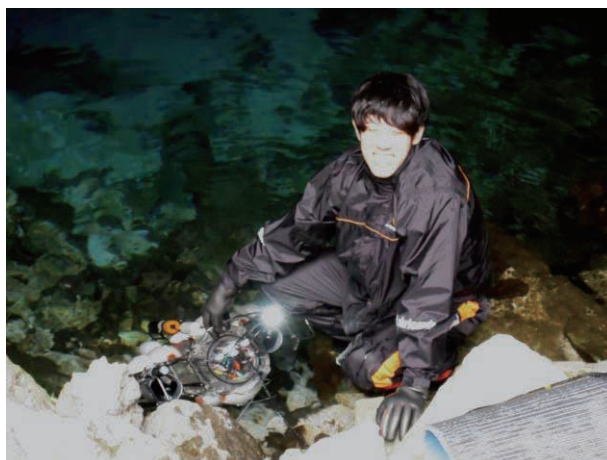


岩戸洞水中洞窟におけるロボット探査と 球磨カルストの水文地質予備調査*

眞部広紀**1、長嶋豊**2、浦田健作**3、染谷孝**4、
須田淳一郎**5、山口卓哉**6、山口拓朗**7、
浅田優紀**8、川田駿也**9

ROV Exploration of Iwato Do Underwater Cave
and Hydrogeological Preliminary Survey on Kuma Karst
Hiroki MANABE, Yutaka NAGASHIMA, Kensaku URATA, Takashi SOMEYA,
Junichirou SUDA, Takuya YAMAGUCHI, Takurou YAMAGUCHI,
Yuuki ASADA, Shunya KAWATA



* 原稿受付 平成 23 年 11 月 11 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 一般科目化学科

**6 九州工業大学 大学院

**7 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

専攻科 2 年

**8 野里電気株式会社

**9 株式会社アトックス

写真 1

左上：岩戸洞 洞外湧泉

左下：閉鎖水面環境対応水中ロボット“新釜猫 Mark II”

右上：潜航準備

右下：コントロールユニット

1. 緒言

地底空間である洞窟は、進入困難な暗黒の極限環境であり、地質学・地下水学・古気候学・古生物学・古人類学・考古学・生物学などの関連学術分野にと

って特別な価値をもつ。地球上に残された地理学的な極地(フロンティア)でもあり、洞窟内部の測量と図面作成・公開が、地理学上の発見・登録の条件となっている。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、無数の洞窟地下水系が広がっている。しかしながら、水中洞窟(地下水に満たされた洞窟)は、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(オーバーヘッド環境)の潜水調査は高いリスクが伴うため、ダイバーの代替手法として水中ロボットが切望されてきた。

本研究グループは、平成 20・21 年度に校長裁量経費(融合研究)の補助によって、閉鎖水面環境(オーバーヘッド環境)に対応する ROV(Remotely Operated Vehicle 有索式遠隔操縦型ロボット)の開発を継続し、水中洞窟探査の実証実験によって実績を重ねてきた。福岡県平尾台「牡鹿洞」地下川下流水没部や熊本県五木村「白滝の穴」湧泉基底部に於いて、新しい水中洞窟をロボット探査によって発見・撮影することができた ([1][2])。平成 21 年度には熊本県球磨村「岩戸洞」において、ロボット探査の準備のために洞外湧泉の予備調査を実施した。また、本洞(神瀬石灰洞窟)の地底湖の現況、とくに湖底に開口する水中洞窟の位置確認・撮影を行った ([3])。

「岩戸洞」や同村「球泉洞」の集水域と考えられている球磨山地の石灰岩体は、球磨村と山江村にまたがっている。「岩戸洞」水中洞窟の未知部分を含む地下水系は大規模であることが推定されるが、今まで実証されてこなかった。そこで、平成 22 年度は校長裁量経費(融合研究)『水中洞窟で接続するケイブシステムのロボット測量探査と水文環境の地球化学分析』の補助をもとに、球磨村教育委員会と同村岩戸地区のご厚意により調査許可を得て、2つのプロジェクトを進めた：

《ロボット探査》

「岩戸洞」洞外湧泉奥の水中洞窟現況調査・撮影と、交差ラインレーザーによる洞窟形状計測の予備実験。

《水文地質予備調査》

球磨山地の石灰岩体境界精査、地表河川・洞窟にある吸込点・湧出点の位置特定、色素追跡のための予備調査・流量計測演習。(平成 23 年度も継続調査)

本稿ではこれらのプロジェクトの概要を報告し、今後の展望と方向性を検討する。

2. 水中洞窟のロボット探査

陸上など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 etc、別種の対応・仕様が要求される。現在の水中ロボットは、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。ROVの位置計測・状態監視管理は、ケーブルの基点である支援船上のコントロールユニットによって行われる。緊急時には、ケーブルを使ってロボットを牽引して水面まで強制的に浮上させ、揚収することが可能である。

横穴・斜洞の水中洞窟探査では、固体の天井部によって塞がれて開放水面がほとんどないために状況が異なる。ROV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)から水平方向に遠く離れなければならない、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ROV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ROVが拘束されることもある([4])。したがって、ケーブル牽引は緊急回収の有効手段にはならない。

水中洞窟でROVが逆方向に回頭した場合、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がある。後進して帰還すれば、回頭する必要がないため、ケーブル拘束のリスクを低減できる。本研究グループでは閉鎖水面環境への対応として、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。

2. 1 牡鹿洞地下川下流水没部

浅海域用マルチカメラロボット“釜猫”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、内部構造の撮影に成功した([1])。

2. 2 白滝の穴最奥湧泉

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ステムの予備実験も実施した([2])。

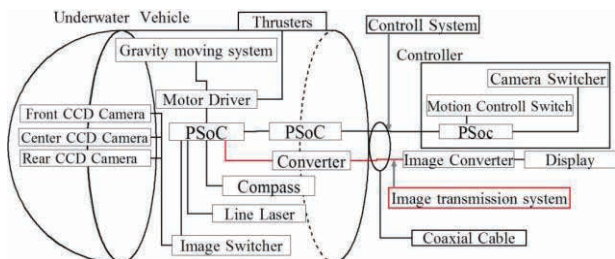


図 1(上) 新釜猫 Mark II システム構成

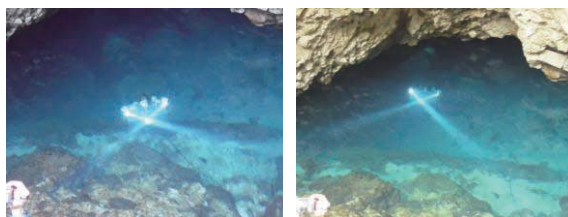
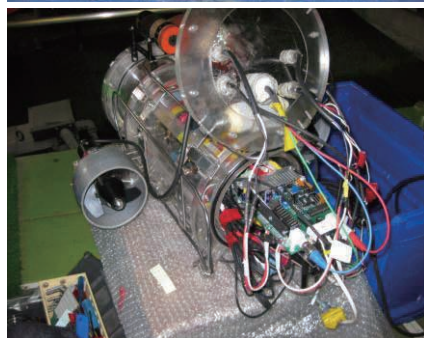
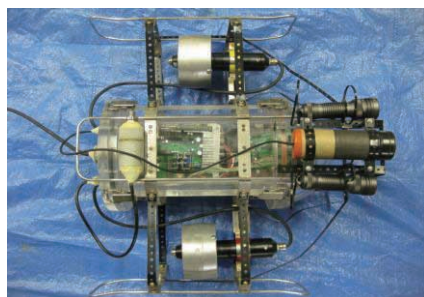


写真 2(上) Mark II 外観

写真 3(右上) 「岩戸洞」洞外湧泉前進基地の設営

写真 4(右中) スラスタ機能点検

写真 5(右下) Mark II 潜航開始

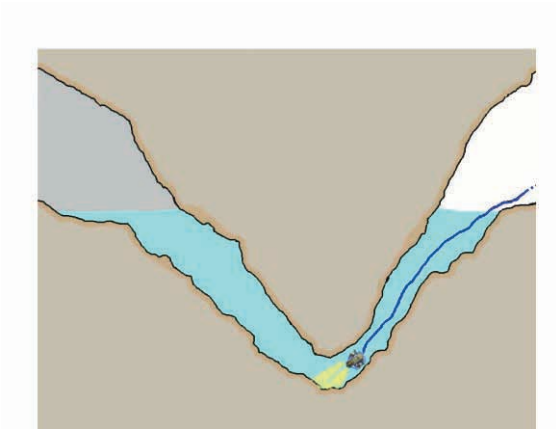


図2 「岩戸洞」洞外湧泉模式図(飽和帯単ループ)



写真6(上) モニターを見守る参加者たち

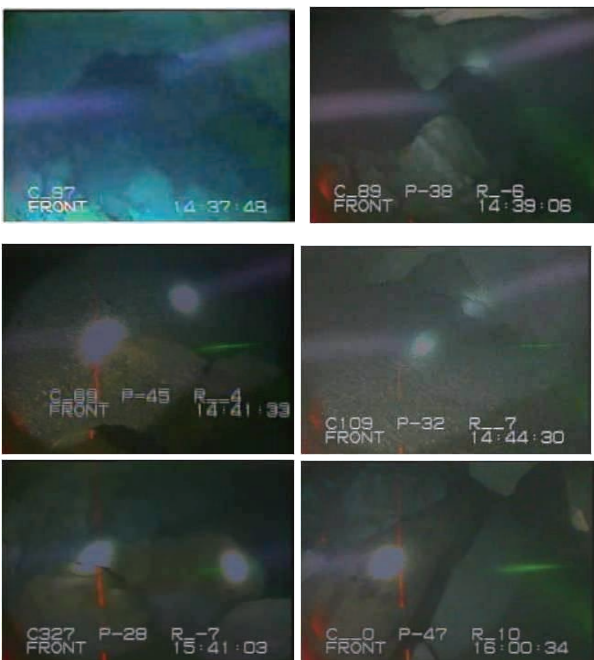


写真7(下) Mark II のカメラ撮影画像(モニター画面)

2.3 岩戸洞洞外湧泉

平成 22 年度は“新釜猫”に交差ラインレーザーや改良型サーベイシステムのテストベッド機として“新釜猫 Mark II”を製作した。2010 年 12 月に本校実験無響水槽のシミュレーションモジュールで操縦訓練と予備実験を開始し、2011 年 2 月 6 日に熊本県球磨村「岩戸洞」洞外湧泉において、水中洞窟最深部までの撮影記録実証実験を行った。参加者は、長嶋・浦田・眞部を含めて以下の通り：

[長嶋研究室]

山口卓哉 (電気電子工学科専攻科 2 年 当時)

山口拓朗 (電気電子工学科専攻科 1 年 当時)

浅田優紀・川田駿也・園田康二・山中康弘

(電気電子工学科 5 年 当時)

[サイエンス部(顧問 須田)]

菅原翔公・坂本康平(物質工学科 3 年 当時)・

島崎晋輔(電気電子工学 3 年 当時)

[カマネコ探検隊]

田中孝宣氏・樋高昭子氏・白土昌子氏・寺嶋雅弘氏

実験には球磨村教育委員会の宮本宣彦氏と岩戸地区の方々も見学に来られた。

ミッションの主目的はサーベイシステムの計測実験にあるため、計測結果と比較検討できるように形状の概容が判明している水中洞窟で探査を行う必要があった。今回の選定した「岩戸洞」洞外湧泉は、洞窟地形単位の飽和帯単ループ(a phreatic loop)であり、「地下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」という典型例な形状をしている(図 2)。

ロボットの移動行程は、ワンアタックではなく、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成功している([2])。ミッション完了条件は、単ループの底部到達とした。

ロボット撮影映像の画像処理による洞窟形状計測システム開発を予備実験として、ラインレーザー 2 基(赤色・緑色)の水中投射実験を行った。水中では

緑色光の方が赤色光よりも減衰が少ないとされるが、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。

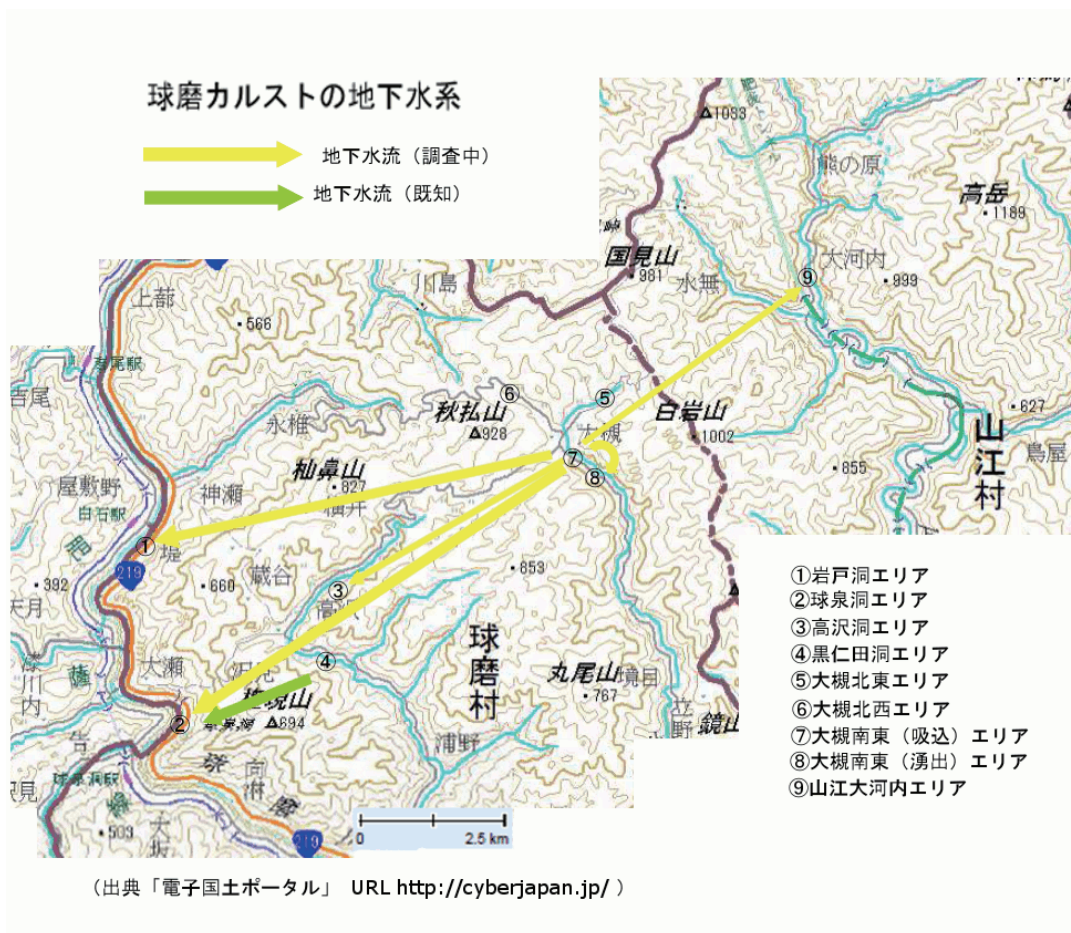
実験中は、撮影画像や電子コンパスの計測値が安定しなかったため、今回のサーベイシステムの予備実験から有意な計測成果は得られなかったが、後日、水中スラスターの磁界の影響を除去し、回路間の干渉を解消することができた。

過去に探査した「牡鹿洞水中洞窟」や「白滝の穴水中洞窟」と違って、「岩戸洞」洞外湧泉の洞窟の断面径が大きい。洞内観察のために大きく迂回するルートを通ると、回頭するのと同じ結果に陥る。想定外の物体(交差した半割材木2本)によって、ケーブルが挟まりロボットが拘束されてしまった。緊急避難的措置を講じて、ロボットを回収し実験を終了することができたが、このような状況への対処法は今後の研究課題となり得る。Mark II の改良機 Mark III

や、新造中の3号機に盛り込む予定である。

3. 球磨カルストの水文地質予備調査

球磨川に面する「岩戸洞」や「球泉洞」「大瀬洞」は球磨山地の地下水系の排水点と考えられる。1980年代頃からのこの地域の洞窟調査を続けていた浦田は、球磨山地の石灰岩体をカルスト水文系としての研究する必要性を訴えていた([5])。1990年代前半、イギリスの潜水調査隊によって、洞外湧泉奥の空間部奥にある第2水没部と本洞地底湖の連結が報告された([6])。本研究グループでは、洞外湧泉と本洞地底湖の現況確認のため平成21年度に予備調査を実施した。平成22年度の8月に球磨山地の下見を実施し、23年1月・2月の予備調査で、浦田は石灰岩体の境界を追跡精査し、①岩戸洞、②球泉洞、③高沢洞、④黒仁田洞、⑤大槻北東、⑥大槻北西、⑦大槻南東(吸込)、⑧大槻南東(湧出)、⑨山江大河内の9調査エリアを設定した。水温や pH・電気伝導度などの



水質計測、流速計測を定期的を実施するほか、吸込点にフルオレセインNaなどの色素を投入し、湧出点に仕掛けた活性炭で捉える色素追跡調査のポイントとして使用する。たとえば、⑦に投入した色素が①の活性炭に捕捉された場合、大槻地区「小川」下流に吸い込まれた水が、地下水流として7km以上移動して「岩戸洞」に到達していると推定できる(図3)。その流路に石灰岩体が含まれていれば、「岩戸洞」から7km以上続く未知の大洞窟系が存在する可能性がある。

平成23年度の8月から約1カ月間隔でバックグラウンド用活性炭の設置・回収を行い、設置ポイントを調整し、仕掛けの頑健さを向上させた。11月初旬に⑦エリアに色素を投入し、追跡調査を開始した。本節では、水文地質予備調査に使用する各エリアの現況を紹介する。

3. 1 岩戸洞エリア

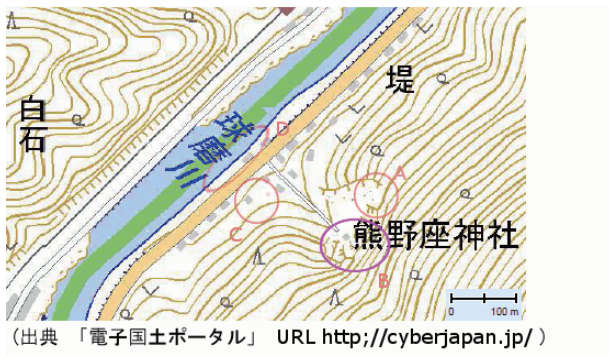


図3 ①岩戸洞エリアの調査ポイント

- A: 「岩戸洞」洞外湧泉(前節参照)
- B: 「岩戸洞」本洞地底湖
- C: 「長命水」
- D: 「球磨川湧泉群」

前述のように、AとBの地下水系は接続しているので、活性炭の仕掛けはAに設置している。

平成22年度予備調査の流入量・流出量の測定から、浦田はA+B+Cの流出量の不足分をもとに、球磨川に直接湧出する第4のポイントの存在を予想した。ロボット探査の2月6日は、降水量の少なさとダム放水によって、球磨川の水位が著しく低下していたため、ポイントD「球磨川湧水群」を発見するこ

とができた。活性炭はDにも設置している。



写真8 B 「岩戸洞」本洞(神瀬石灰洞窟)洞口



写真9 B 「岩戸洞」本洞地底湖



写真10 B 「岩戸洞」本洞地底湖最奥の水路



写真 11 C 「長命水」



写真 12 D 「球磨川湧泉群」

3. 2 球泉洞エリア



(出典 「電子国土ポータル」 URL <http://cyberjapan.jp/>)

図4 ②球泉洞エリアの調査ポイント

A : 「球泉洞」 B : 「大瀬洞」

A「球泉洞」の地下水は、近隣のB「大瀬洞」から球磨川に排出されているため、活性炭はBに設置している。④「黒仁田洞」に吸い込まれた中園川の水は、②「球泉洞」「大瀬洞」に流出することが知られている。球磨山地で現在判明している地下水流は、④→②のみである(図2)。



写真 13 B 「大瀬洞」 (洞口)

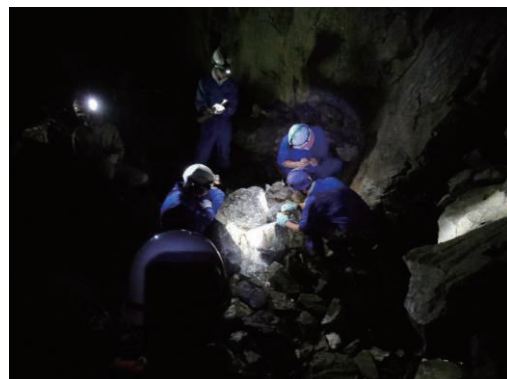


写真 14 B 「大瀬洞」 (洞内 活性炭設置)

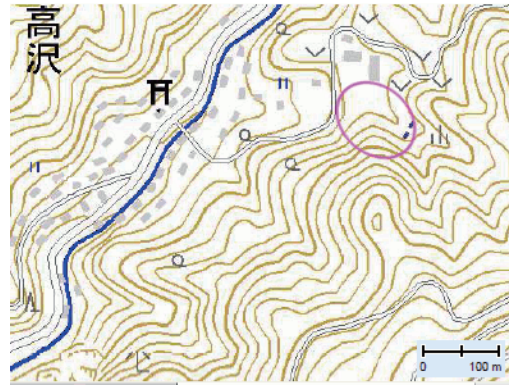


写真 15 B 「大瀬洞」 (洞内 活性炭設置)



写真 16 B 「大瀬洞」の滝

3. 3 高沢洞エリア



(出典 「電子国土ポータル」 URL <http://cyberjapan.jp/>)

図 5 ③高沢洞エリアの調査ポイント

「高沢洞」では2本の地下川が合流しているため、2つ活性炭を仕掛けている。また、「高沢洞」では球磨山地カルストで初めてムーンミルクが発見された。成因が不明な未固結の柔らかい鍾乳石で、浦田が洞内の分布を調査し、染谷がサンプル採集を行い、現在分析中である([7])。



写真 17 「高沢洞」(洞口) (撮影 染谷孝)



写真18 「高沢洞」地下川合流点(撮影 染谷孝)



写真19 「高沢洞」ムーンミルク(撮影 染谷孝)

3. 4 黒仁田洞エリア

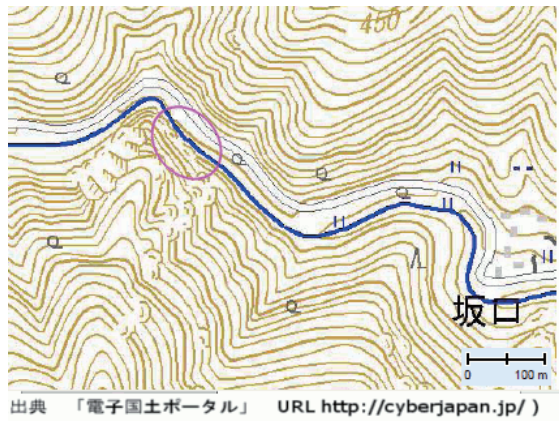


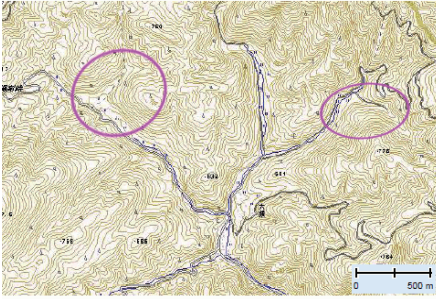
図6 ④黒仁田洞エリアの調査ポイント

「黒仁田洞」は中園川に面する石灰岩の崖の基部に開口する。大量に流入している中園川の水は、②「球泉洞」「大瀬洞」に流出することが知られている。



写真20 「黒仁田洞」(撮影 染谷孝)

3. 5 大槻北東・北西エリア



(出典 「電子国土ポータル」 URL <http://cyberjapan.jp/>)

図7 ⑤大槻北東エリア ⑥大槻北西エリア

石灰岩体が地表河川と交差する場所に生じた吸込ポイント。

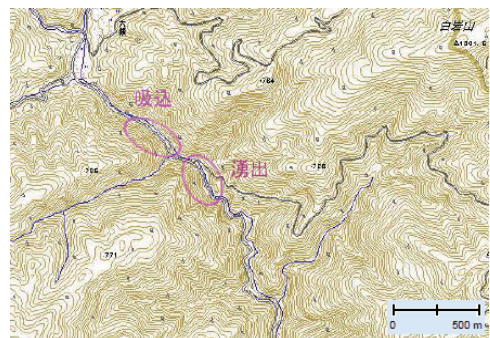


写真 21 大槻北東エリア



写真 22 大槻北西エリア

3. 6 大槻南東(吸込、湧出)エリア



(出典 「電子国土ポータル」 URL <http://cyberjapan.jp/>)

図8 大槻南東(⑦吸込、⑧湧出)エリアの調査ポイント

白岩山から続く石灰岩体と地表河川「小川」との交差箇所に生じた「吸い込み」と「湧き出し」のポイント。

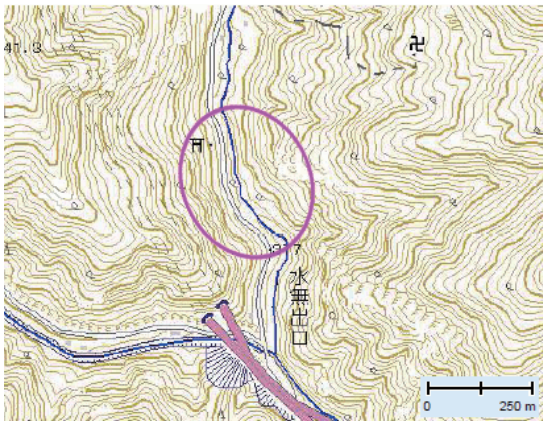


写真 23 「大槻東南(吸込)エリア」(撮影 染谷孝)



写真 24 「大槻東南(湧出)エリア」(撮影 染谷孝)

3. 7 山江大河内エリア



(出典 「電子国土ポータル」 URL <http://cyberjapan.jp/>)

図9 山江大河内エリアの調査ポイント

地表河川の「万江川」が石灰岩体と交差して生じた「湧き出し」ポイント。



写真25 「万江川湧泉群1」



写真26 「万江川湧泉群2」 (撮影 染谷孝)



写真27 活性炭の設置(撮影 染谷 孝)



写真28 活性炭の仕掛け (上)、タグ (下)
(撮影 染谷孝)



写真 29 「白嶽東洞」 (洞口の川奥 活性炭設置)



写真 30 「白嶽東洞」 (最奥水没部 活性炭設置)

4. 結言

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、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。浦田の研究調査によって、日本の国土面積の 70%以上を占める山地における広範囲な「カルスト」分布が明らかになった〔8〕。山地カルスト地域を水源にもつ地方自治体では、表土が地下水系を経由して流出し、水質悪化の一因となるため、継続的な水源のきめ細かい水質監視・流入出量管理が急務である。

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。

本研究グループは、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てきた。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。

謝辞

平成 23 年 8 月の球磨山地予備調査補助員である

サイエンス部の坂本康平(物質工学科 4 年)・木村祐樹(電子制御工学科 5 年)・青山祥平(電気電子工学科 4 年)・平野廣大(電気電子工学科 2 年)・山口奨(電子制御工学科 2 年)・永井宏に、深く謝意を表す。

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, 須田淳一郎,
球磨山地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 47 号 pp.45-50, 2010 年
- 4) 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 | Par#t1
- 5) 浦田健作,
石灰岩帯の再検討 九州地区,
日本洞窟学会 ケイビングジャーナル 5 号,
pp.18, 1997 年
- 6) Cave Diving Group,
Iwato Do Cave,
CDG Newsletter, Issue 111, pp.43-44, April 1994
- 7) 染谷孝, 浦田健作, 眞部広紀,
球磨カルスト、高沢鍾乳洞からのムーンミルクの
産出とその意義,
(準備中), 2011 年
- 8) 浦田健作
日本のカルスト研究における
美濃帯カルストの重要性(予報),
日本洞窟学会第 37 回大会(福岡大会),
講演要旨集 13pp. 2011 年