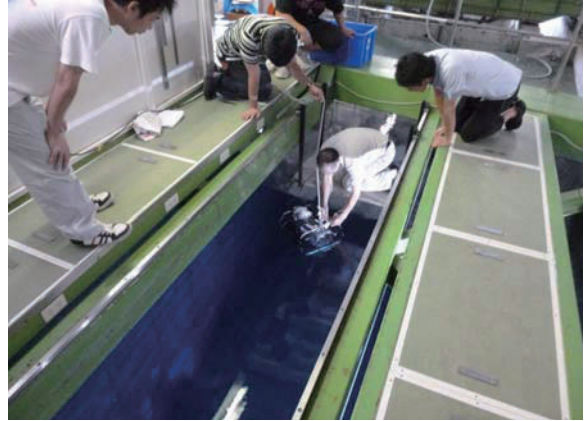
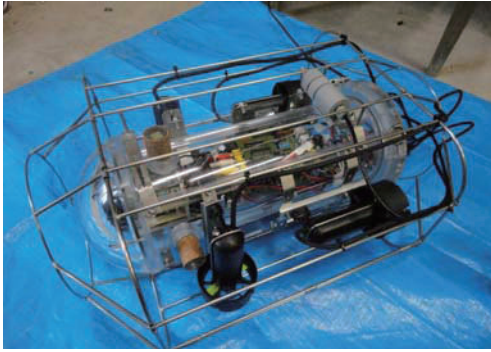


水中洞窟系のロボット探査とソナーによる形態計測の予備実験*

眞部広紀**1、長嶋豊**2、浦田健作**3、染谷孝**4、
下尾浩正**5、前田貴信**6 三宅飛翔**7、柴田裕貴**8、
原崎芳加**9、原田明**10、白川知秀**11、福岡聡紀**12

Robotic Exploration and Preliminary Experiments with Sonar Morphometry of Underwater Cave System

Hiroki MANABE, Yutaka NAGASHIMA, Kensaku URATA, Takashi SOMEYA,
Hiromasa SHIMOO, Takanobu MAEDA, Hishou MIYAKE, Yuuki SHIBATA,
Yoshika HARASAKI, Akira HARADA, Tomohide SHIRAKAWA, Toshiki FUKUOKA



* 原稿受付 平成 24 年 10 月 26 日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目数学科

**2 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

**3 大阪経済法科大学 地域総合研究所

**4 佐賀大学 農学部

**5 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

**6 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**7 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

専攻科 1 年

**8 旭国際テクネイオン株式会社

**9 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科 本科 5 年

**10 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科 本科 5 年

**11 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科 本科 5 年

**12 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科 本科 5 年

写真 1 左上 水中ロボット“釜猫 3”

左下 本校水槽暗所洞窟モジュール潜航訓練

右上 九州大学応用力学研究所深海水槽実験

右下 千綿溪谷竜頭泉滝壺実験

1. 緒言

陸上などの非水中環境で動作する通常のロボットとは異なり、水中ロボットは防水・耐圧・流体力など、別種の対応・仕様が要求される。現在、世界の研究機関で開発が進められている水中ロボット

は、海・川・湖沼など、大きな自由水面を有する開放水面環境（オープンウォーター環境）における運用を前提に開発されてきた。ミッション開始時（ロボットの入水）や終了時（ロボットの回収）は、水面を通過させて行われる。緊急時には、ロボットを牽引して水面まで強制的に浮上させて揚収することが可能である。固体の天井部によって開放水面が塞がれている閉鎖水面環境（オーバーヘッド環境）では、水面回収を緊急時の対応オプションとして使用できない。水中洞窟は閉鎖水面環境であり、起伏・屈曲・分岐に富んだ暗黒の立体迷路である。これらの要因が探査を実施する上での障害となっていて、未踏・未調査の水中洞窟に対するロボット探査はほとんど行われてこなかった。

本研究グループは国内初の試みとして、閉鎖水面環境に対応可能な小型水中ロボットをシリーズで開発した。『校長裁量経費（融合研究）』の補助によって、平成 20 年度・21 年度・22 年度に実施した福岡県平尾台「牡鹿洞」、熊本県五木村「白滝の穴」、同県の球磨村「岩戸洞」における湧泉や洞窟水没部の探査実証実験では、未知の水中洞窟発見と内部の撮影記録が成果として得られ、学術分野に大きく貢献することができた ([1,2,3])。

平成 23 年度から『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』（寄附金 キヤノン財団「理想の追求」研究助成）、『閉鎖空間と閉鎖水面環境に関する研究』（寄附金）の補助を受け、水中洞窟・非水中洞窟の形態形状を 3 次元計測する探査システムの研究開発を進めている。

本稿では、閉鎖水面環境（水中洞窟）の 3 次元計測について、移動観測プラットフォーム（水中ロボット）による探査を考察する。第一段階のケーススタディとして、過去 3 年間の「牡鹿プロジェクト」「白滝プロジェクト」「岩戸プロジェクト」を総括する。次に、第二段階として新造した水中ロボット 3 号機の性能試験とソナー計測システムの予備実験を報告する。水中洞窟と非水中洞窟が混在する洞窟系にも対応するため、閉鎖空間（非水中洞窟）の 3 次元計測についても検討する。ロボットへの実装に向けた第一段階として、移動観測プラットフォーム（人間に装着したレーザー測域センサー）による計測システムの予備試験を報告する。

2. 背景

リモートセンシング技術の発達によってグローバルな高精細解析が可能になった地表に較べると、地下に関する情報は地表のそれに及ばない。しかしながら、例外的な地下への「窓」である「洞窟」が存在する。地表の延長であり、地理学・地質学・地下水学・古気候学・古生物学・古人類学・考古学・生物学などの学術分野の対象が重層するフィールドとして調査価値は高い。探検家や科学者の尽力によってその一部が明らかになってきたが、落石・崖・泥濘・高湿度・滴下水、凹凸・屈曲・分岐・狭窄・高低差など、非整地的・微地形的な障害・陥穽を包含する暗黒世界は、進入するだけでも極めて困難である。そのため、「洞窟」の大多数・大部分は未知・未踏領域であり、潜在的な調査対象は実質的に無尽蔵である。有効な調査手法を提供すれば、多くの関係学術分野に貢献することができる。本研究グループは日本洞窟学会と連携して、『洞窟探査システム』をコアテーマとする洞窟調査関連分野とロボティクス分野の総合プロジェクトに着手した。

未知環境の洞窟に対して、「進入→計測・測量・調査→帰還」という完全回収型の探査ミッションをロボットに遂行させるには、探検者がもつ「眼」・「記憶（記録）」・「ルート計画力」・「足回り」をシステム化・機械化する必要がある。

自律方式によるシステムの実現は、研究期間が長くかかることが見込まれたため、時間を短縮できる遠隔操縦方式のロボットの研究、とくに「足回り」（ロボットの移動方法）の研究を最優先にした。

移動方法の中でも、接地移動は重力の影響によって消費するエネルギーが大きく、転倒・滑落によって損傷・帰還不能に陥る可能性も少なくない。例外的に、「洞窟」の水中部では、浮力によって重力の影響を軽減することが可能である。また、「洞窟」の形態は水中部も非水中部も大きな差はない。

この利点を活かすために、『洞窟水中部（水中洞窟）の探査システム』の出発点として、水中探査ロボットの研究、具体的には、本研究グループが進めてきた小型の遠隔操縦方式ロボット（ROV : Remotely Operated Vehicle）からアプローチすることにした。

3. 沿岸浅海域・陸域の水中ロボット探査

「水中」は人類にとって苛酷なフィールドであり、リモートセンシングが発達した今日においても、「水」という障壁によって守られたフロンティア（極限環境、未踏領域）である。その観測用無人プラットフォームとして、ロボットが活用されている。水中環境では、防水・耐圧・流体力など、非水中環境とは別途な仕様・対策がロボットに要求される。例としては、鹿児島錦江湾の熱水噴出孔の観測を行った東京大学の“Tridog- I”、“TUNA-SAND”、JAMSTECの生物探査ロボット“PICASSO”などがある。これらは深海域用・大重量で高性能な機器類を多数搭載しているため運用コストは高い。水環境の悪化に伴い沿岸浅海域の調査ニーズが高まってきたが、上記のような大型・中型ロボットでは小規模なミッションの費用対効果が悪く、数多い需要が見込まれる沿岸域調査の現実的手段にはならない。そこで、本研究グループでは、“Lemon”、“小値賀プロジェクト号”など、少人数で携行・運用可能な低コスト・小型軽量コンパクトな水中ロボットを開発し、藻場の撮影実証実験によって調査手段としての有効性を示した。また、底質を巻き上げにくい静穏な推進機構を活かして、水中考古学の発掘現場で鮮明な水中画像の撮影に成功した〔4〕。



写真2 “Lemon” (30kg)

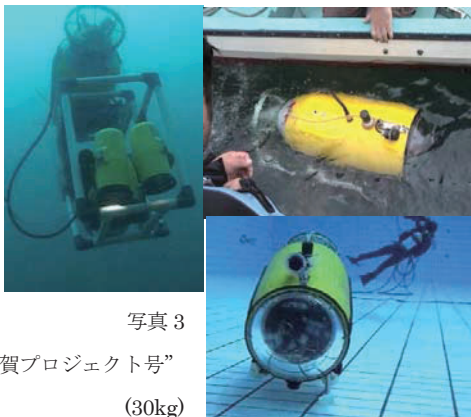


写真3
“小値賀プロジェクト号”
(30kg)

陸域においても環境問題の深刻化にともない、川・湖沼・地下水などに対する水文系調査の需要が高まっている。海と同様に広い開放水面をもつ川・湖沼は、水中ロボット調査の適用範囲内にある。例としては、東京大学の“淡探”や立命館大学の“湖虎(COCO)”が琵琶湖の観測を行っている。本研究グループでは、北九州市において“Lemon”を使用した沈水植物ガシャモク（絶滅危惧種）の水中生態観察を行った。

4. 水中洞窟のロボット探査

水中洞窟は川・湖沼がもつ広い開放水面がほとんど無く、暗黒の水中迷路であり障害物も多い。このような上方を塞がれた閉鎖水面環境（オーバーヘッド環境）の潜水調査はハイリスクが伴うため、水中滞在時間・行動指針の厳格化、潜水装備の冗長化によって対処している。海・川・湖沼の潜水よりも費用対効果は著しく悪く、川・湖沼などの地表水系にくらべて調査の進捗が遅い。ダイバーの代替手段として水中ロボットが切望されているが、現在世界中で研究されている水中ロボットの技術・手法は開放水面を前提条件としているため、水中洞窟の調査用途に対応できない。ROVの場合では、ケーブルの基点である前進基地（コントロールユニット）からロボットが水平方向に遠く離れなければならず、ケーブルも進入長の分だけ展開する必要がある。ところが、長く繰り出すとケーブルの自重が大きくなり、負荷でロボットが動けなくなる。また、横ずれしたケーブルが狭窄部に引き込まれてロボットが拘束されることもある〔5〕。ケーブル牽引による強制浮上は緊急回収の有効手段にはならない。水中洞窟内でロボットが回頭した場合、ケーブルが洞壁・洞床などの突起を巻き込んで拘束されるリスクもある。回頭せずに後進すればケーブル拘束のリスクを低減できる。そのために、ロボットには後方カメラを搭載するなど、水中洞窟に対応する運用法とシステムが必要になる。拘束の予防と対処を重視した実証実験プロジェクトの構想を固め、候補地選定等の準備を開始した。

本研究グループは、平成20年度から22年度まで『校長裁量経費（融合研究）』の補助を受け、閉鎖

水面環境対応の小型水中ロボットの開発と、洞窟の現場における探査実証実験を継続して行なった。

4.1 牡鹿洞の地下川下流水没部

浅海域用マルチカメラロボット“海猫”をベースに、平成 20 年度に閉鎖水面環境対応型 1 号機“釜猫”を開発した。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、未知であった水没部の奥に「牡鹿洞水中洞窟」を発見し撮影に成功した〔1〕。



写真 4 左

上 牡鹿洞洞口

中上・下 牡鹿洞最深部前進基地

下 水中ロボット“釜猫”



写真 4 右

上 “釜猫” 潜航開始

中上 前進基地のモニター

中 水中洞窟の鍾乳石(“釜猫”カメラモニター画面)

中下 水中洞窟奥の新水面(“釜猫”カメラ映像)

下 サポートダイバー

4.2 白滝の穴の最奥湧泉

平成 21 年度は“釜猫”をリニューアルした 2 号機“新釜猫”を開発した。2009 年 2 月に九州中部の熊本県五木村「白滝の穴」最奥の未調査湧泉において先行予備調査を実施し、8 月に予備調査と探査模擬訓練を行った([1])。

12 月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実施した([2])。

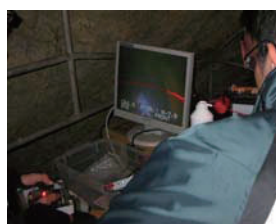
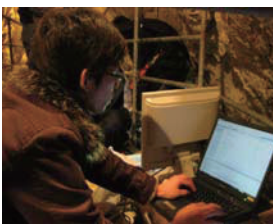


写真 5

左上 「白滝の穴」洞口

左中・左下 「白滝の穴」最奥前進基地

右上 水中ロボット“新釜猫”

右中上・右中 “新釜猫” 潜航開始

右中下 発見した水中洞窟(“新釜猫”カメラ映像)

右下 サポートダイバー

4.3 岩戸洞の洞外湧泉

平成 22 年度のプロジェクトにおいては、テストベッド機の“新釜猫”に交差ラインレーザーと改良型サーベイシステムを搭載した。この“新釜猫 mark II”を使用して、熊本県球磨村「岩戸洞」洞外湧泉の水中洞窟最深部までの現況調査・撮影と、洞窟形状計測のための予備実験を実施した([3])。

ロボットの移動行程は、ワンアタックの往復ではなく、進入・帰還のセットを反復して段階的に進入距離を延ばしていくパターンを採用した。これは、電源電池の消耗よりも、コントロールユニットのオペレータとナビゲータの慣熟を優先させる手法で、白滝の穴湧泉探査においても採用している([2])。

洞窟形状の点群データと 3 次元モデル生成を目的として、ロボット撮影映像画像の処理による洞窟の形態計測システムの予備実験を行った。水中での減衰が少なく到達距離が長いとされる緑色光と比較対照用の赤色光、2 種類のレーザー光を水中ロボットから洞壁に投射して、反射光パターンの形状を読み取った。画面上で光のラインを視認する場合や、ラインの形状を水中の背景色(青色)から分離抽出する場合には、赤色光の方が有利であることを確認した。また、水中の青色系の画像では、反射箇所と周囲との色調対比が大きい赤色光の方が、緑色光よりも反射光のパターンを識別しやすいことを実証した。



写真 6

左上「岩戸洞」洞外湧泉

左下 “新釜猫 mark II”

右上 mark II 潜航開始”

右中上 前進基地

右中 オペレータとコントロールユニット

右中下 水中洞窟(mark II カメラ映像)

右下 サポートダイバー

5. 3号機の開発

平成20年度から22年度の探査実証実験によって、水中洞窟の形態を計測する基礎技術の第一段階の確認できた。そこで、ロボットと洞窟壁面間の距離測定に基づいたソナー計測システムを計画した。

平成23年度から『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』（寄附金 キヤノン財団研究助成）、『閉鎖空間と閉鎖水面環境に関する研究』（寄附金）の補助を受けて、距離測定用のソナーを搭載したロボットシステム(3号機 “釜猫3”)の製作・試運転を進めた。

3号機の特徴としては、調査内容に応じて推進方式を使い分けることができる点、水中洞窟内の距離計測用4方向ソナーを搭載している点であり、測距データから洞窟概形の生成を目指している。

5.1 3号機の概要

開発した3号機は主にROV (Remotely Operated Vehicle)として使用するため、ロボット本体とPCコントローラーで構成した。アクリル製耐圧容器に水中スラスター、4方向ソナーを装着し、PSoCマイコン制御基板、電子コンパス、深度センサー、CCDカメラを搭載した。推進方式には2基スラスター型(2基スラスターとトリム機構を搭載して3次元移動実現)及び4基スラスター型(推進用および潜航浮上用に2基ずつスラスターを搭載)の2種から選択できる。特に底質を攪拌するような場所では、2基スラスター型を使用する。洞窟用ソナー(探知周波数77kHz、指向角40°、送信繰返周期200ms、送波音圧180dBuPa)を新規に製作した。4基スラスター型水中ロボットの主要諸元を表1に示す。

全長[mm]	670
高さ[mm]	300
幅[mm]	440
空中質量[kg]	18

表1 主要諸元

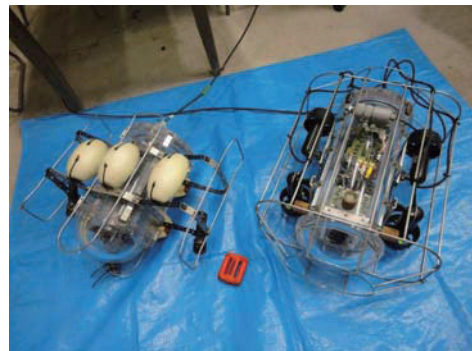
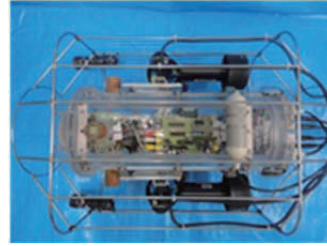


写真7

右上・右中 3号機 “釜猫3”

右下 “mark II” と 3号機

5.2 3号機の航行性能実験

平成23年度には、3号機のROVとしての操縦性能を把握するために、PCコントローラーによる直進と潜航浮上性能実験を本校大型無響水槽で行った。電子コンパス・深度センサー等で性能評価した結果、

全スラスターを PWM 制御することで、使用環境に応じて柔軟性のある航行が可能であることを確認した。加えて、本校の無響水槽内に水中洞窟環境を模したシミュレーションモジュールを組み立て、暗所操縦訓練も行った(写真 1)。また、新長崎漁港環境調査等での評価から有効性を確認した。

平成 24 年度には、九州大学春日キャンパスの応用力学研究所深海水槽において、3 号機の各種実験
 (①潜降浮上性能実験とソナー測距予備実験、②定深度自動潜航制御実験、③無線 LAN 潜航制御実験)を行った。

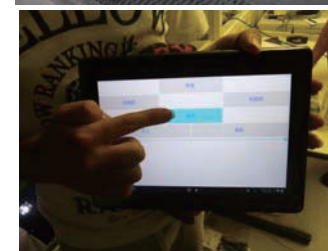
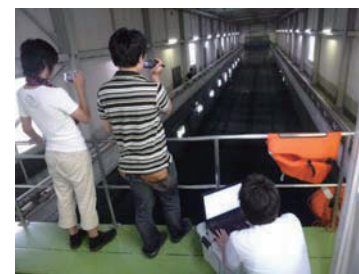


写真 8

左上 九州大学応用力学研究所深海水槽

右下 ①基本航行性能試験とソナー計測予備実験

右上 ②定深度自動潜航制御実験

右下 ③無線 LAN 潜航制御実験

6. ソナーによる形態計測

本稿では、地表から連続して一定の規模がある地下空間と「洞窟」を定義する。地表に開口部（洞口）をもつ点で、地下空洞と区別する。規模の基準は、通例、人間が通過可能なサイズに設定される。空間には大気や水が満たされている。本研究グループの計測対象は、洞床・洞壁・天井などの「洞窟」の境界曲面である。ソナーを搭載した水中ロボットが水中洞窟の中を移動しながら境界曲面を計測するシステムの開発と検証を目指す。1枚の平面を境界曲面に交差させると、「洞窟」の断面を表すいくつかの閉曲線になる。これらの断面閉曲線の形状・サイズの詳細取得を研究の第一段階とした。

3号機の機体トリムは機軸方向が水平面に収まるように設定している。また、搭載した4chソナーの計測方向は、機軸に垂直な平面1枚に収まるように配置してある。空間の延長方向を概ね水平とみなすことができる横穴と斜洞では、3号機の機軸を水中洞窟の延長方向に向けることで、機軸に垂直な平面を水中洞窟の横断平面と一致させることができる。このとき、機軸方向に垂直な平面内の4方向（上下左右）の距離を4chソナーによって計測すれば、水中洞窟の断面閉曲線の形状をサンプリングできる。

平成23年度は、3号機のソナーのチャンネル毎に測距特性を測定し、良好な結果が得られた。平成24年度は、本校プールにおいて、3号機のソナー計測予備実験を行った〔6〕。また、近隣の東彼杵郡千綿溪谷「竜頭泉」の滝壺においてロボット探索とソナー計測予備実験を行った。

6.1 ソナーの基本測距性能と較正実験

ソナーの較正を行うため本校プールにおいて、クランク状に反射板を配置し、ロボットを移動させながら測距した。図1の各点の番号は測定点を表しており、測定した壁面の点番号と対応している。図2に測定中の水中ロボットの方位および深度結果を示す。測距データでは最大8.3%の誤差がみられたが、比較的安定した結果が得られた。具体的な水中洞窟では狭隘で凸凹も多いため反射波の影響等も予想されるが、細かい間隔で測定することで3D概形を生成できると考えられる。基本航行性能評価と水中洞窟用4方向ソナー較正実験では、ほぼ満足できる結果を得たが、ソナーの増幅度・

閾値等の性能改善が課題となった。

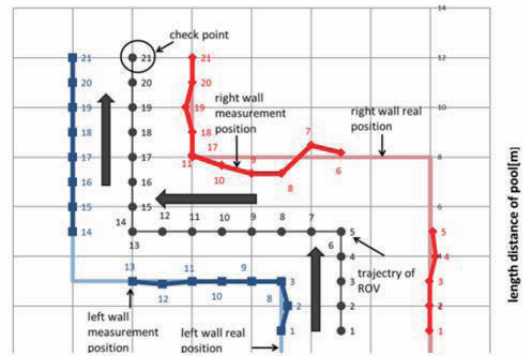


図1 概形測距（水平方向）の結果

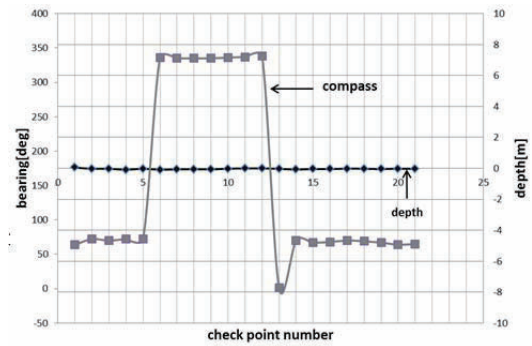


図2 概形測距（深度）・方位の結果



写真9 本校プール ソナー計測予備実験

6.2 竜頭泉滝壺におけるソナー計測予備実験

本校所在地の近くの東彼杵郡千綿溪谷に「竜頭泉」がある。その滝壺は約 20m の最大水深があると伝えられているが、実測データの資料は見つかっていない。そこで、平成 24 年度に滝壺の水深分布を計測するプロジェクトを立案し、本校サイエンス部の協力を得て先行予備調査を実施した。滝壺を横断する測線に沿って水深を計測する予定であったが、流量が予想よりも多く、錘のロープが流されて中央部付近は正確な計測ができなかった。方針を変更して、水際線に沿って水深を計測した結果、約 11~12m の範囲に計測値が収まった。このことから、水際線直下は崖(ドロップオフ)であることが予想された。これが正しければ縦穴水中洞窟探索のシミュレーションフィールドに使用できる。

日をあけて 3 号機による滝壺水底のロボット探査



写真 10

[先行予備調査]

左上 器材準備 左下 錘による測深

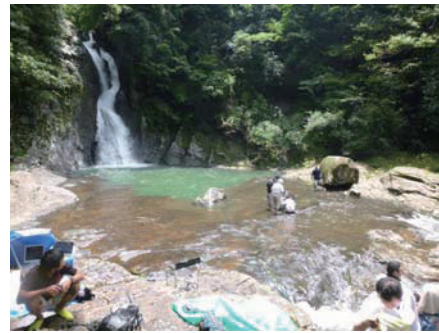
[ソナー計測予備実験]

右上 ロボット準備

右下 前進基地のモニター画面

(「竜頭泉」滝壺水底の 3 号機カメラ映像)

と計測予備実験を行った。ロボット探査ではカメラ映像によって、滝壺は崖で囲まれた形状であることが確かめられた。計測予備実験では、水深は最大約 15m を記録したが、20m のポイントは発見できなかった(図 3, 4)。途中、右ソナーの O リング劣化による漏水が生じて、水平方向の計測データが得られなかった。また、GND 線の接触不良によるモニター画面の暗化・寸断が生じたが、これらの不具合は後で解消した。ソナーの増幅度・閾値等のさらなる性能改善が課題である。



龍頭泉の概形

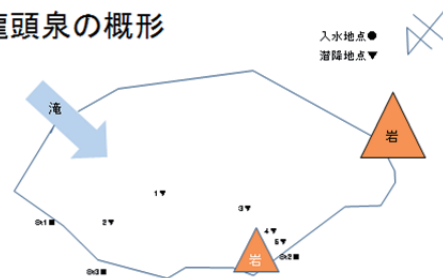


図 3 概形 (下方ソナーによる計測ポイント)

No.	出発地点	動作	深度(m)
1	st1	潜降→着底→浮上	11.2
2	st1	同上	
3	st1		
4	st2	潜降→着底→右回り→浮上	
5	st2		
6	st3		
7	st1	潜降→着底→右回り→浮上	

No5		No.7	
方位(°)	深度(m)	方位(°)	深度(m)
	11.2	78	15.1
	11.4	120	12.6
57	11.6		
78	15.1		
250	11.6		

図 4 測距 (深度) ・方位結果

7. 水中洞窟突破後の非水中洞窟探査

平成 22 年度「岩戸プロジェクト」でロボット探査した「岩戸洞」洞外湧泉水中洞窟は、洞窟地形単位の飽和帯単ループ(a phreatic loop)の典型であり、「地下水面から下降して再び地下水面に向かって上昇する U 字状あるいは V 字状の洞窟通路」という形状をしている。1990 年代の潜水調査によって、湧泉水面から水中洞窟を抜けると、第二水面（向こう側の水面）の上には広いホール状の空間（非水中洞窟）が続いていることが確認されている（[7]）。このように、複数の非水中洞窟が水中洞窟で連結して一続きの洞窟系（ケイブシステム）を形成している例は、山口県秋吉台「秋芳洞-葛ヶ穴」など少なくない。また、平成 20 年度「牡鹿プロジェクト」のロボット探査で発見した「牡鹿洞」水中洞窟の奥には、第二水面らしき新水面も確認されている。

水中洞窟を越えた先の空間奥部は、未知の非水中洞窟につながっている可能性が大きく、重要な調査価値を持つ未踏領域である。しかしながら、水中ロボットが探査できるのは、水中か水面上の周辺に



図 5

- 上 水中洞窟の水中ロボット探査
- 中 第二水面上の水中ロボット探査と未知空間奥部
- 下 未知空間奥部（非水中洞窟）の非水中ロボット探査

限定される(図 5 上中)。水中洞窟系のロボット探査を行うには、水中洞窟だけでなく、非水中洞窟も探査の対象に含める必要がある(図 5 下)。

本研究グループは、小型の水中ロボットをベースに水中洞窟ロボット探査システムの開発・検証を続けているが、非水中洞窟用の移動体として非水中ロボット（ローバー型・クローラー型管路調査ロボット）の開発にも携わってきた。また、非水中ロボットの移動センシング技術として、レーザー測域センサー(LRF Laser Range Finder)による 3 次元環境地図作成の研究も行っている。

7.1 管路調査ロボット

空間奥部の探査には、凹凸・屈曲・分岐・狭窄・高低差等の不整地を移動可能で、滴下水・高湿度等の条件下で作動し、自然光のない閉鎖空間環境を探索できる頑健な非水中ロボットが必要になる。本研究グループは処分場等の埋設管路調査用に、小型ローバー型ロボット“山猫 1”と“山猫 2”、小型クローラー型ロボット“管猫”を開発してきた。管路と非水中洞窟は共通点が多いため、管路ロボットは非水中洞窟探査ロボットの開発ベースとなり得る。



写真 11

- 上左 山猫 2 (前面) 上右 山猫 2 (後面)
- 中 管猫
- 下 管猫の可変傾斜型クローラー機構

7.2 青龍窟の先行予備調査と LRF 計測予備実験

水中洞窟の形態計測と同様に、本研究グループは、レーザー測域センサー(LRF Laser Range Finder)を搭載した非水中ロボットが非水中洞窟の中を移動して境界曲面を計測するシステムの開発と検証を目指している。「洞窟」の断面閉曲線の LRF による計測を第一段階として着手した。

非水中洞窟ロボット探査の実証実験用フィールドとして、福岡県平尾台「青龍窟」の洞口ホールを選定した。洞口ホールは東洞口から西洞口に抜ける断面径の大きい貫通洞であり、大部分は横穴になっていて、ロボット移動実験・計測実験等の作業が実施しやすさを見込むことができるからである。

平成 23 年度には洞口ホールの現況確認を目的に、先行予備調査とレーザー測域センサー(LRF Laser Range Finder)の計測予備実験を行った。

計測システムのセンサーは北陽電機 UTM-30LX (レーザー安全規格クラス I) を使用した。作業ヘルメットにセンサーを固定して、ヘルメットを被った作業員(人間)を移動プラットフォームとし、計測データのロギングにはパッド式の端末を使用した。洞口ホールの断面径よりもセンサーの有効出力距離が小さかったことから、片側半分ずつ計測するために、作業員に右側洞壁近くを移動させた。ルートは、東洞口から入洞して西洞口から出洞した後、西洞口から再入洞して東洞口から出洞する往復路とした。

先行予備調査では、西洞口奥の斜洞部落石帯以外は、“山猫 2” や“管猫”の走破性能でも充分に対応可能であることが確認できた。また、計測予備実験では、自然光の入らない中央部の方が洞口付近よりもレーザーの反射を感知しやすいことが判明した。



写真 12

左 LRF 計測システム

右上 東洞口 右中 東洞口奥

右下 計測開始(西洞口へ)



写真 13

左上 洞ホール中央から西洞口へ

左下 西洞口

右上 洞ホール中央

右下 洞ホール中央から東洞口へ

今後は、LRF 計測データをもとに 3 次元モデル生成手法の研究も並行させる。そのために精度検証・比較対照用として、平成 24 年度に写真計測測量ソフトウェア「PhotoModeler Scanner」を導入した。

8. 今後の展開

水中洞窟探査と非水中洞窟探査において、ソナーや LRF によって計測した断面閉曲線相互の配置を決定するために、慣性計測装置 (IMU Inertial Measurement Unit) による姿勢方位計測・デッドレコニング軌跡取得システムの研究を予定している。また、「洞窟」の点群・ポリゴン・サーフェスモデルによる 3 次元表現の研究を行う。リアルタイム CG 生成を目指し、3D マッピングとロボットのナビゲーションの同時運用法も研究する。

8. 結言

未知・未踏の閉鎖水面環境・閉鎖空間環境である水中洞窟・非水中洞窟に対して、「進入→計測→帰還」という完全回収型の探査を成功させるには、ロボティクス技術をさらに発展させることが不可欠である。海・川・湖沼の探査ミッションが前提にある現在の水中ロボット技では、水中洞窟内で回収不能に陥るリスクを低減できない。また、現在の非水中ロボット (陸上移動ロボット) では、不整地の度合いが比較的小さい「青龍窟」洞口ホールの斜洞部落石帯の昇降移動でさえ困難と考える。本研究グループは、閉鎖水面環境・閉鎖空間環境を探査するため、移動体プラットフォームとしてのロボティクスを基盤とした「洞窟」の形態計測の研究を進めていく。

謝辞

本研究はキヤノン財団「理想の追求」研究助成寄附金『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』、ならびに本校寄附金『閉鎖空間、閉鎖水面環境に関する研究』の経費で取り組みました。また、九州大学応用力学研究所共同利用・共同研究の一部として行いました。キヤノン財団、九州大学応用力学研究所中村昌彦准教授および稲田勝職員に感謝致します。更に、水中洞窟用ソナー製作にご協力頂いたフュージョン社笹倉豊喜氏他の方々に厚く御礼致します。

参考文献

- 1) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 宮本憲,
水中洞窟探査ロボットの实証実験と予備調査,
佐世保工業高等専門学校研究報告
第 46 号 pp.43-48, 2009 年
- 2) 眞部広紀, 浦田健作, 長嶋豊,
山口卓哉, 山口拓朗, 木村昌生, 滝川大介
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,
佐世保工業高等専門学校研究報告
第 47 号 pp.39-44, 2010 年
- 3) 眞部広紀, 浦田健作, 長嶋豊, 染谷孝,
須田純一郎, 山口卓哉, 山口拓朗,
浅田優紀, 川田駿也
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 年
- 4) 山口拓朗, 長嶋豊, 下尾浩正,
浅海域用小型水中ロボットの開発,
日本機械学会九州学生会
第 43 回卒業研究発表講演会 (No.128-2) 論文集
pp361-362, 2012 年
- 5) M. Stipanov, V. Bakari, Z. Eskinja,
ROV use for cave mapping and modeling,
Second IFAC Workshop
Navigation, Guidance and Control of
Underwater Vehicle(2008), Volume#2 | Part#1
- 6) 三宅飛翔, 下尾浩正, 川崎仁晴,
長嶋豊, 眞部広紀
コンパクトで柔軟性の高い水中ロボットの開発,
平成 24 年度電気関係学会九州支部
(第 65 回連合大会)講演論文 p524, 2012 年
- 7) Cave Diving Group,
Iwato Do Cave,
CDG Newsletter, Issue 111, pp.43-44, April 1994