

## 白滝の穴水中洞窟における 探査ロボットとサーベイシステムの実証実験\*

真部広紀\*\*、浦田健作\*\*\*、長嶋豊\*\*\*\*、  
山口卓哉\*\*\*\*\*、山口拓朗\*\*\*\*\*、木村昌生\*\*\*\*\*、滝川大介\*\*\*\*\*

Demonstration Experiment of Exploration Robot and Surveying System  
in Shiratakinoana Underwater Cave

Hiroki MANABE, Kensaku URATA, Yutaka NAGASHIMA,  
Takuya YAMAGUCHI, Takurou YAMAGUCHI, Masao KIMURA, Daisuke TAKIGAWA

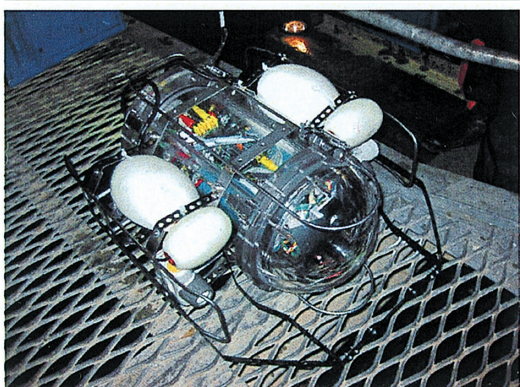


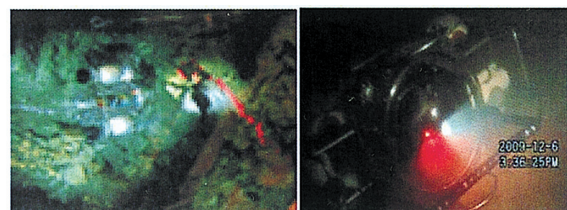
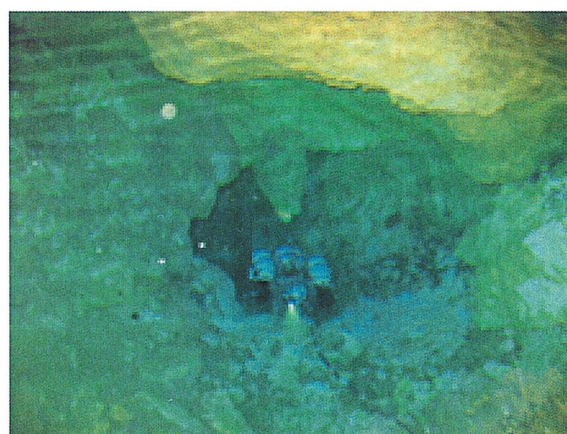
写真 1

左上：白滝の穴 洞口

左下：閉鎖水面環境対応水中ロボット“新釜猫”

右上：白滝の穴 湧泉の基底開口部

右下：“新釜猫”のシートレーザー



### 1. 緒言

地球の陸地面積の約 15%を占める炭酸塩類岩体のカルスト地域には、水中洞窟・非水中洞窟が接続する無数の未調査地下水系が含まれている。潜在的な調査対象は無尽蔵であるが、水中洞窟は調査の最大の障壁であり、水面がほとんど無い水中環境(閉鎖水面環境)の代表例である。広範囲の水面がある海・川・湖沼とは異なり、上方を固体の天井部によって塞がれた暗黒の迷路であり障害物も多い。このような閉鎖水面環境の潜水調査には高いリスクが伴うため、海・川・湖沼の場合以上に、ダイバーの代替調査手段として水中ロボットが切望されている。しかしながら、現在の水中ロボットは海・川・湖沼の探査ミッションが設計思想の前提にあり、水中洞窟内では回収不能に陥りやすい。そのため、閉鎖水面環

\* 原稿受付 平成 22 年 9 月 21 日

\*\* 佐世保工業高等専門学校 一般科目数学科

\*\*\* 大阪経済法科大学 地域総合研究所

\*\*\*\* 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

\*\*\*\*\* 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科専攻科 2 年

\*\*\*\*\* 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科専攻科 1 年

\*\*\*\*\* 西日本旅客鉄道(株)

\*\*\*\*\* 九州工業大学工学部 3 年

境の実用的な探査に対応できず、水中洞窟が含まれる水系調査の進捗は極めて遅い。逆に、水中洞窟の探査領域を拡大する水中ロボットがあれば、自然地理学・水文地質学・地下水文学・洞窟学など、水循環の環境問題に関係する学術分野に対して、質・量ともに大きく寄与できることが予想される。また、カルスト地域に水源がある地方自治体にとって、現実的なコストで地下水系調査を実施できるようになるメリットは大きい。水源のきめ細かい水質監視・流入出力管理を支援する体制を整えることによって、水質汚染・水源枯渇などの環境問題解消への一助として貢献できる。島嶼のカルストにおいては、表土が河川だけでなく地下水系を經由して沿岸に流出し、周辺サンゴ礁の環境悪化の一因となっている。詳細なカルスト地下水系の現況調査が急務である。

平成 16 年度に本研究グループでは、『閉鎖水面環境対応』というコンセプトを提唱し、以来、継続的に追求してきた。平成 20 年度に閉鎖水面環境対応型水中ロボット 1 号機“釜猫”を開発し、九州北部の福岡県平尾台「牡鹿洞」の未調査水没部において 2008 年 12 月に探査実証実験を実施した。未知であった水没部の奥に「牡鹿洞水中洞窟」を発見し、内部構造の撮影に成功した[1]。

平成 21 年度は“釜猫”を大幅にリニューアルした 2 号機“新釜猫”を開発し、九州中部の熊本県五木村「白滝の穴」未調査湧泉において、2009 年 2 月に先行予備調査、8 月に予備調査と探査模擬訓練を行った[1]。12 月実施の探査実証実験では、未知であった湧泉の奥に「白滝の穴水中洞窟」を発見し、内部構造の撮影に成功した。また、水中洞窟の概形を計測するため、電子コンパス・傾斜計を利用したサーベイシステムの予備実験も並行した。

本稿では、この実証実験のロボット探査成果を報告するとともに、閉鎖水面環境探査に不可欠なサーベイシステムの予備実験結果について考察する。

## 2. ロボット探査

熊本県球磨郡五木村小鶴の白滝公園内に位置する白滝鍾乳洞(「白滝の穴」)は、東西方向の高角度断層に沿って形成された石灰洞である。洞口から約 35m は遊歩道が整備された観光洞として開発されていて、最奥に透明度が高い未調査湧泉がある[2]。

この湧泉の水源として、水中洞窟の存在が推定されていた。平成 21 年度校長裁量経費(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、改良機“新釜猫”による探査計画「白滝プロジェクト」を企画準備した。五木村のご厚意により調査許可を得て、2009 年 12 月 6 日(日)に、白滝の穴湧泉のロボット探査を実施した。



写真 2

最上左：前進基地の設営(白滝の穴 遊歩道最奥部)

最上右：“新釜猫”の組上げ

上左：水面で浸水チェック

上右：湧泉直上の前進基地

下左、下右：水面下で浮力・浸水チェック、  
スラスタテスト

最下左、最下右：湧泉開口部でライトテスト

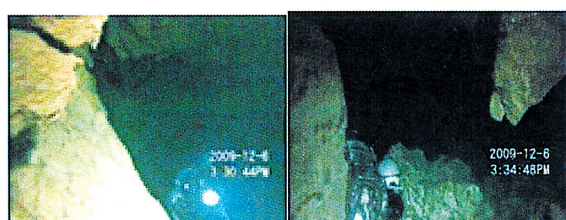
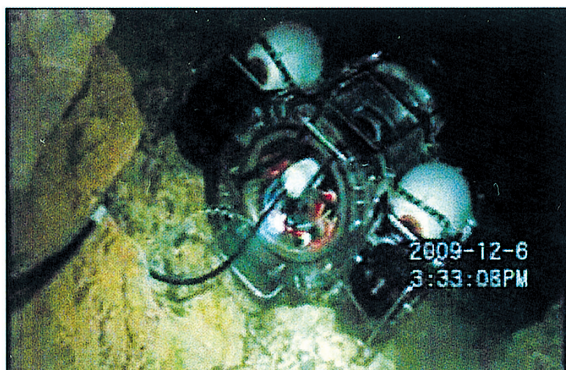


写真3 湧泉基底開口部奥の水中洞窟に進入

探査参加者は以下の10名：

[教員3名]

長嶋豊、真部広紀、浦田健作（大阪経済法科大学）

[電気電子工学科のロボット探査チーム5名]

山口卓哉(専攻科1年(当時))、木村昌生・滝川大介・

山口拓朗・田崎悟史(本科5年(当時))

[ケイビング団体のカマネコ探検隊2名]

田中孝宜氏、樋高昭子氏

湧泉基底の開口部から“新釜猫”を進入させ、未知の水中洞窟の入口を発見した(写真3)。

8月の探査模擬訓練時の基本システムに加え、ロボットを操縦するオペレーターが初見の水中洞窟で進入ルートを見つけやすくするために、シートレーザー投射器を搭載した(写真1右下)。さらに、電子コンパス・傾斜計のリアルタイム計測値をモニター画面にインポーズして、オペレーターが具体的な方位・俯角を参照しながらナビゲーションを行うことを可能にした(写真4,5,6)。

ロボットの往復パターンについても詳細に検討した。1回で到達可能な限界点まで進入距離を延ばすワンアタック法は、往復経路がすべて初見部分となり、オペレーターの操縦負担が極めて大きい。そこで、機体の方向転換なしに後進が容易な“新釜猫”のメリットを活かして、徐々に進入距離を大きくし

て往復を繰り返す漸増マルチアタック法を採用した。 $n$ 回目の往復の初見部分は、次の $n+1$ 回目の往復では非初見部分に転化するので、2回目以降の初見部分の比率を抑制できるからである。

### 3. 水中洞窟の概容

4回の漸増アタックの探査記録を総合して、「白滝の穴水中洞窟」の概容を説明する。



写真4 “新釜猫”のカメラモニター

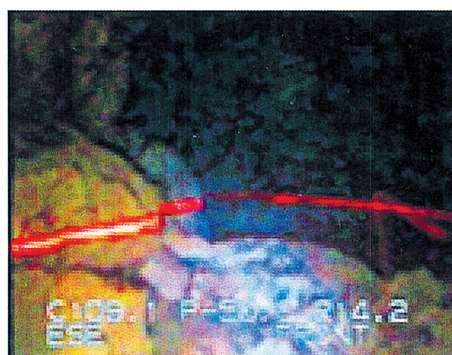
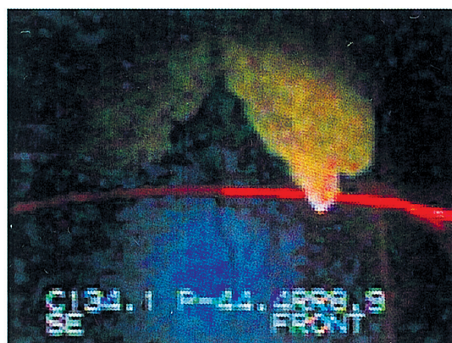


写真5(“新釜猫”のカメラ撮影動画)

水中洞窟の前半部と

2次生成物(鍾乳石・フローストーン)

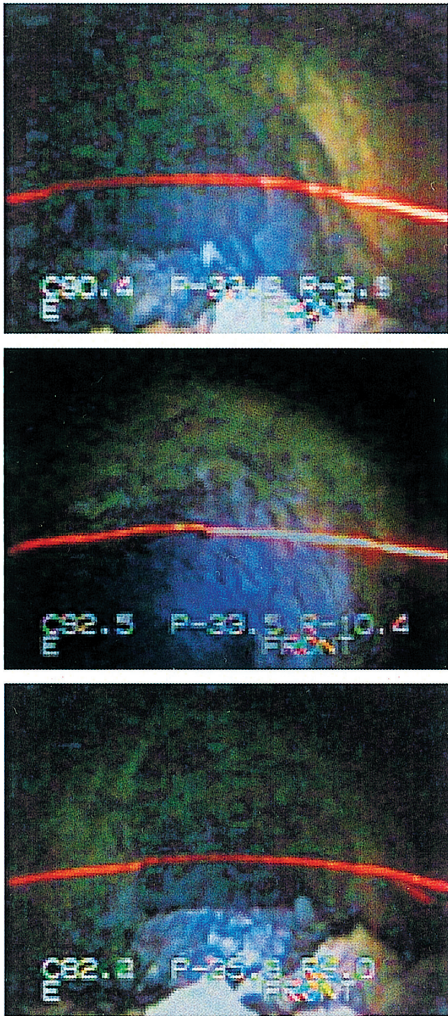


写真6 (“新釜猫”のカメラ撮影動画)

溶食痕(スカラップ)が顕著な奥部

下: ロボット到達点以奥、水中洞窟は深く続く

水中洞窟における“新釜猫”の進入探索経路において、ロボット搭載カメラの記録映像では分岐は確認されなかった。そのため、進入探索した部分の水中洞窟は一本道と考えられる。総進入距離は約18m、平均傾斜(ロボットの俯角)は約45°であった。湧泉水面からの計算推定水深は、水中洞窟入口(湧泉基底開口部)では約4m、最奥到達点の湧泉水面では約13mである。

進入経路の洞窟前半部(基底開口部近く)は概ね南東～北西方向に形成され、傾斜は50°前後であり、洞壁には2次生成物(鍾乳石、フローストーン)がある(写真5)。水中では2次生成物は形成されないため、前半部の水位が低下して乾いた洞窟の時期が過

去にあったと考えられる。

後半部(奥部)は東西方向に形成された管状通路(tube passage)である。洞壁は水流による魚鱗状の溶食痕(スカラップ)で覆われている(写真6)。

「白滝の穴」は傾斜60°以上の高角度断層面に沿って東西の走向方向に形成されていることから、浦田は「白滝の穴」水系の一部である水中洞窟も東西方向に発達していると推定した。今回のロボット探査によって、水中洞窟(とくに奥部)が東西方向に形成されていることが確認され、浦田の推定を実証した(写真6の各画像左下; C82.2～92.5 E (82.2°～92.5° East))。

ロボット到達点以奥は傾斜が急に大きくなり、管状通路の形成方向が東西(断層面の走向方向)から南北(断層面の傾斜方向)に転換している。

#### 4. サーベイシステムの予備実験

既存の地図で稠密に把握されている地表と違って、地下空間には僅少な例外を除いて地図がない。洞窟や水中洞窟における調査成果に空間情報を付与しようとするならば、白地図の作成から出発しなければならない。

本研究グループが着目したボアホールサーベイシステムは、搭載センサーによって計測した探査体の方位角の方向余弦とケーブル長の差分と積算し、探査体の3次元相対移動量を算出する。移動量を3次元直交座標にプロットしてつなげた曲線は、探査体の軌跡を表現する。本来の用途である鉱山の試掘孔や地中埋設配管の形状を計測する場合は、試掘孔・配管と探査体との隙間(クリアランス)がほとんどない。この拘束条件によって、探査体の進行方向が試掘孔や配管の方向とほとんど一致するため、算出した探査体の軌跡を試掘孔や配管の形状曲線とみなすことができる[3]。

水中洞窟探査においては、ROVと洞壁とのクリアランスが大きい。ROVの機体方向と進行方向(水中洞窟の方向)を常時そろえて操縦するのは困難なため、ROVの軌跡曲線と水中洞窟の形状表現には原理的に扨拭できない乖離が存在する[4]。

今回の探査では水中洞窟内部の撮影ミッションを優先させるため、並行するサーベイシステムの実験は試行的な運用レベルにとどめた。ハンドラーが

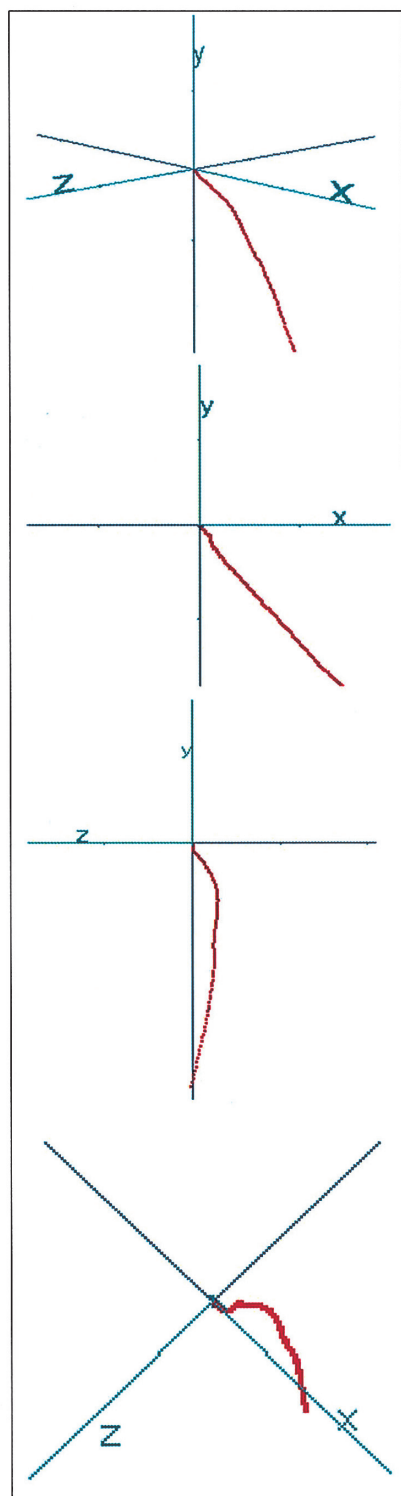


図1 (上) ロボットの軌跡曲線

表1 (右上) 電子コンパス・傾斜計の計測データ(一部)

方位 (度)	ピ ツ チ	ロ ー ル	x 変位	y 変位	z 変位	x 総和	y 総和	z 総和
114	-50	-19	0.913545	-0.40674	-1.19175	0.913545	-0.40674	-1.19175
111	-50	-18	0.93358	-0.35837	-1.19175	1.847126	-0.7651	-2.38351
86	-50	8.9	0.997564	0.069756	-1.19175	2.84469	-0.69535	-3.57526
100	-50	-4	0.984808	-0.17365	-1.19175	3.829498	-0.869	-4.76701
95	-50	-10	0.996195	-0.08716	-1.19175	4.825692	-0.95615	-5.95877
88	-50	-6	0.999391	0.034899	-1.19175	5.825083	-0.92125	-7.15052
126	-38	-35	0.809017	-0.58779	-0.78129	6.6341	-1.50904	-7.93181
144	-22	-33	0.587785	-0.80902	-0.40403	7.221885	-2.31805	-8.33583
142	-46	-11	0.615661	-0.78801	-1.03553	7.837547	-3.10607	-9.37136
133	-50	-6	0.731354	-0.682	-1.19175	8.568901	-3.78806	-10.5631
182	-50	-38	-0.0349	-0.99939	-1.19175	8.534001	-4.78745	-11.7549

読み取るケーブル長に時刻を付加させず、「コンパスの向いている方向へ毎秒距離 1 (単位不定) だけ進む」という前提条件で軌跡曲線を算出し、プロットツール「3DPlot」で 3 次元表示した(図 1, 表 1)。おおまかではあるが、前述した水中洞窟の形状の雰囲気を図に反映させることができた。「白嶽東プロジェクト」「白滝プロジェクトII」「牡鹿プロジェクトII」など、今後のロボット探査実証実験の比較対照資料として活用する。

## 5. 独自性と展望

現在、世界の 45 以上の研究機関において、水中ロボットの研究が精力的に進められているが、海・川・湖沼のような広範囲水面の水中環境を探査対象としている。国内の例としては、鹿児島錦江湾のアオリムシコロニーや熱水噴出孔を観測した「Tri-dog-I」(200kg)、「TUNA-SAND」(240kg)、深海生物探査ロボット「PICASSO」(200kg)が挙げられる。これらのロボットは深海の特殊ミッション向けであり、重量や体積が大きく、高性能な調査機器類を多数搭載している。1回の調査ミッションの規模は大きくなり、移動・運用コストは高い。

一方、環境問題が深刻化している沿岸域では、小規模調査のニーズは膨大な数に上る。沿岸域のように水深の小さい浅海域では、上記のような大水深対応型ロボットはオーバースペックである。移動・運

用コストがかかり過ぎるため、細かい調査ニーズには対応できない。長嶋の卒業研究室では、少人数携行・運用が可能なローコスト・小型軽量・コンパクトな水中ロボットを開発し、藻場調査や水中考古学調査の現場において有効性を実証した[5,6,7]。

環境問題は地下水においても深刻化している。水質汚染・水源枯渇の対策を立てるためには水系調査が急務であるが、川・湖沼などにくらべて調査が遅れている。とくに、水系の一部に水中洞窟が含まれるケースでは調査が著しく遅れている。ここ20年来急速に成長してきた水中ロボット技術ではあるが、海・川・湖沼の探査ミッションが設計思想の前提にあり、現在の水中ロボットでは水中洞窟内で回収不能に陥りやすい。たとえば、2007年にクロアチアのブダペスト研究所では、海洋型の小型ROVによる水中洞窟探査ミッションを試みたが、閉鎖水面環境に起因するケーブルの絡みでロボットが拘束され、所期の探査目標を達成していない[4]。

実用的な水中洞窟の探査を想定した「閉鎖水面環境対応」という概念を抽出し、新しいカテゴリーのロボットコンセプトとして提唱したのは、本研究グループが最初である。国内の研究機関・組織の中で、唯一、水中洞窟の安全で高効率な調査手法を研究し、現場において検証を重ねている。

閉鎖水面環境は水中洞窟以外にも、水害によって水没した建物・都市地下空間内部、沈没船内部、転覆船内部などがある。水中洞窟探査ロボットを、これらの空間部に取り残された要救助者探索システムに発展させていけば、レスキュー支援分野への貢献が期待できる。

水中洞窟は外界から隔離され攪乱を受けにくい。ため、堆積物・化石・古人骨・遺物などを包蔵・維持しやすく、新種の生物が生息している可能性もある。自然地理学・地質学・水文地形学・地下水学・地球化学・古気候学・古生物学・生物学・古人類学・考古学など、数多くの分野の良質な研究対象を包蔵している。探検調査を行う学術的な意義やメリットは大きい。前人未踏の洞窟や水中洞窟に一步を踏み出せば、その場所にとって人類最初の探検者となることができる。フロンティアスピリットがこの上なく昂揚するこの体験は、本校の工学教育に強力なモチベーションを提供する。

## 6. 結言

2009年12月実施された「白滝プロジェクト」によって、閉鎖水面環境対応水中ロボット“新釜猫”の探査能力を実証することができた。湧泉の奥に発見された「白滝の穴水中洞窟」は、本校が初めてその存在を確認し社会に周知した2例目の水中洞窟である。

## 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年
- 2) 九州大学探検部, 五木・五家荘の洞窟, 1988
- 3) 多摩川精機(株)編, ジャイロ活用技術入門, 工業調査会, pp.163-174, 2002年1月
- 4) M. Stipanov, V. Bakari, Z. Eskinja, ROV use for cave mapping and modeling, Second IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (2008), Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, Volume# 2 | Part# 1
- 5) 長嶋豊, 真部広紀, 海中ロボット技術を活かした水中考古学調査～小値賀島前方湾における予備実験～, アジア水中考古学研究所 水中考古学研究第2号, pp.49-54, 2006.12
- 6) 長嶋豊, 真部広紀, 志久修, 下尾浩正, 田口喜祥 浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発, 佐世保工業高等専門学校研究報告第44号, pp.35-42, 2007年
- 7) 長嶋豊, バリベックプロペラを用いた浅海域調査用海中ロボット～無線と細径ケーブルによるハイブリッド化～, 日本マリンエンジニアリング学会誌, VOL.43, No.4, pp.108-111, 2008, JUL