

令和 5 年 4 月 24 日現在

機関番号：82620

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K01132

研究課題名（和文）鍾乳洞における照明植生を軽減する光環境に関する実験的研究

研究課題名（英文）Experimental study on the luminous environment for reducing lampenflora in limestone caves

研究代表者

朽津 信明（Kuchitsu, Nobuaki）

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・室長

研究者番号：50234456

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：各地の鍾乳洞における照明植生の繁茂状況について調査し、水分供給が十分な場合には、年間積算照度 $5.44E+4lxh$ 以上の地点で繁茂が顕著となり、 $3.87E+4lxh$ 以下の地点で顕著でない傾向を明らかにした。ただし、年間積算照度 $3.87E+4lxh$ 未満でも照明植生が認められた箇所もあったため、年間積算照度だけで照明植生をコントロールできるとは言えない。一方、光合成で使用されにくい光なら目安の照度以上でも照明植生を軽減できることが確認されたため、光合成に使用される成分を軽減しながら肉眼では白色に見えるようなLED光源を開発したが、その照明植生軽減効果は限定的であり、さらなる検証が必要な状況である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

照明植生の繁茂が鍾乳洞鑑賞の妨げとなっていることは新聞紙上でも取り上げられており、社会的関心を生んでいる。本研究によって、数多くの事例に基づいて照明植生繁茂の目安となる年間積算照度の値を具体的に示せたことは、特定の条件にある鍾乳洞という話ではなく、また鍾乳洞ばかりでなく古墳なども含めた様々な環境にある対象において、良好な見学環境を与えていく目安を示せたことになる。また、その制御に関して、単に積算照度を下げるという方向性だけでなく、照明を工夫することで、見学に違和感を与えず、通常の白色照明に比べれば照明植生の繁茂を促しにくいという照明を製作できる可能性を示せたことは学術的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：The study on the thriving status of lampenflora in limestone caves at various locations revealed a trend that, when moisture supply is sufficient, thriving vegetation is more conspicuous at sites with an annual integrated irradiance of more than $5.44E+4lxh$ and less conspicuous at sites with less than $3.87E+4lxh$. However, it cannot be concluded that lampenflora can be controlled only by the annual integrated irradiance, because lampenflora was also observed at some sites with an annual integrated irradiance of less than $3.87E+4lxh$. On the other hand, it is possible to reduce lampenflora by using light without component wave length used for photosynthesis, even at illuminance levels above the guideline above. Therefore, an LED light source was produced in this study by reducing the components used for photosynthesis as much as possible while still appearing white to the naked eye. However, the effectiveness in reducing lampenflora was limited and further verification is required.

研究分野：保存科学

キーワード：年間積算照度 藻類 LED

1. 研究開始当初の背景

2018年に、特別天然記念物である山口県の秋芳洞において、鍾乳石の表面が緑色になり、本来の外観が損なわれているというニュースが新聞各紙で取り上げられた。鍾乳洞に限らず、古墳や磨崖仏など、文化財の表面が緑色の生物で覆われることで、本来の外観が損なわれるケースは頻繁に指摘されている。こうした現象は、基本的に照明に起因して光合成生物が繁茂することで生じる現象で、緑色物質は一般に照明植生と呼ばれている。洞窟など、本来は光が与えられにくい場所で照明植生が繁茂するのは、基本的には見学者のために人工照明が取り付けられたことに起因していると考えられる。その際、古墳時代の横穴墓などにおいて、見学者が外から対象物を覗き込む状況の場合には、見学対象の場所における照度の制御が試みられる場合がある。具体的な積算照度の目標値が議論された研究もあり、実際に対策によって照明植生が軽減された実例も知られている。これに対して鍾乳洞では、一般には見学者が鍾乳洞の内部に入って探検しながら、広さや構造の複雑さを実感する場合が多く、照射時間や照度をコントロールすることで積算照度に達成目標を設定する方法は、見学者の安全性の面を考えた場合に容易に実現できるとは考えにくい。また、化学薬品や紫外線などを利用して照明植生を除去する試みも行われて実績が上がっている現場もあるが、天然の鍾乳洞に対してそこまで人為的介入が求められているかは疑問で、鍾乳洞でそれを行うのが相応しいかどうか、すぐに結論の出せる問題ではない。

一方、光合成で利用される光の成分は一部分であることから、人工照明の波長を制御することで照明植生の繁茂を軽減する研究もなされているが、可視光で波長制御された光は特定の色を発することになり、鍾乳石のように本来は基本的に白色を呈するはずのものの見学のために、色のついた照明を当てることは見学者に違和感を与えとも予想され、それはそれで本来の価値を伝えることに弊害をもたらす可能性を含む。この点に関して、アメリカやヨーロッパの鍾乳洞では、光合成には利用されにくく、かつなるべく違和感を与えにくい光として、黄色の照明を当てることで照明植生の繁茂を軽減する試みが行われているところもあるが、歴史的に白熱灯が室内照明の主体だった欧米諸国と、蛍光灯が主体だった日本とでは、見学者が違和感を覚える光に差異が存在する可能性が高いと予想される。単に照明植生を軽減するというのではなく、鍾乳洞の持つ本来の価値を、なるべく有効に見学者に伝えることが求められているのであり、その障害となっている照明植生を軽減することも有効な一つの手段だが、鍾乳石の持つ本来の色彩がなるべく損なわれることなく見学者に提示されることも求められていると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、最終的には鍾乳洞の価値を的確に守り、かつ人々に有効に伝え、さらには次の世代へと適切に継承していくことである。一見すると、自然に形成されてきた鍾乳洞は、人間が介入しなければそれだけで自然の状態が守られるように思われるかも知れないが、現実には放置されたことでこれまでに自然災害などの人間以外の営力によって失われてきた天然記念物は少なくない。だとすれば、たとえ天然記念物であっても、その価値を守り適切に人々に伝えて行くためには、ある程度は人間が介入する必要があるかも知れないことを意味し、そのための人々のコンセンサスを得るには、なるべく価値を人々に伝えて理解を得る必要があると考えられる。鍾乳洞のうちの大半は、本来は光の供給が極端に乏しい環境にあったと考えられるが、人間の観光目的でそこに人工照明が与えられるようになってから、それまでは存在が顕著ではなかったはずの藻類や蘚苔類などの緑色生物（照明植生）が表面に繁茂するようになり、鍾乳石などの本来の姿を鑑賞するのが困難な状態となっている場合が多く見られる。そうした照明植生の多くは、自然の状態では存在しなかったものと考えられることから、鍾乳洞の価値を人々に正しく伝えるためには、基本的にはそれらの繁茂は軽減されるのが好ましいと考えられる。

照明植生を単に制御することが目的であれば、実はそれ程難しい話ではなく、鍾乳洞に人工的な光を全く供給しなければ、恐らくは照明植生は激減し、本来の表面がある程度までは取り戻されるだろうが、それでは見学者が鍾乳洞を有効に鑑賞することができなくなってしまい、価値を有効に伝えられなくなる。そうではなく、見学者にきちんと価値を伝える前提で、なるべく鍾乳洞本来の姿を鑑賞してもらうことが必要と考えられる。このことから、なるべく照明植生を抑制しながら、適切に鍾乳洞本来の状態を人々に見せていく方法を提案することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

3.1. 風連鍾乳洞の調査

本研究における主たる研究対象として、国指定天然記念物である、臼杵市の風連鍾乳洞を対象として照明植生の状況調査を行った。調査時点における計測値に基づいて、照度の値と緑色生物の繁茂状況（測色値）の計測から、照度と照明植生との関係を把握した。また、洞窟内での通電時間に基づいて、洞窟内での照明の照射時間を計測することから積算照度を推定し、積算照度と照明植生との関係についても考察した。また、洞内で鍾乳石を覆って存在している照明植生についてサンプル採取して同定し、またそれを単離することで、鍾乳石表面に繁茂する照明植生の生

物学的性質を解析した。

3.2. 新たな照明の考案

洞窟に繁茂する緑色生物の波長特性を計測すると、おおむね赤色光と青色光とを吸収し、緑色光を反射する傾向が認められることから、その両者を除いて緑色光のみを照射すれば、繁茂を制御できる可能性が従来から指摘されていた。しかし、特別な演出効果を想定するのではない限りは、緑色の光で白色の鍾乳石を見せるのでは、鍾乳洞の価値を十分に伝えられない場合も考えられる。そこで、なるべく赤色光と青色光の成分を含まず、それでも、肉眼的には白色に見えるような光を試験的に作成した。これにより、鍾乳石を本来の色で鑑賞でき、また光合成で使用される成分の光を理論上は軽減した状態の照明の開発を試みた。

3.3. 室内実験

風連鍾乳洞で鍾乳石を覆って存在していた緑色生物を単離・培養し、それを用いて室内実験を試みた。単離された緑色生物に、照度条件が同じになるように、片方には白色 LED を照射し、もう片方には上記 3.2 で開発した新たな白色照明を照射し、その後の繁茂状況を比較して評価した。

3.4. 関連資料の調査

風連鍾乳洞以外に、公開されている鍾乳洞における照明植生の状況を調査し、あわせて、鍾乳洞以外でも、関連する文化財における状況を調査して、比較検証した。

研究期間中に調査した鍾乳洞は以下である。山口県美祢市の特別天然記念物・秋芳洞、同市の天然記念物・景清洞、大正洞、香美市の国指定天然記念物・龍河洞、高知市の高知県指定天然記念物・菖蒲洞、長崎県西海市の国指定天然記念物・七ツ釜鍾乳洞、沖縄県南城市指定天然記念物・玉泉洞、和歌山県由良町の戸津井鍾乳洞、熊本県球磨村の国指定天然記念物・球泉洞、岡山県指定天然記念物である新見市の井倉洞。

また、研究期間中に調査した鍾乳洞以外の関連文化財も含めて、成果を学会発表もしくは論文発表した。上記に示した以外の対象は、茨城県指定有形文化財である直牒洞、天草市指定天然記念物である、アンモナイト館、国指定史跡である石人山古墳、国指定史跡・和歌山城内の穴蔵状遺構、国指定史跡である石人山古墳、国指定史跡であるフゴッペ洞窟、である。

4. 研究成果

風連鍾乳洞での観察を中心としながら、他の様々な鍾乳洞や、類似した公開環境にある人文系の文化財などで供給される照明と植生との関係を精査した結果、積算照度の概念が照明植生の繁茂と一定の関係性を持つような傾向が見出された。これにはもちろん、それぞれの岩質、水分供給条件、化学成分など、照明以外の様々な要因の影響も考えられるものの、それらの諸条件に大きな違いがない場合には、おおむね積算照度の値が大きい地点で植物繁茂が多く、小さい地点では植物繁茂が少ない傾向が一般的に認められた。鍾乳洞に与えられる人工照明には様々な種類のものがあり、また関連調査を行った対象では自然光で公開が行われている文化財もあるが、植物繁茂が顕著な地点とそうでない地点との照明環境を比べると、だいたい年間積算照度で $5.44 \times 10^4 \text{lxh}$ を超えるような地点では、照明植生の繁茂が見られる傾向が認められた。これが照明植生繁茂の目安の値と考えられ、また $3.87 \times 10^4 \text{lxh}$ よりも低い地点では、繁茂が乏しい傾向が認められた。これが繁茂を軽減する目安の値と考えられ、この両者の間に照明植生繁茂の閾値を想定することが一応は可能と考えられるに至った。

ただし、 $3.87 \times 10^4 \text{lxh}$ という年間積算照度は、1日あたり8時間の照射で一年間公開が続けられる場合で考えると、瞬時値としては131x程度の照度条件に相当し、そのレベルの光では鍾乳石を十分に見学することが難しいような場合も予想され、また洞窟内の公開環境として安全性の面でも問題が生じる可能性がある。こうした理由から、照明の波長特性を検討することによって、ある程度の照度が与えられても、照明植生の繁茂を誘引しないような条件を検討する方向にも研究を進めた。

単色 LED を選択的に組み合わせることで、光合成に利用される波長域をなるべく減らしながら、白色に見える照明を試作した。その結果、鍾乳石を想定した白色物質以外に、赤、青、緑、黄色、黒、など、想定される一通りの色彩を持つ物体色について、あまり違和感なく色を実感することができる照明であることが確認された。これを用いて、風連鍾乳洞で本研究により同定されたシアノバクテリアの *Pseudanabaena* 属を用いて繁茂実験を行ったが、今回の実験条件ではこの照明が白色 LED に比べて明瞭な繁茂軽減効果を持つと言えるような状況は確認できなかった。これは、この光源が光合成に使用される成分も実際には含んでおり、また今回の実験は実際の鍾乳洞の公開環境からすると高い照度環境で実験を試みたことが一因となっている可能性も考えられた。そこでさらに照明を改良して、光合成に使用される成分をさらに軽減しつつ白色に見える光源を開発した。ただし、この光源の有効性に関する実験は行えておらず、今後のさらなる検証が望まれるところと言える。

以上、本研究で得られた成果は、以下のようにまとめることができる。

- ① 岩質、水環境、化学的な栄養条件などによって異なることが予想されるものの、十分な水分供給がある地点では、年間積算照度を $3.87 \times 10^4 \text{lh}$ 以下に抑えることで、鍾乳洞内の照明植生を軽減できる可能性が期待できる。
- ② 単色 LED を組み合わせることで、光合成で使用される成分を軽減しながら鍾乳石が白色に見えるような光源を作ることが可能である。ただし、実際に照明植生を軽減できるかどうかについては、引き続きさらなる検証が必要である。

このような考え方に基づいて、今後鍾乳洞の価値を適切に人々に伝えていくことに貢献できることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---------------------------------------|---------------------|
| 1. 著者名 朽津信明・森井順之・柳沼由可子・廣瀬浩司 | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 天草市・アンモナイト館における緑色生物の制御 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 保存科学 | 6. 最初と最後の頁 85-97 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 朽津信明、犬塚将英 |
| 2. 発表標題 常陸太田市・直牒洞の光環境と緑色生物 |
| 3. 学会等名 文化財保存修復学会第43回大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 朽津信明、森井順之、柳沼由可子、廣瀬浩司 |
| 2. 発表標題 天草市アンモナイト館における照明調整による緑色生物の軽減 |
| 3. 学会等名 文化財保存修復学会第42回大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 黒坂愛美、佐藤嘉則、片山葉子、朽津信明、西澤智康 |
| 2. 発表標題 風連鍾乳洞内に生育する照明植生の微生物叢解析 |
| 3. 学会等名 第14回日本ゲノム微生物学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 佐藤 嘉則 (Yoshinori Sato) (50466645) | 独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・室長 (82620) | |
| 研究分担者 | 西山 賢一 (Ken'ichi Nishiyama) (60363131) | 徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授 (16101) | |
| 研究分担者 | 犬塚 将英 (Masahide Inuzuka) (00392548) | 独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・室長 (82620) | |
| 研究分担者 | 西澤 智康 (Tomoyasu Nishizawa) (40722111) | 茨城大学・農学部・准教授 (12101) | |
| 研究分担者 | 片山 葉子 (Yoko Katayama) (90165415) | 独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・客員研究員 (82620) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|