

Q ボーリングで石灰岩中に空洞がありました。空洞はどうしてできるのですか？

A 酸性水と石灰岩を構成する方解石が、長期に渡る化学反応を起こすことにより溶食されて空洞が作られます。

(1) 土壤と酸性水

石灰岩が溶食を受けるというのは、石灰岩を構成している方解石（ CaCO_3 ）が水に溶けるということです。二酸化炭素（ CO_2 ）を含まない純水状態においても CaCO_3 は溶けますが、 CO_2 を含む水（＝酸性水）ですと、効果的に CaCO_3 の溶解が促進されます。

雨水は、大気中の CO_2 を取り込みますが、その量はわずかです。そのような雨水をさらに酸性化させるのが土壌です。土壌中の CO_2 の生産には、バクテリアや菌類といった微生物の活動、植物の腐植、植物根の呼吸による CO_2 の放出などがあります。その土壌を雨水が通過すると CO_2 が混入し、酸性水が作られます（図-1）。また土壌を通過した雨水（酸性水）と石灰岩の溶解の過程の化学式は、一般に以下の式²⁾で表現されます。

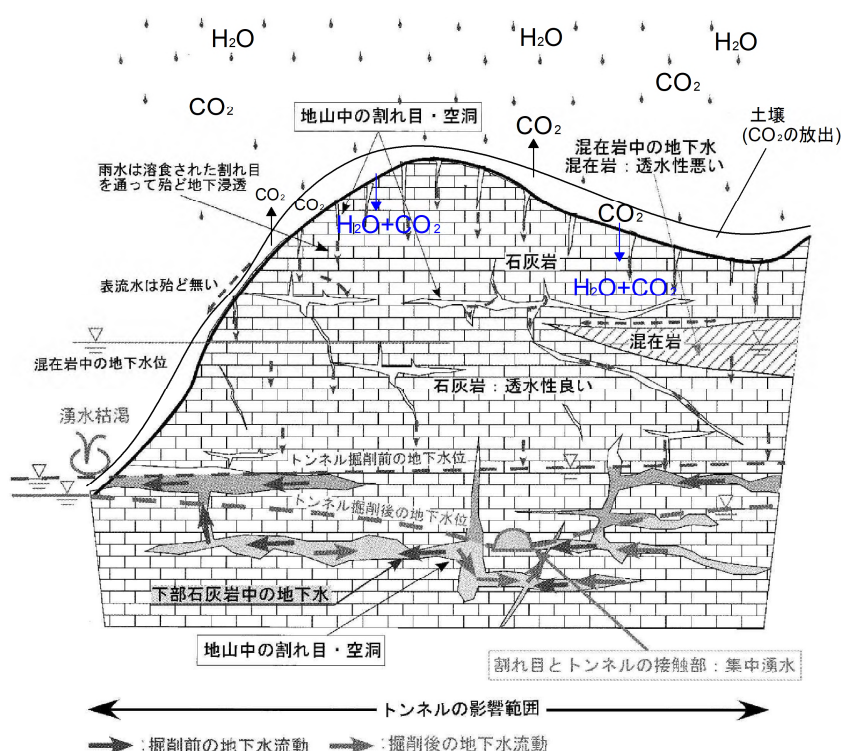
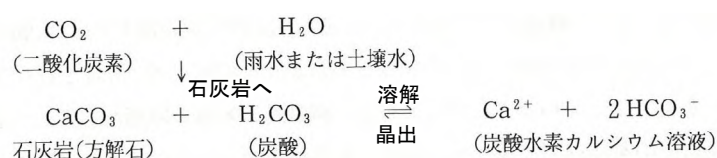


図-1 石灰岩の溶食モデル¹⁾



また、近年では、数百 m を越える地下深部での鍾乳洞が報告され、地下カルストと呼ばれています³⁾。地下カルストは地表水が直接流入したとは考えにくい深度にあり、長谷川他(2003)⁴⁾は、過去の火山活動に伴う酸性～中性の熱水が断層に沿って供給され、その熱水により石灰岩が溶食された可能性が高いことを報告しています。地下カルストでは、大規模な水みちが形成され、漏水や大湧水の原因となる可能性が高いことも併せて報告されています。

(2) 石灰岩地帯の地形

酸性水による石灰岩の溶食により形成された地形がカルスト地形です。カルスト地形の代表的なものとしては、カレンフェルト、カルスト凹地、鍾乳洞などがあります。

①カレンフェルト

地表に露出している石灰岩が溶食作用を受け、溶け残った部分が土壌中から突出したものの。墓石や羊の群れのような景観となります。

②カルスト凹地（ドリーネ、ウバーレ、ポリエ）

雨水が地下に浸透する通り道や地下の鍾乳洞の陥没によってできる凹地をドリーネ（シンクホール）といいます。直径数 m から数百 m の大きさになるものもあります。

ドリーネが徐々に拡大して隣接するドリーネと繋がった状態のものをウバーレ、ウバーレが更に大きくなり盆地状の広い平坦地になったものをポリエと言います。

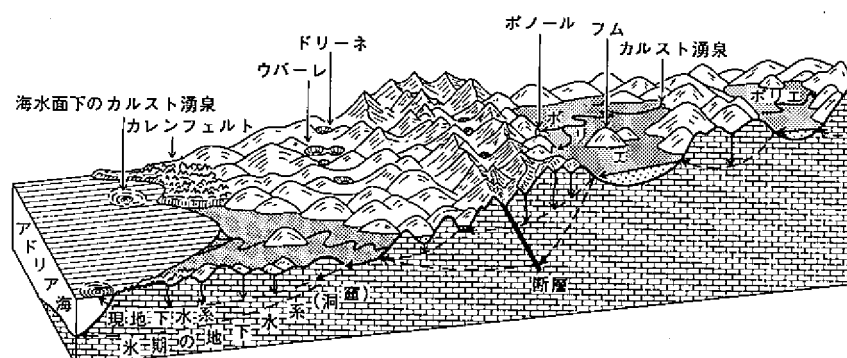


図-2 石灰岩地帯の断面図⁵⁾

③鍾乳洞

石灰岩中の割れ目に沿って、酸性水が流れることにより溶食が進行して徐々に空間が広がり、洞窟空間が作られていきます。この洞窟空間内で酸性水に溶けた CO_2 が空気中に抜けると、酸性水中に溶存していた炭酸カルシウム (CaCO_3) が方解石として晶出し、沈殿して鍾乳石となります。鍾乳石のある洞窟を鍾乳洞と言います。鍾乳洞はご存じのように、その風光明媚な景観から観光施設として親しまれております。



写真-1 鍾乳洞（高知県の龍河洞）

（３）土木地質における問題

石灰岩そのものは硬質なことが多く、石灰岩地帯では土木地質的に問題が少ないと思われるかもしれませんが、非常に厄介な地質となる場合もあります。

石灰岩中の空洞の形成は、酸性水による溶食によると前述しましたが、その空洞の①空間的拡がりが不規則である、②規模の大小が様々である、③進行性があるといった問題点があります。

石灰岩中の空洞が構造物の近接直下に分布すると、構造物の荷重で空洞が崩壊し、構造物に沈下等の影響を与える可能性があります。また、道路等では、輪荷重や振動により空洞が崩壊し、路面陥没といった被害が生じる可能性もあります。しかしながら、①、②を正確に把握することが非常に困難な場合が多く、構造物ごとに通常の構造物よりも詳細に調査を実施する必要がある、道路や鉄道などの連続した構造物の場合、路線に沿った面的な分布の把握が必要となります。

長期的な視点となりますと、③の影響を評価する必要があります。現在は問題がないと評価されていても、隣接して鍾乳洞がある場合、溶食の進行により鍾乳洞が崩壊したり、崩壊に伴い空洞が広がり構造物の荷重により崩壊する可能性があります。また、直下でなくても空洞の崩壊による陥没が構造物に影響を与える危険性も懸念されます（図-3）。

また、鍾乳洞は地下河川を形成することから、トンネル工事では鍾乳洞に遭遇すると多量の湧水が発生するなど難工事となります。地下水に関する難工事の事例としては、長谷川他(2003)⁴⁾は四国カルストの地芳トンネルで、約 2MP の水压を持つ突発湧水の発生や、中四国農政局南予農業水利事業（1997）での秩父帯中の石灰岩を貫く導水路トンネルで 1.5～2.7Mpa の高圧湧水と 19 か所のグラウト止水処理が必要となった難工事の事例を報告しています。

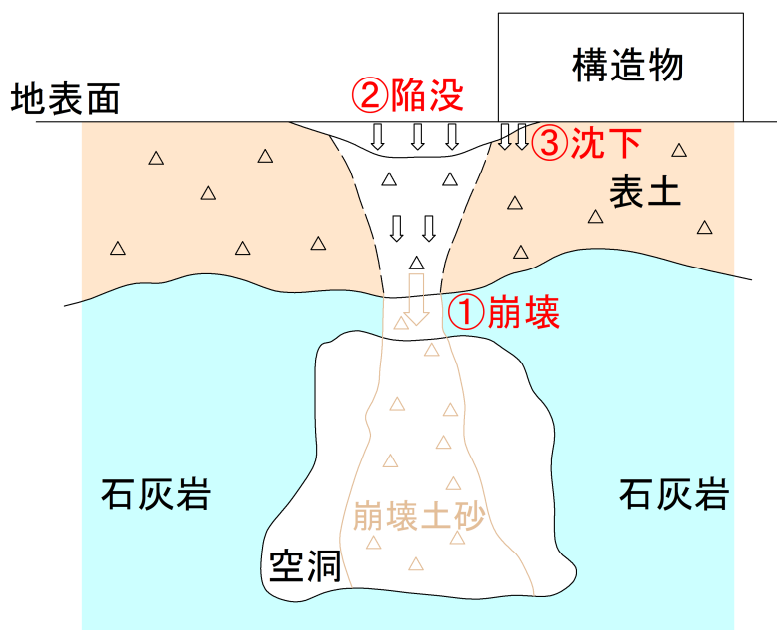


図-3 崩壊による沈下の影響 (模式図)

(4) 支部内の事例

応用地質学会中国四国支部内の地域においては、平成10年4月に岡山県川上郡備中町のカルスト台地内で、鍾乳洞の溶食進行による鍾乳洞の崩壊が原因と推定される地盤沈下被害が民家41件他、多くの構造物に発生しています⁶⁾。

また、高知県土佐市の県道39号土佐伊野線では、トンネル掘削中に鍾乳洞が発見されました。空洞は2段となっており、狭い空間の分布などで詳細は不明であるものの、図-4に示すような鍾乳洞の分布が報告されています。鍾乳洞の分布域ではトンネル支持力不足、周辺部は将来的に車両走行の振動や溶食進行で鍾乳洞の崩壊による沈下・支持力不足などの影響が想定され、最終工法として「RC断面補強梁+制振桁」が選ばれています。いわば、トンネル内の一部が橋梁構造という非常に珍しい構造が採用されています。

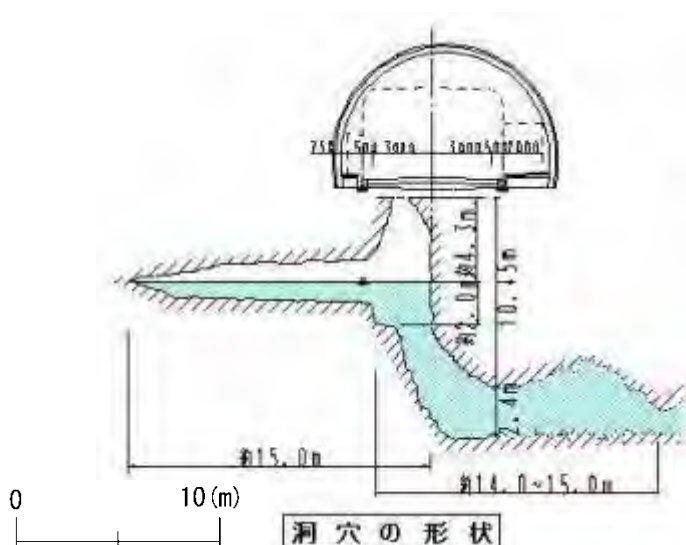


図-4 トンネル下の鍾乳洞分布形状⁷⁾

中国四国地方の主な石灰岩分布と鍾乳洞・カルスト台地の紹介

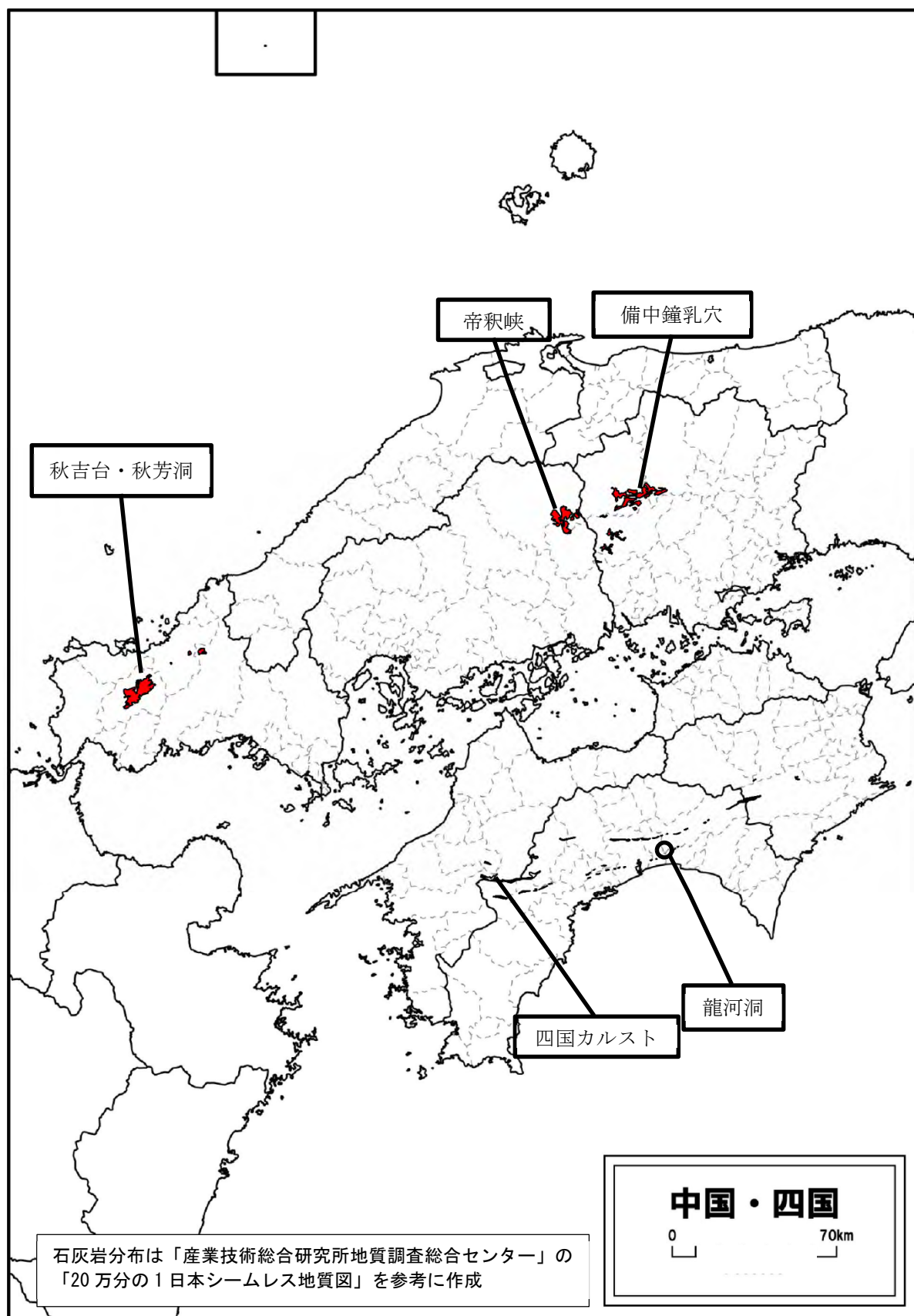


図-5 中国四国地方の主な石灰岩分布と鍾乳洞・カルスト台地位置図
(背景図「白地図専門店」<http://www.freemap.jp/> より)

山口県；秋吉台・秋芳洞

山口県美祢市に広がる日本最大のカルスト台地。日本 3 大カルストの一つ。台地面積は 54km² であり、無数のカレンフェルトやドリーネを有する他、400 を超える鍾乳洞があります。その中でも一番有名な鍾乳洞が秋芳洞となります。こちらも日本最大規模で日本三大鍾乳洞の一つです。総延長は約 9km、内 1km が観光ルートであるが、洞内には無数の鍾乳石の景観が見られます。



写真-2 秋芳洞



写真-3 秋吉台

高知県；龍河洞

高知県香美市土佐山田町にある鍾乳洞。日本三大鍾乳洞の一つ。総延長 4km、内 1km が観光ルートで、多くの鍾乳石が見られます。また弥生時代に洞内を住居としていた痕跡があり、天然記念物と国の史跡に指定されています。洞内では弥生式土器が鍾乳石と一体化したものも見られます。



写真-4 龍河洞

広島県；帝釈峡

広島県庄原市東城町及び神石郡神石高原町にまたがる溪谷。石灰岩台地が深く浸食されて形成されたカルスト地形が広がり、溪谷の比高は 200～300m です。天然橋である雄橋は、全長 90m、幅 18m、厚さ 24m、川底からの高さ 40m と日本一の天然橋で、世界三大天然橋として広く知られています。



写真-5 帝釈峡の雄橋

岡山県；備中鍾乳穴

岡山県真庭市にある大鍾乳洞。平安時代となる西暦 901 年に書かれた「日本三大実録」にもその名が記述されるなど、文献に残る日本最古の鍾乳洞として知られています。洞内には、大広間を始め、日本一の高さと言われる高さ 3m、直径 5m の大石筍、22 階層からなる「五重の塔」等無数の鍾乳石の壮大な景観が見られます。



写真-6 備中鍾乳穴⁸⁾

愛媛県～高知県；四国カルスト

愛媛県西予市から高知県高岡郡津野町に分布するカルスト台地。日本 3 大カルストの一つ。西から大野ヶ原、姫鶴平、五段高原、天狗高原の 4 地域に大別されます。カレンフェルトやドリーネなどカルスト地形特有の景観が楽しめます。また、標高 1,000 ～1,500m からの風景や高原植物、放牧された牛の群れなど見所が満載です。



写真-7 四国カルスト

【引用文献】

- 1) (一社) 日本応用地質学会中国四国支部編(2010)：「中国四国地方の応用地質学」，p. 204，一部加筆
- 2) 漆原和子編(1996)：カルスト その環境と人びとのかかわり，大明堂，p. 112，一部加筆
- 3) 鹿島愛彦，高橋治郎(1989)：四国西部法華津山地の地下カルスト(南予用水農業水利事業 隧道の地質学的研究－その 6)，愛媛大学紀要自然科学 D シリーズ(地学)第 XI 巻第 2 号，1-10
- 4) 長谷川修一，A. Khorsandi，渡辺弘樹，澤田臣啓(2003)：熱水溶液による石灰岩の侵食と応用地質，日本応用地質学会中国四国支部平成 15 年研究発表論文集，p. 67-70
- 5) 前出 2)，p. 95
- 6) 日吉祐介，田辺和康，富田武満，尾島勝(2001)：カルスト台地が危ない，土木学会中国支部第 53 回研究発表会，VII-29
- 7) 高知県：「天崎鍾乳洞トンネル」，
<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/170107/kakotopi-amasaki.html> (2018 年 11 月 22 日閲覧)，一部加筆
- 8) 右画像；真庭観光局公式サイト真庭観光 WEB：「備中鍾乳穴（びっちゅうかなちあな）」，
<https://www.maniwa.or.jp/web/index.cgi?c=spot-2&pk=3352> (2019 年 5 月 2 日閲覧)

(回答者 岡村 洋)