

# P10 秋吉台北東部における石灰岩洞窟の崩壊メカニズムの検討

## Investigation of collapse mechanism of limestone caves in northeastern Akiyoshidai, Yamaguchi Prefecture

○乾智美・辻智大（山口大学）

### 【はじめに】

石灰岩洞窟の拡大には石灰岩の崩落が起因しているとされており、崩落には断層が関与していることが指摘されている（太田ほか,1980）。乾ほか（2022）では、秋吉台北東部に位置する景清洞を含む複数の洞窟を研究した。その結果、断層と崩落の関係について、1) 連続性が良く破碎幅の広い断層が崩壊に関与すること、2) 洞幅や洞窟横断面のアスペクト比も崩壊の発生しやすさに影響すること、3) 堆積物の層序から崩壊の時期や回数を推定できる可能性があることの3点を推察している。しかし、断層の連続性については洞窟内でしか追跡されていない。1) のような規模の大きな断層は地表まで連続している可能性があると考えており、地下で崩壊を起こすような断層を地表から追跡できれば、陥没による被害を未然に防ぐなど防災に活かすことができる。よって、より広域的な調査が求められる。また、断層の崩落への関与について、力学的な検討はなされていない。さらに、景清洞では崩落時期なども含めた形成史も明確ではない。

よって本研究では、1) 洞内で観察される主要な割れ目系の連続性を検討すること、2) 調査地域における石灰岩の強度を算出し、崩壊を発生させる要因を検討すること、3) 景清洞における洞内河川の発達から、石灰岩の崩落までの形成史を考察すること、の3つを目的に研究を行った。

### 【研究結果】

調査地は山口県美祢市秋吉台北東部の猪出<sup>ししでだい</sup>台及び、台麓に開口する景清洞洞内である。

乾ほか（2022）は景清洞を「崩落部」と「非崩落部」に分類した。崩落部には連続性が良く破碎幅が大きい断層が存在し、崩落礫が卓越する。本発表で着目する崩落部は、洞口から 200～300 m 程の鳥帽子天井と呼ばれる場所付近の崩落部 1 と、洞口から 700～800 m 程にある崩落部 2 の 2 箇所である。一方、非崩落部にも断層や亀裂は存在するものの崩落部のような大規模な断層は認められず、崩落礫はほとんど観察されない（第 1 図）。以下に崩落部 1（Loc.1～3、14、15 を含む）で観察された堆積物の産状と断層の特徴について述べる。

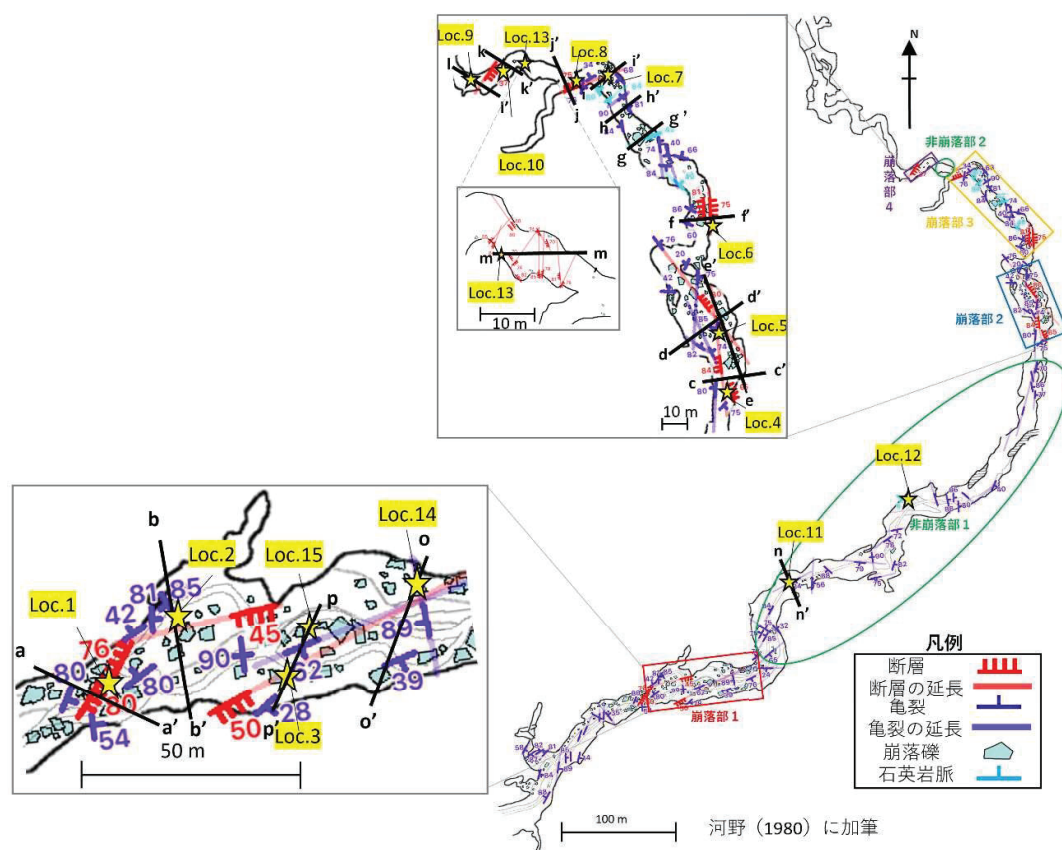
Loc.1 では N28° E, 80° E と N28° E, 76° W の 2 本の断層が確認されている。洞窟の北側と南側に河川堆積物および崩落礫が見られ、北側では 3 m 程の巨礫の上位に円礫を含む河川堆積物が堆積する。最上位には 30 m 程の崩落礫が見られ、その上に石筍が形成されている。全体的に石灰成分に覆われ固結している（第 2 図）。

Loc.2 は N76° E, 45° S の断層沿いに発達した空間で、高さ 7～8 m 程の洞内アルプスと呼ばれる堆積物の山がある。直径 1～2 m 程の崩落礫を覆うように円礫を含む河川堆積物が堆積し、最上位には崩落礫が堆積している。最上位の崩落礫にはスカラップ（石灰岩に触れていた流水の、方向や速さなどを示す溶食痕）が観察されない（第 3 図）。

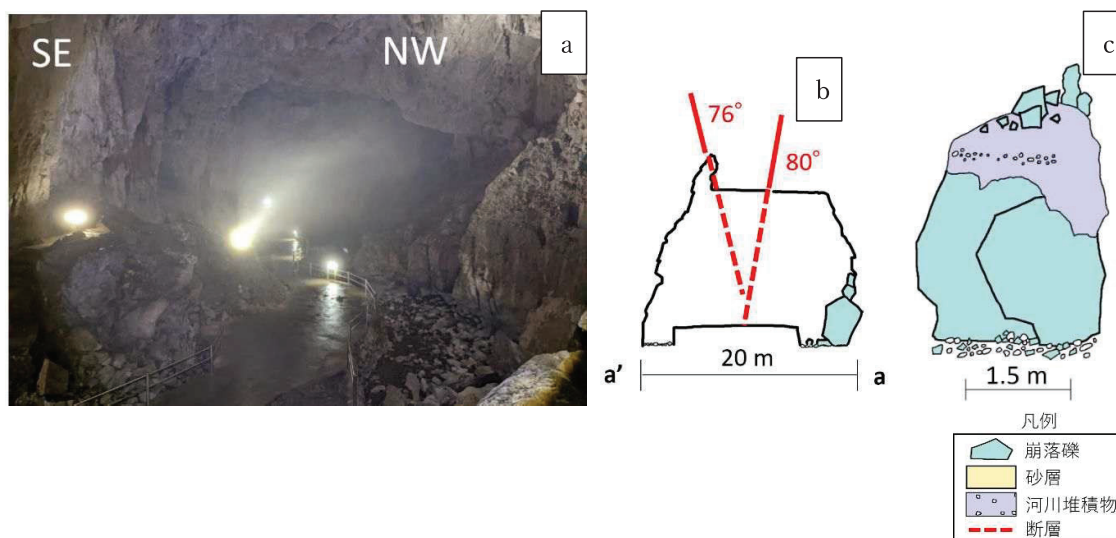
Loc.3 では天井に N68° E, 50° S の断層が見られる。亜円礫を含み上方細粒化を示す河川堆積物層と、その上位には崩落礫が観察される。その崩落礫にはスカラップは観察されない。（第 4 図）。

Loc.3 より下位にある Loc.15 では、溶食や風化の進行したスカラップの観察される崩落礫が観察される。この礫の上に亜円礫を含む固結した河川堆積物が乗っている様子が観察される（第 5 図）。

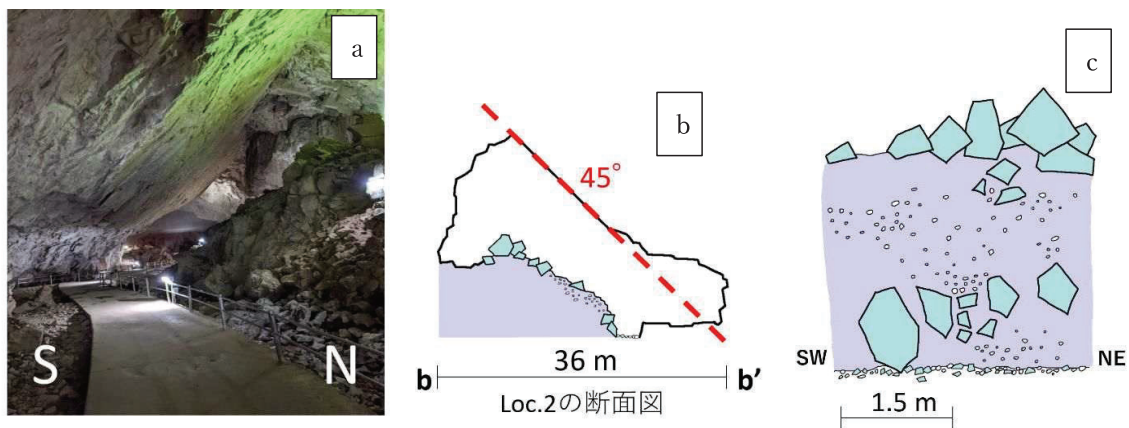
Loc.14 では北側の洞壁にノッチが観察される。最下位には崩落礫が観察され、それを埋積するように垂円礫を含む河川堆積物が堆積している。その上位には崩落礫が観察され、この上位の崩落礫と河川堆積物によってノッチが埋積されている。この露頭の最上位には細粒～中粒の砂層が確認された（第6図）。



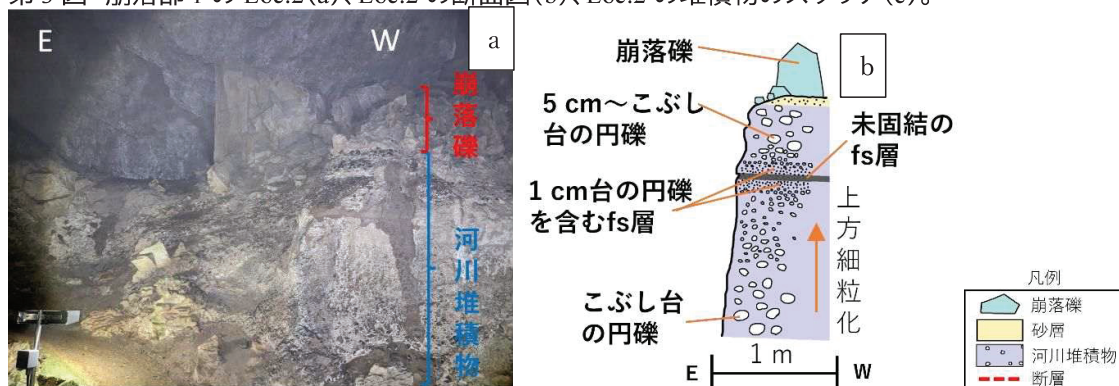
第1図 景清洞ルートマップ。河野(1980)に加筆。



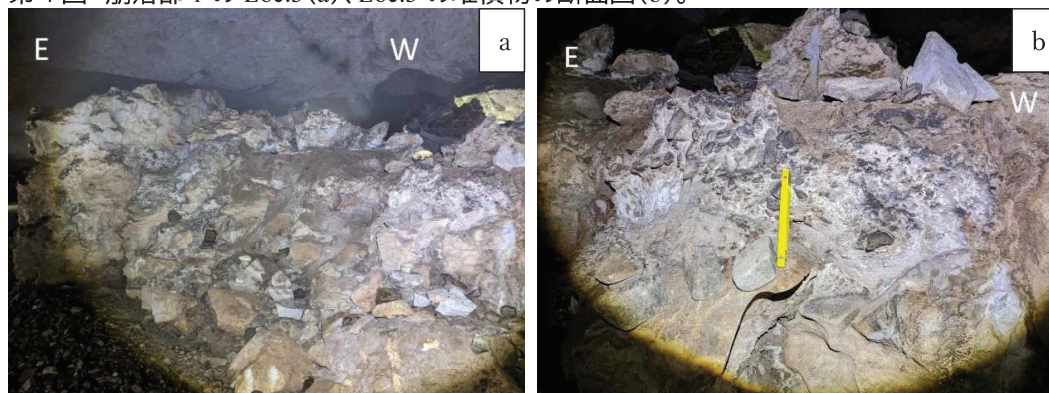
第2図 崩落部1のLoc.1(a)、Loc.1の断面図(b)、Loc.1の堆積物のスケッチ(c)。



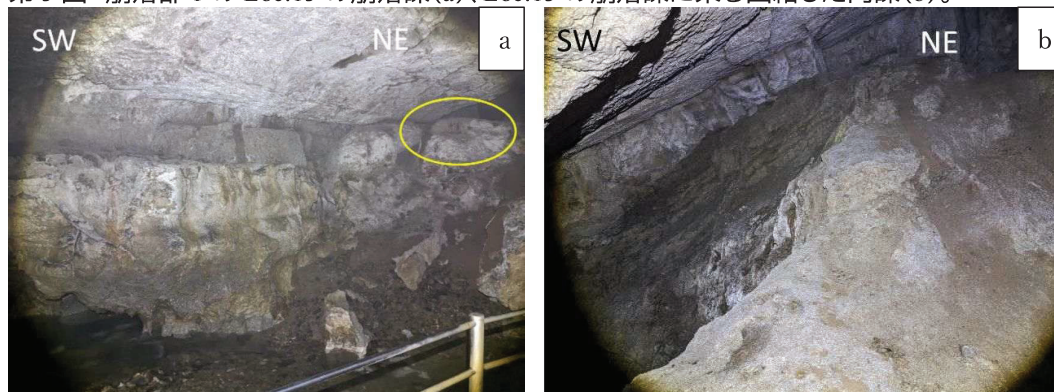
第3図 崩落部1の Loc.2(a)、Loc.2の断面図(b)、Loc.2の堆積物のスケッチ(c)。



第4図 崩落部1の Loc.3(a)、Loc.3の堆積物の断面図(b)。



第5図 崩落部1の Loc.15の崩落礫(a)、Loc.15の崩落礫に乗る固結した円礫(b)。



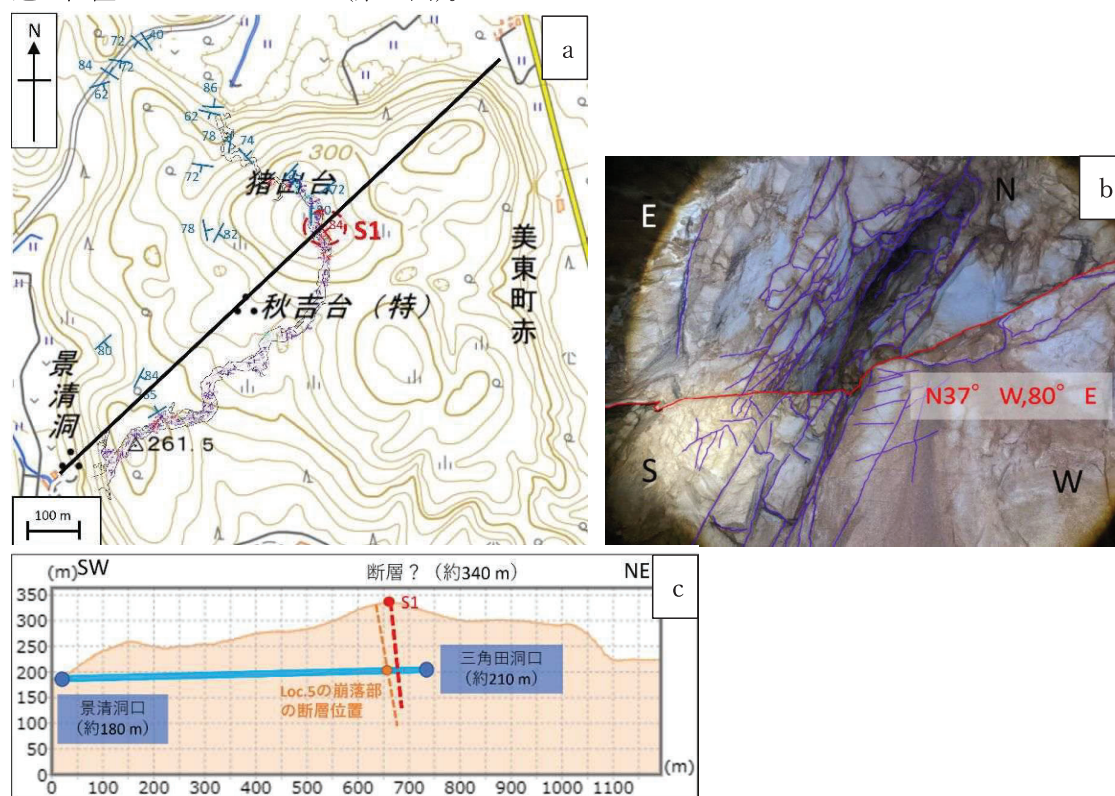
第6図 崩落部1の Loc.14のノッチ(a)、Loc.14の最上位の砂層(b)。

次に景清洞が開く猪出台上の踏査結果を示す。台上では石灰岩の亀裂系や、石灰岩群の一定方向の配列などが観察され、それらの走向傾斜は第7図のコンター図のようになる。コンター図から、走向方向に一定の傾向は見られないが、高角な傾斜を持つ亀裂系が多いことが観察された。また、猪出山の頂上部において、 $N37^{\circ} W, 84^{\circ} E$ の走向傾斜をもつ割れ目(S1)を発見した。この割れ目は他の亀裂系より連続性が良く割れ目を中心に窪地となっており、崩落礫のようなものが割れ目周辺に堆積していた(第7図)。



第7図 猪出台上の一定の配列を持つピナクル(a)、台上の割れ目(S1)と崩落礫(b)、台上の割れ目のコンター図(c)。

以下に猪出山の断面図を示す。断面図は第8図ルートマップに示す断面で作成した。台上で発見したS1の割れ目を断面図にプロットすると、崩落部2のLoc.5の洞内断層  $N37^{\circ} W, 80^{\circ} E$  と近い位置にプロットされた(第8図)。



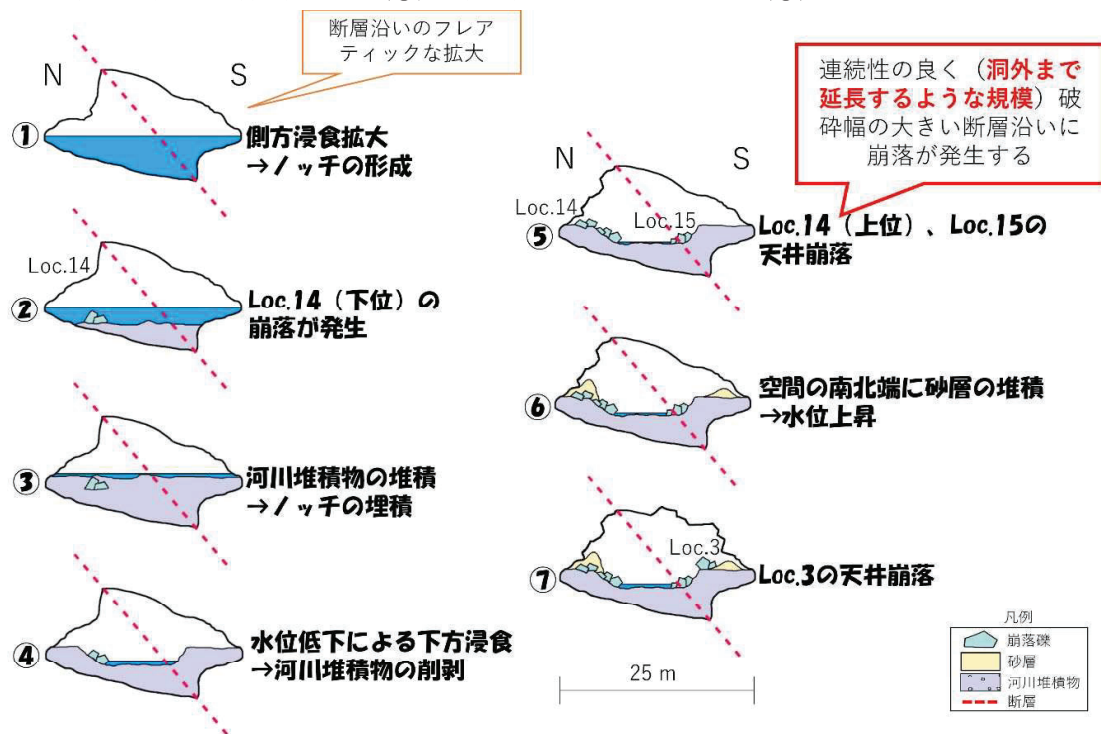
第8図 猪出山のルートマップと断面線(a)、崩落部2(Loc.5)の天井の断層(b)、猪出山の断面図(c)。

また、上記で作成した断面図から崩落部のおおよその土被り厚を算出し、太田ほか（2003）に則り鉛直方向地圧と水平方向地圧を算出した。最も土被り厚の大きかった崩落箇所では土被り厚が約 130 m あり、この時の地圧は鉛直方向が 3.19 MPa、水平方向が 1.06 MPa となった。これに対し、石灰岩の曲げ強度は 13.25 MPa（田中,1958）であり、実際に崩落部にかかった地圧は石灰岩の強度に比べて小さかった。

### 【考察】

景清洞内で観察できる堆積物の層序に関して、崩落部 1 の各地点で河川堆積物の下位と上位に崩落礫が観察された。このことから、崩落部 1 の各 Loc.において複数回の崩落および河川堆積物の堆積が起こったことが示唆される。また、Loc.2、3 の最上位の崩落礫にはスカラップなどの溶食跡が観察されないことから、最も新しい崩落が起こった後から現在まで、最上位の崩落礫の位置までは水位の上昇がなかったと考えられる。さらに、ノッチが上位の崩落礫とその下位の河川堆積物によって埋積されている箇所もあった。よってこの崩落の発生は、少なくとも洞内河川が飽和状態から下方浸食、側方浸食に移行した後であると推察される。これは河野（1983）からも支持される。

第 9 図に崩落部 1 の Loc.3、14、15 に基づいた、洞窟の形成過程の仮説を示した。まず初めに、地下水に飽和した環境で、断層沿いに水中洞窟が形成された。続いて徐々に地下水位が低下すると共に、一定の水位で水面の安定期があり、ノッチが形成された (①)。水面の高さは不明であるが、Loc.14 で崩落が起こり下位の崩落礫が堆積した (②)。河川堆積物の堆積により、ノッチが埋積された (③)。次に更に水位が低下し、河川堆積物が削剥されていった (④)。なお、洞内堆積物は人工的に排除されているため、その影響により削剥されたものもある。その後 Loc.14 と Loc.15 において崩落が発生し、Loc.14 では上位の崩落礫が堆積した (⑤)。その後①のノッチの高さほどまで水位が上昇、砂層を形成し (⑥)、最上位の崩落が発生した (⑦)。



第 9 図 崩落部 1 の Loc.3、14、15 を例にした形成過程の模式図。

地表踏査と断面図からは、台上で観察された割れ目（S1）と洞内の断層（崩落部 2 の Loc.5）が連続している可能性があり、崩落部 2 で崩落に関与したと考えられる断層もしくは断層群が地表に達していることが示唆される。

また、景清洞にかかる地圧と曲げ強度の比較から、不連続面のない塊状の石灰岩では理論的には崩落が発生しないはずである。しかし、実際には崩落が発生していることから、地圧以外に不連続面や地下水、洞幅など崩落を誘発するような要因があると考えられる。これは断層、特に連続性が良く破碎幅の大きい断層が崩落に寄与するという乾ほか（2022）の考えを支持する。さらに、乾ほか（2023）で示した洞幅も崩壊しやすさの素因になるという考えとも矛盾しない。ただし、今後空洞の大きさを考慮した力学計算が必要である。

#### 【謝辞】

本研究にあたり、美祢市文化財保護課の村上崇史氏には調査への同行や、測図の提供、ご助言など、多大なるご協力を賜った。また、調査にあたり減免申請や調査中の宿泊など、美祢市観光政策課の職員の方々とほっとビレッジ美東の中屋弘幸氏には大変お世話になった。以上の方々に記して感謝の意を表する。

#### 【引用】

乾智美・辻智大・村上崇史（2022）景清洞・大正洞の形成過程における割れ目と崩壊の関係性，日本洞窟学会第 48 回大会講演要旨集，10.

乾智美・辻智大（2023）石灰岩洞窟における割れ目と崩壊の関係性，日本地質学会西日本支部第 173 例回講演要旨，23.

河野通弘（1980）秋吉台の鍾乳洞－石灰洞の科学－，帰水会，9-24.

河野通弘（1983）景清洞の形態等に関する調査，山口ケイビングクラブ会報，19，13-16.

太田岳洋・朝倉俊弘（2003）凝灰岩類からなる軟岩地山におけるコアディスキングとトンネル変形材料，52，505-510.

太田正道・杉村昭弘・配川武彦（1980）秋吉石灰岩層群と地質構造，河野通弘編，秋吉台の鍾乳洞－石灰洞の科学－，帰水会，9-24.

[単位体積質量・単位体積重量（比重）一覧 | CMC \(concrete-mc.jp\)](#) (2023/7/30)

田中正男（1958）石灰岩およびその周辺岩石の物理的性質の測定とその坑内掘削計画への応用，日本鉱業会誌，74，40-45.