

水中洞窟探査ロボットの实証実験と予備調査*

真部広紀,** 長嶋豊,** 浦田健作,**** 宮本憲*****

Demonstration and Preliminary Surveys for Underwater Cave Exploration Vehicle

Hiroki MANABE, Yutaka NAGASHIMA, Kensaku URATA, Ken MIYAMOTO



牡鹿洞水没部 (ロボット探査)



平成 20 年度機
“釜猫”(カマネコ)



白滝の穴水没部 (湧泉)



平成 21 年度機
“新釜猫”(新カマネコ)

1. 緒言

地球上に広く分布する石灰岩の溶食地形であるカルスト台地は、独特の美しい景観の奥底に、自然史・環境分野の学術研究対象を数多く秘めている。その地下深くに形成される洞窟（鍾乳洞）は、科学者や探検家を魅了してやまない地底世界である。厚い石灰岩層を透過してリモートセンシングすることは不可能であるため、洞窟の空間形状や内部の情報を得るには、人間が自ら赴かなければならない。なかでも洞窟水没部のような水中洞窟はカルスト水文学上重要な領域であるが、踏査には特別な困難さがある。自然光が無いことに加えて呼吸に必要な空気も無い。天井まで水に満たされている場所では、通常の潜水（ダイビング）において緊急エスケープルートである浮上可能な開放水面も無い。そのため洞窟潜水（ケイブダイビング）では、携行空気量やライト数など冗長バックアップを考慮して装備を構成する。徹底した体系的訓練と厳しいリスクマネジメントが要求されるなど、ダイバーに課される条件は厳しく、水中洞窟調査に出動可能な現役ダイバーの絶対数は、世界全体を数え上げても僅少である。現在の日本では残念ながら途絶しつつあり、我が国の水中洞窟の多くは未踏・未探検の領域として残されている。この現状を打破する一方法としてロボット探査が考えられるが、日本の洞窟は規模が小さく狭隘であり、従来の海洋系大型・中型水中ロボッ

トを搬入出できない。水中洞窟内の狭窄・屈曲・分岐によって、視界が狭いロボットがUターンをすると進行方向をロストする危険がある。ROV方式ではケーブルが洞壁の凹凸・突起に拘束される。また、海洋ではスラスタ水流による堆積土の巻き上げ・不良視界はそれほど問題視されないが、透視度が極端に回復しにくい水中洞窟では視界低下は深刻である。これらの要因すべてに対処可能なロボットシステムを、水中洞窟探査のために新たに開発する必要があった。平成 18 年度に長嶋（水中ロボット工学）・浦田（カルストシステム学）らと研究グループを立ち上げ、ロボットの構想と実証実験候補地の予備調査を開始した。平成 20 年度の「牡鹿プロジェ

* 原稿受付 平成 21 年 9 月 25 日

** 佐世保工業高等専門学校 一般科目数学科

*** 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

**** 大阪経済法科大学地域総合研究所

***** 有限会社 ロボットテクノス

クト」では、牡鹿洞（福岡県平尾台）の未調査水没部において、プロトタイプ機“釜猫（カマネコ）”による実験探査を実施した。水中における石筍や石柱の発見、未知の新水面（新洞窟の可能性を示唆）の発見など、学術的な調査成果が得られ、ロボット探査の有効性を実証することができた。当研究グループでは、今年度（平成21年度）の校長裁量経費（融合研究）『水中洞窟等のフロンティア環境におけるミッション遂行型ロボット探査と実証実験』：

- (1) 本格実験機“新釜猫”作製
（ロボットテクノス社と共同開発）
- (2) 「白滝プロジェクト」「牡鹿プロジェクトII」
「岩戸-神瀬プロジェクト」

により、研究調査活動を本格化させることになった。すでに一弾目の「白滝プロジェクト」は始動している。

本稿では、「牡鹿プロジェクト」の総括と「白滝プロジェクト」第1次探査（現地下見・模擬訓練）を合わせて報告する。

2. 牡鹿プロジェクト

探査器材の搬入出の観点から、実証実験のフィールドとなる洞窟の選定には、交通アクセスが良く、洞口からサンプル（洞窟水没部）まで洞窟探検（ケイビング）技術を要さないルートがあることを重視した。福岡県平尾台の牡鹿洞（牡鹿鍾乳洞）は、サンプルがある最深部地下川まで観光ルートが整備されている。地下水色素追跡調査によって、地下川の水は、100m 離れたこむそう穴最深部の地底湖へ流出することが確認されている。また、水



予備調査(第1次 2007年9月)
水中部の形状・延長方向を
サンプル水面から目視確認



予備調査(第2次 2008年9月)
サンプル周辺のスケールを概測

準測量により、牡鹿洞サンプルとこむそう穴地底湖の水面標高差は20mあり、地下水が不透水性の岩脈を何らかの形で横断流下していると考えられる[1]。しかしながら、「水」の障壁に阻まれて、牡鹿洞～こむそう穴の地下水系の形態は推定・想像の域を脱しなかった。この謎を解明するため、水中ロボットによる探査プロジェクト「牡鹿プロジェクト」：

- (2.1) 予備調査
- (2.2) ロボットの設計・製作
- (2.3) ロボット操縦訓練・システムの改善
- (2.4) サンプル探査

を研究グループの発足と同時に始動した。現場支援は浦田の呼びかけで、地元のケイビング団体「カマネコ探検隊」に協力を仰ぐことになった。

2.1 予備調査

サンプル入口から目視できる範囲で水中部を概観するため、第1次予備調査を「カマネコ探検隊」メンバーの下村哲也と真部が実施した。サンプル水面から水深1~2mの通路状の水中洞窟が約10m以上続いていることを確認した。この情報で、牡鹿洞サンプルを模した操縦訓練用シミュレーターの形状構想が固まった。さらに、ロボットの上限サイズを決定するデータを得るため、第2次予備調査を岩本玄樹（物質工学科5年生、ワンダーフォーゲル部 当時）と真部が実施し、サンプル周辺部・水面部のスケールを概測した。

2.2 ロボットの設計・制作

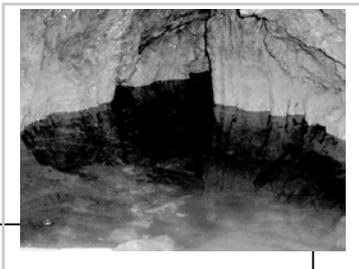
予備調査の情報をもとに、牡鹿洞サンプルの探査ミッションプログラムを固め、スラスタ2基・UOV方式・シースルーボディ・マルチカメラ・マルチライト内蔵の“釜猫”を作製した。ロボット本体は、全長450mm、全幅530mm、全高300mm、質量20kg。バッテリーはNiMH電池（12V, 8600mAh）を用いている。

【航行操縦システム】

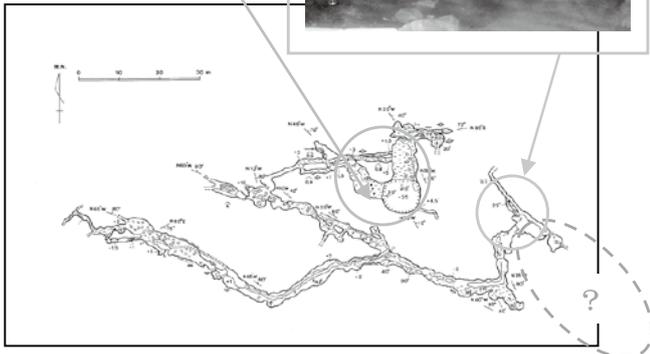
オペレーターはモニター画面に映し出される“釜猫”のカメラ映像を見ながら、カメラ切換えや水中スラスタの制御を行う。“釜猫”には21Wスラスタを2個搭載し、前進・後進・旋回を行う。2次元的な動きのみでは水中洞窟内を自在に航行することはできないため、重心移動機構を開発し、3次元の航行を可能にした。



牡鹿洞洞口



牡鹿洞水没部(サンプル)

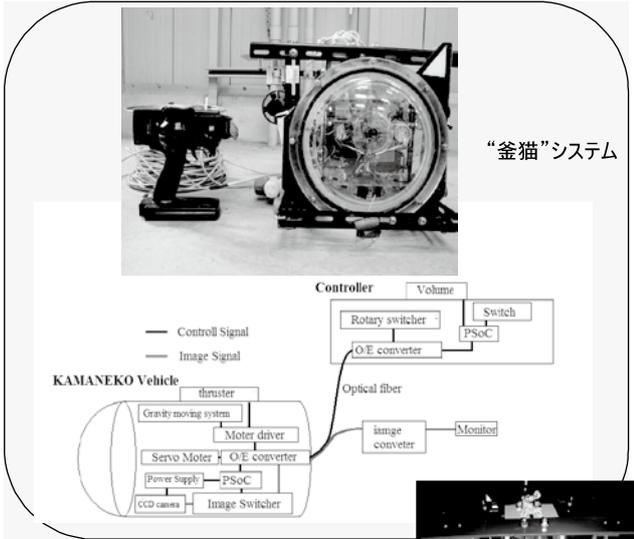


牡鹿洞平面図（[2]より抜粋、加筆）

水中洞窟探査ロボットの検証実験と予備調査

【映像伝送システム】

“釜猫”は前後・左右等 6 個の CCD カメラを搭載し、それらの映像を切換えることで、狭い洞窟内でもロボット本体の向きを変えずに多方向の視界を確保している。さらに各カメラに対応した照明ライトを用いることで、自然光が絶無な洞窟内部も鮮明に映し出すことを可能にした。PSoC マイコンを搭載し、カメラ切替や省エネのためのカメラ電源切替を制御する。ロボット本体～コントローラー・モニター間は、光ファイバーケーブルを通じて制御信号・映像信号の通信を行っている。



「牡鹿プロジェクト」
サンプル探査用器材



サンプル前進基地



“釜猫”
最終セッティング



操縦訓練用
モジュールシミュレーター



夜間暗所操縦訓練

2.3 ロボット操縦訓練・システムの改善

探査対象の牡鹿洞サンプル奥については、水深 1~2m、通路状の水中洞窟が約 10m 以上続いているらしいこと以外に事前情報がない。天然の水中トンネルであるから、狭窄・屈曲・分岐もあり得る。この未知の水中迷宮にロボットを進入させ、様々な観察を行った上で脱出・帰還させなくてはならない。探査ミッション成功の鍵は、ロボットオペレーターを含むチームの練度にかかっている。本番探査の前に経験値を上げておくため、操縦訓練用にモジュール方式のシミュレーターを作製した。金網モジュールを本校プールに沈めて通路状（総延長 13m）に仮設したシンプルなものであるが、モジュールの配置を組み変えることで様々な模擬ルートを構築することができる。ロボットのマルチカメラ～モニター視界だけで操縦する訓練を夜間に繰り返し実施し、ライトやスラスターの取り付け位置等、“釜猫”システムの調整や改善を行った。

2.4 サンプル探査

第 1 次(2008 年 9 月 29 日)：当日、台風の影響で牡鹿洞地下川の流量が急増し、前進基地の設営場所とした最深部が水没したため、探査ミッションを中止した。

第 2 次(2008 年 12 月 27 日)：天候と学校行事が噛み合わず何回も延期され、探査決行が確定したのは 3 ヶ月後のことであった。

ロボットチーム：長嶋・真部と佐野裕次郎・堀部哲司・山下一真（電気電子工学科 5 年生 当時）

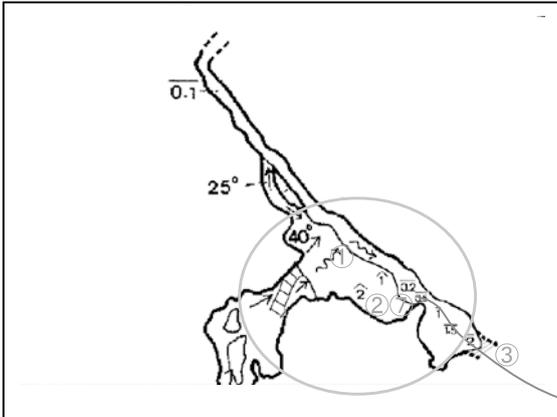


① 前進基地の合同調査隊

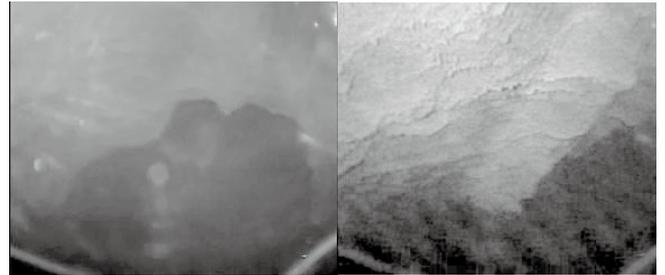


② “釜猫”潜航開始

牡鹿洞最深部（[2]の抜粋に加筆）



“釜猫”の水中ルート（推定概念図）



③ 水中洞窟入口(天井部)



④ 成長が中断した石筍?



⑥ 水中石筍・石柱群



⑤ 未知の新水面



⑦ “釜猫”回収・帰還



水中洞窟探査ロボットの実証実験と予備調査

サポートチーム：浦田と染谷孝・田中孝宜・下村哲也・藤哲也・藤太貴（「カマネコ探検隊」）

による合同調査隊を結成した。ロボットチームは牡鹿洞管理事務所内で“釜猫”ロボットを仮組みし、機能チェックを行った。サポートチームは、器材をリレー式に事務所から洞口に、さらに洞口から道のり 180m 先の最深部に運び入れて、前進基地をサンプ手前に設営し、シルト巻き上げ防止板をサンプ水際・水底に沈下させた。2 チームが合流して、ロボットの最終組上げとカメラ・スラスタ・重心移動機構の機能チェックを行った。“釜猫”の全システムに異常が無かったので、予定通り探査ミッションを開始した。

ケーブルハンドラーがロボットを着水させ、水際で待機するシュノーケラー（真部）にリレーした。サンプ手前には狭窄部があるため、ロボットが衝突しないようにシュノーケラーが通過誘導を行い、浸水の有無や、カメラ・スラスタ・重心移動機構の水中動作チェックをした。浮力を微調整する必要が生じたためロボットを前進基地に引き揚げて、バラスト重量を再調整してサンプ水面に戻した。“釜猫”の全システムに異常が無かったので、サンプの水中奥に向けてロボットを潜航させた。基地からロボットまでの移動距離（サンプ進入距離）を概測するために、ロボットとコントローラーを繋ぐ光ファイバケーブルには 1m 毎に目盛りが付けてあり、ケーブルを繰り出すハンドラーが読み上げを担当する。

前進基地のモニターに映し出されるロボットカメラの映像によって、サンプの奥は通路状の水中洞窟（幅 3m、水深 2m 程度）であり、予備調査時の目視 10m ポイントを越えて、少なくとも 10m 以上続いていることを確認できた。20m ポイントの上方には未知の開放水面が広がっていたが、水面上の景観は未観察である。このポイントより奥は、ロボットが水底と接触するほど水深が小さかったため、進入を断念して帰還航行（後方カメラによるバック潜航）を開始した。帰路の途中において、サンプ入口から 16m ポイントで一群の石筍・石柱を発見した。鍾乳石は水中では成長できないことから、牡鹿洞サンプの水中洞窟には、過去に乾いた洞窟期の存在したことが示唆される。

基地まであと 7m のポイントでロボットの内蔵バッテリーの電力がほぼ底をつき、洞壁と堆積土の V 字溝に着底して航行できなくなったが、基地までの距離が短かったことが幸いして無事に回収することができた。

2.5 結果及び検討

“釜猫”の牡鹿洞サンプ探査によって、小型水中ロボットは水中洞窟の有効な調査手段となり得ることが実証できた。しかしながら、いくつかの問題点も浮き彫りになった。

ハード面：洞窟内の搬入出・作業状況を考慮すると、小型な“釜猫”でさえも大きく重く、突起が多かった。システム全体の器材や運搬用の梱包材の量も多かった。下方向（水底方向）の映像取得を優先して上方向カメラを搭載していなかった。電源バッテリー内蔵方式を採用したが、電力低減時の対処が難しかった。浮力・トリム微調整のバラストを簡単につけ外しする機構がなかった。

運用面：洞窟学的見地からは、新水面上の空間を観

察すべきだった。7m ポイントから基地まで戻るときに、ケーブルを早く引っ張り過ぎたため、狭所にケーブルがライントラップされてしまい、ロボットの回収が一時困難になった。今回、牡鹿洞サンプを奥まで探査してみて、工学教材として“中級”のフィールドであることが判明した。水中洞窟のロボット探査実証実験を初めて行う学生たちは“初級”者なので、シミュレーション訓練を数多く積んだとはいうものの、牡鹿洞サンプにおいては実力に余裕がなかった。卒業研究室の学生が代替わりしてしまうと、年 1 回の実証実験探査では PCDA サイクルが機能しにくい。

以上の点を踏まえて、“釜猫”後継機は、ロボット本体の小型軽量化・流線型化、カメラ・ライト位置の再配置、電力供給可能なケーブルの使用、バラストの付け外し易くする機構を前提条件に開発されることになった。また、実証実験を年 1 回の単発イベントではなく、想定難易度が異なる水中洞窟のフィールドにおいて、実証実験を年複数回実施するプログラムを構想・編成し、実験候補地の一つ、白滝の穴における予備調査を先行的に実施した。

平成 21 年度は、校長裁量経費（融合研究）『水中洞窟等のフロンティア環境におけるミッション遂行型ロボット探査と実証実験』により、関連予備調査を含めたプロジェクト群：

「白滝プロジェクト」（初級）

「牡鹿プロジェクト II」（中級）

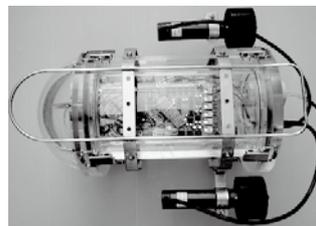
「岩戸-神瀬プロジェクト」（上級）

と“釜猫”の改良型後継機（平成 21 年度機）“新釜猫”の開発・作製が具体化することになった。

【“新釜猫”のシステム概要】

長嶋研究室が有限会社ロボットテクノスから器材の提供を受けて、“新釜猫”システムを共同で研究開発した。基本構成は“釜猫”と同じであるが、洞窟内の探査ミッションに使用し易い仕様に改良されている。

- (1) ロボット本体のサイズ・重量を低減し流線型化した：全長 300mm、全幅 220mm、全高 220mm、質量 12kg。バッテリーは NiMH 電池（12V、4500mAh）
- (2) “釜猫”のコントローラーは既製プロボを改造したものであったが、“新釜猫”では専用コントローラーを作製した。
- (3) ロボット本体のダウンサイジングに伴って、コントローラー・モニターなどを含めた全器材量を“釜猫”システムの約 3 分の 1 まで減量した。



“新釜猫”システム

コントローラー



「白滝プロジェクト」サンプ探査用器材

3. 白滝プロジェクト

熊本県球磨郡五木村北部にある白滝の穴（白滝鍾乳洞）は小規模な観光洞である。観光コース最奥の未調査サンプ（湧泉[3]）では、高い透明度の水が豊富に湧出している。洞口からサンプまでの道のり・高低差が少ないため、器材の搬入出が容易であり、観光コース最奥も前進基地が設営し易い。以上の点で、ロボット探査実証実験の“初級”者向けフィールドに選定した。

3.1 予備調査

平成20年2月7日、岩本玄樹（前出）と真部が、現地の下見と撮影・概測を行った。

3.2 第1次探査（現地下見・探査模擬訓練）

熊本県と五木村の許可を得て、平成21年8月29日、長嶋研究室のロボットチーム3名（木村昌生・滝川大介・山口拓朗 電気電子工学科5年生）を真部が引率し、現地下見と“新釜猫”による探査模擬訓練を実施した。“新釜猫”のカメラが撮影した水中映像によって、湧泉の底部（水深3~4m）に未知の水中洞窟が奥に続いていることを発見した。現在、12月初めの第2次探査（本番）に向けて準備を進めている。

4. 結言

「牡鹿プロジェクト」の牡鹿洞サンプロボット調査によって、小型軽量な水中ロボットが水中洞窟に対する有効な学術調査手段と成り得ることが実証できた。この機会を与えてくださった牡鹿洞管理事務所の吉野了嗣氏に深く感謝したい。さらに、卒業研究を通して、「牡鹿プロジェクト」に協力してくれた佐野裕次郎・堀部哲司・山下一真諸氏に感謝したい。

今後の課題として、小型軽量化したオプション開発（撮影対象のサイズ計測やデジタルコンパス方位データの字幕表示、洞壁の形状自動計測マッピングなど）が挙げられる。“新釜猫”をテストベッド機としてオプションシステムの実証実験を実施していきたい。我々の水中ロボット技術を発展させていけば、サンプの奥の洞窟が全水没している場合は、全域に渡って探査が可能になるであろう。しかしながら、牡鹿洞の例においても兆候があるが、水中洞窟では非水中部（未知の乾いた新洞窟）に遭遇する可能性は少ない。この場合、水中ロボットにとって水が無いことが逆に障壁となり、探査可能な範囲は第1のサンプ内に限定される。洞窟学・カルスト水文学の要請から、非水中部を越えて、第2、第3のサンプも探査する手段が必要である。そのために、水中～非水中をクロスオーバーしたロボットの連携ミッションを具体化していきたい。

参考文献

- [1] Urata, K. "Formation of the Hirao-dai karst system, Fukuoka Prefecture, Japan". Bulletin of Akiyoshi-dai Museum of Natural History, Vol.44, 1-40. pp.26 1, 2009.
- [2] 横田直吉退職記念出版会篇, “平尾台の石灰洞”, 日本洞窟協会, pp159, 1982年
- [3] “五木・五家荘の洞窟”, 九州大学探検部, 1988年

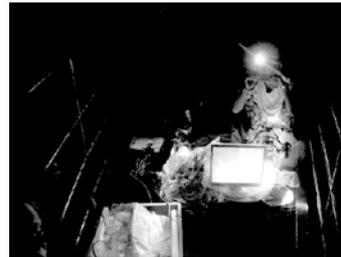


白滝の穴洞口

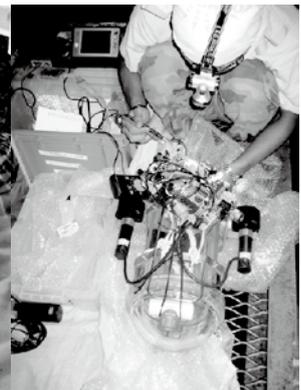
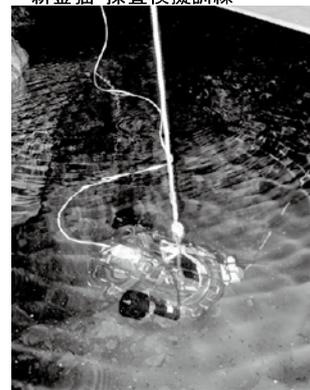
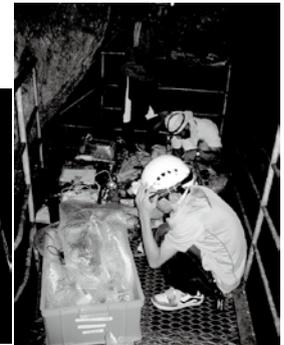
予備調査(2009年2月7日)



サンプ前進基地



“新釜猫”探査模擬訓練



白滝の穴湧泉の水中洞窟