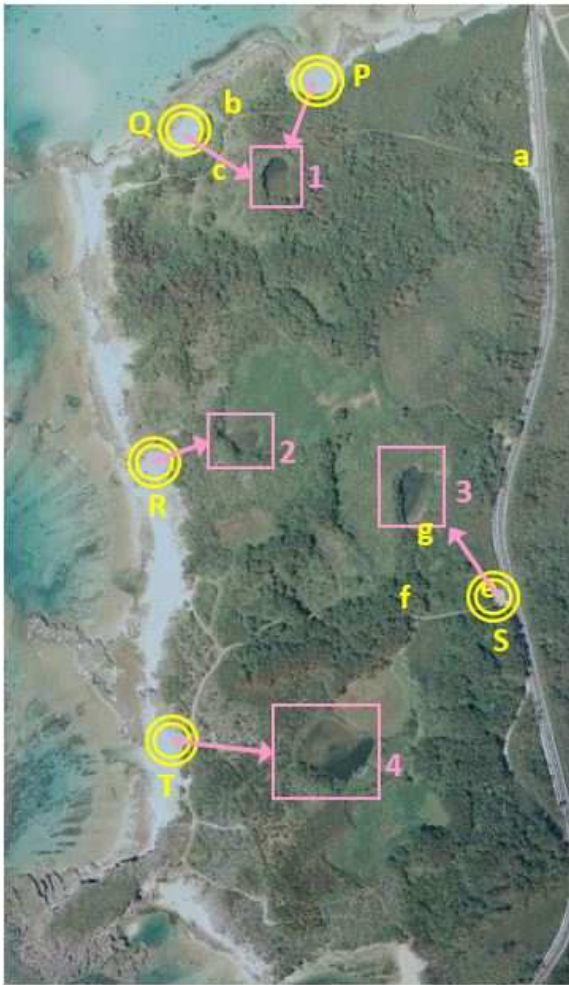


図 19 下地島北西沿岸域の HP 候補 (P,Q,R,S,T)

- ① ナガビダイキ ② ガーナイキ
③ ククルイキ ④ オコイキ

(国土地理院空中写真 OCK9411-C18A-2 より抜粋して加筆)



図 21 下地島「通り池」の HP 候補 (U,V)

I 一の池 II 二の池

(国土地理院空中写真 OCK9411-C18A-2 より抜粋して加筆)

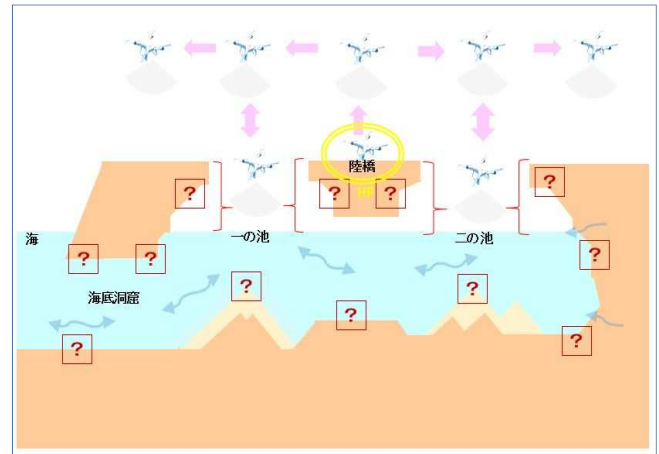


図 22 「通り池」のドローン飛行縦断面模式図

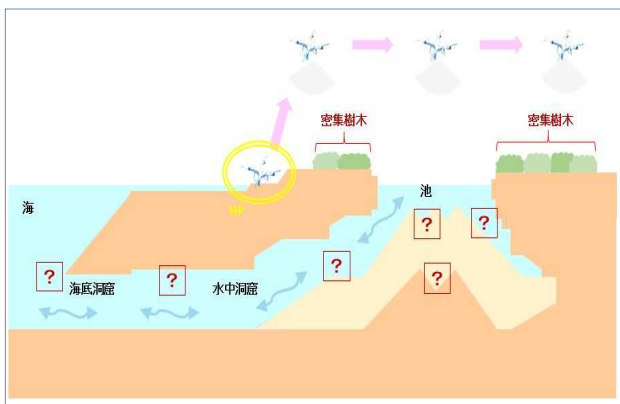


図 20 「ナガビダイキ」「ガーナイキ」「オコイキ」のドローン飛行縦断面模式図

4.2 ドローン空中撮影・3次元写真測量

【北西沿岸域の池】水際からの池の画像は既往の調査で撮影されているが、池の中央部の詳細な画像データはまだない。本研究グループでは、2次元モザイクオルソ画像を得るために、第一段階としてドローン空中撮影を実施する。

【「通り池」】ドローン空中撮影動画を含めて真上からの画像が、web上に多数公開されている。「通り池」は高低差がある地形なので、表現するには3次元モデルが必要になる。本研究グループでは、第一段階として水上部分の3次元モデルを得るために、ドローン SfM/MVS 写真測量を実施する。

4.3 ペイロードの吊り下げ

[構成] バッテリー内蔵型の小型軽量の ROV には脚部に着水用のフロートを装着する。ケーブルでドローン(UAV)と結ぶ。ケーブルは制御信号通信と ROV の重量を吊す用途に使用し、途中にはドローンの過剰降下防止の目安としてフロートを装着する。緊急時に ROV を分離可能なジョイントにフロートを装着してもよい。

[調査方法(図 23, 24 は往路のみ)]HP でドローンを離陸させて ROV を吊り上げる。目標の水面直上まで移動し、降下して ROV を着水させる。ROV は水中探査を開始し、ドローンは空中でホバリングするか、水面に浮いて待機する。ドローンのバッテリー残量が少なくなるまでに上昇して、ROV を吊り上げて HP に帰還する。

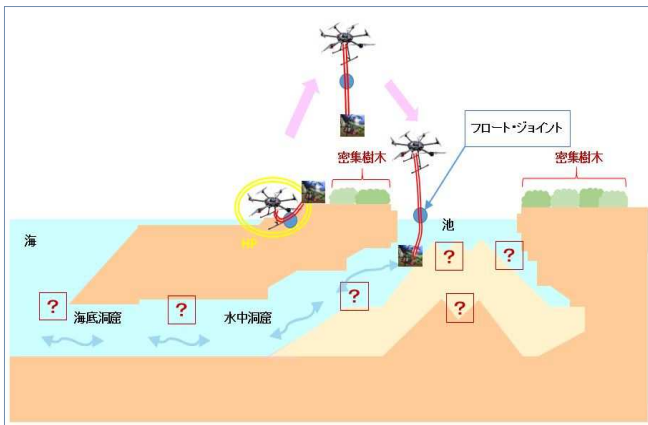


図 23 「ナガビダイキ」「ガーナイキ」「オコイキ」におけるドローンによる ROV 吊り下げ

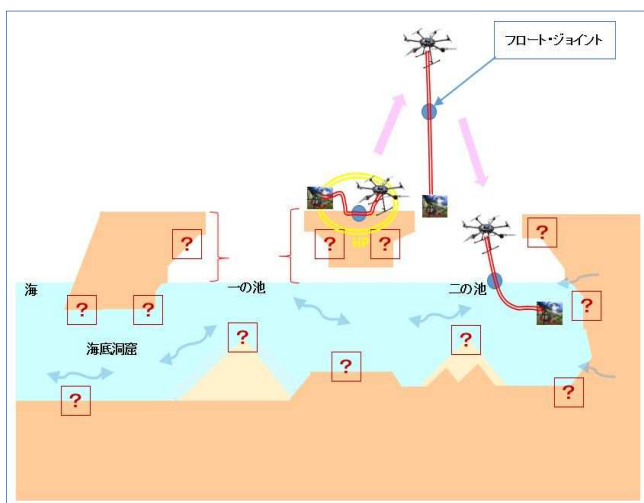


図 24 「通り池」におけるドローンによる ROV 吊り下げ

5. まとめ

水空両用ドローンの開発については、USA ミシガン州 Oakland 大学の「Loon Copter」をはじめ、国内外で精力的に研究が進められているが、空中におけるドローンの無線通信の方式を水中においても使用する。その意味では水空両用ドローンは無索式の ROV であり、現時点では、通信電波が届く浅深度でしか潜航できていない。真水（汽水）と海水が塩分躍層を境界面として併存するアンキアライン水文環境への適用は未知数である。

本稿の調査方法検討の目的は、既存技術の最小限の組み合わせで、水没陥没ドリーネの水中探査を実施することにある。机上演習から始めて計画を練り上げ、今後、水没陥没ドリーネの類似環境で探査実験を行い、問題点を解決していく必要がある。

テザーケーブルは有索式 ROV の命綱であるが、ROV を拘束するデメリットもあり、水中閉鎖環境、とくに水中洞窟ではそれが顕著になる。将来的には、UAV との分離・結合ミッションにより、ROV をより高機動な AUV に置きかえた水没陥没ドリーネ探査を目標にする。

参考文献

- 1) 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-
pp80.気仙沼市教育委員会, 気仙沼 (1995)
- 2) 川原 歴:
富江熔岩隧道の研究,
地球, vol. 2, pp. 664-673 (1924)
- 3) 松本徂夫他:
長崎県福江島富江半島熔岩トンネル
-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)
- 4) 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・入水水道の形成発達-
宮古島市総合博物館紀要第 18 号, pp1-23, 2014 年
- 5) 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)

6)眞部広紀、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 (2011)

7)眞部広紀、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)

8) 眞部広紀、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)

9) 眞部広紀、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)

10) 眞部広紀、長嶋豊、浦田健作、山本祐二、近藤正義、岡本
渉、

**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 (2017)

11) 眞部広紀、長嶋豊、浦田健作、染谷孝、山本祐司、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(菊田町平尾台大会)学術講演会

12) 眞部広紀、岡本渉、前田貴信、

洞窟地形のドローン空中撮影

～写真測量と 3D モデル化を目指して～

日本洞窟学会第 44 回大会(気仙沼市大会)学術講演会(2018)

13) 稲川直裕、

自作水中観測ロボットを用いた大分県内ダムの環境保全調査

[https://k-keikaku.or.jp/xc/uploads/fckeditor/chousa_kenkyu/
h29%20kenkyuhoukoku03.pdf](https://k-keikaku.or.jp/xc/uploads/fckeditor/chousa_kenkyu/h29%20kenkyuhoukoku03.pdf)

14) 岡本渉、松見豊他

ドローンによる PM2.5 測定

平成 28 年度第 12 回名古屋大学技術研修会報告(2016)