



Guidelines for Cave and Karst Protection 洞窟・カルスト保護ガイドライン

Second Edition
第2版



Xe Bang Fai cave, Laos

Photo by Steven Bourne

Guidelines for Cave and Karst Protection

洞窟・カルスト保護ガイドライン

Second Edition

2022

編集：David Gillieson, John Gunn, Augusto Auler and Terry Bolger

寄稿者: Augusto Auler, Terry Bolger, Ferdinando Didonna, Rolan Eberhard, Stefan Eberhard, Hein Gerstner, David Gillieson, John Gunn, Ana Komericki, Denise Matias, Jasmine Moreira, Ana Sofia Reboleira, Geary Schindel, Maria-Laura Tîrlă, Bärbel Vogel and Brad Wuest

Published by the International Union of Speleology (UIS:国際洞窟学連合)
and the International Union for Conservation of Nature (IUCN:国際自然保護連合) 発行

日本語訳・編集：後藤聡(Satoshi GOTO)

日本語訳：大河内垂由美(Ayumi OKOCHI)

日本語監修：石原与四郎(Yoshiro ISHIHARA),安藤奏音(Kanato ANDO)



Guidelines for Cave and Karst Protection 洞窟・カルスト保護ガイドライン

本ガイドラインの初版は 1997 年に IUCN によって発行された。この第 2 版は、国際自然保護連合 (IUCN) の支援を受けて、2022 年に国際洞窟学連合 (UIS) によって発行された。このガイドラインは、IUCN 世界保護地域委員会地下自然遺産専門家グループの洞窟とカルスト作業部会のメンバーによって統合・編集された。

本書で表明された見解は、必ずしも UIS、IUCN、その他の参加組織の見解を反映するものではない。

Copyright:

© 2022 UIS, International Union of Speleology and IUCN, International Union for Conservation of Nature

著作権: 2022 UIS、国際洞窟学連合、IUCN、国際自然保護連合

本書の複製は、出典を明記することを条件に、著作権者の書面による事前の許可なく、教育目的またはその他の非商業目的で行うことができる。

著作権所有者の書面による事前の許可なく、本出版物を再販またはその他の商業目的で複製することを禁じます。

推奨される引用形式:

Gillieson, David S., Gunn, J., Auler, A. and Bolger, T. (editors), 2022. *Guidelines for Cave and Karst Protection, 2nd Edition*, Postojna, Slovenia: International Union of Speleology and Gland, Switzerland, IUCN. 112pp.

National Library of Australia Cataloguing – in – Publication entry:

Gillieson, D., Gunn, J., Auler, A. and Bolger, T. (editors)

ISBN: 978-0-646-84911-9 (pdf)

書誌情報

洞窟-保護と管理

カルスト-保全と管理

カバー写真: Steven Bourne、使用承諾済

レイアウトと制作: David Gillieson and Jeremy Garnett

UIS について

国際洞窟学連合(Union Internationale de Spéléologie : UIS)はケイビングと洞窟学の国際機関である。UIS は非営利の非政府組織であり、科学的、技術的、文化的、経済的側面のすべてにおいて国際的な洞窟学を発展させ、調整するために、幅広い国籍の学術的、技術的な洞窟学者の交流を促進しています。UIS は、国際レベルで洞窟の保護を推進する主要な世界的科学・スポーツ団体であり続けています。国際自然保護連合 (IUCN) とも連携しています。要請があれば、UIS は国際的な洞窟学イベント、洞窟やカルスト地形を保護するための加盟国の取り組み、世界遺産登録のためのユネスコへの申請、カルスト機関の設立のための政府への申請、洞窟探検家や科学者のプロジェクトのための資金集めの取り組みなどを支援しています。UIS は、世界 57 の加盟国および 250 以上の機関や組織と協力し、2021-22 年に「国際洞窟・カルスト年」を宣言しています。

secretary@uis-speleo.org

<http://uis-speleo.org/>

IUCN について

国際自然保護連合 (IUCN) は、政府組織と市民社会組織の両方から構成される独自の会員制連合である。IUCN は、人類の進歩、経済発展、自然保護が共に行われることを可能にする知識と手段を、公的機関、民間団体、非政府組織に提供しています。

1948 年に設立された IUCN は、現在世界最大かつ最も多様な環境ネットワークであり、1,400 を超える参加組織と約 18,000 人の専門家の知識、リソース、リーチを動力としています。IUCN は保全に関するデータ、評価、分析を提供する主要な機関です。

IUCN は、その幅広いメンバーシップによって、ベストプラクティス (最善の方法) やツールを国際基準で創出支援し、信頼できるリポジトリとしての役割を果たすことができます。

IUCN は、政府、NGO、科学者、企業、地域社会、先住民族組織など、多様な利害関係者が環境問題の解決策を策定し、実行に移し、持続可能な開発を達成するために協力できる中立的な場を提供しています。

多くの協力者や支援者と協力しながら、IUCN は世界各地で大規模かつ多様な保全プロジェクトを実施しています。最新の科学と地域社会の伝統的な知識を組み合わせたこれらのプロジェクトは、損なわれた生息地を復元し、生態系を回復し、人々の幸福を高めるために活動しています。

www.iucn.org

<https://twitter.com/IUCN/>

目次

Document scope 文書範囲	ii
Contributors 貢献者	iii
Acknowledgements 謝辞	iv
The Nature of Karst Systems カルストシステムの性質	1
Introduction: Karst, caves and their protection はじめに: カルスト、洞窟、そしてその保護	1
Karst and rock solubility カルストと岩石の可溶性	4
Some values of karst and caves カルストと洞窟の価値	6
The special nature of karst environments and cave systems カルスト環境と洞窟システムの特殊性	122
Scales of management in karst areas カルスト地域における管理規模	14
Human Activities on Karst: Impacts and Mitigation カルストへの人間活動：影響と緩和	20
Recreational and adventure caving レクリエーションとアドベンチャー・ケイビング	200
Show caves 観光洞	34
Adventure and tourism activities on surface karst 地表のカルストでの冒険とツーリズム活動	49
Scientific research 科学的研究	52
Agriculture and forestry 農林業	57
Extractive industries 採取産業	65
Development and infrastructure 開発とインフラ	73
Water supply 水の供給	83
Managing karst in protected areas 保護地域におけるカルストの管理	88
Developing effective monitoring and mitigation 効果的な監視と低減策の開発	88
Management planning for karst protected areas カルスト保護地域の管理計画	92
Involvement of Indigenous peoples in karst management 先住民のカルスト管理への関与	98
Conclusions 結論	109
Further Reading さらなる読み物	110
Internet Resources インターネット上の情報	111
Scientific References 科学的参考文献	112
Appendix 1: Karst and Caves in Non-carbonate Rocks 付録 1：非炭酸塩岩のカルストと洞窟	115
Appendix 2: Complete Guidelines 付録 2：完全なガイドライン	125

Document scope 文書範囲

本書が示すガイドラインは、1997年に国際自然保護連合-IUCNによって発行されたオリジナルの「Guidelines for Cave and Karst Protection: 洞窟およびカルスト保護のためのガイドライン」の更新および拡張内容を提供している(参考文献を参照)。2021年に国際洞窟学連合(UIS)はガイドラインの第2版を発行することに合意し、その後IUCNもその出版物の後援に同意した。元のガイドラインは主に地質遺産に関する内容である。これは第2版でも引き続き重要な考慮事項であるが、洞窟やカルストの保全に関わる生物学分野の問題も取り上げている。

地表および地下のカルスト生態系の保護は、持続可能な開発のための国連2030アジェンダの目標15(陸上生態系の保護、回復、持続可能な利用の促進、森林の持続可能な管理、砂漠化との闘い、土地劣化の阻止と回復、生物多様性の損失の阻止)に特に関連している。これらのガイドラインは、持続可能な開発目標6(すべての人が水と衛生設備を利用できるようにし、持続可能な管理を確保する)にも関連している。世界人口の約10%が、個々の泉またはカルスト地下水のいずれかから水を得ているからである。新しいガイドラインは、カルスト地域や洞窟地域の地質多様性、地質遺産、生態系の保護と保全を特に考慮することにより、2020年にIUCNが発行した「保護地域および保全地域における地質保全に関するガイドライン」を構築および拡張したものである。

この出版物は、洞窟とカルストの探検家、科学者、管理者、教育者の世界的な組織である国際洞窟学連合が主催する、2021年から2022年の国際洞窟とカルスト年(IYCK)の期間中に発行されることが適切である。IYCKの3つの中心テーマは、探索、理解、保護である。この出版物はこれらのテーマの3番目に焦点を当てているが、私たちの目的は、洞窟とカルストの敏感さについての理解を高めることである。初版が出版されて以来、洞窟やカルストに関する知識は増え、喜ばしいことであるが、洞窟やカルストは世界中で人間の活動によって脅かされ続けている。実際、特別な存在でかけがえのなく、水文学的、生態学的、文化的に重要な洞窟やカルストの景観が継続的に被害を受けたり、脅かされたりしている。

このガイドラインの編集者および寄稿者の多くは、地質遺産専門家グループの一部であるIUCN-WCPA洞窟およびカルスト作業部会(CKWG)のメンバーである。CKWGの他のメンバー、IUCN SSC洞窟無脊椎動物専門家グループのメンバー、およびカルスト専門家の世界的なコミュニティのメンバーがこの出版物をレビューした。本書には、参考文献、有用なインターネット資料、および本書の作成に使用した科学文献のリストを掲載する。私たちは、このガイドラインが、洞窟とカルストの効果的な保護に不可欠な、特別な管理上の考慮事項についての知識に大きく貢献することを願っている。1997年のガイドラインはその道の「第一歩」であり、この第2版は一般レベルでの知識の向上を反映したものである。現在の課題は、世界中のカルスト地域で、より国家的かつ特定の場所に特化した戦略を開発することである。

Contributors 寄稿者

David Gillieson, School of Geography, Earth and Atmospheric Sciences, University of Melbourne, Clayton, Victoria, Australia
John Gunn, School of Geography, Earth & Environmental Sciences University of Birmingham, England, UK
Augusto Auler, Research Director, Carste Ciência Ambiental / Instituto do Carste, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil
Terry Bolger, Cave & Karst Specialist, Vientiane, Laos
Ferdinando Didonna, Member European Cave Protection Commission ECPC/FSE; Member IUCN/WCPA Geoheritage Specialist Group GSG, Italy
Rolan Eberhard, Natural and Cultural Heritage Division, Department of Primary Industries, Parks, Water and Environment, Hobart, Tasmania, Australia
Stefan Eberhard, Director, Subterranean Ecology Pty Ltd, Coningham, Tasmania, Australia; Adjunct Affiliate, University of New South Wales; Honorary Associate, Western Australian Museum
Hein Gerstner, Park Manager, Mulu World Heritage, Borsamulu Park Management Sdn Bhd, Mulu, Sarawak, Malaysia
Ana Komerički, Croatian Biospeleological Society, Zagreb, Croatia
Denise Margaret S. Matias, Biodiversity and People, Institute for Social-Ecological Research (ISOE), Frankfurt am Main, Germany
Jasmine Cardozo Moreira, Tourism Department, Land Management Grad Program, Ponta Grossa State University, Brazil
Ana Sofia Reboleira, Departamento de Biologia Animal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal
Geary Schindel, Chief Technical Officer, Edwards Aquifer Authority, San Antonio, Texas, USA and President, National Speleological Society, USA
Maria-Laura Tîrlă, Department of Regional Geography and Environment, University of Bucharest, Bucharest, Romania
Bärbel Vogel, President, German Speleological Federation; Adjunct Secretary, International Union of Speleology-UIS; Secretary IUCN/WCPA GSG Cave and Karst Working Group
Brad Wuest, President, International Show Caves Association, Natural Bridge Caverns, San Antonio, Texas, USA

Acknowledgements 謝辞

本ガイドライン第2版の査読および／または有益なコメントを寄せてくださった以下の方々に感謝する：

Gordana Beltram, Slovenia	Kyung Sik Woo, South Korea
Rosana Cerkvenik, Slovenia	Don McFarlane, USA
Phil Chapman, UK	Jasmine Moreira, Brazil
Mick Day, USA	John Parr, Laos
Martin Ellis, UK	Andy Spate, Australia
Hans Friederich, Malta	Tim Stokes, Canada
Jeremy Garnett, Top End Editing, Australia	George Veni, USA
Paul Griffiths, Canada	John Watson, Australia
Nadja Zupan Hajna, Slovenia	Nick White, Australia
Eko Haryono, Indonesia	Paul Williams, New Zealand

本ガイドラインに写真を提供してくださった以下の方々に感謝する：

Luciana Alt	Peter Hofmann
Steven Bourne	Tony Marsden
Philippe Crochet	Vitor Moura
Rob Eavis	John Spies
Csaba Egri	Rainer Straub
Paul Griffiths	
Vittorio Grobu	

カルスト水文システムのブロック図、カルスト集水域の空間的構成、およびカルストに対する人間活動の影響について、Maria-Laura Tîrlă に感謝する。

The Nature of Karst Systems カルストシステムの性質

Introduction: Karst, caves and their protection はじめに:カルスト、洞窟、そしてその保護

カルストと洞窟は、地球の進化と人類文明の発展の静かな証人である。洞窟とカルストは、地球の、長く波乱に満ちた地質学的歴史の重要な断片を保持・保護してきた。その断片とは、古代の鉱床、はるか昔の海、初期の生命体から、洞窟に適応したユニークな生物、絶滅した巨大動物の化石、人類の芸術の初期の姿まで、多岐にわたる。洞窟やカルストがなければ、我々はこれらを知ることはできなかったであろう。カルスト地形と洞窟は、地球上で最も見事で貴重な景観のひとつであり、固有の観光価値と経済的価値がある。洞窟とカルストを保護することは、人類と地球の歴史を守るために不可欠である。カルストと洞窟の知識を得ることは、カルストと文明の健全な共存を守り、最終的に私たちに返ってくるであろう環境への影響を、最小に抑え、回避するために不可欠である。カルストと洞窟の、安全かつ持続可能な利用、そしてそれらを適切に保護・管理する方法が本書の主題である。専門家にとって興味深い技術的な詳細を提供する一方で、一般読者にも理解しやすい、世界的な最善の保護・管理方法についての最新情報を伝えることも目的としている。

What is karst? カルストとは何か



国立公園およびユネスコ生物圏保護区にある Cares 峡谷は、高山にある裸地カルストの好例である。写真：David Gillieson.

「カルスト」という言葉は、石を意味する古代の言葉 *karra/gara* に由来し、一般的に「古典的カルスト」として知られる、現在のスロベニアとイタリアの国境地帯で初めて科学的に使われた。この地域には特徴的な地形があり、少なくとも部分的には、過放牧による土壌侵食のために露出した石灰岩が広範囲に広がっている。その後、「カルスト」は世界的に様々な環境に対して使われるようになったが、その中には古典的カルストとほとんど共通点がなく、表層

岩盤がほとんどないものも多い。カルストの定義は数多くあり、時には矛盾することもあるが、カルスト地域とは、高い岩石の溶解度と、優先的な経路（水路）に沿った地下水の移動の組み合わせから生じる、特徴的な地形と水文学によって形作られる、と考えるのが、良い出発点である。小さな経路を通る地下水の流れは層流であり、土砂を運ぶことはできない。時間が経つにつれて、その経路は溶解によって拡大する。乱流が発生するのに十分な大きさ（一般的には空隙幅が 10 mm まで）になると、水路として知られるようになる。カルスト地域の特徴的な地表の地形には、ドリーネ（一般に“陥没穴：sinkholes”として知られる）のような密閉された窪地や、より大きな平らな床の溶食盆地（ポリエ：polje）がある。沈降流（吸込み河川:Sinking streams）、涸れ谷、湧水もよく見られる。米国環境保護庁は、洞窟とカルストに関する便利な用語集を作成している（インターネット資料を参照）。



Cares 峡谷とは対照的に、湿潤温帯のニュージーランド・King Country にあるカルストのほとんどは、厚い火山灰被覆の下にある。原生林の多くは取り除かれ、牧草地に取って代わられている。写真：John Gunn.

What is a cave? 洞窟とは何か？

洞窟とは、地球の物質（岩石や堆積物）の中に自然に形成された空洞のうち、人間が立ち入るのに十分な大きさのものである。この定義により、洞窟は、人工的なトンネルやその他の建設された地下空洞（誤って洞窟と呼ばれることもある）と区別される。最小空洞寸法は、探検者の体格に依拠するが、直径 0.3 m が妥当な近似値である。別の定義である、最小空洞長 5 m も一般的に適用されるが、5 m より短い洞窟は、かつてもっと長かった通路の名残である可能性があり、そのほとんどは浸食によって短くなっている。前節で述べたように、カルスト洞窟は溶解によって形成され、空洞の大きさは 1 mm から数十 m の範囲にわたる。一般に、表成洞窟（Epigenic caves）と深成洞窟（Hypogenic caves）に大別される。表成洞窟は、水が重力によって地表から下降し、可溶性の岩石を溶解することによって形成される。炭酸塩岩の場合、二酸化炭素が水に溶けてできる炭酸によって溶解する。対照的に、深成洞窟は、下層の岩石層から洞窟地帯に流れ込んできた、上方に流れる流体によって形成され、近辺の地表から派生する炭酸水は関係しない。これらの流体は、遠くの水源（透水性の低い地層によって閉じ込められている）または深い水源（一般に地熱部）から発生し、その上またはすぐ隣の地表からの涵養とは無関係である。その結果、ほとんどの深成洞窟は、地表にほとんど、あるいはまったく表れていない。カルスト洞窟の第三のタイプは、炭酸塩岩が海岸で露出し、淡水と海水の境界で溶解が起こる場合に形成される。これらはフランク・マージン洞窟(Flank margin caves)と呼ばれる。

カルスト洞窟（溶解によって形成される）に加えて、他の非化学的な要因によって形成される様々な洞窟がある（付録 1 を参照）。海洋領域では、事実上すべての硬い岩の海岸には沿岸洞窟（海食洞）があり、その大部分は物理的なプロセスによって形成されている。陸上では、風が洞窟の発達に寄与し、堆積物の地下の物理的浸食が管を形成する。世界には、溶岩の噴火の際に形成される火山洞（溶岩洞）が何千もあり、これらの多くは地表近くに形成されるため、崩落ドリーネ(collapse dolines)が見られるのが一般的である。アイスランドの Vatnajökull 国立公園のように、氷河の下の氷の中にも洞窟が形成され、中に入ることができるところもある。中国貴州省の黄果樹で観察されるように、堆積中に形成されている洞窟は、トッファやトラバーチンの中でも見られる。



活動的なエピジェニック洞窟の一例で、二次生成物と碎屑堆積物が見られる。Baradla 洞窟は、ハンガリーのユネスコ世界遺産「Aggtelek と Slovak のカルストの洞窟群」にある。この洞窟はユネスコ生物圏保護区とラムサール条約登録地でもある。写真：Csaba Egri。

Protection of caves and karst 洞窟とカルストの保護

国際自然保護連合（IUCN）は、保護地域を「明確に定義された地理的空間であり、関連する生態系サービスや文化的価値とともに、自然の長期的な保全を達成するために、法的またはその他の効果的な手段によって、承認・専用化され、管理されるもの」と定義している。さらに、6 つの管理カテゴリと 4 つのガバナンス・タイプを定めている（インターネット資料を参照）。地形と洞窟は、カテゴリⅢの天然記念物またはその特徴「特定の天然記念物（地形、海山、海中洞窟、洞窟のような地質学的特徴を持つもの、または古木林のような生ける機能を持つもの）を保護するために確保される地域」として、特に言及されている。この種の保護区における地表のカルスト地形や洞窟は、十分に文書化され、明確に保護されることが期待される。しかし、他のカテゴリが割り当てられる洞窟やカルスト地形は、保護地域全体のごく一部であったり、他の興味深い特徴を保護することが目的であったりする場合、同程度の注意が払われない可能性がある。このような問題は、保護区の規模や種類を問わず発生する。例えば、野生動物保護団体が、

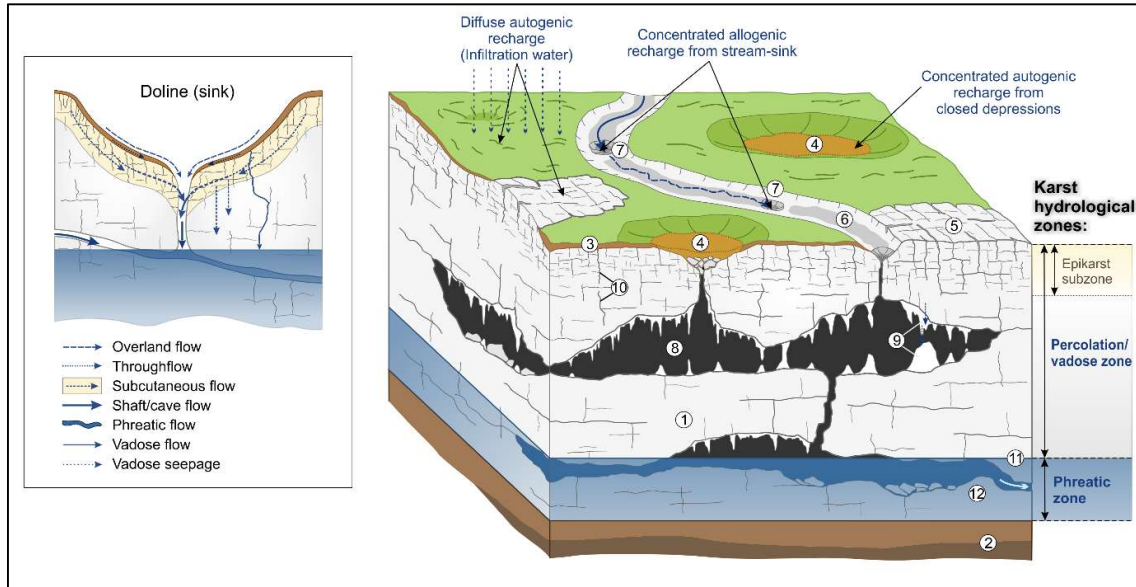
動植物の管理を主な目的として土地を購入する場合がある。その地域の一部に炭酸塩岩が分布している場合、そこにはカルスト地形や洞窟が存在する可能性が高いが、所有者にとっては直接的な関心事ではないかもしれない。このような状況は世界的に見られ、国連教育科学文化機関（ユネスコ）の 4 つの保護地域 {生物圏保護区, 23%; ラムサール条約登録地, 5%; 世界遺産登録地 (WHP), 7%; ユネスコ世界ジオパーク, 38%} 指定によって、炭酸塩または蒸発岩(evaporite)カルストの地域を含む保護が提供されている。しかし、これらの数字には、ほぼ全体がカルスト地形である地域 (例: スロベニアの Škocjan 洞窟群 WHP、ここはラムサール条約登録地であり生物圏保護区でもある) もあれば、大部分が非カルスト地形で、小さな石灰岩の領域がある地域 (例: アルジェリアの Tassili n'Ajjer WHP) も含まれているため、非常に多くの内部変数が隠されている。さらに、洞窟やカルストがある場所が、他の特徴のために保護されている場合にも問題が生じる。例えば、洞窟やカルストを含むいくつかの WHP は、その文化的関心のために世界遺産に指定された。国際自然保護連合 (IUCN) または他の組織によって指定されたかどうかにかかわらず、カルストを含むすべての保護地域が、本ガイドラインに記載されているように、カルスト環境の特別な性質を尊重する方法で管理されることが重要である。

Karst and rock solubility カルストと岩石の可溶性

高い溶解度を持つ主な岩石のグループは、炭酸塩岩 {石灰岩、苦灰石(dolomite)、大理石} と蒸発岩 (塩、石膏、硬石膏) である。特定の条件下では、珪酸塩岩は十分に溶解し、カルスト地形や洞窟が形成されることがある。洞窟は炭酸塩岩や蒸発岩地帯に多く見られるが、洞窟のないカルスト地形もある。イギリスのイングランドでは、白亜紀とジュラ紀の石灰岩に覆われた地域に、涸れ谷やドリーネのような表層カルスト地形があり、いくつかの沈降流もある。地下水の追跡により、湧水への急速な流れが確認されているが、長さ 50 m を超える水文学的に活発な洞窟系は 1 つしかない。

炭酸塩岩や蒸発岩が非石灰質岩の下に潜り込む場所では、水の循環が続き、洞窟が形成されることがある。アメリカのケンタッキー州では、石灰岩の上に砂岩が重なっている。世界最長の洞窟であり、世界遺産にも登録されているケンタッキー州の Mammoth 洞窟は、その大部分が石灰岩以外の岩石の下に広がっている。層間(interstratal)カルストの場合、地表の非カルスト岩の帽岩 (caprock) ドリーネは、深部にあるカルスト化した岩石の崩壊によって引き起こされる。それ以外の場所では、幅広い通路が地下に存在することを示す、地表の証拠がないことがあり、その最たる例のひとつが、イギリス、ウェールズの Ogof Draenen である。70 km の既知の通路のうち、炭酸塩岩が地表に露出している地域にあるのは 15% 以下で、残りの洞窟は、地表の地形からはカルスト地形とは考えられない地域の下にある。

表成洞窟は、水が地表から下降して形成され、炭酸塩岩の場合は二酸化炭素が水に溶けてできる炭酸水によって溶解する。蒸発岩は酸を必要とせず、純粋な水で溶解する。対照的に、深成洞窟は深部から上がってくる酸性の熱水によって形成される。深成洞窟は一般的に、地表にはほとんど、あるいはまったく表れない。カルスト地形がほとんどない地形の下にあり、崩壊によって形成された 1 本の堅穴からしか入れない、アメリカ・ニューメキシコ州の世界遺産、カールズバッド洞窟群国立公園内の Lechuguilla 洞窟は、洞窟の総延長が 242 km 以上にも及び、高低差は 480 m もある。場合によっては、平坦で構造物が見られない石灰岩台地であるトルコの obruks のように、深成洞窟の生成過程で大きな空間が形成され、それが崩壊して幅も深さも数百メートルに及ぶ窪地が形成される。



カルスト水文システムの模式図。図は Maria-Laura Tîrlă と John Gunn による；挿入内容は Gunn (1985) を編集。キー：1 - 炭酸塩岩盤（石灰岩など）；2 - 不浸透性岩盤；3 - 土壌被覆；4 - ドリーネ；5 - カレン；6 - 涸れ谷；7 - 吸い込み穴（ポノール）；8 - 洞窟；9 - 二次生成物；10 - 節理または割れ目；11 - 地下水位；12 - 水没部。

要約すると、一般的にカルスト地形と考えられている地形は、地表に特徴的な地形（ドリーネ、涸れ谷(dry valley)、カレン）があり、その下に洞窟がある。しかし、地表にカルスト地形があっても洞窟がない地域や、深部に洞窟があっても地表にカルスト地形がない地域、あるいは層間カルスト地形しかない地域もある。

最も顕著なカルスト地形は、炭酸塩岩や蒸発岩が広範囲にわたって地表に露出している場所（オープンカルスト）であるが、その多くの地域では、地形形成の過程で堆積した未固結堆積物に覆われている。これらは覆い(mantled)カルストまたは被覆(covered)カルストと呼ばれ、地形が進化したか、堆積物や若い岩石によって埋没・埋蔵された埋没(buried)カルストとは区別される。ほとんどの場合、この埋没は流体や堆積物の移動を減少させ、このような環境は化石(fossil)カルストまたはパレオカルスト(palaeokarst)と呼ばれる。このような不活性の通路は単に「化石」と呼ばれるが、厳密には正しくない。これらは「残って」おり、ほとんどの場合、二次生成物（洞窟内に形成されるすべての鉱物堆積物の総称）を育てる浸透水の流入経路、または洞内の天井や壁の機械的破壊の結果として、まだ進化しているからである。



アメリカ、ニューメキシコ州、Lechuguilla 洞窟（カールスバッド洞窟群、世界遺産）の Chandelier Ballroom にある壮大な石膏。Lechuguilla 洞窟は深成洞窟で、200 km 以上の洞窟が 堅穴から通じている。写真：Rainer Straub.

Some values of karst and caves カルストと洞窟の価値

世界的な生物多様性と地質学的多様性を保護する戦略の一環として、カルスト地形と景観の例を残すことの重要性に加え、カルスト地域は一般的に経済的、科学的、文化的価値を持つ。そこには多様な要求があり、それらは互いに対立する可能性がある。

カルストには多くの自然資源があり、貴重な生態系サービスを提供している。例えば、人間が消費する淡水、水生生態系と農業灌漑、地表と地下環境の両方における生物多様性、レクリエーションと文化的価値の高い景観と洞窟、農業生産の基盤となる土壌などである。カルストは二酸化炭素 (CO₂) の天然の吸収源として機能し、気候変動の緩和にも役立っている。これらすべての資源と生態系は、相互に密接に結びついているため、孤立したものとして考えることはできない。これらの複雑なフィードバック機構により、カルスト生態系の一つの要素への影響は、他の要素、あるいは生態系全体に予期せぬ影響を及ぼす可能性がある。

カルストの水資源は、何千年もの間、人類の消費活動にとって重要なものであった。それらには、農業（灌漑や養殖）用水、そしてここ 100 年の間には水力発電も含まれる。カルスト湧水は、他の岩石から湧き出る湧水よりも規模が大きく、信頼性が高い傾向があるため、人類の居住形態はこれらの水源に強く影響されてきた。紀元前 450 年までには、中国ではカルスト湧泉が灌漑に利用され、中央アメリカのマヤ民族は洞窟やセノーテ（水で満たされたドリーネ）を広く利用していた。2019 年には、世界の人口の約 10%、約 7 億人がカルストから飲料水を得ていると推定された。カルスト地下水の最大の消費国は中国で、約 1 億 5,000 万人が主にカルスト地下水に依存している。2 番目に多いのはアメリカで、主に農村部に約 5,000 万人が住んでいる。米国テキサス州のエドワーズ(Edwards)帯水層は、サンアントニオなどの大都市を含む数百万人に水を供給している。

カルスト地下水を湧水から利用者まで運ぶには、かなりのインフラが必要である。2,000 年以上前、11 本の長い水道橋が、16 km から 91 km の距離にわたって湧水をローマの旧市街に供給していた。ヨーロッパ最大のカルスト地下水供給システムは、オーストリアのウィーンで 170 万人の市民に供給されているもので、2 つの主要な水道橋のうち最初のものが 1873 年に開通した。20 世紀から 21 世紀にかけて、クロアチアとボスニア・ヘルツェゴビナの Dinaric カルストや中国など、多くのカルスト地域で同様の大規模な土木工事が行われた。湧水の上流では、カルスト地域は地表水の欠如が無いことで、その開発が制限されてきた。石灰岩が比較的高い空隙率と浸透性を持つ地域では、ボーリング孔が良好な水源を供給する可能性がある（例えば、イングランドの白亜紀石灰岩）。しかし、多くの石灰岩では、ボーリング孔が生産的である可能性は 1~2%しかないと推定されている。工業汚染物質も農業汚染物質も、カルストの地下ネットワークを通じて急速に運ばれる可能性があるため、効果的な土地利用管理がきわめて重要となる。

カルスト地域は、セメント製造用の石灰岩の供給源として使われ続けており、都市開発のペースが増すにつれて、高純度の石灰岩や骨材としての大きな需要が生まれている。石灰石はまた、農業用石灰、鉄鋼生産、塗料の充填剤、プラスチック、製薬産業にも使用されている。採石は、洞窟とその生成物を破壊し、洞窟生物を絶滅させ、水質を悪化させる可能性がある。ただし、注意深く管理すれば、その影響を最小限に抑えることができる。アメリカ大陸（主にアメリカとブラジル）の洞窟では、18 世紀から 19 世紀にかけて、硝石（硝酸カリウム）の採掘が火薬の生産に不可欠であった。何千もの洞窟で硝酸塩を豊富に含む土壌が採掘され、その硝酸塩が取り除かれた土壌を洞窟に戻すことで再生させる方法をポルトガル王室が出版した。

肥料用の洞窟グアノの採掘は世界的に行われていた。人工肥料や化学肥料が導入される以前は、鳥やコウモリのグアノを原料とする天然肥料や有機肥料が広く使われていた。鳥類のグアノは、インド洋のナウルやクリスマス島といった太平洋の島々で採掘され、コウモリのグアノは、有機肥料の供給源として、現在でもテキサスのいくつかの洞窟で採掘されている。ボルネオの Niah 洞窟では、洞内のアナツバメのグアノが今でも肥料として採掘されており、その洞壁にはより有用なアナツバメの巣もある。中国ではボーキサイト、鉛亜鉛、石炭など、カルストに埋没する鉱物の採掘が広く行われており、ブラジルの Chapada Diamantina 地域では、19 世紀から 20 世紀初頭にかけて洞内で大規模なダイヤモンドの採掘が行われていた。また、石筍や鍾乳石をはじめとする二次生成物は、土産物として販売するために違法に持ち出されたこともある。

カルストは地形的な内部変化が大きいため、一般的に地理的多様性が高い。そのため、カルスト以外の景観よりも潜在的にはより多様な景観が存在し、塔状(tower)カルストのように周囲から比較的隔離されていることも多い。洞窟は風雨から保護されている。それゆえに、地表の風化により消滅したり、土壌・植生により覆われたりすることがなく、他の地域では見ることが出来ない地質学的にユニークな 3D の景観を提供することができる。紀元 20 世紀後半から、カルストは石油貯留層から容易にアクセスできる地表として利用されてきた。熱帯環境では、カルストは希少種や固有種を含む動植物の生物多様性が、地上と地下の両方で非常に高い。カルスト地形の中には、生物の避難所として機能しているものもある。地表に生息する近親種では駆逐されえるほどの環境変化を耐え抜き地下に留まった種や、ドリーネや洞口により形成された涼しく湿った微気候を呈する地表に生息する種がいる。

コウモリはおそらく洞窟に最もよく関係する生物であろうが、その他にも多くの、しばしば固有の脊椎動物や無脊椎動物がカルストに生息する。その中には個体数が少ないものや、地下環境の不変性に高度に適応したものもある。すべてのカルストではないが、多くのカルストでは、地下の環境条件はほぼ一定であり、洞窟の種は地下の環境変化に対してほとんど耐性がないかもしれない。ベトナムでは、絶滅危惧種の霊長類であるデラクールラングール (*Trachypithecus delacouri*) が、いくつかのカルスト地域の固有種である。ベトナムとラオスの国境にある広範なカルスト地形では、石灰岩の大きなブロックが川によって隔てられており、種の分散にとって効果的な守りとなっている。少なくとも 6 種の葉食猿（ラングール、*Trachypithecus* spp.）がおり、それぞれが石灰岩の特定のブロックにおける固

有種になっている。同様に、中国の広西チワン族自治区では、生息地の分断がシロテテナガザル (*Trachypithecus leucocephalus*) の個体数を分けている。他に類を見ないような地下環境は、硫酸による作用で発達する深成洞窟によって形成されることもある。これらの洞窟には、多くの場合完全に隔絶され、地表の環境から完全に独立して進化した、非常に珍しい生物群集や生態系が存在する。ルーマニアにある、硫化水素が豊富な Movile 洞窟には、少なくとも 51 種が生息しており、そのうち 34 種は固有種である。Edwards 帯水層には、高度に適応した魚やサンショウウオを含む 60 種以上の生物が生息しており、中には水深 250 m 以上の井戸からのみ確認されている種もある。

洞内の保護された堆積環境は、化石の骨の部分や DNA の保存を容易にしている。動物は洞窟に落下したり、水を求めて入ったり、流されて入り込むことがあり、洞内で蓄積されたその遺骨は、時間の経過とともに変化する動物相の記録を提供する。洞内のコウモリのコロニーやフクロウのねぐらは骨の蓄積に貢献し、小型の脊椎動物相の良いサンプルを提供している。哺乳類が洞窟を隠れ家、冬眠場所、子供の巣穴として利用し、一部の個体はその場で死亡することが避けられないため、成長系列や捕食者と被食者の関係を調査することができる。これらすべての死骸の堆積環境から得られる手がかりは、気候に対する長期的な動物相の変化を描き出すものであり、現代の急激な気候変動や人口増加、生息地の分断を考慮し、今後、生物種が存続できる場所を予測するためのツールを開発するのに役立つ。化石の記録は、気候に対する長期的な動物相変化のパターンを評価し、予測モデルにとって意味のあるデータを提供する唯一の手段である。

過去の気候条件の推定は、私たち人類を含む地球上の動植物種の分布パターンの変化に対し、何らかの説明を与えるという点で、自然科学分野で長い間関心を集めてきた。1960 年代以降、地球温暖化がもたらす可能性のある大気を類推する手段として、過去の気候の再現に再び関心が集まっている。洞窟生成物科学は、古代の気候記録を安定して保存するために発展してきた。洞内の石筍は、多くの場合、年単位で層ごとに積み重ねられるため、このような石筍の縦断面からは、数千年から数万年にわたる微細層序のデータが得られる。ウラン系列年代測定は、最大で 65 万年前まで (U-Th)、数百万年前 (U-Pb) の絶対年代を提供する。安定同位体分析は、これらの時間尺度における気候変動の予測ができる。中国の洞窟から得られた酸素同位体の記録は、東アジアモンスーンの強さと地球全体の気候の変化に関する長期的なデータを提供してきた。この記録は、過去 64 万年間をカバーし、地球上で最も長い継続的な気候記録の一つである。地中海沿岸の洞窟に分布する二次生成物の過成長は、鮮新世までさかのぼる過去の海水準変動の、極めて詳細な記録である。アマゾンの熱帯雨林では、石筍の炭素同位体から森林の回復力に関する重要な情報が得られた。これらの洞窟堆積物は、将来の気候予測の手がかりを提供することができる。世界的な海面上昇により、人口の多い沿岸地域が消滅することが避けられない問題であることを考えると、非常に価値がある。



滴下水による二次生成物中の方解石の堆積は、酸素同位体化学の変化を長期にわたって記録する貴重な資料となり、過去の気候の代理記録となる。写真：Csaba Egri.

カルストと洞窟は、景観とレクリエーションの価値が非常に高い。2021 年末現在、炭酸カルストや洞窟を有する世界遺産は 44 カ国に 76 件、ユネスコ世界ジオパークは 26 カ国に 68 件ある。観光は、開発・未開発の洞窟、地表の景観の利用を含め、いくつかのカルストにおける主要な経済活動であり、それによって地域雇用を生み出している。洞窟観光の成長は、19 世紀後半に蝋燭ランタンによるささやかな始まりから、LED ライトや電車が採用される今日に至るまで、洞窟の利用も、洞窟に与える影響の範囲も劇的に拡大している。世界にはおよそ 1,600 の観光洞があり、中には毎年数十万人の観光客が訪れるものもある。例えば、世界遺産のマンモス(Mammoth)・ケイブ (アメリカ) には 50 万人、スロベニアのポストイナ(Postojna)洞窟には 100 万人以上の観光客が訪れる。これらの統計は、一般公開されている洞窟が 300 以上あると思われる中国の観光洞の数を恐らく過小評価している。2019 年には観光洞を訪れる客は 1 億 5,000 万人に上り、世界中で 7 万人もの人々が洞窟観光業に従事している可能性がある。遠隔地からの洞窟鑑賞は、解説、動画、写真を掲載したオンラインサイトによっても可能であり、その制作が地域経済の重要な構成要素となっているところもある。このようなメディアは、洞窟やカルストが観光用として、また気にかける必要のある環境としての価値を高めている。

洞窟はかねてから、シェルター、生活空間、そして紛争時の避難場所として使われてきた。また、神社や寺院としても利用され、畏敬の念を抱かせる神聖な空間として、また日常生活から切り離された場所として宗教的な儀式の場を提供する。洞窟はしばしば曖昧な空間とみなされ、保護と避難の場所の両方となる。その一方で、人を捉え、閉じ込める場所にもなる。多くの文化において、大地の内側の場所は女性として扱われてきており、洞窟もまた母なる大地の子宮を表すものとして認識され、誕生と再生に関連している。洞窟に閉じ込められた人々が、何らかの試練を経て解放されるという神話もある。神聖さというものは、樹木、泉、山など、他の多くの自然の形態や物質に投影される

かもしれないが、先史時代において最も古くから知られている神聖な場所は、フランスの Dordogne 渓谷にあるような、自然に形成された洞窟である。タイの仏教僧は、瞑想の修行をするための静かな隠れ家として洞窟を探し求める。僧侶が有名な瞑想マスターになれば、その信者たちは洞窟をより豪華な祠に発展させ、彼を偲ぶのである。

自然洞は古くから崇拜の対象であり、神話や宗教の物語に頻りに登場する。哲学者 Porphyry（西暦 234-305 年）は、神殿ができる前は、宗教的儀式はすべて洞窟で行われていたと考えた。彼は、神殿の建築様式は洞窟の暗闇と単一の入口を模倣したものであり、1 年の特定の時期に洞窟に光が差し込むことには儀式的な意味があると主張した。聖なる洞窟には、特別な癒しや占いができる聖なる泉がある場合もある。

ブラジルのようなカトリックの国では、洞内の祠や教会全体が人気の巡礼地となっている。Bom Jesus da Lapa の大きな洞窟には、1600 年代後半から礼拝の場となっている 2 つの教会があり、毎年 100 万人以上が訪れている。フランスの Lourdes 洞窟は、1858 年に聖母マリアが出現した場所としてローマ・カトリック教会に認められており、毎年数百万人の観光客を受け入れている。



洞窟やカルストは、景観的にもレクリエーション的にも非常に高い価値を持つ。スロベニアの Krizna Jama にある手つかずの地底湖を探検する 2 人の洞窟学者。写真：Csaba Egri。

東南アジアには多くの洞窟寺院がある。なぜならば、洞窟が町の近くにある便利な立地で、隠された空間があるという神秘的な雰囲気を持っているからである。タイ、ラオス、そして中国の洞窟の多くには仏教の祠があり、マレーシア北部の Ipoh 近郊の洞窟には道教と仏教の寺院がいくつかある。最もよく知られている洞窟寺院は、クアラルンプール（マレーシア）郊外の Batu 洞窟群にあり、ヒンドゥー教徒が毎年開催するタイプサム祭の中心地となっている。マレーシアのヒンドゥー教徒だけでなく、インド、オーストラリア、シンガポールなど他の国のヒンドゥー教徒にとっても巡礼地となっている。日本の沖縄本島には、洞口に存在している神社がいくつかある。



仏教の洞窟祠、Nam Ou 川、ラオス。写真：David Gillieson

上記のことから、個々の洞窟の重要性を評価するために使われる基準には、以下が含まれる：

- 地質学的考察 - 構造、層序、古生物学、鉱物学に関連する特徴など。
- 地形学的考察 - 通路の形態、碎屑物の堆積配列、特に過去の地表環境の証拠となる場合には、二次生成物など。
- 水文学的考察 - 主要な地下の流れや湖の存在、地表の排水を分断する地下の裂け目、または水路網を理解する上で重要な要素など。
- 生物学的考察 - 種の豊富さ、希少種や絶滅危惧種の存在、異常な栄養構造、コウモリの主要な繁殖地など。
- 考古学および文化的な考察 - 深く層別された堆積物の存在、地域の先史時代の進化における洞窟の役割、採掘や水管理などの歴史的な洞窟の使用例、または精神的、宗教的な意義など。
- 地理的な考察 - 遠隔性と原生自然としての価値、道路やキャンプ場などの公園インフラへの近さ、レクリエーションの機会、主要な人口中心地からのアクセスのしやすさ。

Auler ら（2018）は、有意水準を厳密に評価することで、環境保護のための洞窟の優先順位付けのための 1 つの方法を提供した。彼らは、401 の洞窟を例に取り、上記の考察を網羅する 70 の変数を使用し、統計的に分析した。その結果、生物学的変数が、洞窟の長さと同面積とともに最も有用であることが示された。この方法は、関連するデータが利用可能であれば他のカルスト地域にも適用し、改良することができる。

Guidelines ガイドライン

- (1) カルスト地域の効果的な計画には、地域の文化的および政治的背景の中で、その経済的、科学的、人間的価値を十分に理解する必要がある。
- (2) 管理者は、カルスト集水域においては、地表での活動が地下またはさらに下流に対して、直接的または間接的な影響を与えることを認識する必要がある。
- (3) 洞窟の特徴とその比類のない価値をよく理解することは、カルスト地域の管理を改善するために不可欠である。

The special nature of karst environments and cave systems カルスト環境と洞窟システムの特殊性

可溶性岩石と、地表と地下の一連の流れを統合する水路を介した地下排水の発達、カルスト地形の複雑さと多くの特別な特徴を生み出している。このような高度な連結性は、地表でのいかなる変化・影響であっても速やかに地下に伝わり、洞窟環境とそれに依存する陸生および水生生物に影響を与えることを意味する。

カルストの地表環境は厳しい。カルスト環境では、雨水がすぐに地下に流出するため、湿度の高い気候であっても、地表は定期的に乾燥する。岩盤が表層堆積物に覆われていない限り、カルストの地表は岩質で、浅く斑状の土壌を持つ傾向がある。炭酸塩岩盤に含まれる方解石や苦灰石などの可溶性鉱物の量は、90~99%と高いことが多い。したがって、土壌を形成する不溶性鉱物の含有量は、全体の1%~10%にすぎない。ゆえに、炭酸塩カルストで見られる植生は、岩石質の土壌、高いカルシウム含有量（アルカリ性）、乾燥という条件に適応する傾向がある。例外は、可溶性岩石が、氷河堆積物（アメリカ北部）、黄土（イギリスのピークディストリクト）、火山灰（ニュージーランドのキング・カントリー・カルスト）など、外部由来の（同種の）表層堆積物で覆われている場合である。熱帯地域では、土壌に覆われたカルストは熱帯雨林やサバンナの植生の下でより一般的であり、火山灰に由来する重要な土壌マントルを持つことがある。

カルストの地表生態系は、地形、水文、土壌、植生などの点で、隣接する景観とは大きく異なることが多い。険しい地形と厳しい環境条件を持つカルストは、非カルストよりも多様な生息環境を提供している。そのため、希少種や固有種を含む動植物の生物多様性が育まれている。ラオスでは、21種のトゲフウチョウボク属（*Capparis* spp. L.）が知られており、そのほとんどが単一のカルストに存在する。同様に、ホソユビヤモリ属（*Cyrtodactylus* spp.）の約90種は、インドから東南アジア全域、そしてメラネシアに至るまで、カルストの固有種である。

カルストの地下環境は、非カルストよりも特徴的であり、より発達している。どのような岩石タイプでも、ある程度の地下水の移動は割れ目系岩盤流としてありえるが、水による溶解が割れ目を拡大し、地表の排水の大部分またはすべてを地下に導く通路または洞窟を形成するのは、カルスト岩においてのみである。炭酸塩岩の洞窟は一般に、砂岩（珪岩）、礫岩、溶岩、蒸発岩などの他の岩種の洞窟よりも大きく、長く、深い。サラワクのDeer洞窟とベトナムのHang Son Doong洞窟は、通路の広さにおいて世界最大級の洞窟であり、アメリカのMammoth洞窟は世界最長の洞窟、ジョージア州のVeryovkina洞は世界最深の洞窟である（いずれも2022年1月現在）。

探検可能な大きさの洞窟に加え、カルストにあるが人間が入れない直径0.3 m未満の水路には、ほとんど調査されていないが、おそらく広範な地下生息地が存在する。これがメソ洞窟(mesocavern)生息地である。これまでほとんど研究されてこなかったが、地底生物相にとって非常に重要であると考えられており、カルストによっては、「洞窟動物相(cave fauna)」と呼ばれる多くの種が生息している可能性がある。水位より上にある、空気で満たされたメソ洞窟の生息環境は、直径の大きな洞窟よりも安定した微気候を保っている可能性が高い。それゆえ、洞窟動物相により最適な条件を提供する可能性がある。洞窟生息地や地下水生生物への、人為的影響や、影響の緩和のほとんどは、このような小口径の洞窟とその動物相に影響を及ぼすと想定される。

洞窟の中には、地表からの浸透水だけを受けているものもあれば、定期的な洪水を含め、地表の小川からの水と土砂の供給を受け続けているものもある。一次生産に必要な太陽光がないため、洞窟の食物網に必要な有機物のほとんどは、地表環境から供給されなければならない。しかし、いくつかの洞窟生態系は、酸化硫化物のような地球化学的エネルギー源に依存している。

洞窟環境の最も明白な特徴は、光量が少なく、洞口から離れるとほぼ一定の温度になることである。真っ暗闇の中で生活するには、他の感覚（主に触覚と嗅覚）が優位になる必要がある。そのため、洞窟に完全に適応した動物は、触角を大きくしたり、付属器官を伸ばしたり、振動を感知する特殊な器官を持ったりする。目は大幅に縮小されるか、あるいは完全に消失することさえある。このような特徴は洞窟適応形態と呼ばれ、この種の陸上動物は真洞窟性生物 (troglomorphy)、水棲動物は地下水生生物(stylobionts)と呼ばれる。

洞窟に棲む場所と期間によって、周期性-または真性（義務的洞窟棲息生物:）、-嗜好性（選択的洞窟棲息生物）、-ゼネス（洞窟訪問生物）に分類されてきた。盲目の洞窟魚は洞窟に適応した地下水生生物の良い例である。しかし、これには例外があり、洞窟にしか棲んでいない動物でも、暗闇への適応をほとんど、あるいはまったく示さないものもいる。

地中動物相、特に地下水生生物はカルスト以外の環境でも見られるが、洞窟やカルスト地下水系は生息地の多様性が高く、空隙が大きい。そのため、カルストの地中動物相は一般的に、非カルストの地中環境よりも生物多様性が高い。地下の生物群集は、孤立度が高いため、希少種や固有種が多いのが特徴である。真洞窟生生物は地下の生息地を離れることができないため、ひとつのカルスト地域や洞窟系に限定されることが多い。

カルスト排水域の境界は容易には定められない。なぜならば、排水経路の大部分は地下にあり、地下水流域(groundwater basins)は一般的に地表の分水嶺に従わないため、カルスト水がたどる排水経路は明らかではないからである。さらに、カルストにおける地下水の分水嶺は、その位置が水の多い状態と少ない状態の間で変化することがあるため、帯状構造として考えるのが最適である。カルストを通過する水の多くは、河川から浸透した水によってもたらされる。これらの水流が、カルスト地域の境界を越えて横たわる不浸透性の岩石に由来する場合、それらは外来性(allogenic)河川（水流）と呼ばれる。これに対して、完全にカルスト岩石に由来する内因性(autogenic)河川（水流）と呼ばれる。

カルスト生態系が脆弱なのは、環境条件が極端である可能性があり、またカルスト生態系の相互連結性が高いため、カルスト生態系の一要素に直接的な影響が生じると、波及的に他の要素やカルスト生態系全体に深刻な間接的影響をもたらされる可能性があるためである。このような条件により、多くのカルスト生態系は回復力が低い。つまり、攪乱に抵抗したり、攪乱後に回復したりする能力が低い。カルストの地下水は、その水理地質学的構造により、汚染物質が薄い土壌やエピカルストから、ドリーネや流入口を経由して容易に侵入できるため、汚染に対して特に脆弱である。「エピカルスト」という用語は、岩盤の最上部数 m を指し、そこではほとんどの溶解が行われるため、より深い岩盤よりも空隙が多い。地下に入ると、水はカルスト地層以外の地下水（年間数 m）よりもはるかに急速に移動するため（1日あたり数 km）、汚染物質が長距離にわたって拡散し、地下の生物種や生態系に影響を及ぼす可能性がある。汚染物質はカルスト帯水層に閉じ込められ、その後長い時間をかけて湧水で放出される可能性がある。

カルストの土壌は脆いことが多く、少なくとも人間の時間軸においては、本質的に不可逆的な侵食に対して脆弱である。植生の除去や劣化（例えば、伐採、家畜の放牧、穀物栽培など）は、深刻な土壌侵食を引き起こし、ヨーロッパの Dinaric カルストや中国の華南カルストにおける主要な環境問題である「岩石砂漠化」につながる可能性がある。自然植生の劣化と土壌侵食は相互に関連している（すなわち、植生の劣化が侵食を引き起こすこともあれば、その逆もある）。土壌侵食と植生の劣化は動物生息地の喪失につながり、その結果、表層カルスト生態系の生物多様性が低下

する。土壌侵食とそれに伴う植生と生物活動の衰退は、カルスト地形の、大気中の二酸化炭素の自然な吸収源として機能の効率性を低下させる。カルストの溶解は、陸上の二酸化炭素吸収源の 29.4%、または人為的二酸化炭素排出量の 10.4%を占める。

自然のプロセス、特に水文学的システムを保護することは、カルスト地形の保護と管理の基本である。このことは、地下水保護と生物多様性保全のために、集水域全体の植生と土壌を注意深く管理する全体的な手法の必要性を意味している。総合的な集水域管理の必要性は、他の多くの岩相よりもカルスト地形にとって不可欠である。カルストに流入する同源的河川の水質管理と、地下水系に涵養を行うドリーネの保護は、すべてのカルスト地域の管理における主要課題である。

現在、本当に原始的なカルスト景観を保護できる場所は比較的少ない。そのような場所の保護と維持に加え、劣化したカルスト地形における自然の植生や動物生息地の復元など、過去と現在の管理による悪影響を是正することに重点を置かなければならない。このような改善は、自然のカルストプロセスを回復するのに役立つ。

Guidelines ガイドライン

- (4) 自然プロセス、特に水文学的システムを保護することは、カルスト景観の保護と管理の基本である。
- (5) カルスト地形のプロセスの中でも卓越したものは、二酸化炭素の段階的な変化であり、外部大気の高濃度から、土壌大気の大規模な濃度上昇を経て、洞窟内の濃度低下に至る。土壌の二酸化炭素濃度の上昇は、植物の根の呼吸、微生物の活動、健全な土壌無脊椎動物相の結果である。この変化は、カルスト溶解の過程を効果的に作動させるために維持されなければならない。
- (6) 総合的な集水域管理の必要性は、他の多くの岩相よりもカルスト地形にとって不可欠である。
- (7) 現在、原始的なカルスト地形は比較的少なく、残っているものは最優先事項として保存・維持されなければならない。それ以外の場所では、過去と現在の管理方法による悪影響を是正することに重点を置かなければならない。

Scales of management in karst areas カルスト地域における管理の規模

管理規定は、カルストシステムの構造と機能における、自然におよび課せられた変化を考慮する必要があるとの認識が高まっている。複雑なカルスト水文システム（または複雑な統合洞窟システム）に適用される管理規定が単一であると、システムの様々な部分で進行中の地形学的・生態学的プロセスを適切に保護する可能性は低く、したがって管理計画はカルストシステムの規模を考慮しなければならない。乾燥したカルスト地域であっても、微気候とエネルギー源の強い勾配が、洞口から洞内に広がっている場合がある。したがって、管理計画は洞窟の生態系における自然の変化を考慮しなければならない。

水流が主に表層を流れる非カルスト性集水域の場合、河川連続体構想は、河川の生物学的・化学的プロセスはその物理的属性、特に水温、流動様式、土砂輸送と密接に関連していると主張する。したがって、生物群集は、河川そのものがそうであるように、下流に向かって予測可能な変化をする。このことは、生物群集が、地形学的・生態学的条件が類似している短い区間、すなわち「河川流域: stream reach」の特定の条件に適応していることを示唆している。

このような流域では、管理の空間スケールを次のように概念化することができる：

河川連続体の概念に従えば、集水域全体 > 小集水域（河川の順序、岩相によって定義） > 河川流域（類似の勾配、基質、流動領域(flow regime)）。

しかし、カルスト集水域の場合は、以下のようになる：

非カルスト集水域 > カルスト集水域 > カルスト小集水域 > 洞窟通路（様々な種類の連続性とエネルギーレベル） > 湧水。

洞窟の生態系を構成する生物の個体群の存続には、外部からの食料とエネルギーの供給が不可欠となる。主な外部供給源は、流水によって浸透もしくは解体され、洞窟内に流れ込んだ有機物の残骸である。この物質は、洞窟の生物相に利用されやすい細かい腐植質の場合もあれば、利用するためにはまずバクテリアや菌類によって分解されなければならない粗い破片（小枝、葉、枝）の場合もある。このように、洞窟は地表流で言うと上流に相当する。したがって、めったに氾濫しない洞内の場所は、動物相が豊かでないことが予想されるが、外部に直接つながっている本流沿いの場所は、種数がきわめて多く、生物の総個体数も多い可能性がある。これらの生物は大洪水で流されることもあるが、岩の隙間や小さな穴から個体群が再殖することもある。外部物質のもう 1 つの重要な供給源は、ドリーネ、堅穴、または地表に開口している割れ目からの降下である。これは、水源から離れたより乾燥した通路や、乾燥した気候の洞窟では特に重要である。樹木の根が洞窟の通路に侵入することは、ほとんどの熱帯やいくつかの温帯の洞窟において、非常に重要なエネルギー源となる。コウモリや鳥類は、グアノや死骸の形で重要な外部エネルギー源となることがあり、生態系によっては主要な、あるいは唯一のエネルギー源となることもある。

洞窟の生態系へのエネルギーインプットの頻度と規模は、生物の個体群を維持するために非常に重要である。水の移動が春の雪解け時に限定される寒冷地において、生物活動は水と有機物の主要な流入に追従するように段階的に変化するが、他の時期にはほとんど休眠状態になることもある。季節的な降水量が多い地域では、生物は最大 6 ヶ月間、気候の変動が大きい場合はそれ以上、乾燥に耐えるために適応しなければならないかもしれない。熱帯地域の洞窟の動物相はそれほど季節変動に伴う環境変化の影響を受けず、年間を通して活動している可能性があるが、繁殖は資源の競争を減らすために段階的に行われることもある。有機物に関連する種の豊かさが、真洞窟性生物(troglobitic fauna)の動物相の豊かさに必ずしも比例しているわけではないことを認識することが重要である。真洞窟性生物(Troglobites)は食物の乏しい洞窟域で最も多く発生し、有機物がより広く分散している熱帯洞窟ではあまり見られない。水の流入規模と頻度の大きな変化は、洞窟の生物学に深刻な影響を及ぼす可能性がある。そのような変化は、カルスト水が水路変更されたり、過剰に利用されたり、植生の伐採などの地表の変化で浸透水の量と質が変化するような農村地域では、度々起こりえる。

洞窟の通路や水路は、河川の流域に相当し、管理の基本単位となる。流水がある通路は、流水がほとんどない高次の通路とは異なる管理をしなければならない。洞窟システムにおける物質とエネルギーの流れを理解するためには、これらの異なるタイプの通路の連結性が非常に重要である。残存している洞窟通路、地下で生成された洞窟通路、または古カルストにある洞窟通路は、連結性が低いかまったくない状態であり、攪乱後の回復能力がほとんどない。定期的に氾濫する通路は、攪乱の頻度にもよるが、ある程度の回復能力がある。堆積物の流動、有機炭素、および粒子状物質の流出が大きい活動的な河川通路は、攪乱に対処し、回復力のある生態系を維持する可能性がある。

カルストの深部には、地下で生成された（地下水の上昇によって形成された）、水が充満した空洞が存在する場合がある。テキサス州の Edwards 帯水層では、帯水層中に地下水面より 1,000 m 以上低く、常に水を湛えている場所が多数存在する。帯水層に適応した種が最も多く知られており、地表からの流入に由来しない独特な動物相を有している。

また、それらは井戸からの汲み上げや、整備不良の井戸や放置された井戸による潜在的な影響を受けやすい。2種の盲目ナマズを含む、60種以上の他の水生生物種は、流動性のある自噴井戸でのみ見られる。

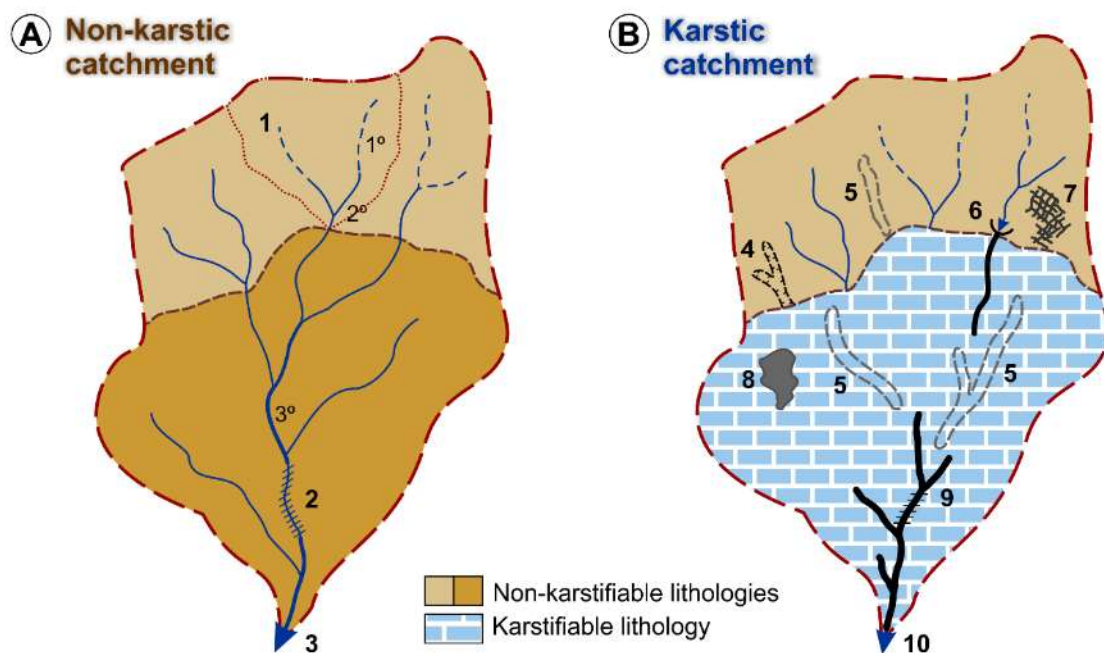
個々のカルスト水文系（または洞窟系）には、活動的な流水通路から非活動的な高次の通路、さらにはつながりの弱い遺存通路まで、いくつかの構成要素ないし何種類かの通路が含まれている可能性がある。それぞれに異なる管理手法を必要とするが、流路、エネルギー源、攪乱の種類と様式、および影響の緩和戦略を検討することができる集水域または小集水域ごとに統合されるべきである。流域全体という最も広範なレベルでは、カルストと非カルスト双方の構成要素が、物質とエネルギーの流れ、攪乱および／または汚染源の可能性という観点から評価されるべきである。

カルスト系の構成要素の接続性とエネルギー準位の図式

カルスト系構成要素	地表との接続性	エネルギー準位と流動
活動的な流れの吸い込み	高	高い、粗い木質瓦礫、粒子状物質、溶存有機炭素（DOC）をもたらす高水準の定期的な洪水
その他の集中涵養源、主に閉鎖性窪地	高	高い、水量は一般的に沈降流よりも少ないが、植物性残骸、微粒子、DOCを輸送する。
活動的な河川通路	高	高い、定期的な洪水は微粒子とDOCをもたらす
湧水	高	高い、DOCの定期的な排出と微粒子
不活性の河川通路（高位レベル）	中	中、DOCをもたらす定期的な洪水
残留洞窟(古代の河川通路)	中	浸透水は、多湿な地域ではDOCをもたらすが、浸透が限定的な乾燥地域では、炭素流動は限定的である。グアノは、DOCもたらす定常的な物質として重要である。
メソ洞窟または浅い地下生息地	中	重要な避難所である河川通路との連結性
深成洞窟	低	硫黄と鉄に基づく生態系、局所的な炭素流動
古カルスト	低	とても低い、流動なし

この管理規模を実現する方法の一つは、空間モデルの使用である。カルスト攪乱指数は、van Beynen & Townsend (2005) によって最初に開発された、カルスト景観に対する人為影響を評価する方法である。この指標は、地形学、水文学、大気学、生物相、文化という 5 つのカテゴリの環境指標を用い、そこから攪乱のレベルまたは範囲を定義することができる。原則として、各カテゴリの指標は、安価に入手でき、容易に再現可能で、環境状態の変化に対応できるものでなければならない。データ源としては、現地調査、空間データ、地形図、航空写真、地元の洞窟探検家や政府の専門家の意見などがある。指標の採点は、半定量的なもの（ランク付けされたデータ、分類された地域、または被覆率）、または定性的なもの（集落の種類、洞窟開発の種類）のいずれかにすることができる。指標は、当該地域に関連性がない場合は、破棄することができる。攪乱指数 (Total Disturbance Index) は、得られたすべてのスコアを合計し、可能な最大スコアの合計で割って端数を出すことによって計算される。指数の利点は、利害関係者が各指標を調べ、どのように導き出されたかを知ることができることであり、また、カルスト環境の全体的な状態は、環境管理者や政策立案者にとって比較しやすい部類となる。

カルスト水系は、地表と帯水層が急速に繋がるため、汚染に対して特に脆弱である。本質的な脆弱性は、脆弱性の程度に影響するカルスト環境の特性によって決定される。これらは、土壌の厚さおよび浸透率、エピカルスト帯の割れ目密度、ドリネの分布、透水係数の変化などのカルストの「配管」に関連している。これらの組み合わせにより、潜在的な脆弱性が決定される一方、土地利用やインフラ（道路、給水、埋立地、または汚染源）が加わることで、具体的な脆弱性が生じる。脆弱性を評価するこれらの手法は、地下水脆弱性モデル (GVM: groundwater vulnerability models) に空間的に統合され、人為的汚染に対する帯水層の脆弱性を定量化することを目的としている。より広く受け入れられている GVM の一つである EPIK は、特にカルスト帯水層用に設計されている。GVM のユーザーは、定量化が非常に困難なものもあるため、使用する入力変数の妥当性に確信を持つ必要がある。



非カルスト集水域とカルスト集水域の空間構成の比較。キー：1-副集水域、2-流域、3-流域の出口、4-屋根のない洞窟、5-遺存洞窟、6-活動中の陥没、7-深成洞窟、8-古カルスト、9-洞窟通路、10-カルスト泉。図：Maria-Laura Tîrlă。

Guidelines ガイドライン

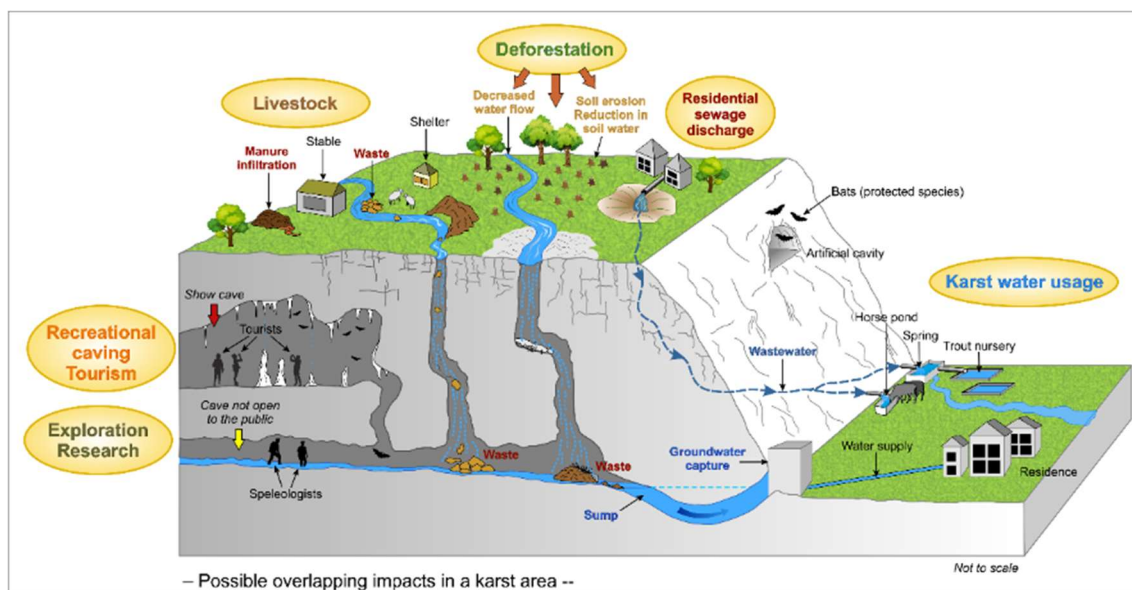
- (8) 複雑なカルスト水文系（または複雑な統合洞窟系）に適用される単一の管理手法は、システムの異なる部分にわたって進行中の地形学的・生態学的プロセスを適切に保護する可能性は低い。したがって、管理計画はカルスト系の規模要因を考慮しなければならない。
- (9) ほとんどの洞窟の生物は、地表環境からもたらされる餌資源に大きく依存している。外部からの食物とエネルギーの供給は、生存可能な生物個体群の存続に不可欠であり、洞窟生態系へのエネルギー投入の頻度と規模は、生物個体群の維持に不可欠である。
- (10) 個々のカルスト水文系（または洞窟系）には、活発な流水通路から不活発な高位レベルの通路、さらにはつながりの弱い遺存通路まで、いくつかの構成要素やタイプの通路が含まれている可能性がある。それぞれに異なる管理手法が必要である。
- (11) カルスト地域の中には、地下水汚染物質に対する感受性が高い場所もあれば、それほど高くない場所もある。したがって、カルスト地下水資源を保護するためには、包括的な土地利用計画が必要である。



スロベニアの Škocjanske 洞窟にある、定期的に洪水に見舞われる非常に活発な洞窟通路。洞窟内を流れる Reka 川は 50 m 以上増水することもあり、左上に見える観光道の高さまで達する。Škocjanske 洞窟は、世界遺産「Škocjan の洞窟群」とユネスコ生物圏保護区「カルスト」内にあるラムサール条約登録地である。写真：Csaba Egri.

Human Activities on Karst: Impacts and Mitigation

カルストへの人間活動：影響と緩和



人間活動がカルスト地域に与える影響の一部。図：Maria-Laura Tîrlă、Bogdan Bădescu

Recreational and adventure caving レクリエーションとアドベンチャー・ケイビング

Introduction はじめに

人類は種の起源以来、洞窟を訪れてきた。それは残された芸術や工芸品からも明らかである。洞窟の入口は良い避難所を提供するため、最も広く利用されたが、中央アメリカのマヤ文明で行われたように、入口の先にある暗黒地帯への訪問も、おそらく儀式目的や水を求めて行われた。人間は現代まで洞窟の入口部分に住んできたが、この初期段階では洞窟が神話の対象とされ、想像上の怪物や邪悪な霊の住処と恐れられるようになった。また、地獄への入口とされることもあった。ヨーロッパでは、無知と迷信に支配されたこの時期が 16 世紀まで続いた。それは旅行や調査の時代であり、少なくともそれらの追求のために十分な富や資源を持っていた人々にとっては、自然科学の始まりであった。

歴史的な洞窟探査は主にヨーロッパで文献に記録されているが、中国でも行われ、徐霞客（1587-1641 年）がその地域で初めてのカルスト学者兼洞窟学者であった。徐々に、人々は地下空間を恐れる場所ではなく、探索し楽しむべき場所と考えるようになった。最初は、主に洞窟外で働く考古学者、生物学者、地質学者、地理学者などによって研究された。19 世紀に入ると、一部の人々は主に洞窟に焦点を当て、自らを洞窟学者と呼ぶようになった。同時期には「探検」が盛んになり、「異国の地」への訪問、山の登頂、そして必然と洞窟探険も行われた。21 世紀に入ると、人類が訪れられる場所は踏破され、未登頂の山も少なくなった。しかし、毎年、洞窟探検家たちは毎年何十 km もの未踏の洞窟を探検し、調査している。最初の探検者の後に続いたのは、純粋にレクリエーションや楽しみのために訪れる人々であった。これは地球の多くの地域で同様であった。15 世紀のことわざには、「人々が楽しむ方法を見つけるやいなや、別の人がそれを利用して稼ぐ方法を見つける」と言われており、アウトドア（地下を含む）のアドベンチャーに参加したい人々にガイドがサービスを提供する産業が成長した。世界で最も古いと知られている観光洞は、中国の葦笛洞窟（リードフルート洞）であり、唐代の 792 年に遡る碑文が残されている。ヨーロッパで最初に記録され

た洞窟ツアーは、1213年にスロベニアの Postojna 洞窟で行われた。同じくスロベニアにある Vilenica 洞窟は、西暦1633年以来、訪問者から入場料を徴収している。

このような歴史を踏まえて、21世紀の今、洞窟に入る人々をいくつかのグループに大別することができる：

- 一般の人々は、観光洞を訪れるか、宗教的な目的で訪れる。
- 洞窟探検と記録に携わる洞窟学者。
- レクリエーションケイバー（フリーアクセス）。
- アドベンチャーケイバー（インストラクターによる主導を伴う）。
- 洞窟内での研究を行うか、洞窟からの材料を研究に利用する科学者たち。
- 洞窟が主な訪問目的ではない洞窟の「偶発的」ユーザー。たとえば、洞窟通路の一部を含むランニングイベントに参加するユーザー。

観光洞や宗教的な目的で利用される洞窟は、一般の人々が訪れやすいように、通常は人工照明や歩道が設置されている。十分な移動能力を持つ人なら誰でも利用できる。一部では、障がい者のアクセスも提供されている。一方、アドベンチャー、レクリエーション、調査を目的とする訪問者たちは、通常、ヘルメットに個別の光源を装着し、さまざまな種類の防護服や装備を身に着ける。レクリエーション・ケイビングは、すでに探索され調査された場所を訪れる活動である。アドベンチャーケイバーは以前知られていなかった通路にアクセスし、その発見を調査し文献化することを目指している。これは、以前に探検されていない地域に探検隊を派遣したり、既知の通路の終端にある障害物を取り除いたりするなど、内部でのクライミングや潜水を含むさまざまな手段で達成される場合がある。これらのカテゴリの洞窟利用者は、管理と影響の必要性を調査する上で役立つ場合がある。個々人がこれらの活動の複数に参加する可能性があることに留意されたい。例えば、とあるケイバーは一部の時間を探検に費やすかもしれないが、レクリエーション・ケイビングも楽しみ、アドベンチャー・ケイビングに参加したり（またはリーダーの役割を担ったり）、観光洞への訪問も楽しむ可能性がある。

管理の観点から見ると、どのカルスト地域にもいくつかの洞窟利用タイプを有する可能性がある。はじめに、観光洞ならびに宗教的に重要な洞窟である。次に、アドベンチャー・ケイビングの場所で、その多くは訪問者の安全性を高めるためにある程度の工夫が施されている。最後に、大部分の場所はレクリエーション・ケイビングと洞窟調査を目的としている。宗教的な意義を持つ観光洞は本書の他のセクションで述べられているため、このセクションではアドベンチャー・ケイビング、レクリエーション・ケイビング、および洞窟調査に焦点を当てる。多くの未開発の洞窟や「自然洞窟」にとって、ケイビング活動は保全を考える際に最も直接的なリスク要因である。特に、保護区に指定されたことで流域の同調的な管理が可能な場合、そのようなケースに当てはまる。

Cave exploration and documentation 洞窟探検と記録

他の地形とは対照的に、洞窟探検家の努力の結果、記録されている洞窟の通路の範囲は毎年何 km も拡大している。これらの努力は、大きく2つのグループに分けることができる。1) 既知の洞窟の開口部または開通した通路を介した探査、および 2) 洞窟の入り口と通路の変更を必要とする探査である。洞窟探検の歴史が長いほとんどの国では、探検・記録されていない洞窟の入り口は、あったとしてもごくわずかである。他の場所、特に熱帯地域や高緯度地域では、洞窟探検隊が依然として実質的に未知の洞窟系を記録することができる。熱帯地域では、深い堅穴や急な側面のドリネの底にある入り口など、アクセスが特に困難でない限り、洞窟には地域住民が入った可能性がある。これらの洞窟探検家には、科学的に特に興味深い特徴に関する情報を含め、発見を文書化する責任と、新たに発見された場

合にはその洞窟が確実に保存されるよう措置を講じる責任がある（UIS 倫理規定を参照）。特に、地域住民が十分に関与することが不可欠である。探検者をはじめ広いコミュニティに提供する情報を提供するため、洞窟の場所や、洞窟に対して見出している神聖あるいはその他の価値観について地域住民から学ぶ必要がある。同様に、複合的な価値の保護方法についても探検者をはじめ広いコミュニティに情報共有をする必要がある。

既知の洞窟内には、探検家が入っていない通路がまだ存在する場合がある。最も一般的な理由は、その通路が簡単にはアクセスできなかったからである。通常、そのような通路は既知の通路よりも高い位置にあるか、堆積物や水で埋まっている。高い位置にある通路は、通常、安全に登るためにボルトや他の固定具を設置できる洞窟クライマーがアクセスする。そのため、通路の壁には小さな傷が付くことは避けられない。水で満たされた通路の探検は洞窟ダイバーによって行われ、彼らは通路の潜水を経て、空気で満たされた通路に到達できる場合がある。これらの通路が広範囲に及ぶ場合、洞窟ダイバーではない者に対し、潜水を必要としない代替の入口の開発要望があるかもしれない。ただし、新しい通路が高い美的または科学的価値を持つ場合、問題が生じる場合がある。

多くの「新しい」洞窟通路は、「掘削」として一般的に知られる通路の改造によって見つかる。使用される技術には、堆積物の除去、崩落地域を通る経路の安定化工事、川の流路変更、静的な水たまり（水で満たされた通路）の排水、狭い通路を拡張するための爆発物の使用などが含まれる。このような工事は、アクセスするために必要な最小限の改造に留められるべきであり、短期～長期にわたる潜在的な影響を十分に検討した上で、また、改造によって引き起こされる影響よりも発見の重要性が高い場合にのみ行われるべきである。



イタリア、Canin 高原の Abisso Michelle Gortani の深い堅穴を探検。写真：Csaba Egri.

保護区では、管理者がすべての掘削活動に同意を求めることが重要であり、国によっては具体的なガイドラインが作成されている。ダービーシャー・ケイビング協会（Derbyshire Caving Association）が、自然保護に関する英国政府の

ドバイザーであるナチュラル・イングランド (Natural England) と共同で作成した文書では、特に、科学的特別保護区内 (Site of Special Scientific Interest) での掘削について取り上げている (インターネット資料を参照)。申請を検討する際には、掘削の成功は、新たな通路や興味深い特徴へのアクセスを提供し、当地の科学的関心を高めることを認識すべきである。ただし、掘削の申請を行う人々は、例えば堆積物が詰まった通路は全体的に堆積物を除去するのではなく、慎重に掘削するなど、影響を最小限に抑える姿勢を示す必要がある。掘削が成功したならば、発見事項に関して地図や写真を用いた文書で十分に説明するべきである。この文書情報は、追従する科学的探索の要不要にかかる決定を行う当該保護区の管理者に共有される必要がある。新しい洞窟や洞窟の一部に入る際には、最善の保全方法を熟考する必要がある。発見事項の中に環境変化への応答性が高いエリアが含まれる場合、探検者はそれらのエリアを最適なルートで通過し、これが後に続く人々にとって明確に示されるようにするべきである。また、洞窟内の余剰設備はすべて撤去することが要求されるべきである。



洞窟探検では時折、その先の通路にアクセスするために堆積物を取り除く必要がある。上の図中ではいずれも、堆積物を通して掘られたシャフトを示し、崩落を防ぐために足場の棒と板が使用されている。左の図では、堅穴は、微細な鍾乳石のある 50 m の通路につながる開いた亀裂まで 4 m 掘削された。右の図では、図の左側にあるパイプを設置して通気性を向上させている。洞窟から堆積物は取り除かれず、代わりに袋に詰められて空きスペースに積み上げられた。約 5 m 進むと、掘削は科学的価値の高い開けた通路に至った。いずれの発掘も特別科学的関心地域内で行われ、法定当局の許可を得て行われた。右側の掘削地は観光洞の終わりにあり、所有者からの激励を受けて着手された。写真：Rob Eavis.

洞窟探検に携わる人々の大半は、発見した洞窟の詳細を雑誌、ニュースレター、または最近ではオンラインで発表している。これらの報告書には、一般的に詳細な地図や説明が含まれており、洞窟の資源に関する重要な情報源となっている。多くのカルスト地域では、洞窟について知られているすべてのことは、事実上、ケイビング・グループの努力の結果である。保護地域の中には、洞窟情報をケイビング・コミュニティに依存し、場合によっては管理の面で彼らと提携するところもあるが、国家機関が洞窟学の専門知識を独自に開発することで、あまり消極的でない管理スタイルが可能になる。これは、洞窟関連の問題に助言するための専門の科学スタッフを雇用し、スタッフの訓練を通じて運用レベルでの洞窟探検能力を開発することによって行うことができる。



ラオスの Hin Nam No 国立公園にある Xe Bang Fai 洞窟の上流側の入り口。この洞窟は2012年からアドベンチャー・ツアーに開放されている。写真：John Spies.

Recreational caving レクリエーション・ケイビング

レクリエーション洞窟探検（スポーツケイビングとも呼ばれる）は、本質的には「純粋にケイビングを楽しむためのケイビング」であり、既知の洞窟を訪れる活動である。そのため、ウォーキングや登山などの他のアウトドアレジャーと似ている。アメリカやヨーロッパの多くの国では、（探検ではなく）レクリエーションとしての洞窟探検が20世紀初頭に始まり、志を同じくする少数の個人から組織化された大規模な団体までのクラブやグループで行われていた。個人用装備が入手しやすくなり、特にスタティックロープ技術の採用により、クラブのサポートに頼ることなく、少数の個人が深く複雑な洞窟への訪問を行うことが可能になった。それにもかかわらず、21世紀の現在でも、世界的に、ほとんどのレクリエーション目的の洞窟探検家は、少なくとも1つの洞窟探検クラブに属している。洞窟へのアクセスはレクリエーション洞窟探検にとって重要な要件であり、多くの国で洞窟へのアクセスを維持し改善することを主要な目的として、洞窟クラブが連携して地域または国の団体を結成している。国家レベルの組織も通常、会員や、敷地内に洞窟を持つ地主に保険を提供したりしている。1965年に、洞窟探検と洞窟学の国際機関として国際洞窟学連合(UIS)が設立され、2022年1月時点で57の国が加盟している。UIS内にはカルストおよび洞窟保護委員会があり、そのメンバーが本書のガイドラインの作成に貢献している。

現在ではほとんどのレクリエーション洞窟探検者が地下環境の美しさ、脆弱性、科学的重要性を理解し尊重しているが、常にそうだったわけではない。多くの洞窟が故意または無知による理解不足から深刻な損傷を受けてきた。21世紀における特に問題になっているのは、「スピード・ケイビング」と呼ばれる、洞窟内の特定の地点に到達し、できるだけ短い時間で地表に戻ることを目的とし、洞窟への潜在的な影響を考慮していない場合が多い行為の増加である。故意の破壊は一般的に、観光の記念品として鍾乳石を持ち去る、泥合戦や、泥の彫刻や滑り台を作るための碎屑堆積物列の破壊、そして落書きなどである。洞窟が保護されているか、保護区域内にある場合、犯人が特定されれば法的措置が取られる場合もある（アメリカでは起訴に成功した事例がある）。しかし、法的措置が洞窟の受けた損失を補うことはできない。人間の時間スケールで言えば、洞窟生成物や碎屑性堆積物はかけがえのないものである。不

注意による損傷は、洞窟の環境を理解し、尊重しないことに起因する。特に、洞窟生成物の価値とそれらを保護する必要性を認識する多くの洞窟探検者は、一般的に碎屑性堆積物の科学的重要性を十分に理解しておらず、「泥」と扱う傾向がある。



ニュージーランド、ワイトモの Hollow Hill 洞窟、Castle Grotto にある繊細なストローの洞窟生成物。これらは慎重なアクセス・ポリシーと最小限の影響によるケイビング・ガイドラインによって保護されている。写真：John Gunn.

1990 年代半ば以降、洞窟探検者が洞窟に与える影響への懸念から、多くの国で倫理規定、洞窟保全規定、および最小限の影響に留める洞窟探検のガイドラインが開発されてきた。これらの規定の目的は、洞窟探検者に対し、安全性だけでなく保全の観点からそれぞれの探検活動を考えるよう促し、多くの国内および地域の洞窟探検組織が果たす重要な保全の役割を強調することである。倫理規定が確立されている国では、洞窟探検者はその規定に精通し、それに従うことが求められるべきである。保護区域では、規定の順守が義務付けられるべきである。規定が確立されていない国では、保護区域の管理者は、公表された規定から関連する情報を引用して、その地域の洞窟のための規定を設けるべきである。以下に、これらの例を示す。

EXAMPLES OF CAVING CODES 洞窟探検規定の例

国際洞窟学連合 (UIS) は『外国における洞窟探検および科学のための倫理規定』を持っている [<https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/03/Code-of-Ethics-of-the-UIS-English-Language.pdf>]。タイトルはやや誤解を招くかもしれない。なぜなら、この重要な文書は「外国での洞窟探検遠征」だけでなく、「冒険、地質・生態ツーリズム」や「自国における一般的な洞窟探検」についてもカバーしているからである。また UIS 文書内では「観光洞の開発」や「科学的サンプリング」に関するガイドラインも別々に掲載されている。

オーストラリア洞窟学連盟(The Australian Speleological Federation)は、1995年に最初の「最小限の影響に留める洞窟探検行動規範」の一つを制定し、最新版(2010年)は <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards> で入手できる。この規定は2つのセクションに分かれている。1つは一般的な洞窟訪問に関するもので、もう1つは新しく発見された洞窟または洞窟の一部の探索に関するものである。

英国ケイビング協会(The British Caving Association)は、英国政府のイングランドにおける自然環境のアドバイザーであるナチュラル・イングランド(Natural England) [<https://british-caving.org.uk/our-work/cave-conservation/>] と共同で、「最小限の影響に留める洞窟探検ガイドライン」を作成した。このガイドラインは影響を最小限に抑えることを目的としているが、洞窟と地表の両方での保存と修復作業に関する推奨事項も含まれている。

ニュージーランド自然保護局(The New Zealand Department of Conservation)は、「洞窟探検のケア規定」と呼ばれるガイドラインを持っている [<https://www.doc.govt.nz/parks-and-recreation/things-to-do/caving/caving-guidelines/>]。このケア規定は、環境や他の人々への影響を最小限に抑えつつ、洞窟探検を推進することを促している。

全米洞窟協会 (National Speleological Society) は、定期的に更新される「最小限の影響に留める洞窟探検ガイドライン」を持っている。最新の更新は2021年2月であり、それには新型コロナパンデミックによる影響も考慮されている [<https://caves.org/conservation/cavingcode.shtml>]。著者らは、洞窟環境についてより多くの知識が得られるにつれて、洞窟探検者が自らの探検行動を評価し再定義する際にガイドラインを更新すべきであるという、重要な点を述べている。

20世紀初頭から半ばにかけては、洞口位置を含む洞窟の情報はケイビング・クラブの会員に限定されるのが一般的で、ある程度の保護がなされていた。特に壊れやすい洞窟や探検中の洞窟の場合、いくつかの国では今でもそうである。アメリカでは、1988年の連邦洞窟資源保護法が制定された。同法は、連邦政府の土地にある洞窟を対象に、重要な洞窟の位置情報を一般に提供してはならないと規定している。しかし、他の場所では、娯楽的な洞窟探検への関心の高まりにより、きわめて詳細な場所情報を提供するガイドブックが出版されるようになった。インターネットの普及により洞窟情報の提供が大幅に増加し、GPSを持っている人なら誰でも簡単に洞窟の正確な入口を見つけられるようになった。同時に、SNSの利用が急増し、訓練や経験の不足した個人やグループが洞窟を訪れ、その様子をオンラインで投稿することが増えた。必然的な結果として、ケルンを使用したり、洞窟の壁に印を付けたりして、洞窟から出るルートを確認する落書きや、『記念品』の持ち去りといった意図的な洞窟への損傷、ならびに碎屑性堆積物や鍾乳洞が豊富にある地域を迂回するルートを通らないなどの不注意による事故が増加している。この種の活動は、保護区域の管理者にとって特に難しい課題である。なぜなら、これらの個人は洞窟探検コミュニティの一員ではなく、洞窟の保護規定についての知識がないからである。洞窟の入口や内部に看板を設置することは役立つかもしれないが、完全な保護を実現する唯一の手段は、洞窟の入口を保護するか、洞窟内の敏感なエリアへのアクセスを制限することである(詳細は「洞窟の分類と管理ツールとしての活用」を参照)。洞窟への出入口の設計は慎重に検討する必要がある。

それは安全で、洞窟の美観を不必要に損なわず、動植物の移動、空気や水の流れを妨げず、負傷者の救助を妨げないようにしなければならない。

洞窟ダイビングは、最も一般的な探検の手段である。そのため、洞窟探検と文書化で説明されているが、国によっては、それ自体がレクリエーションとして行われている。探検的な洞窟潜水は、主に陸上の洞窟探検の経験を持つ個人によって行われるが、レクリエーション的な洞窟ダイビングは、一般にはオープンウォーター・ダイバーによって行われる。洞窟が彼らにとってどのようなリスクをもたらすのか、また、彼らが水中洞窟環境にどのようなリスクをもたらすのかを、彼らは完全に理解していない場合が多い。

数年以上このスポーツに携わっているレクリエーション・ケイバーは、写真、測量、救助、洞窟科学、洞窟探検などの洞窟学の側面を専門にしていることがよくある。例えば、洞窟の撮影が洞窟の価値に対する地域社会の認識を促進し、保護活動を支援するのに役立つという幅広い利点がある。洞窟測量は、管理者、科学者、救助隊員にとって不可欠なツールである。救助の備えには安全性と保全上の利点がある。そして、洞窟探検家と科学者の協力により、これらのシステムに関する知識が増え、洞窟が研究者から影響を受けるリスクが軽減される。洞窟探検グループは、洞窟のゴミを片づけたり、損傷した地物を修復したりする「カルスト・ケア」プロジェクトを開始することも知られている。洞窟探検家の態度は様々であるが、洞窟管理者と地元の洞窟探検グループとの間には非常に建設的な関係が築かれている例は数多くある。これらの関係を構築することには明らかな利点があり、特にこれによりアクセス条件の順守が促進されるという点が挙げられる。一部の保護区では、洞窟管理委員会や作業グループに関係者を参加させることで、体系的な方法でこれに取り組んでいる。一部の保護区では、利害関係者を洞窟管理委員会や作業部会に参加させ、組織的な方法でこの取り組みを行っている。これにより、洞窟探検者にとって重要な制限事項を含む論点についての対話の機会が生まれる。新しいアクセス制限を課すことはおそらく否定的に受け止められ、その根拠がケイビング・コミュニティに理解されない場合は遵守されない可能性がある。



アメリカ、ニューメキシコ州、カールスバッド洞窟群国立公園世界遺産地域、Lechuguilla 洞窟、Chandelar 湖。この洞窟は科学的価値が高く、探検家による損傷を受けやすいため、立ち入りは承認された科学研究者、調査・探検チーム、国立公園局の管理関連旅行に限定されている。管理計画が発表されている（インターネット資料を参照）。写真：Rainer Straub.

Adventure caving アドベンチャー・ケイビング

アドベンチャー・ケイビング（「インストラクター・ケイビング」または「ワイルド・ケイビング」とも呼ばれる）には、非常に地味な体験から、高度に組織化された商業的な地下体験まで、幅広い範囲が含まれる。アドベンチャー・ケイビングを提供する多くの人々は、フリーランス（個人事業主）のインストラクター（ガイド）であり、山岳ガイドやトレイルガイドなど地上での関連する職業と同様の役割を果たしている。洞窟体験を希望する一般の人々や、あまり一般的ではないが、複雑な洞窟システムのガイドを希望するレクリエーション・ケイパーは、選択した洞窟に必要なすべての装備を提供するガイドを雇う。ケイビングのインストラクターは、主に学校グループを対象とした屋外教育センターでも雇用されているが、企業の「チーム構築」や「マネジメント」の経験を大人に提供するセンターやグループもある。また、一部の観光洞では一般の観光客向けのツアーに追加してアドベンチャー・ケイビングを提供している。ほとんどのケイビング・インストラクターはサービスの対価を受け取るが、特にスカウト運動などの組織のために無償でアドベンチャー・ケイビングの体験を提供する人もいる。

先進国では、インストラクターに対する高水準の安全トレーニングは、法律または保険で義務付けられていることが多い。オーストラリアとニュージーランドでは、インストラクターは特定のトレーニングを受けることが義務付けられており、通常は1年間のフルタイムのコースで、応急処置、救助、解説を含むアドベンチャー・ガイドのあらゆる側面をカバーする。ガイドを受ける人々の安全は最も重要であるが、地下の環境の安全性にも同等の比重を置くことが不可欠であり、地質遺産や生態系の保護の重要性が強調されている。残念なことに、過去にはインストラクターがグループに泥合戦に参加するよう奨励し、地下の体験を「向上」させるといった悪い慣行が一般的であった時代があり、これにより重要な碎屑物質が損傷し、鍾乳石や洞窟壁に泥が付着する結果となった。

全国的なケイビング団体がある場合、その団体がインストラクターの認定を行い、安全と自然保護に同等の注意が払われるようにするのが最適であると思われる。英国洞窟協会(BCA)は、洞窟探検のインストラクターおよびガイド向けに、全国的に認められた2つの認定資格を提供している。ローカル洞窟および鉱山リーダー評価制度(LCMLA)と、洞窟インストラクター認定資格(CIC)である。LCMLAは、「雇用主やその他の権限を持つ者の利益のために、地下で他者に対して責任を負うことを望む人々の能力を表彰するものであり、主な考慮事項は、同様にグループの安全と脆弱な環境の保全」である。また、イギリスには Peak Instructed Caving Affiliation (PICA)などの地元のインストラクターグループもあり、これは英国のピーク地区の洞窟探潜エリアをカバーし、Derbyshire Caving Association に所属している(BCAの地域評議会のひとつ)。PICAの使命の一部は、「当該地域でLCMLAおよびCIC主導の旅行に使用できる洞窟や鉱山に関する安全性と保全に関する情報を普及させること」である。



ブラジルの半乾燥地帯にある Brejões 洞窟は、アドベンチャー・ツーリズムによく利用されている。大きな通路と巨大な岩石がある。写真は Philippe Crochet.

インストラクターが引率する洞窟ツアーに使用できる洞窟についての言及は非常に重要である。なぜなら、経験のない洞窟探検者にとって受け入れがたい安全リスクがあるか、地下の環境に損傷を与えるリスクがあるため、アドベンチャー・ケイビングには適さない場所があることを暗黙的に認識しているからである。より広範な洞窟では、脆弱性評価を行い、それを使用して洞窟をゾーンに分けるという補完的なアプローチがある。損傷の可能性が低く、興味深い特徴が少ないと考えられる通路は、ほとんどまたは全く地下の経験がない個人を対象とするタイプのアドベンチャー・ケイビングに適したゾーンに分類される可能性がある。中程度の価値の通路は、参加者がある程度の経験を持っているか、インストラクターと参加者の比率が損傷のリスクを最小限にアドベンチャー・ケイビングに適している可能性がある。地質遺産や生態系の損傷リスクが非常に高く、アドベンチャー・ケイビングに適していない洞窟や洞窟内区域もあるだろう。リスクアセスメントを行う際には、洞窟の適正収容量を考慮することが重要である。なぜなら、人間の訪問は洞窟や洞窟のセクションが有する物理的および生物学的な価値に対し、不可避的で累積的な影響を与えるからである。

世界的に見て、小規模な活動がアドベンチャー・ケイビングの大部分を占めているが、ニュージーランドの Waitomo 地域での「ブラックウォーター・ラフティング」などの類似の経験を提供する、いわゆる「ハイエンド」のアドベンチャー・ケイビング体験を提供する営利企業が増えている。最長かつ最も高価なガイド付き洞窟ツアーの 1 つは、ベトナムのハン・ソン・ドゥン (Hang Son Doong) にある Oxalis Adventure Company が提供する 4 日間の体験である。この洞窟には容積が世界最大の洞窟通路の 1 つがあり、Phong Nha-Ke Bang 国立公園内に立地し、世界遺産に登録されている。このような営利企業は、他の形のアドベンチャー・ケイビングよりも、観光洞と共通点が多い。インフラに多額の投資を必要とし、訪問者数が多く、安全性を向上させたり、訪問者の体験を増やしたりするために、通常、洞窟のインフラに大きな変更が加えられている。例としては、固定クライミング補助具や洞窟内のジップラインの導入などがある。



アドベンチャー・ケイビングでは、氷の洞窟も訪れるようになった。オーストリアの Eiskogelhöhle。写真：Csaba Egri。

Cave classification as a management tool 管理ツールとしての洞窟分類

洞窟を管理するためには、1) 洞窟とその内容物の目録と、2) 異なる用途への適性を識別するための分類システムを持つことが必要である。特定の特徴の範囲が制限されているか、水平または垂直の範囲が限られている洞窟では、多くの場合、洞窟全体が多くの目的にとって論理的な管理単位である。しかし、より長い洞窟、特に価値や訪問者の影響に対する感受性に変動がある洞窟では、ゾーニングアプローチがより適切である可能性がある。例えば、定期的に洪水が発生する活発な流水通路は、乾燥した上部通路よりも訪問者の影響に対して頑丈である可能性がある。洞窟全体のレベルを考慮する場合、そのサイトは、それを取り囲む直接的な地域、そのサイトが位置するカルスト地域の他の地域、および国家的、世界的なコンテキストに関連して考慮されるべきである。洞窟内で、現在システムが導入されていない洞窟や保護地域には、次のアプローチが推奨される。

1. 洞窟の目録を作成し、調査で特に興味深い特徴をマークする。
2. 各特徴タイプの脆弱性を評価する。つまり、洞窟通路の形態は一般的に頑丈である一方、鍾乳石や碎屑物は簡単に損傷する可能性が高い。
3. レクリエーション洞窟探検、ガイド付き冒険洞窟探検、探検、研究など、洞窟の潜在的な用途を特定する。
4. ポイント 1~3 に基づいて、特定の用途に適した洞窟内のゾーンを識別する。地域事情に沿って採用できる簡単なスキームは、通路または洞窟地域を次のように等級付けすることである。
 - **A-低感受性。** 頑丈で、故意の破壊以外はほとんど耐えられると考えられるエリア。あらゆる目的に適している。
 - **B-中程度の感受性。** 基本的な予防措置や注意を怠ると、簡単に破損してしまうような興味深い特徴があるエリア。最小限の影響に留めるケイビング規則を理解し、それを遵守するレクリエーション・ケイパーに適している。アドベンチャー・ケイビングの入門には適していないが、適切な資格を持ったリーダーと一緒に、少人数のアドベンチャー・ケイビングを楽しむことができる。新しい通路の発見や科学的研究を目的とした探検は、プロジェクトの提案と影響評価を条件に許可される。
 - **C-高感受性。** 価値が高く、傷つきやすい特徴を持つエリア。これらのエリアの使用は最低限に留め、影響を最小限に抑えるための管理を行う必要がある。娯楽目的の洞窟探検家は、アクセスを要求する正当な理由(写真撮影など)の提示や、洞窟やその興味深い特徴についての特別な知識を持つリーダーと一緒に訪問することが求められる場合もある。新しい通路の発見や科学研究を目的とした探検は、成功の可能性と発見の価値に対して損害のリスクを評価する「費用対効果」分析を行った後にのみ許可されるべきである。
 - **X-極めて敏感。** 損傷の危険性が高い、非常に価値の高い洞窟の区間。このような区間は、例外的な状況、すなわち、敏感な区域の特定の特徴を理解することを目的とした調査以外は、立ち入り禁止とすべきである。

Cave rescue 洞窟救助

すべてのアウトドア・レクリエーションと同様に、洞窟内でも、個人または個人が救助を必要とするような事故が発生する危険性がある。洞窟には、主に 4 つの客観的な危険がある：低体温症、物質の崩壊、浸水、危険なガスである。その他の危険はすべて主観的なものであり、訪問者に関係するものである。たとえば、心臓発作などの、他の場所で起こる可能性があるが、その個人が地下にいるときに発生する医療的緊急事態が挙げられる。また、個人やグループが洞窟に入り、出口に戻れなくなったり、洪水で閉じ込められたりするなどの事故に遭う危険もある。洞窟探検の長い歴史があるほとんどの国には、国または地方の洞窟救助組織があり、地下での救助を直接引き受けたり、国の緊急サービスによる救助を支援したりしている。洞窟での救助は一般的に困難であり、特に負傷者の移動が必要な場合は、洞窟に影響を与える可能性がある。救助活動では、まず、最初に救助者と救助される人々の安全と健康が最優先だが、できる限り洞窟環境への影響を最小限に抑えるべきである。救助チームが主に経験豊富な洞窟探検者で構成されている場合、彼らは洞窟への影響を最小限に抑えたいと考えるであろう。少なくとも 1 つの「Minimal Impact Cave Rescue Code (最小限の影響の洞窟救助規定)」があり、これは 2006 年にオーストラリア洞窟救助委員会によって作成され、2019 年に大規模な改訂が行われた（インターネット資料を参照）。

Biological impacts of cave visitation 洞窟訪問の生物学的影響

洞窟はさまざまな動物の生息地を提供している。コウモリは最もよく知られ、世界中に広く存在している。他にも、洞窟魚やサンショウウオなどの脊椎動物もいるが、特に洞窟に適応した無脊椎動物が最も一般的である。これらの動物の多くは非常に限られた分布を持っている。洞窟探検活動は、洞窟内を移動する人々によって傷つけられたり、移動させられたりする小さな無脊椎動物の場合のように、洞窟動物に直接影響を与える場合もあれば、病原体や栄養素の持ち込み、生息地の変化などのように、間接的に影響を与える場合もある。これらの影響が生物多様性に与える影響は、十分な研究なしには完全に把握するのは難しいであろう。保全戦略には、種の保護計画、動物保護のための最小限の影響の洞窟探検の実践に対する認識を高めるための情報提供、生息地の復元、およびゾーニングを通じた重要な生息地へのアクセス制限が含まれる。一部の洞窟は中程度または低エネルギーの環境であり、人間の時間スケールでは基本的にエネルギーの投入がほとんどない。これらの洞窟に1人の洞窟探検者が入ることで、熱、光、および栄養素に影響を及ぼし、エネルギーバランスが変化する可能性がある。1990年代以降に明らかになった要因の1つは、洞窟探検者による微生物や微小動物の持ち込みの可能性である。洞窟への訪問者の影響は、一般的には累積的であり、相乗効果をもたらす可能性がきわめて高い。

地表への攪乱とは対照的に、中エネルギーまたは低エネルギーの地下環境における人間の活動の痕跡や影響は、数百年、さらには数千年にわたって残る可能性がある。例えば、フランスの Chauvet 洞窟で発見された、最大で約 48,000 年前のクロマニオン人の足跡と考えられるものが、堆積物の表面に残っている。特に懸念されているのは、2006年に初めて現れて以来、北アメリカや他の地域で数百万のコウモリを死亡させた、感染性の高い真菌病「ホワイトノーズ シンドローム (WNS)」である。これは *Pseudogymnoascus destructans* という菌によって引き起こされる。ヨーロッパと中国のコウモリで確認されており、個体数の減少を引き起こしていない。高湿度を好み、コウモリが冬眠中に静止している間に繁殖し、悪影響を与える。コウモリの鼻に白いふわふわの斑点が現れ、体や翼にも白い斑点が見られるようになる。これはしばしば致命的である。最初にこの菌が発見されたのは北米の観光洞であり、菌が他の国からの観光客の靴に持ち込まれた可能性があるとして示唆されている。人間が、靴、衣類、洞窟探検用具によって誤って菌を持ち込むことで、冬眠する洞窟から別の洞窟へと菌を拡散させる可能性がある。観光洞を訪れる観光客もこの病気を広める可能性がある。ケンタッキー州の Mammoth 洞窟などの観光洞では、靴の消毒ステーションなどの手順が設けられ、アメリカ全体および一部の他の国のレクリエーション的な洞窟探検者に広く採用されている。洞窟探検のギアや機器を除染する手順は、WNS 除染チームによって提案された(インターネット資料を参照)。これらの手順は特定の問題に対応したものであるが、すべての洞窟探検家、特に保護区を訪れる洞窟探検家に対し遵守が推奨される。ただし、WNS の主な感染経路はコウモリからコウモリである。コウモリの多くは社会性をもつ哺乳類であり、夏の餌場から繁殖の洞窟、そして冬の冬眠場所へと移動する。この菌はコウモリだけでなく、洞窟環境内の堆積物にも付着している。

洞窟探検家が不注意に洞窟の微生物に影響を与える可能性に加え、世界のいくつかの地域では、洞窟に入ることが人間の健康に潜在的なリスクをもたらす。最も広く知られているリスクは、ヒストプラズマ症によるもので、鳥やコウモリの糞によく見られる真菌の胞子を吸い込むことによって引き起こされる感染症である。コウモリは他の病気の媒介者となる可能性もあるため、承認された研究を行う経験者のみが行うべきである。健康リスクは、洞窟のリスクアセスメントの一部を構成すべきである。

Procedures to decontaminate caving gear and equipment ケイビング用具および装備の除染手順

水に浸せるアイテムの場合:

- ケイビング用具の汚れを徹底的に落とす。
- 55°C以上のお湯に 20 分以上浸す。

水に浸せないアイテムの場合:

- 6%過酸化水素スプレーまたはイソプロパノール消毒ウェットティッシュで消毒する
- ブーツは泥や汚れを落とし、上記のように消毒する。

感染の可能性がある洞窟に持ち込まれ、適切な除染手順を使用して処理できない装備は、他の洞窟地域や他の国の洞窟に持ち込んではいけません。一部の保護地域では、たとえ除染されていたとしても、感染した可能性のある洞窟にあった装備の持ち込みは禁止されている。

Incidental users of caves 洞窟の付随的利用者

21 世紀に入ると、「アドベンチャー体験」に対する需要がますます高まり、ランニングイベントの一環として洞窟が使用されるようになり、洞窟内で自動車を使用した例もある。観光洞で行われる既存のインフラを利用したランニングイベントは、既に観光洞が受けている影響を大幅に超える影響はないであろう。天然のアーチを形成する遺跡洞窟を通る歩道でのランニングも同様である。しかし、地質遺産や生態系へのダメージを避けることは不可能であるため、この種のイベントやその他の競技・スポーツイベントにワイルドケイブ（以下、自然洞窟と表記する）を使用することは許可されるべきではない。同様の配慮が、地下での電動車両の使用にも適用される。一部の観光洞では電動車両が使用されてきた長い歴史があるが、自然洞窟に電動車両を持ち込むことは、必然的に生じる損害のため、まったくもって不適切である。

Guidelines ガイドライン

- (12) 洞窟の目録は、管理の基礎として望ましい。各洞窟の特に興味深い特徴は、地図上で明示されるべきである。
- (13) リスク評価は望ましいものであり、場所に適した形で、洞窟のグループ、個々の洞窟、または洞窟内の特定のセクションを対象にすべきである。評価は、人間の探検者に対するリスクと、人間の探検者が洞窟に与えるリスクの両方をカバーすべきである。各タイプの特徴の脆弱性は、特定の用途に適した洞窟や洞窟内のゾーンの特定を容易にするために評価されるべきである。
- (14) ケイビングの影響の管理は、利害関係者が関与する戦略的な計画プロセスを通じて行うのが最善である。適切なアプローチは、アクセス政策が常に重要な役割を果たす、いくつかのイニシアチブを組み合わせる必要がある。
- (15) アドベンチャー・ケイビングを提供するインストラクターは、安全面や洞窟の保護について十分な訓練を受けていることを証明できる者でなければならない。
- (16) すべてのケイバーは、影響最小限のケイビング規範規約（MICC）に精通し、それに従うことが期待されるべきである。保護地域に国または地域の MICC が適用されない場合は、公表されている規範に基づいて特定の規範を作成すべきである。

- (17) 掘削、保護地域内の洞窟での独自の探検と研究は、特定の協定を通じて、または許可を要求することによって管理されるべきである。
- (18) 保護地域の管理者は、その地域で洞窟探検の事故が発生した場合に実施できる計画を作成することが推奨される。この計画は、地域または国のケイビング団体や、事故や緊急事態を担当する国家機関の関与のもとで作成されるべきであり、洞窟や地表での救助の影響を最小限に抑えるためのガイドラインを含むべきである。
- (19) 天然洞窟にいかなる形式の自動車を入れることは、全く適切ではない。天然洞窟はランニングイベントや他の種類のスポーツイベントに使用すべきではない。

Show caves 観光洞

Introduction はじめに

この文書では、いずれも日本語で観光洞に対応する show cave と tourist cave という 2 つの用語を使い分けずに、一般の人々が入場料を支払って入れる洞窟を指している。これらの洞窟の一部は、連邦、州、または地方の政府当局が所有および/または運営している。政府所有の観光洞の一部は委託業者によって運営されているが、他の多くの観光洞は私有され、運営されている。ほとんどの保護区域では、観光洞はほんの一部であり、残りの多くの場所はアドベンチャーやレクリエーションな洞窟探潜に使用される（レクリエーションおよびアドベンチャー・ケイビングを参照）。神社や教会など宗教的な目的で使用される洞窟は、特別なタイプの観光洞と見なすことができる。洞窟と宗教的な実践（シャーマニズムを含む）の関連は、多くの宗教で一般的であり、一部の洞窟は礼拝の場所に改装されている。これらの洞窟は特にカトリックおよび仏教の国々で頻繁に見られ、観光客だけでなく、祈りや礼拝を行う人々も多く訪れる（カルストと洞窟のいくつかの価値を参照）。改装の程度は、宗教的な像を備えた簡素なシェルターや洞窟から大規模な礼拝堂まで多岐にわたる。一部の洞窟は教会として使用され、座席エリアや祭壇、神聖な場所があり、定期的にミサが行われ、指定された司祭がいる。宗教的な実践に使用される洞窟は通常宗教当局によって管理され、洞窟環境への影響はほとんど考慮されない。そのため、この章の残りの部分では宗教的な目的で使用される洞窟は議論しないが、原則としては宗教的な目的で使用される洞窟にも等しく適用される。

国際観光洞協会（The International Show Caves Association; ISCA）は、IUCN および UIS と協力して、「観光洞の開発と管理のための国際的な推奨ガイドライン」を作成した（インターネット資料を参照）。これらの推奨事項の目的は、世界中のどこに位置していても、観光洞の開発と管理のベストプラクティスに対する指針を提供することである。推奨国際ガイドラインの目的は、厳格なルールを作成することや法律として解釈することではない。これらは洞窟の開発と管理に対する専門的なアプローチのためのガイドラインである。多くの観光洞は数十年にわたって運営されており、一部は数百年にわたっている。ISCA はガイドラインで、既存の観光洞がすべての推奨国際ガイドラインに準拠するのが難しい場合、場合によっては不可能である場合があることを認識している。これらの場合、ISCA ガイドラインは、時間をかけて取り組むことができるベストプラクティスや基準の例を提供する。

推奨される国際的なガイドラインは、観光洞の開発と管理のベストプラクティスに関する確定的な情報源と考えられるべきであり、新しい情報や発見を考慮に入れるために最新の形式で保たれるべきである。これは特に保護区において重要であり、観光洞は可能な限り高い基準で管理されるべきであり、保護区外で活動する観光洞に模範を示すものである。例えば、インフラを交換する必要がある場合、これは単純な「同じものの交換」ではなく、洞窟環境に対する最良のオプションを評価した後に行われるべきである。



アメリカ、ニューメキシコ州、Carlsbad 洞窟の観光用通路にある Big Room。この洞窟は、Carlsbad 洞窟群国立公園の世界遺産の中で唯一の観光洞である。他にも多くの洞窟があり、アドベンチャー・ケイビングが可能な洞窟もあれば、許可制で科学者などが立ち入ることしかできない洞窟もある。写真：Csaba Egri.

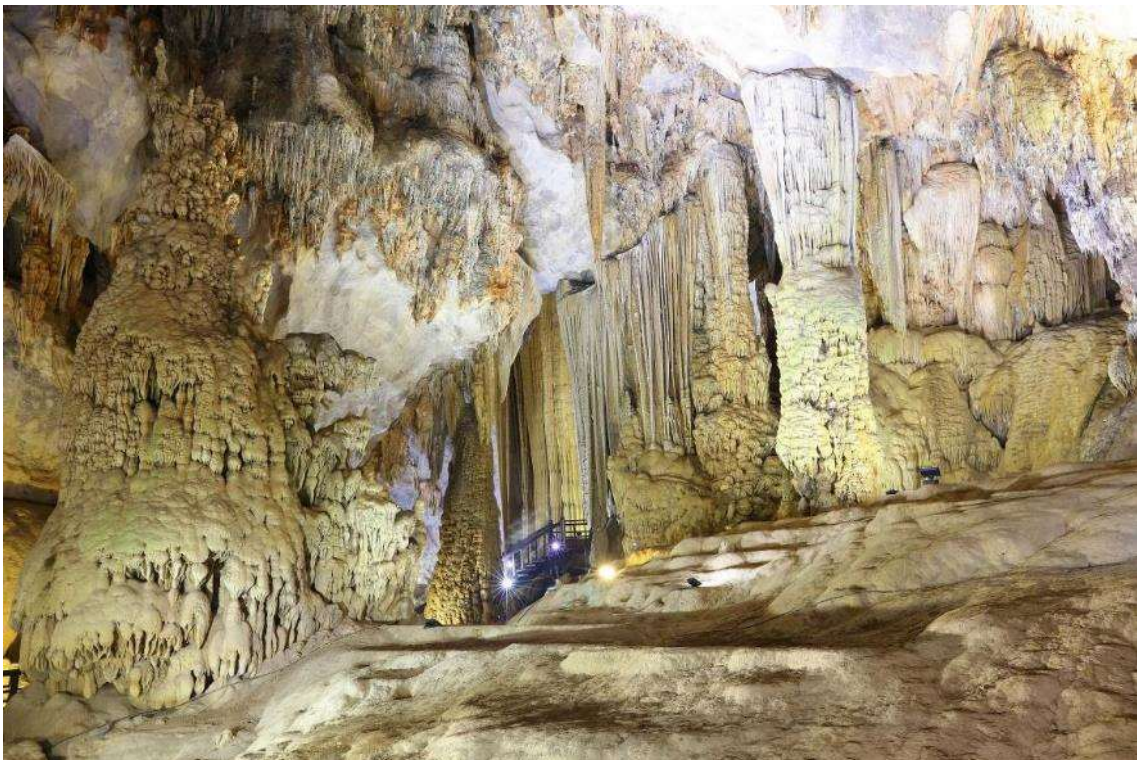
一般的な規則がすべての状況に絶対的に適用できるわけではないことは事実である。世界中のいくつかの洞窟では、許容できる理由によって、このガイドラインのいくつかの部分が必要な困難なしに適用できないような、異常なパラメータが存在する可能性がある。これらのガイドラインおよび ISCA が推奨する国際的なガイドラインは、観光洞が自身の状況と経済的な能力に応じて取り組むべき目標として提供されている。また、ABIS（英国・アイルランドの観光洞協会;the Association of British and Irish Show Caves）、ACKMA（豪州洞窟・カルスト管理協会;the Australasian Cave and Karst Management Association Inc.）、ANECAT（観光用洞窟運営フランス国内協会;the French National Association of Operators of Caves Developed for Tourism）および NCA（米国国立洞窟協会;the USA National Caves Association）など、多くの国の観光洞管理協会があり、洞窟の開発と管理のベストプラクティスを会員や仲間と共有している。私たちが提供するガイドラインは、ISCA が提供するガイドラインを補完するものである。

Considerations for developing a cave into a show cave 洞窟を観光洞に発展させるための考察

既に、観光洞が開発されている場合、入場料や小売のお土産、カフェの飲食物、その他の付随するアトラクションからの収益は、一般的に重要な収入源であり、洞窟は地元の雇用の貴重な源となる。また、破壊行為などの問題が発生する恐れがある場合には、洞窟環境を保護することもある。これは、特に開発途上国で新たな洞窟を開発する動機となる。ただし、そのような開発が行われる前に、提案されたプロジェクトの経済的影響と実現可能性についての徹底的な調査、および洞窟の生物学的および地球科学的な興味への開発の影響を考慮に入れた環境影響評価が行われるべきである。開発は、1) 影響を成功裏に管理でき、環境および公共の安全要件に準拠した建設のための十分な資金が用意されていること、および 2) 見込まれる収入が、洞窟を環境的に責任ある持続可能な方法で管理することを可能にすることが示された場合にのみ進められるべきである。特に、開発が開始されたものの完了せず、洞窟がさらに脆

弱な状態になったり、観光洞が開設されたものの、持続可能で責任ある運営を継続するために必要な収入を得るのに十分な観光客が集まらなかったりすることを防ぐことが重要である。さらに、経済計画がプラスにならない場合でも、国や地元のボランティアクラブによって経済的な成功が保証される場合、一般の人々に洞窟を開放することは許容される場合がある。適切に管理された観光洞は通常、洞窟を保護するだけでなく、地元経済に収入源と教育源を提供している。

観光洞は、一般の人々の大半が地下環境を体験する場である。そのため、文化的、歴史的、科学的な重要性和洞窟環境の素晴らしさを説明する絶好の機会を提供する。これは、洞窟が一般的に指定の主な理由である保護区では特に重要である。



Paradise 洞窟はベトナムのユネスコ世界遺産、Phong Nha-Ke Bang 国立公園内の観光洞。撮影：Steven Bourne.

Safety 安全性

訪問者と従業員の安全は、観光洞の基本的な目的でなければならない。これには地上と地下が含まれ、敷地内のすべての部分が含まれる。敷地に入出入りする交通は、適切に舗装された道路と駐車場を経由する必要がある。適切な組織化が不可欠である。地下では常に建築基準を満たすことができるわけではない。洞窟内の通路を計画する際には、訪問者の安全が最優先されるべきである。特に地下では天井の高さが重要である。十分な天井の高さが確保できない場合、潜在的な負傷を防ぐために警告を行うべきである。必要な場所には手すりを設置すべきである。

安全計画には、救急隊ができるだけ効果的に洞窟にアクセスできるようにすることが含まれる。地元の救急サービスとの関係を確立し、通常多くの体力を要する洞窟救助が遭遇する制約と困難をすべて関係者が認識できるようにすべきである。計画がない限り、これは洞窟環境自体にも深刻な影響を与える場合がある。観光洞のスタッフには、救助活動と応急手当の適切なトレーニングも提供すべきである。

Visitor carrying capacity 観光客適正収容量

観光洞の「観光客適正収容量」は、洞窟がツアーや一定の期間内で収容できる最大の来場者数を確立するための計画および管理ツールである。観光洞の観光客適正収容量を決定することは、来場者に安全で情報豊かで楽しい洞窟ツアー体験を提供し、経済的な目標を達成しつつ、洞窟環境への影響を最小限に抑えるバランスを見つけるものである。観光洞の適切なビジター収容人数を決定する際には、これらの要素をすべて考慮しなければならない。

以下の情報は、環境への影響を最小限に抑える要因に焦点を当てる。観光洞への観光客の訪問はある程度の影響を及ぼしているが、適切な訪問者管理手順と実践により悪影響を最小限に抑え、訪問者の満足度を高めることができる。最初のステップは、物理的なパラメータを考慮することである。訪問者の流れは、洞窟内を効率的に進み、影響を最小限に抑える方法で案内すべきである。考慮すべき要素には、通路の大きさ、二次生成物からの距離、インフラ（手すりのようなもの）、洞窟への出入りが別々の場所で行われ、直線的な見学者の流れができるのか、あるいは同じ場所で出入りするのか、などがある。訪問者が洞窟内ですれ違う場合は、十分なスペースを確保するためにこれらの場所を考慮すべきである。

第二のステップは、空気の流れ、空気の質、温度、湿度、洞窟の動物相などの環境パラメータを考慮することである。洞窟によっては、大勢の観光客が空気の温度と二酸化炭素濃度を著しく上昇させることがある。一人の人間が放出する熱エネルギーは 80~120W で、これは白熱電球 1 個分とほぼ同じである。したがって、洞窟ツアーに参加する 50 人または 60 人のパーティーは、局所的に気温を 1~2°C 上昇させる可能性がある。観光洞の管理者は、これらの変動が洞窟の自然な変動範囲内に収まるようにし、通常の状態では短期間で正常なレベルに戻るようにするべきである。訪問者の呼吸による二酸化炭素濃度の上昇は、1,500~5,000 ppm になる場合があり、この段階で一部の人々が不快に感じるかもしれない。一部の洞窟では、二酸化炭素濃度を管理するために、適切な衛生基準に基づく効果的なモニタリングが必要である。換気シャフトの設置や扉の改造によって、一部の洞窟では空気の循環が改善される場合があるが、こうした措置は慎重に考えられ、自然な洞窟環境を変えてしまうなどの問題を引き起こさないように適用される必要がある。



1806年に初めてショーケースとしてオープンした Baradla Domica 洞窟のガイドツアーに参加する観光客。この洞窟はハンガリーとスロバキアの国境を横断しており、Aggtelek 洞窟群とスロバキアのカルスト世界遺産に登録されている。また、この洞窟は2つの独立したユネスコ生物圏保護区（ハンガリーの Aggtelek とスロバキアの Slovensky Kras）、2つの独立したラムサール条約登録地（ハンガリーの Baradla 洞窟システムと関連湿地帯、スロバキアの Domica）にも登録されている。写真：Csaba Egri.

コウモリや洞窟適応種のような洞窟動物相の存在も考慮に入れるべきで、洞窟に住処を見つける生き物への影響を最小限に抑えることを目標とする。コウモリが観光洞内をめぐらしている場合、特にコウモリが冬眠しているときや繁殖しているときには、訪問者によって邪魔されないように特別な注意を払うべきである。

各洞窟の物理的特性と環境パラメータはそれぞれ異なるため、来場者収容能力は一律に適用するのではなく、各特定の観光洞および観光洞ツアー体験ごとに個別に決定する必要がある。観光洞の多くは、訪問者の体験を最大化し、環境への影響を最小限に抑えるためのツールとして経済学を利用している。一例として、「変動価格設定」と呼ばれる、季節や繁忙期の入場料を値上げして、繁忙期の過密を軽減することが挙げられる。これにより、訪問者の体験を向上させると同時に、過密による環境への影響を最小限に抑えることができる。また、観光洞が来場者収容能力の決定を行う際にすべての要因を考慮する例として、繁忙な休日の週末が挙げられる。ここでは、経営陣が通常よりも多くの訪問者を受け入れ、洞窟内の温度が通常よりも高くなるという環境への影響よりも経済的な利益が重要であると判断し、それに伴う環境への影響が限定的な日数である場合がある。

これらの環境への影響をそれぞれ考慮し、訪問者の経験や経済的要因と比較検討して、特定の観光洞に対する洞窟訪問者の最大収容能力を確立するのは、観光洞管理者の責任である。

Show cave access 観光洞へのアクセス

観光用に洞窟を開発することの最初の、そして最も明白な影響の1つは、既存の入り口の変更（自然洞窟へのアクセスを制御するために行われることもある）、または新しい入り口の建設である。多くの観光洞では、訪問者のために、

観光洞に転換する前に使われていた自然洞窟へのアクセスとは異なるアクセスを提供することが必要である。このような人工的なアクセスは、トンネルや洞窟内に掘削された新しい入口を介して提供される場合がある。人工的な入口が作成されると、これが洞窟内の空気循環を変え、洞窟生態系に混乱をもたらす可能性がある。洞窟内の空気循環の乱れを避けるためには、人工的な入口にはエアロックを設置する必要がある。エアロックを設置しないことを決定するのは、特別な調査を行った後でなければならない。効率的なエアロック・システムを設置する方法として望ましいのは、二重の扉を使用することである。

観光洞に来場者向けに適した天然の入口がある場合、適切な形態のアクセス制御を設置する必要がある。以前は入場料を徴収する主要な入洞ポイントから入場者が迂回できるような入口に対してゲートを設置または閉鎖することが一般的でした。これは、栄養素の導入や洞窟動物、特にコウモリの移動を制限したり、完全に妨げたりする悪影響があった。ウモリが使用する入口や通路にゲートを設置する場合、上部には高さ 15 cm、幅 45~75 cm の空隙を持つ水平バーを設置することが望ましい。この空隙により、コウモリが自由に通り抜けられるようになる。新しい洞窟のゲートはすべて、コウモリが自由に通れるように設計すべきであり、古いゲートはコウモリに優しい設計のものに取り替えるべきである。しかし、どのようなゲートも避ける種もいるため、その場合はフェンスなど別の解決策を見つけなければならない（インターネット資料：洞窟のゲートを参照）。

Above ground level works 地上工事

敷地の地形と洞窟の地下空洞を関連付けるには、地表の詳細と洞窟の地下の詳細が描かれた敷地図が必要である。この情報は、計画中の洞窟の場合と同様に、既存の観光洞窟にとっても非常に重要である。地上の特徴と地下の詳細の関係が分かると、水に関連する要因を評価できる。多くの場合、唯一の要因は、地下の岩を通して地表の水が浸透することであり、これは干渉すべきではありません。さらに、洪水水として地下に侵入する地表水のリスクを非常に注意深く検討する必要がある。

建物や駐車場のようない硬い表面を持つ場所は、地表から洞窟への雨水の自然浸透が起こる、洞窟の集水域（洞窟へ入ることができる場所と、そこに排水される水路）より上に配置しないことが重要である。自然浸透が妨げられる可能性がある場合は、他の解決策を模索すべきである。このような解決策は、防水性のある駐車場の表面を、雨水が通過できるような舗装に変えるといった簡単なものである。建物が洞窟の上にある場合は、できれば移設するか、財政的な理由で移設できない場合は、建物の寿命が来たら移設すべきである。屋根や他の堅い表面からの流出水は集中させず、広範囲に分散させる必要がある。また、サイトで発生する排出物が適切に処理され、地下の世界に汚染が及ぶのを防ぐことも非常に重要である。

観光洞の運営に必要な建物を、できるだけ洞窟の入り口に近い場所に配置しようとする傾向があるのは自然なことで、観光洞の入口や出口が、博物館、解説センター、ギフトショップなど、他の用途の建物内にある場合もある。しかし、多くの洞窟では、放射性ガスであるラドンの濃度が自然に高くなるため、これが洞窟からスタッフが作業している場所に漏れるのを許すと、放射線量が蓄積されることになる。したがって、洞窟の入口や出口と、スタッフが働く建物間に、換気されたエリアを確保することをお勧めする。

Infrastructure inside a show cave 洞窟内のインフラ

洞窟を観光用に開発する際、一般的には自然な通路の物理的な変更が必要であり、照明、歩道、プラットフォーム、関連するインフラの設置も行われる。既存の観光洞であっても新しい場所での開発においては、インフラの必要性を注意深く評価し、設計し、設置する必要がある。訪問者の満足と安全を提供する必要があることは明らかだが、洞窟の自然環境への変更や干渉を最小限に抑えることを目的とすべきである。開発は、通路の形態の変更や堆積物、鍾乳

石への損傷を最小限に抑えるように心がけるべきである。洞窟の歩道や照明に関連する問題は、以下で詳しく考えられている。いくつかの大規模な観光洞では、エレベーター、バス、列車など、アクセスを容易にし、より多くの観光客を可能にするために機械化された輸送手段が使用されている。これらのタイプの移動手段は、移動に問題のある観光客には優しいが、洞窟の環境に大きな変更を伴う可能性があり、そのため慎重に計画されなければならない

Show cave pathways 観光洞の通路

歩道は、耐久性のある安全な歩行面を提供し、訪問者が滞在すべき明確な境界を提供するための重要な要素である。洞窟内の観光ルートは、洞窟内の生物生息地や鍾乳石に最小限の影響を与えるよう設計されるべきである。洞窟の歩道の配置は、訪問者が主要な見どころに十分に近づけて見たり写真を撮ったりできるようにすべきだが、触れたり干渉したりはできないようにする必要がある。洞窟の堆積物の床は、可能な限り歩道を高く設置して保護し、生息地の価値、化石の記録、堆積物の歴史を保存する必要がある。

洞窟内の通路は広すぎる必要はない。たとえば、2人が並んで歩くことは、望ましいことではあるが、必須ではない。一列の通路で十分だが、ツアーグループが集まってガイドの話を聞くことができる、より広いエリアを時折作成することをお勧めする。展示洞窟内の通路は、通路の表面の下または横にユーティリティパイプ、導管、およびケーブルを配置するために使用できる。これらのユーティリティはコンクリートで囲まれないことが望ましいである。照明システムの制御スイッチには通路から簡単にアクセスできる必要がある。

通路は、歩行面、側面の縁石、手すりの3つの基本的な構成要素からなる。通路の設置に使用する材料は、洞窟の美観と地下環境の両方にできるだけ影響を与えないものが望ましい。

Walking surfaces 歩行面



フランス、Gouffre d'Esparros の観光洞にある高くなった通路。矢印は、土砂が下の洞窟に落ちるのを防ぐためのネット。写真：John Gunn.

歩道の歩行面に使用する材料は、洞窟環境に対して無害であるべきである。伝統的には、特に石灰岩の洞窟では、歩道の歩行面には一般的に洞窟が形成された岩に最も近いコンクリートが好まれている。コンクリートは歩道を高くできない場合にも広く使用されている。コンクリートには洞窟に美的に溶け込み、耐久性があるという明確な利点があるが、その重さ、混合および注ぎ込み時の潜在的な問題、一度設置された後の取り外しの難しさなどの欠点もある。また、歩道の歩行面に使用する材料は、洞窟環境に対して無害であるべきである。伝統的には、特に石灰岩の洞窟では、歩道の歩行面には一般的に洞窟が形成された岩に最も近いコンクリートが好まれている。コンクリートは歩道を高くできない場合にも広く使用されている。コンクリートには洞窟に美的に溶け込み、耐久性があるという明確な利点があるが、その重さ、混合および注ぎ込み時の潜在的な問題、一度設置された後の取り外しの難しさなどの欠点もある。また、コンクリートからの浸出物が生物学的に悪影響を及ぼす可能性があるという証拠もいくつかある。低密度のコンクリートは、パーライト、軽石、火山スコリアなどを使って作ることができ、十分な歩道強度を保ちながら、軽量化という点では利点がある。ステンレス・スチール製のグレーチングも、歩道の材料として人気が高まっている。ステンレス鋼は高価で、組み立てや設置に特殊な技術を要するという明確な欠点がある。ステンレス製留め具を備えたガラス繊維強化プラスチック(FRP)格子も、ステンレス鋼よりもコストと重量が低く、洞窟通路によく使用される素材である。

ステンレスや FRP など、適切なグレーチング素材で作られた昇降式歩行面は、長持ちし、メンテナンスがほとんど必要なく、洞床への影響も少なく、取り外しも比較的容易であるため、必要に応じて洞内をほぼ自然の状態に戻すことができるという利点がある。しかし、あらゆるタイプのグレーチング(格子)は、糸くず、ゴミ、土、泥、小物などが洞窟の床に落ちてしまうため、この点を考慮した設計でなければ、グレーチングを外して下の洞窟の床を掃除するのは非常に難しい。

Kerbs 縁石

縁石またはキックプレートには、いくつかの異なる目的がある。1 つは、訪問者の足を囲い、通路を越えて洞窟の特徴を保護することである。もう 1 つは、歩道の反対側を向いている縁石の外側が、共用導管、パイプ、ケーブルに便利な場所を提供していることである。縁石は、訪問者からの糸くずやその他の残留物を防ぐのにも役立つ。

Handrails 手摺

手すり(またはガードレール)は、デリケートな場所や危険な場所で来場者が通路から外れるのを防ぐと同時に、来場者に安定性やサポートを提供する。ショーケースの手すりの素材は、ステンレス・スチールが好まれている。この素材には、メンテナンスがほとんど必要ないこと、洞窟内で組み立てや溶接ができること、洞窟内に新鮮な水を運ぶための水配管として使用できる可能性があることなどの利点がある。この材料の欠点は、コストと輝度である - それは美的には魅力的ではない。実際の手すり自体の下に取り付けられるソリッドな中間の柱やソリッドな手すりの代わりに、ステンレス鋼ワイヤーロープを使用すると、ソリッドスチールの視覚的な影響が大幅に軽減される場合がある。鋭角に曲げるのではなく、カーブをつけるのも効果的である。ガラス繊維強化プラスチック(FRP)製レールにステンレス・スチール製ファスナーを取り付けたものも普及しつつあり、効果的で低コストのソリューションとなっている。

通路などのインフラストラクチャは、訪問者に安全なアクセスを提供し、洞窟を衝撃から保護することを目的としているが、インフラストラクチャの設置自体は、慎重に行わないと大きな影響を引き起こす可能性がある。建設工事を開始する前に、環境影響評価を実施し、環境緩和および管理計画(environmental mitigation and management plan;EMMP)を作成する必要がある。建設中の洞窟資源へのダメージを最小限に抑えるために、EMMP を実装および監視する必要がある。

Cave lighting 洞窟照明

観光洞のエネルギーバランスは理想的には自然（開発前）の変動範囲内にあるべきである。電気の照明は光と熱の両方を放出するので、可能な限り熱を発生させないようにするために、照明は高効率であるべきである。多くの観光洞は、古い照明システムを近代的な、高効率の発光ダイオード（LED）照明に置き換えており、これらは新しい開発やケイブ照明のアップグレードにすべて使用すべきである。

グループで移動する観光洞では、見学ルートをゾーンに分け、ガイドが照明のオン・オフを切り替えるのが効果的である。こうすることで、見学者がいる洞窟の一部だけを照らすことができる。これは、洞窟環境の加熱を抑え、照明植生の成長を抑制し、必要なエネルギーの量とその費用を削減するのに役立つ。一方、訪れる人が独自に移動する観光洞では、照明を移動センサーやタイマーと連動させることができる。電気システムは、安全でバランスの取れた回路に設置する。

主電源に障害が発生した場合、何らかの非常用照明を常備しておくことが重要である。非常照明は、完全な無停電電源装置であれ、独立電源装置を備えた非常照明システムであれ、常に利用可能であるべきである。地域の法令が適用され、バッテリーランプや同様の装置が許可される場合もある。

照明計画において重要な考慮事項の 1 つは、視覚的な影響と洞窟への損傷の両方を最小限に抑えるために、照明器具、配線、電源キャビネットをどのように配置するかである。照明植生は、洞窟に人工照明を導入した場合によく見られる現象である。さまざまな種類の藻類やその他の高等植物が人工光源の導入によって発生する可能性がある。照明は、照明植生の成長を最小限に抑えるために、クロロフィルの吸収スペクトルへの寄与が最小限に抑えられた発光スペクトルを持つ必要がある。照明植生の成長を防ぐもう 1 つの方法は、植物が生息する可能性のある表面に到達するエネルギーレベルを下げることである。ランプと洞窟の表面の間の安全な距離は、ランプの強度によって異なる。おおよそその目安として、1 m の距離が安全である。光は照明する対象に注意深く向けられ、周囲のエリアに光が漏れたり、訪問者の目に入ったりを避ける必要がある。この点で照明器具の遮蔽が非常に役立つ。過去には、温かい色の照明が鐘乳石や洞窟アートに近すぎる場合、重大な損傷を引き起こすことがあったが、冷たい LED 照明を使用するとこの問題はそれほど重要ではない。

過剰な照明を避ける照明デザインは、洞窟への環境への影響を最小限に抑えるだけでなく、暗闇の意図的な利用や選択した洞窟の特徴に対する照明の順序付けによって、訪問者の体験を向上させることができる。観光洞の照明を設計する際に心に留めておくべき重要な 2 つの原則がある：アクセスのための照明は、すべての洞窟の訪問者の安全な移動と一致する最小レベルであるべきである。効果的な照明を使用することで、不慣れた環境でも安全にアクセスでき、見学者をリラックスさせる親しみやすいゾーンを作り出すことができる。LED ストリップライト、12V ダウンライト、および他の低エネルギーテクノロジーの使用で、この目的を達成できる。これらは手すりや通路の端に取り付けることができ、必要なインバーターやバッテリーはよく隠されている。一般的に、すべての照明器具と配線は、訪問者からよく隠れているが、洞窟とその内容にさらなる損傷を与えることなく、メンテナンスのためにアクセスできるようにしておく必要がある。消費電力の削減には、CO₂ 排出量の削減以外の利点があり、低電力要件は、本格的な停電が発生した場合に現地の無停電電源を使用できるようにする。また、熱の発生も少なくなる。現在は多くのそのような技術が利用可能だが、それらは目的を達成するためのツールとして使用すべきであり、それ自体が目的ではない。

美観のための照明は、洞窟、探検、開発、歴史などの側面を説明するためなど、根底にある哲学に基づくべきである。可能であれば、照明は連続的であるべきで、訪問者がある場面から次の場面に導き、場合によっては洞窟全体を照らすことになる。暗い環境では、どのような光でも劇的な効果をもたらす。また、非常に遠くの光でも、奥行きと神秘的なイリュージョンを高めることができる。水場の照明は、非常に効果的で、訪問者に美的感動を与えることができる。

洞窟の照明デザインには、特定の特徴を強調するためにカラー照明を利用するものもあれば、洞窟の自然の色を見せるためにニュートラルでクールな光を利用するものもあり、どちらも洞窟の環境に大きな影響を与えない。観光洞の中には、訪問者の体験を高めるために、音楽と同期した照明ショーを行うものもあるが、洞窟環境に悪影響を与えることは知られていない。

Cave cleaning 洞窟清掃

多くの観光洞では、定期的に通路や時折鍾乳石が掃除される。これはほこり、繊維、流入した堆積物、菌類、藻類（照明植生）などが蓄積するためである。いくつかの方法が試されているが、高压洗浄が最も一般的に使用される方法である。ただし、一部の場合では、こすり洗い、界面活性剤の使用、蒸気清掃も試されている。これらのすべての方法は、掃除される鍾乳石表面に一定の影響があると予想される。高压洗浄を行う場合、オペレーターは洗浄の回数と頻度を制限し、方解石表面上でのノズルの通過回数を最小限に抑えるように努める必要がある。

照明植生は、観光洞の悪名高い惨劇であり、根強い問題である。塩素系漂白剤のような強力な洗浄剤の使用は、藻のような汚染生物を取り除きたいという需要を満たすが、残念ながら、塩素系漂白剤を含む化学薬品は、適切な条件下ではすぐに藻が繁殖するため、長期的にはあまり効果がない。藻の繁殖を最小限に抑える唯一の方法は、短期間しか繁殖を止められない定期的な化学処理ではなく、光と熱を減らすことによって、照明植生の発生をコントロールすることである。

しかし、照明植生が増殖した場合は、化学合成物質でそれを破壊する必要がある。しかし、除草剤（Herbicides）は洞窟の環境には毒性が強すぎるため、洞窟内では決して使用すべきではない。除草剤は農業でよく使用されるが、その分解が遅く、有毒性が洞窟の生態系に深刻な影響を与える可能性がある。照明植生を減少または除去するための強力な漂白剤の使用については、Cigna（2011）によって調査された。最も広く使用されている2つの化学物質は、次亜塩素酸ナトリウム（塩素漂白剤、体積の5%）と過酸化水素（体積の15%）である。次亜塩素酸ナトリウムは塩素を洞窟環境に放出し、効果的な洗浄剤である一方、洞窟の生物にとっては有毒だが、速やかに拡散する可能性がある。過酸化水素は鉄分が豊富な堆積物が存在する場合、意図しない生物学的影響を与える場合がある。アメリカの新しい研究（Kieft et al., 2021）では、塩素漂白剤と過酸化水素は、塩素漂白剤の毒性と過酸化水素が鍾乳石を分解するため使用すべきではないと示している。ベンザルコニウム塩化物は、1%から10%の濃度で使用すると、照明植生を効果的に除去する無毒の殺菌剤である。著者らはまた、殺菌 UV ライト（UV-C）の使用を推奨している。どの薬剤を使用するにしても、洗浄後には表面をしっかりと洗うことが推奨される。できれば公共の水道からの塩素処理された水ではなく、洞窟の水を使用すべきである。年に一度のクリーニングがおそらく最適な頻度だが、一部の場所では、洞窟の水だけを使用してより頻繁にクリーニングすることで利益を得る場合があるでしょう。

New materials 新素材

新素材は常に開発されており、洞窟での使用に適している、あるいは大きな可能性を秘めているように見えるものもある。しかし、一部の新素材は優れていることが証明されているが、複合材料（合成木材）などの他の素材はそうではなく、洞窟に悪影響を及ぼす。この問題の一つの側面は、多くの種類の複合材料が存在し、木繊維を含むものは細菌の繁殖や藻類、カビの発生を支援する可能性があるため避けるべきである。すべての複合材料の仕様書を注意深くチェックし、材料に木材や紙製品が含まれていないことを確認すべきである。洞窟で複合材を使用する予定がある場合は、提案されている種類の複合材が、使用する予定の洞窟環境で広範な試験の対象となった後にのみ使用するべきである。ステンレス鋼は洞窟で使用するのに優れた素材であることが証明されている。ただし、ステンレス鋼にはさまざまなグレードや品質がある。ステンレス鋼の使用にかかるコストの多くは、使用目的に適したタイプを見つけることにかかっている。この材料を洞窟内で使用する予定がある場合は、よりグレードの高いステンレス鋼を使用することをお勧めする。洞窟での使用に大きな可能性を秘めた新しいプラスチックが開発された。これらの新しいプラスチックの大きな利点は、軽量で鋼鉄に近い特性を持ち、簡単な工具で簡単に加工できることである。プラスチック部分はステンレス鋼のボルトで接合されているため、将来の設計更新も容易である。これは樹脂でコーティングされたガラス繊維を加熱ダイに通して引き抜いて作られたプラスチックである。これらはしばしば砂利でコーティングされており、より良いトラクションを提供しているが、多くの来場者がいる場合、すぐに摩耗する可能性がある。手すりも繊維強化プラスチックで作成できる。

Materials that usually don't belong in a show cave 通常は観光洞にふさわしくない素材

どのような素材が観光洞にふさわしくないかという問題を考える上で、このセクションに列挙されている素材の多くが、過去のある時期には使用に適していると考えられていたことを認めなければならない。その結果、現在では望ましくないと考えられている材料を1つ以上含んでいない既存の観光洞を見つけることは、おそらく困難であろう。観光洞として開発中の洞窟は、以下に述べるように、現在望ましくないことが知られているすべての材料の使用を避けるべきである。

Galvanised metals 亜鉛メッキ金属

過去数十年間、亜鉛メッキ鋼管は観光洞の手すり、階段、プラットフォームとして使用される材料として選ばれていた。しかし、亜鉛メッキ材料に含まれる亜鉛は酸化しやすく、洞窟環境に浸出する。亜鉛メッキコーティングの浸出は、特に敏感な無脊椎動物の洞窟動物や方解石の堆積に悪影響を与える可能性がある。既存の観光洞で亜鉛メッキ鋼板が使用されている場合は、別の材料に取り替えるためのプログラムを策定すべきである。

Dissimilar metals 異種金属

異なるグレードのアルミニウムなどの異種金属を使用すると、湿った環境で相互に接触すると必ず腐食が発生する。最初で最良の解決策は、異なる金属を互いに接触させて使用しないことである。次善の解決策は、ネオプレンやナイロンワッシャーなどの装置を使用して材料を相互に隔離することだが、これは水の膜がバリアを横切って広がった場合に避けられない事態を遅らせるだけである可能性がある。また、犠牲陽極（ガルバニック陽極）は、洞窟に悪影響を及ぼす可能性のある何らかの化学化合物を生成するため、使用しないことを推奨する。

Non-ferrous metals 非鉄金属

多くの非鉄金属も、過去に洞窟で使用されたことがある。おそらく最も一般的なものは銅とその関連合金で、洞窟内の多くの緑色のシミの原因となってきた。

Iron and steel 鉄鋼

未処理の鉄や鋼は錆びやすい。炭素の割合が少ない軟鋼であっても、酸化（錆びる）しやすい。従って、生の鉄や鋼鉄は、錆のシミが生じるので、観光洞では使用しないこと。

Bitumen (asphalt) ビチューメン（アスファルト）

ビチューメン（アスファルト）は、石油から得られる炭化水素の黒色粘性混合物である。ビチューメンには、生物相に有毒な生成物を溶出する能力があり、方解石の堆積を妨げる可能性がある。既存の観光洞でアスファルトを発見した場合、できるだけ早く除去する計画を立てるべきである。観光洞として開発されている洞窟内では、決してアスファルトを使用すべきではない。

Wood 木材

何世紀にもわたって、木材は建築や家具などのアイテムの製造に好まれてきた材料である。したがって、観光洞開発の初期に木材が使用されるのは当然のことであった。残念なことに、木材は腐り始めるまでの寿命が比較的短い。これには、クレオソート処理および圧力処理された木材が含まれる。一般的に洞窟の環境は孤立しており、外部からのエネルギーの導入は洞窟の平衡を変える可能性がある。洞窟を流れる川や小川が存在するなど、何らかの理由で有機物の含有量が高い場合には例外がある。

洞窟の環境で木材が分解・腐敗すると、腐敗した木材が食物連鎖の一部となる可能性がある。腐敗した木材は真菌や細菌の繁殖を助長し、洞窟の在来種に取って代わる外来種が侵入する危険性さえある。型枠や足場、同様の一時的な目的に木材を使用する場合、可能であれば洞窟内で作業すべきではない。作業が完了したら、木材は取り除き、作業や構造物の解体によって発生したくずや破片を丁寧に取り除くよう注意を払うべきである。腐敗した木材を洞窟から取り除く必要がある場合は、運搬中に崩れないように注意を払い、不自然な栄養源を提供しないようにする必要がある。腐った木材の小さな痕跡でも、洞窟に生息する種の個体数爆発を引き起こす可能性があるため、洞窟から木材を持ち出す前に木材から腐朽した木材を除去する必要がある。

既存の展示洞窟で木材が見つかった場合、経済的に許される限り、木材の導入が自然環境に重大な変化を引き起こす可能性がある場合には、他の材料に置き換える計画を立てる必要がある。このような計画の対象となる期間は、現場木材の予想寿命によって制限されるべきである。観光洞の開発中には、木材以外の材料を選択する必要がある。氷の洞窟だけが木材と相性の良い環境特性を備えており、滑りにくく、凍った状況でも作業が容易なため、通路や手すりの建設によく使用される。

Monitoring モニタリング

洞窟の気候の基本的なモニタリングは、定期的を実施し、公式なモニタリングスケジュールを採用すべきである。気温、湿度、ラドン（濃度が法律で定められたレベルに近いかそれを超える場合）、水温（該当する場合）を監視することができる。二酸化炭素の濃度が自然変動の範囲から大きく外れている場合は、そのモニタリングも含めるべきである。洞窟内外の空気の流れもモニターすることができる。洞窟で研究を行う科学者を選ぶ際には、洞窟環境に精通した経験豊富な科学者に依頼することが非常に重要である。それ以外の場合でも、能力のある科学者であっても、洞

窟環境について完全に理解していない場合がある。間違った助言が洞窟の管理に与えられると、洞窟環境が危険にさらされる可能性がある。洞窟科学は非常に専門的な分野である。

Show cave managers 観光洞管理人

観光洞の管理人は、観光洞のビジネス管理と環境保護の両方の能力を備えていなければならない。観光洞の管理者は、洞窟が「金の卵を産むガチョウ」であること、そして洞窟が細心の注意を払って保存されなければならないことを決して忘れてはならない。

Show cave guides 観光洞ガイド

観光洞のガイドは、洞窟と訪問者の架け橋として非常に重要な役割を果たす。ガイドが適切に訓練されていることが非常に重要である。観光洞の管理者は、特にその洞窟でのガイディングについて書かれたガイドマニュアルを作成すべきである。ガイドはグループダイナミクスだけでなく、地質学、生物学、古生物学、文化のおよび歴史的な重要性、およびそれを訪問者に分かりやすく面白く伝える効果的な方法についても訓練されるべきである。観光洞ガイドは、訪問者に洞窟とカルスト地形の支持者になるよう促す素晴らしい機会を提供する。彼らは訪問者の安全と洞窟の保護も担当している。

Interpretation 解説

解説の目的は、洞窟とその自然・文化遺産の価値に関する情報を訪問者に提供し、洞窟体験の理解と認識を高めることである。解説のもう一つの側面は、洞窟資源の保護と、洞窟の訪問者とスタッフの安全のための規則と規制を効果的に伝えることである。これらの「すべきこと」と「すべきでないこと」は、訪問者が理解し、できればその重要性を理解し、自発的な遵守を促すような方法で、作成し、展示し、口頭で伝えるべきである。洞窟ガイドが同行するツアーグループ、あるいは洞窟全体に配置されたガイドに監視されながら個人で入場する洞窟では、洞窟ガイドは、洞窟の保護と訪問者の安全のための規則と規制の遵守を確実にするために、適切な訓練を受けるべきである。

洞窟訪問者の体験は、実際の訪問前、訪問中、訪問後に作用する多くの要因によって形成される。これらの要素のうち、認識、期待、受容（到着）、および回想は、実際の洞窟体験そのものよりも重要である可能性があり、長期的にはおそらく回想が個人にとって最も重要である。訪問者の体験のモニタリングは、これらの要素を評価するように設計されなければならない。

訪問者の体験をデザインする際の基本原則は次のとおりである。：

- オンラインまたは現地で一般向けに提供される情報は、正確で誤解を招かないようにする必要がある。事前にこの情報を提供することで、望ましくない行動を減少させ、期待感を高めることができる。
- 洞窟地域への入口では、可能な限り最高の外観が得られるようにするべきである。
- ガイド付きツアーのある洞窟では、各ツアーは適切な訪問者数、適切な時間に合わせて調整され、訪問者との関係や親密な関係を築くよう努める知識豊富なガイドが案内する必要がある。
- すべての訪問者の特定の文化的ニーズや興味を特定し、それを提供するためにあらゆる努力を払うべきである。



ドイツ語と英語でマルチメディア情報を提供する4つのインタラクティブ・ステーションのひとつ、Wendelstein 洞窟（ドイツ）。写真：Peter Hofmann.

各観光洞は、ツアーやインターネット上の宣伝資料で利用する特定のテーマを開発することを推奨している。これらのテーマは教育プログラムの基盤となる可能性がある。このようなテーマを開発することは、ガイドと管理者にいくつかの課題をもたらすが、訪問者にとってより有意義な洞窟体験と、より充実した労働力をもたらすことができる。過去には、ほとんどのケーブルツアーがガイドによって案内されていたが、21世紀に入ってから、訪問者が自分のペースで洞窟を移動できるようにする自己ガイドツアーへの移行が見られる。自己ガイドの洞窟ツアーへの移行は、一部ではガイドの雇用を減らしてコスト削減を図るという目的で行われているが、洞窟内で特定の場所にガイドを配置し、安全を確保し、損傷を防止し、必要に応じて追加の解説を行うモデルを採用することも可能である。後者のモデルは、地元の農村コミュニティが洞窟観光に関与し、ガイドが地元の雇用に重要な貢献をする場合に特に適している。一部の観光洞は、来場者数が変動するシーズンにおいて、これらのモデルまたは併用することがある。

セルフガイドツアーでは、解説に異なるアプローチが必要であり、現在、以下のようなアプローチが用いられている：

セルフガイドの観光洞で使われる解説のアプローチ

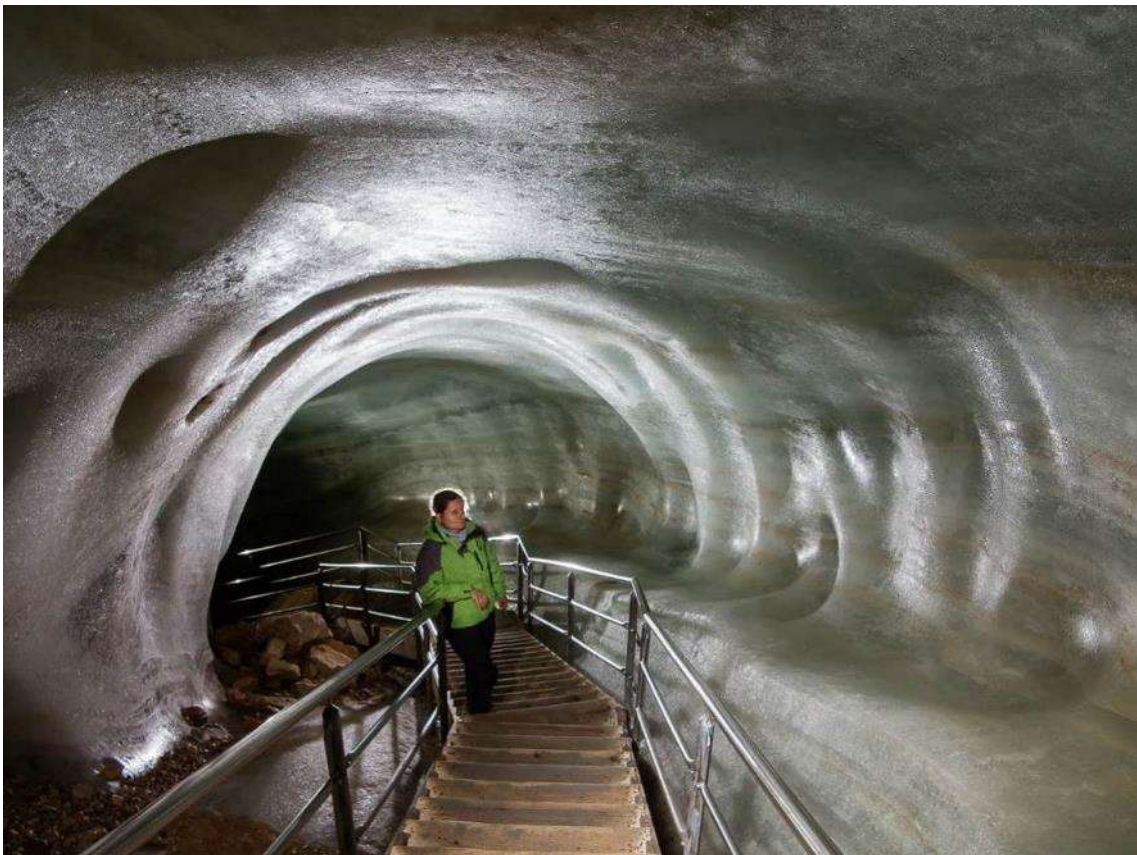
Interpretive type	解説タイプ	Used at these caves:	使用洞窟
看板のみ		以下の国々を含む多くの洞窟がある：	
		オーストラリア	Fig Tree Cave, New South Wales Mammoth Cave, Western Australia
		オーストリア	Lamprechtsofen Cave
		中国	Furong Cave, Chongqing
			Tenglong Cave, Hubei Province
		マレーシア	Deer Cave, Sarawak
			Niah Great Cave, Sarawak
		スロベニア	Škocjan Caves
		USA米国	Mammoth Cave, Kentucky
		複数の言語でメッセージが表示されるハンドセット	ラオス
スペイン	Cueva de Nerja		
米国	Carlsbad Cavern		
音声メッセージ付きの固定局	メキシコ	Balankanche Cave	
	英国	Dan yr Ogof	
来場者のスマートフォンにアプリを提供	英国	Treak Cliff Cavern	

どのタイプを使用する場合でも、テーマ別の解釈や強力な保護メッセージの組み込みなど、適切な解釈が重要である。説明板は現地の言語だけでなく、一般的な国際言語でも書かれている必要がある。

Guidelines

- (20) 既存の観光洞は、可能な限り高い基準で管理されるべきであり、ISCA 推奨ガイドラインや、ここに記載されているガイドラインに準拠するよう努力すべきである。
- (21) 洞窟を観光洞として開発する前に、環境と経済的な持続可能性を判断するための徹底的な調査が行われなければならない。
- (22) すべての観光洞にとって、安全は最優先事項でなければならない。
- (23) 特定の観光洞の訪問者収容能力を決定することは、訪問者に安全で有益で楽しい洞窟ツアー体験を提供することと、経済的目標を達成しつつ洞窟環境への影響を最小限に抑えることのバランスをとることである。訪問者の体験、環境への影響、経済的目標の3つすべてを考慮しなければならない。
- (24) 地上工事が洞窟に及ぼす潜在的な影響を分析するためには、洞窟の地表と地下両方の詳細が描かれた測量図が必要である。

- (25) 自然の洞窟環境を維持するためには、観光洞の入口に適切なインフラを整備することが不可欠である。
- (26) 既存の観光洞であれ、新規の場所であれ、すべての新規開発において、インフラのニーズは、現在のベストプラクティスを考慮に入れながら、慎重に評価、設計、設置されるべきである。
- (27) 洞窟内の電気照明ネットワークは、ゾーン分けされることが望ましく、これにより、現在訪問者がいる洞窟の部分のみを効果的に照らすことができる。光の使用は最小限にして、特定の特徴のみを照らし、訪問者の経験を高めるような雰囲気を作り出すべきである。
- (28) 効果的な観光洞の管理は、適応的なサイト管理を可能にするためのモニタリングによって支えられている。最低限、洞窟、動物相、気候、二酸化炭素濃度の基本的なモニタリングは、モニタリングのスケジュールに従って実施されるべきである。
- (29) 観光洞の管理者は、観光洞の経営と環境保護の両面で有能であるべきである。
- (30) どのような観光洞でも、ガイドは洞窟と訪問者をつなぐ非常に重要な役割を果たす。ガイドは、特定の洞窟の価値観と、訪問者に対する解釈について、適切な訓練を受けることが不可欠である。
- (31) すべての観光洞は、一般の人々が洞窟の環境をよりよく理解し、鑑賞できるよう、質の高い解説情報を開発すべきである。



オーストリアの Eisriesenwelt 洞窟では、氷の美しさと質感を体験できる。写真：Csaba Egri.

Adventure and tourism activities on surface karst カルスト地表での冒険とツーリズム活動

21 世紀に入って以降、裸地の地表カルスト、石灰岩の舗装、尖塔状のカルスト、断崖や峡谷などでの冒険やツーリズム活動が増加している。これらの険しい場所は、時には人里離れた生息地は、認識されていない生物多様性や地質多

様性の価値を持っている場合がある。特に保護区域では、これらの価値を保存することが重要である。したがって、このような活動を許可するかどうか、どのような条件（規制）で、どこで（ゾーニング）行うかについての意思決定プロセスの一環として、希少種や固有種の植物（ランなど）や動物（ラングールなど）、あるいは脆弱なカルスト地形（ピナクルなど）について、これらの地域を調査することが重要である。

このような活動を支援し、許可されるために必要なインフラストラクチャーは、視覚的にも完全性の面でもカルストにほとんど影響を与えないように設計・設置されるべきであり、将来必要に応じて容易に撤去できるようにし、必要な場合はカルストをほぼ自然な状態に戻すことができる。

19世紀にアルプスのカルスト地帯で始まったピア・フェラータ（鉄の道）を利用したカルスト・周回コースは、特に20世紀後半以降にヨーロッパで人気となり、世界中に広まっている。マダガスカル島のツィンギ・ド・ベマラハ WHPでは、「ビッグ・ツィンギ・サーキット」と呼ばれるカルスト・周回コースが、遊歩道、プラットフォーム、はしご、吊り橋、および一部の場所ではケーブル安全ラインが含まれる。ラオス中部にあるプー・パー・マーン（Phu Pha Marn）のカルスト・サーキットには、ジップライン、ヴィア・フェラータ（Via Ferrata）、吊り橋、ネット・ブリッジ、プラットフォームがあり、周回コース全体にケーブルの安全ラインが張られている。これらのサーキットでは、壮大なピナクル・カルストの景観を探検・体験し、固有種の野生動物（キツネザルやラングールなど）を見ることができる。少人数のグループで訪れる観光客は、訓練を受けたガイドの案内で周遊する。非常に険しく露出した景観のため、訪問者は決められたルートに留まり、自然の生態系にできるだけ影響を与えないようにする。訪問者は、壊れやすいピナクルやその他のカレンの特徴を歩いたり登ったりしてはならない。

ロッククライミングの歴史は古いが、21世紀に入ってから、特に固定した補助具を使わず、ロープも使わない「ボルダリング」の参加者が著しく増えている。崖の生息地は、歴史的に最も人間活動に邪魔されない場所のひとつであったが、以前にも増して人間による圧力に直面している。調査によると、クライミング・ルートは、クライミングに使われていない同じような崖の地域よりも植物の被度が低く、生物多様性も低い。石灰岩は一般的に、花崗岩や砂岩のようにきれいに割れない。そのため、石灰岩の崖にプロテクション用の「伝統的な」取り外し可能なアンカー（チョックやカム）を設置するのは難しい。その代わりに、ほとんどの石灰岩のエイドクライミングエリアでは、保護のために事前に設置されたボルトで固定されたアンカーが使用されている。クライマーズ協定（Climber's Pact）のようなロッククライミングの行動規範があり（インターネット資料を参照）、クライミングエリアにおける生物多様性、地質多様性、文化的価値（先住民のロックアートなど）の保護に取り組んでいる。



ラオス、Phou Pha Marn 保護区のピナクル・カルストの中をジップラインで進む。写真：
Green Discovery Laos.

キャニオニングは、通常流れる川や溪谷を利用して、ロープを使った降下（アブセイリング）、登攀、ジャンプ、水泳などの技術を駆使して進むアウトドアレクリエーション活動である。キャニオニングは 1970 年代にアメリカ人やヨーロッパ人によって広まったが、その起源は 19 世紀末のフランスにまで遡る。近代洞窟学の父として知られるエドゥアール・アルフレッド・マルテルは、洞窟探検と研究のパイオニアであり、崖谷地域の難アクセス地での科学的研究のためにキャニオニングの技術を最初に導入した。国際キャニオニング組織（International Canyoning Organization for Professionals）によるキャニオニングの行動規範（インターネット資料を参照）には、環境に対する意識と保護についての議論が含まれている。

Guidelines ガイドライン

- (32) 険しく人里離れた地表のカルスト生息地には、認識されていない生物多様性や地質学的価値がある可能性があり、どのような条件下で、どこで、冒険やツーリズム活動を許可するかという意思決定プロセスの一環として、調査・評価されるべきである。
- (33) 地表カルスト活動を支援するために必要なインフラは、視覚的にも完全性の面でもカルストにほとんど影響を与えず、必要に応じて将来容易に撤去でき、カルストをほぼ自然の状態に戻せるように設計・設置されるべきである。

Scientific research 科学的研究

洞窟は、地球や人類の過去の歴史、生物の進化プロセスを研究するのに最適な場所の一つである。洞窟は効果的に断熱されたタイムカプセルであり、骨、貝殻、花粉、木炭、植物などの有機物や、碎屑性堆積物や鍾乳石などの無機物を保存する傾向がある。洞窟や洞窟の入口は、特に乾燥、低湿度、温度の極端な地域で生物が生存できない場合に、多くの植物、動物、微生物の一時的な避難所または恒久的な避難所として機能している。

有機物と無機物は、さまざまな自然の地形学的プロセスを介して洞窟に運ばれるが、最も一般的には水が関与し、場合によっては風が関与している。地下物質が蓄積し、通路が遺棄されると、蓄積された堆積物は地表で作用する風化プロセスから保護される。ほとんどの活発なカルスト水文システムは、流れが速いことを特徴としているが、一部の地域では地下水は深い流路をたどり、表面に戻るのに数百年または数千年かかる場合がある。近表面の水と混合しない限り、彼らはクロロフルオロカーボン (chlorofluorocarbons) や 1950 年代の人為的に導入された原子放射線などの人為的な汚染物質なしに現れる。古環境や考古学の研究にとって、洞窟は、現在、洞窟に保存されている同位体、骨格標本、堆積物に保存されている環境 DNA (e-DNA) など、学際的な情報の「スーパーマーケット」となっている。気候変動の指標に焦点を当てた研究にとって、保存状態の良い洞窟は多くの手がかりや研究材料を提供してくれる。これには火山灰層、洪水の淡水堆積物、滴下水と鍾乳石中に存在する同位体や有機残渣が含まれる。

生物学的研究において、洞窟は「地底の実験室」に例えられる。なぜなら、洞窟は強く断熱され、緩衝された環境であり、地表の環境に影響を与える変数や摂動の多くが存在しないか、あるいは強く抑制されているからである。具体的には恒常的な暗闇、ほぼ一定の温度と高い湿度、低い餌供給、そしてほとんど存在しないか、強く緩和された昼夜や季節の変化などが挙げられる。これらの比較的安定した予測可能な条件は、洞窟やその中の生物相を、適応、エネルギー流、進化プロセスなどの基本的な生物学的な問題の研究に非常に適しているものとする。活動中の洞窟は通常、地表から定期的に情報を受け取るが、残存した洞窟は孤立した「地下島」になる可能性があり、そこでは専門的な地元固有の「トログロビオント ('troglobiont')」種が進化する可能性がある。これらの種は希少で、一般的に分布範囲が限られているため、研究活動がこれらの種に与える可能性のある影響を評価することが重要である。

洞窟に生息する鳥類やコウモリの個体群は、科学的調査とは関係なく、人が洞窟に入ることによる攪乱に対して特に脆弱である。洞窟のねぐらや繁殖地でコウモリや鳥を捕獲したり、巣を採集したりすることは、研究目的であれ、伝統的な食用・薬用目的であれ、地域の鳥やコウモリの個体群に非常に大きな影響を与える可能性がある。洞窟の無脊椎動物の個体群のほとんどは、人間の存在にあまり反応しないか、明らかに妨害されているように見える。踏みつけは、個々の洞窟無脊椎動物にとって直接的な脅威であることは明らかであり、人間の往来が激しいと、地下に生息する脆弱な種に大きな影響を与える可能性がある。特に床に生息する脆弱な種に対して、重い人間の移動は影響が大きい傾向があるが、これらの種は隠れやすいである。柔らかい堆積物の踏みつけは、科学者だけでなく、すべての洞窟探検家にとって一般的な問題である。石の下に隠れている種を押しつぶす可能性がある。ただし、ほとんどの無脊椎動物の集団は、中空の空間にいる可能性が高く、条件が適切な場合にのみ洞窟の通路に出てくるでしょう。

科学者による過剰な採集もまた、洞窟の動物相を脅かすものとして認識されてきた。ホライモリ (*Proteus*) が博物館の展示品として珍重されていたヨーロッパ諸国では、このようなケースがあった。洞窟の甲虫 (メクラチビゴミムシなど) は、蝶と同じように、アマチュアやプロの昆虫学者によって、今でも収集可能な標本として求められている。科学的な過度の収集が脅威になる可能性は、集団遺伝学の研究など、多くの標本が必要な研究プロジェクトでのみ起こる。そして、サンプリング対象となる個体群が小さく孤立している場合のみ発生する。ほとんどの現代の生物学者は、過度の収集の潜在的な影響を認識しており、生物学のほとんどの研究は個体群や種の生存に最小限の影響を与えるように行われる。これには使用されなくなったトラップ (落とし穴) の撤去も含まれる。しかし、科学的な同定や分類のために時折行われる個々の標本の採集は、脅威として認識されるべきではなく、むしろ種の正確な同定と保全のためには不可欠なものである。設計が不適切な (または実施されていない) 科学実験は、環境への影響をもたらす可能性がある。例えば、1970年代には、ブラジルの保護区内の洞窟で有名なムーリス地下研究所 (フランス) を再現しようとする試みがあった。この試みは失敗し、多くの洞窟適応型の魚の死亡をもたらした。その後、劣化した研究所の構造物を撤去しなかったことで問題がさらに悪化した。

洞窟の動物相や洞窟の生態系に対する最大の脅威は、科学的な調査からではなく、鉱物の採取、森林伐採、農業、地下水の汲み上げ、水質汚染、堆積など、洞窟の外での活動から生じていることを心に留めておくことが重要である。一般のケイバーは、地下の生態系に微生物を持ち込むことによって、不注意に洞窟に影響を与えることがある (レクリエーションとアドベンチャー・ケイビングを参照)。



ドイツ、Frauenhaldenhöhle で無脊椎動物を採取する生物学者。写真：Rainer Straub.

自然保護区の指定は、科学的な研究に基づいて行われることが一般的であり、場合によってはその研究成果が場所の名前に反映されることがある。時折、貴重な環境資産の存在を実証する科学研究によって、保護が妥当とされる場合がある。これは、希少な種や絶滅の危機に瀕した種、重要な地質遺産の存在が示される場合である。ただし、特に景観の理由で指定される多くのカルスト保護区では、地形がどのように進化し、システムを動かすためのプロセスや連関がどのように機能するのかについての理解が限られている場合がある。多くのカルスト保護区は、重要な自然価

値を持っているため、高品質な研究の中心地となっており、また、世界の多くの地域では科学活動を歓迎する姿勢があるためである。

保護地域における研究は、カルストシステムの理解に大きく貢献してきた。ケンタッキー州の Mammoth 洞窟国立公園 (NP) とニューメキシコ州の Carlsbad 洞窟群国立公園 (NP) は、どちらもアメリカの世界遺産に登録されており、カルスト地質学と洞窟形成学 (Mammoth)、および低原質洞窟形成学と洞窟地質微生物学 (Carlsbad) の発展の鍵となる地域である。両公園には、宿泊施設を含む研究インフラがあり、私有地で研究が行われる場合にはそうでないこともあるが、サポートしてくれるスタッフもいる。保護区での研究のさらなる利点は、貴重なフィールド機器の保護が厚いことである。環境パラメータをモニターする蛍光光度計やロガーなどのモニタリング機器は、意味のあるデータを収集するために、一般的に長期間配置する必要があるため、破損や盗難のリスクが常につきまとう。保護区のスタッフはデータ収集や機器の完全性の確認、遠隔地の科学者には利用できない科学的な洞察を提供するのに役立つ場合がある。一部の保護区には、地元の科学者が常勤スタッフとして在籍している場合があり、彼らはしばしば「洞窟の専門家」と呼ばれる。これにより、質の高い調査が日常的に行われるようになった。Mammoth 洞窟国立公園では、常駐の科学スタッフによる調査によって、カルスト地形における地下水盆の世界で最も詳細な地図が作成された。科学者を常駐させることのさらなる利点は、学生や一般の人々にカルストと洞窟に関する詳細な情報を提供できる可能性があることである。米国では、Mammoth 洞窟国立公園と近くのウェスタンケンタッキー大学との協力により、居住者と非地元の科学者による 1 週間にわたるカルストと洞窟に焦点を当てた一連のフィールドセミナーである「カルストフィールド研究」プログラムの実施が可能になった。1979 年から運行されている。



古気候研究のため、イギリスの特別科学保護区で許可を得て行われた洞窟層のコアリング。
写真：John Gunn.

「内部に焦点を当てた研究」と呼ばれるものは、保護地域への理解を高めることを目的としており、したがって管理に直接反映することができる。綿密に構成されたモニタリングプログラム(「効果的なモニタリングと緩和策の開発」を参照)は、厳密な分析の対象となる科学的データを生み出すという点で、研究の一形態となる可能性がある。しかし、内向きの研究は、特定の問題(例:染料を使用して泉の集水域を確立するための水跡プログラム)や問題(例:モニタリングによって特定された特定の植物や動物の減少を調査する)に対処することで、通常のモニタリングとは異なる。対照的に、「外向きの研究」は、保護区内で収集されたデータや材料を使用してより広範な問題に対処している(例:洞穴鍾乳石に保存された記録を使用した過去の環境の再構築、または洞窟を地下研究所として使用すること)。後者の良い例は、スロベニアの Postojna 洞窟内にあるビバリウム(生き物の住む環境を再現した空間)で、一部は科学的な作業と研究に使用されている。地球上の洞窟は、他の惑星の洞窟を探索するために使用されるロボットの実験場としても使用されている。一部の状況では、研究の資金は保護区に優先的に流れることがある。ブラジルでは、洞窟が連邦レベルで保護されている場合、洞窟に影響を与える環境補償金は、優先的に洞窟での研究に向けられるべきである。マラガ近くの人気のある Nerja 洞窟(スペイン)など、一部の観光洞は、科学的な会議を含むカルストの研究に資金を提供している。

すべての保護区において、洞窟やカルスト地形での調査は、書面による申請と調査許可証の交付を受けて初めて実施されるのが理想的である。許可証は事前に十分な余裕をもって申請し、調査チームは、サービスに対する適切な支払いを含め、地域社会と連携して活動することが望ましい。一部の国々では、カルストおよび洞窟の研究を希望する他国の研究者に対する特定の規則がある。その目的は、研究者が「植民地主義的」なアプローチを採用せず、ホスト国も得られる知識を共有できるようにすることである。UIS は国際洞窟探検のための倫理規定を採用しており、一部は特定の研究コンポーネントを含んでいる(インターネット資料を参照)。洞窟探検の歴史がない国で調査を行う場合、起こりうる誤解を避けるために、現地の人々に自分たちの仕事の目的を理解してもらうことが特に重要である。不幸な例として、エチオピアへの探検で、現地の人たちが、洞窟の鍾乳石は「科学研究のために貴重なものだ」と聞かされ、それがきっかけで、一部の人たちが洞窟に入り、販売できると信じて鍾乳石を取り除いてしまったことがある。

可能な限り、保護区のスタッフに調査プロジェクトの内容を知らせ、可能であればデータ収集に参加させるべきである。そうすることで、訪問者のグループにツアーを提供する際に調査内容を参照することができるようになり、先行調査に関するフィールド固有の詳細について、後続の調査チームをよりよく支援することができる。研究者は、訪問者が理解できるような形で研究成果を公開するよう奨励されるべきである。これは、ビジターセンターでのポスター発表、インターネット上の記事、またはソーシャルメディアを介して行うことができる。場合によっては、データを広く共有することも可能かもしれない。イギリスのバクストンにある特別科学的興味地区であるプールズケイバンの英国洞窟科学センター(BCSC)は、リアルタイムの洞窟気候モニタリングシステムを確立した。データは BCSC ウェブサイトにアップロードされ、誰でも無料でダウンロードして使用できる(インターネット資料を参照)。

研究許可の申請書には以下を含めることをお勧めする。

- プロジェクトの説明と、外側に焦点を当てた研究の場合は、別の場所ではなく保護地域で実施する必要がある理由。
- 機器が設置される場所またはサンプルが採取される場所(およびサンプル採取の量と頻度)。
- 潜在的な影響の評価と、それらの影響を最小化するための措置。例えば、古気候・古環境の研究など、洞窟壁面の利用を必要とする研究が良い例である。1980年代には、比較的大量の物質が必要であったため、洞窟から洞窟組織を丸ごと取り出すことが一般的であった。ほとんどの研究では、必要な物質は少量であり、薄いコアを注意深く抽出することで得られるため、もはやその必要はない。コアが抽出された後、小さな栓が

挿入され、方解石の沈殿が続いている場合、鍾乳石などが治癒することができる。入手可能な場合は、すでに壊れた鍾乳石のサンプルを優先する必要がある。これは、訪問を受ける洞窟ではよくある状況である。壊れた鍾乳石が存在しない場合は、保守的なアプローチを採用し、視界から隠され、美的価値が低いものを選択する必要がある。

- 計画されている生物学的または微生物学的サンプリングの詳細。これは、サンプリングが実施される国以外の国を拠点とする研究者にとっては特に重要である。なぜなら、一部の国々ではバイオパイレーシーの事例が頻発しているため、これらの材料を追加の書類なしで輸出することを許可していない場合があるからである。逆に、オーストラリアやアメリカのような国では、生物試料や土壌の輸入に関して非常に厳しい法律がある。
- 訓練を受けた洞窟作業員による洞窟の写真撮影とマッピングのためのドローンとロボットの使用は、科学的分析と解釈のための高品質のデータを提供できる最近の発展であるが、これらの装置の使用は研究許可の一部として承認されるべきである。

許可申請を審査する人は、時代遅れの技術やプロトコルが洞窟やカルスト資源に永続的なダメージを与える可能性があることを認識しておく必要がある。これは、考古学および古生物学の作業中に、発掘および遺物または生物学的遺物の除去が状況に応じた（化石生成学;taphonomic）現場研究なしで行われた場合に発生し、重要な年代情報および堆積情報を入手する機会が大幅に制限された。可能であれば、堆積物の代表的な部分は、より高度な技術による将来の作業を可能にするために、そのままの状態での保存されるべきである。古生物学的な集団とその状況の保存を促進する傾向にある安定した環境条件は、攪乱に対して最も脆弱である。このような通路での発掘は、エネルギー環境への影響をもたらし、地下環境に対応する影響をもたらす可能性がある。すべての考古学者は、自分たちの高価な年代測定法に影響を与える可能性のある材料を知っているが、腐敗したプラスチックシートやすり切れた日除けネットは、多くの洞窟遺跡でまだ見られる。これらは発掘エリアの「修復」の結果である。地表の遺跡の損傷とは対照的に、中エネルギーまたは低エネルギーの地下環境における人間の活動の痕跡や影響は、数百年、さらには数千年にわたって残る可能性がある。研究者には、技術の進歩、特に地表現場の遠隔監視の機会を活用し、それによって訪問回数を減らすことが奨励されるべきである。太陽光発電パネルと小型風力タービンにより、バッテリーを交換するために訪問する必要がなく継続的な監視が可能になり、携帯電話や衛星ネットワークを使用してデータをアップロードできる。

Guidelines ガイドライン

- (34) 洞窟やカルストのあるすべての保護区は、調査の管理に関する方針を策定すべきであり、それは申請書を受領し、承認された場合にのみ許可されるべきである。
- (35) 洞窟での調査を希望する者は、洞窟の環境とその地域のミニマムインパクト・ケイビング規範に精通していることを証明できるか、または、規範の遵守を保証する経験豊富な洞窟科学者と協力していることを証明できなければならない。
- (36) 管理計画がある洞窟については、研究活動に関するセクションが必要である。
- (37) 保護区の内外を問わず、洞窟やカルストで活動するすべての研究者は、潜在的な利益と環境や文化的価値への損害のリスクとの比較を含め、提案を慎重に評価することが推奨される。
- (38) 動物相、鍾乳石、堆積物については最小限のサンプリング方法に重点を置くべきであり、研究者は学術メディアだけでなく一般の人々にも容易に理解できる形式で結果を発表することに尽力すべきである。研究者は、プロジェクトの完了時に、機器の撤去と現場の修復（必要な場合）に取り組む必要がある。

Agriculture and forestry 農林業

人類という種の発展は、自然植生（主に森林）の除去、農地への置き換えと表裏一体の関係にある。このように、人間による強制的な植生の遷移は、特定の植物相の構成と長期的に適応した生物相を備えた、自然に進化した生態系を破壊した。世界的に見て、林業や農業から何らかの影響を受けていないカルスト地域は、人里離れた場所にあるか、農業や森林伐採を妨げる強力な保護を受けている地域だけである。カルストへの人為的影響の多くは、採掘産業などによる直接的かつ局所的なものであり、その影響は小規模なものから甚大なものまで様々である。例えば、地中海流域の一部や中国南部に広がっている岩石の砂漠化は、原生植生の除去やフォローアップ農法によってもたらされた土壌侵食の結果である。これは、カルストに対する最も深刻な人為的影響と言われている。カルストの大部分が土壌に覆われている温帯地域であっても、人為的な影響（面積比）が最も大きいのは農業である。



放牧に使われるカルスト地形、スペイン、アストゥリアス州Mirador de Camba。写真：David Gillieson.

ヨーロッパ文明発祥の地である地中海地域は、温暖なカルスト地形に人間が与えた影響を示す「典型的な場所」である。その原始的な松や杉の森は、ガリーグやフリガナとして知られる二次的な低木群落に徐々に取って代わられた。同じような特徴を持つ植物群落は、中緯度のバルカン半島と東ヨーロッパで、より温帯の、しかし中程度の大陸性気候条件下で北上して発達した（セルビアの *shibljak* と棘の覆いの *Crataego-Prunetea* 低木林群落）。これらの暖かく乾燥した低木林は、多くの石灰岩カルスト高地で支配的な植物群落を形成している。ヨーロッパ外では、類似した傾向が見られるが、より最近のものである。マダガスカルでは、原生林の伐採と農地への転換が、餌の食物連鎖の基盤の急速な変化により、洞窟内の固有の動物相に対する主要な脅威となり、深刻な生物多様性の喪失を引き起こした。生物多様性の深刻な損失を引き起こした。東南アジアのいくつかのカルスト地域では、原生林の皆伐とパーム油プランテーションへの転換が特に懸念されている。基本的に自然な状態で残っているカルスト地域は、隣接する岩相に比べて豊かな生物多様性を支えている。この生物多様性は、地域社会の伝統的な慣習によって維持されてきた部分もあるが、商業活動によって急速に破壊される可能性がある。カルスト生物多様性への直接的な影響とは対照的に、農業や林業のカルスト地質遺産への間接的な影響は主に水質と水量の変化に関連している。

Agricultural practices on karst terrains カルスト地形での農業行為

カルスト地域で農業を実践することは、農村地域にとってしばしば困難であり、水不足などの問題を解決しようとする試みは、一般的にカルストシステムに影響を与えてきた。ヨーロッパのいくつかの地域では、「アグリカルスト (agri-karst)」と呼ばれる独特の景観が、地域の気候や農業手法に対応して発展してきた。カルストにおける農業慣行は、カルストそのものと同様に、気候に大きく影響されるか、または制御されており、3つの大まかなゾーンが認められる：

- 湿度の高い熱帯地域で集約的な農業（稲作、サトウキビ）が行われており、カルスト地形が豊かな地域が多い（東南アジアなど）。
- 温帯カルスト地域では、主に穀物（特に小麦とトウモロコシ）、野菜、そして温暖な温帯地域ではブドウ園やオリーブの木をベースとした混合農業が行われている。家畜の放牧／牧畜もまた、カルスト地域の水質と水量に重要な影響を及ぼす可能性がある。
- 緯度や標高の高い寒冷な環境では、家畜耕作や段々畑での自給自足の農作物が主流である。



- 中国貴州省、Wan 峰林カルストの大きな窪地の底に広がる集約農業。森林が残っている地域もあるが、背景の塔の森林伐採が著しい。写真：John Gunn.

東南アジアの塔状および円錐状のカルスト地帯では、多くの伝統的な農業の慣習が見られる。例えば、中国南西部の雲南省、貴州省、広西チワン族自治区の峰林丘陵 (fenglin-fengcong)、フィリピンのボホール島の円錐状カルスト、インドネシアのグヌン・セウ火山のcockpitカルストなどがある。長い年月をかけて、地域社会は傾斜を減らし、雨季に降った雨水を保持するために、丘や山に段々畑を形成してきた。フィリピン・ボホール島の湿田農業は、カルスト地形と農業の実践が調和した例であり、100年単位で持続可能性を達成することに成功しているように見える。地元コミュニティが何世紀にもわたって使用してきた季節ベースの暦は、地元の農業の必要性を気候の傾向に適応さ

せることを目指しており、基盤となるカルストの自然な調節システムに最も適しているようである。残念ながら、灌漑システムの衰退によって、低地の「湿地」カルスト地域でコーンを基盤とする経済的に価値の低い農業システムに水田作物が取って代わられるなど、社会環境への影響が生じている。一方、世界最大の連続カルストのひとつである中国南西部の歴史的なカルスト地域では、農業利用による植生の減少と土壌侵食、それに伴う森林伐採や水の消費が起きている。

温帯地域では、ドリーネで穴だらけの緩やかな傾斜の高原が一般的なカルスト地形を形成し、その最も発展した段階では多角形のカルストが形成される。この地形がもともと密生した原生林の植生に覆われていた場合、ドリーネは維管束植物種の避難場所として機能する。これらの地域では通常、森林伐採により土砂がドリーネの下部に移動し、その結果、ニュージーランドの King Country カルストで観察されるように、水文体制に変化が生じる。ドリーネは一般的には故意に埋められ、平坦な地面の面積を増やす試みが行われることがある。同様の理由でカレンも破壊される場合があり、一部の地域では壁の建材や装飾用の石として採石される場合もある。これらの各行動は、地下地球生態系の機能に重大な変化を引き起こす可能性がある。

農業は、歴史的な森林伐採、土壌侵食、それに続く高度な堆積物の変化、さらには地表と地下の流れの両方における食料資源の利用パターンの変化に関連している。これらは、洞窟川の無脊椎動物群集に対する主なストレス要因として機能する。たとえば、洞窟に入る堆積物は、速度が低いエリアに堆積し、それによって生息地が変わる。



アイランドの Burren と Moher の断崖ユネスコ世界ジオパークにある Sheshymore 石灰岩舗装。花粉の分析から、この地域には厚い鈹物土壌があり、先史時代には森林に覆われていたことが示唆されている。森林伐採の後には壊滅的な土壌侵食が起こり、現在では一般に岩石砂漠化と呼ばれているプロセスである。写真：John Gunn.

堆積物のインプットは、特にフレアテックループで蓄積される場合、導管の水力学を妨害する場合がある。有機汚染は洞窟生物相の群集構造を変化させ、一般にその分布と豊かさの減少をもたらしている。浮遊する有機物質や石の表面に形成される微生物群は、流れのコミュニティにとって重要なエネルギー源である。その他の人為的ストレス要因は、地下生物の代謝に影響を与え、金属や金属化合物、農薬、肥料、新たな汚染物質、揮発性有機化合物などが含まれる。一般的な汚染源としては、畑作物に施される肥料や糞尿、糞尿貯蔵施設、飼料場、搾乳小屋、鶏舎、豚舎、家畜小屋などが挙げられる。Coxon (1999) は、農業の影響の例を提供し、カルスト含水層が農薬や病原体を泉に伝える重要な役割を説明している。これらの活動は、地下生物だけでなく、直接人間の健康に影響を与える場合もある。例えば、ニュージーランドの Waitomo 地域では、ドリーネに排出された養豚場の廃棄物が、農場に水を供給する泉を汚染した。アイルランドでは、Castleisland の町に水を供給していたカルスト泉が、スラリーやその他の農場から発生する汚染物質による汚染のため、廃止されなければならなかった。例えば、ニュージーランドの Waitomo 地域では、ドリーネに排出された養豚場の廃棄物が、農場に水を供給する泉を汚染した。アイルランドでは、Castleisland の町に水を供給していたカルスト泉が、糞尿や他の農業によって生成された汚染物質によって閉鎖されなければなりません。農業によるカルストへの汚染の最も深刻でよく文書化された影響の1つは、2000年5月にカナダの Walkerton で発生した。この時、町の井戸が病原性バクテリアで汚染され、7人が死亡し、2,300人以上が病気になった。

ほとんどの汚染は点涵養によって発生するため、1) 農業流出水を、地下流入河川、ドリーネ、その他の自然の開口部など、涵養が集中する地域に直接流出させない、2) これらの地域の周囲に緩衝地帯を設定する、などの対策を講じれば、汚染を最小限に抑えることができる。緩衝地帯では、耕作や家畜の放牧を認めてはならず、耕作地からの流出土砂をろ過するために、完全な植生被覆を維持しなければならない。ウォーカーントンのように、カルスト地形に薄い覆土しかない場所では特に注意が必要である。



スロベニア、Cerkniško ポリエの季節耕作地。写真：David Gillieson.

農地利用の変化は、土壌二酸化炭素濃度を減少させる可能性がある。これは、エピカルストでの溶解速度および二次生成物の形成に影響を与える可能性がある。土壌の二酸化炭素濃度は、例えば、原生林の下では草地の下よりも顕著に高く、牧草地では作物の下の土地よりも高い濃度になるのが一般的である。後者の結果、耕作地を草地に転換することによって、土壌二酸化炭素濃度が急速に上昇する可能性があることが研究で示されており、これは劣化したカルスト地形で実施する良い実践となる可能性がある。侵食による土壌被覆の減少は、特に激しい降雨の後に、より急速な浸透をもたらし、これが洞窟の上で起こる場合、不飽和の急速涵養水が鍾乳石を再溶解する可能性がある。

Forestry on karst カルスト林業

森林は、カルストシステムの調節と機能にとって不可欠な、自然植生の確立された長期的な進化形態である。カルスト地域では、森林は生物地球化学サイクルの重要な構成要素である。森林に覆われたカルスト地形を持続的に管理するためには、森林の性質と土壌の二酸化炭素（CO₂）の変動に関するいくつかの原則を考慮する必要がある。土壌は海洋に次いで、地球上で 2 番目に大きな炭素吸収源である。森林の植生とその下の土壌は炭素貯蔵庫と炭素吸収源の両方であり、空気から二酸化炭素を捕捉して貯留し、徐々に放出することができる。この二酸化炭素の一部は水に溶けて石灰岩に浸透し、石灰岩の風化を引き起こし、最終的には地下の開口部や洞窟を形成する。このように、カルスト系の炭素収支はその機能にとってきわめて重要であり、各カルスト地域または流域内で植生、土壌、岩石、地下水の間で一定のバランスが保たれている。土地利用や植生を変更すると、このバランスが変わり、気候変動も水の利用可能性や植生の活動に影響を与える。森林植生の下で土壌には追加の炭素が取り込まれ、石灰岩のさらなる溶解が促進され、溶解した炭酸塩イオンの一部が最終的に鍾乳石の成長として堆積する。通常、洞窟内でカルサイトの沈殿によって形成されるこれらの化学的な堆積物は、浸透水の滞在時間が長く、滴下速度が低い条件が必要である。

これらの条件は、通常、中程度に割れた基盤岩に満たされ、小さな開口部があり、滲み水を大きな空間に均等に導き出している。木の根は土壌に対してより多くの二酸化炭素を呼吸し、岩の風化を促進し、また成長中に基盤岩を割裂する特定のパターンをエピカルスト（カルストシステムの最上部水文学的レベル）に刻印している。土壌微生物群集の活動は、土壌に蓄積された二酸化炭素を大気に放出する重要な役割を果たしている。風化した石灰岩から放出される炭素は最終的に地下水と河川を介して海洋に移行しているが、その一部は土壌を通じて大気に失われるか、地下水から直接噴出するであろう。全体的に、石灰岩の風化は一般的に「結合炭酸塩風化」を通じた炭素貯留と考えられているが、これが常に真実であるとは限らず、このプロセスの効率は各地域や盆地ごとに異なる可能性がある。

林業は、独自の問題を伴う重要な土地利用である。原生林は通常、極相群落として分類され、長期にわたる妨げられない進化により非常に安定している。これらの森林の一部は山地や熱帯地域の人里離れたカルスト地形を占めているが、人間の生息地、ツーリズム、木材の採取の継続的な拡大によって絶滅の危機に瀕している可能性がある。これらの森林は厳格な保護を必要とし、いかなる形態であっても人為的搾取を受けるべきではない。林業の実践には、道路建設（斜面の切り崩しを伴う）、伐採、苗木の育成と再植林、さらには伐採後の様々な活動が含まれる。森林の伐採によって、土地は一時的または永続的に安定した植生カバーによる保護がなくなり、これは全体の自然システムのバランスが急激に変化することを意味している。森林が伐採されるとすぐに急速な変化が起こり、降雨の浸透が増加し、木材の残骸の分解による窒素生産が増加し、土壌侵食が始まる。土壌侵食はエピカルスト・パターンのさらなる変化を引き起こし、二酸化炭素の吸収が減少し、カルストシステムのバランスに悪影響を及ぼす。

カルスト環境の完全性に対する脅威は伐採以外にもある。カルスト上に開発された確立された森林生息地に外来のより経済的に生産性の高い樹種が導入され、多くの場合、基本的な森林の種類が変化する（例：落葉樹林の代わりに針葉樹林、熱帯雨林の代わりにアブラヤシのプランテーション）という結果が生じる可能性がある。カルスト水域の水文学的および化学的不均衡が大きくなり、土壌の酸性度が上昇し、岩盤の腐食が加速し、鍾乳石の劣化が起こる。森

林や森林に隣接する牧草地に対する人為的な火災は、カルスト地形で自然に発生する火災の強度、期間、範囲に限定されないとしても、長期的な悪影響を及ぼし、そのほとんどは岩盤表面の焼成と剥離で構成される。これには、溶存無機化合物の濃度の増加、地下水の化学組成および水文学的な体制の変化が含まれる。



スロベニアの森林カルスト。写真：John Gunn.

カルスト地域での伐採や林業活動の基本は、地表のカルストの価値と感受性、および地下との連結性（または開放性）を注意深く評価する必要がある。林業活動の前には、カルスト地域の調査とマッピングが必要であり、変化への感受性（または脆弱性）を評価し、適切な管理方針を策定する必要がある。カルスト流域内での林業活動の種類と規模の分析も検討すべきである。

Guidelines ガイドライン

- (39) 農業活動はカルスト地質生態系に重大な悪影響を及ぼす可能性がある。保護区管理者は、(a) 提案されている土地利用の変更に特に注意を払い、(b) 水の量と水質への影響を最小限に抑えるために、農業の種類と地面の特定の条件に適した指導を提供する必要がある。
- (40) 土地利用に関しては、耕作地では、侵食による損失や、通気性、骨材安定性、有機物含有量などの土壌特性の変化を最小限に抑え、健全な土壌生物相を維持するために、慎重な土壌管理が必要である。牧草地は、特に飼養水準に注意しながら、植生被覆を維持するように管理すべきである。ドリーネは点状涵養を提供するため、自然のままにしておくべきであり、決して埋め戻したり、廃棄物処理に使用したりしてはならない。
- (41) 可能な限り、陥没溪流、ドリーネ、その他の自然の開口部など、涵養が集中する領域の周辺に緩衝地帯を設定すべきである。なぜなら、これらは汚染物質や汚染物が地下のカルスト環境に移動するための導管だからである。農地では、緩衝地帯での耕作を許可すべきではなく、耕作地からの流出土砂をろ過するために、完全な植生被覆を維持すべきである。森林では、緩衝地帯の原生植生の保全と潜在的な強化が重要である。

- (42) 水量に関しては、灌漑用の地下水の取水量を制限すべきである。雨水利用を可能な限り採用すべきである。
- (43) 水質に関しては、害虫や雑草を駆除するためにどうしても必要な場合を除き、農薬や除草剤の使用は控えるべきである。肥料の使用量を減らし、可能であれば天然肥料を使用すべきである。涵養が集中している地域の周辺には緩衝地帯を設け、土壌が飽和状態または飽和状態に近く、越流によって化学物質がカルストに流れ込む危険性がある時間帯には、化学物質の散布を行うべきではない。



森林業活動は、ドリーネ（カルストシンクホール）のあるカルスト地形の完全性に影響を与える場合がある。道路建設や皆伐による木材の伐採により、自然に進化した森林植生が除去される。自然林地域は、一般的に「プランテーション林」の均等な樹齢の林に置き換えられている。適切な緩衝地帯がないドリーネは、伐採残渣で埋まり、内側の急斜面が不安定になる。バンクーバー島、ボナンザ湖。写真：Paul Griffiths.

- (44) カルスト地域での伐採または森林活動の前に、その地域の目録を作成して地図を作成し、敏感性および/または脆弱性を評価し、適切な管理規定を作成する手順が必要である。特定のカルスト集水域内での森林活動の種類と規模を事前に分析し、規定がどのように実施され、敏感なカルスト地域がどの程度保護されているかを確認するためのフォローアップ監視を考慮する必要がある。
- (45) カルスト地形上に開発された自然林（成木や繁茂林を含む）は、皆伐、伐採、あるいは人間の影響を受けてはならない。代わりに、これらの森林は、地表および地下のカルスト環境が生態系サービスの恩恵を享受し続けるように、適切な保護管理によって厳格に保護されるべきである。
- (46) 原生林が伐採され、他の樹種に置き換えられている場合、管理者は、その場所の生態学的条件に最も適したタイプの森林によって外来種を置き換える計画を立てるべきである。



皆伐採とその後の山火事による天然森林植生の除去は、中国南部の一部のカルスト地域や Dinaric カルスト地域で観察される「岩だらけの砂漠化」に似た重大な土壌侵食を引き起こす可能性がある。このカルスト地形の劣化は、水文学的流入を変化させるだけでなく、生息地の喪失や生物多様性の減少を引き起こす可能性がある。火災は上部エピカルスト岩盤表面の焼成と破壊（剥離など）を引き起こす。バンクーバー島の Kinman Creek カルスト。
写真：Paul Griffith.



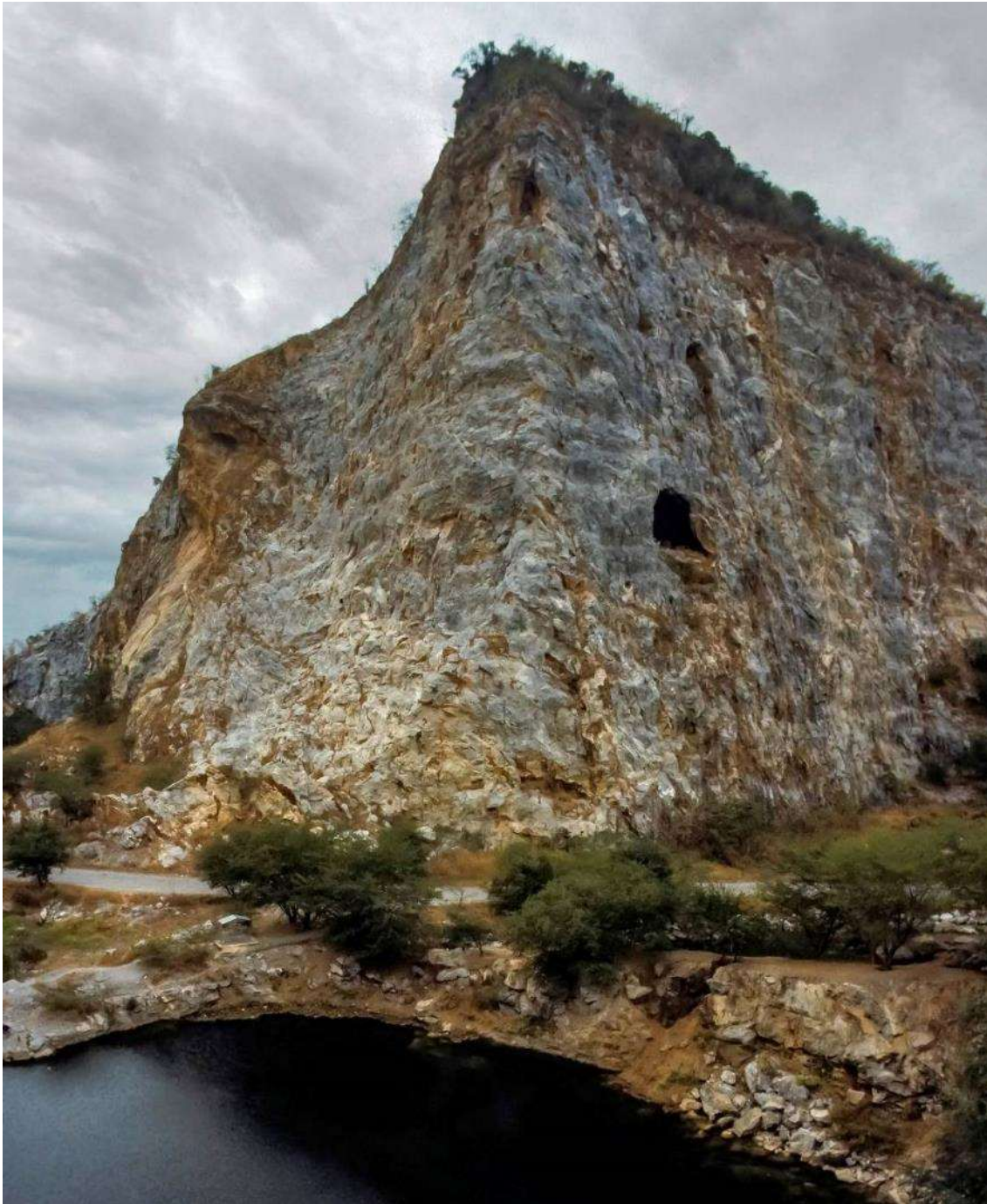
土壌の薄いカルスト地域の自然林の皆伐は、節理や拡大した割れ目、その他の岩盤の開口部への重力による土壌の深刻な損失につながる可能性がある。焼畑や山火事は、こうした伐採の影響をさらに悪化させる可能性がある。深い溝を持つ、以前は土壌に覆われていたカルレン地形がむき出しになっている。バンクーバー島、Tahsish River のカルスト地形。写真：Paul Griffiths.

Extractive industries 採取産業

用語に関するメモ。「鉱山」、「ピット」、「採石場」という用語はすべて、石や鉱物が採掘される場所を表すために使用される。一部の著者は、石が採掘される場合には「採石場」という用語を使用し、他の鉱物の抽出には「鉱山」という用語を使用しているが、用法には一貫がありません。いずれの場合も採掘は地表で行われ、「露天掘り」や「露天掘り鉱山」のように「露天」という単語が接頭辞として付けられることもあれば、地表の下から行われることもある。この文書では、地表掘削には「採石場」という用語を使用し、地下作業には「鉱山」の語を使用する。

洞窟やカルスト地域には、いわゆる「石器時代」から人類が利用してきた鉱床がある。カルスト地形が見られる最も一般的な岩石である石灰岩は、何千年もの間、建築用石材として利用されてきた。21世紀には、セメントや骨材としての建築、特にコンクリート、化学・製薬産業、紙やパルプの製造、石灰としての農業、鉄鋼の製造、寸法石や装飾用岩石、排煙脱硫を含む様々な環境プロセスなど、世界で最も広く使用される材料のひとつとなった。洞窟やカルスト地域には、いわゆる「石器時代」から人類が利用してきた鉱床がある。カルスト地形が見られる最も一般的な岩石である石灰岩は、何千年もの間、建築用石材として利用されてきた。21世紀には、セメントや骨材としての建築、特にコンクリート、化学・製薬産業、紙やパルプの製造、石灰としての農業、鉄鋼の製造、寸法石や装飾用岩石、排煙

脱硫を含む様々な環境プロセスなど、世界で最も広く使用される材料のひとつとなった。ドロマイトは一般的に肥料として使用される。カルストを形成する非炭酸塩岩石にも実用的な用途がある。石膏は一般的に肥料や建設業に、塩は食品や化学工業に、鉄鉱石は鉄鋼や鉄の製造に不可欠であり、珪岩は一般的な観賞用石材である。したがって、採掘産業が洞窟やカルストの地質遺産や生態系に影響を与える可能性があることは、驚くべきことではない。



切り出された円錐形と部分的に破壊された洞窟、タイ。写真：John Gunn.

岩床に加えて、いくつかの経済的に重要な鉱床が一般にカルスト地域と関連している。一部の鉱物、特に亜鉛、鉛、銀を含む鉱物だけでなく、特に螢石、重晶石、燐灰石などは、炭酸塩の層系内の崩壊構造や鉱脈に充填されることがあり、時折「古カルスト」と呼ばれる古代の溶解特徴と関連付けられる場合もある。経済的価値のある鉱物は、カルストの窪地に集中したり、洞窟に流れ込んだりする。ブラジル中央部では、礫岩から採掘されたダイヤモンドが珪岩

洞窟内で採掘され、石壁の建設や洞窟通路の改造が必要となった。世界中であるすべての石油の約 60%とすべてのガスの約 40%は、主に高透水性の層や孤立した空間（石油文献では「vugs」と呼ばれる）などの二次多孔性構造と関連して、炭酸塩岩に収納されている。

一部の鉱物は、カルスト岩に分布していなくても、少なくとも部分的にカルストプロセスに起因する場合がある。これは、一般にカルスト岩に付随するアルミニウムが豊富な風化残留物であるボーキサイトの場合に当てはまる。地下水の過剰な使用（「水採掘」と呼ばれることもある）は、カルスト地域に特有のものではないが、特に水の汲み上げが涵養を超える場合には、採掘活動の一形態と見なすことができる。大規模な鉱山排水計画でよく見られるケースである。

洞窟に関連する鉱物の最後のカテゴリは、乾燥した通路で形成される化学的または有機的な堆積物である。硝石は硝酸塩が豊富な土壌堆積物であり、世界中の洞窟で一般的に見られ、18 世紀から 19 世紀にかけて主に火薬製造の主原料として広く使用された。鳥やコウモリの排泄物であるグアノは、19 世紀にアメリカ大陸、東南アジア、オーストラリアで肥料の原料として広く採掘された。Carlsbad 洞窟もそのひとつである。現在でも熱帯地方では、地元の農家によるグアノの「自給自足」採掘が広く行われている。それは再生可能な活動とはほど遠く、重要な古環境アーカイブを完全に破壊し、グアノに依存する無脊椎動物の群集に大きなダメージを与える。今日に至るまで、アナツバメの唾液を使って作られたツバメの巣は、マレーシアやタイの洞窟で合法的に収集され、高価な珍味として販売されている。

洞窟に関連する鉱物は、先史時代から採掘されてきた。イギリスのランディドノ近くの石炭紀の石灰岩では、約 4,000 年前にさかのぼる銅鉱山があり、アメリカの Mammoth 洞窟国立公園では先住民が原始的なたいまつを使って洞窟の通路を何キロも進み、石膏や燧石を採取したことを示すミイラが見つまっている。オーストラリアの Nullarbor 地方にある Koonalda 洞窟では、先住民オーストラリア人が 1,000 メートル以上の通路を進みながら燧石を採掘した。建設目的での石灰岩やトラバーチンの採掘は、特にカルストの多い地中海地域で数千年にわたって行われてきた。ヨーロッパによるアメリカ大陸とオーストラリアの「発見」に関連して、カルスト堆積物の経済的重要性が、グアノ関連肥料産業のブームと、アメリカにおいて 1860 年代の南北戦争時、火薬生産に重要だった洞窟での大規模な硝石採掘につながった。産業革命以来、いくつかのカルスト関連鉱物商品の需要が増加した。

採掘産業が環境に与える影響は、活動内容、鉱床の種類、採掘技術、そして経済的要因によって大きく異なる。炭酸塩岩石は地球の大陸表面の約 15%を占めており、そのため市場価格は一般的でない鉱物に比べて低い。しかし、炭酸塩の需要は増加の一途をたどっており、製薬・化学産業で使用される高純度の石は高値で取引されている。カルスト岩に含まれる他の鉱物の採掘も経済的要因によって推進されており、鉱物の需要に応じて価格が大きく変動する。中国市場の急速な成長が後半 2000 年代以降に関連し、鉄などの基本金属が需要の増加に対応する。他の重要な金属の価格も、再生可能エネルギー部門の急速な成長に伴い上昇しており、電気車のバッテリー製造に必要なリチウム、ニッケル、コバルトが該当する。これらの経済的な大サイクルは、世界の鉱業産業を推進し、保護地域内または近くでの鉱物採掘が行われる圧力を増大させている。これは、これらの金属が戦略的な商品となっているため、需要が高く価格も高騰している開発途上国にとって特に問題である。

Extraction of carbonate rocks 炭酸塩岩石の採取

非常に純度の高い石灰岩やドロマイト鉱床の中には、地下鉱山を利用して採掘されているものもあるが、世界的には、石材の大部分は露天採石場から採掘されている。先進国では、初期の採石場は小規模な地元企業であったが、現在ではほとんどの石材は、丘の斜面や谷間にある少数の大規模な採石場から採掘されている。これらの採石場の多くは何十年も操業しており、新しい採石場の許可を得るのは一般的に困難であるため、既存の採石場の経営者は、採石場の

拡大や深掘りを求める傾向にある。保護区の管理者にとって特に問題となるのは、イギリスの Peak District 国立公園のように、保護区が指定される以前から、保護区内や保護区の境界で採石が行われている場合があることである。

発展途上国、特に熱帯地域では、まだ多くの小規模な石灰岩採石場が存在し、円錐状のカルスト地形や塔状のカルスト地形では、比較的小さな採石場でも固有種を含む丘全体を取り除く場合がある。このような状況では、保護地域外に大規模な採石場を開発し、小規模な採石場を閉鎖することが、特に大規模な場所でより高い環境基準が求められる場合、影響を大幅に軽減する可能性が高いでしょう。

Extraction of iron formations 鉄鉱石の抽出

炭酸塩岩が広範な地域に露出するのに対し、鉄鉱石層は 10 億年以上前に特定の地質学的な出来事によって形成されたものであり、そのためには特定の地形の中で形成される。高濃度の鉄はケイ酸の浸食と鉄の移動によるものであり（これは空隙や洞窟を作る同じプロセスである）、ほとんどの高品位の鉄床は洞窟に関連している。これらの岩石は高い経済的需要があり、ブラジルでは高品位の鉄鉱床の多くがすでに採掘されており、残りの多くの地域が将来の採掘計画に含まれている。ほとんどの鉄山は、相対的な規模が小さいため、局所的な影響しかもたらさないのは事実だが、最大規模の鉄山であっても、急速な都市開発に有利な広範なサプライヤーの連鎖のほかに、その場所に関連した産業プラントが存在するのが普通であり、その結果、はるかに広い地域にかなりの影響が及ぶ。ブラジルのアマゾン地域に位置する Carajás では、世界最大の鉄鉱石埋蔵量が 1967 年まで発見されませんでしたでしたが、2,000 以上の洞窟を含む鉄鉱石の台地に位置している。この地域はもともと人口密度が低く、主にアマゾンの原生林に住む先住民がいる。鉄山は数年後に始まり、2020 年までには鉄業活動によって維持される新しい都市に約 30 万人が住んでいた。

Impacts of extractive industry 採取産業の影響

冒頭で述べたように、石や鉄物は採石場から採掘されることもあれば、地下鉄山から採掘されることもある。この 2 つの採掘形態による影響は、特に保護地域に対する影響が大きく異なる傾向があるため、以下では別々に考察する。

Quarry impacts 採石場の影響

採石場には大きく 2 種類の影響がある。第一に、敷地内での直接的な影響、そして第二に、より広範囲へ間接的な影響である。第一の現場への影響は、採石される岩石を露出させるために、その上にある土壌や表層堆積物を除去することによるものである。その岩石が炭酸塩である場合、土壌が失われると、土壌帯で発生する溶解プロセスの原動力となる二酸化炭素の大部分が直ちに失われる。土壌と表層堆積物の除去に続いて、最初に除去される岩石は、溶解の大部分が起こる地域であるエピカルストのものである。この岩石の除去は、溶解に直接影響を与えるため、採石場を流域とする泉に到達する炭酸カルシウムの量に影響を与える。例えば、イギリスの Forest of Dean では、石灰岩の採石場が、トゥファを堆積させるために保護されている泉の流域にある。湧水は、採石によって炭酸塩の湧水量が減少し、トゥファの堆積に影響を及ぼしているかどうかを判断するためにモニタリングされている。

炭酸塩岩の価値は比較的低いため、厚い残土の下に採石場が開発されることはほとんどないが、採石場がより価値の高い鉄物を採掘している場合はその限りではない。この場合、経済的価値のない物質（残土または対象鉄物の母岩）は、鉄滓ダムや廃棄物パイルに堆積され、採石場よりも環境に悪影響を及ぼす可能性がある。

古い採石場は、深く掘るよりも横に石を採取する方が簡単であるため、丘や谷の側面に位置するのが一般的であった。これは、表面の地形の改変または完全な破壊をもたらし、これは、採石によって丘が完全に除去される可能性がある円錐形またはタワーカルストの地域では特に懸念される。地質遺産の明らかな損失に加えて、熱帯地域の多くの丘はコウモリのねぐらとなっており、希少種が生息しており、その中には単一のタワーに固有のものである可能性もある。

採石場が横方向または縦方向に拡大するにつれて、カルスト排水システムの要素（導管）や洞窟と交差する可能性が高まる。採石場が関連当局の許可を得ている場合、洞窟の破壊を回避するメカニズムはないが、許可には洞窟の形態と堆積物の科学的記録の要件を含めるべきである。国によっては、洞窟の破壊に対する補償を義務付ける法律が制定されている。例えばブラジルでは、極めて重要なものとして分類されていない洞窟の破壊は、金銭の支払いが別の洞窟の永久保存によって補償されることを条件に、法的に認められていた。これにより、重要なカルスト地域や洞窟を保護する新しい国立公園など、重要な保護地域が創設された。しかし、洞窟に値札を付けることは、保全戦略としてリスクがないわけではない。鉱石の価格は大きく変動する一方で、価格は一般に政府の経済指標に連動しているからである。2000年代以降の金属商品ブームでは、採石場の開設や運営に必要な莫大な財源と比較すれば、洞窟の破壊によって発生するコストは支払う価値のある代償とみなされるかもしれない。さらに、洞窟によってブロックされる鉱物埋蔵量の価値は、洞窟の破壊に支払う価格を上回ることが一般的である。2020年初頭には、ブラジル全体で洞窟ごとに最大で100万ドルの価値の不可逆的な影響が発生する可能性があった。

採石場または採石場の一部が、これ以上石が採掘されない段階に達した場合、それ以降の石の採取は行われず。この時点で、採石場の再生が可能になる。特に採石場が保護区域内にある場合、これは非常に価値のある取り組みである。可能性の1つは、採石場の床に敷き詰められた廃棄石灰岩（浸透を改善するために引き剥がす必要がある場合がある）で構成され、有機改善剤を含む土壌材料または細かい石灰石（粉塵まで3mm）で覆われた新しいエピカルストを構築することかもしれない。採石場の縁では、地形複製技術により、岩のバットレス、ヘッドウォール、ガレなど、採石エリアの外側の天然カルストで見られるものと同様の地形を構築しようとする。

採石場区域外での影響は、主に発破と水に関するものであり、どちらの場合も、保護区域外の採石場が保護区域内で影響を及ぼす可能性がある。発破の影響は複雑であり、発破の設計または実施と地質の両方に関係する。採石場と交差している洞窟でも、通路の形態や岩石標本に損傷がない例もあれば、採石場から数百メートル離れた洞窟が損傷を受けた例もある。さらに考慮すべき点は、騒音や振動が洞窟の動物相に与える影響であるが、これはあまり理解されていない。これらの要因にもかかわらず、最新の爆破設計によって衝撃を最小限に抑えることができることは明らかである。この設計では、爆発物の量と各ショットホール内でのその位置が慎重に計算され、ミリ秒の遅延を利用して振動と空気の過圧が軽減される。これらの要因にもかかわらず、最新の爆破設計によって衝撃を最小限に抑えることができることは明らかである。この設計では、爆発物の量と各ショットホール内でのその位置が慎重に計算され、ミリ秒の遅延を利用して振動と空気の過圧が軽減される。過去に最も一般的な爆薬はANFO（硝酸アンモニウムと燃料油の混合物）で、これはボーリングの中で調合されたり、あるいはその近くで調合されたりする場合がある。これは長期にわたるDNAPL（密度の高い非水相液体）汚染のリスクをもたらす。採石場区域外での影響は、主に発破と水に関するものであり、どちらの場合も、保護区域外の採石場が保護区域内で影響を及ぼす可能性がある。発破の影響は複雑であり、発破の設計または実施と地質の両方に関係する。採石場と交差している洞窟でも、通路の形態や岩石標本に損傷がない例もあれば、採石場から数百メートル離れた洞窟が損傷を受けた例もある。さらに考慮すべき点は、騒音や振動が洞窟の動物相に与える影響であるが、これはあまり理解されていない。これらの要因にもかかわらず、各ショットホールにおける爆薬の量とその位置が注意深く計算され、振動と空気の過圧を低減するためにミリ秒単位の遅延が使用される最新のブラスト設計によって、影響を最小限に抑えることができることは明らかである。さらに考慮すべき点は、過去に最も一般的だった爆薬は、ボーリング孔で、あるいはボーリング孔内で混合されたANFO（硝酸アンモニウムと重油）であったということである。これには、長期にわたるDNAPL（高密度非水相液体）汚染のリスクがある。現代の発破は、一般にエマルジョン爆薬とあらかじめ混合したANFOを使用している。しかし、燃料油の貯蔵は、カルストへの放出の可能性を生む。硝酸アンモニウムの不適切な取り扱い、地下水の硝酸塩汚染を引き起こす可能性もある。ANFOの製造に使用される両方の製品は、使用前に採石場で保管・混合されるのが一般的である。



ブラジル、Lagoa Santa カルストにある採石場の岩肌。写真：Augusto Auler.

採石場からの水文学的影響は、敷地に流入または流出する水に関連している。爆破の衝撃と同様に、水文地質学的状況を慎重に評価することが不可欠である。水は、地表流または主要な地下水流路との交差によって採石場に侵入する可能性がある。地表流は、採石場の操業を混乱させる可能性がある採石場の拡張によって排水池から捕捉された水を管理するために、長期的な計画を必要とする。採石場への地下水の流入量は大きく異なる場合がある。地下水の氾濫によって閉鎖された採石場もあれば、元の地表から 100 m 以上下に広がっていながら、横方向からの流入がほとんどない採石場もある。採石場がより広い範囲から地下水を取り込んでいる場合、その後に地盤沈下ドリーネ（陥没または充填）が発生することがあり、これらは採石場の周囲から数百メートルも離れていることがある。採石場へのすべての流入は、原則として採石場内での汚染物質の移動を促進し、それらを井戸や泉に運ぶ可能性がある。

採石場から出る水の水文学的影響は、水が地表を流れるか、帯水層から汲み上げられるかによって異なる。採石場からの陸地の流れには、カルスト帯水層の涵養機能を詰まらせたり、川の流れや生息地を変えたり損傷したりする可能性のある高レベルのシルトが含まれていることがよくある。採石作業からの汚染物質は地表の流れに乗って運ばれ、シルトに付着することがよくある。このような影響は、水を沈殿池に流すことで軽減できるが、沈殿池には少なくとも 100 年確率で発生する洪水を収容できる容量が必要である。もし沈殿物中に高濃度の汚染物質が蓄積した場合は、それらを取り除き、適切に設計された埋立地に処分する必要がある。帯水層への影響は、水位を下げて採石場の操業を可能にするために、採石場から水を汲み上げる必要がある場合に生じる。採石場のくみ上げによって地滑りドリーネの発達リスクが高まり、これは人間のインフラに被害を与える可能性がある。また、カルストの泉や井戸の流れを減少させたり止めたりする可能性がある。逆に、汲み上げ水を受ける川の流れのパターンは変わり、総流量と洪水ピークの大小が増加する。

採掘や岩石の破碎活動から出る採石場の粉塵がカルスト地形に流れ込むと、堆積物の負荷が増加し、その結果、地表流の水力学や堆積が混乱する可能性がある。粉塵対策は、多くの採石場において継続的な問題であり、微粒子による広範な大気汚染につながる可能性がある。採石場の寿命が終了した後、施設が家庭や産業廃棄物の不法投棄によって地下水への影響を引き起こさないように管理するための長期的な問題が発生する。政府によっては、採石場や鉱山に

対して、埋め立て計画や財務履行保証を義務付けているところもある。採石場が操業を停止した後の土地利用についても、開発に関する規制が必要となる場合がある。

一般的に、保護地域内における新たな採石や採石の拡張には反対であるという推定があるため、影響に関する証拠や、代わりに他の場所で石が採石された場合の潜在的な影響の観点から、どのような申請も慎重に検討されることが重要である。採石場が洞窟の通路と交差して破壊されていたり、湧水と水文学的に急速につながっていたりするという証拠がある場合は、これ以上の拡張に反対する根拠となる。しかし、他の状況では、既存の採石場のエリアを深くしたり拡張したりしても、カルスト地形や水文学に新たな影響をもたらさない可能性があり、新しい場所を開設するよりも望ましい場合もある。深掘りのために排水処理が必要な場合、さらなる問題が生じる場合もある。いずれの場合も、申請は保護区や重要な人間および生態系の水源である井戸や泉に対する逆効果な影響がないことを強力に示す証拠を提供する必要がある。

Mine impacts 鉱山への影響

地下鉱山が地表に与える影響は、鉱物が処理されたり残渣が廃棄されたりする場所とともに、鉱山に通じる入口周辺の地域に限定される。よほど強力な戦略的根拠がない限り、保護区内に新たな鉱山を立地すべきではなく、処理場や廃棄物の山は保護区境界のかなり外側にあるべきである。ただし、保護地域の外に入り口がある鉱山を使用して、保護地域の下から鉱物を抽出することは可能かもしれない。最新の採掘技術は、坑内への崩壊のリスクを最小限に抑えており、最も重大な影響は、鉱山施設から地下水を除去する必要性から生じると考えられる。過去にいくつかのカルスト地域で広く使用されてきた技術の 1 つは、深い谷から排水坑を掘削し、大規模なブロック全体の地下水位を効果的に低下させることである。その結果、湧水や湧水を水源とする河川の流量が減少し、場合によっては完全に干上がった状態になる。現代のより深い鉱山では一般に大規模な脱水計画が必要であり、その中には $6 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える揚水量を伴うものもある。多孔質な地層では、揚水によって水位が円錐状に低下しているが、ほとんどのカルスト岩では浸透性が著しく非均一であり、特に鉱山が水路と交差している場合、排水の影響は何キロメートルに及ぶ場合がある。排水坑道と同様に、一般的な影響は、湧水や湧水を水源とする水路の流量が減少することと、揚水を受ける河川の流量が増加することである。岩盤が 3 m 以上の土で覆われている場合、表層堆積物の地下水が引き下げられると、一般的に地盤沈下ドリーネが形成される。追加の影響は、水質の変化および浮遊する堆積物の負荷に関連する。

鉱山や採石場は洞窟の通路と交差する可能性があり、洞窟の気候に影響を与えたり変化させたりする可能性があり、その結果、絶滅危惧種のコウモリの生息地の喪失につながる可能性がある。鉱山や採石場を許可する際には、コウモリや絶滅危惧種の重要な生息地への影響を最小限に抑える取り組みを考慮する必要がある。アメリカのウェストバージニア州にある Greer 石灰岩採石場は、近くに位置する長さ 50 km の「Hellhole 洞窟」のマッピングを洞窟探検家と緊密に協力して許可した。この洞窟は、採石場の近くにあり、極めて絶滅危惧種のコウモリ 2 種の重要な冬眠地としている。

採石場と同様、鉱山の寿命は限られており、通常は数十年以内である。鉱物が枯渇する場合もあるが、一般的には、採掘コストの上昇や市場価格の下落によって経済的でなくなり、鉱山が放棄されることが多い。鉱物の新たな用途が発見され、その結果として価値が上昇した場合、何十年も使われなかった鉱山を再開するよう圧力がかかる可能性がある。鉱物採掘の長い歴史を持つ国々では、一般に修復の試みもなく放棄された鉱山や採掘場が数多くある。場合によっては、これらの遺跡は、その歴史的な重要性が認められたり、荒れた地面や荒地に希少な植物が定着したりしたために保護が与えられている。他の場所では、土壌侵食、鉱山排水酸性化、崩壊するシンクホールの形成など、環境上の問題が発生する場合がある。鉱山の適切な閉鎖（廃止）は、しばしば非常に複雑で費用がかかり、過去にはほとんどが採掘運用コストに組み込まれることはなかった。一部では、『戦略的破産』と称される手法によって、廃止コ

ストを回避しようとする試みさえあった。カルスト地域の鉱山の廃止措置と正しい閉山後は、地表の動き、地下水の水質、地表と地下の生態系の長期にわたるモニタリングを含むべきである。

Summary 概要

採掘産業とカルストや洞窟の保護を調和させるという課題は、潜在的または実際の環境への影響と、国際規模から地元規模までの利害関係者が関与する政治的および経済的要因の両方に関連するため、常に困難である。保護地域内での開発が「国益にかなう」という理由で許可されるケースもあれば、開発を許可するために保護を完全に解除するケースもある。しかし、21世紀に入ってから、企業界でESG（環境、社会、ガバナンス）の実践が増え、重要な場所を保護しないことが企業の評判、最終的には経営幹部に損害をもたらす可能性があることが認識されている。2020年、オーストラリアの二つの鉄鉱石鉱山の洞窟内で重要な考古学的遺跡が破壊され、最初は先住民が抗議したが、その後、ソーシャルメディアでの広報活動によって世界的な抗議が起こった。株主からの圧力により、最高経営責任者（CEO）と上級幹部数名が解任され、会長と取締役数名が辞任した。この件についての議会の調査が執筆時点で進行中であり、この文書が変更をもたらすことを期待して鉱業法に対する保護措置が強化される可能性がある。



英国Peak DistrictにあるDowlow石灰岩採石場。この採石場の面積は約0.5km²で、2021年の最低地点は元の地表から約100m低かったが、導水路や洞窟は遮断されておらず、採石面からの地下水の流入はない。写真：Tony Marsden.

ほとんどの採掘産業は、二酸化炭素排出量が高く、持続不可能である。たとえばセメント産業は、炭酸塩の形成と斜成の間に閉じ込められた二酸化炭素を高温で放出するため、世界の温室効果ガス排出量の8%を占めていると推定されている。さらに大きな割合は、炭酸塩岩の貯留層から抽出された化石燃料（ガスと石油）の燃焼によるものと考えられている。地球が温暖化の許容範囲内で排出量を削減しようと奮闘する中、すでに環境の岐路に立たされているこれらの産業は困難な時期に直面する可能性が高い。

カルストと洞窟の壊れやすい性質のため、採掘活動と共存することは困難だが、バランスを追求する必要がある。洞窟に非常に近い場所で採石場が稼働したり、カルストの下に鉱山が拡張されたりしても、目立つ影響が生じない場合もあれば、水文システムの広範な混乱や地質遺産の完全な破壊、固有種の喪失が発生する場合もある。完璧な利益と損失の均衡を実現するのは難しいであろうが、厳格な科学的評価、詳細なモニタリング、最小限の影響を持つ運用が可能かもしれない。

Guidelines ガイドライン

- (47) カルスト保護区内での新しい鉱山や採石場については、その鉱物が不足しており、経済的または戦略的価値が高い場合で、代替の供給源がないことが示される場合を除き、原則として許容されるべきではない。
- (48) カルスト地帯における新しい鉱山や採石場の提案は、その範囲内および境界にある特徴、さらには地表水とカルスト地下水を介した遠隔地への影響の可能性を考慮した詳細な環境評価を受けるべきである。
- (49) 環境アセスメントでは、洞窟とカルストの地形と生態系の価値を記述し、評価する必要がある。重大な影響が少ない代替採取場所があるかどうかを評価する必要がある。代替場所がない場合は、洞窟生態系の完全性と水文学的プロセスの連続性を保護するために、可能な限り重要な洞窟やカルスト地形の周囲に慎重に設計された緩衝保護ゾーンを設ける必要がある。
- (50) 破壊以外の選択肢がない場合は、特徴を記録し、必要に応じて科学研究のために除去（移転）する必要がある。つまり、古環境研究のために洞窟石や堆積物を記録し、除去（移転）する必要がある。
- (51) 開発が許可される場合は、適切に設計された環境保護システムがなければならず、また、必要に応じて変更できるように、運用中の状態と保護システムの有効性を記録するための監視プロトコルが存在する必要がある。また、閉鎖のための資金を確保するために事前に支払われる保証金など、適切な修復と長期的な監視を含む詳細な閉鎖計画も策定する必要がある。

Development and infrastructure 開発とインフラ

歴史を通じて、人々はカルスト地形や洞窟をさまざまな目的で利用してきた。居住、保護、農業、給水などのために建造物が建てられた。中世のヨーロッパでは、スロベニアの Predjama 城のように、洞窟の中に要塞や城を築き、防御と侵略の際に洞窟の通路を通る脱出路を確保した。小規模な産業も洞窟を利用した。イギリスの Peak 洞窟の大きな入り口では、中世から現代に至るまでロープ作りが行われており、現在は主に洞窟を訪れる観光客に販売するためにロープが作られているが、かつては洞窟内にロープ職人の小さな集落があった。世界遺産の華南カルスト地域には、洞窟の入り口に小さな住居が残っている。チーズの熟成には多くの洞窟が使用されており、有名なロックフォール・ブルーチーズは、フランスの Combalou 洞窟内で熟成された場合にのみその名を名乗ることができる。キノコ、ビール、ワイン、キムチ、その他いくつかの製品は、これまで、そして多くの国で今でも洞窟で生産または保管されている。道路建設では、高価なトンネルを建設するよりも便利な選択肢として洞窟通路が利用されることがある。フランスの Mas-D’Azil 洞窟を横切る道路やオーストラリアの Jenolan 洞窟の一部がその良い例である。多くのカルスト泉には、何らかの工学的構造が見られる。洞窟とカルストのインフラストラクチャのさらなる例は、水の利用（「給水」を参照）、採石と採掘（「採掘産業」を参照）、およびツーリズムへの適応（「観光洞」を参照）に関連している。



スロベニアの Predjama 城は、紀元 13 世紀に洞窟の口の中に建てられた。写真：David Gillieson.

インフラの必要性と並行して人口が増加すると、カルスト地域がそのような開発に影響を与えたり、影響を受けたりするのは当然のことである。19 世紀以降に起こった指数関数的な人口増加は、産業の発展と都市化と密接に関連している。カルスト地域に住んでいる人口や、水などのカルスト資源に依存する人口は増加し続けており、2020 年時点で約 11.8 億人と推定されている。カルスト地形が支配的な地域では、都市や産業全体を含むすべての開発は、カルストの上に築かれなければならなかった。その結果、脆弱なカルスト生態系に対する環境圧力が高まっている。それにもかかわらず、カルストの動態を理解する知識の進歩と、より持続可能なアプローチによって、開発とカルストの保護の両立を可能にする重要な進展があった。

カルスト地域の開発とインフラはさまざまなタイプと機能を持つ可能性があり、その結果、さまざまな種類の脆弱性と影響が生じる。次のような広範な分類が採用されている。

- 線形インフラストラクチャ。
- ダムと貯水池。
- 産業。
- 都市開発。

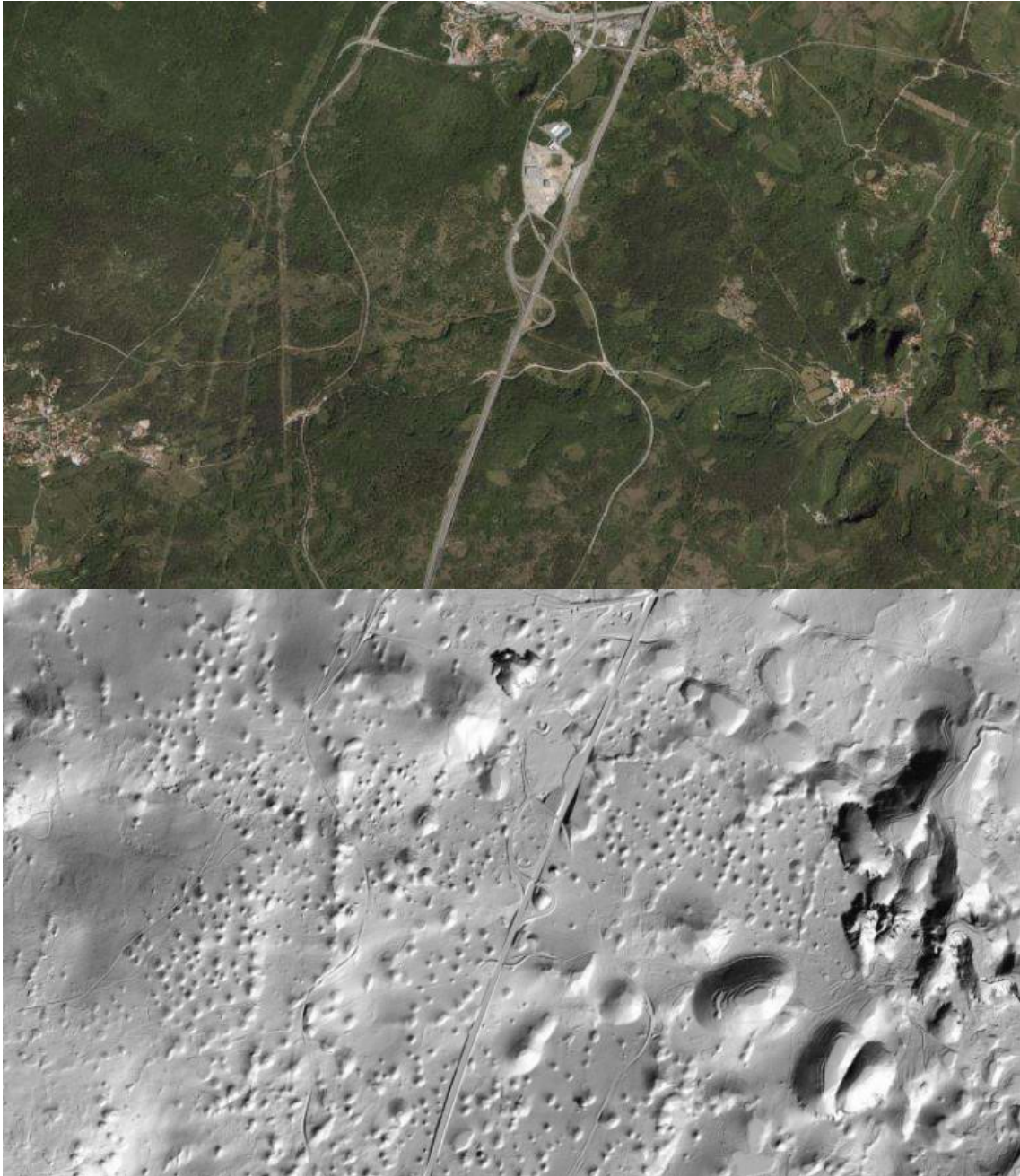
これらの異なるタイプは一般に関連付けられており、それらの間の境界線は曖昧になることがよくある。原則として、残念ながらどこでも強制されているわけではないが、設置前に敷地とそのすぐ周囲（保護緩衝地帯）を含む環境評価調査を行う必要がある。このゾーンでは、プロジェクトを続行すべきか、それとも代替場所を模索すべきかを評価するために、洞窟と地表カルストの特徴の目録を含むより詳細な調査を実行する必要がある。一部の貯水池やダムの場合のように、特定のプロジェクトの場所を変更することが不可能な場合がある。しかし、ほとんどの場合、最初はコストがかかり、根本的な変更に見えるこの行動は、最終的には環境修復や訴訟に関連する高額な手続きを避ける賢明な選択となる場合がある。

Linear infrastructures 線形インフラストラクチャ

線形インフラストラクチャは、道路、鉄道、送電線、水路、その他の構造物で構成されており、これらの構造物は通常狭く、かなりの長さがある。人、物資、水、エネルギーの輸送に不可欠で、その密度は経済的豊かさと人口規模に直接関係している。

カルスト地域の特徴的な険しい地形のため、そのような構造物の建設は困難な場合がある。トンネル掘削はカルスト山塊を横断するための一般的な代替手段であり、未知の洞窟を遮断して水の流入を引き起こす可能性がある。さらに考慮しなければならないのは、近隣の洞窟の安定性と、建設中や操業中の振動との関係である。交通振動による洞窟の部分的、あるいは完全な崩壊は起こりうるが、それはまれであり、その地域の地質と洞窟の深さによる。洞窟の上を横断する道路や、洞窟内を通る道路で、目に見える形態的な損傷がない例もある。同様の地盤工学的な考慮事項は、洞窟を天然の橋として利用する場合にも適用される。このような状況では、洞窟と道路の両方に損害が生じないことを保証するために、ケースバイケースの調査がなされるべきである。通常、直線的な構造物の計画にはある程度の柔軟性があり、可能であれば早い段階で、より脆弱なカルスト地帯からの迂回を採用すべきである。

道路や鉄道からの流出物はしばしば汚染されており、カルスト地帯では最終的に排水溝や沈没点に向かう傾向があり、泉や水源を汚染する可能性がある。危険な化学物質の流出事故が発生した場合、これは非常に深刻な問題になる場合がある。化学物質は、それらの密度と組成に依存して複雑に振る舞う。汚染されたカルスト土壌や洞窟を清掃することは通常複雑で費用がかかる。カルスト帯水層の異方性特性と一般的に高速の浸透率のため、汚染物質の一部が急速に導管を通して移動し、投入から数時間または数日後に高濃度で現れる可能性がある。残りはエピカルストや小さな導水路に貯留され、投入から数十日または数百日後になっても低濃度で現れる場合がある。



スロベニア、Divaca (Divaca) 近郊の主要幹線道路に隣接するドリーンの航空写真 (上) と LIDAR 画像 (下)。スロベニア共和国環境庁 (EARS) の環境アトラスより転載。

カルストは、特にドリーンの発達や浅い洞窟への崩壊を通じて、線状構造にも影響を与える可能性がある。地球物理学的研究は、回避すべき空洞や洞窟を特定するのに役立つが、パイプラインからの水漏れや建設された排水路に沿った損失によって引き起こされる蓋の崩壊によるシンクホールがそれらの研究後に形成される可能性がある。鉄塔の近くにドリーンが形成されるケースはあるものの、鉄塔 (鉄塔) 間の間隔が広いと、送電線からの影響を受ける危険性は低い。2010 年頃から、再生可能エネルギー市場、特に風力タービンによる発電が著しく伸びている。厳密には直線的ではないが、風力タワーは一般的に平行に並んでおり、同様の考慮が適用される。これらの重い構造物は、ある程度の位置の柔軟性を持っており、洞窟から離れるようにすべきである。風力タービンはコウモリを殺す場合があり、通常は羽根との直接的な衝突ではなく、気圧の急激な低下によってコウモリの肺が崩壊するバロトラウマによるもの

である。風力タービンは、その地域のコウモリ種への害を最小限に抑えるために、コウモリの専門家と相談して配置および運用されるべきである。



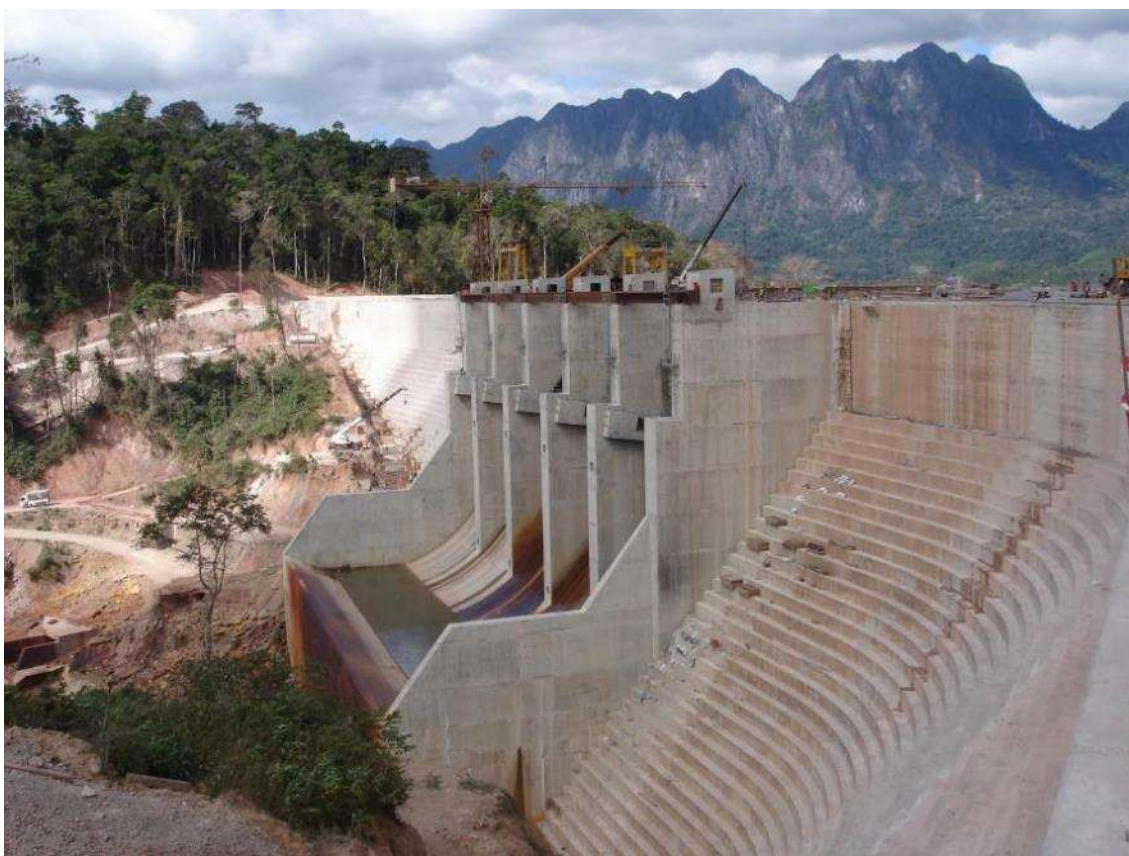
上に示したように、小規模な道路をドリーンの周りに迂回させることは、簡単で効果的な戦略である。ただし、主要な高速道路はできるだけ直線である必要がある。上記の写真は、スロベニアを通る高速道路の経路上にあるドリーネを示している。このドリーネは掘削され、出口が封鎖され、崩壊のリスクを減少させるために注意深く骨材で埋められている。写真：John Gunn.



ロベニアの同じ高速道路のルートは、元々は土砂で満たされた屋根のない洞窟だった場所の上を通過している。建設業者とポストイナのカルスト研究所の協力により、崩壊の危険性を減らすために骨材で満たされ密閉される前に、洞窟が注意深く記録されることが保証された。写真：John Gunn.

Dams and reservoirs ダムと貯水池

カルスト地域では水が地下を流れる傾向がある。川のシンク、ドリーネ、泉が典型的な特徴であるが、一般に地表の排水は限られている。このため、歴史を通じて、個人消費や農業のために水を利用し、保持する方法を考え出すことが重要であった。そのためには、井戸を掘削したり、洞窟内にポンプ装置を設置したりといった工学的な解決策が必要だった。それに代わる適切な方法は、ダムや貯水池を建設することである。ダムや貯水池は、水を地上に維持し、流量の制御と分配を容易にすることを目的としている。カルスト地形にある岩石は、溶解度が高いため、通常、地形の標高が低い場所にあり、ダム建設の自然なターゲットとなる。さらに、深く切り立った谷や峡谷は、洞窟の崩壊によって生じることもあり、多くのカルスト地域によく見られる地形であり、魅力的なダムサイトとなりうる。古代以来、特にヨーロッパや中国では、何千ものダムや貯水池がカルスト地形に建設されてきた。



カルスト地形に建設された水力発電ダム（ラオス）。写真：Terry Bolger.

カルスト地形にあるダムや貯水池のほとんどは、ある程度の漏水を示すが、これは通常、大規模で高価なグラウチング（すなわち、空隙をコンクリートやその他の不透水性材料で埋めること）を施しても、当初から容認されている。これは、地球物理学的手法は深さが増すにつれて解像度が低下する傾向があり、現在の技術では導管や洞窟に代表される潜在的な漏洩ルート サイズと位置を確実に決定できないという事実によるものである。さらに、ダムや貯水池は、以前に存在していた水面よりも高い標高に水面を生成し、それによって「水力勾配」が増加する。この勾配の増加により、地下水の流れの速度が増加し、乱流モードで動作し、既存の通路をかつて塞いでいた堆積物を除去する可能性がある。もう 1 つの潜在的な欠点は、この新たに作成された勾配によって溶解速度が増加し、特に炭酸塩カルストよりも岩石の溶解性が高まるかに高い蒸発岩地域では、ダムの耐用期間中に導管の拡大が可能になることである。したがって、時間の経過とともに漏れが増加する傾向があることは驚くべきことではない。さらに、貯水池の下流の亀裂や洞窟通路からの漏水、および水柱の重みによってドリーネの発達が発達誘発される可能性があり、これが新たな漏水

帯の形成につながる可能性があり、周辺地域に小規模な地震震動を引き起こす可能性がある。追加の環境問題には、他の水系との水力的な接続および水生生物の移動の妨げが関連しており、水質汚染も含まれる。一度ダムが経済的に不適切または環境への影響が大きいと判断されると、それを撤去することは可能だが、これはリスクがないわけではなく、費用がかかり技術的にも難しい企業である。継続的な打設作業、メンテナンス、または他のダムの補修よりも費用がかからない場合もある。

一部のカルスト地域では、カルスト帯水層の貯水量を増やすためにダムが建設されている。一般に、より効果的で問題の少ない設計は、カルスト地域の上流にダムを配置し、カルスト導管を閉塞しない場所で堆積が起これ、すべての流れが帯水層に吸収される速度で水が放出されることを可能にする。ただし、この設計は常に可能であるとは限らない。代替設計では、カルスト地中またはその下流端にダムを設置し、カルスト地の上に直接水を貯留する。この方法では、洞窟や水路の堆積が増加し、それらの水文条件で進化していない洞窟の生態系に大きな影響を与える。さらに、汚染物質が貯水池に流出すると、帯水層に直接流入しているが、上流のダム設計では、汚染物質が地下水に入る前に捕捉して除去または修復する機会が増える。どちらの設計も、追加の水が急速に帯水層を通して流出する浅くて低い地下水貯留カルスト帯水層では使用すべきではない。テキサス州の Edwards 帯水層など、大きくて深い自生式カルスト帯水層の地下水を増やすことにある程度の成功が見られている。

Industries 産業

産業にはさまざまな規模、目的、形態がある。セメントやカルストに埋め込まれた鉱物などのカルスト由来の原料に関連する加工プラントは、通常、採石場や鉱山の近くに位置しており、通常、カルスト上に建設されていることを意味する。これらの産業に共通する特徴としては、これらの産業に共通する特徴として、1) 鉱物処理と冷却のための高い水需要、2) 化石燃料の必要性、3) 処分場、特に不純物や残土が多い採掘場では、工場敷地よりもはるかに広い場合がある。これらの特徴は、一部の産業がカルスト環境に多大な負担をかけており、液体と大気への放出の両方を注意深く制御する必要があることを意味する。地下水の過剰な汲み上げは、地盤沈下やシンクホールの崩壊を引き起こす可能性がある。大気汚染は、有害な温室効果ガスだけでなく、さまざまな微粒子も含み、洞窟やカルストの特徴に損害を与える可能性がある。

鉱物採掘に関連していない産業は、通常、消費者や輸送ルートに近い場所にある。カルストの特別な脆弱性のため、建築基準または区域規定の何らかの修正が必要になる可能性がある。たとえば、持続可能な排水計画(SUDS; Sustainable Drainage Schemes)では、一般に、暴風雨の排水の追加を避けるために、浸出池や浸透池を提供することが開発者に要求される。カルスト地域では、これらはシンクホールの崩壊を引き起こし、地下水の量と水質を変化させる可能性がある。多くの産業に共通するのは二酸化炭素排出量が多いことであり、これはカルスト地域をはるかに超えた影響をもたらす。

Urban development 都市開発

「カルスト環境と洞窟システムの特殊な性質」で説明したように、自然条件では集中した涵養が節理、ドリーネ、シンクを通してカルストに入るが、特に土壌や植生で覆われている場合、または表層堆積物がある場所では、ほとんどの涵養は拡散して減衰する。カルスト地形上の都市部は、これらの条件の変化の極端な例を表しており、他のタイプの開発に関連する問題の一部を拡大している。カルスト地形上の市街地は、このような条件の変化の極端な例であり、他の種類の開発に関連する問題のいくつかを拡大したものである。都市は常に、屋根、舗装、道路などの形で不浸透性物質を広範囲に導入することによって、自然の浸透パターンを大きく変化させる。このような変化は、一般的に濁りやすく、土砂、油脂、鉛、その他の化学物質で汚染された流出水の集中につながる可能性が高い。したがって、都市排水をできるだけカルストから遠ざける効率的な方法が必要である。それが不可能であれば、岩盤の方向に向かっ

て排水を促進し、できれば水がカルストに入る前に水質を改善する必要がある。「雨水排水井戸」は、ケンタッキー州ボウリング・グリーンのような多くの都市で重要である。ボウリング・グリーンは、カルスト平原にあり、地下に洞窟システムを持ついくつかの都市のうちのひとつであるため、汚染がカルスト帯水層に到達する可能性が高まっている。初期には区画規制がなかったため、大雨が降ると洪水になりやすいドリーネに建設が許可された。他のドリーネの埋め立ては、それらの排水能力を減少させ、洪水貯留容量を減少させた。効率の低い自然な排水システムは、一部のカルスト地域で都市部での洪水を引き起こす。これは一部のカルスト地形でよく見られる問題である。ゴミや下水の処理も、特に発展途上国では重要な問題である。一部の都市では、集合的な下水システムが存在せず、下水は排水溝や川に直接排出されたり、手作りの地下タンクに投棄されたり、カルストの隙間やシンクホールに流れ込むことがある。これらの原始的なシステムは、汚染物質の拡散を遮断せず、緩和しないため、カルスト含水層や洞窟生態系に重大な脅威をもたらす可能性がある。さらに、不浸透性の覆いは局所的な水路を変化させ、より急速な流出を引き起こし、洞窟やシンクホールのステージの高さを増加させ、嵐の反応の長さを短縮し、その結果乾期に利用できる水が少なくなる可能性がある。

都市部から流出する暴雨排水は、油脂、バクテリア、その他の都市点源汚染や非点源汚染によって、非常に有毒なものとなる可能性がある。また、浄化槽や家畜の排泄物、都市部の野生生物などの流出により、都市部の細菌濃度が非常に高くなり、地下水の深刻な悪化を招くこともある。

固形廃棄物に関しては、「埋立地」と呼ばれる特定の場所が、通常、厳しい計画条件の対象となる。これらの地域は、可能な限りカルスト地形の外側で、不透水性の岩盤の上に位置し、漏出を防ぐために不透水性のバリアで覆われていなければならない。残念ながら、後発開発途上国ではこのようなことはほとんど行われておらず、土壌や地下水の汚染につながっている。自動車、家庭、産業による大気汚染も、都市で増幅される環境影響の一種であり、酸性雨や微粒子の飛散につながる。



ブラジル、Lagoa Santa カルストの洞窟の流れによって運ばれるゴミ。写真：Luciana Alt.

危険物 (HazMat) は一般的に使用され、カルストを通して輸送され、その放出は洞窟、カルスト、地下水資源に重大な影響を及ぼしている。HazMat 事故の検出、モニタリング、修復は、以下の問題のために非常に困難である：

- 土壌は通常、汚染物質の減衰をほとんどもたらさない。
- カルスト地形では地下水の流速が速いため (1 km/日以上)、汚染物質を封じ込めたり浄化したりする前に、汚染物質が長距離にわたって移動する可能性がある。
- 流路は明確に定義されていないため、注入と排出の関係は一般に不明である。
- モニタリングシステムは、設置、サンプリング、維持が困難で費用がかかる。
- カルストにおける地下水の流れは非等方的であるため、モニタリングシステムは、汚染の濃度や範囲を代表するものではないかもしれない。
- カルスト水文地質の専門家の数が限られており、利用可能な人材が少ないである。
- 浄化方法の設置や運用が困難で、効果が限定的な場合がある。

有害物質の放出は、産業事故、意図的な放出、消費者の廃棄物 (除草剤や殺虫剤) の不適切な処理、地下の漏れた貯蔵タンク、浸透タンク、下水システム、および石油・ガス送管から発生する可能性がある。ガソリンやその他の燃料は、溶剤(ドライクリーニングによるもの)とともに環境中に放出される一般的な物質である。地下水を汚染するだけでなく、一部の蒸気は蓄積すると有毒または爆発性となる可能性があり、洞窟、下水道システム、さらには住宅や公共の建物内で爆発性環境を引き起こす可能性がある。

カルスト地帯での危険物事故への緊急対応は非常に困難であり、まず公共の安全の確保が優先されるべきである。その後、地表と地下の保護が続く。可能であれば、修復には液体および固体廃棄物の封じ込めと除去が含まれる必要がある。危険物は決して地表に流すべきではない。なぜなら、民間および公共の水源地の汚染、洞窟の生物相の中毒、洞窟や建物内の爆発性蒸気の収集、湧水の水質悪化につながり、湧水に依存する生態系や下流の利用者に影響を与える可能性があるからである。カルストにおける有害物質放出の影響の調査は、経験豊富なカルスト環境専門家によって実施される必要がある。

地下水の過剰汲み上げは都市部でよく見られる。何千もの公共井戸や私有井戸の汲み上げが重なると、鉱山や工業地帯で見られるような大規模な汲み上げが 1 回行われたのと同じような影響が生じる可能性がある。都市部での地盤沈下は、地下水が利用されている世界の多くの上下水道配水管の漏れによってシンクホールが発生し、亀裂への土壌の移動、または土壌内の空洞の形成につながり、その後崩壊に至る。米国フロリダ州では、住宅保険に住宅保険パッケージが含まれていることがよくある。都市部での地下水の過剰汲み上げは、下流の利用者や湧水に依存する種にとって重要な資源である湧水の減少または完全な喪失を引き起こす可能性もある。

暴風雨水流出の不適切な管理による陥没穴(sinkholes)の洪水は、カルストに問題を引き起こす可能性がある。陥没穴(sinkholes)の中に住宅や店舗を建設すると、都市化に伴う遮水性の高い覆いがあり、急速かつ長期にわたる洪水が発生する可能性がある。土地利用慣行の不適切な規制により、シンクホールの「排水管」が堆積物、植生、ゴミで詰まり、洪水の高さと期間が増大する可能性がある。

都市がカルスト地域の端にある場合、都市の成長は、通常、開発がより容易で、費用がかからず、環境への影響が少ない非カルスト地域に向けるのが最善である。このような取り組みには、公教育が有効である。テキサス州 Austin と San Antonio では、カルスト帯水層を懸念する住民が、帯水層や絶滅危惧種の保護、場合によっては公園として確保さ

れるカルスト地域の広大な土地を購入するために、20～30年かけて数億ドルを集めるために、税金を少し増やすことを投票で決めた。



ブラジルの Lagoa Santa カルストにある不適切な埋立地。写真：Luciana Alt.

現在、世界人口のほとんどが都市部に住んでおり、都市は持続可能性の課題における重要な要素となっている。いくつかの気候に優しい取り組みや NBS(Nature Based Solutions)プロジェクトは、カーボンニュートラル(理想的にはマイナス)環境を達成するために、前述の影響を軽減することを目指している。この最近の大きな変化は、カルスト環境に利益をもたらすはずである。

Development and infrastructure in protected areas 保護地域における開発とインフラ

保護地域にはさまざまな「保護」のレベルがあり、いくつかの条件を満たせば産業や市街地の存在を認めるところもあれば、手つかずの原生地域もある。カルスト地域の人気のある保護区域の多くには、来場者センターやレストラン、スタッフ、科学者、観光客向けの宿泊施設などの設備がある。先に列挙した影響はこれらの建造物にも当てはまり、より脆弱なカルスト地形から離れた場所に設置されるのが理想的である。サラワク州のグヌン・ムル国立公園では、すべての施設が洞窟から数キロ離れている。しかし、多くの保護区には、洞窟やシンクホール近くまたは真上に建物が存在する。これらの構造物による環境影響の事例は数多くあるため、注意が必要である。トイレの便所と洞窟の水流が直接つながっていることが水の追跡実験によって証明された事例もある。

通常、洞窟内の建造物は最小限に抑えられている。しかし、人気のある保護区の中には、地下レストラン(米国の Carlsbad 国立公園や Mammoth 洞窟国立公園を含む)、土産物店、トイレ、地下ショー用の円形劇場、エレベーター、列車やケーブルカーの線路などがあるところもある。これらの構造物はすべて何らかの環境影響を伴うため、包括的な環境評価を行った後にのみ設置する必要がある。保護地域管理計画では、これらが快適さ(または自然条件からの断熱)と訪問者の安全を提供する手段として正当化されるかどうかを明確にする必要がある。

Conclusions 結論

カルストと人間は、最初のヒト科の動物が出現して以来、共存してきた。洞窟やカルスト地域が、完全に人間による何らかの改変を受けていないことはほとんどないが、21世紀に入ってから、保全と影響のバランスを達成する傾向が強まっている。人口の多いカルスト地帯で持続可能性を達成するのは難しい課題であるが、グリーン・インフラストラクチャー・プロジェクトによって、環境サービスをよりバランスよく利用する方向へ向かうことが可能になってきている。

Guidelines ガイドライン

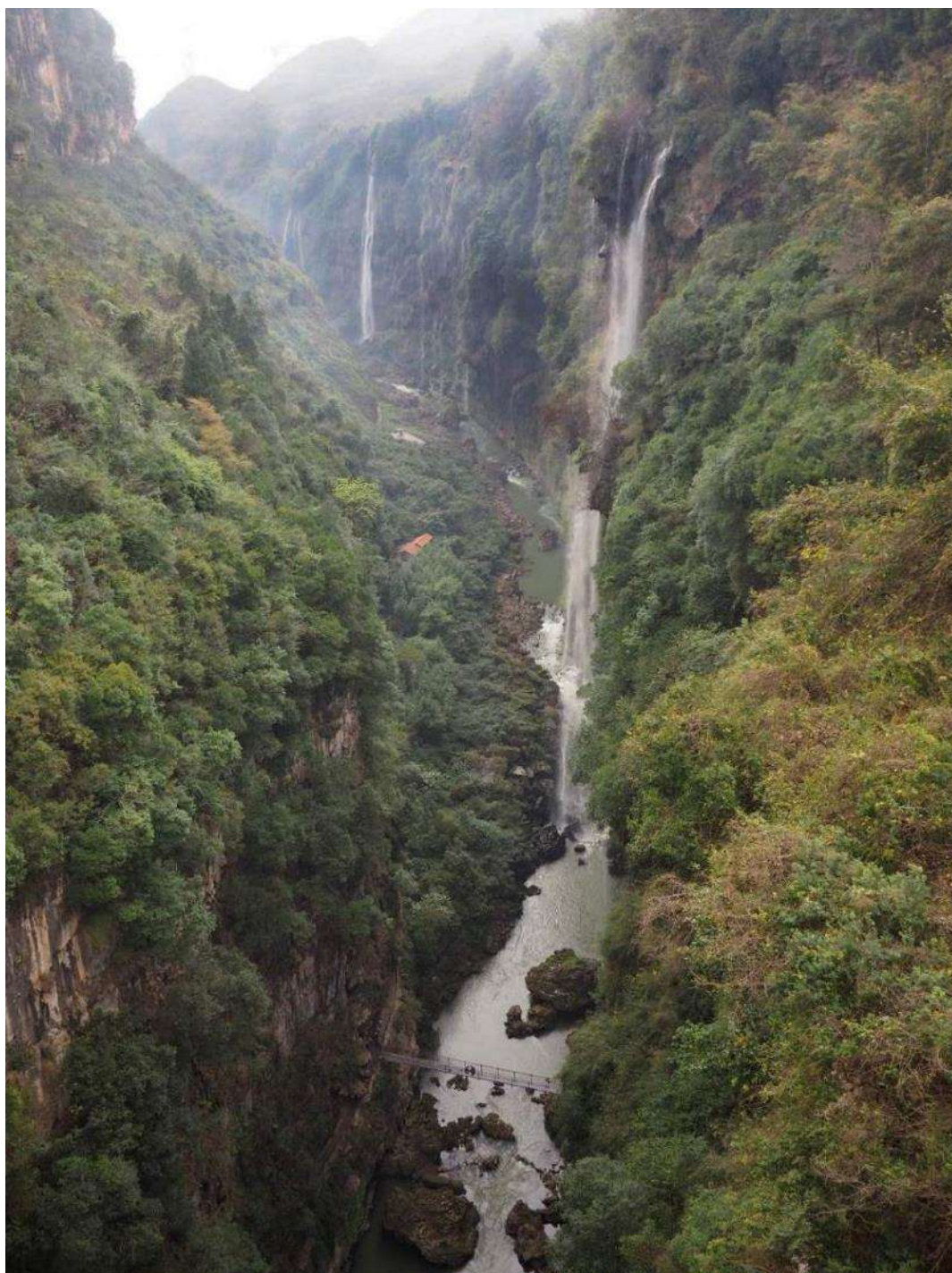
- (52) カルスト地域における建設プロジェクトのすべての実現可能性調査には、計画地、詳細な環境アセスメント、保護緩衝地帯の規模についての慎重な検討が含まれるべきである。プロジェクトや都市開発をカルスト地域から遠ざけることが可能な場合、これは経済的にも環境的にも前向きな決定となりうる。
- (53) 建設中および建設後に発生する大気廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物の処分に対処するためのプロトコルを開発し、適用すべきである。これらは、大気、土壌、エピカルスト、カルスト帯水層の上部ゾーンを含むカルスト臨界帯全体に及ぶ必要がある。
- (54) カルストに対する建築基準は、地震や洪水が起こりやすい地域と同じ方法で施行されなければならない。カルスト地域の都市ゾーニングでは、カルスト環境に固有の特殊性と脆弱性を考慮する必要がある。
- (55) 科学に基づいた強力な立法計画の枠組みが地方、地域、国家レベルで実施されるべきである。
- (56) 特に後発開発途上国においては、地主や都市住民にカルスト地形の脆弱な性質を知らせるため、教育的な取り組みを実践すべきである。
- (57) 保護地域では、インフラは最小限にとどめ、できれば洞窟やカルスト地形から離れた場所に設置すべきである。
- (58) 適切な保護地域管理計画では、不必要な快適さを提供するのではなく、環境と訪問者の保護を重視して、地域内に建築物を建てることの長所と短所を慎重に比較検討する必要がある。洞窟内での大規模なインフラ事業は、必要不可欠なものでない限り、控えるべきである。
- (59) 危険物質は細心の注意を払って取り扱われ、放出を最小限に抑えるために適切に規制されるべきである。危険物事故の初期対応者は、カルストに対する特定の対応方法について訓練を受ける必要がある。
- (60) ガソリン、その他の燃料、溶剤、下水、その他の有害廃棄物などの危険物は、決して地下に流すべきではない。地下水の調査と浄化は非常に困難であり、費用もかかる。可能な限り、有害物質は地表に封じ込め、除去すべきである。潜在的な環境影響のより詳細な調査は、経験豊富なカルストの専門家が行うべきである。

Water supply 水の供給

水へのアクセスは、人類が時間の経過とともにどのように進化してきたかに大きな役割を果たしてきた。ギリシャ人、ミノア人（クレタ島）、ローマ人、その他多くの社会はカルスト水資源の扱い方を学び、多くの都市は飲料水源として、あるいはレクリエーションのためにカルスト泉の近くに位置することで恩恵を受けた。イタリアのシチリア島の Syracuse、フランスの Nimes、イギリスの Bath。アメリカ大陸では、マヤ文化は主にカルスト地形で進化し、そこでは地元ではセノーテとして知られる崩壊したドリーネを通過のみ水にアクセスできた。カルスト地形の主な特徴の 1 つは、岩石の可溶性の性質により、地表の排水系がまれで、水が地下を流れる傾向があり、時には洞窟を通過してアクセスできるか、ほとんどの場合、泉でのみアクセスできることである。一方、肥沃な土壌（地中海ではテラロッサとして知られる）が存在する場合は、農業に適している。農業と都市の成長により、世界の多くの地域で信頼できる飲料水源として泉が広く利用されるようになった。カルスト泉は、少なくとも 19 世紀以来、米国のバーボンウイスキーやベルギーのトラピストビールなどの伝統的な酒類産業に利用されてきた。

世界カルスト帯水層地図(WOKAM; the World Karst Aquifer Map)に基づいて、世界の氷のない大陸表面の 15.2%がカルスト化可能な炭酸塩岩の存在によって特徴付けられていると推定されている。2020 年の時点で、約 12 億人（世界人口の 16.5%）がカルスト地域に住んでおり、約 7 億人が水を消費している。この割合は増加する可能性が高く、カルスト帯水層の持続可能な利用に脅威を与えている。カルスト地下水を効率的に利用するためには、掘削井や貯水池などのエンジニアリングソリューションが一般的に必要である。1986 年以前は、世界中(中国を除く)のカルスト地に

17,000 を超えるダムが建設されたが、多くのダムで重大な漏水が発生したり、完全に埋まったりすることはなかった。これらの初期の工学的失敗により、カルストでの工学は「予期せぬことを予想する」べきであるという広く信じられるようになった。人口の増加に加えて、気候変動の影響が人々のカルスト地下水への依存を悪化させる可能性があり、特にアジア、中東、ヨーロッパ、北および中央アメリカの一部の人口密集地のカルスト地域で顕著になるであろう。



中国貴州省の馬林河溪谷にあるカルスト泉。写真：John Gunn.

カルスト地形では、岩盤のドリーネや節理を通じて浸透が急速に起こる傾向があるが、通常、黄土や火山灰などの表層堆積物上に形成される厚い不透水性土壌がある地域では、降雨時に湖が形成されることがある。他の岩石とは異なり、地下水の流れは非常に速く、導管や洞窟を通して発生する。地下水面の深さは地域によって異なり、透水性の岩

石の場合のように連続した表面が存在しない地域もある。フロリダ州やメキシコのユカタン半島などの平坦な海岸地域では、地下水は地下数メートルのところにあるため、比較的簡単にアクセスできる。しかし、山岳カルスト地域では、一般に数百メートルの通気帯があり、地下水への容易なアクセスが妨げられており、独創的な解決策が必要である。

カルスト水の乱開発は世界の多くの地域で発生しており、水位の低下につながっている。これは、泉や洞窟の川が干上がる可能性があるため、カルストの水生生態系に深刻な影響を及ぼす。多くのカルスト地域では、生活用水や工業用の井戸のため、数十メートルの地盤低下が観察されている。カルスト地下水の過剰汲み上げは、操業するために大規模な脱水計画が必要な鉱山や採石場の場合のように、点源となる可能性がある。しかし、より一般的には、都市消費または灌漑用に複数の井戸から汲み上げられた水の合計量によって地下水面の低下が発生する。地下水位下（水位面）の洞窟や空間の一部は、水の支持によって一部安定している。この支持がポンピングによって急速に取り除かれると、崩壊を引き起こされる場合がある。水位の低下に伴うさらなる影響は、土壌とカルスト岩盤（エピカルスト帯として知られる）の間の接触が地下水面より上に露出したときに発生する。これにより、拡大した節理に土壌が流入し、土壌内に不安定な空間が生成される。これらの空間の崩壊は、過剰な排水が行われる岩溶地域に頻繁に見られるドリネ（凹地）の崩落の原因となる。砂漠、島、沿岸の岩溶地域での淡水資源の過剰汲み上げは、しばしば塩水の浸入を引き起こす場合がある。放棄された、または適切に建設または保守されていない井戸も、地表からの汚染物質が地下に侵入し、地下水の汚染を引き起こす経路となる場合がある。

一部のカルスト地域では洪水が発生しており、これは一般に都市化に関連している。ほとんどの都市では地面が不透水性の表面で覆われているため、自然の浸透が大幅に減少し、地下水面に向かって排水するいくつかの排水構造に集中する。流出水はこれらのシステムの限界を超える場合があり、ケンタッキー州の都市化されたカルスト地域で頻繁に起こるように、広範な洪水が発生する。気候変動に関連する過激な豪雨イベントが増加することで、洪水のリスクが高まる可能性があり、人工の排水構造や洞窟の導水管がより大きな水量に対応できない場合がある。ドリネも洪水の原因となる場合があるが、それは水が流れ込むのではなく、下から上昇する水によるもので、大量の水が高い位置のドリネに流れ込み、洞窟や導水管を通じて低い位置に移動する場合がある。

厚い表層堆積物があるカルスト地域を除いて、カルストへの浸透とカルスト導水管を通じた流れは、一般的な地下水系よりも桁違いに速い場合がよくある。したがって、カルスト地下水は自然の減衰と濾過が限られており、硝酸塩、産業、または偶発的な流出などの農業源からの汚染は容易に地下水面に到達し、導管を通じて長距離に急速に広がる可能性があることを意味する。このため、カルスト水汚染の評価と緩和が非常に複雑になる。このこのため、カルスト水汚染の評価と軽減が非常に複雑になる。界中の多くのカルスト地域では、不適切な浄化槽、あるいはし尿処理のための適切なシステムがまったく存在していないことが一般的であり、病原体による汚染の可能性が高まっている。さまざまな化学物質やあらゆる種類のゴミがカルスト帯水層に侵入する可能性がある。一部の地域では、「見えないものは気にしない」という一般的な見方が、人々にドリネや洞窟に廃棄物を投棄させる原因となっている。都市部のいくつかの洞窟川はひどく汚染されており、ほとんど「天然」下水道にすぎず、ケンタッキー州の Horse 洞内の Hidden River Cave や Bowling Green にある洞窟などで大規模な清掃作業が必要でした。

農業や牧草地のための森林伐採や気候変動による干ばつは、保護的な植生被覆を取り除き、土壌侵食を引き起こす可能性がある。これにより、ドリネや流入口の詰まりが発生し、洪水の原因となる場合がある。追加の影響として、地表と洞窟の排水が土砂で詰まり、通路が塞がり、洞窟内の堆積物の悪化を引き起こす。世界中の洞窟の集水域は不適切に管理されていることが多く、その結果、水循環に影響を与えている。洞窟上の土地利用の変化は浸透ルートへの土壌の浸透を引き起こし、洞窟の色と完全性に影響を与える可能性がある。これは、地質の堆積により、主に白い洞窟の色が変化する可能性がある観光洞窟では特に重要である。

いくつかの先述した環境への影響は、化学物質の偶発的な流出など、点源で発生する短期の出来事に起因する。しかし、都市化や産業による汚染、過剰汲み上げなど、他の影響は数年または数十年のスケールで起こる場合がある。さらなる影響は気候変動に関連しており、逆説的にカルスト地域の水収支に逆の影響を及ぼし、干ばつによる水不足の悪化や、記録的な降水現象による洪水の可能性の増大を引き起こす可能性がある。どちらの状況も現在、世界中で頻繁に発生している。例えば、メキシコ、カリブ海、フロリダ南部のカルスト化した地域では現在ハリケーンの発生頻度が増加しており、一方、干ばつが発生しやすい地域では洞窟排水量の減少が見られている。気候変動の影響は、通常他の要因と重なり合って発生し、その影響を拡大させる役割を果たす。気候変動による海面上昇は、海水が内陸に流入する経路を提供するため、岩灰岩の帯水層に大きな影響を与える可能性がある。

さらに、バルカン半島、ヨーロッパの他の地域、東南アジアなど、いくつかのカルスト地域は国境を越えて広がっている。カルスト資源の管理には、資源管理全般、特に地下水資源をめぐる紛争を避けるために国際協力が必要となる場合がある。



イギリス、ファーマナの Marble Arch 洞から放流される洪水。Cuilcagh Lakelands UNESCO 国際ジオパークに位置する。写真：John Gunn.

Guidelines ガイドライン

- (61) カルスト地帯の水源、例えば泉、井戸、洞窟の保護地域を定義する。これらの保護地域では、肥料の適切な使用や制御された水のくみ上げなど、農業の実践に関するプロトコルが確立されるべきである。泉に対する保護区域の実施に関するいくつかのスキームが提案されているが、広く適用されているのはヨーロッパとアメリカだけである。
- (62) 教育の取り組みは、地主や一般市民がカルスト環境の特異性を理解し、固体廃棄物、衛生問題、有害廃棄物の不適切な処理を避けるための意識を高めるべきである。
- (63) 堅牢なモニタリングシステムは、カルスト地域の影響を受けやすく利用度の高い地下水系の主要な湧水と選ばれた井戸に確立されるべきである。長期的な高解像度のリモート監視は現在、多くの泉で可能であり、より広範囲に実装される必要がある。
- (64) 各国はカルスト水を壊れやすい有限の資源として扱い、水の採掘を管理し規律するための法律を施行するとともに、汚染が生じた場合の迅速な対応に適切な資金提供を認めるべきである。特に、浄化槽の適切な設計と実施、および埋立地の位置に関する勧告は、実践されるべきである。
- (65) カルスト環境における多くの汚染物質の挙動についてはほとんど知られていないため、このテーマの科学的理解を進めるために適切な資金提供が行われるべきである。

Managing karst in protected areas 保護地域におけるカルストの管理

Developing effective monitoring and mitigation 効果的な監視と低減策の開発

Monitoring Principles モニタリングの原則

モニタリングは、特に自然保護地域における洞窟やカルスト資源の管理と保護に不可欠な手段である。モニタリング指標と測定値は、管理が開始されたとき、理想的には人為的な変化が起こる前に存在していた状態の「ベースライン」と比較できる、洞窟とカルスト資源の現在の状態に関する信頼できる情報を提供するために選択される。開発の長い歴史がある展示洞窟などの場所の場合は、近くの未開発の洞窟を「ベースライン」として使用できる場合がある。さらに、2020年から2021年の新型コロナウイルス感染症（Covid-19）パンデミックの間、多くの観光洞はさまざまな期間閉鎖されたが、自動センサーを使用してモニタリングが継続されていた場合、データは自然条件の近似値を提供する。モニタリングにより、リソースの状態の時間の経過に伴う変化、影響と改善の両方が明らかになり、管理アクションの有効性が明らかになる。継続的なモニタリングの結果は、管理者に情報を提供し、影響を軽減するために使用できる(順応的管理)。

理想を言えば、洞窟とカルストのモニタリングプログラムは包括的であり、水、空気、土壌などの非生物資源、地質学および地形学的特徴、動植物、生息地、生態系などの生物資源を含むべきである。ただし、保護区管理機関は、このような包括的な評価プログラムを支援するための十分な資金を持っていないことがよくある。したがって、モニタリングの取り組みは、自然資源を価値や重要性、脆弱性、実際のあるいは予想される脅威や影響の深刻さに基づいて優先順位付けし、焦点を絞るべきである（自然要因または人為的活動からの影響のいずれの場合も）。洞窟の場合、洞窟の主な特徴の目録を持つことが重要である。目録には洞窟の地図上に位置情報が示されていると便利である。位置情報づけは GIS を使用した技術によって容易に行うことができる。洞窟のモニタリングは、洞窟の周囲のエリアも含むべきである。それは、外部からの影響が洞窟システムのダイナミクスに影響を与える可能性があるためである。

モニタリング対象を優先順位付けした後、適切なモニタリングの指標を選択する必要がある。指標の選定基準は、関連性があり、科学的に信頼性ができ、実施可能であり、測定可能な低影響があり、費用対効果があるかである。法的手続きが発生した場合、指標は関連する環境法によってサポートされる場合がある。モニタリングの指標と方法は、可能な限り訓練を受けたスタッフによって容易に理解および実施できるように選択すべきである。一般的には、1つまたは2つの場所でしか行えないほど複雑で高価な指標よりも、多くの場所で簡単かつ安価に測定できる指標を監視する方が良いであろう。例えば、洞窟内の多くの開いた皿からの蒸発を測定することは、1つの場所での水分不足の問題を把握するための単一の水温計よりも良い情報を提供するかもしれない。

モニタリングには複製、頻度、費用の考慮も必要である。重要な指標を頻繁にモニタリングすることは、多くの指標を時折モニタリングするよりも好ましいである。重要な指標や重要な場所でのモニタリングは、影響を最小限に抑えるための管理の効果を評価するために必要な頻度で行うべきである。ただし、壊れやすい地域での高頻度のモニタリングは、それ自体が影響を生成する可能性があるため、必要がない限り避けるべきである。可能であれば、自動モニタリングが優先されたい。各指標のモニタリングのためのプロトコルを開発することが望ましい。

Some Best Practices in Monitoring モニタリングにおけるいくつかのベストプラクティス

Water quality and quantity 水質と水量

カルスト地域では、水質と水量のモニタリング場所として、水を供給する流入口、ドリーネ（入力地点）および泉や井戸（出力地点）を使用することが好ましい。資源が許す限り、連続的なモニタリングとイベントベースのモニタリングを行うべきである。比較的安価なデータロガーが市販されており、水深（定量曲線が確立できれば流量に変換可能）、温度、溶存酸素、電気伝導度（全溶存固形物の代理）、濁度（浮遊固形物の代理）などの主要なパラメータを連続的に測定できる。一方、栄養分、金属、炭化水素、有機汚染物質、細菌などの他のパラメータは、一般的に専門の実験室が必要で測定が高額であるため、イベントベースのモニタリングに適している。水流の少ない時期にこれらのパラメータが最も高くなり、水生生物への脅威を呈することがあるが、ほとんどの汚濁物質と土砂が流入するのは暴風雨や洪水時である。洞窟の流水や地表水の状態のより一般的な評価は、汚染に対する耐性が低い感受性の高い種の数などの水質の生物学的指標によって得ることができる。これには、水生昆虫（昆虫、蠕虫、巻貝、甲殻類）や特定の魚の種などが含まれる。

Vegetation condition 植生状態

固有の植生の状態を維持し向上させることは、しばしばカルスト保護区域の優先事項である。植生状態のモニタリングは、管理目標に向けた進捗状況を追跡するために必要である。植生状態のモニタリングには、現地評価法とリモートセンシング法の 2 つの主要なアプローチがある。森林測定や炭素会計のための現地法は、多くの場所で容易に利用でき、地元のレンジャーや土地所有者にトレーニングを施すことができる。リモートセンシングは、広範な範囲での自動化された繰り返し可能な方法を提供するという利点から、植生状態のモニタリングにますます利用されている。これは植生状態の変化を検出するのに適している。植物生態学からのさまざまなメトリクスは、Normalised Difference Red Edge（NDRE: 正規化された赤外線エッジ）指数などのリモートセンシングによる代理測定を提供する。これは光合成活性の指標を提供する。また、常緑被覆を用いた灌木の侵入も推定できる。

Cave atmosphere 洞窟の空気

観光客向けの洞窟における気候と空気の監視は、多くの場合、電子センサーとデータロガーを備えた自動気象モニタリングステーションを使用して行われる。モニタリングステーションは、主要な場所や感度の高い場所に配置すべきである。測定すべき指標には、気圧、温度、湿度、二酸化炭素、空気流量、蒸発量などが含まれる。ラドン濃度の測定は、観光客の洞窟の健康と安全対策の一環として一般に義務付けられている。これらの測定の目的は、大気の状態を可能な限り自然のベースライン値に近づけること、または訪問後に状態をベースライン値に迅速に回復できるようにすることである。

Cave fauna 洞窟の動物相

重要な洞窟動物、特に希少種または固有種が存在する場合、その存在と豊富さをモニタリングする必要がある。モニタリングの指標となる種は、真洞窟性生物または地下水生生物である可能性があり、これらは多くの場合固有種であり、おそらく最も脆弱である。しかし、コウモリ、ハリオツバメ、カマドウマなどのような「キーストーン」種も、他の生物が依存する食物を洞窟にもたらす重要な役割を果たすため、指標種として考慮すべきである。理想的には、指標種として選ばれるキーストーン種は、洞窟内で豊富で広く分布しているべきである。一部の真洞窟性生物、例えばトビムシは、洞窟システム内の栄養バランスの指標として役立つ場合がある。

Speleothems and sediments 鍾乳石と堆積物

洞窟内の鍾乳石や堆積物は、天然洞窟では訪問者によって直接影響を受けることが多く、観光洞では照明植生の成長の影響を受ける可能性がある。フォトモニタリングは、鍾乳石の状態を記録し、影響を明らかにする効果的な方法である。特に科学的または美的な価値があるか、洞窟のトレイルに近いなど、特定の鍾乳石や堆積物をフォトモニタリングの対象に選ぶべきである。フォトモニタリングは、特定の鍾乳石や堆積物を一定の位置から一定のカメラとライトの設定で撮影することを含む。これにより、写真を正確に複製し、時間の経過とともに訪れ者の影響を評価できる。写真によるモニタリングは、訪問者数とその潜在的な影響に応じた頻度で実施する必要がある。多くの観光洞では、1年の監視間隔が適切である可能性がある。レーザースキャン(LIDAR)などの新しい技術は、モニタリングでの使用が期待されている。LIDARは、洞窟の詳細な三次元イメージを作成し、これを基準にして鍾乳石や堆積物の変化、および洞窟環境のその他の人為的な変化を検出するのに使用できる。航空機搭載 LIDAR を使用して、同じアプローチを地表にも適用できる。

Climate change and extreme events 気候変動と極端な現象

気候変動の影響はすでに明らかであり、多くのカルスト地域に深刻なものとなるでしょう。洪水、干ばつ、山火事などの極端な現象の発生とその性質の増加は、最も困難な気候変動傾向を示している。気温、降水量、淡水温度、河川と湧水による水の流量、湖の水位、地下水の高さなど、気象および水文学的パラメータのモニタリングは、気候変動の検出と対応のための優先事項である。気温の段階的かつ長期的な上昇と極端な温度現象(熱波)は、洞窟環境では一般に遅れて減衰する。対照的に、カルスト水文システムでは、洪水や干ばつなどの極端な水文現象の影響が地表から地下(洞窟)環境に急速に伝わる。これらのパラメータのモニタリングは、洪水や山火事などの極端な事象の早期警告システムの開発の基盤パラメータさらに、気候変動の生物学および生態学的指標が特定される可能性がある。例としては、植物の発芽や開花などの季節現象のタイミングの変化や、鳥やコウモリなどの動物種の移動のタイミングや範囲の変化などが挙げられる。

Mitigation 緩和

モニタリングにより主要な洞窟やカルスト資源への脅威や影響が明らかになった場合は、さらなる被害を軽減するために管理措置を講じる必要がある。人為的な訪問による脅威や影響に対処するためには、ゾーニングを用いて敏感なエリアへのアクセスを制限したり、訪問者の数と頻度を減少させたり、天然洞窟を歩く際の優先ルートを示したり、手すりのある歩道を整備したり、ガイドの同行を必要としたりするなどの戦略がある。

洞窟資源に損傷が生じた場合、適切に管理するには、損傷した部分を可能な限り復元する必要がある。洞窟の通路や鍾乳石の修復、落書き、糸くず、ほこり、照明植生の除去にはさまざまな方法がある(観光洞を参照)。

しばしば採石などの地表活動は地下への影響に繋がる。採石後の地表カルストの修復には費用と時間がかかる場合がある。主な再生の課題には、地下の排水の完全性、水質、洞窟の生態系の回復が含まれる。第2の目的は、効果的な涵養のために採石場内で高度に相互接続された二次間隙率を維持し、元のカルスト排水とその植生被覆を可能な限りシミュレートすることである。



世界遺産タスマニア原生地域の石灰岩採石場が、20年の歳月を経て修復された。修復作業中、採石場はいくつかの小さな閉鎖排水流域に分割され、それぞれにカルスト地形の陥没または浸透域が焦点となった。各陥没はフィルター構造で保護され、粘土の扇状地域には雨後の土砂移動を制限するための追加の構造物が取り付けられた。これに続いて、ハイドロマルチング(Hydromulching)と注意深い植生再生が行われる予定である。写真：David Gillieson.

カルスト修復の基本原則は次のとおりである。

- 可能な限り自然なシステムとプロセスを維持または復元する。介入が必要な場合、自然のプロセスと調和する自然由来のソリューションは、自然のプロセスを制御または停止しようとするエンジニアリングソリューションよりも環境的に持続可能で効果的である。例えば、河川、小川、泉の自然な流れのレジームを維持または復元することは、カルストシステムにとって重要である。また、カルスト上の土壌や堆積物が圧縮された場合、浸透水の流れと地下水の涵養を復元することが重要である。
- 地表と地下の両方からすべての汚染源を除去する。これには、洞窟やカルスト地域の上流における土地利用と活動の規制、汚染された堆積物の掘削と除去、洞窟からの汚染水や堆積物の洗い流し、微生物や植物を使用した生物修復が含まれる場合がある。これは費用のかかるプロセスであり、多くの場合、環境管理を担当する政府機関が費用の一部を負担しなければなりません。
- 地表の積極的な土壌侵食を制御し、地下のカルストシステムへの堆積物の侵入を防ぐ。これには植生の再生、急斜面の安定化、あるいは等高線堤防の建設が含まれる場合がある。
- 上流地域での地下水の過度な利用（時には農業目的で）を制限する。これは地下河川の流量を減少させ、洞窟内の水生生物に影響を与える可能性があるためである。
- 活発な土壌生態系を促進する。ミミズ、アリ、シロアリなどの無脊椎動物は、有機物質を分解し、地層を生物活性化し、土壌の質感と栄養状態を改善するのに効果的である。
- 安定した植生カバーを確立し、できれば地元の多年生植物を選ぶ。永久植生は土壌侵食の抑制に効果的であり、土壌の生物活性を高め、見た目にも美しいものである。ただし、植生は土壌の二酸化炭素濃度にも影響

を与え、水を使用するため、涵養量が減少することに注意しなければならない。したがって、鍾乳石の成長に不注意による影響が生じる可能性がある。

- 地上と地下の変化をモニタリングする。修復の成功は、カルスト水を定期的にサンプリングすることで評価できる。サンプリングは、豪雨時における堆積物と溶質の転送の増加を考慮に入れるため、イベントベースで行うべきである。
- 問題が発生しない限り、現地を放置する。プロセスが遅い場合、修復に干渉する誘惑が非常に強いである。植生の評価は、十分な確立と成長が起こった少なくとも 2 年後にのみ評価する必要がある。多くのカルスト地域、特に生物学的プロセスが気候によって制限されている地域では、修復の期間は数十年かかる可能性がある。

Guidelines ガイドライン

- (66) モニタリングは、特に保護地域における洞窟やカルスト資源の管理と保護において不可欠なツールである。継続的なモニタリングの結果は、管理の情報源として活用され、影響を軽減するために使用できる。
- (67) モニタリングの取り組みは、自然資源の価値や重要性、脆弱性や脆弱性、実際のまたは予想される脅威や影響の深刻度に基づいて、自然資源に優先順位を付けることで焦点を当てるべきである。
- (68) 下水の汚染はカルスト地帯では特別な問題を引き起こすため、常に最小限に抑え、モニタリングする必要がある。このモニタリングは、単に定期的な間隔ではなくイベントベースで行う必要がある。溶質や化学汚染物質の濃度は通常、低流量期間に最も高くなるが、汚染物質がカルスト系を介して最大量輸送されるのは暴風雨や洪水のときである。
- (69) 重要な場合を除き、脆弱な地域での高頻度のモニタリングは避けるべきである。実現可能な場合は、自動モニタリングを優先すべきである。
- (70) 多くのカルスト特性、特に洞窟内部のものが再生不可能であることを認識しつつも、良い管理は可能な範囲で損傷した特性を復元することを求める。
- (71) カルスト地域においては、できるだけ自然なシステムとプロセスを維持または復元すべきである。介入が必要な場合、自然プロセスと調和する自然由来の解決策の使用が優先される。これらの解決策は、技術的な方法よりも環境に優しく、持続可能性が高い。

Management planning for karst protected areas カルスト保護地域の管理計画

管理計画の策定は保護区の管理における重要な取り組みであり、理想的な状態を定義しそれを達成するのに役立つ。また、保護区の財政的、人的、その他のリソースが、優先的な管理課題に対処する際に活用されることを確認する。管理計画の策定は、保護地域とその近隣地域に責任と利益を持つさまざまな政府機関や利害関係者を巻き込むことで、計画と能力構築のプロセスにおける重要なマイルストーンとなる。管理計画は、保護区の主な特徴や価値を特定し、達成すべき管理目的を明確にし、保護区の保全価値が守られるように実施されるべき行動を示す簡潔な文書であるべきである。

カルスト地域の保護区の管理が適切かつ効果的に行われるためには、他の景観タイプや生態系と比較して、カルストの特殊な性質を考慮に入れる必要がある。これについては、「カルスト環境と洞窟システムの特异性」で詳しく説明されており、以下にいくつかの重要なポイントが述べられている。

- カルストの健全性は、自然の水文学システムの維持に強く依存している。したがって、カルストの景観には総合的な集水域管理が必要不可欠である。すべてのカルスト地域の管理における重要な問題は、異地起源の水流の水質管理である。ポイント涵養を提供するドリネまたは割れ目のある地域の保護と、カルストに流入する異地起源の水流の水質管理である。水文地質図はカルスト保護地域管理にとって貴重なツールであり、管理と保護にとって重要な集水域を強調表示する。
- カルスト生態系は脆弱である。地表環境条件は極端になる場合があり（乾燥、石灰質）、表層が異地起源の堆積物で覆われていない場合、土壌は通常浅く、岩が多く、容易に侵食される。地下生態系は特に繊細であり、生存には主として、水を通じて地表から伝わるエネルギーフローに依存する。このとき、水質は極めて重要である。
- カルストは地表と地下の両方の特徴と価値を含み、地表と地下の物理的および生物学的プロセスを統合しているため、著しく複雑である。カルスト生態系は高度な相互接続性を持っているため、カルスト生態系の一つの要素に対する直接的な影響は、他の要素やカルスト生態系全体に対して間接的に深刻な影響を与える可能性がある。したがって、カルスト地域の自然資源と生物多様性を保護するためには、総合的なアプローチが必要である。

ほとんどの管理計画の手法は、プロセスを構造化し、論理的なアプローチを提供する一連の手順を通じて進められる。保護の程度や必要な管理の度合いは、保護区の種類ごとに異なるため、管理計画の構造はさまざまなニーズに対応できるように柔軟である必要がある。例えば、私有地の保護区では、外部の関係者を管理計画に関与させない場合や、まったく管理計画を必要としない場合がある。完全な管理計画を作成できない場合は、計画を作成しないよりは、単純で簡略化された文書を作成する方がよいであろう。単純な管理計画は、開発と実施が容易で、迅速で、費用がかからない。詳細や複雑さは、管理計画が時間とともに更新され、より多くのリソースが利用可能になるにつれて徐々に進化するであろう。

Protected area management planning steps (adapted from Thomas and Middleton, 2003)

保護地域管理計画の手順 (Thomas と Middleton, 2003 年から適応)

1. **事前計画フェーズ**- このフェーズでは、計画プロセスの達成目標、実施方法、タイミングや予算について定義し、誰が参加するかを明確にする。専門家や利害関係者、地域コミュニティを含む幅広い視点を取り入れ、保護区の将来の管理について議論するために、異なる専門分野の人々が協力することが推奨される。
2. **データ収集、背景調査、初期の現地調査**- 計画と管理は信頼できるデータに基づいて行われるべきである。最初に既存のおよび背景情報を収集する。歴史的データや地域の知識は非常に有用である場合がある。次に、必要に応じてフィールドインベントリーや調査、研究を行い、既存の情報を確認し、必要な追加情報を取得する。収集した情報は、保護区の説明として文書化する。

カルスト保護区の場合、以下のセクションで収集すべき情報に関するガイダンスが提供されている：[カルストと洞窟の一部の価値](#)、[カルスト環境と洞窟システムの特异性](#)、[レクリエーションとアドベンチャーケイビング](#)、[科学的研究](#)、[農林業](#)、[水供給](#)、および[カルスト管理における先住民の関与](#)。

3. **収集した情報の評価**－このステップでは、保護地域の重要性を維持するために保護および保存する必要がある主要な特徴と例外的な価値を特定する。計画プロセスに地元住民やその他の利害関係者を含めることがますます重視されるようになってきているため、彼らがその地域に対して保持している自然、文化、社会経済的価値を特定し説明できるメカニズムを用意することが重要である。「重要性の表明」の作成は、社会に対する保護地域の重要性を説明し、保護地域を地域、国家、国際レベルの文脈の中に位置づける。主要な特徴、例外的な価値、および重要性の記述は、管理計画の基礎となる重要な枠組みを提供する。

カルスト保護地域については、主な特徴と例外的な価値を特定するためのガイダンスが次のセクションで提供される：[カルストと洞窟のいくつかの価値](#)、[カルスト環境と洞窟システムの特殊な性質](#)、[レクリエーションと冒険の洞窟探検](#)、[科学研究](#)、[農業と林業](#)、[水の供給とカルスト管理への先住民族の関与](#)。

4. **制約事項、脅威、および機会の特定**-保護区の具体的な管理目標を定義する前に、その管理に対する制約事項や、その価値に対する主な脅威を特定する必要がある。制約の中には、カルスト生態系の脆弱で脆弱な性質など、自然環境に依存するものもある。保護地域に対する脅威は、人為的または自然によるものであり、保護地域内から発生する場合も、保護地域の境界を越えて発生する場合もある。保護地域の前向きな変化、修復、修復の機会も特定されるべきである。

カルスト保護区の場合、制約事項、脅威、および機会を特定するためのガイダンスは、以下の章で提供されている：[カルストと洞窟の一部の価値](#)、[カルスト環境と洞窟システムの特別な性質](#)、[レクリエーションとアドベンチャー・ケイビング](#)、[科学的研究](#)、[農林業](#)、[水供給](#)、[および効果的なモニタリングと緩和の開発](#)。

5. **管理のビジョンと目標の策定**－管理計画のプロセスでは、将来の保護地域の理想的な状態、状態、または外観を説明するビジョンステートメントを開発し、明確にする必要がある。目標は、経営ビジョンに続き、経営が達成すべき条件を示す、より具体的な意思表示である。目標は、保護地域の主要な特徴、保護地域の保全方法を定義すること、および共同管理の取り決め、訓練、保護意識などのガバナンスと管理の他の重要な分野に関連するものである必要がある。

カルスト保護区の場合、管理ビジョンと目的に関するガイダンスは、以下の章で提供されている：[カルストと洞窟の一部の価値](#)、[カルスト環境と洞窟システムの特別な性質](#)、[カルスト地域の管理の尺度](#)、[レクリエーションとアドベンチャー・ケイビング](#)、[ショーケイブ](#)、[農林業](#)、[水供給](#)、[効果的なモニタリングと緩和の開発](#)、[およびカルスト管理における先住民の参加](#)。

6. **管理オプションの特定と評価（ゾーニングを含む）**-管理目的が設定されたら、次はそれらの目的をどのように達成するかを考える段階である。通常、これはいくつかの方法で行うことができるため、管理行動のオプションの範囲を特定し、適切なものを選ぶべきである。ゾーニングは、管理目的を達成するために広く使用されるツールである。ゾーンは、保護区の目的を最も効果的に達成するためのさまざまな戦略を採用するエリアを識別する。ゾーニングは、流れ込み、洞窟、泉などの重要な生息地やサイトを保護するために使用できる。カルスト保護区内の洞窟を保護と利用の異なるレベルに分類することは、効果的なゾーニングの一形態である。

カルスト保護区の場合、管理オプションに関するガイダンスは、以下の章で提供されている：[カルストと洞窟の一部の価値](#)、[カルスト環境と洞窟システムの特別な性質](#)、[カルスト地域の管理の尺度](#)、[レクリエーションとアドベンチャーケイビング](#)、[ショーケイブ](#)、[農林業](#)、[水供給](#)、[効果的なモニタリングと緩和の開発](#)、[およびカルスト管理における先住民の参加](#)。

7. **管理計画草案の作成**－上記の計画要素すべてを 1 つの文書に統合すると、管理計画草案が作成される。管理計画には標準化された形式はないが、特定の標準的な要素が含まれる傾向がある。それらは、保護地域の紹

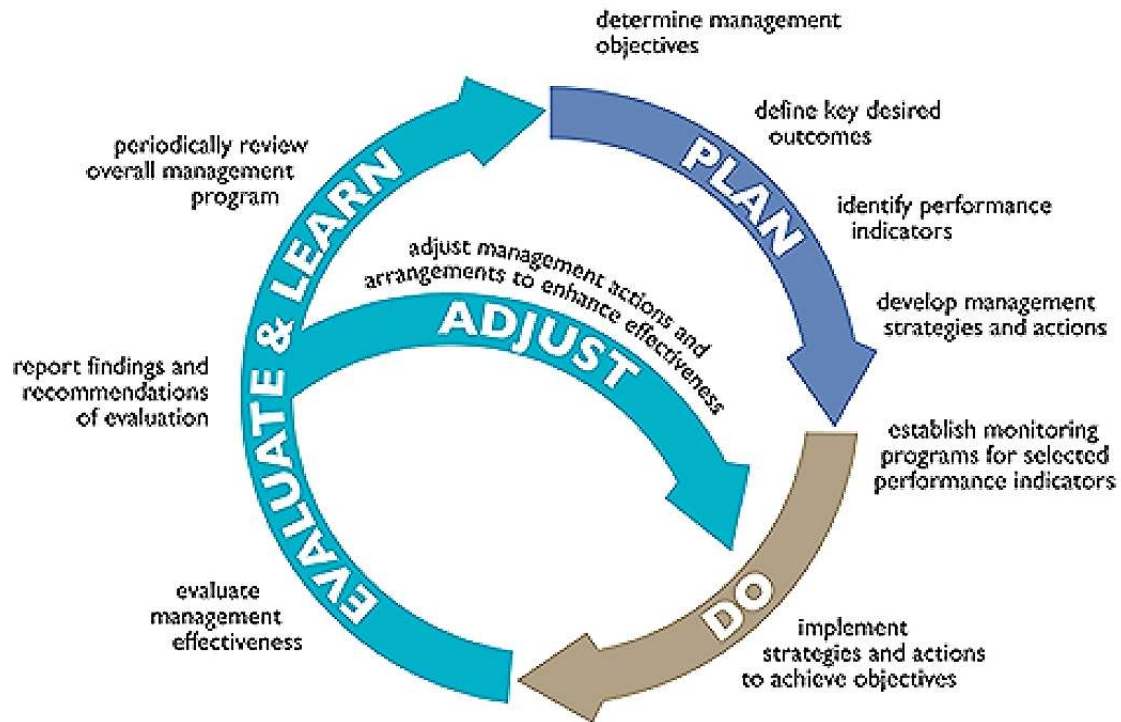
介とその重要性とそれに影響を与える要因の議論から始まり、読者をその将来の管理ビジョンの策定に導き、最後にこのビジョンをどのように達成するか、管理者がどのように行うかを概説する管理活動で終わる。他の人は、その寿命の終わりに向けて計画の有効性を評価する。

保護区のマネジメント計画の基本的なフォーマットは、次の章で提供されている：[マネジメント計画の基本的な要素](#)。

8. **管理計画草案に関する公開協議** – 利害関係者および一般の人々が管理計画草案を検討し、コメントを提供する機会は、管理計画プロセスにおいて重要なステップである。これには地域コミュニティ、地方政府関係者、NGO の代表、商業的な利害関係者、利用者グループ、関心を持つ個人、そして保護区のスタッフなどが含まれる。これらのグループは、計画プロセスに関与する機会があれば、当事者意識を持ち、管理目標と行動に対してより積極的に取り組むようになる。参加レベルは、情報提供とフィードバックの提供から、保護区の共同管理に積極的に関与するまで、さまざまなグループ間で異なる場合がある。

カルスト保護区に関する公共コンサルテーションとコミュニティ参加に関するガイダンスは、次の章で提供されている：[先住民のカルスト管理への関与](#)。

9. **草案の修正と最終管理計画の作成** – このステップには、利害関係者や一般の人々から受け取ったコメントを考慮して、管理計画草案を修正することが含まれる。受け取ったすべての書面によるコメント、および公開会議で記録されたコメントは考慮される必要がある。最終計画に付随する協議に関する報告書を作成すると役立つかもしれない。この報告書には、受け取ったコメントがどのように考慮されたか、また一部のコメントが使用されなかった理由が詳しく記載されている。これは、利害関係者や一般の人々が計画の最終版を理解し、含まれる管理措置がどのように選択されたかを理解するのに役立つ。
 10. **管理計画の承認** – 適切な当局による承認を得るための最終計画の提出を含む手続きステップである。手順は国によって異なるが、ほとんどの場合、計画に権限を与えるための正式な採択または承認のプロセスが必要になる。
 11. **管理計画の実施** – 管理計画は、保護地域の目標を達成し、ビジョンを達成するために実施される行動を定める。多くの場合、管理計画は、保護地域の年間運営計画を作成するための基礎となる。協力的な管理システムが導入されている場合、管理計画では、管理活動の実施におけるさまざまな利害関係者の役割と責任を指定する必要がある。
 12. **モニタリングと評価** – 実施が進む中、モニタリングとレビューはマネジメントにフィードバックを提供する。このステップの目的は、1) 管理計画が効果的に実施され、目標が達成されているかどうかを確認すること、2) 管理の影響の観察から学ぶこと、および 3) 管理アクションをそれに応じて適応させることである。実装で問題が発生した場合は、モニタリングとレビューを使用してリソースを再配置し、実装を改善する取り組みを行うことができる。
- カルスト保護区域に関するモニタリングとレビューのガイダンスは、「[効果的なモニタリングと緩和の開発](#)」に提供されている。
13. **管理計画の見直しと更新の決定** – 管理計画は少なくとも 10 年ごとに更新することが推奨される。多くの場合、管理計画は法律によって期限が定められており、通常は 5 年または 10 年である。理想的には、管理計画を更新する決定は、古い計画の有効期限が切れる前に新しい計画を導入できるように十分な時間をもって行われる。



オーストラリアのタスマニア大自然世界遺産で使用される管理プロセスの概略図。

Basic elements of a management plan 経営計画の基本要素

エグゼクティブサマリー – この部分はマネジメントプランの重要な要素を要約し、詳細な内容を読まずにすばやく理解できるようにする。全文を読む時間がない高位の管理者にとって役立つ。

導入 – この部分では、計画の目的と範囲、保護区域が指定された根拠、現在の状態、および計画の開発権限が述べられる。保護区域の場所、サイズ、主な資源や価値など、基本的な要約情報が含まれる場合もある。

保護区域の概要 – これは保護区域内外のリソースについての関連する記述情報を要約する。以下が含まれる：

- 歴史的情報 - サイトやその以前の利用および管理についての情報。
- 生物学的情報 - 群落、生息地、植物、動物。
- 物理的情報 - 気候、水文学、地質学、地形学、土壌。
- 文化的および美的情報 - 風景の特徴、考古学、文化的な関連。
- 社会経済的情報 - 地域社会の人口統計および保護区域内の自然資源の現在の利用。

保護地域の評価 – 保護地域の重要な特徴および顕著な価値を特定し、それらを保護・維持することによって保護区の重要性を維持する必要がある：

- 自然、文化、科学、レクリエーションの価値の優れた例。これには、重要な洞窟やその他の岩灰岩の特徴が含まれる。
- 地表と地下の両方の希少な固有の動植物。
- 地表と地下の両方の考古学的、歴史的、文化的遺跡。

- 経済的にも文化的にも地域社会にとって不可欠な地域と資源。
- 保護地域の流入口、湧水、集水域など、保護地域全体の完全性を保護するために不可欠な地域。

制約、脅威、機会の分析 – 保護地域とその保全と管理に影響を与える制約、脅威、機会の分析。地域の主要な特徴や価値に対する現在のまたは過去の影響は、他の管理上の考慮事項とともに記載する必要がある。

- 制約 – 保護地域の境界より上流の集水域の管理など。
- 脅威 – 希少または固有の動植物の違法な狩猟や収集、鍾乳石や洞窟鉱物の破壊や盗難、考古学的または文化的遺跡の略奪や妨害、気候変動や洪水や山火事などの極端な現象による影響など。
- 機会 – 汚染源の除去、劣化した生息地や自然現象の修復など。

ビジョンと目標 – 将来の保護地域の理想的な状態や状態を説明するビジョンステートメントの明確化。これに一連の目標が続く。これは、計画の期間内に経営陣が達成すべき内容を概説する具体的な記述である。目標は、保護地域の主要な特徴、保護地域の保全方法を定義すること、および共同管理の取り決め、訓練、保護意識などのガバナンスと管理の他の重要な分野に関連するものである必要がある。

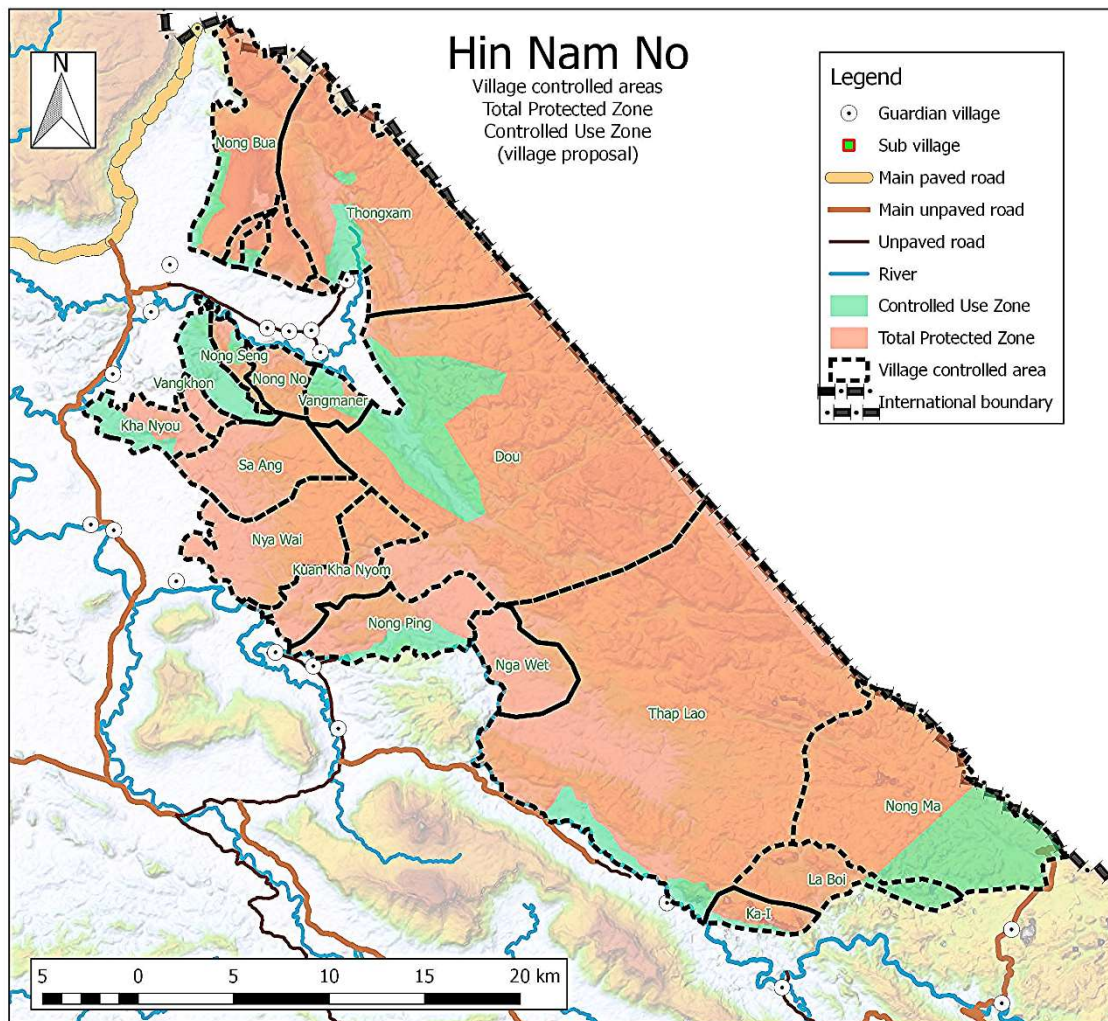
ゾーニング計画 – 地図を使用して境界、分類、および管理を示し、各ゾーンで許可または禁止される活動を示すゾーニング計画を準備できる。多くの保護区には、自然保護のための完全保護ゾーン、洞窟や景勝地などの主要な観光スポットの訪問者利用ゾーン、そして地元コミュニティによる自然資源の持続可能な収穫のための管理された使用ゾーンがある。ゾーニングは、流入口、洞窟、泉などの重要な生息地やサイトを保護し、劣化した地域の回復と修復のために使用できる。カルスト保護区内の洞窟を異なる保護レベルと利用のために分類することは、効果的なゾーニングの形態を示す。ゾーニングは洞窟内でも使用でき、リソースの脆弱性や危険性に応じて、異なる通路に異なる保護レベルとアクセスが設定される。

管理アクション – 目的を達成するために実施される具体的な活動で、優先活動が識別され、さまざまな利害関係者の役割と責任が明記される。詳細は、別の年間運用計画で提供される場合がある。観光洞やアドベンチャーケープなどの一部の活動や場所、または気候変動とその影響を管理するために、別個の管理計画が策定される場合がある。これらの支援計画は、この例と同じ基本要素を持っている場合がある。管理アクションには次のものが含まれる：

- 生物多様性と地質多様性の管理。
- 集水域の管理。
- 文化的管理。
- 劣化したリソースの復元。
- 訪問者の管理および関連するインフラ。
- 保護意識の向上と学校への啓発活動。
- モニタリング
- 科学的研究。
- 洞窟の探検と調査。
- パトロールと法執行。

- 早期警戒システム、災害対応および救助。
- 村の生計の発展。
- トレーニングと管理。

モニタリングとレビュー – このセクションでは、管理計画の実施がどのようにモニタリングされるか、および計画のレビューがいつ、どのように実行されるかを概説する。それには、保護地域のパフォーマンスを測定するための指標を含める必要がある。モニタリングの取り組みは、その価値や重要性、脆弱性や傷つきやすさ、実際のまたは予想される脅威や影響の程度に基づいて、優先順位を付け、重点を置く必要がある。



ラオス、Hin Nam No 国立公園、カルスト地形における管理目的のゾーニング。地図：Ronny Dobbelsteijn

Involvement of Indigenous peoples in karst management 先住民のカルスト管理への関与

歴史的に、国家機関によって設立および管理される保護地域は、世界のカルスト資源を保護するための主要なメカニズムでした。しかし、これまでの経験から、保護区内やその近くに住む人々と、保護区の管理を任されている機関との間に紛争が生じるのが一般的であることが分かっている。保護区域内の土地のほとんどまたはすべてが国や公共機関の所有である場合、土地利用に対するより高い程度の制御が可能だが、土地が私有されている場合は、これがより

難しい場合がある。先進国では、地元で選出された管理委員会の代表者や、議論の多い問題に関する地元の協議などを通じて、地域コミュニティが意思決定プロセスに関与するのが一般的である。この点において、カルストや洞窟を含む保護地域と他の価値のために保護されている地域の間にはほとんど違いはない。ただし、21世紀に入ってから、先住民が多数居住している地域の管理に対する懸念が増えている。

世界遺産管理における先住民の関与は、ますます優先度を増している。2005年以来、ユネスコ世界遺産運営ガイドライン(第40項)は「推薦、管理、モニタリングに対するパートナーシップのアプローチ」を推進してきた。これらのガイドラインは2017年に改訂・拡大され、世界遺産管理への先住民族の積極的な関与は不可欠であり、ベストプラクティスの管理につながると考えられている。2015年、世界遺産委員会は「世界遺産に関する先住民族国際フォーラム」を設立した。このフォーラムの目的は、「世界遺産物件の特定、保全、管理」における先住民コミュニティの役割を高めることであり、毎年、世界遺産委員会の会合に合わせて開催されている。2018年、ユネスコは先住民族との関わりに関する政策201EX/6を承認した。この重要な文書には、自然遺産と文化遺産の保護における先住民族の役割が含まれており、世界遺産だけでなく、ユネスコが支援するすべての活動に適用される。したがって、管理計画では、先住民族が使用する伝統的または地方の統治システムを考慮する必要がある。何世紀にもわたって存続してきた慣習法に基づく既存の土地所有権が存在する可能性がある。これは国家政府によって正式に認められていない、あるいは望まれていないかもしれないが、それでもこれを明確に念頭に置いて管理する義務がある。

本章では、カルスト地形における保護地域管理について、当初から先住民族を計画と管理に関与させた4つの事例を紹介する。そこから多くのことが学べたが、関係が発展し成熟するにつれて、まだ学ばなければならないことがたくさんある。

Hin Nam No National Park – Laos: Collaborative governance in action

ヒン・ナム・ノー国立公園 - ラオス：協調的ガバナンスの実践

ヒンナムノー(Hin Nam No)は、ラオス中部に位置するカルスト地形保護地域で、世界自然遺産への推薦が準備されている。この地域には多角形のカルストが含まれており、総面積は94,000 haである。世界最大の河川洞窟、セバンファイ(Xe Bang Fai)はこの地域の重要な特徴であり、冒険旅行者の訪問が増えている。しかし、財政的および人的資源が限られているため、保護地域を効果的に管理および監視するための能力と情報が不足している。ヒン・ナム・ノーでは共同管理(Co-Management)システムが確立され、地域コミュニティが積極的な役割を果たし、彼らが依存する自然資源の管理により多くの権限と責任を持つようになった。このように、ヒン・ナム・ノーとその周辺では、生物多様性と地質学的多様性の保全、そして貧困の緩和という目標が共有されている。

ヒン・ナム・ノーを取り囲む18の「保護村」は、7つの民族からなる約8,000人の人々で構成されている。共同管理を成功させるためには、保護村と政府機関の双方が、保護と保全のために適切かつ明確に定義された役割と責任を担う必要がある。

ヒン・ナム・ノー国立公園における共同統治モデルの5つの「ビルディング・ブロック」が特定され、実施された：

1. 参加型協議によるガバナンス評価 - 村、地区、および県のレベルでガバナンスのベースライン評価が実施された。その目的は、ヒン・ナム・ノー国立公園のガバナンスと管理の現状を文書化することでした。その後、評価の結果は必要な介入の合意につながり、ヒン・ナム・ノー共同管理計画の一部となった。



2. 洞窟ツアーに使われるインフレーターボートと村のガイドたち（ラオス、Hin Nam No 国立公園）。写真：Terry Bolger.
3. 共同管理・ガバナンス体制の確立 -共同管理体制を確立するための法的・政策的基盤（国レベル）が必要である。ヒン・ナム・ノー協力管理委員会が設立された。委員会の主な利害関係者および権利所有者は、保護者の村（慣習的権利を持つ）および保護地域管理当局であり、法執行機関、農業、ツーリズムなどの関連（地区）政府機関からの二次的な利害関係者が含まれる。
4. 伝統的知識と慣習的権利に基づく参加型土地区画整理 -ヒン・ナム・ノー国立公園は、使用済みの小道と村の慣習的権利に基づいて、各保護村がパトロールするための区域に区画整理された。また、地域は、伝統的にこの目的で使用されてきた地域に基づいて、保護村による自然資源の持続可能な収穫のための使用管理区域 (CUZ)としても区画された。CUZ は、ヒン・ナム・ノー国立公園の面積の 14%を占める。ヒンナムノー国立公園の残りの 86%は、自然保護のための完全保護区に指定されている。
5. 共同管理協定 -ヒン・ナム・ノーの共同管理委員会と各保護村の間で結ばれた共同管理協定は、CUZ の自然資源の利用ルールを定めるもので、パトロール、法執行、ツーリズムに関する利益分配の取り決めも含まれる。
6. 保護区の管理活動に地元の村人を参加させる。18 の保護村から約 120 人の村レンジャーが、ヒン・ナム・ノー国立公園のスタッフとともに保護区に定期的に出向き、野生生物の目撃情報や脅威を記録したり、法執行のためのパトロールに参加したりする。村のレンジャーたちは、ヒン・ナム・ノー国立公園での探検や調査活動を支援しており、カルスト地形や洞窟、森林、小道に関する彼らの地元の知識は非常に貴重なものだ。ツーリズム活動を行う保護村のいくつかには、約 35 人の村のエコ・ツーリズムガイドがいる。彼らは、セバンファイ (Xe Bang Fai) 洞窟や他のいくつかの洞窟へのツアーをガイドし、ヒン・ナム・ノー国立公園の壮大なカルスト地形での散策を案内している。



ラオス、Hin Nam No 国立公園の保護区スタッフと村のガイド。写真：Terry Bolger.

このビルディングブロック 3、4、5（上記）は、共同統治システムの特に強力な構成要素であり、伝統的な慣習的アプローチを損ない、不注意にも紛争を引き起こすような新しい管理システムを構築するのではなく、既存の伝統的な資源管理システムの上に構築するものである。この慣習的な管理システムとの均質性により、村の参加が促進される。これは、政府の能力と予算が低い地域では不可欠である。

2014 年にヒン・ナム・ノー国立公園の共同管理が開始されて以来、管理効果には 16%の改善が見られ、技術的能力と管理スキルに大きな改善が見られた。この共同管理システムを維持し、ヒン・ナム・ノー国立公園のカルスト地形資源を保護・保全するためには、能力向上、管理計画の実施、順応的管理、持続可能な資金調達に関するさらなる取り組みが必要である。

Haida Gwaii, British Columbia, Canada – Haida people: six ethical principles カナダ、ブリティッシュコロロンビア州ハイダ・グワイ - ハイダ族：6つの倫理原則

林業は、ブリティッシュコロロンビア州(BC)のカルスト地帯で最も広く行われている土地利用活動の 1 つであり、カルストに対する理解の向上が引き続き必要とされている理由の一例である。洞窟は 1990 年代後半まで森林地帯の石灰岩地域の保護の主要な焦点であったが、BC 森林省が石灰岩管理に対するよりシステムベースのアプローチを初めて発表したことで、これが変化した。カルスト上またはその近くで行われる土地利用または資源開発活動には、カルスト系への環境への影響、カルスト帯水層とその集水域への影響、およびカルスト関連の地盤災害の可能性を考慮する必要があることが現在では広く受け入れられている。



ラオス、Phou Pha Marn 保護区にあるカルスト地形周回路の一部である遊歩道と吊り橋を歩く観光客。写真：Terry Bolger.

革新的なプロジェクトがハイダグワイの伝統的な所有者と協力した。グワイハーナス国立公園のあるこれらの大陸の島々は、バンクーバー島の北、ブリティッシュコロンビア州の北西海岸沖に位置している。島々には非常に広範な針葉樹林カルストがあり、重要な科学のおよび文化的価値を持つ洞窟がある。森林活動はカルストと洞窟資源の完全性に影響を与えて行われている。ハイダグワイ族は太古の昔からこれらの海上の土地を占領し、州および国レベルで政府機関と協力関係を築いてきた。ハイダ・グワイ長老評議会によって策定された、明確に明示された土地利用ビジョンがある。これはカルスト地域だけでなく、海洋領域を含むハイダ・グワイ全体に当てはまる。

このビジョンの土台となっている6つのハイダの倫理と価値観を、ハイダ語の後に英語で以下に示す：

1. *Yahguudang* または *Yakgudang* – 「敬意」。お互いとすべての生き物に対する敬意は、私たちの文化に根付いている。私たちは必要なものだけを受け取り、感謝し、それにふさわしい行動をする人たちを認める。
2. *Giid til'juus* – 「世界はナイフの刃のように鋭い」。自然界との相互作用にはバランスが必要である。何をするにも注意を払わないと、簡単に引き返せない地点に達してしまえる。私たちの実践と他者の実践は持続可能でなければなりません。
3. *Gina waadluxan gud ad kwaagiida* – 「すべては他のすべてに依存する。」この原則は、管理への統合アプローチに相当する。
4. *Isda ad diigii isda* – 「与えることと受け取ること」。贈与と受領（互惠性）は私たちの文化において尊重される習慣であり、私たち同士や自然界との相互作用に不可欠である。私たちは自然界から与えられる贈り物に感謝し続ける。

5. *Gina k'aadang.nga gii uu tl' k'anguudang*–「賢明な助言を求めて」私たちの長老たちは、伝統的な方法と調和して働く方法について私たちに教えてくれる。森のように、私たちの人々のルーツは絡み合っている。私たちは文化、価値観、法律に沿った新しいアイデアや情報を一緒に検討する。
6. *'Laa guu ga kanhlins* –「責任」。私たちは、先祖から受け継いだ、海と土地を管理し、大切にすることを責任を受け入れる。私たちの遺産が未来の世代に受け継がれるようにする。

これら 6 つの倫理原則と価値観は、ハイダのエコシステムベースの管理の実際の定義に具体化されている。

「尊重は生態系に基づく管理の基本である。陸、海、空気、そして人間社会を含むすべての生物は相互に関連しており、私たちにバランスと調和を維持し、回復させる責任があることを認めるものである。」「尊重は生態系に基づく管理の基礎である。陸、海、空気、そして人間社会を含むすべての生物は相互につながり合っており、私たちにバランスと調和を維持し回復する責任があることを認識する。

グワイ・ハナス・ジーナ「ワアドルキサン・キルグルガ土地・海・人管理計画」、2018 年。

以下の表に概要が示されているように、これらのハイダグワイの原則と科学的管理のベストプラクティスの間には共鳴関係がある。

生態系に基づく管理のためのハイダと科学的原則の比較。ハイダ民族評議会、2007 年より。ハイダの土地利用ビジョン-Haida Gwaii yah'guudang (ハイダグワイを尊重する)。

ハイダの原理	パラレル科学原理	可能なアプリケーション
尊敬	予防的アプローチ	あらゆる種の幸福を考慮する。混獲などの無駄な漁業行為を防止する。
バランス	長期にわたる持続可能な利用	持続可能な漁業を確保し、生態学的・社会経済的情報を考慮する。
相互関連性（すべてが他のすべてに依存している）	統合マネジメント	土地利用計画の決定へのリンク。海洋活動の両立性と開発の累積的影響を考慮する。
授受（互惠性）	公平な分配	計画を立てる際には、すべての生き物が本来持つ価値を理解するべきである。限られた資源を共有するための公正かつ公平なアプローチを開発する。
賢明な助言を求める	適応的な管理 最適な情報	伝統的な知識を活用し、調査、教育、モニタリングを通じて理解を深める。
責任	包括的かつ参加型	ハイダの称号と権利を尊重し、十分な執行能力を確保する。

Gunung Mulu WHA, Sarawak - Penan and Berawan peoples: awareness through education and training
サラワク州グヌン・ムル WHA - ペナンとベラワンの人々：教育と訓練を通じた意識向上



Mulu の Deer ケイブの上流入口にいる地元のパーク・レンジャー。写真：John Gunn.

サラワク北部のグヌン・ムル(Gunung Mulu)カルストには、東南アジアで最も長い洞窟がいくつかある。ムル(Mulu)は、沿岸都市 Miri の東約 100km に位置する。ムルの小さな町へは、毎日航空便でアクセスできるほか、Baram 川と Tutoh 川を遡るボートでもアクセスできる。グヌン・ムル国立公園の面積は 90,000 ha で、ほとんどの訪問者は町に隣接する公園本部からアクセスできる最南端のカルスト地帯に集中している。公園の 90%以上が未訪問のままで、自然のままの状態である。グヌン・ムル国立公園は 1978 年に王立地理学会の遠征の対象となり、その後同協会は 1982 年にこの公園の管理計画を作成した。その後、1992 年から 1995 年を対象とした新たな管理計画が策定され、その後の評価によって世界遺産に推薦された。公園は 2000 年 11 月に世界遺産に登録され、その後、東南アジアで最も象徴的な国立公園のひとつとなり、持続可能な開発のモデルとして他の地域でも模範とされるようになった。ツーリズム・リゾート会社 Borsarmulu Sdn.Bhd.は、戦略的管理計画を立案し、サラワクとマレーシアの模範的な公園、ショーケースとしてムルを管理、発展させるために政府と正式な契約を結ぶことになった。2001 年以降、ツーリズムへの関心が急速に高まり、国際的なツーリズムの注目も高まった。グヌン・ムル NP のスローガンにあるように、「重要性を真に理解する」ために、ムルの知識を訪問者に伝える責任が生じた。

世界遺産の地位を維持するための重要な要件の 1 つは、科学的に正確な情報を訪問者に提供し、研究を促進する必要があることである。これに加えて、地元コミュニティに力を与え、この遠隔地に重要な雇用の機会を提供する必要がある。世界遺産の原則と管理計画によれば、地元の人々はガイドや通訳として訓練されるべきである。地元の人々は既に森林に対する感覚と驚異的な技能を持っているが、科学に関する教育の不足と言語の問題が存在している。グヌン・ムル国立公園の管理チームは、新しいガイドの育成と既存のガイドの研修のためのトレーニングプログラムを導入した。このコースは、カルストと洞窟の側面、森林、完全保護区域と関連する法令、生物多様性と地質多様性をカバーするモジュールを提供する。また、顧客の取り扱いや、観光洞とアドベンチャー・セッティングの両方でツアー

を紹介する特別セッションもある。通常、認定された基本的なファーストエイドのコースは、トレーニングの一部である。

グヌン・ムル国立公園は地域社会を必要とし、地域社会は公園を必要としている。この相互の前提に基づけば、ムルは成功例とみなすことができるが、それには絶え間ない努力が必要である。2021年、ムル企業は従業員の97%を現地で雇用した。地域社会を発展させるためのこうした課題は、地元の学校であるバトゥ・ブンガン小学校で幼い頃から取り組まれており、ムルが任命した教育研究連絡責任者は、地元の子どもたちと一緒に働く特権を与えられている。グヌン・ムル NP にとって学校は、さまざまな民族の地元住民が子どもたちという共通の目標を共有する場である。グヌン・ムル国立公園は、これを将来の世代のガイドやその他の公園職員の意識と関心を高めるための非常に実用的な方法であると考えている。

グヌン・ムル国立公園 (Gunung Mulu NP) は、ソフトなものから過激なものまで、ガイド付きで体験することができる。現在、グヌン・ムル国立公園には 70 人の登録ガイドがいる。これらのガイドのうち、直接雇用されているのは 20 人だけである。残りの人数は、代理店やツアーオペレーターのガイド、そしてフリーランスのガイドである。つまり、グヌン・ムル NP で活動するガイドのかなりの部分は、公園の給料をもらっておらず、ボルサムル (Borsarmulu) の管轄下でないことを意味しており、そのため運営が困難になることがよくある。これらのフリーランスのガイドは、追加のガイドトレーニングセッションに参加することができ、時折そうしている。



グヌン・ムル国立公園の Sungei Lansat を案内する地元ガイド。写真：John Gunn.

YUS Conservation Reserve, Papua New Guinea: Sustainable resource utilisation

YUS 保護区、パプアニューギニア：持続可能な資源利用

ヨプノ・ウルワ・ソム保全地域 (YUS CA; Yopno-Uruwa-Som CA) は、パプアニューギニア (PNG) の Morobe の Saruwaged 山脈に位置する。これらの高い山々 (3,500m 以上) には、石灰岩と泥岩の層間に発達した広大なカルスト地帯がある。この地域の Yupna や Nungan で *makna* と呼ばれる洞窟が数多くある。洞窟は儀式的な意味合いを持つだけでなく、一夜の避難所やコウモリ狩りの場所としても使われている。パプアニューギニアの農村地域は、祖先が何世代にもわたってそうであったように、自然資源と肥沃な土壌に依存して、主に自給自足のライフスタイルを送って

いる。しかし、YUS コミュニティのリーダーたちは、重要なリソースが不足しつつあるという、前の世代が経験したことのない憂慮すべき課題に気づいている。

「猟師たちは森で動物を見つけるために、より長い距離を移動しなければならなかった。自分たちの伝統的な土地では、家族を養うのに十分な数の動物を見つけることができなかったからだ。」

Matthew Tombe, Isan village, YUS.

パプアニューギニアの土地の 90%以上が先住民によって所有されているため、YUS の景観を保護するには地元地域の支援が不可欠である。10 年以上にわたり、ツリーカンガルー保護プログラムは村落と協力して、この景観と人々と野生生物が依存する資源を持続的に管理してきた。これを促進するため、Karau Kuna では 50 の村と共同で地域土地利用計画 (LUP) を策定し、人々の福祉と自然保護の優先順位を考慮した資源利用に関する合意を確実にしている。

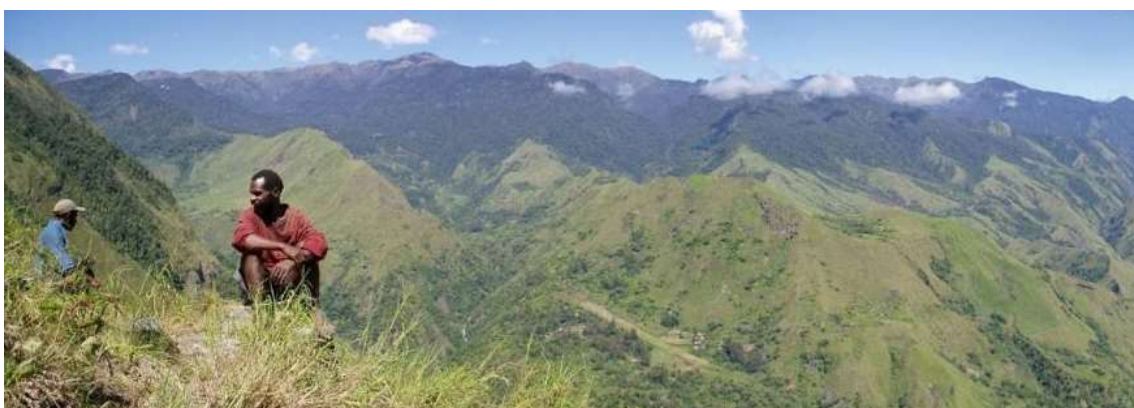
2009 年に官報に掲載された YUS CA は 76,000 ha の土地をカバーしており、生物多様性保全のために地域の地主や氏族が誓約した区画で構成されている。この保全地域は、以前は 5 つの言語グループに属する伝統的な狩猟地の一部であった。誓約された土地は現在も慣習的な所有権下にあるが、伐採と狩猟は PNG 自然保護法 (1978 年) により技術的に違法とされている。原生林は YUS の景観における主要な生態系であり、保護地域の 70% を占めている。海拔から 3,100 m までは森林が優勢で、この標高より上には高山草原が見られる。この森林は、絶滅危惧種であるマツキカンガルーや他の有袋類、極楽鳥類にとって重要な生息地である。これらの熱帯雨林は二酸化炭素の重要な貯蔵庫でもある。YUS の他の土地被覆タイプには、頻繁に焼かれる人為的な草地、焼畑農業と集約農業が混在し、シェードコーヒー・プランテーション、カカオ・プランテーション、小規模な樹木栽培区がある。

YUS プロジェクトは、森林炭素、固有の生物多様性、生態系サービスを保全するとともに、伝統的な生活様式への影響が少ない持続可能な活動から収入源を提供することで、地元の農村地域に利益をもたらすことを目指している。複数の目的を持つ持続可能な開発モデルを統合することは、土地利用計画における大きな課題である。当初、地元の土地所有者を巻き込み、YUS CA に対する彼らの希望を聞き出すため、すべてのすべての氏族の領土で進行役のワークショップを実施した。YUS CA を厳格な保護区、複合利用区、村落生産区に区分するゾーニングは、地元の氏族によって行われ、地元の人々によって GPS と衛星画像を使用して地図が作成された。各氏族の領域では、地元の人々が保護レンジャーや教育係としてパートタイムの仕事を得た。米国を拠点とするフェアトレードコーヒーマーケティング業者による造林トレーニングを受けて、シェードコーヒー農園が設立された。同社は、YUS コーヒーを特徴的な「ツリーカンガルー」ブランドとして加工・販売も行っている。人為的な草地には樹木栽培区が設立され、村人のための利用可能な木材資源が増やされた。他の取り組みでは、学校へのアクセスを改善し、地域での医療を提供したが、どちらの問題もワークショップで特定された。

ドイツの開発銀行 KfW Bankengruppe が資金提供した主要な取り組みでは、REDD+手法(インターネット資料を参照)を使用して、YUS のさまざまな土地被覆タイプにわたる炭素蓄積量を評価した。これらの評価は、リモートセンシングを使用した植生マッピングと地域のフィールド調査を補完した。このプロジェクトでは、幅広い環境範囲の原生林をサンプリングすることで、代表的な炭素蓄積量を提供した。プロジェクトチームは、二次林、シェードコーヒー・プランテーション、耕作放棄地、人為的な草地における炭素蓄積量も測定し、炭素蓄積量を増やすための今後の土地利用管理に役立てた。

REDD+の方法論では、カーボン・オフセット・プロジェクトの開発、管理、モニタリングに地元住民を参加させることが強調されているため、チームは、すべての炭素評価に地元住民を有償で参加させることを目的としたトレーニング・モジュールを考案した。地元住民による地上バイオマスデータの収集と森林炭素蓄積量のモニタリングは、炭素

のベースライン炭素インベントリを構築し、既存の REDD+プロジェクトで森林炭素を監視するのに役立つだけでなく、森林開発を放棄している人々に生計を提供する可能性がある。庭園休耕地、アグロフォレストリーシステム、植林地など、生計を立てるためのランドスケープは、適切な土地管理によって、かなりの量の炭素を隔離・蓄積することができる。空間監視および報告ツール(SMART)の方法論とツールの統合により、YUS 保護地域管理委員会の能力が強化され、毎月のパトロール中に YUS レンジャーが収集したデータを受信して分析し、保全の脅威と課題を軽減するためのデータ主導型の管理対応を開発し、主要な種の存在の肯定的な傾向を強調する能力が向上する。



Yopno-Uruwa-Som 保全地域内の Uruwa 溪谷、Wasauon Field Camp から。カルスト地形上の高山草原は上部山地林の上であり、村落周辺の伐採地との境界は不規則である。写真：David Gillieson.



地上での炭素インベントリを作成する Yopno-Uruwa-Som 保全地域の村人とプロジェクト・マッピング・チーム。写真：David Gillieson.

Guidelines ガイドライン

- (72) 先住民族が存在する保護地域については、地元の管理委員会との協力的な管理システムを確立するための法的および政策的根拠が必要である。委員会の主な利害関係者および権利所有者は地元住民と保護区管理当局であり、二次的な利害関係者は関連政府機関である。
- (73) 先住民族が存在するカルスト保護地域については、伝統的知識と慣習上の権利に基づく参加型の土地ゾーニングが必要である。これには、何らかの経済活動が行われる使用管理区域と、自然保護が主な目的である完全に保護された区域が含まれるのが理想的である。
- (74) 先住民族がいる公園の管理者は、各コミュニティがその管理と経済活動のために明確に定義されたエリアを持つように、適切な言語で書かれた地元コミュニティとの共同管理協定を策定する必要がある。
- (75) 先住民族がいる公園の管理者は、保護区管理活動に地元住民を参加させるべきである。洞窟やカルストウォークでのレンジャー活動や観光ガイドは、重要な雇用の機会を提供し、地元コミュニティに力を与えるのに役立つ。レンジャーやガイドに、大多数の訪問者が使用されると思われる言語や自然史を教育するプログラムが不可欠である。
- (76) ベストプラクティス管理の重要な要件は、訪問者に正確で科学的に正確な情報を提供し、関連性があり影響の少ない研究を促進する必要があることである。

Conclusions 結論

カルストや洞窟は非常に特別な場所であるが、土地、水、生態系資源の管理者や保護地域の管理者がコントロールできる範囲は非常に限られており、より広い範囲の影響に大きく左右されることが多い。自然保護のみを目的として管理されているカルスト地域はほとんどなく、多くの保護地域はツーリズムやレクリエーションのために洞窟やカルストの景観を紹介しており、カルストシステムや攪乱に対する感受性について一般の人々に教育を促すという重要な役割を果たしている。一部の管轄区域では、社会的または経済的目的を持った他の活動も許可されている。また、歴史的な前例により、その場所でこれらの活動が行われる場合もある。このような状況では、保護されたカルスト地域内およびその周辺でのすべての活動が、自然保護という包括的な目的と両立する方法で管理されるよう、慎重な配慮が必要である。管理当局は、保護地域に含まれないカルスト地域を特定し、計画管理、公教育プログラム、遺産協定または土地使用契約などの手段によって、これらの地域の価値を保護することを考慮すべきである。

気候変動は、カルストシステムが進化してきた地質学的な時間尺度内で自然に起こってきた。しかし、現在、人間の介入によって気候が急速に変化し、自然なカルストプロセスに根本的な影響を与える可能性がある。管理規定は柔軟でなければならず、この現実を認識し、システムの回復力を最大化するように努めなければならない。洪水、津波、火災、地震などの高強度・低頻度のイベントの影響は、地域、地元、および特定のサイトの尺度での管理戦略で対処する必要がある。これらの事象は頻度を増し、その影響に対処する社会の能力を上回っている。

地域的な要因が、各カルスト地域で生じる特異的な圧力と機会を決定している。したがって、これらのガイドラインは、実用的でないグローバルな尺度で過度に具体的な指示を与えるのではなく、オプションを強調しようとしている。我々は必然的に、カルストであろうとなかろうと、全ての地域に適用される管理のより一般的な側面とは対照的に、カルストを他の地形様式と区別する問題に焦点を当てる。これらのガイドラインは、常に地域の文脈の中で適用されなければならないことを強調しなければならない。これには、地域の生物多様性と地質学的多様性の認識、さらに社会経済的、政治的要因への配慮が含まれる。

自然資源管理の根底にある哲学には世界的に顕著な変化が見られる。保護に関するこれまでの管理体制は排他的かつ制限的であり、世論はほとんど考慮されていなかった。私たちは現在、より啓発的な管理体制に急速に移行しており、脆弱で貴重な地域に住む人々、またはその近くに住む人々との良好な関係が重要とみなされ、これらの地域は適応的管理の原則を使用して運営されている。洞窟とカルストの管理者にとっての課題は、本質的に再生不可能な資源を保全しながら、新しいパラダイムを受け入れることである。

この説明とガイドラインは、カルストと洞窟システムに対する地域社会の認識を向上させるための有益な支援を管理者や計画者に提供し、それによって保護と管理の改善に対する地元の受け入れと関与を確保する機会を増やすことを期待している。これらのガイドラインは、国家、地域、または特定の場所のレベルでより詳細な戦略や管理計画を策定する際に役立つであろう。全体的には、管理機関はカルストの効果的な管理のための専門知識と能力を築く努力をするべきである。

Further Reading さらにる資料

- Crofts, R., Gordon, J.E., Brilha, J., et al. (2020). *Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas*, Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.31.en>
- Culver, D.C. and Pipan, T. (2009). *The biology of caves and other subterranean habitats*. Oxford University Press, Oxford.
- Drew D., and Hötzl, H. (1999). *Karst hydrogeology and human activities: Impacts, Consequences and Implications*. IAH International Contributions to Hydrogeology 20. Routledge.
- Ford, D., and Williams, P., (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester.
- Gillieson, D.S. (2021). *Caves: Processes, Development and Management*. 2nd Edition. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Gunn, J. (ed.). (2004). *The Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor and Francis – Routledge, New York. See especially entries on Recreational Caving, Restoration of Caves, and Tourism and Caves: History.
- Hildreth-Werker, V. and Werker, J.C. (eds.). (2006). *Cave Conservation and Restoration*. National Speleological Society, Huntsville, AL, USA. Available at <https://protect-au.mimecast.com/s/u6sYC71ZQzSARY91Zc8-Dg4?domain=digital.lib.usf.edu>
- International Show Caves Association (ISCA), 2014. *Recommended international guidelines for the development and management of show caves*. ISCA. Available at <https://www.i-s-c-a.org/documents>
- Kresic, N. (2013). *Water in Karst*. McGraw Hill, New York.
- Palmer, A.N. (2007). *Cave Geology*. Cave Books, Dayton, Ohio.
- Thomas, L. and Middleton, J. (2003). *Guidelines for management planning of protected areas*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Available at <https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGTS/MGTS11/U5/thomas-middleton-2003-guidelines.pdf>
- Van Beynen, P. (ed.) (2011). *Karst Management*. Springer, New York.
- Veni, G. and DuChene, H. (eds.) (2001). *Living with karst: a fragile foundation*. Environmental Awareness Series no. 4, American Geological Institute. Available at <https://store.americangeosciences.org/living-with-karst.html>
- Watson, J., Hamilton-Smith, E., Gillieson, D., and Kiernan, K. (1997). *Guidelines for Cave and Karst Protection*. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/1997-026.pdf>
- White, W.B., Culver, D.C., and Pipan, T. (eds.) (2019). *Encyclopedia of Caves*, 3rd edition. Academic Press.
- Williams, P.W. (2008). *World Heritage Caves and Karst*. IUCN, Gland, Switzerland. Available at <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2008-037.pdf>
- Worboys, G.L., Lockwood, M., Kothari, A., Feary, S. and Pulsford, I. (eds.) (2015). *Protected Area Governance and Management*. ANU Press, Canberra, Australia. Available at <https://press.anu.edu.au/publications/protected-area-governance-and-management>

Internet Resources インターネット上の情報

Australian Speleological Federation Minimal Impact Caving Codes in 1995, with the latest version (2010) available at <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards>

British Cave Science Centre (free data source), available at <https://www.cave-science.org.uk/>

British Caving Association Minimal Impact Caving Guidelines, available at <https://british-caving.org.uk/our-work/cave-conservation/>

Canyoning code of conduct, available at www.icopro.org/pages/icopro-canyoneer-charter-104.html

Cave gates advice, available at <https://digital.lib.usf.edu//content/SF/S0/05/10/33/00001/K26-00584-147-166.pdf>

Climbers Pact, available at www.accessfund.org/learn/the-climbers-pact

Guide on digging to find new caves in protected areas (UK), available at <https://thedca.org.uk/images/dca/publications/leaflets/Cave-Digging.pdf>

Guidelines for applying protected area management categories, available at <https://portals.iucn.org/library/node/30018>

Information on training for cave instructors (UK), available at <https://british-caving.org.uk/our-work/training/>

International Union of Speleology (UIS) has a 'Code of Ethics for Cave Exploration, and Science in Foreign Countries', available at <https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/03/Code-of-Ethics-of-the-UIS-English-Languaqe.pdf>

IUCN Protected Area categories, available at <https://www.iucn.org/theme/protected-areas/about/protected-area-categories>

Karst Management Handbook for British Columbia, available at <https://www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00189/karst-mgmt-handbook-web.pdf>

Karst Inventory Standards and Vulnerability Assessment Procedures for British Columbia, available at https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/natural-resource-stewardship/nr-laws-policy/risc/karst_risc.pdf

Minimal Impact Cave Rescue Code, available at <https://www.caves.org.au/administration/codes-and-standards/send/8-codes-and-standards/9-micrc2020>

National Speleological Society (USA) has Minimum-Impact Caving Guidelines that are regularly updated, most recently in February 2021 to take into account the Covid pandemic, available at <https://caves.org/conservation/cavingcode.shtml>

New Zealand Department of Conservation has a 'Caving care code', available at <https://www.doc.govt.nz/parks-and-recreation/things-to-do/caving/caving-care-code/>

REDD+ Webb Platform, available at <https://redd.unfccc.int/>

Tasmanian Cave Access Policy, available at www.dpipwe.tas.gov.au/Documents/PWS%20Cave%20Access%20Policy.pdf

United States Fish and Wildlife Service, White-nose Syndrome Response Team, available at <https://www.whitenosesyndrome.org>

United States Environmental Protection Agency, A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology, available at <https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p-download-id=36359>

Scientific References 科学的参考文献

- Auler, A.S., and Piló, L.B. (2015). Caves and mining in Brazil: the dilemma of cave preservation within a mining context. In *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. (eds. B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Durán, P. Jiménez, P. LaMoreaux). Springer, Berlin, 487–496.
- Auler, A.S., Souza, T.A.R., Se, D.C. and Soares, G.A. (2018). A review and statistical assessment of the criteria for determining cave significance, In *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications* (eds. M. Parise, F. Gabrovsek, G. Kaufmann, and N. Ravbar). Special Publications 466(1). Geological Society, London, 443–460.
- Bátori, Z., Csiky, J., Farkas, T., *et al.* (2014). The conservation value of karst dolines for vascular plants in woodland habitats of Hungary: refugia and climate change. *Int J Speleol* 43, 15–26. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.1.2>
- British Columbia Ministry of Forests, (2003). *Karst management handbook for British Columbia*. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch, Victoria, British Columbia, 81. <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/publications/00189/Karst-Mgmt-Handbook-web.pdf>
- Benstead, J.P., and Pringle, C.M., (2004). Deforestation alters the resource base and biomass of endemic stream insects in eastern Madagascar. *Freshw Biol* 49, 490–501. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01203.x>
- Burri, E., Castiglioni, B., and Sauro, U. (1999). Agriculture, landscape and human impact in some karst areas of Italy. *Int J Speleol* 28 B, 33–54.
- Cigna, A. A., (2011). The Problem of Lampenflora in Show Caves. *Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association*, 82, 16–19.
- Council of the Haida Nation, (2007). Haida Gwaii Strategic Land Use Agreement. Council of the Haida Nation. <http://www.haidanation.ca/Pages/Agreements/pdfs/Haida%20Gwaii%20Strategic%20Land%2038Use%20Agreement.pdf>
- Council of the Haida Nation, (2018). *Gwaii Haanas Gina 'Waadluxan KilGuhlGa Land-Sea-People Management Plan*, Archipelago Management Board Gwaii Haanas National Park Reserve, Parks Canada, British Columbia.
- Coxon, C. (1999). Agriculturally induced impacts. In *Karst hydrogeology and human activities: Impacts, Consequences and Implications* (eds. D. Drew and H. Hötzl). IAH International Contributions to Hydrogeology 20. Routledge, 37–63.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., *et al.*, (2002). Main concepts of the European approach for karst groundwater vulnerability assessment and mapping. *Journal of Hydrogeology*, 10, 340–345.
- de Koning, M., Parr, J.W.K., Sengchanthavong, S., and Phommasane, S. (2016). Collaborative governance improves management effectiveness of Hin Nam No National Protected Area in central Laos. *Parks* 22(2), 27–40.
- Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., and Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39, 165–176.
- Forti, P., (2015). *The scientific and socio-economic importance of karst and caves and their vulnerability*. Brief for GSDR 2015.
- Frappier, A.B. (2008). A stepwise screening system to select storm-sensitive stalagmites: taking a targeted approach to speleothem sampling methodology. *Quatern Int* 187(1), 25–39.
- Gerstner, H., McArthur, E., and Clark, B. (2018). Feeding the furnace of information, *Proceedings 22nd Australasian Cave and Karst Management Conference, Margaret River WA May 2018*, 6-10. <http://www.ackma.org/Proceedings/proceed/22/22contents.html>
- Gill, D., (1999). Nomination of the Gunung Mulu National Park, Sarawak, Malaysia for World Heritage Listing. *Report to UNESCO World Heritage Committee*. Sarawak Forestry Department, Kuching.
- Gillieson, D., (2011). *Cave Management*. In *Karst Management* (ed. P. E. van Beynen). Springer, New York.
- Gillieson, D., and Clark, B., (2010). Mulu: The World's Most Spectacular Tropical Karst. In *Geomorphological Landscapes of the World* (ed. P. Migon), Springer, pp311–320.
- Gillieson, D., Silverman, J., Hopkinson, R., Quenzer, M., and Kuna, K., (2011). *Vegetation mapping for the YUS conservation landscape*. Report for Conservation International and KfW Bank, James Cook University, Cairns, 35.

- Goldcheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., *et al.* (2020) Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal* 28, 1661–1677.
- Goldscheider, N. (2012). A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *AQUA mundi* Am06046, 117–124.
<https://groundwaterportal.net/sites/default/files/Holistic%20approach%20-%20groundwater%20ecosystems-%20karst%20terrains.pdf>
- Griffiths, P., and Ramsey, C. (2005). Best management practices for palaeontological and archaeological cave resources. *Journal of the Australasian Cave and Karst Management Association*, 58, 27–31.
- Griffiths, P.A., and Ramsey, C.L., (2009). *Assessment of Forest Karst Resources of Haida Gwaii: A Strategic Overview*. Gwaii Forest Society, Project SFM08–2008.
- Gunn, J. (2021). Karst groundwater in UNESCO protected areas: a global overview. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 297–314.
- Gunn, J., Bailey, D., and Handley, J. (1997). *The reclamation of limestone quarries using Landform Replication*. Department of the Environment, Transport and the Regions, HMSO, London.
- Gunn J., and Trudgill, S.T. (1982). Carbon dioxide production and concentrations in the soil atmosphere: A case study from New Zealand volcanic ash soils. *Catena*, 9, 81–94.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., and Jourde, H. (2014). A review of natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Sciences Reviews* 138, 61–88.
- Hamilton-Smith, E., McBeath, R., and Vavryn, D., (1997). Best Practice in Visitor Management. *Proceedings of the 12th ACKMA Conference, 1997 Waitomo, New Zealand*. 85–96.
- Hardwick, P., and Gunn, J. (1993). The impact of agriculture on limestone caves. *Catena supplement*, 25, 235–249.
- Hellstrom, J., Sniderman, K., Drysdale, R., *et al.* (2020). Speleothem growth intervals reflect New Zealand montane vegetation response to temperature change over the last glacial cycle. *Sci Rep* 10, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58317-8>
- Iván, V., and Mádl-Szőnyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environmental Earth Sciences*, 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>
- Jones, A., Angileri, V., Bampa, F., *et al.* (2013). *CAPRESE-SOIL: Carbon Preservation and Sequestration in agricultural soils, Options and implications for agricultural production*. Final report – EUR 26516. <https://doi.org/10.2788/77068>
- Kieft, T.L., Havlena, Z., and Veni, G. (2021). *An Investigation of Lighting and Chemical Methods to Prevent and Remediate Lampenflora, Carlsbad Cavern, New Mexico*. National Cave and Karst Research Institute Report of Investigation 14, Carlsbad, New Mexico.
- Liu, Z., Dreybrodt, W., and Liu, H. (2011). Atmospheric CO₂ sink: Silicate weathering or carbonate weathering? *Appl Geochemistry* 26, S292–S294. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.085>
- Manidis Roberts Consultants. (2000). *Gunung Mulu National Park Integrated Development and Management Plan*. Final Report. Sydney, Manidis Roberts Consultants.
- Martin-Sanchez, P.M., Miller, A.Z., and Saiz-Jimenez, C. (2015). Lascaux Cave: An Example of Fragile Ecological Balance in Subterranean Environments. In *(Microbial Life of Cave Systems* (ed. A.S. Engel), Berlin, München, Boston: De Gruyter, 279–302. <https://doi.org/10.1515/9783110339888-015>
- MacGregor, C.L.V., Hellstrom, J.C., Woodhead, J.D., Drysdale, R.N., and Eberhard, R.S. (2022). Low impact of sampling speleothems – reconciling scientific study with cave conservation. *International Journal of Speleology*, 51(1), 1–11. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.1.2406>
- McNie, P.M. and Death, R.G. (2017). The effect of agriculture on cave-stream invertebrate communities. *Mar Freshw Res* 68, 1999–2007. <https://doi.org/10.1071/MF16112>
- Milanovic, P. (2021). Dams and reservoirs in karst? Keep away or accept the challenges. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02273-0>
- Milanović, S., and Vasić L. (2021). Review: Methodological approaches and research techniques for addressing construction and remediation problems in karst reservoirs. *Hydrogeology Journal* 29, 101–122.
- National Resources Conservation Centre. (2010). *Conservation Practice Standard*. <https://nrcc.usda.gov>

- Olarinoye, T., Gleeson, T., Marx, V. *et al.* (2020) Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater. *Sci Data* 7, 59. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0346-5>
- Reed, E. H. (2009). Decomposition and disarticulation of kangaroo carcasses in caves at Naracoorte, South Australia. *Journal of Taphonomy*, 7, 265–283.
- Simon, K.S., Benfield, E.F., Macko, S.A., (2003). Food web structure and the role of epilithic biofilms in cave streams. *Ecology* 84, 2395–2406. <https://doi.org/10.1890/02-334>
- Spötl, C., and Matthey, D. (2012). Scientific drilling of speleothems—a technical note. *Int J Speleol* 41(1), 29–34
- Stevanovic, Z. (2019) Karst waters in potable water supply: a global scale overview. *Environmental Earth Science* 78, 662. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>
- Tattersall, I., and Schwartz, J. H. (2001). *Extinct Humans*, Boulder, CO, Westview Press.
- Tercafs, R. (2001). *The protection of the subterranean environment. Conservation principles and management tools*, P.S. Publishers.
- Thomas, L., and Middleton, J. (2003). Guidelines for management planning of protected areas. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Titus, T., Phillips-Lander, C.M., Boston, P.J., Judson Wynne, J., and Kerber, L. (2020). Planetary Cave Exploration Progresses. <https://eos.org/science-updates/planetary-cave-exploration-progresses>
- Truebe, S. (2015). *Cultivating a climate of cave conservation awareness: a synthesis of current speleothem sampling methods and best practice recommendations*. CLIMAS Climate and Society Fellowship Report. <https://climas.arizona.edu/sites/default/files/pdf2014truebefellowsreport.pdf>
- UNESCO (2018). *UNESCO policy on engaging with Indigenous peoples*, UNESCO, Paris. <https://en.unesco.org/indigenous-peoples/policy>
- United States Environmental Protection Agency (2002). *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*. <https://karstwaters.org/wp-content/uploads/2015/04/lexicon-cave-karst.pdf>
- Urich, P.B. (1989). Tropical karst management and agricultural development: example from Bohol, Philippines. *Geogr Ann Ser B* 71B, 95–108. <https://doi.org/10.1080/04353684.1989.11879589>
- Urich, P.B. (1996). Deforestation and declining irrigation in Southeast Asia: A Philippine case. *Int J Water Resour Dev* 12, 49–64. <https://doi.org/10.1080/713672197>
- Urich, P.B. (2002). Land use in karst terrain: review of impacts of primary activities on temperate karst ecosystems. Science for Conservation 198 (Report). New Zealand Department of Conservation, Wellington.
- van Beynen, P., and Townsend, K. (2005) A disturbance index for karst environments. *Environmental Management* 36, 101–116.
- Veni, G. (1999). A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. *Geomorphology* 31, 151–180. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00077-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00077-X)
- Venter, M., Dwyer, J., Dieleman, W., *et al.* (2017). Large trees and natural disturbances drive forest biomass on a 3000m elevation gradient in Papua New Guinea, *Global Change Biology*, 23, 4873–4883. <https://doi.org/10.1111/gcb.13741>
- Wang, K., Zhang, C., Chen, H., *et al.* (2019). Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services. *Landsc Ecol* 23, 4873–4883. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00912-w>
- Watson, J., Hamilton-Smith, E., Gillieson, D., and Kiernan, K. (1997). *Guidelines for Cave and Karst Protection*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Williams, P.W. (1993). Environmental change and human impacts on karst terrains: An introduction. *Catena supplement*, 25, 1–20.
- Wood, P.J., Gunn, J., and Rundle, S.D. (2008). Response of benthic cave invertebrates to organic pollution events. *Aquat. Conserv. Mar Freshw Ecosyst* 18, 909–922. <https://doi.org/10.1002/aqc.933>

Appendix 1: Karst and Caves in Non-carbonate Rocks

付録 1：非炭酸塩岩のカルストと洞窟

カルスト地形は、主に溶解作用によって生じる一連の特殊な地形から成り立っている。古典的には、カルストは最初に石灰岩、苦灰石、大理石などの炭酸塩岩に存在する現象として研究され、理解された。これらの岩石は酸性水に容易に溶け、地球上で知られている洞窟やカルスト地形の大部分を生み出す。ただし、適切な条件が存在すれば、他のいくつかの種類の岩石でも溶解プロセスが実行される可能性がある。例えば、石膏や塩などの蒸発岩は炭酸塩よりも溶解しやすいため、カルスト地形や洞窟が形成される場合がある。珪岩や砂岩などシリカを含むさまざまな岩石もカルスト地形を形成する可能性がある。溶解度は低いですが、シリカが豊富な岩石の溶解は他の非化学的プロセスとともに作用する。これらの岩石における溶解洞窟の発生には、気候が大きな役割を果たしている可能性がある。石膏と塩は非常に溶けやすいため、湿気が多い気候では風化してしまう傾向がある。したがって、これらの蒸発岩のカルスト地形は、主に乾燥した環境に存在する傾向がある。一方、シリカは温暖な気候のもとでは溶解性が高く、これらの岩石の代表的なカルスト地形や洞窟は熱帯地方に存在する。

他の洞窟は完全に機械的(浸食)プロセスによって作成され、化学物質の関与は限定的である。これは波の衝撃によって生成された海または沿岸の洞窟、または風によって作られた乾燥地帯の洞窟の場合に当てはまる。洞窟のさらなるカテゴリには、溶岩洞など、洞窟が発達する岩石と一緒に作られたもの、または地殻変動(裂け目の洞窟)によって作られたものが含まれる。要約すると、洞窟やカルストを生成するには多くの方法があり、決して炭酸塩岩に限定されるものではない。したがって、カルストと洞窟を解釈するには、全体的な視点を保つことが不可欠である。

Caves and karst in gypsum 石膏の洞窟とカルスト

石膏は石灰岩よりも溶解性が高く、広範囲に及ぶカルスト地形や洞窟が形成される可能性がある。岩石としての石膏は、炭酸塩に比べて地表に少ないため、石膏洞窟やカルストの世界的な分布はより限られている。石膏洞窟は、他の岩石と交互に存在する石膏層によってしばしば発生し、限られた露頭または露出がない場合がある。これを「層間カルスト」と呼ぶ。ウクライナ西部の迷路洞窟など、世界で最も長い洞窟のいくつかは、比較的薄い石膏層で発展した。

大衆観光に適応した石膏洞窟は比較的少なく、最もよく知られているのはスペインの Sorbas 洞窟だろう。石膏洞窟とカルストは、多くの点で炭酸塩よりも壊れやすい。岩の硬度はかなり低く簡単に損傷したり刻まれたりする可能性がある。鍾乳石はあまり一般的ではない傾向にあり同様に壊れやすい。これらの洞窟は主に乾燥地帯に発生するため、利用できる排水系が限られ、その結果、環境への影響の再生が制限される低エネルギー環境が生じる。石膏岩の機械的安定性が低いため、洞窟の通路は比較的小さくなる。最長の石膏洞窟は通常、ウクライナにある全長 257km の Optymistychna 洞窟のように、ほとんどが小さな通路を含む広大な迷路で構成されている。石膏層間層内の空洞が崩壊すると、一般に地表に陥没穴(sinkholes)が生じる。石膏内の通路の急速な発達も、工学上の問題を引き起こす可能性がある。

Caves and karst in salt 塩の洞窟とカルスト地形

塩は石膏や石灰岩よりもはるかに溶解性の高い岩石であるため、すぐに風化してしまう傾向がある。塩の洞窟やカルストは、非常に乾燥した環境でのみ存在する。チリの Atacama 砂漠、イスラエルの Sedom の砂漠地帯、イランの Qeshm がその代表例である。石膏洞窟について提案された考察の多くは塩にも当てはまるが、洞窟ははるかに小さい傾向があり、最長のものであるイスラエルの Malham 洞窟は長さ約 10km である。岩はかなり柔らかく、崩壊せずに大きな開口部を維持することができず、乾燥した気候のために活発な排水がない。塩の表面はもろいが、摩耗しやす

い傾向がある。塩の鍾乳石はしばしば存在しているが、非常に損傷を受けやすい。一般的に人里離れた過酷な環境にあることが、これらの洞窟の保護に貢献している。



洞窟内の塩の結晶、Sedom 山、イスラエル。写真：Rainer Straub.

イランでは、ユネスコ世界ジオパークに指定されている Qeshm 島の塩の洞窟の一部が観光用に開放され、チリの San Pedro de Atacama 近郊にある洞窟も観光用に開放されている。Sedom の広大な洞窟はアドベンチャー・ツーリズムのために開放され、毎年数百人が訪れる。



イスラエル、Sedom 山の Colonel 洞窟、ハライトで形成された深い立坑を見上げる。写真：Rainer Straub.

Caves and karst in silica-rich rocks シリカに富む岩石の洞窟とカルスト地形

砂岩、珪岩などのシリカが豊富な岩石、さらには花崗岩などの一部の火成岩も溶解することがある。これらの岩石では炭酸塩とは異なり、溶解度は温度とともに上昇するため、温暖な熱帯気候の下では溶解が促進される傾向がある。溶解速度が低いため、溶解が実行されるまでの長い時間スケールが必要であり、安定した地殻条件の下で進化した古代の景観は、このタイプの洞窟の形成に適した条件を備えている。シリカを豊富に含む岩石の溶解洞窟は、南米（主にブラジルとベネズエラ）、アフリカ、オーストラリア、アジア（インドとタイ）の多くの地域に分布している。南アメリカでは、珪岩は古く（原生代中期）、化学的に耐性があるため、標高の高い尾根を形成する傾向がある。

長さ数キロメートルの珪岩と砂岩の洞窟の地図が作成され研究されており、最大のもはベネズエラ南東部の世界遺産 Canaima 国立公園内にある。ブラジルでは、これらの洞窟は、ブラジル東部のいくつかの山岳地帯と、アマゾン川流域の低地地域に発生する。これらの洞窟は新しい研究分野を代表するものであり、洞窟の探索が十分に行われていない地域がまだ多くある。オーストラリア北部の原生代の砂岩地層には広範な砂岩のカルスト地形と洞窟が存在し、最もよく知られているのは Purnululu 国立公園（世界遺産）、西オーストラリアのキンバリー地域、北部準州の Kakadu 国立公園である。

珪岩と砂岩は、珪質マトリックスの有無にかかわらず、絡み合った石英の粒子を示す岩石である。シリカに富む岩石の破片がシリカに富むマトリックスで固められた集合体が発生することもある。これらの岩石の化学的変質により、最初に粒子がバラバラになる。これらの岩石の化学的変質により、最初に粒子が分解される。このプロセスは、アレニゼーション (arenisation) として知られている。これらの洞窟の岩盤は非常に砕けやすくなる。ブラジル南東部にあるイビティポカ州立公園では、全長 2.7km の Bromélias 洞窟の狭い場所を観光客が頻繁に通過することで、一部の通路の形状が永久的に変化したことが知られている。観光客が洞窟の不安定な部分に触れてしまい、通路の天井が崩

れる事故も起こり、この洞窟は観光客に閉鎖されることとなった。洞窟の壁の非常に壊れやすい性質が、洞窟に碑文を刻む動機となっているようである。いくつかの砂岩の洞窟には、集中的な擦り傷による落書きが見られる。



ブラジルの Guimarães 国立公園内にある砂岩の洞窟、Caverna Aroe Jari。写真：Csaba Egri。

シリカを豊富に含む岩石の洞窟には、多様な真洞窟性生物動物相が生息している可能性がある。たとえば、ブラジル北東部の Chapada Diamantina 国立公園には、洞窟に適応した 2 種のナマズがいる。これらの洞窟には、炭酸塩岩によく見られる風光明媚な鍾乳洞がほとんどない。しかし、南アメリカの多くの洞窟は定期的に観光客を受け入れているが、現時点では人工照明や計画されたルートを備えた大量観光に適切に適応している洞窟はない。ブラジル南東部 Diamantina の Saltire 洞窟など、いくつかの洞窟で洞窟管理計画が承認されているが、洞窟の壊れやすい性質を認識し、訪問を洞窟のより大きくアクセスしやすい部分に限定する傾向がある。珪岩と砂岩は一般的な岩石であるため、経済的価値は限られている。さらに、この地形に伴う貧弱な砂質土壌と高地に位置することが多いため、人間の居住地は一般にまばらである。このため、人間の訪問が制限され、洞窟の保存に有利な傾向がある。景色が美しい、滝が存在し、利用が容易であるため、こうした多くの地域は国、州、地方のレベルで自然保護区に指定されている。



ベネズエラの世界遺産 Canaima 国立公園内の Auyan tepu 洞の千本柱の間。写真：Vittorio Grobu.

Caves in iron formations 鉄の地層の洞窟

鉄の地層の洞窟は 1960 年代に初めて洞窟学の文献に記録されたが、世界的な需要の増加による鉄鉱山の著しい拡大により、2014 年以降脚光を浴びるようになった。現在、ブラジルを中心に豪州やアフリカでも、数千もの洞窟が鉄層で確認されている。洞窟の規模は小さく、長さが 100 m を超えることはほとんどないが、洞窟そのものだけでなく、岩石の間隙にも生息する驚くべき洞窟動物相を擁している。最近、何百もの新しい真洞窟性生物が記録されている。縞状鉄鉱層として知られる、風化していない本来の鉄鉱層の岩石は、シリカと鉄が交互に層を成している。鉄はシリカよりも化学的耐性が高いため、シリカが最初に溶出し、高品位の鉄鉱石になる。化学プロセスだけでなく、鉄還元細菌が不溶性の鉄(III)を可溶性の鉄(II)に変換する地球微生物学的メカニズムの複雑な相互作用も含まれる。これらの洞窟は一般に高品位の鉄塊と関連付けられているため、通常、鉄を抽出するための代替の場所がなく、採掘による経済的圧力に直面している。ブラジルでは洞窟のある鉄鉱層のいくつかが合法的に採掘されており、新しい国立公園、研究資金、出版物など、洞窟に関連する多額の環境補償につながっている。しかし、このタイプの岩石は世界的に産出が限られており、鉄地域のほとんどがすでに採掘計画に組み込まれているという事実により、この補償金の多くは他の岩石の洞窟に適用され、保全単位に不均衡が残されている。



鉄形成洞窟、南Espinhaço 山脈、ブラジル。写真：Luciana Alt and Vitor Moura.



天井に canga (鉄分を多く含む礫岩)、壁に帯鉄層 (BIF) が見られる鉄層洞窟。ブラジル、Espinhaço 山脈南部。写真：Luciana Alt, Vitor Moura.

オーストラリアでは、鉄層の洞窟に関連する遺跡が大々的に破壊され、国民の激しい抗議行動が起きた。Juukan 峡谷の遺跡には、46,000 年前に人類が居住していた時の資料が含まれていたが、採掘によって完全に破壊された。伝統的

所有者、Puutu Kunti Kurrama 族、Pinikura 族、そして環境団体からは非常に強い反応があった。その後の議会調査では、州と連邦の両方の遺産保護法の不備が浮き彫りになった。現在、この地域にはこの法律に基づいて承認された採掘活動の脅威にさらされている場所が他にもある。

鉄層の洞窟には風光明媚な鍾乳洞がほとんどなく、狭い通路で構成された内部構造のため、観光の対象としては魅力的ではない。そのため、これらの洞窟はレクリエーションな洞窟探検家にはほとんど注目されておらず、環境コンサルティングの仕事を通じてその重要性が強調されている。このような洞窟を定期的に訪れているのは数少なく、適切な管理計画やインフラを持つものはない。ブラジルの一部の洞窟は、保護バッファーとともに永久保存されている。しかし、これらの洞窟の多くは採掘場内にあるため、その完全性を維持することは困難である。特に多孔質な岩内の洞窟生物の移動や範囲についてはほとんど知られていないため、これらの生態系を効果的に保護する方法は不確かである。

Non-karstic caves 非カルスト洞窟

多くの洞窟は、その成因において化学プロセスの優位性を示さず、代わりに、他のさまざまな地質学的要因やメカニズムによって形成される。溶解プロセスが存在しない（または小さな役割）ため、これらの洞窟は通常、古典的なカルスト地形には属さない。ドリーネやカレンなどの典型的なカルストの特徴は存在しない傾向がある。このような風景は、「疑似カルスト」というやや疑わしい定義に含まれることがある。それにもかかわらず、これらの非カルスト洞窟には、驚くべき科学のおよび美的価値がある可能性がある。



アメリカ、ハワイ州、Kazumura 洞窟の溶岩の層。多くの入り口を持つこの複雑な洞窟は、キラウエア火山の山腹にあり、現在世界で最も長く (65.5km)、深い (1100m) 溶岩洞窟である。写真：Philippe Crochet.

洞窟の中には、それが挿入されている岩石と同期して形成されるものもある。溶岩洞窟の場合は、噴火後に流れ落ちた溶岩が、その外側を大気や地下と接触させて先に固化させ、内側は溶けたままになる。溶岩の供給がなくなると、

斜面に沿って長い管が残る。このような洞窟は世界中の活火山地帯でよく見られ、観光用に転用されたものもいくつかある。スペインのカナリア諸島の Lanzarote 島にある Jameos de Agua は、一般観光客向けに開放された溶岩洞の 1 つである。溶岩洞には本質的な地質学および生物学的価値があり、そのような洞窟の多くは地質学的に若い(通常、最大年齢は数十万年)ものの、すでに定着しており、洞窟に適応した豊かな動物相を示している。溶岩洞窟は 11 のユネスコ世界ジオパークと 4 つのユネスコ世界遺産に登録されている。エクアドルのガラパゴス、チリの Rapa Nui、韓国の済州火山島、アメリカのハワイ火山国立公園である。

洞窟はトラバーチンと呼ばれることもあるトUFFアにも発生しているが、この用語は温泉水からの堆積物を指すのに最適である。トUFFアとトラバーチンはどちらも炭酸カルシウムの沈殿によって形成された岩石で、最も一般的には泉またはそのすぐ下流で発生する。溶岩洞窟と同様に、トUFFアの洞窟は、岩石の堆積と同時に最初に形成される。ほとんどは長さや幅がわずかに数 m だが、中にはそれより長いものもある。ヨーロッパにはトUFFアに観光用の洞窟が少なくとも 7 つあり、最も長いのはドイツのホナウにある Olga's の洞窟(170 m)である。

隆起作用によって主に形成される割れ目や裂け目が拡大したものとされる洞窟は、世界中の多くの地域に存在する。これらの洞窟は、割れ目洞窟または亀裂洞窟と呼ばれることもある。それらは、チベット高原やグリーンランドなど、溶解が軽微なプロセスである寒い気候や地殻変動が活発な地域でより一般的である。これらの小さな洞窟は生物学的に非常に興味深いものであり、古代の鍾乳石が含まれている可能性がある。ブラジル南東部にある世界で最も深い珪岩洞窟である Centenário 洞窟は、高原の頂上で地表に開いた深い継ぎ目で構成されており、深さ 484 m で通行不可能な寸法まで狭くなる。



イタリア、Sardinia 島東海岸の Gennargentu 国立公園にある海の洞窟。写真：Csaba Egri。

浸食作用によって形成された洞窟は世界中に数多く存在し、さまざまな種類の岩石に見られる。多くの海食洞や沿岸洞は、波の浸食作用によって形成されている。アメリカのカリフォルニア州沿岸やニュージーランドの Waitakere 山脈西岸などに優れた例がある。よく知られている場所の 1 つは、スコットランド沖にある Fingal's の洞窟である。こ

こは何世紀にもわたって観光客が訪れ、メンデルスゾーンの交響曲の 1 つにインスピレーションを与えてきた。風は、特に砂漠環境の砂岩などの「柔らかい」岩石に洞窟を生成することがある。tafoni として知られるさまざまなサイズの丸い浅い空洞は、花崗岩、砂岩、一部の変成岩でよく見られる。それらは、機械的、地殻変動、化学的プロセスの組み合わせによって生成されるようである。ブラジルのアマゾン流域で観察されたように、絶滅したアルマジロを含む動物の穴を掘る行為により、長さ 1km を超える洞窟が形成されている。蛇行する川による岩の露出物の浸食や、不固結な岩や土壌内の水流によっても、短命でほとんどが小さな洞窟が生成される場合がある。これらは「パイプ」として知られ、特に乾燥した地域ではかなり一般的な特徴である。アメリカ西部の「バッドランズ」地形と関連付けられた良い例がある。

氷河洞窟は、氷の中で発達する特殊な洞窟群である。これらの氷河洞窟は、ほとんどが融解によって形成され、氷に完全に囲まれていることもある。融解は夏に速まり、これらの洞窟はより高い発達率を経験する傾向がある。氷を融解させるために必要な熱は、水と氷の摩擦によって生じる場合もあるし、火山プロセスによって温められた水など、外部の要因に起因する場合もある。氷の洞窟は、特に人為的影響により急速に変化する気候の下では急速に進化する可能性がある。多くの氷河洞窟は、その洞窟が位置する氷河とともに、非常に不確実な将来に直面している。氷河の洞窟は、アイスランドのアドベンチャー・ツーリズムの注目の的となっている。

主に山の麓（または氷河に伴う）で見られる、落下したブロックの無秩序な配列は、崖錐洞窟(talus caves)を含むことがある。洞窟の起源がその洞窟が存在する堆積物と同期していることのもう 1 つの例である。多くの種類の岩石が崖錐洞窟を生成する可能性があるが、剥離の影響を受ける火成岩ではより一般的であるようだ。アメリカのニューハンプシャー州にある崖錐洞窟は、人気の観光スポットである。オーストラリアでは、クイーンズランド州北部のクックタウン近くのブラックマウンテンの崩壊洞窟が広範囲にわたり、重要なコウモリの集団を収容している。深い風化が起こると、岩の洞窟が形成される場合がある。これらは、地下の風化作用によって生成され、中核石や岩塊がガラスや風化残渣に囲まれている。その後、沈下する流れによって岩塊間の風化残渣（レゴリス;regolith）が除去されると、無定形のシリカ洞穴形成物や興味深い生物を持つ広範な洞窟が生じることがある。オーストラリアでは、ビクトリア州の Labertouche とクイーンズランド州の Wyberba に顕著な花崗岩の岩塊洞窟がある。スペイン北部の Galicia 地方には、1km を超える印象的な岩塊洞窟がある。

一般に、炭酸塩以外の岩石の洞窟は、地質学および生物学的な観点からは同様に重要であるにもかかわらず、あまり研究されていない傾向がある。洞窟は人里離れた場所にあることが多く、通常規模が小さく、大きな洞窟や地下河川、特に洞窟のような精巧な美的価値がないため、訪れる人も少なく、破壊行為にさらされることも少ない。溶岩洞窟はその例外で、世界的によく記録されており、観光地として地域的に重要であり、広範な科学文献が存在する。

Bibliography 参考文献

- Auler, A.S., Parker, C.W., Barton, H.A., and Soares, G.A. (2019). Iron Formation caves: Genesis and ecology. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 559–566.
- Frumkin, A. (1994). Morphology and development of salt caves. *National Speleological Society Bulletin* 56: 82–95.
- Kempe, S. (2019). Volcanic rock caves. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 1118–1127.
- Klimchouk, A. (2019). Gypsum caves. In *Encyclopedia of Caves* (eds. W. B. White, D. C. Culver, D. C., and T. Pipan). Academic Press: 485–495.
- Palmer, A.N. (2007). *Cave Geology*. Dayton, Ohio: Cave Books.
- Persoiu, A. and Lauritzen, S.E. (2018). *Ice Caves*. Amsterdam: Elsevier.
- Wray, R.A.L., and Sauro, F. (2017). An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstone and quartzites. *Earth Science Reviews* 171: 520–557.

Appendix 2: Complete Guidelines 付録2：完全なガイドライン

カルストと洞窟の価値

- (1) カルスト地域の効果的な計画には、地域の文化的および政治的背景の中であるすべての経済的、科学的、人間的価値を十分に理解する必要がある。
- (2) 管理者は、カルスト集水域においては、地表での活動が地下またはさらに下流に対して直接的または間接的な影響を与えることを認識する必要がある。
- (3) 洞窟の特徴とそのユニークな価値をよく理解することは、カルスト地域の管理を改善するために不可欠である。

カルスト環境と洞窟システムの特別な性質

- (4) 自然のプロセスの保護、特に水文システムは、カルスト景観の保護と管理の基本である。
- (5) カルストプロセスの中で際立っているのは、大気中の低濃度から土壌中の高濃度、そして洞窟内での濃度の低下までの、二酸化炭素(CO_2)濃度の変遷である。土壌中での二酸化炭素濃度の上昇は、植物の根の呼吸、微生物活動および元気な土壌無脊椎動物相による。この濃度変化は、カルスト地形の解決プロセスの効果的な運用のために維持されなければならない。
- (6) 集水域全体の管理の必要性は、カルスト景観・地形にとって、他の多くの岩相よりも重要である。
- (7) 現在、手付かずのカルスト景観は比較的少なくなっており、残っているものは最優先事項として保存および維持されなければならない。他の地域では、過去および現在の管理方法からの悪影響の是正に焦点を当てる必要がある。

カルスト領域の管理規模

- (8) 複雑なカルスト水文システム(または複雑な統合洞窟システム)に適用される単一の管理規定は、システムのさまざまな部分にわたって進行中の地形学および生態学的プロセスを適切に保護するとは考えにくい。したがって、管理計画は、カルストシステムのスケール要因を考慮する必要がある。
- (9) ほとんどの洞窟の生物は、地表環境から持ち込まれた食料源に大きく依存している。外部からの食物とエネルギーの加入は、生物の生存可能な集団の生存に不可欠であり、洞窟生態系へのエネルギー入力の種類と大きさは、生物集団の維持に不可欠である。
- (10) 個々のカルスト水文システム(または洞窟システム)には、活発な流路から不活発な高いレベルの通路、および接続が不十分な残存通路まで、いくつかの構成要素または種類の通路が含まれている場合がある。それぞれに異なる管理手法が必要になる。
- (11) カルストエリア内では、地下水汚染物質に対して非常に敏感な地域もあれば、感度が低い区域もある。したがって、カルスト地下水資源を保護するためには、包括的な土地利用計画が必要である。

レクリエーションとアドベンチャー・ケイビング

- (12) 洞窟の目録は管理の基礎として望ましいである。各洞窟で特に興味深い点は、図面上で特定する必要がある。
- (13) リスク評価は、洞窟のグループ、個々の洞窟、または洞窟内のセクションを、その場所に応じてカバーする必要がある。この評価は、人間の探検家に対するリスクと人間の探検家が洞窟にもたらすリスクの両方をカバーする必要がある。それぞれのタイプの特徴の脆弱性は、洞窟、または特定の用途に適した洞窟内のゾーンの識別を容易にするために評価する必要がある。
- (14) ケイビングの影響の管理は、利害関係者の関与のもとで戦略的な計画プロセスを通じてアプローチするのが最適である。適切なアプローチには、さまざまな施策を組み合わせる必要があると思われ、特にアクセスポリシーが常に重要な役割を果たす。
- (15) アドベンチャー・ケイビングを提供するインストラクターは、安全面と洞窟保護に関する適切な訓練を受けているということを証明しなければなりません。
- (16) すべての洞窟探検家は、ミニマムインパクト洞窟探検コード(MICC)に精通し、それに従うことを期待される。国や地域の MICC が保護地域に適用されない場合は、公開されたコードに基づいて特定のコードを考案するべきである。
- (17) 保護地域内の洞窟での掘削、独自の探査、研究は、特定の合意または許可申請によって管理されるべきである。
- (18) 保護地域管理者は、その地域で洞窟探検事故が発生した場合に実施できる計画を立てることが推奨される。この計画は、地域または国のケイビング機関と、事故や緊急事態に責任を追う公的機関の関与を経て策定されるべきであり、洞窟と地表への救助の影響を最小限に抑えるためのガイドラインを含めるべきである。
- (19) 観光開発されていない洞窟へのいかなる形態でも車両輸送を許可することは全く不適切であり、これらの洞窟はランニングイベントや他の種類のスポーツイベントに決して使用すべきではない。

観光洞窟

- (20) 既存の観光洞窟は、可能な限り高い基準で管理し、ISCA 推奨ガイドラインやここで提供されているガイドラインに準拠するよう努めるべきである。
- (21) 洞窟を観光洞窟に開発する前に、環境的および経済的持続可能性を決定するために徹底的な調査が行われなければならない。
- (22) すべての観光洞窟では安全が最優先事項でなければならない。
- (23) 特定の観光洞窟の訪問者の収容能力を決定することは、経済的目標を達成しながら、訪問者に安全で有益で楽しい洞窟ツアー体験を提供することと、洞窟環境への影響を最小限に抑えることとの間のバランスである。これらの要因のうち訪問者の経験、環境への影響、経済的目標の3つをすべて考慮する必要がある。
- (24) 地表工事が洞窟に与える可能性のある潜在的な影響を分析するために、洞窟の地表部分の詳細と地下の詳細を描いた敷地計画が必要である。

- (25) 観光洞窟の入口にある適切なインフラは、自然の洞窟環境を維持するために不可欠である。
- (26) 既存の観光洞窟であろうと新しい洞窟であろうと、すべての新規開発において、インフラストラクチャの必要性を慎重に評価し、現在のベストプラクティスを考慮して設計、設置する必要がある。
- (27) 洞窟内の電気照明網は、区域を分けて、観光客がいる洞窟の部分のみを効果的に照らすことが望ましい。光の使用は特定の特徴のみを照らし、訪問者の体験を高める雰囲気を作り出すために最小限に抑える必要がある。
- (28) 効果的な観光洞管理は、適応的なサイト管理を可能にするモニタリングによって支えられている。少なくとも、洞窟、動物相、気候、二酸化炭素濃度の基本的なモニタリングは、モニタリングスケジュールに従って実施する必要がある。
- (29) 観光洞の管理者は、観光洞のビジネスの管理とその環境保護の両方に有能でなければならない。
- (30) どの観光洞でも、ガイドは、洞窟と観光客の間の橋渡し役として非常に重要な役割を担っている。ガイドが特定の洞窟の価値と観光客のための説明について適切に訓練されていることが不可欠である。
- (31) すべての観光洞は、一般の人々が洞窟環境をよりよく理解し、鑑賞できるように、高品質の解説情報を開発する必要がある。

地表のカルストでの冒険と観光活動

- (32) 険しく人里離れた地表のカルストには、生物多様性と地理的多様性の価値が認識されていない可能性があり、どのような条件下で、どこで冒険や観光活動を許可するかについて決定するための一環として、調査や評価が必要である。
- (33) 地表でのカルスト活動をサポートするために必要なインフラは、カルストに視覚的にも完全性の面でもほとんど影響を及ぼさず、必要に応じて将来容易に取り外してカルストをほぼ自然な状態に戻すことができるように設計および設置されるべきである。

科学研究

- (34) 洞窟やカルストを有するすべての保護区は、研究の管理に関する方針を策定し、研究は申請、承認された場合のみ許可されるものとする。
- (35) 洞窟の研究がしたい者は、洞窟環境とその地域における最小影響ケイピングコード、もしくはそのコードの遵守が保証できる経験豊富な洞窟学者と協働することが望ましいである。
- (36) 管理計画を持っている洞窟は、研究活動に関する部局があるはずである。
- (37) 保護地域の内外を問わず、洞窟やカルストで働く全ての研究者は、潜在的利益と環境ならびに文化的価値を有する対象へのダメージとなるリスクとの比較を含めた、提案を慎重に評価するべきである。
- (38) 動物相、鍾乳石、堆積物のサンプリングを最小限に留めることに重点を置くべきである。研究者は、学術メディアだけでなく一般の人々が容易に理解できる形でも結果を公表するよう務めるべきである。研究者は、プロジェクトの完了時に機器の撤去と(必要に応じて)現場の原状回復に務める必要がある。

農林業

- (39) 農業活動は地生態系に対して甚大な悪影響を与える可能性がある。保護区の管理者は、(a) 提案された土地利用の変更に特に注意を払い、(b) 水量と質への影響を最小限に抑えるために、農業の種類と地上の特定の条件に適したガイダンスを提供する必要がある。
- (40) 土地利用に関して、通気性、骨材安定性、有機物含有量などの土壌特性の侵食損失および変化を最小限に抑え、良好な状態の土壌生物相を維持するために、耕作地を慎重に管理する必要がある。牧草地は植生被覆を維持し、特にその貯蔵レベルに注意を払った管理をするべきである。ドリーネは局所的な集水をするため自然状態を維持する必要があり、決して埋め立てたり廃棄物の投棄所にしたりしてはなりません。
- (41) 緩衝地帯は汚染物質および公害物質を地下へ移動させる導管である。したがって、伏流を有する小川、ドリーネ、あるいはその他の自然開口部などの集水域の周囲に可能な限り配置する必要がある。農地では緩衝地帯での耕作は許可されるべきではなく、耕作地を起源とする流出物中の堆積物を濾過するための完全緑化が維持されるべきである。森林では、緩衝地帯における原生植生の保全と潜在的な強化が重要である。
- (42) 水量に関しては、灌漑用地下水の取水量を管理するべきである。雨水利用は可能な限り行い、
- (43) 水質に関しては、害虫や雑草を防除するために必須でない限り、農薬や除草剤の使用を推奨しない。肥料の使用量を減らし、可能であれば天然肥料を使用する必要がある。集水が集中する区域の周辺に立地する緩衝地帯は大事にしなければならず、土壌が飽和状態を呈するまたはその状態に近しく、カルストへの化学物質を流し込むリスクがある場合には、化学物質を用いてはならない。
- (44) カルスト地域で伐採や林業を行う前に、その地域の目録と地図の作成、感度および/または脆弱性の評価、ならびに適切な管理方法の開発を行う手順が必要である。特定のカルスト集水域内における林業活動の種類と規模に関する事前分析に加え、管理がどのように実施され、どの程度敏感なカルスト地域が保護されているかを確認するための、追跡モニタリングを検討する必要がある。
- (45) 成熟林や繁殖林を含むカルスト地形で発達した自然林は、切り出したり、伐採したり、または人為的影響を受けてはならない。代わりに、これらの自然林は、地表および地下のカルスト環境が生態系サービスの恩恵を享受し続けるよう、適切な保全管理によって厳しく保護されるべきである。
- (46) 原生林が伐採され外来種が卓越する地域では、管理者はその場所の生態学的条件に最も適した森林の種類によって外来種を追い出す計画を考案する必要がある。

資源開発

- (47) カルスト保護地域において、供給不足で経済的または戦略的価値の高い鉱物の代替供給源がないと示されない限り、新たな鉱山の建設や採石を行わないことを前提とする必要がある。
- (48) カルストに新しい鉱山や採石場を建設するいかなる提案も、地表水とカルスト地下水を介した遠方への影響の可能性と同様に、その地域と境界内の両方の特徴を考慮した詳細な環境アセスメントの対象となるべきである。
- (49) 環境アセスメントは、洞窟とカルストの地形と生態系の価値を説明し、評価する必要がある。また、それほど重大な影響を与えないような、採掘のための代替地があるかどうかを評価しなければならない。代替地がない場合

、洞窟生態系の完全性と水文学的プロセスの継続性を保護するために、可能な限り、重要な洞窟とカルスト地形の周りに、慎重に設計された緩衝保護地帯があるべきである。

- (50) 破壊以外の方法が取れない場合、特徴物は記録され、そうすることが妥当と判断される場合は科学研究のために取り除かれるべきである。すなわち、古環境研究のために鍾乳石と堆積物を記録して除去する。
- (51) 開発が許可される場合は、適切に設計された環境保護システム、および操業中の状態や保護システムの有効性を記録するためのモニタリング実施要項が必要であり、必要に応じて変更を加えることができる。また、適切な修復と長期的なモニタリングを含む詳細な閉鎖計画が必要であり、閉鎖のための資金が利用可能であることを保証するために事前に支払われる保証金も含まなければならない。

インフラ開発

- (52) カルスト地域での建設計画の実現性を計るすべての研究は、建設場所、詳細な環境評価、保護用の緩衝地帯の広さなどを慎重に検討する必要がある。建設計画や都市開発をカルスト地域から遠ざけることが可能な場合、それはカルスト地域にとって、経済的にも環境的にも前向きな決定となりえる。
- (53) 建設中および建設後に発生する気体、液体、固体の廃棄物を処理するための規約が策定され、適用されるべきである。規約は、大気、土壌、エピカルスト、カルスト帯水層の上部域を含む、カルスト臨界地域全体に及ぶよう作られるべきである。
- (54) カルスト地域の建築基準は、地震や洪水の発生しやすい地域と同じ方法で施行されなければならない。カルスト地域の都市区画は、カルスト地域固有の特異性と脆弱性を考慮する必要がある。
- (55) しっかりとした科学的根拠と法律に基づいた計画の枠組みを、地方、地域、国の各レベルで立てて実行する必要がある。
- (56) 特に発展途上国においては、カルスト地形の脆弱性を土地所有者や都市住民に知らせるための教育的な取り組みが必要である。
- (57) 保護地域では、インフラ開発は最小限にとどめ、可能であれば洞窟やカルスト地形から離れた場所で開発を行うべきである。
- (58) 適切な保護区管理計画は、不要な快適さを提供するのではなく、環境と訪問者の両方を保護する方向で、区域内の建造物の長所と短所を慎重に検討する必要がある。洞窟内での大規模なインフラ開発計画は、必要不可欠なものでない限り、推奨されるべきではない。
- (59) 危険物は細心の注意を払って扱われ、流出を最小限に抑えるために適切に規制されるべきである。危険物に関する事故の初期対応者は、カルストに対する特別な対応方法について訓練を受けるべきである。
- (60) ガソリンなどの燃料、溶剤、下水などの有害廃棄物は、決して地下に流してはならない。地下水の調査や水質の回復は非常に困難であり、費用もかかる。可能な限り、危険物は地表に封じ込められ、除去されるべきである。潜在的な環境影響のより詳細な調査は、経験豊富なカルストの専門家が行うべきである。

水の供給

- (61) 泉、井戸、洞窟などの、カルスト地域の水源を保護するための緩衝地帯を定義する。これらの保護区では、適正管理された肥料の使用制御された水汲み上げを含む、農作業に関する規約を確立する必要がある。湧水の保護区域を実施するためのいくつかの理論体系が提案されているが、それらはヨーロッパやアメリカのみで広く適用されているのみである。
- (62) カルスト環境の特殊性に関連して、固形廃棄物、衛生廃棄物、有害廃棄物の不適切な処分を避けるために、土地所有者と一般市民の意識を高める教育的な取り組みが必要である。
- (63) カルスト地形の影響を受けやすく、利用頻度の高い地下水系にある主要な湧水と選定された井戸に、確固としたモニタリングシステムを確立する必要がある。長期的かつ高解像度の遠隔モニタリングは、現在多くの湧水で可能であり、より広く実施されるべきである。
- (64) 各国はカルスト水を繊細で有限な資源として扱い、水の採取を管理・規律する法律を施行し、汚染された場合に迅速に対応できるよう適切な資金を確保するべきである。特に、浄化槽の適切な設計と設置、埋立地の位置に関する提言については、その通り実践されるべきである。
- (65) カルスト環境における多くの汚染物質の作用についてはほとんど知られていないため、科学的調査を進めるために十分な資金を提供する必要がある。
- (66) 効果的なモニタリングと負荷の軽減モニタリングは、洞窟やカルスト地形の資源を管理・保護する上で、特に保護区においては不可欠な手段である。継続的なモニタリングから得られる結果は、管理に必要な情報を提供し、影響を軽減するために利用することができる。
- (67) モニタリングの取り組みは、その自然資源の価値や重要性、脆弱性、事実または予測される脅威や影響の重大性に基づいて優先順位をつけ、集中して行われるべきである。
- (68) 地下水の汚染は、カルスト地形において特別な問題を引き起こすため、常に最小化し、モニタリングされる必要がある。このモニタリングは、単に一定の間隔で行うのではなく、問題が発生する毎に行うべきである。溶質と化学的汚染物質の濃度は、一般的に低流量時に最も高くなるが、カルストシステムを通じて汚染物質が最も流入するのは、暴風雨や洪水の時である。
- (69) 負荷に弱い地域での高頻度のモニタリングは、それ自体が影響を与える可能性があるため、決定的に必要な場合を除き、避けるようにする。可能であれば自動化されたモニタリングを、優先的に行うべきである。
- (70) 適切な管理には、多くのカルスト地形、特に洞内の地形が再生不可能であることを認識し、損傷した地形を可能な限り回復させることが求められる。
- (71) 可能な限り、カルスト地域の自然のシステムとプロセスは、維持または修復されるべきである。もし介入が必要な場合は、自然を基盤にした解決策、特に自然のプロセスに同調し、工学的な解決策よりも環境的に持続可能な解決策を用いることが望ましい。

- (72) カルスト地域管理への先住民の参画先住民族がいる保護地域については、現地管理委員会との共同管理システムを確立するための法的・政策的基盤が必要である。委員会の主要な利害関係者および権利所有者は地域住民と保護区管理当局であり、副次的な利害関係者は関連政府機関になる。
- (73) 先住民族がいるカルスト保護地域では、伝統的な知恵と慣習的権利に基づく参加型の土地区画整理が必要である。これには、経済活動を行う管理利用区域と、自然保護が第一の目的である完全保護区域が含まれることが理想である。
- (74) 先住民族がいる公園の管理者は、適切な言語で書かれた地域社会との共同管理協定を作成し、管理と経済活動のために、各自治体が明確に定義された区域を持つようにすべきである。
- (75) 先住民族がいる公園の管理者は、保護地域管理活動に地元の人々を巻き込むべきである。自然保護活動や洞窟やカルストハイキングでの観光案内は、重要な雇用機会を創出し、自治体の活性化に貢献する。自然保護官やガイドに、多くの訪問者が使うであろう言語や自然史の教育を行う取り組みが不可欠である。
- (76) 最善の管理の鍵となるのは、訪問者に科学的に正確な情報を提供し、適切で負荷の少ない調査を促進することである。