

フゴッペ洞窟における照明制御による緑色生物繁茂への対策

朽津 信明・浅野 敏昭*1・江本 匡*2・伊藤 尚久*2・田保 (石原) 知佳*2
 ・三田 直樹*3・芳賀 卓*4・石田 宏司*5

1. はじめに

屋外石造文化財の表面に、緑色の植物が繁茂する現象は、頻繁に指摘されている¹⁾。こうした緑色生物は、洞窟遺跡や古墳の石室のような、自然状態では外光の差し込まない現場であっても、見学者用の照明などの影響によって繁茂しているのが観察される場合が少なくない²⁾。文化財表面におけるこうした植物の存在は、場合によってはそれが存在している方が「趣があつて良い」という意見も稀に耳にされる場合もあるものの、一般には好ましくないと考えられる場合が多く¹⁾、特に表面に壁画のようなものが描かれている文化財の場合には、壁画の損傷に繋がりがかねない問題となることが懸念される。

文化財表面における既存の緑色生物を、能動的に除去するかどうかについては、様々な議論があろうが、少なくとも文化財の損傷に繋がる恐れがある状況にあるならば、最低限それ以上のさらなる繁茂を軽減する対応は望まれる。そのためには、問題となる緑色生物の増殖する条件を正確に理解した上で、それに適した状況をなるべく与えないことが対策に繋がろう。

植物の繁茂には、理屈の上では水と光と二酸化炭素の存在が直接的な原因として挙げられるが、文化財保存だけを目的とした二酸化炭素の制御というのは現在のところ非現実的であることから、現実には水と光との制御が、緑色生物の増殖を軽減する対策として考えられる。このうちの水に関する制御は、植物の問題のみならず、塩類風化や凍結劣化など、石造文化財の劣化に関する他の主要な要因とも密接に関係していることもあつて、これまでも数多くの研究がなされてきている³⁾。これに対して、光の影響については、少なくとも植物繁茂を軽減する目的での、その制御に関する研究は、これまでは殆ど行われてきていない。

そこで本研究では、北海道余市町のフゴッペ洞窟で壁画表面に観察された緑色生物について、その性質を解明するとともに、そのさらなる繁茂を軽減する方法について、主として照明を制御することから検討することにより、同様の問題を抱える文化財の保存に対しても貢献することを試みるものである。

2. フゴッペ洞窟とその現状

フゴッペ洞窟は、北海道余市町に位置する、内部に主として線刻の壁画が残されている海蝕洞窟で、国の史跡に指定されている(図1)⁴⁾。洞窟は、1950年に発見されて以後、1972年には保存施設が完成し⁵⁾、現在は洞窟は密閉に近い状態で、見学者はガラス越しに壁画を見学できるようになっている(図2)。しかしながら保存施設の完成後既に30年近くが経過して、壁画の保存状態には良好とは言えない面も目立つようになってきており⁶⁾、平成9(1997)年度に新たにフゴッペ洞窟保存調査委員会が発足して、保存対策が検討されている。

このフゴッペ洞窟の壁画部分を覆いながら、緑色生物が繁茂する部分があることについては、遅くとも1980年代から指摘がなされていたが、近年になって特に問題視されるようになってきていた⁷⁾。現在は洞窟の最奥部の断層付近を中心に、その周辺部分や、北側壁面などにおいて、緑色生物の繁茂が顕著に観察される(図3)。1950年の発見直後や、その後の発掘調査

*1 余市町教育委員会 *2 (株)エコニクス *3 独立行政法人産業技術総合研究所 *4 北海道教育大学岩見沢校
 *5 千歳科学技術大学



図1 フゴッペ洞窟の壁画

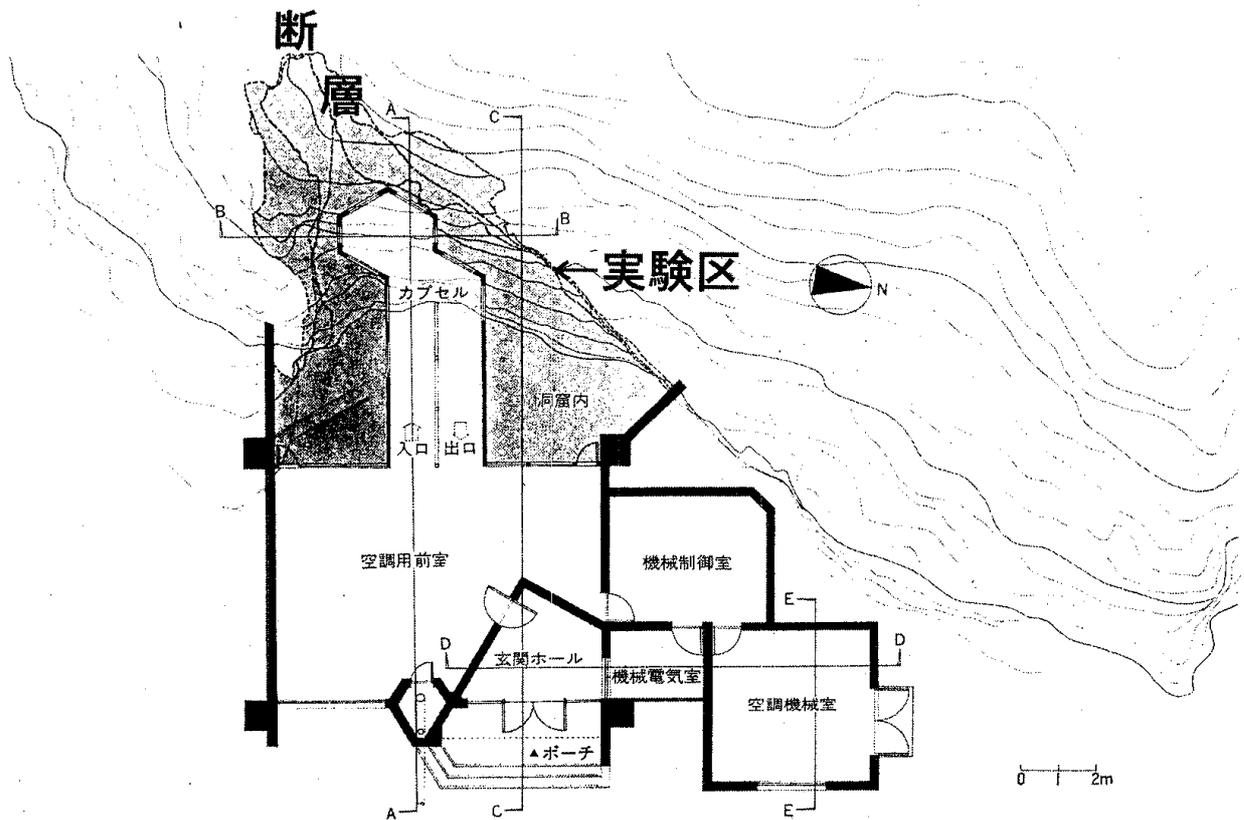


図2 フゴッペ洞窟平面図

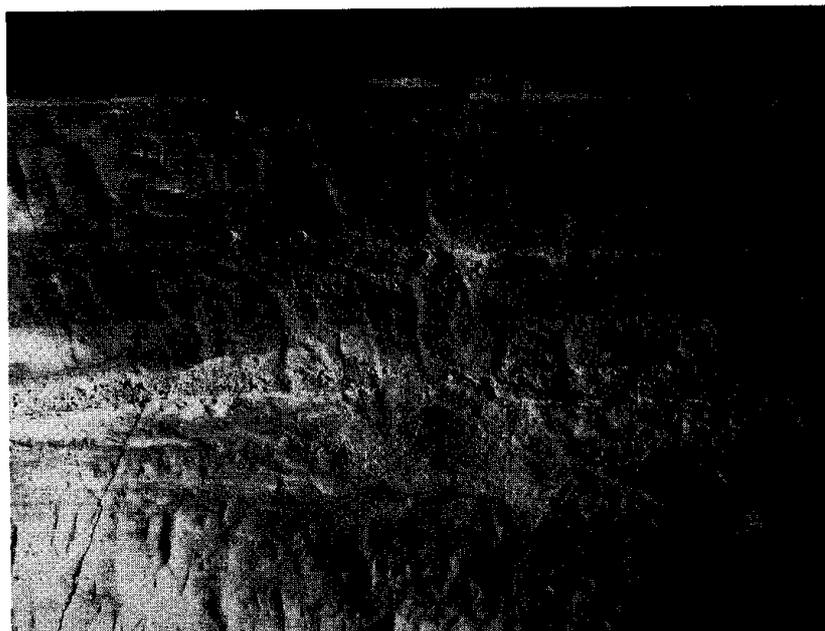


図3 線刻壁画表面に繁茂する緑色生物

の際には、緑色生物の問題は記載されていないことから⁵⁾、壁画を覆う緑色生物は、その後の公開環境の中で顕著になってきたものと考えられている⁶⁾。

壁面における緑色生物は、肉眼的には二種類のタイプに分類される。片方は相対的に暗い緑色を示し ($L^*=16.5$, $a^*=-1.4$, $b^*=11.4$)、比較的厚み (2 mm以上) を持ってビロード状に壁面に付着するタイプであり、これは主として洞窟最奥部の断層付近に集中して観察される。もう片方は相対的に明るい緑色 ($L^*=18.3$, $a^*=-3.3$, $b^*=10.1$) を示し、壁面に膜状こびり付く状態で薄く (2 mm未満) 存在し、これは洞窟全体で一般的に観察される。むろん、両者が混在しているように見られる部分も多いが、一般には両者のいずれが卓越しているか、ある程度は肉眼で分類が可能である。なお、それ以外にも、例えば肉眼的に珪藻の亡骸ではないかと推定される白色の物質や、菌類などのその他の生物と推定される物質なども観察されることがあるが、それらに比べて緑色生物は圧倒的に分布が広く、また肉眼的にその存在が顕在化して感じられるため、本研究では特にこの二種類の緑色生物を観察対象とする。

3. 緑色生物の同定

3-1 可視光反射スペクトル

現場において、暗緑色のビロード状の部分と明緑色の膜状部分のそれぞれ最も代表的と思われる部分において、分光色彩計 (ミノルタCG-422c) にて可視光反射スペクトルを測定した。結果は図4に示す。

両者とも 560nm付近に反射のピークを示し、400 ~ 500nm付近に緩やかな吸収を示した。また、暗緑色部分は、620nm付近と 680nm付近に、そして明緑色部分は 660 ~ 680nm付近に比較的シャープな吸収を示した。

3-2 種の同定

洞窟において自生する、暗緑色、明緑色それぞれ代表的な部分について、現場で観察を行うとともに、採取した試料をそのまま位相差顕微鏡で観察した。さらに、試料を滅菌水の中で攪拌し、数回希釈した後、寒天平板培地上に塗布し、20℃、約 1500lux、12-12L/Dサイクルの条件下で培養を行った。培地は、C培地およびCT培地に寒天を添加したものをを用いた。数週間後、

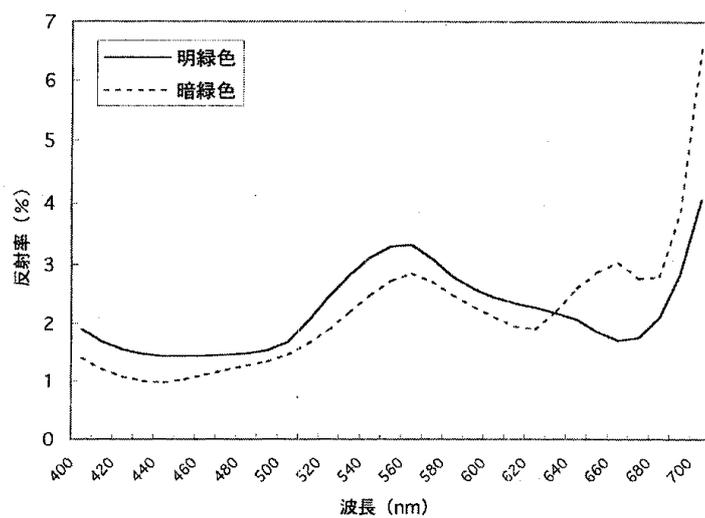


図4 各緑色生物の可視光反射スペクトル

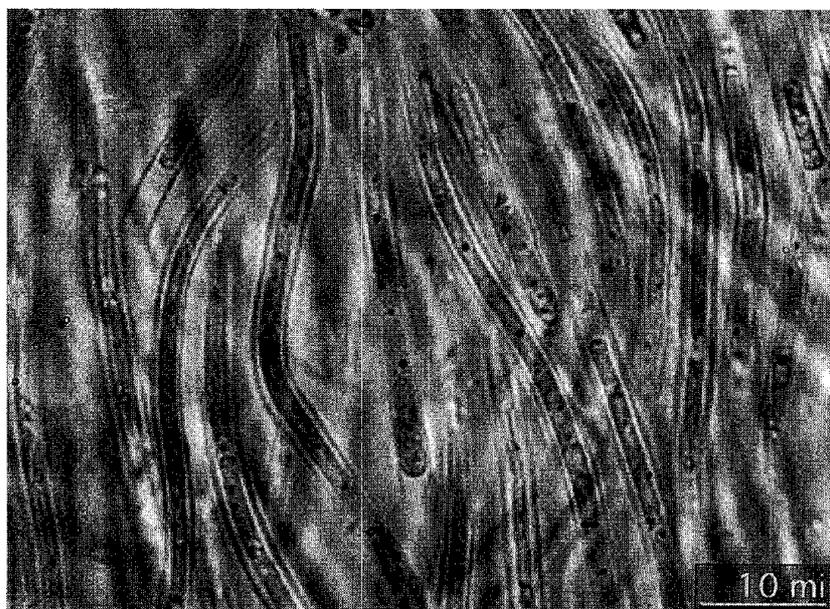


図5 暗緑色生物の位相差顕微鏡写真

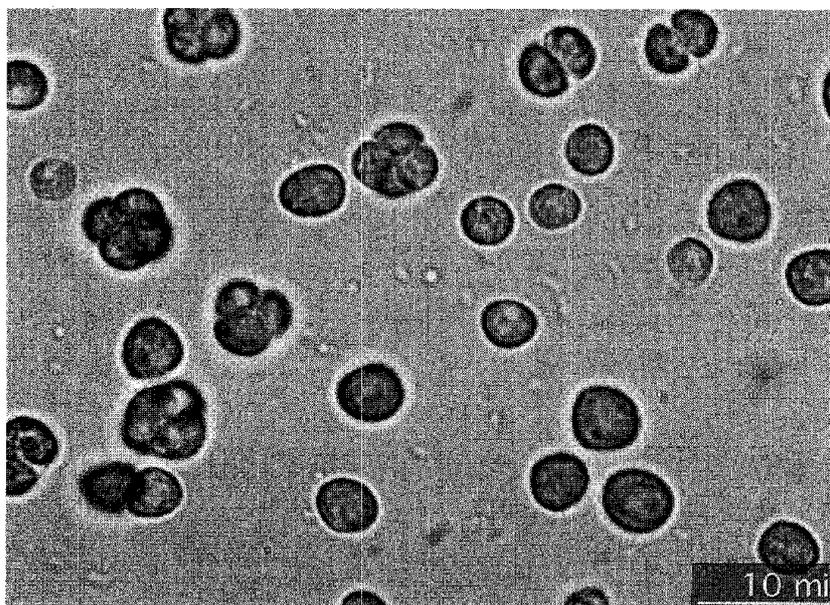


図6 明緑色生物の位相差顕微鏡写真

培地上に形成されたコロニーを、C培地およびCT培地を用いた液体培地に移植し増殖させ、位相差顕微鏡にて観察した（図5, 6）。

暗緑色の生物は、洞窟壁面にマット状に付着し、そのマットから短円錐状の糸状体の束が多数立ち上がる。これらはおおむね平行に並ぶ糸状体の集合で、それぞれの糸状体は鞘に囲まれ、ごく稀に偽分枝状に枝分かれする。このような半気生性ないし土表性的な生態的性質、ならびに植物体の外形、および糸状体の形態から、この植物は藍藻植物（*Cyanophyta*）、ユレモ目（*Oscillatoriales*）、ユレモ科（*Oscillatoriaceae*）のシンプロカ属（*Symploca*）であることが認められた。さらに、糸状体の形状と幅（ $2.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ ）、細胞の幅（ $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ）と長さ（成長の盛んな糸状体で $2.3 \sim 3.5 \mu\text{m}$ ）、および鞘がクロルチンクヨードで染色されない性質などから、*Symploca thermalis var. thermalis* と同定された。この種は元来は温泉産であるが、フゴッペ産のものは形態的にこれに合致する。

なお、分離・培養された藻体では鞘は著しく薄くなり、糸状体の幅は $2.8 \sim 4 \mu\text{m}$ と、自生の藻体より若干太くなる傾向がある。現状では、天然の材料に基づいて本属の分類が行われており、培養下における生理的性質・形態的可塑性等は、分類のためには未だ知見が十分蓄積されていない。

また、明緑色の生物は、単細胞球形ないし亜球形の藻類で、細胞の形態・構造およびオート孢子形成の様式から、緑藻植物（*Chlorophyta*）、緑藻綱（*Chlorophyceae*）、クロロコックム目（*Chlorococcales*）、ウーキスチス科（*Oocystaceae*）、クロレラ属（*Chlorella*）であることが認められた。フゴッペに自生するものは、細胞の長さ $3.4 \sim 6$ （ ~ 7.4 ） μm 、幅 $3 \sim 6$ （ ~ 7 ） μm 、長さとの幅の比は $1 \sim 1.1$ （ ~ 1.5 ）で、後述の培養試料では、長さおよび幅はそれぞれ $10.4 \mu\text{m}$ および $9.5 \mu\text{m}$ に達するが、長さとの幅の比はほとんど変わらない。細胞内には葉緑体があるが、葉緑体にはピレノイドを欠く。葉緑体にピレノイドを含まない特徴をもった種群（旧パルメロコックス属 *Palmellococcus*）の中で、現在までフゴッペ産のものに合致する種は見あらず、現時点では、クロレラ属の1種（*Chlorella sp.*）とするにとどめざるを得ない。

4. 室内実験

単離された各種に対して、室内実験によってさまざまに制御された照明を与えることにより、その増殖速度がどのように変化するかを観察した。

4-1 実験装置

1 cmX 1 cmのプラスチックセルを培養容器として用い、セルには蓋をして、蓋にファイバーを通しそこから各光源からの光を照射した（図7）。培地は10倍希釈のCT培地を用い、上記で単離された*Symploca*（暗緑色）、*Chlorella*（明緑色）をそれぞれの実験で3試料ずつ用いた。各実験とも培養条件は 20°C とし、30日間培養した。これら藻類の増殖は、750nmの吸光度を測定することによ

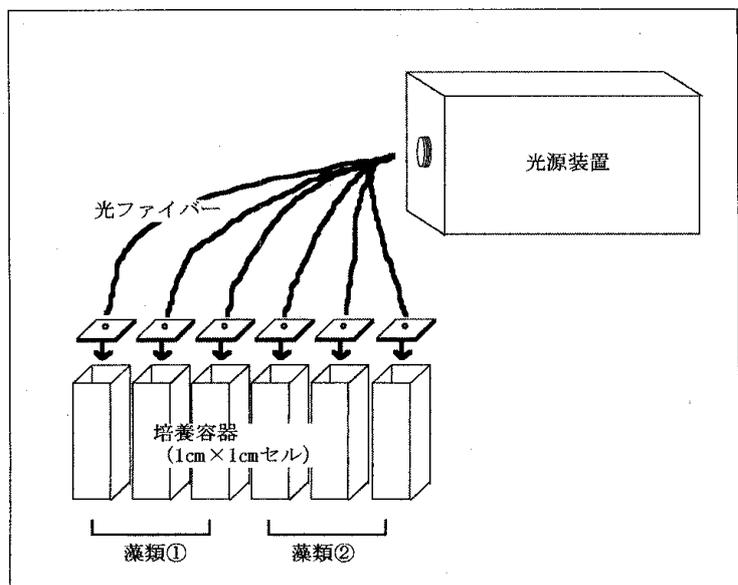


図7 室内実験装置模式図

り評価した。

4-2 波長制御の効果

上記可視光反射スペクトルで、両試料ともに560nm付近の光を反射している（利用されていない）ことから、その付近の波長の光のみを照射することにより、増殖速度がどのように変化するかを観察した。光源には蛍光灯（3波長形昼白色）を用い、波長を制御する試験区にはバンドパスフィルター（500～600nm部分のみを透過）を、そして対照区にはNDフィルター（波長特性を変えずに強度だけを軽減する）を設置し、双方の試験区における照度が約750luxで同様になるように調整した。また、照射時間は12-12L/Dサイクルとした。

各試料の増殖曲線を図8に示す。種の違いによる違いは殆ど見られず、両種とも、波長制御を行った場合には増殖が明確に抑えられた。

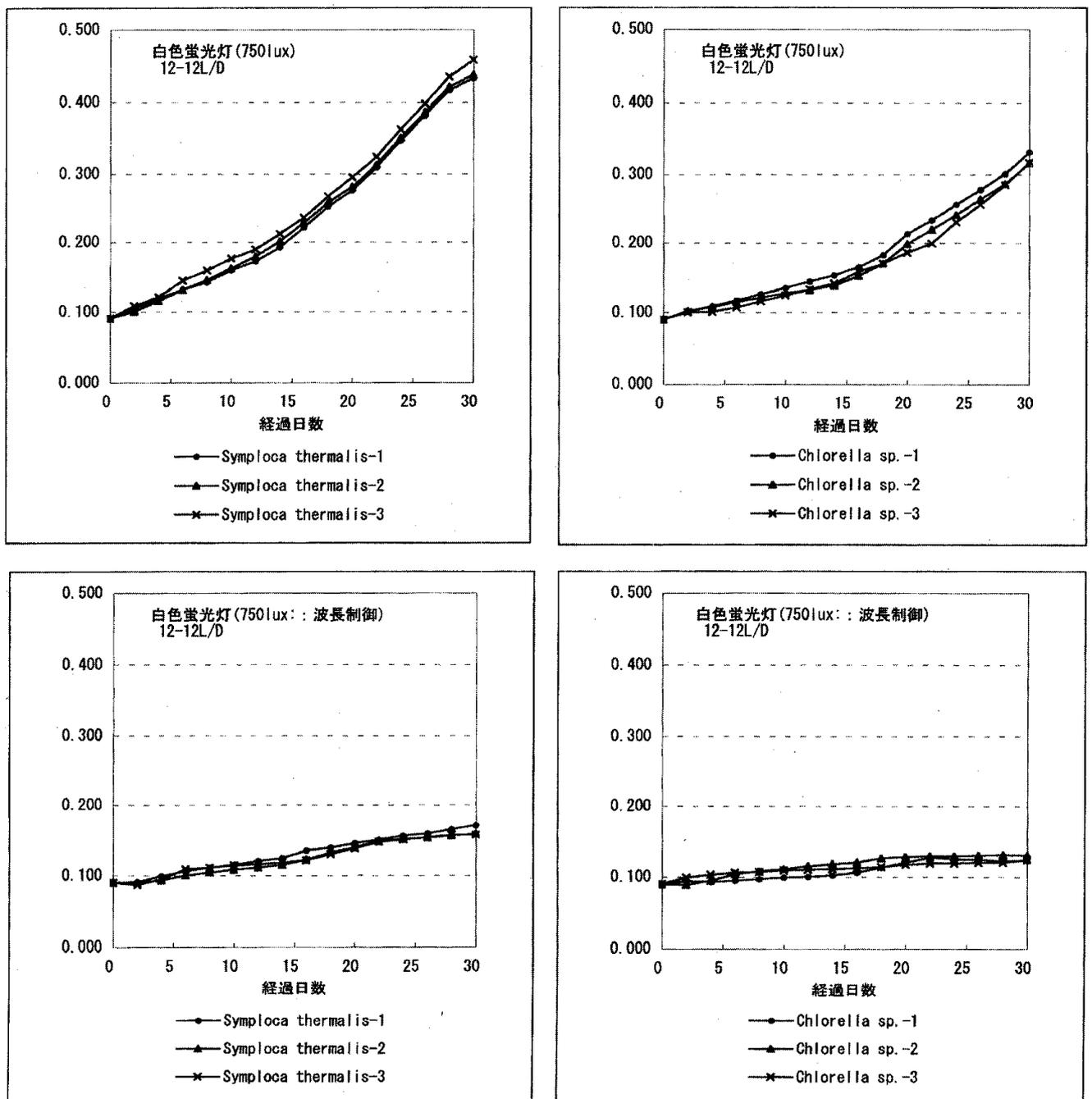


図8 波長制御光と非制御光とによる植物の成長の比較

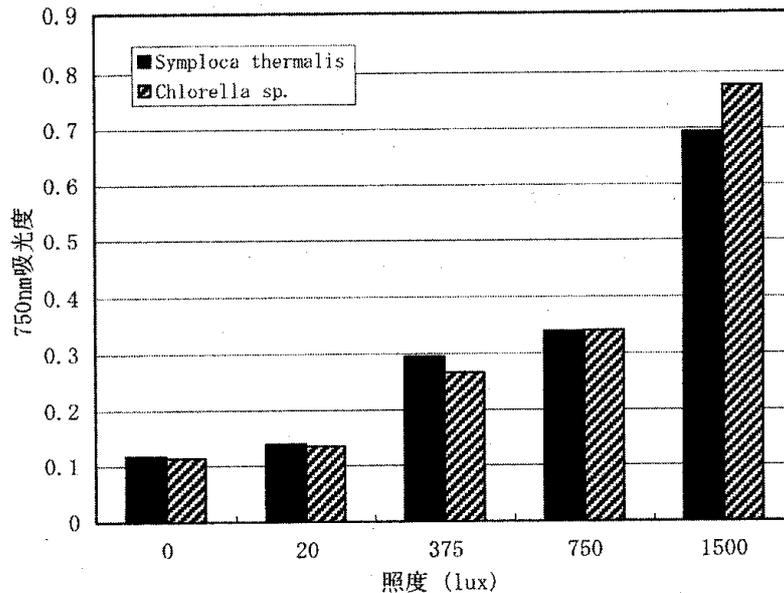


図9 照度と植物の成長速度との関係

4-3 照度制御の効果

次に、照度条件を変えて、増殖速度の変化を観察した。光源には上述と同様の蛍光灯を用い、NDフィルターによって1500lux、750lux、375lux、20lux、それに遮光した条件をそれぞれ設定し、照射時間は12-12L/Dサイクルとした。

30日後の750nmの吸光度を比較したのが、図9である。いずれの種においても、照度が上がるほど増殖が早くなる傾向が見られた。

4-4 照射時間制御の効果

最後に、一日当たりの照射時間を変えて、増殖速度の変化を観察した。光源には同様の蛍光灯を用い、照度は750luxとした。照射時間は、12-12L/D、4-20L/D、1-23L/Dの3通りのサイクルとした。

各試料の増殖曲線を図10に示す。種の違いによる違いは殆ど見られず、両種とも、照射時間が短ければ短いほど増殖が制御される傾向が見られ、特に一日一時間照射の場合には、両種とも殆ど増殖は認められなかった。

5. 現地実験

実際の現場において、照明制御が緑色生物の増殖軽減に対して有効であるかどうかを、現地実験により検証した。

5-1 実験方法

実験区としては、洞窟内で壁面が認められず、なるべく均質に緑色生物が繁茂し、なるべく平らで水分条件などが均質と判断される箇所を選定した(図2)。

実験光源としては、室内実験で用いたのと同種の蛍光灯を用い、波長制御には同様のバンドパスフィルター(500~600nm部分のみを透過)を使用した。なお、壁面がない部分とは言え、実際の文化財における実験となるため、対象壁面における照度は、上記室内実験から増殖速度が十分に小さいことが期待される20luxとなるように設定した。対照光源としては、同様の蛍

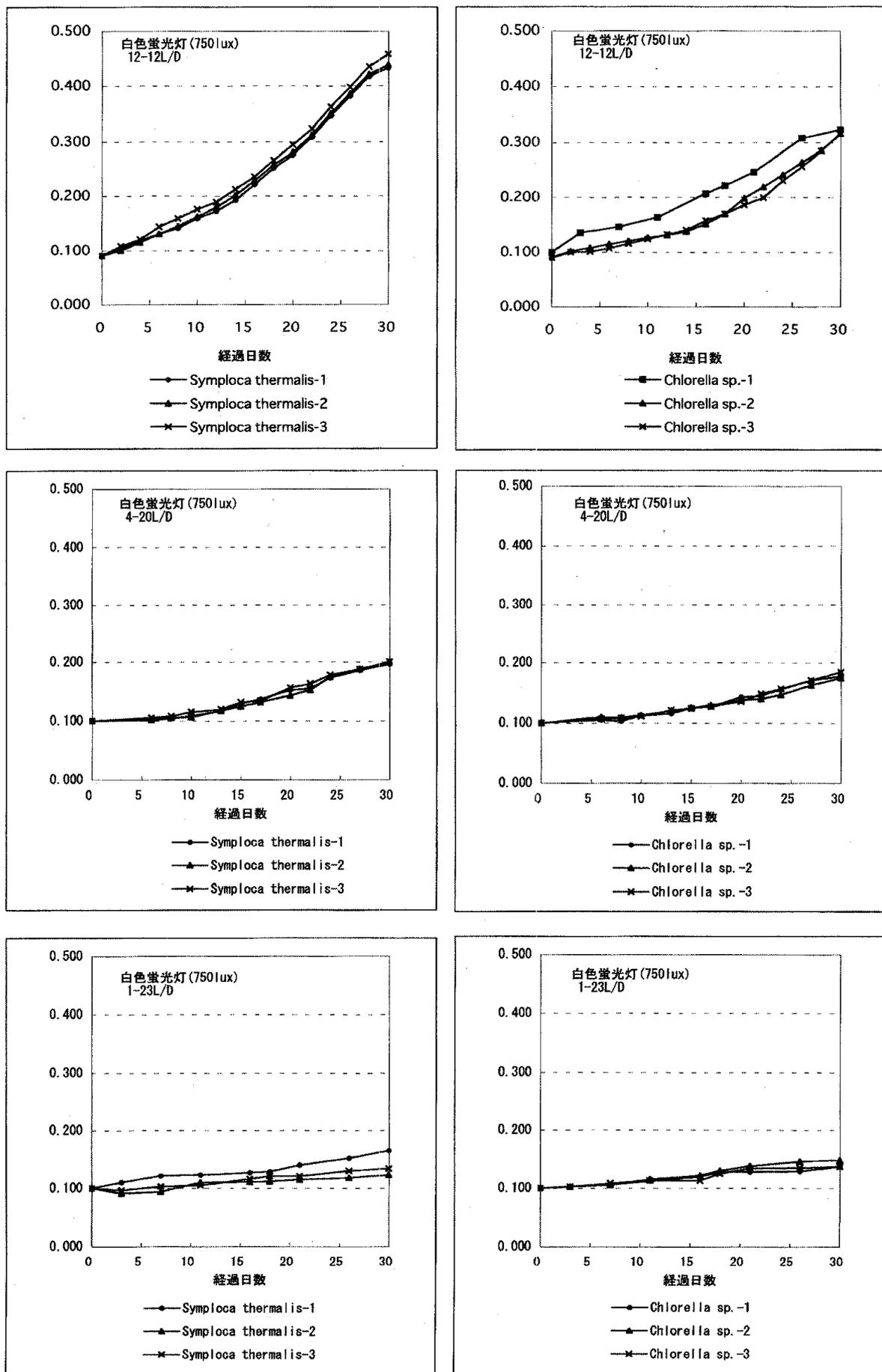


図10 照射時間と植物の成長速度との関係

光灯にNDフィルターを用い、同じく壁面における照度が20luxになるように調整した(図11)。また、実験光源だけでなく、公開環境における見学者用照明も含めて、全く光が与えられないようにした遮光区も設け、それをネガティブコントロールとした。評価は、分光色彩計(ミノルタCG-422c)により、対象部分(径2cm)の色をL*a*b*表色系にて表し、比較した。また、実験区以外でも、通常の公開環境で光照射が続けられている、緑色生物が典型的に繁茂する箇所、さらに植物の繁茂が殆ど見られない岩肌部分などでも、必要に応じて適宜同様に色を計測し、比較した。

なお、通常の公開環境とは、フゴッペ洞窟は原則として毎週月曜日に休館で、それ以外の日は朝9時から夕方4時半まで公開が行われている。また公開日でも、見学者がいない場合にはその都度消灯し、見学者の見学中のみ照明が与えられるようにされている。実験区における光源も、同様の電源を使用することにより同様の条件とし、実際に与えられた照射時間は、電気式時計を同様の電源で稼働させることにより、一日あたりの平均照射時間として月別に集計した。なお、実験区以外の光源は、原則として蛍光灯が用いられているが、洞窟の凹凸や光源からの距離によって照度条件はまちまちであり、だいたい7~140lux程度であった。また実験期間中の洞窟内の最高および最低気温は9.3~19.6℃であり、同湿度は80.3~95.5%であった。

5-2 結果

各期間の照射時間を表1に示す。一日当たり、20分程度から6時間近くまでまちまちであり、一般には夏場に長めで冬場に短めの傾向が見られた。各実験区の測色結果は、表2に示す。このうち、緑色の変化が最も反映されるのはa*値であることから、各実験区において、a*値の変化だけを見たのが図12である。いずれの実験区でも、時間の経過と共にa*値が-3前後から0付近まで上昇する傾向が見られた。これに対して、実験区以外で緑色生物が繁茂する箇所では、あまり変化せず-4程度であり、また植物の繁茂が見られない箇所では、+4程度で殆ど変化が見られなかった。

表1 現地実験照射時間測定結果

2000年12月	56分/日
2001年1月	28分/日
2月	23分/日
3月	1時間05分/日
4月	1時間45分/日
5月	計測不能
6月	2時間55分/日
7月	4時間17分/日
8月	5時間58分/日
9月	4時間04分/日
10月	5時間17分/日

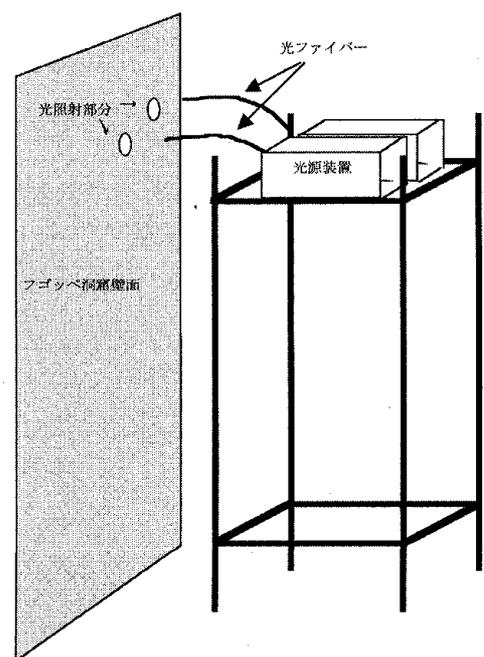


図11 現地実験装置模式図

表2 現地実験結果一覧

年号	日付	経過日数	波長制御光			白色光			遮光		
			L値	a値	b値	L値	a値	b値	L値	a値	b値
2000	2000.6.30	0	16.75	-3.05	7.35	17.39	-2.60	6.21	20.33	-3.63	9.75
	2000.7.6	6	16.00	-2.38	5.48	18.60	-2.92	6.42	20.22	-2.41	6.94
	2000.7.12	12	17.18	-2.72	5.44	19.03	-2.99	6.92	20.23	-2.75	6.53
	2000.7.18	18	16.59	-2.70	5.54	18.47	-1.85	7.79	18.58	-2.19	6.84
	2000.8.21	52	15.05	-2.44	5.39	18.95	-1.40	7.42	18.80	-2.28	5.75
	2000.9.12	74	16.51	-2.29	6.00	17.29	-0.86	6.32	18.20	-1.27	5.58
	2000.10.18	110	16.58	-2.04	6.32	17.85	-1.03	6.13	18.42	-0.63	5.97
	2000.11.29	152	18.64	-1.85	5.77	18.65	-0.89	5.97	19.12	-0.64	5.89
	2000.12.21	174	17.41	-1.84	5.57	18.14	-0.73	6.03	18.73	-0.70	6.11
2001	2001.1.23	207	17.69	-1.77	5.71	18.85	-0.73	6.06	19.76	-0.68	6.15
	2001.3.1	244	18.01	-1.63	5.75	18.41	-0.53	6.55	20.12	-0.51	7.08
	2001.4.10	284	17.88	-1.69	5.61	19.88	-0.31	6.49	20.30	-0.40	6.49
	2001.6.5	340	17.37	-2.24	7.01	17.26	-1.02	7.38	19.00	-0.81	6.76
	2001.6.21	356	18.12	-2.08	7.47	17.49	-1.14	7.45	20.5	-0.63	5.84
	2001.7.19	384	18.18	-1.73	7.15	18.43	-0.62	7.30	19.99	-0.14	6.49
	2001.8.30	426	16.68	-1.37	8.21	18.02	-0.75	7.7	19.96	-0.06	8.09
	2001.9.26	453	18.06	-1.24	7.97	18.04	-0.45	7.99	21.18	-0.7	8.59
	2001.10.26	483	16.94	-1.05	7.96	17.57	-0.22	8.6	19.92	0.44	8.62
2001.11.20	508	18.91	-0.92	8.51	18.51	0.11	7.96	21.22	0.39	8.86	

6. 考 察

まず、室内実験の結果から、照明を制御することにより、緑色生物の増殖をある程度は軽減可能であることが確認された。具体的には、波長を制御した光を照射すれば、照度と照射時間が同様であっても、制御しない光を照射した場合に比べて増殖を軽減することができた。また、波長を制御しなくても、照射時間が同様であれば、照度を落とせば落とすほど増殖は軽減できた。さらに、波長も照度も制御しなくても、一日当たりの照射時間を一時間にまで短くすれば、増殖はほぼ防ぐことができた。このことから、実際の公開環境を考える場合には、逆に照射時間、照度、波長の順に優先しながら制御を行うことで、緑色生物の増殖を軽減可能であろうと判断される。

次に現地実験の結果を見ると、白色光、波長制御光、遮光のいずれにおいても、一年以上が経過して季節変化の範囲を超えてa*値の上昇傾向が認められている。a*値の上昇は、緑色が薄くなっていることを意味し、これは緑色生物の減少を意味するものと考えられる。従って、いずれも緑色生物の繁茂を軽減できていると判断される。現状では、遮光、白色光、波長制御光の順にa*値が上昇しているように読みとれる(図12)が、これは波長制御光の効果が乏しいと解釈するよりは、誤差の範囲で、単にいずれもa*値に上昇傾向が認められるとだけ解釈されるべきであろう。実際、実験区以外で緑色生物が目立つ地点では、依然として低いa*値が認められ続けており、実験区との違いが顕著である。なお、いずれの実験区でも、緑色生物が認められない岩肌部分に比べれば、今のところa*値はまだ低い状況であるため、現状では既存の緑色生物を根絶するまでには至っていないと判断されるものの、もとより本研究の目的は、既存の緑色生物を除去することにはなく、あくまでもさらなる繁茂を軽減することにあるため、その意味では十分な効果が得られているものと解釈される。

以上から、緑色生物の繁茂をなるべく許さずに洞窟を今後公開していく方向性を考えると、

まずは照射時間を極力少なくすることが第一に考えられる。むろん見学者の便宜を考慮する必要があるため、具体的な目標値は指定できないものの、見学者がいないときにはなるべくまめに消灯されるシステムにより、できる限り一日当たりの照射時間を少なくする対応が重要であろう。次に、照度条件であるが、これは低ければ低いほど緑色生物の繁茂は制御できると考えられるが、見学者が壁画の見学を行えなければ照明を当てる意味が乏しくなるため、むしろ見学者の便宜を前提として、その範囲内でなるべく照度を抑えるように心がけるべきであろう。今回現地実験に用いた 20lux の条件下では、現地で壁画の見学には大きな支障は起きておらず、また白色光でも緑色生物の増殖が軽減されていたことから、このあたりが一応は照度条件の目安として考えられるだろう。最後に波長制御に関しては、確かに室内実験の結果では白色光に比べて明瞭な制御効果が観察されたが、現地実験では白色光に比べて有利な結果は特に見出されなかったことから、むしろ上記の二つの条件が十分に整えられれば、当面は特別に波長が制御された光源を用いる必要はないのではないかと考えられる。ただし、何らかの事情で照度や照射時間を制限するだけでは対応できないような事態に将来陥った場合には、最終的な手段として今回室内実験を行った波長制御光を用いれば、通常光に比べて緑色生物の繁茂を軽減できる可能性は残されている。

なお、本稿ではあくまでも照明制御に着目して対策を考察してきたが、はじめにも述べたように、植物の繁茂は照明以外に水の存在も密接に関係した問題である。従って、現実的な対策を考察する場合には、水対策を含めた総合的な対応が必要不可欠となることを忘れてはならないであろう。

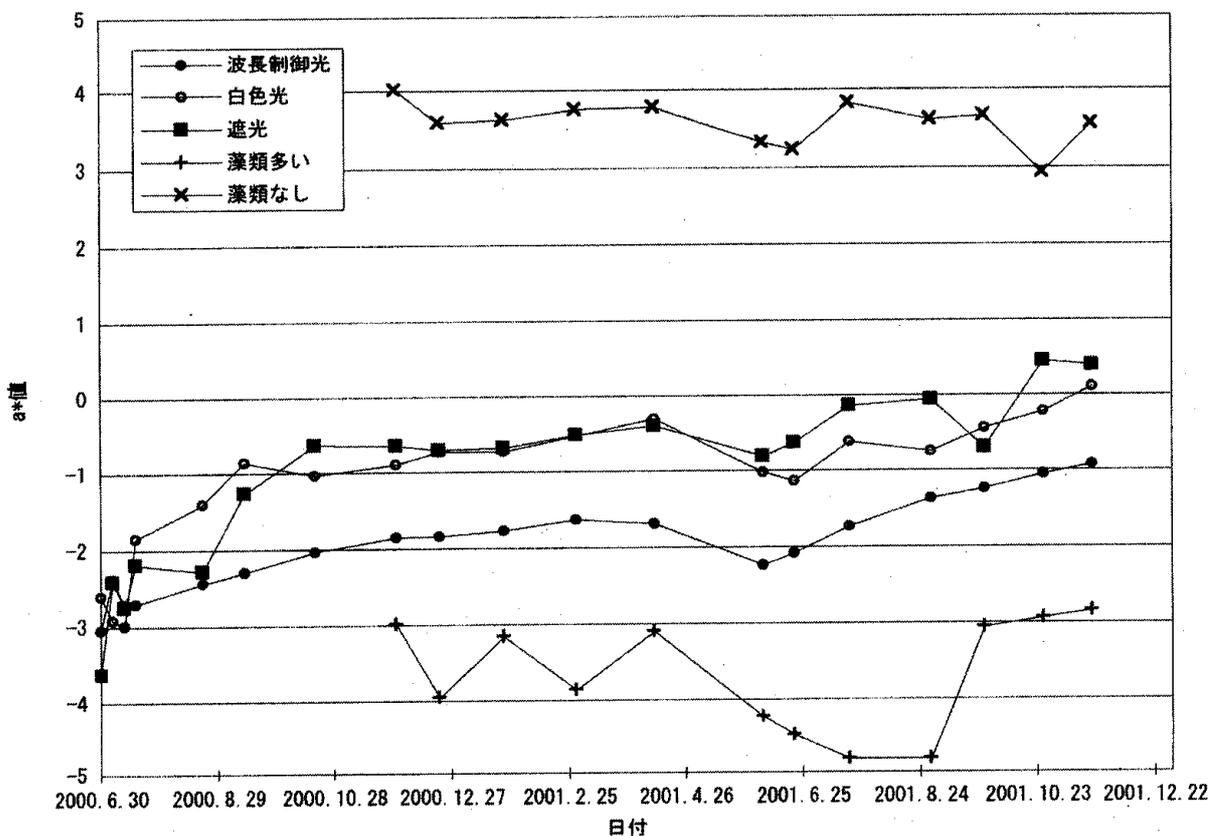


図 12 現地実験における各地点での a* 値の推移

謝辞

本研究における現地調査と現地実験においては、余市町の盛昭史氏をはじめとするスタッフの方々にご協力いただいた。緑色生物の鑑定に際しては、帯広畜産大学の美濃羊輔名誉教授にご教示いただいた。また、室内実験の装置の構築に関して、職業能力開発大学校の西澤鉦一教授から多数のご助言をいただいた。以上を記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 新井英夫 (1985) 石造文化財の生物劣化とその対策, 石造文化財の保存と修復, 84-95, 東京国立文化財研究所
- 2) Lefevre, M. and Laporte, G. S. (1969) The 'Maladie Verte' of Lascaux, *Studies in Speleology*, 2, 35-44
- 3) Department of Archaeology of Pakistan (1972) Master plan for the preservation of Moenjodaro, Government of Pakistan
- 4) 峰山巖・掛川源一郎 (1983) 謎の刻画フゴッペ洞窟, 六興出版
- 5) 北海道余市郡余市町 (1973) 史跡フゴッペ洞窟保存工事報告
- 6) 朽津信明・三田直樹・安田匡・石崎武志 (1997) 史跡・フゴッペ洞窟の風化と保存 (I), 日本応用地質学会平成9年度研究発表会講演論文集, 33-36
- 7) 北海道新聞社 (1996) 北海道新聞 1996年7月19日付け

キーワード: 洞窟遺跡 (cave site); 藻類 (algae); 照明制御 (light control); 照度 (illumination); 公開環境 (environmental condition)

Countermeasures against the Growth of Green Organisms by Light-controlling in Fugoppe Cave, Hokkaido, Japan

Nobuaki KUCHITSU, Toshiaki ASANO*¹, Tadasu EMOTO*², Takahisa ITO*²,
Chika TABO-ISHIHARA*², Naoki MITA*³, Suguru HAGA*⁴ and Koji ISHIDA*⁵

Green organisms on the carvings in the Fugoppe Cave, Hokkaido, were identified and countermeasures by light-controlling against the growth of the organisms are discussed. *Cyanophycearae Oscillatoriales Phormidiaceae Symploca* and *Chlorophyceae Chlorococcales Chlorella* were identified as the dominant organisms there. Then purified samples of each were used for laboratory experiments. First, the samples exposed to light of limited wave length (500 ~ 600 nm) showed less growth rate than the samples exposed to non-limited light. Second, the higher the illumination is, the more the growth rate of the organisms became: the growth rate was small enough when the illumination was 20 lux. And third, the less the illuminating period was, the less the growth rate of the organisms became: the growth rate was almost 0 with one hour illumination for one day. Next, on-site experiment was held on the wall with green organisms. Illumination was 20 lux and lighting was given only when tourists were in the cave, i.e. 20 min. ~ 6 hours / day. As a result, the green color on the wall became quantitatively less ($a^* = -4$ to 0) at points exposed to light with limited wave length, without limitation, and with no light. Accordingly, to prevent further growth of green organisms in Fugoppe Cave, controlling the illumination (i.e. less than 20lux) and keeping the illuminating period as short as possible will be necessary although limiting the wave length of the light is also a possibility.

*1 Yoichi Town

*2 ECONIXE Co. Ltd.

*3 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

*4 Iwamizawa Campus, Hokkaido University of Education

*5 Chitose Institute of Science and Technology