



石灰岩地域では、その流域の地下水の状況把握が難しいと聞きますが、どのような特徴があり、どのような調査が望ましいのでしょうか？



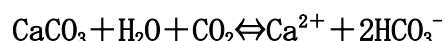
- 石灰岩には、微生物活動により二酸化炭素濃度が高くなった土壤中を降水が通過し、二酸化炭素を多く含む地下水により溶解が促進されやすい特徴があります。
- 石灰岩地域の地下水の水質は、石灰岩の主成分である炭酸カルシウム (CaCO_3) を反映して、 Ca^{2+} と HCO_3^- の成分が多い炭酸水素カルシウム型 (Ca-HCO_3 型) となり、pH8 以上のアルカリ性を示します。
- 石灰岩が広く分布する地域の地下水は、地下に分布する溶食空洞が地下河川のような水みちを形成し、地形がつくる集水域を超えた地下水流動があることが大きな特徴です。
- 石灰岩地域の溪流では流水がなく、下流の湧出箇所では多くの湧水量となる傾向があります。その湧水量は河川水の流量変動に類似しており降雨に連動して変化する傾向があります。
- トンネル施工時には、石灰岩地帯中の無数の縦方向や横方向に発達した空洞（鍾乳洞）のつながりにより、土被り圧に近いような高水圧の湧水を伴うことがあります。
- 集水域を超えた地下水流動があるため、トンネル施工の影響範囲や湧水量を推定することは、一般的に用いられている地形的な要素にもとづく水文学的方法（高橋の方法）やポテンシャル理論に基づく水収支シミュレーションなどの手法では難しい。
- 石灰岩地域のトンネル水文調査の着目点で言えば、石灰岩分布の確認、広域の水文地質調査、地質構造の把握、湧水地点の水収支の検討から地形に現れない集水域の検討とトンネルルートとの関係把握、水質分析による検討、特に広域の石灰岩分布と湧水地点の連続性の把握等が重要項目となります。
- また、石灰岩の空洞（鍾乳洞など）を伴う水みち調査では、特殊なトレーサーとなりますが、アクチバブルトレーサーなどを用いれば 1～2km 離れた地点でも追跡が可能であり、地中の水みちが完全には把握できなくても、トンネルの地下水評価上有益なデータとなります。

(1) はじめに

石灰岩は中国地方の秋吉帯、四国地方の秩父帯に大小のレンズ状岩体として分布しています。大きなレンズ状岩体は、中国地方では石灰岩地域が台地状の地形をなすことから秋吉台、帝釈台、阿哲台などと呼ばれ、四国地方では四国カルストなどに分布しています。なお、福岡県の平尾台、山口県の秋吉台、四国カルストは日本三大カルストと呼ばれています。石灰岩体はしばしば大小の溶食空洞を伴うことから、トンネル工事時の異常出水、ダム基礎岩盤の漏水、隠れた空洞上の突然の陥没など、建設工事を主体に応用地質的課題が多いことが指摘されています¹⁾。

(2) 石灰岩の溶食と溶食空洞の形成

石灰岩地域では、石灰岩の主要成分である炭酸カルシウムが二酸化炭素を多く含んだ水によって溶解が促進されやすくなり、特徴的な地形が形成されます。この溶解現象を化学反応式で示せば、



で示されます。

上式の反応式が右に進むと石灰岩が溶解し、地表にドリーネなどの窪地や地中に鍾乳洞などの溶食空洞を伴う排水系（水みち）が形成されます。また、反応が左に進むと炭酸カルシウムが沈殿し、鍾乳石などの二次生成物を形成します。この反応式に示すように、石灰岩の溶解反応を左右する最も重要な要因は二酸化炭素です。図-1の石灰岩の溶解に及ぼす二酸化炭素濃度の効果に示すように、降水が大気中の二酸化炭素濃度（0.036%）と平衡状態にある場合には溶解量が比較的少なく、降水が地中に浸透する過程で土壌中の二酸化炭素濃度（0.1～1.5%）と平衡状態になると、溶解量が多くなることを示しています。微生物活動により二酸化炭素濃度が高くなった土壌中を降水が通過することは、溶解作用を進めるうえで重要な役割を意味しています²⁾。このような溶解作用を繰り返すことにより、ドリーネや地中においてはつながりが複雑で、かつ、溶食空洞を伴う排水系（水みち）が形成され、地表では河川の発達が乏しくなります。

さらに、もう一つ重要なこととして、降水が石灰岩中に浸透し鍾乳洞などを形成するには初生的な亀裂（空隙）が必要で、石灰岩の分布状況や周辺の地質構造（断層、亀裂分布）などの地質情報が重要な手がかりとなります。上記に示した基礎知識のもとで石灰岩地域の地下水特性や地下水流動を把握するために必要な調査について以下に示します。

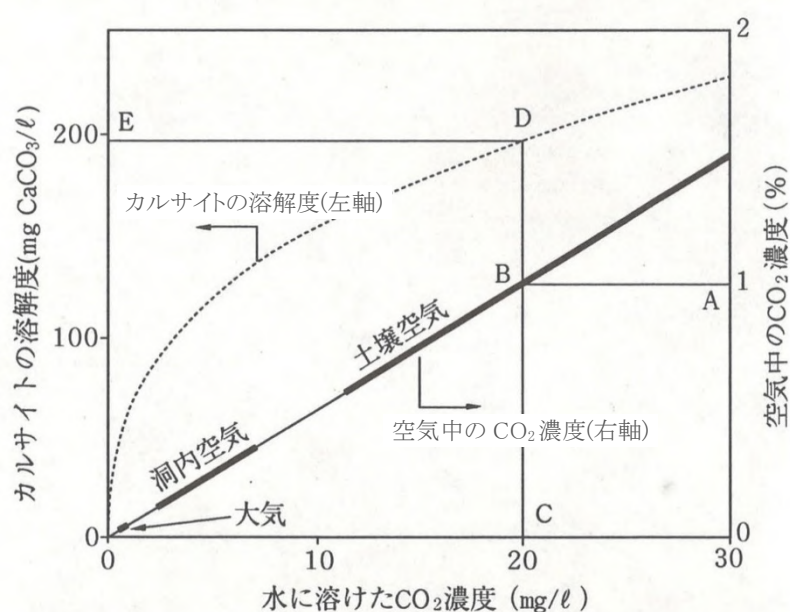


図-1 石灰岩の溶解に及ぼす二酸化炭素濃度の効果²⁾

(3) 石灰岩地域の地下水の水質

前述のように、石灰岩の主成分は炭酸カルシウム (CaCO_3) からなりますが、二酸化炭素 (CO_2) を多く含む水にはよく溶ける性質があり、石灰岩地域の地下水の水質は Ca^{2+} と HCO_3^- の成分が多い炭酸水素カルシウム型 (Ca-HCO_3 型)³⁾ となります (図-2)。また、pH は 8 以上のアルカリ性を示す特徴があります。

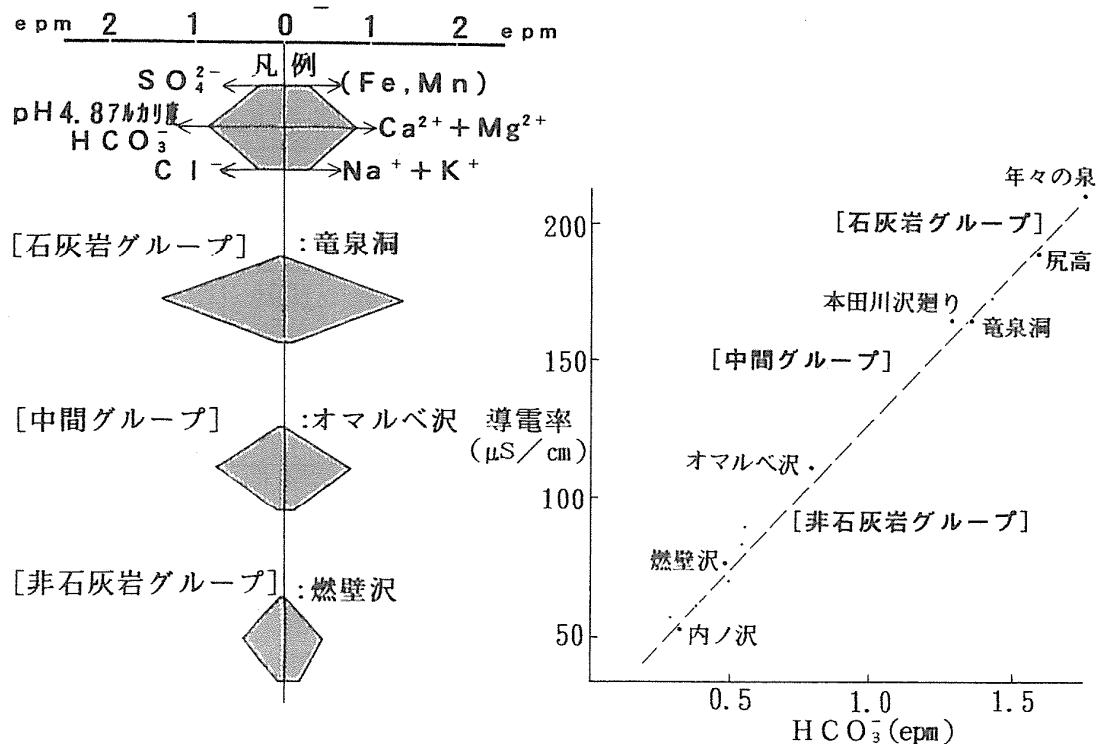


図-2 岩手県岩泉町の龍泉洞の湧水と周辺河川の水質組成³⁾

(4) 石灰岩地山の地下水流動の特徴

石灰岩地帯では特異的な地形としてカルスト地形をつくり (写真-1、-2)、カルスト上に降った雨は、石灰岩中の溶食された割れ目を通り地下浸透するため表流水は殆ど無く、ある地点から鍾乳洞を伴う湧水として地表に現れることが多い¹⁾。そのため、カルスト地域では、開析谷の発達が悪いことから谷、尾根の地形が不明瞭となる特徴もあります。

図-3 に石灰岩地帯におけるトンネル湧水メカニズムの概念図を示します。図-3 に示すように石灰岩地帯中には無数の縦方向や横方向に発達した空洞 (鍾乳洞) が繋がっており、地下河川のような水みちを形成すること多い。降雨は割れ目を通してこの空洞 (鍾乳洞) に溜まり、湧水地点よりも空洞部の地下水位が高くなると水みちを通り地表面に湧出します。

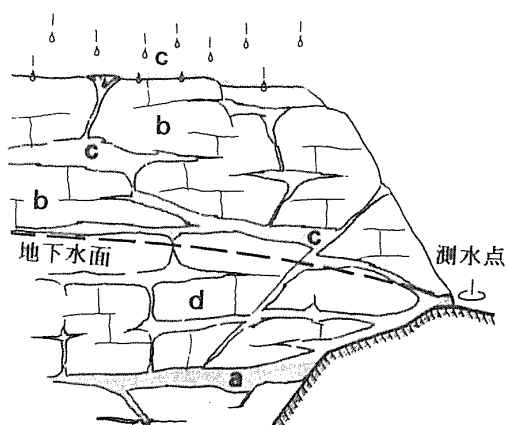
石灰岩地域の地下水は、図-3 に示すように地下に分布する溶食空洞が地下河川のような水みちをなすことから、地形がつくる集水域を超えた地下水流動があることが大きな特徴です。



写真-1 四国カルストの山頂部の石灰岩¹⁾
注：文献 1) の口絵写真、須内寿男氏撮影



写真-2 石灰岩の溶食例
注：須内寿男氏撮影



【記号の解説】

- a: 飽和帯中の洞窟内に貯留していた水に降雨が加わりハイドログラフが立ち上がる水
- b: 降雨後に通気帯中の割れ目などを通じて地下水流として流出する水
- c: ドリーネの吸い込み穴を通じて運ばれる水
- d: 地下水面下の小空隙から継続的に湧出する水

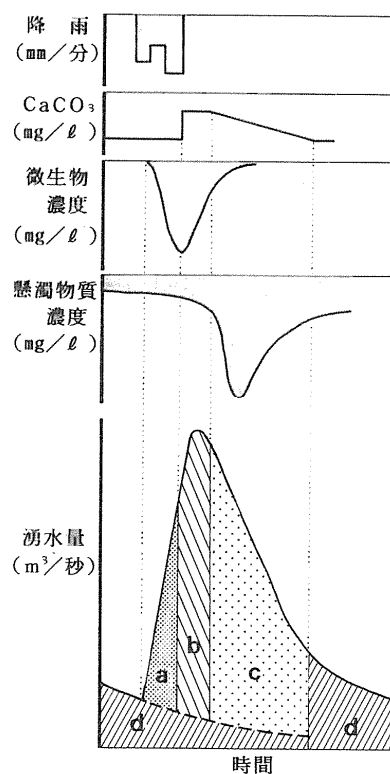


図-3 石灰岩地帯の湧水のハイドログラフのモデル³⁾

図-4は石灰岩地帯における地下水位観測孔の水位変動と近接する湧水地点の湧水量の変化の事例です。降雨に連動した地下水位と湧水量の変動を捉えており、特に、湧水量は降雨直後に急激に増加し、その後徐々に減衰するといった河川水の流量変動に類似した傾向を示しています。

トンネル施工後のトンネル湧水についてみると、一般地山のトンネル湧水では降雨とあまり関係なく緩やかな季節的流量の増加～減少傾向を示す場合が多いのに対し、石灰岩地帯におけるトンネル湧水では、図-4の事例と同じように、河川水と同じような降雨に反応した急激な流量の変化を示します（図-5）。

さらに、四国カルストの地芳トンネルでは土被り 240m のところで、約 2MPa (20kgf/cm²) の水圧を持つ突発湧水に遭遇した報告例など、トンネル施工時の高水圧湧水の遭遇がいくつか報告されています¹⁾。

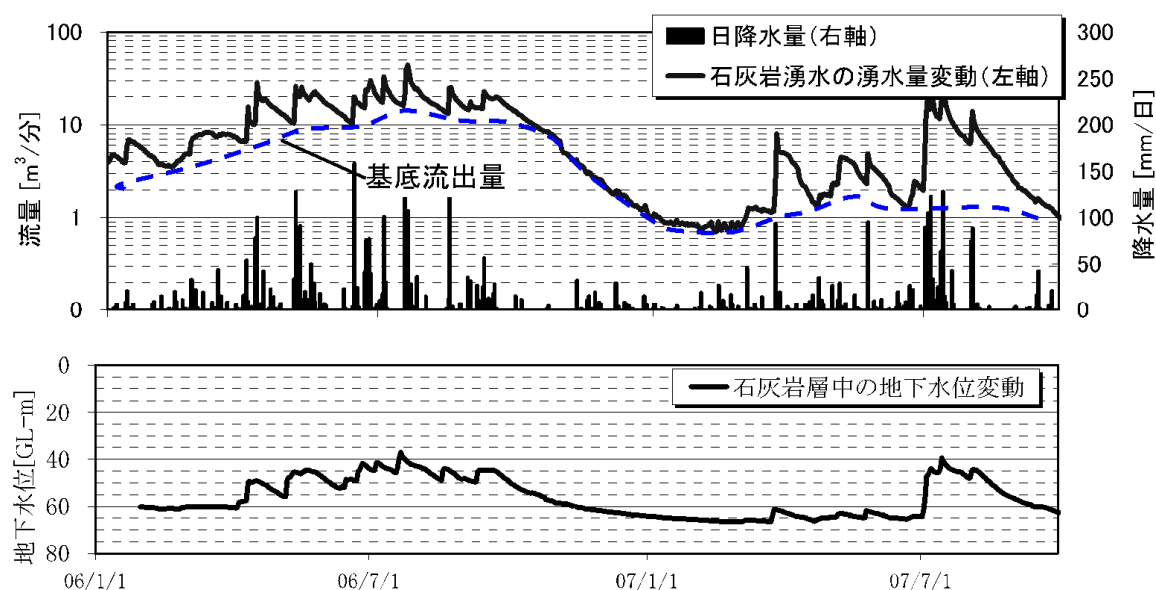


図-4 石灰岩地帯における地下水位観測孔の水位変動と近接する湧水地点の湧水量の変化の事例⁴⁾



図-5 石灰岩地帯におけるトンネル湧水の観測事例¹⁾

(5) 流域の水収支からみた一般地山と石灰岩地山の違い

一般的な山の流域の流出は、流域内に降った雨が直接沢筋に集まって流れる表面流出と一旦地下に浸透しやがて地下水として流出する基底流量からなります。降雨の少ない渇水期の沢水は地山からの地下水流出のみからなり、その流域の基底流量となります。そのた

め、沢水流量 $Q = (\text{降雨量 } P - \text{蒸発散量 } E) \times \text{流域面積}$ の関係から流域の水収支を求めることができます（図-6）。流域の基底流量のデータは、地山の地下水流出量や地下水涵養量を判断する有効なデータとなります。

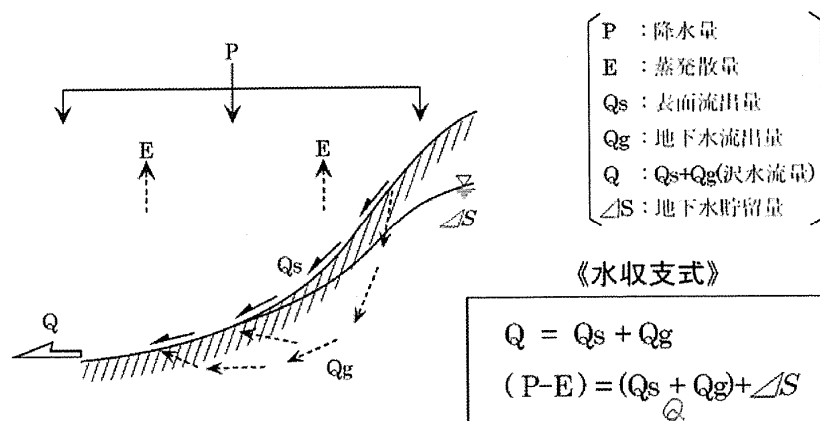


図-6 流域の水収支概念図⁴⁾

一方、石灰岩地山では、鍾乳洞を伴う地下河川のような水みちが存在することが多く、流域を越えた地下水流動を示すことから、地形上の流域内にもたらされた降雨よりも多くの湧水量が観測される場合が多い。

四国の石灰岩地域に隣接する吉田導水路トンネル近傍の湧出地点である観音水（名水百選）は、水収支的に見れば地形上の流域面積 0.3km^2 に対し、約 10 倍程度の集水域が無いと流出しえない豊富な湧出量となっており¹⁾、明らかに石灰岩中に分布する水みち（鍾乳洞など）を介して地下水が流出していることが伺えます。



写真-3 愛媛県西予市宇和町の観音水の湧出口（露口耕治氏撮影）

注：本湧水地点は、観音水と呼ばれ名水百選に選ばれています。日量 800t とされ、生活用水、農業用水として利用されています。隣接して施工された導水路トンネル工事の折には、湧水が減水したことがあります。

（6）石灰岩地山のトンネル工事に伴う湧水湧水の特徴と調査の着眼点

石灰岩地山でのトンネル施工は、鍾乳洞などの空洞を伴う水みちの一部でもトンネル切羽が通過すると、多量の地下水がトンネルに引かれて坑口に排水されるため、これまでに

湧水していた箇所が枯渇することとなります。石灰岩地帯中のトンネルの影響範囲は、空洞を伴う水みちの連続性に強く影響を受け、場合によって数 km 離れた湧水地点まで地形的な流域を越えて影響が生じた事例もあります。そのため、一般的に用いられている地形的な要素にもとづく水文学的方法（高橋の方法）によるトンネル影響範囲や湧水量を推定することは困難です。また、ポテンシャル理論に基づく水収支シミュレーションなどの手法でも地中に分布する空洞を伴う水みちの連続性やその水理特性を把握しない限り精度の高い予測が困難と考えられます。

石灰岩地帯でのトンネル工事に伴う水文調査は、第一にトンネルルートに石灰岩が分布するかどうか、更に、トンネルルートに分布する石灰岩と周辺湧水との連続性があるかなどを事前に把握するとともに、鍾乳洞などの空洞を伴う地下水系の連続性と石灰岩と接する周辺地質構造に起因する亀裂や断層などとの関連を把握することが、トンネル工事に伴う湧水湧水予測で重要なポイントです。特に、四国カルスト地域の付加体に分布する石灰岩地帯を掘削した地芳トンネルでは、断層破碎による地下深部から続く亀裂を介した酸性熱水の溶食により形成されたと見られる地下カルストの事例⁶⁾もあり、地下水の流動場となる地質構造の把握が重要な調査となります。

石灰岩の空洞（鍾乳洞など）を伴う水みちの把握では、湧水の連続観測による水収支、主成分分析による溶存成分濃度の比較やトレーサー調査などが上げられます。アクチバブルトレーサー⁷⁾などを用いれば 1～2km 離れた地点でも追跡が可能であり（図-7）、地中の水みちが完全には把握できなくてもトンネル工事の影響を判断するうえで有益なデータとなります。

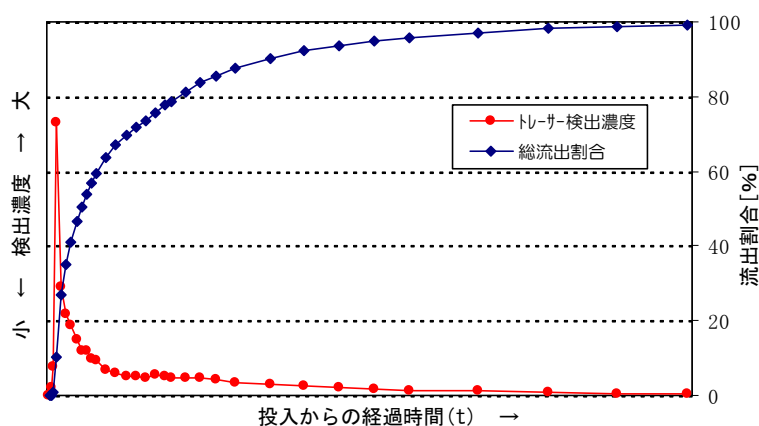


図-7 石灰岩地帯におけるアクチバブルトレーサー投入箇所から約 1km 離れた地点でのトレーサー観測事例¹⁾

注：アクチバブルトレーサー法では、In、La、Eu、Dy などの放射化断面積が大きい希土類元素をトレーサーとして用います⁷⁾。放射性化させた試料から放出される γ 線を計測して、トレーサー元素の定量を行う必要があります。

石灰岩地山におけるトンネル水文調査の着目点は以下からなります。

- ① トンネルルート上の石灰岩分布の確認、場合によってはトンネル中央部でもボーリング調査による確認が必要
- ② 広域の水文地質調査が必要で、広域の石灰岩分布と湧水地点の把握、石灰岩と接する周辺地質構造に起因する亀裂や断層などとの関連を把握
- ③ 必要に応じて地中の鍾乳洞分布調査
- ④ 湧水地点の水収支の検討から地形に現れない集水域の検討とトンネルルートとの関係の把握
- ⑤ 主成分分析による溶存成分濃度の比較解析による水収支との整合性の確認
- ⑥ トレーサー調査等による大きな水みちと湧水地点との連続性の確認

なお、本論は田村・栢木（2020）⁸⁾を参考に解説しました。

【引用文献】

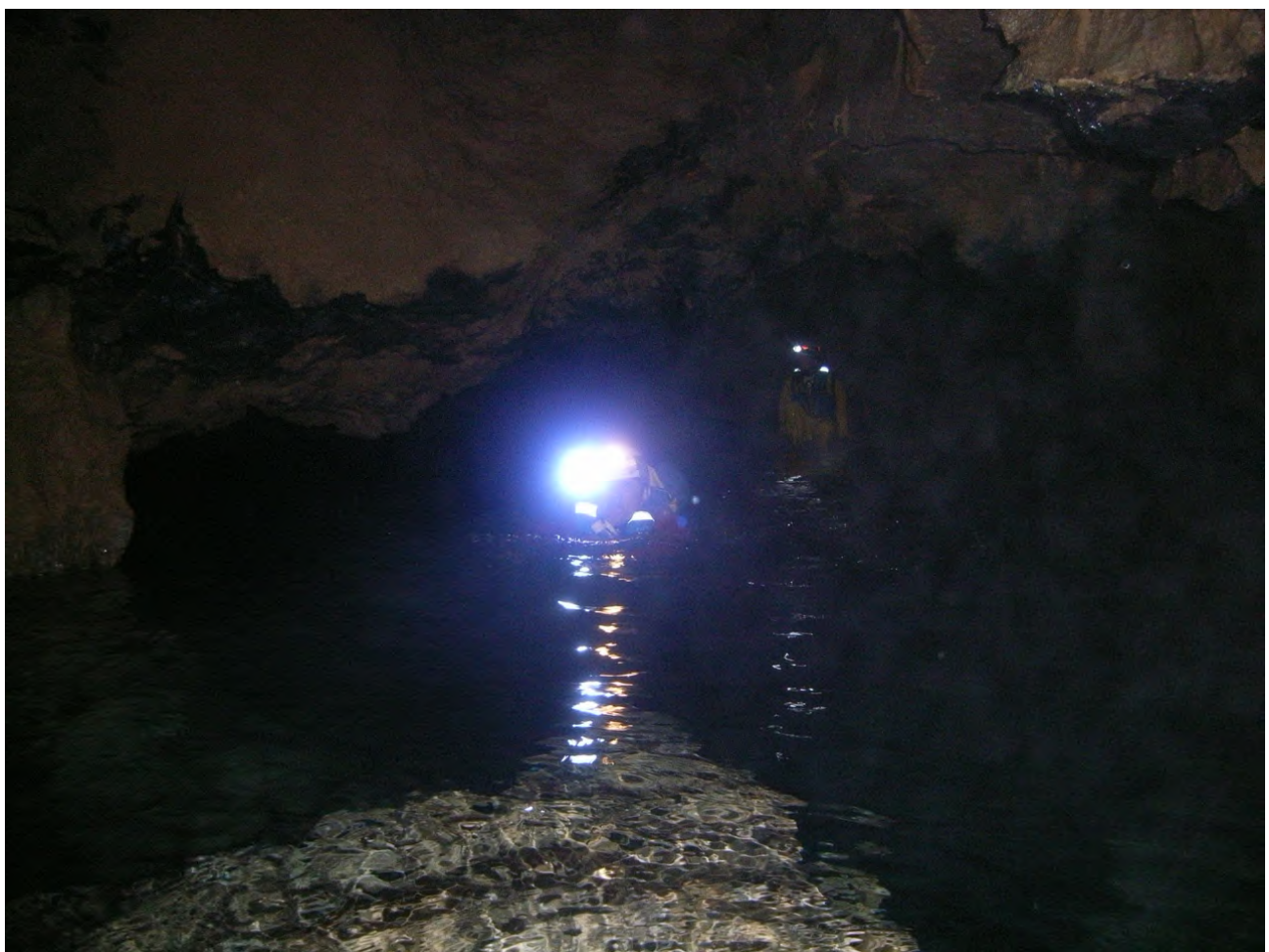
- 1) 田村栄治・露口耕治・栢木智明（2010）：6.7章 溶食を伴う石灰岩の諸問題、中国四国地方の応用地質学、日本応用地質学会中国四国支部編、p. 201-205.
- 2) 井倉洋二（1996）：4.6章カルスト地域の水文地形、水文地形学、古今書院、p. 217-225.
- 3) 漆原和子編（1996）：3章 カルスト地域の地下水、大明堂発行「カルスト」、p. 122-128
- 4) 寺本光伸・栢木智明（2011）：湧水の流出特性に基づく石灰岩地域の水文地質構造の推定、日本応用地質学会中国四国支部、平成23年度研究発表会発表論文集、p. 57-60.
- 5) 栢木智明（2017）：水文・調査と想定方法（山岳地域の流量調査と水文地質特性）、水文地質シリーズ3、扇状地水環境研究機構発行、p. 9.
- 6) 長谷川修一・渡辺弘樹・澤田臣啓（2008）：熱水溶液による石灰岩の溶食と可能性、地下水技術、第50巻、第12号、p. 9-14.
- 7) 地球環境調査計測辞典、第2巻 陸域編2（2003）：トレーサー試験法、(株)フジテクノシステム発行、p. 593-602.
- 8) 田村栄治・栢木智明（2021）：石灰岩地域の水文調査、日本応用地質学会中国四国支部令和3年研究発表会発表論文集、p. 1-6

（回答者 田村 栄治・栢木 智明）

次ページ以降に、参考までに鍾乳洞における洞内河川の写真を添付します。道内河川の写真をご提供いただきました各位に謝意を表します。



滋賀県 河内風穴の洞内河川 内径 5～10m 以上となる洞内河川
(撮影者 関 治 氏)



滋賀県 河内風穴の洞内河川 内径 5～10m 以上となる洞内河川
(撮影者 関 治 氏)



山口県 秋芳洞 撮影者 村上 崇史氏（山口県美弥市職員）



山口県 秋芳洞 撮影者 村上 崇史氏（山口県美弥市職員）



山口県 秋芳洞 撮影者 村上 崇史氏（山口県美弥市職員）



山口県 秋芳洞 撮影者 村瀬 健志氏（秋吉台アドベンチャーツアーズ）



山口県 秋芳洞 撮影者 村瀬 健志氏（秋吉台アドベンチャーツアーズ）



山口県 秋芳洞 撮影者 村瀬 健氏（秋吉台アドベンチャーツアーズ）