

山地カルストの洞窟水文系における ROV と UAV を使用した調査法の検討*

眞部広紀**1, 稲川直裕**2, 山田努**3, 堀江潔**1, 岡本涉**4,
松見豊**4, 長嶋豊**5, 浦田健作**6, 染谷孝**7

Study on Survey Methods for Cave Hydrology System in Mountainous Karst using ROV and UAV*

Hiroki MANABE**1, Naohiro INAGAWA**2, Tsutomu YAMADA**3, Kiyoshi HORIE**1, Wataru OKAMOTO**4,
Yutaka MATSUMI**4, Yutaka NAGASHIMA**5, Kensaku URATA**6, Takashi SOMEYA**7,

Key words: Mountainous Karst, Hydrology System, Cave, Underwater Cave, ROV, UAV

Abstracts

In this paper, we discuss survey methods for hydrology system with underwater caves in mountainous karst using ROV (Remotely Operated Vehicle) and UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

1. はじめに

石灰岩の分布地域では河川が地下に争奪されて地表水系と洞窟地下水系が繋がり、カルスト水文系が形成される。熊本県球磨村には国内最大級の洞口をもつ「岩戸洞(本洞)」(神瀬石灰洞窟)があり、奥の挿り鉢状の縦穴底に地底湖がある。英国のケイブダイバーチームがこの湖底を潜水調査して、大規模な水中洞窟がさらに奥に続いていることを確認している¹⁾。

地表の傾斜で分けられている集水域の間にまたがる石灰岩体には、地下水を隣の集水域に流す機能がある。球磨村から杣鼻山・秋払山を越えて隣の山江村まで、石灰岩体が連続している。「岩戸洞」(本洞)の地下水は、杣鼻山・秋払山の地下を通じて、山江村の集水域に由来する、という仮説が立てられていたが、近年まで検証されてこなかった。

本研究グループは、これら二つの課題に挑戦するため、本校の「校長裁量経費(融合研究)」採択課題『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』(平成 21 年度)と『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』(平成 22 年度)の補助によって、

- ① 水中洞窟ロボット探査
- ② 地下水色素追跡調査(球磨村と山江村)

を実施した。①では費用面を考慮して地底湖深部の未知の水中洞窟探査は懸案とし、既知の水中洞窟である「岩戸洞」(洞外湧泉)のロボットに搭載したソナーシステムによる形状計測実験を行った²⁾。②では上記の仮説を裏付けるデータを獲得した²⁾。研究の基盤となる既存の詳細な地形・地質図は刊行されていないため、色素追跡調査と併行して地形・地質調査を行った。しかしながら、山地では繁茂した森林、高低差(斜面、崖等)が人間の接近・移動を阻み費用対効果を悪化させ、調査範囲は全域に及ばなかった。

本研究グループは、水中洞窟探査のノウハウを幅広く蓄積するため、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)、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査とマッピング』(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査する水中・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、沿岸域カルストのアンキアライン水文環境における水中洞窟探査を実施してきた^{3),4)}。

* 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 日本文理大学 工学部

**3 東北大学大学院 理学研究科

**4 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

**5 佐世保工業高等専門学校 地域共同テクノセンター

**6 大阪経済法科大学 地域総合研究所

**7 佐賀大学 農学部

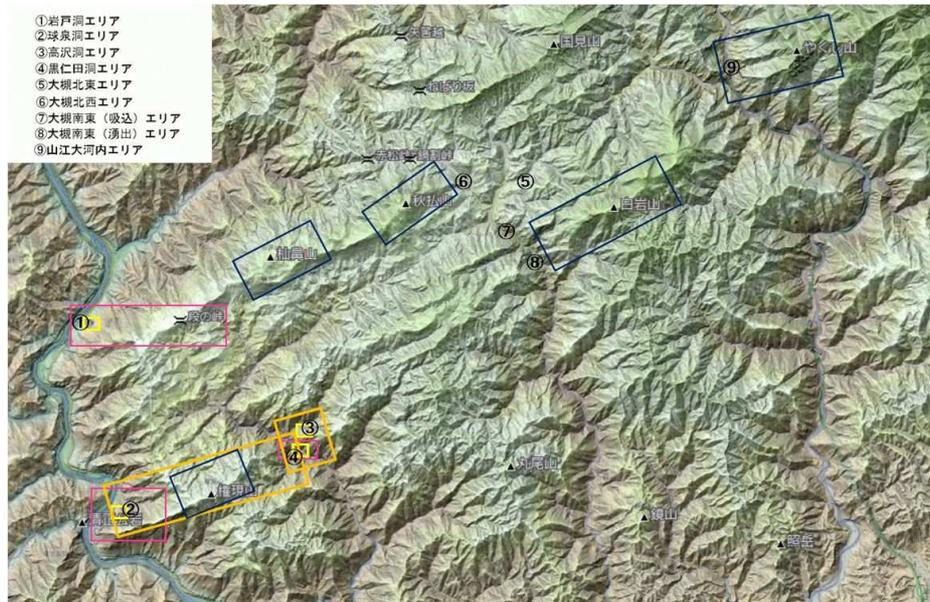


図1 球磨山地と「岩戸洞」(①黄色枠線内) カシ米尔 3D・地理院地図で作成、加筆

近年、急速に普及した小型軽量なドローン (UAV) によって、接近困難な地形の撮影・調査が費用対効果良く実施できるようになってきた。ドローンによる SfM/MVS 写真測量を行えば、球磨山地カルストの詳細な地形を機動的かつ効率的に 3次元モデル化することができる。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「洞窟計測探査シミュレーションプログラム」を立ち上げた。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、現在、ドローンを含めたノウハウを幅広く蓄積するため、様々なプロジェクトを進めている^{5)~8)}。

本稿では、これまでに本研究グループが計画・実施した予備調査、ROV 探査実験、UAV 空中撮影・写真測量等の事例に基づいて、「岩戸洞 (本洞)」の地底湖水中洞窟探査と球磨山地カルストの地形測量について、調査方法の検討を行う。

2. 球磨山地と岩戸洞

球磨山地は熊本県の八代平野と人吉盆地の間に位置し、球磨川水系の山間狭窄部である。球磨川上流域の山江村 (万江川) と中流域の球磨村 (球磨川本流、中園川、小川) は隣接する集水域であり、石灰岩の小岩体群の帯状領域が球磨村と山江村にまたがっている。(本稿では「球磨山地カルスト」と呼称する (図 1。))

2.1 球磨山地カルスト

球磨川に面する「岩戸洞」「球泉洞」「大瀬洞」は球磨山地カルストの水文系の排水口と考えられている。当初、地底湖と洞外湧泉の地下水系の範囲を「段の峠石灰岩」、「杣鼻山・秋払山」と徐々に拡大して「球磨山地」全体の水文系を対象とするに至った。色素追跡調査 (図 2) では、「岩戸洞」(図 3)、「球泉洞」、「大瀬洞」が球磨山地カルストの排水口であることを支持するデータが得られた²⁾。



図2 地下水追跡調査(活性炭設置/交換) 上「球磨川湧泉群」(①岩戸洞エリア) 下「大瀬洞」(②球泉洞エリア)

2.2 地底湖と洞外湧泉

1990年代の前半に、イギリスの Cave Diving Group による潜水調査隊は、「岩戸洞」洞外湧泉奥(図6、第1 サンプ)の洞窟潜水調査を行った。その調査報告書りによれば、サンプ底の狭窄部を抜け浮上すると空間があり、さらに奥は再び水没して第2 サンプ(水中洞窟)となり(図8)、本洞地底湖(図3, 4, 5, 7)と連結している。

前節の「球磨山地カルスト」調査(第一期)は、水文地質学の観点から地底湖水中洞窟の規模や範囲を見積もることを目的の一つに設定していた²⁾。この水中洞窟を含む洞窟系が「球磨山地カルスト」と同規模であれば、その総延長は少なくとも数 km と推定される。本研究グループは「岩戸洞地底湖」深奥部にある水中洞窟の探検調査価値に注目し、第二期調査(水中探査・地形調査)に向けて準備を進めることにした。

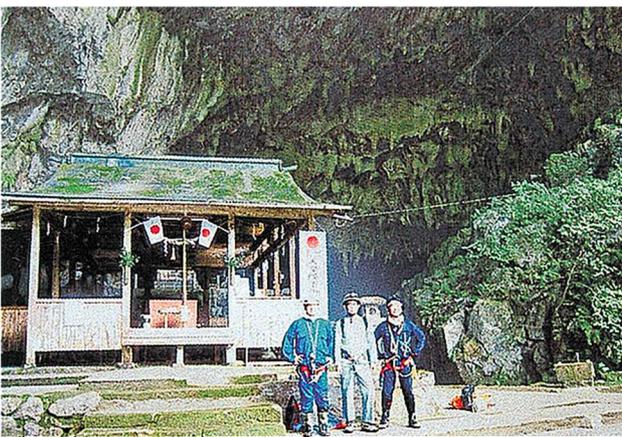
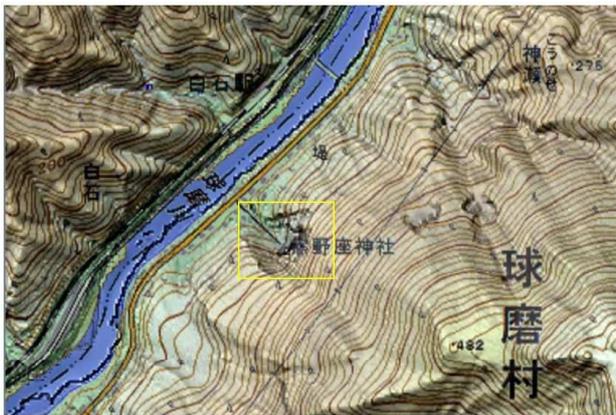


図3 上「岩戸洞」位置(黄色枠線内)
カシミール3D・地理院地図で作成、加筆
下 洞口(熊野座神社前)

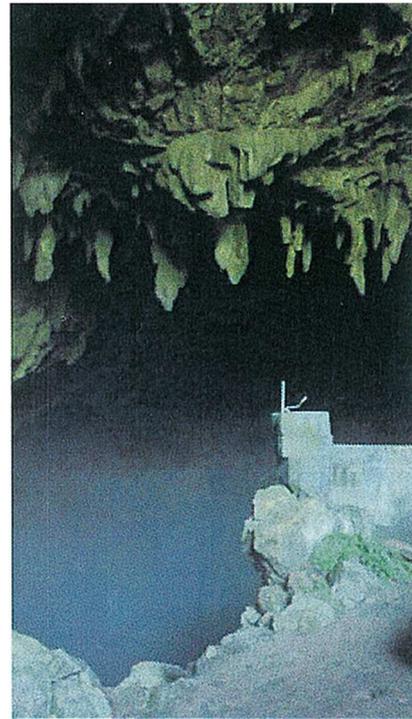


図4 「岩戸洞(本洞)」
上 洞口奥(播り鉢穴の手前)
中 播り鉢穴の底へ降下開始
下 播り鉢穴底の地底湖(ゴムボート調査)

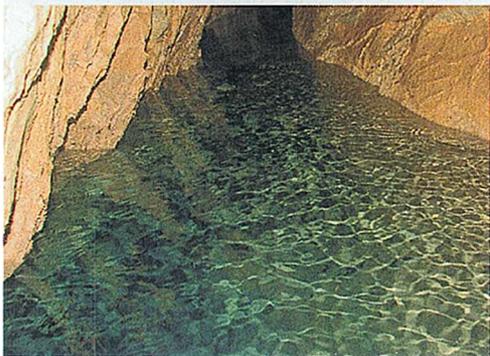
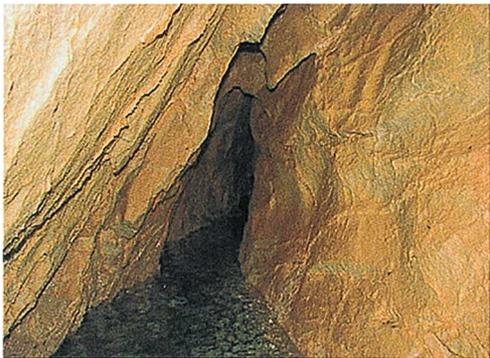
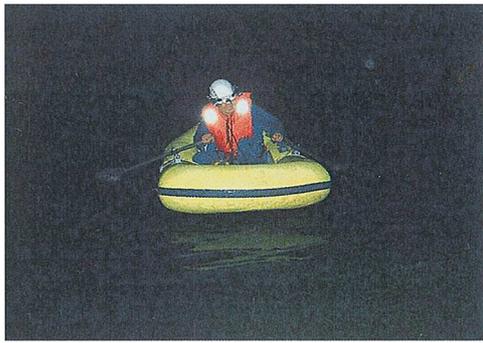


図5 「岩戸洞(本洞)」
上 地底湖水面 中・下 地底湖水没部



図6 「岩戸洞」(洞外湧泉) シュノーケリング調査



図7 「岩戸洞(本洞)」地底湖の縦断面模式図

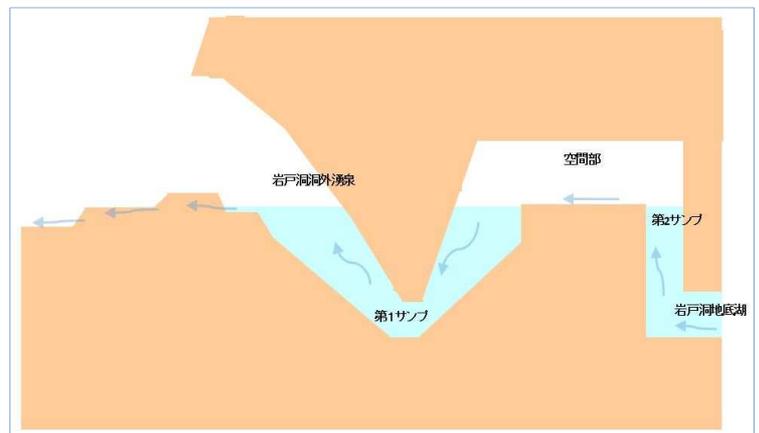


図8 「岩戸洞」(洞外湧泉)の縦断面模式図

3. 類似環境における ROV の調査・実験の例

「球磨山地カルスト」調査プロジェクト²⁾(第一期)では、地底湖の開放水面が人間に較べて格段に大きいこと、斜洞が水没して水面下に続いていることを確認している(図4下、図5)。短距離の範囲(水中洞窟が斜洞から横穴に切り替わる手前まで)であれば、地底湖の ROV 探査は実施可能であり、第二期調査プロジェクトの成果を見込むことができる。

本節では、本研究グループによる有索式小型 ROV を使用した水中調査実験の事例を紹介する(発見した新しい水中洞窟三箇所を含む)。

3.1 芹川ダム湖

本研究グループの稲川研究室(日本文理大学工学部)では、大分県竹田市の芹川ダムにおいて、「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⁹⁾。この ROV は水深 100m まで探査できる性能をもつ。



図9 水中観測 ROV システム



図10 芹川ダム調査実験
上 水面 中・下 水中

3.2 「稲積水中鍾乳洞」

同じ ROV システムを使用して、大分県豊後大野市の「稲積水中鍾乳洞」の水中観測調査を目的とした、ROV の実証動作試験を実施している。

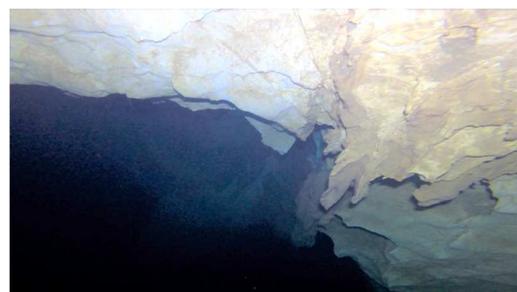


図11 「稲積水中鍾乳洞」調査実験
上 ROV 投入 中 モニター 下 モニター画面

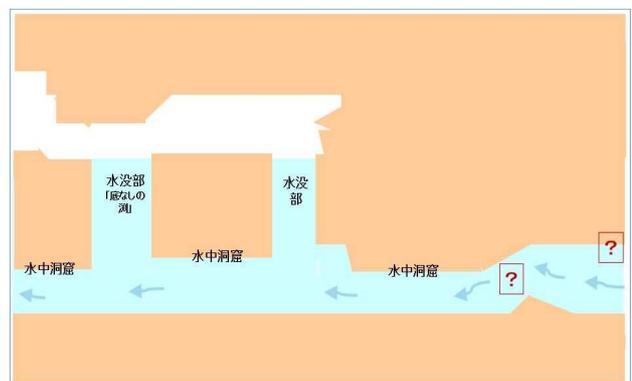


図12 「稲積水中鍾乳洞」の縦断面模式図

3.3 「牡鹿洞」

福岡県北九州市平尾台の「牡鹿洞」は縦穴洞口(図13)をもつ縦穴横穴複合洞窟であり、最深部の地下川は水没部に流入している。本研究グループの長嶋研究室(佐世保工業高等専門学校)では、この水没部手前に基地局(前進基地)を設置し(図14)、製作したROVによる調査実験を行って未知の水中洞窟(「牡鹿洞水中洞窟」)を発見した¹⁰⁾(図15,16)。また、牡鹿洞地下水系の排出口である「不動洞」左洞湧泉においても、後の調査実験で新しい水中洞窟を発見している¹¹⁾(図17)。



図13 「牡鹿洞」 洞口

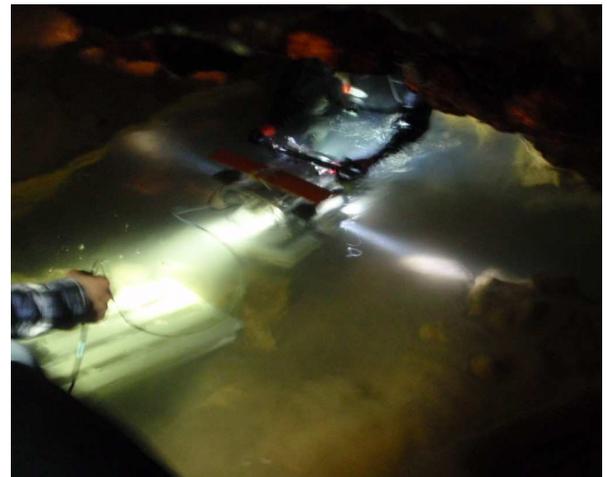


図15 ROV 潜航開始



図16 「牡鹿洞水中洞窟」の新水面



図14 ROVと基地局(前進基地)



図17 「牡鹿洞水中洞窟」「不動洞左洞水中洞窟」の縦断面模式図

3.4 「白滝の穴」

熊本県五木村小鶴の「白滝の穴」は洞口が五木小川に面し(図 18)、最奥部の湧泉から地下川が流出している。本研究グループの長嶋研究室(佐世保工業高等専門学校)では、この湧泉直上に基地局(前進基地)を設置し、製作した ROV による調査実験を行った(図 19、20)。未知の水中洞窟(「白滝の穴水中洞窟」)を発見し、洞壁へのレーザー投射実験も行った¹²⁾(図 21)。



図 18 「白滝の穴」洞口

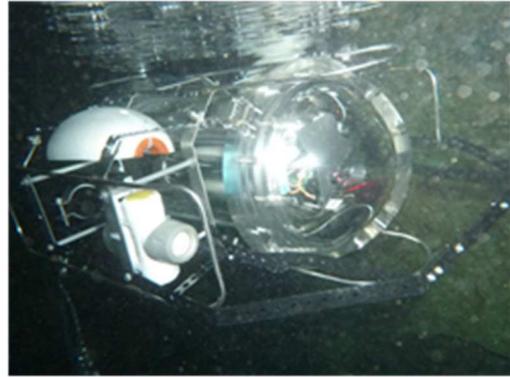


図 20 ROV 潜航開始

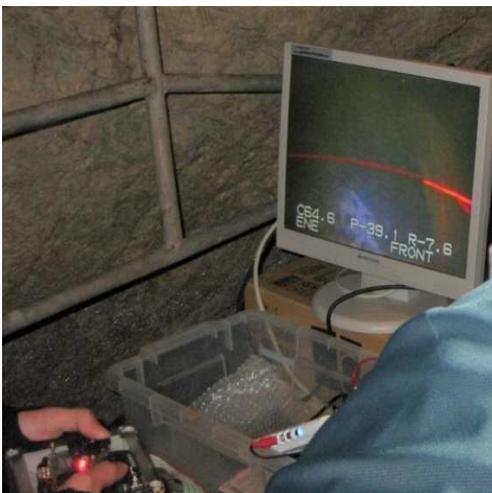


図 19 基地局(前進基地)

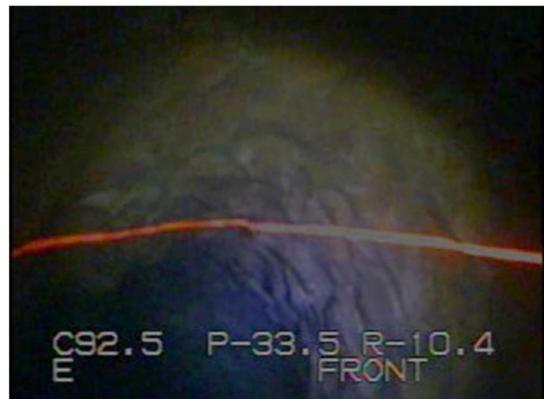


図 21 「白滝の穴水中洞窟」 ROV モニター画面



図 22 「白滝の穴水中洞窟」の縦断面模式図

3.5 「岩戸洞」洞外湧泉

「神瀬石灰洞窟」として知られている「岩戸洞」(前節)の北側近くに洞外湧泉は位置する。本研究グループの長嶋研究室(佐世保工業高等専門学校)では、この湧泉手前に基地局(前進基地)を設置し(図 23, 24)、製作した ROV による調査実験・レーザー投影実験・ソナー計測実験を行った²⁾(図 25, 26)。



図 23 「岩戸洞」洞外湧泉



図 24 ROV と基地局 (前進基地)



図 25 ROV 潜航開始



図 26 「岩戸洞(洞外湧泉)水中洞窟」最深度 ROV モニター仮面

4. 「岩戸洞」地底湖の ROV 探査構想

有索式 ROV による水中調査では「基地局と ROV がケーブルで繋がれている」という構成が基本的である。調査する対象に近い場所が基地局に有利であり、第 3 節の事例では、

- | | |
|-----------|----------|
| 「牡鹿洞」 | … 水没部の水際 |
| 「白滝の穴」 | … 湧泉の直上 |
| 「岩戸洞」洞外湧泉 | … 湧泉の水際 |

に設置している。その点では「岩戸洞」地底湖においても水面直上が望ましい。しかしながら、筏等を仮設する選択肢を除くと、ゴムボート上に基地局の機器を積載する場合、力学的に不安定であり、電源を確保しにくく、滴下水が機器の電子電気機器に深刻な影響を与えるデメリットが多い。地底湖は掘り鉢穴の底にあるため、人員、

機器材、ゴムボートの上げ下ろしの労力が必要になる。地底湖の水際に基地局を設置する場合は、力学的に安定するメリットはあるが電源を確保しにくく、滴下水が機器材の電子電気機器に深刻な影響を与えるデメリットは変わらない。人員、機器材の上げ下ろしの労力も必要になる。水際から離れると、その分の長さを加えたテザーケーブルが必要になるが、洞口内の熊野座神社のそばであれば自然光で明るく、力学的に安定であり、電源が確保しやすく、滴下水の影響がない、などメリットが多い。以下、「水際から離れている神社のそばに基地局を設営する」という前提に立って、検討を進める。

4.1 ROV のエントリー/エグジット

ROV は水中ロボットの種類であるが、水中環境に常時置かれるわけではない。調査開始時に水面上(大気中)から水面下(水中)に投入し潜航させる(エントリー、Entry)。また、調査終了時には浮上させて水面下から水面上に引き揚げる(エグジット、Exit)。このように、ROV がはさんで二つの領域を行き来する水面近くの場所(水際)を、本稿では En./Ex.地点と呼ぶことにする。テザーケーブルの展開・収納を行うハンドラーや機械式リールはこの地点に位置する。通常的小型 ROV 水中調査の設定においては、基地局のそばの水際が En./Ex.地点になる(前節の事例)。しかしながら、「水際から離れている神社のそばに基地局を設営する」という前提は、基地局と水際の En./Ex.地点が物理的に離れて位置することを意味する。用語として区別すれば、有索式 ROV による水中調査は「基地局と En./Ex.地点と ROV がテザーケーブルで直列に繋がれている」ことが基本的な構成である。

4.2 短距離 ROV 探査の構成

テザーケーブルの一端である基地局は神社のそばに固定され、もう一端である ROV は地底湖水面直下(水中斜洞部分)の領域内に位置する。En./Ex.地点の選び方が構成のバリエーションになる；

[構成 A] (図 27 上)

En./Ex.: 地底湖の汀線に設置。基地局との連絡は、トランシーバーを使用する。

課題: 汀線から水没斜洞まで水平距離があり、水底はボルダーで埋まっている。テザーケーブルの浮力がマイナスの場合、水底に沈んでボルダーに擦れたり、間に挟ま

ったりする可能性がある。ケーブルの浮力がプラスの場合、水没斜洞直上でケーブルの向きを水平から垂直に曲げる機構が必要になる。ハンドラーは水中斜洞に位置する ROV の様子を目視できる位置にいないため、展開・収納の指示を連絡する必要がある。

[構成 B] (図 27 中の上)

En./Ex.地点: 水没斜洞上水面に位置させたゴムボート等にケーブルをストックしておくか、滑車等の機構を積載する。基地局との連絡はトランシーバーを使用する。

課題: 調査準備時・撤収時のゴムボートの上げ下ろしや水中斜洞直上までの水面往復移動にマンパワーを割く必要がある。ハンドラーは水中斜洞に位置する ROV の様子を目視できる位置にいるが、水中に照明を懸下すれば視認性が向上する。

構成 B の課題を ROV に電源を内蔵すれば、テザーケーブルを使って電力供給する必要がなくなり、軽く細い通信専用ケーブルに変更できる。また、基地局との制御信号・映像信号は無線通信させることにより、テザーケーブルの一端を En./Ex.地点に変更してテザーケーブルの長さを節約できる。

[構成 C] (図 27 中の下)

En./Ex.: 構成 B と同じ。

課題: 構成 B に加えて、ゴムボートと掘り鉢穴手前に制御信号用・映像信号用のアンテナを設置する。

テザーケーブルの一端を En./Ex.地点から UAV(ドローン)に変更すれば、地底湖水面上から ROV (または水中カメラ) を水面下に吊り下げる方式もある：

[構成 D] (図 27 下)

En./Ex.: 地底湖直上の水面。

課題: UAV の滞空時間(バッテリー残量)に制限される。

短距離 ROV 探査の構成で可能な次の段階は、水中斜洞のスキャンソナーによる 3 次元形状測定¹⁶⁾ である。



図 27 「岩戸洞（本洞）」地底湖短距離 ROV 探査の構成案

4.3 長距離水中探査

テザーケーブルの水中部分が長ければ、プラスにせよ、マイナスにせよ、累積した浮力が ROV を上下に牽引して安定性を損ねる。洞壁と摩擦する部分が長くなり、ROV を後方に牽引する抵抗力となる。この負荷が最大推力を越えると ROV は前進できなくなる。これらは、テザーケーブルが力学的に受動的であることに起因する。力学的に能動的なテザーケーブルが“上手く”運動できれば、諸問題を解決できる可能性がある。この発想は、直列テザー方式による ROV 複数機構成¹³⁾につながる。テザーケーブルを使用しない選択肢としては、AUV (Autonomous Underwater Vehicle、自律型水中ロボット) が挙げられる。AUV の SLAM (Simultaneous Localization and Mapping、自己位置推定と環境地図作成) のために、3 次元写真測量 (立体視)¹⁴⁾ や、ソナーによる洞窟形状 3 次元測定¹⁵⁾ のリアルタイムに実行できることが前提になる。性能実証実験には、水際に前進基地の設定が容易で、長大な水中洞窟をもつ観光洞が有利である。候補には、前述の大分県豊後大野市の「稲積水中鍾乳洞」や岩手県岩泉町の「龍泉洞」がある。

5. 類似環境における UAV の調査・実験の例

「球磨山地」のカルスト水文系の研究を進めるには、山という地形の精密な 3 次元情報が基盤になる。近年、安価になった小型のマルチローター式ドローン (図 28) を使用すれば、人工衛星や有人航空機による地表の撮影よりも、低空、短時間、少人数、低予算で、接近困難な地形の精密な画像を取得できる。さらに、ドローンで撮影した膨大な数の画像を SfM/MVS 写真測量ソフトウェアを使用して処理すれば、精細な 3 次元の地形モデルを作成できる。



図 28 小型ドローン



図 29 ホームポジション (HP)

本研究グループを中心とした研究ネットワーク組織『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は、古代山城遺跡 3 次元比較研究において、山城の列石線等の遺構を追跡するため、山の地表面の DTM (Digital Terrain Model、数値地形モデル) を目標としているが、現在のところは、写真測量で取得可能な、建

物や樹木等の高さを含む DSM (Digital Surface Model、数値表面モデル) をメインテーマに設定している。本節では、「山」と「カルスト」の調査事例として、神籠石系古代山城と台地カルストのドローン写真測量と 3 次元モデルを紹介する。

5.1 古代山城・神籠石

7～8 世紀に朝廷主導で北部九州や瀬戸内海沿岸地域に築造された古代山城は、日本の古代国家形成史の解明という視点から、最重要な大規模遺跡である。神籠石系山城は史書に記載はないものの、山の頂上部や丘陵斜面の周囲に巡らせた土塁・石塁や、谷部を塞ぐ形に造設した水門施設を持つ。古代山城の 70% を占めるが、発掘調査をしても遺構・遺物が城内からほとんど発見されず、築城年・築城経緯などが明らかになっていない。この時期の文献史料は極めて少なく、従来の考古学や文献史学の手法では決定的な論拠が乏しく、発掘調査の飛躍的な増加も期待できない。このような閉塞状況を打開するために、短時間・少人数・低予算のメリットをもつドローンという調査方法を取り入れるのは自然の流れである。

ドローンは大規模遺跡を 3 次元モデル化する新しい調査手法として、エジプトのピラミッドの調査¹⁶⁾ やグアテマラのマヤ文明関係遺跡の調査¹⁷⁾ など、国外の調査事例は多く増加傾向にある。一方、国内では、早稲田大学による埼玉県東松山市野本將軍塚古墳¹⁸⁾ など、いくつかの事例が知られているに過ぎない。古墳よりも大規模な古代山城はほとんどが未着手の状況にあり、古代山城全 23 城の 3 次元モデル構築が実現すれば画期的な研究成果となる。

5.1A おつぼ山神籠石

佐賀県武雄市の「おつぼ山」(標高 66.1m、図 30 上) は有明海の西、杵島山(標高 345m) の西隣に位置する(図 30 下)。「おつぼ山神籠石」の列石線(図 31) は西側列石想定線も含めて 1,866m 余¹⁹⁾ であり、全神籠石系山城の中で最小規模な遺跡である。DJI 社のクアッドコプター Phantom3 を使用して SfM/MVS 写真測量用自動飛行(図 32 は設定用フライトマップ)を実施し空中撮影を行った(図 33)。Terra Drone 社「Terra Mapper」(クラウド無料体験版)による画像処理を行って「おつぼ山」の 3 次元モデルを得た(図 34)。



図30 武雄市「おつぼ山」

上 遠景 下 地形 (カシミール3D・地理院地図で作成)



図33 「おつぼ山」の写真測量用空中撮影画像(一部)



図31 「おつぼ山神籠石」の列石線

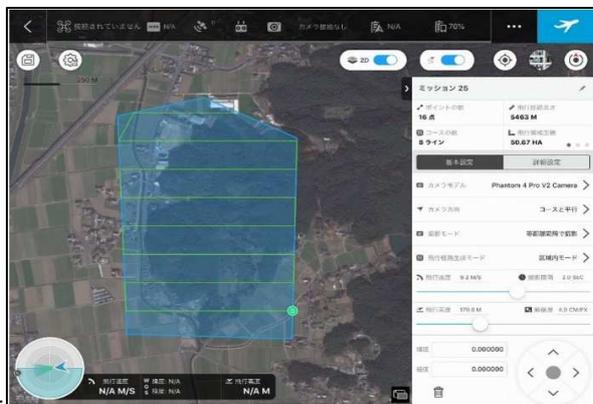


図32 「おつぼ山」のフライトマップ



図34 「おつぼ山」3次元モデル

5.1B 高良山神籠石

福岡県久留米市の「高良山」(標高 312.3m、図 35 上)は有明海の東、耳納山地の西側に位置する(図 35 下)。「高良山神籠石」の列石線(図 36)は高良大社の本宮山(標高 253m)を最高所とし鷲ノ尾山・勢至堂山・虚空蔵山・吉見岳の 5 峰を囲むように築造されている^{20),21)}。DJI 社の小型ドローン Phantom4 Pro を使用して SfM/MVS 写真測量用自動飛行を実施し、「Terra Mapper」(クラウド無料体験版)の処理により「高良山」の 3 次元モデルを得た(図 37)。



図36 「高良山神籠石」列石線



図 35 久留米市「高良山」

- 上 遠景 (西向き 市街方向)
- 中 遠景 (東向き 山頂方向)
- 下 地形 (カシミール 3D・地理院地図で作成)



図 37 「高良山」3 次元モデル

5.2 秋吉台

北東方向約 16km、北西方向約 6km、台地上総面積 54km²の日本最大のカルスト「秋吉台」は、山口県美祢市の中・東部に位置し、台地面の標高 180～420m である。厚東川の東側地域が狭義の「秋吉台」（特別天然記念物、国定公園）であり、多数のドリーネが集中して分布している（図 38）。本研究グループは、UAV を使用する各種の探査実験、とくに縦穴洞口・ドリーネの形状測定を「秋吉台」で進めている。その南縁部において DJI 社の Phantom4Pro の SfM/MVS 写真測量用自動飛行を実施し、Agisoft 社「Photoscan」の処理により 3 次元モデルを得た（図 39）。



図 38 「秋吉台」

上・中 遠景 下 地形（カシミール 3D・地理院地図で作成）

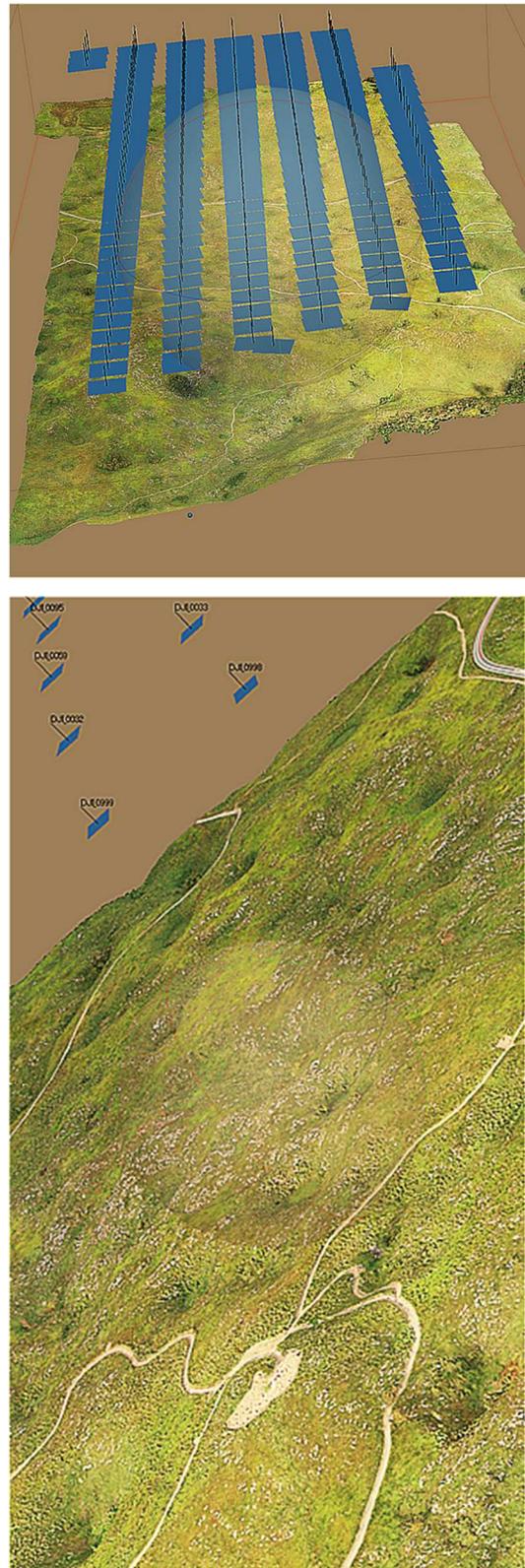


図 39 「秋吉台」3 次元モデル

6. 「球磨山地」 UAV 写真測量の区域

「球磨山地」(図 1)の面積は古代山城を含む山(図 30,35)に較べて広大であり、「秋吉台」(図 38)に較べて目視可能範囲は局所的なものになる。時間と費用の面で、ドローンを前提にする第二期調査計画は、対象を小さい区域に限定せざるを得ない。そこで、第一期の地下水色素追跡調査用エリアのうち、①岩戸洞エリア、②球泉洞エリア、③高沢洞エリア、④黒仁田洞エリアに基づいて、対象区域を設定する(図 1、図 40a～e)。

- I 型: 上記エリアの近傍 (赤紫色枠線内)
- II 型: カルストの特徴を含む山 (藍色枠線内)
- III 型: I と I の間 (橙色枠線内)



図 40c 黒仁田洞エリア近傍 (I 型)
高沢洞エリア近傍と黒仁田洞エリア近傍の間 (III 型)
(カシミール3D・地理院地図で作成・加筆)

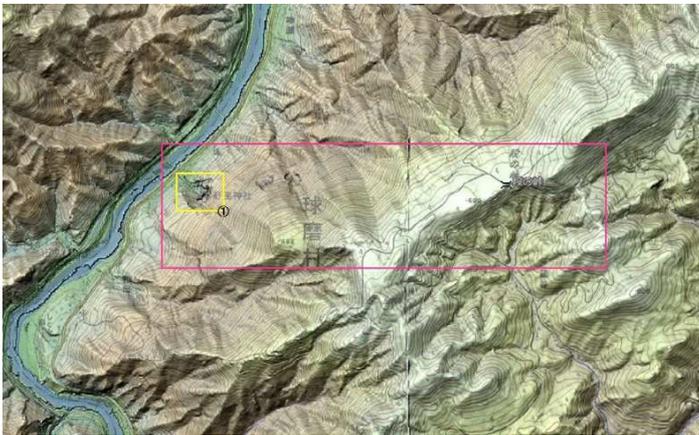


図40a 岩戸洞エリア近傍 (I 型)
(カシミール3D・地理院地図で作成・加筆)



図40d 権現山 (II 型)
(カシミール3D・地理院地図で作成・加筆)

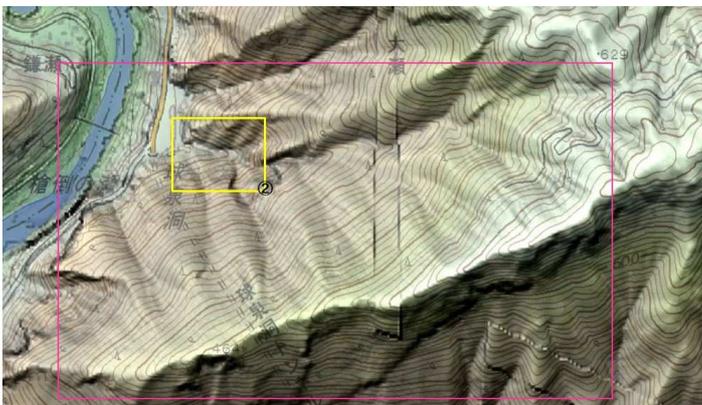


図40b 球泉洞エリア近傍 (I 型)
(カシミール3D・地理院地図で作成・加筆)

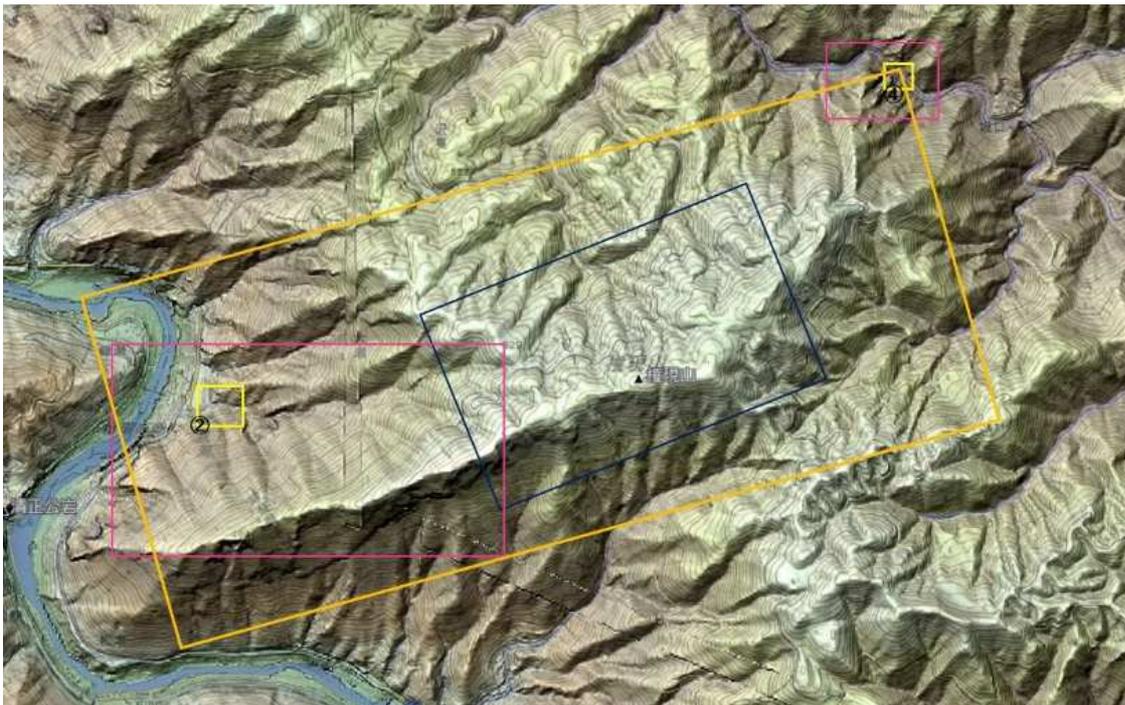


図40e 球泉洞エリア近傍と黒仁田洞エリア近傍の間(Ⅲ型) (カシミール3D・地理院地図で作成・加筆)

7. まとめ

本稿の水中ロボット調査方法検討の目的は、「岩戸洞地底湖」深奥部の水中探査を最小限の技術の組み合わせで実現することにある。そのために、実績に基づいた計画の机上演習から始めて類似環境の探査実験を行い、問題点を解決していく。水中洞窟の規模に対応して ROV の機体数を増やす場合、機体数と同じ本数のテザーケーブルを使用することは避けて、直列テザー方式による複数 ROV のシステム構成を検討する。次の段階として、AUV による水中洞窟探査の準備を進めていく。AUV の SLAM に必要な、3次元写真測量(立体視) やスキャンソナーによるリアルタイムな3次元形状測定の研究を行う。

本稿のドローン調査方法検討の目的は、最小限の技術の組み合わせで、「球磨山地カルスト」の地形測量を実施することにある。ドローンの飛行においてはヘリポートとなる HP (Home Position、ホームポジション) (図29) が重要な役割を担うため、「球磨山地」調査プロジェクト(第二期)の準備として、HP 候補場所選定を目的とする現地踏査を行う。現在、様々な類似地形のドローン写真測量を実践して DSM (数値表層モデル) を取得し

ているが、ドローンに搭載したレーザスキャナーによる DTM (数値地形モデル) 取得の研究も進めている。また、山地カルストにおける未知の縦穴洞口を検出するため、ドローン搭載赤外線カメラによる空中撮影も研究している。これらは、「秋吉台」の縦穴「椿穴」「恵藤穴」においてテスト実験を実施している。

謝辞

「岩戸洞」「大瀬洞」を含む球磨山地カルストの第1次水文地質調査(地形地質調査、洞窟水文系色素追跡調査)に当り、洞内環境保全についてご指導いただいた熊本県球磨郡球磨村教育委員会に感謝の意を表す。

参考文献

1) Cave Diving Group,

Iwato Do Cave, CDG Newsletter, Issue 111, pp.43-44, April 1994

2) 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)

- 3) 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)
- 4) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 山本祐二,
近藤正義, 岡本涉,
**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, (2016)
- 5) 眞部広紀, 岡本涉, 前田貴信,
**洞窟地形のドローン空中撮影
--写真測量と 3D モデルを目指して--**
日本洞窟学会第 44 回大会(宮城県気仙沼市大会) 2018 年
- 6) 堀江潔, 眞部広紀, 岡本涉,
**ドローンによる西北九州地域の古墳・山城の空中撮影
--3D 化によるアーカイブ構築を目指して--**
日本情報考古学会第 41 回大会 2018 年
- 7) 岡本涉, 宮嶋宏行, 眞部広紀, 松見豊 山崎高幸
火星におけるドローンによる大気観測及び地形探査への道
第 62 回宇宙科学技術連合講演会 1K12, 2018 年
- 8) 眞部広紀, 前田貴信, 岡本涉, 山下寛文,
洞窟の探査・計測とデータ活用
第 62 回宇宙科学技術連合講演会 3D14,
OS07 月惑星の縦孔・地下空洞探査 UZUME 計画 2018 年
- 9) 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-eikaku.or.jp/xc/uploads/fckeditor/chousa_kenkyu/h29%20kenkyuhoukoku03.pdf
- 10) 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検証実験と予備調査,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 46 号 pp.43-48 (2009)
- 11) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他,
ROV を援用した水中洞窟調査(短報)
-宮古島平良ピキャズと平尾台不動洞-
日本洞窟学会第 42 回大会(荊田町平尾台大会)学術講演会
- 12) 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)
- 13) 竹林亮, 足立吉隆, 佐藤良史, 佐藤正太郎,
鍾乳洞潜水調査 ROV の開発
2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
- 14) N. Weidner, S. Rahman, A. Q. Li, I. Rekleitis,
Underwater cave mapping using stereo vision
2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989672>
- 15) M. Stipanov, V. Bakarić, Z. Eškinja,
ROV use for cave mapping and modeling,
IFAC Proceedings Volumes Volume 41, Issue 1,
pp.208-211 (2008)
- 16) 河江肖剰,
ピラミッド—最新科学で古代遺跡の謎を解く—,
新潮社, pp.348-353, 2018
- 17) M. A. Canuto, F. Estrada-Belli, T. G. Garrison, S. D. Houston,
et al.,
**Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne
laser scanning of northern Guatemala,**
Science 28 Sep. 2018 : Vol. 361, Issue 6409, eaau0137,
DOI:10.1126/science.aau0137
- 18) 城倉正祥, 青木弘, 伝田郁夫編,
**早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所調査
研究報告第 4 冊 『デジタル技術を用いた古墳の非破壊調
査研究—墳丘のデジタル三次元測量・GPR, 横穴式石室・
横穴墓の匙現計測を中心に—』,**
早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所,
早稲田大学文学部考古学コース, pp.20-23, 2017
- 19) おつぼ山神籠石 佐賀県武雄市史跡調査報告,
武雄市, 1965
- 20) 樋口一成, 高良山神籠石,
久留米市史第 1 巻, 久留米市,
pp.463-510, 1981,
- 21) 松村一良, 高良山神籠石,
久留米市史第 12 巻資料編(考古), 久留米市,
pp.555-560, 1994