建物外壁に生育する藻類の増殖と死滅のモデル化に関する研究

MODELING OF ALGAL GROWTH AND DEATH ON EXTERIOR WALLS OF BUILDINGS

中嶋 麻起子*, 銚井 修一**, 小椋 大輔***, 伊庭 千恵美****

*Makiko NAKAJIMA, Shuichi HOKOI, Daisuke OGURA
and Chiemi IBA*

This research aims to quantify the relationship between airborne algal growth/death on the exterior walls of the building and environmental factors such as surface temperature and humidity. Based on this, the study proposes a prediction model for the algal growth, where the algal growth was evaluated as algal cell number. The proposed model was used to simulate the change in algal cell number (growth and/or death), taking into consideration the temperature, humidity, and incident solar radiation. Results indicate that the algal growth rate agreed well with the measured L* value (brightness).

Keywords : Airborne algae, L* value, Surface temperature and humidity, Solar radiation, Modeling, Exponential model

気生藻類, L*値, 表面温湿度, 日射, モデル化, 指数関数モデル

1. 研究の背景と目的

建物の屋上近くの外壁、窓枠の下、壁下部の地面近くに見られる黒色や緑色の汚れの多くが、藻類や真菌類を含む微生物の付着・生育によるものであることは既往研究により示されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

本論文は、外壁面での汚れの主要原因となっている気生藻類の増殖・死滅に関する環境条件の定量化を行い、それらを用いて増殖・死滅をモデル化することを目的としている。

これまでに京都市内での実態調査により、外壁汚れは雨水が直接当たりやすい部位に多く観察されるが、雨水が直接当たりにくい部位でも観察されること、また、どちらの部位でも汚れの中に藻類と思われる細胞が含まれていることを示した⁷⁾。また、仁和寺九所明神での環境測定において、汚れの程度を目視およびL*値により評価すると^{注1)}、両者はよく対応し外壁の変色程度をL*値により定量的に評価することが可能であることを示した⁸⁾⁹⁾。さらに、壁表面温度が高温になりやすい部位ほど藻類が死滅しやすいため、変色程度が小さくL*値が大きくなることを示した⁸⁾⁹⁾。

これらの結果によると、以下のような外壁面での藻類の増殖・死滅のプロセスが想定される。すなわち、藻類の付着はあらゆる外壁で生じるが、日射が当たりやすく低湿度・高温になりやすい部位では付着した藻類が死滅しやすいため、目視により判別できるような汚れは発生せず、逆に日射が当たりにくく低湿度・高温が発生しにくい部位では付着した藻類が増殖し、やがて目視により判別できる

程度の汚れとなる。

本論文では、上記のプロセスに基づいて仁和寺九所明神の壁表面におけるL*値測定結果から、藻類の増殖・死滅の推移を明らかにするとともに、外壁での藻類の増殖・死滅のモデル化を行う。

2. 仁和寺九所明神における環境測定

2.1. 測定概要

2.1.1. 測定対象と測定期間

測定対象は京都市北西部に所在する仁和寺境内の九所明神である。九所明神は寛永年間に建立され、国の重要文化財に指定されている。最近では平成15年～18年に大規模な修復工事が行われたが¹⁰⁾、その際にすべて再塗装された白色の胡粉塗外壁で、現在すでに黒色への変色が発生している。測定は2011年10月から開始し、2015年4月現在も継続している。

2.1.2. 外気温湿度・外壁表面(近傍)温湿度の測定

温湿度データロガー(RTR-53A, T&D Corporation)を用いて15分間隔で外壁表面近傍の温湿度測定を行った。設置場所をFigs.1, 2に示す。図中の南東角の◆印の位置に気象観測システム(Weather Bucket, (有)アグリウェザー)を設置し、外気温湿度、水平面全天日射量、降水量、風向、風速を30分間隔で測定した。●印の位置では、外壁が変色している上部の梁の上と、ほとんど変色していない下部の梁の上の2か所に、▲印の位置では同様に上部、下部、最

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
教授・工博

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

**** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
助教・博士(工学)

Grad. Stud., Dept. of Architecture and Architectural Eng.,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng.,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng.,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.
Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng.,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

下部の3カ所に温湿度データロガーを設置した(計11カ所)。測定対象が重要文化財であるため、建物の美観に配慮し、拝観者の目に触れやすい建物正面(南壁)では温湿度測定を行わなかった。本来は、壁表面の温湿度を測定するために壁面にセンサーを設置したいところであるが、壁面の加工や直接の接触を避けるため、壁面にできるだけ近い位置(壁面から5mm以内)の温湿度を外壁表面温湿度に等しいと見なし¹¹⁾、以下の考察を行う。

2.1.3. 外壁の変色状態の測定

外壁の変色状態を評価するため、土色計(SPAD-503, コニカミノルタ)を用いて $L^*a^*b^*$ 色系の L^* 値(明るさ)を測定した。Fig. 2に示すように各外壁に40×60cmの領域を定め、その領域内に6カ所の測定箇所を設定した。各測定箇所ですべて3回ずつ L^* 値を測定し平均をとった。さらにその6カ所の平均値をその領域の値とした。東殿南壁、西殿南壁、北壁(東殿)、北壁(西殿)では各1か所ずつ、東殿東壁と西殿西壁では、上部の梁上の外壁とほぼ同様の変色が見られる壁上部とあまり変色が見られない壁下部の2か所ずつの計8か所において、約1か月に1回の間隔で測定した(Fig. 2)。

Fig. 1 Plan of Kusyo Myojin Shrine and locations of the measurement devices

Fig. 2 Wall parts where L^* values measured

2.2. 測定結果

2.2.1. 外壁表面の L^* 値の時間変化

各外壁表面の L^* 値の時間変化をFig. 3に示す。大羽ら、S. C. Agrawalらによると死滅した藻類細胞は白色や透明に、あるいは形が崩壊し、死滅した藻類細胞群は透明或不鮮明となり、縮小したり崩壊する³⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。このことから、本論文では、藻類が死滅する際には L^* 値が増加し壁表面の明度が大きくなり、増殖する際には L^* 値が減少し明度が小さくなると見なす。 L^* 値の小さい順に北壁(西殿)、北壁(東殿)、東壁上部(東殿)、西壁上部(西殿)、東壁下部(東殿)、西壁下部(西殿)、南壁(東殿)、南壁(西殿)となっている。

測定開始(2013年6月4日)から2013年8月6日まで、すべての部位で L^* 値は増加している。その後、2013年9月9日に大きく減少し、2013年9月26日には再び増加している。2013年9月26日から2014年12月19日まででは一定あるいは非常に緩やかに増加しているが、2014年1月20日から2014年5月23日まででは全体的に L^* 値は約1~2増加する。2014年7月30日にやや減少した後、再び増加しているが、その後2014年12月18日まで緩やかに減少し、その後はわずかに増加している

2.2.2. L^* 値の時間変化と壁表面温湿度・降水量との関係

L^* 値の変化と壁表面の温湿度の変化との対応について検討を行うため、日射が当たりやすい部位(南壁(東殿)、南壁(西殿)、東壁下部(東殿)、西壁下部(西殿))、日射が当たりにくい部位(北壁(東殿)、北壁(西殿)、東壁上部(東殿)、西壁上部(西殿))の L^* 値の変化をFig. 4に示す。また、各測定日の直前10日間において30℃以上、40℃以上、RH80%以上の壁表面温湿度の発生割合について日射が当たりやすい部位、日射が当たりにくい部位のそれぞれの平均値をFigs. 5, 6, 7に示す。

(1) 2013年6月4日から2013年8月6日

L^* 値の測定箇所が少なかったため日射が当たりにくい部位の平均値のみであるが、 L^* 値は大きく増加している。日射が当たりにくい部位でも40℃以上の高温がわずかに発生し、30℃以上の高温は日射が当たりやすい部位と同程度の割合で発生している(Figs. 5, 6)。このことから、高温により藻類が急激に死滅したと考えられる。

(2) 2013年9月9日

前回測定時(2013年8月6日)に比べ、 L^* 値が大きく減少している。これは、測定前に台風が通過し曇りや雨の天候が多く日照時間が少なかったため、40℃以上の高温の発生頻度は低く(Fig. 6)、高湿度が多く発生したことから(Fig. 7)、藻類が増殖したと考えられる。

(3) 2013年9月26日

前回測定時(2013年9月9日)より L^* 値が大きく増加している。直前10日間の降水量は2013年9月9日より多いが、降雨があったのは9月16日のみで、その後測定日まで天候は晴れが多く、80%以上の高湿度の発生はあまり多くない(Fig. 7)。また、40℃以上の高温が非常に多く発生している(Fig. 6)。そのため、高温により藻類が死滅したと思われる。

(4) 2013年10月22日から2013年12月19日

期間中、 L^* 値はやや低くほぼ一定の値で推移している。これは、40℃以上の高温が発生しなかったため(Fig. 6)藻類が死滅しにくく、必要な水分を得た際には増殖可能であったためと考えられる。特に2013年10月22日と2013年11月22日は、測定前にRH80%以上

の高湿度が比較的多く発生したため(Fig. 7)藻類が増殖しやすい環境であったと思われる。

(5) 2014 年 1 月 20 日から 2014 年 5 月 23 日

期間中、L*値は徐々に増加している。80%以上の高湿度の発生が少なく(Fig. 7)、40℃以上の高温が発生する時期があり(Fig. 4)藻類

が増殖しにくく死滅しやすかったことによると考えられる。

(6) 2014 年 6 月 27 日から 2014 年 7 月 30 日

Fig. 3 より L*値が減少している部位は、東壁上部(東殿)、西壁上
部(西殿)である。測定直前の 7 月 27 日はほぼ 1 日中雨で藻類が増
殖しやすく、日射が当たりにくい部位ではその後も 40℃以上の高温が

Fig. 3 Change in L* value of each wall

Fig. 4 Change in average L* value of each wall

Fig. 5 Occurrence rate of temperatures over 30°C in the previous 10 days of measurements

Fig. 6 Occurrence rate of temperatures over 40°C in the previous 10 days of measurements

Fig. 7 Occurrence rate of relative humidity 80% and precipitation in the previous 10 days of measurements

発生しないため、死滅しなかったと思われる。

(7) 2014 年 7 月 30 日から 2014 年 9 月 4 日

期間中、40℃以上の壁表面温度が多く発生し(Fig. 6)、80%以上の高湿度はほとんど発生しなかったため(Fig. 7)、藻類は減少し L^* 値は増加したと考えられる。

(8) 2014 年 10 月 9 日から 2014 年 3 月 4 日

期間中、40℃以上の壁表面温度が全く発生しなかったため(Fig. 6)藻類が死滅しにくく、また RH80%以上の相対湿度がわずかに生じたことで(Fig. 7)、藻類が徐々に増殖したと考えられる。

3. 生物の増殖と死滅モデル

以上の結果に基づき、藻類の増殖と死滅に影響を及ぼす環境因子として日射量、壁表面温度、壁表面相対湿度に注目し、モデル化を行う。

3.1. 藻類の増殖・死滅モデル

藻類の増殖・死滅モデルの基礎式として以下の個体群密度 N の変化に関する指数モデルを使用する¹⁵⁾¹⁶⁾。ここで、総合環境指数 G は日射量・温度・相対湿度が増殖に及ぼす影響を示すものとする。

$$dN/dt = G r_0 N \quad (1)$$

$$\begin{cases} G = g_S * f(g_T, g_R) & (0 < T_{surf} < 30) \\ G = g_T & (T_{surf} \leq 0, 30 \leq T_{surf}) \end{cases}$$

N : 個体群密度 [個/m²], t : 時間 [sec], G : 総合環境指数 [-],

r_0 : 成長率 [1/sec], T_{surf} : 壁表面温度 [°C]

g_S, g_T, g_R : 日射量・温度・相対湿度に対応する環境指数 [-]

3.2. 藻類の増殖と死滅に影響を及ぼす環境因子

3.2.1. 日射量

気生藻類はクロロフィルにより光を吸収して光合成を行い増殖に必要なエネルギーを得る。ただし、もともと光の届きにくい水中に生育する藻類はわずかな光でも光合成を行う能力を持っている¹⁷⁾。そこで、日射量に対応する環境指数 g_S を Fig. 8 に示すように想定し、閾値 S_1 は非常に小さな値とする。日射による壁表面温度の上昇の影響は温度の環境因子 g_T で考慮する。

3.2.2. 壁表面温度

多くの藻類において、増殖最適温度は 18~25℃の範囲内にあり¹³⁾、N. Häubner¹⁸⁾は、*Stichococcus* sp. の最適温度は 21℃、*C. luteoviridis* の最適温度は 24℃としている。また、辻本・大羽¹³⁾の実験では、20~31℃までは順調に増殖したが、32℃では約 24 時間後から徐々に緑色が失われ 72 時間ではほとんど死滅した。S. C. Agrawal¹³⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾は、40℃以上の高温に数十分間暴露した場合、藻類の細胞は死滅し再び増殖に最適な環境においても再活性化はしないこと、暴露温度が高くなるほど、また暴露時間が長くなるほど死滅する割合が大きくなることを実験により示している。そこで本論文では、温度が 0℃以下の場合には死滅、0~30℃の範囲では増殖可能、30℃以上の高温においては死滅すると仮定し、Fig. 9 に示すような温度に対応する環境指数 g_T を想定した。

3.2.3. 壁表面の相対湿度

藻類にとって水分は生理学的に必要な不可欠であり、光合成を行う際にも必要とされる。ただし、気生藻類は雨や霧、結露といった大気からの水分供給のみに頼って生長している藻類^④であり、水分条件としては非常に厳しい環境下で生育している。そのため、乾燥状

態となった場合でもすぐに死滅せず、長期間生存する能力を持つ。そこで、本論文では相対湿度が低下しても藻類はすぐに死滅せず、再び増殖に最適な環境を得た際には増殖可能であると仮定する。そこで、相対湿度 80%以下では増殖も死滅もせず、80%以上では相対湿度に比例して増殖率が増加し 100%で最大になるとして、Fig. 10 に示すような相対湿度に関する環境指数 g_R を決定した。ただし、壁表面温度が 30℃以上になる場合には、相対湿度に関係なく藻類は死滅するとしている。温度と相対湿度両方の影響を合わせた環境指数を Fig. 11 に示す。

Fig. 8 Environmental index of solar radiation

Fig. 9 Environmental index of temperature

Fig. 10 Environmental index of relative humidity

Fig. 11 Relation of environmental index between temperature and relative humidity

3.3. 解析対象と解析条件

解析対象は L^* 値の測定を行っている北壁、西壁上部と下部(西殿)、東壁上部と下部(東殿)とし、2013 年 6 月 4 日から 2014 年 12 月 31

Table 1 Threshold values used for calculation of environmental index

N_0 (initial value) [cell/m ²]	1.0×10^6	T_1 [°C]	5.0
r_0 [1/sec]	2.9×10^{-7}	T_2 [°C]	20.0
S_1 [W/m ²]	1.0	T_3 [°C]	30.0
g_{Smax} [-]	1.0	T_4 [°C]	45.0
RH ₁ [%]	80.0	g_{Tmax} [-]	1.5
g_{Rmax} [-]	1.0	g_{Tmin} [-]	-1.5

日までの壁表面温湿度の測定値を用いた。ただし、北壁については、2013年8月から12月までの5か月間の測定から、東殿、中殿、西殿の壁表面温度はほぼ等しい変化であり、日射による急激な温度上昇はどの壁でも発生していないことが示されている。そのため、北壁(中殿)での測定値を用いて考察を行う。日射量、温度、相対湿度に対応する環境指数の閾値を Table 1 に示す。

3.4. 解析結果

2013年6月4日から2014年12月18日までほぼ1か月に1回(全19回)測定を行っており、その測定日正午の藻類個体数とL*値を測定回数(19回)について平均したものを Fig. 12 に示す。ただし、本モデルではL*値の変化傾向と藻類個体数の変化傾向(初期個体数に対する割合)との対応を見るため、個体数については各時点での個体数を計算開始時の個体数で除した相対値で示し、個体数とL*値の対応を比較しやすくするため、L*値の軸を反転している。

北壁は壁表面温湿度の測定を行った中殿北壁について代表して計算を行っているため、北壁(東殿)と北壁(西殿)の違いは表現できていない。しかし、北壁(東殿)と東壁上部(東殿)のL*値はほぼ同じであり、藻類の個体数も両部位でほぼ同様の値となっている点についてはよく対応している。東壁(東殿)と西壁(西殿)の上部と下部について比較すると、L*値は上部より下部の方が大きく、藻類の個体数が小さいことと対応している。ただし、東壁上部も下部も西壁よりもL*値が小さいことについては対応していない。

Fig. 12 Algal cell number and L* value of each wall part

次に、東壁上部と下部(東殿)、西壁上部と下部(西殿)、北壁下部の解析により求めた藻類の個体数とL*値の2014年6月4日からの時間変化を Figs. 13, 14, 15 に示す。ただし、藻類個体数については各時点での個体数を計算開始時の個体数で除した値を示し、個体数とL*値の対応を比較しやすくするため、L*値の軸を反転している。

3.4.1. 東壁上部と下部(東殿)

2013年6月4日の解析開始から8月までにL*値は上部が4.3、下部が4.1増加しており、個体数の減少とよく対応している。個体数の減少は8月末まで継続しているが、この期間はL*値を測定していないが、個体数の変化と同様にL*値は増加していた可能性がある。2013年9月初めにはL*値は上部が2.9、下部が6.4減少し、個体数の増加も対応しているが、個体数の増加量に比べてL*値の減少量が大きい。ただし、壁下部に対して壁上部のL*値の増加量の方がわずかに大きい点は、個体数の変化に対応している。また、壁上部では2013年9月末から11月末までL*値が1.2減少しており、この部分も個体数の増加と対応している。壁上部も壁下部も2013年10月半ばから11月までのL*値の減少、2013年12月から2014年7月の

L*値の増加も、個体数の変化と対応している。2014年8月から9月にかけてL*値は上部が1.6、下部が0.2増加しているが、個体数も夏期の高温により減少している。

3.4.2. 西壁上部と下部(西殿)

全期間を通して、西壁上部の個体数が最も多く、L*値の測定結果とは対応していない。しかし、東壁上部・下部と同様に、2013年6月4日の解析開始から8月まで個体数は大きく減少し、L*値が上部で3.3、下部で2.1増加したことに対応している。その後、2013年9月初めに上部で2.8、下部で3.1、L*値が減少した時期には、個体数もわずかに増加している。ただし、東壁の場合と同じくL*値の変化量に対して個体数の変化量は小さい。2013年9月末に壁下部ではL*値は1.5増加し、個体数もわずかに減少している。その後は、壁上部も壁下部も2013年10月半ばから11月までのL*値の減少、2013年12月から2014年3月までのL*値の緩やかな増加、2013年4月から7月のL*値の減少も、個体数の変化と対応している。2014年7月半ばから9月にL*値は上部が1.4、下部が1.3増加し、これと対応して個体数は減少し、その後ほぼ一定の値となっている。

3.4.3. 北壁

北壁(東殿)と東壁上部については、個体数の変化がほぼ同様であり、L*値の測定結果と対応している。また、東壁、西壁と同様に、2013年6月4日から8月にかけて北壁(東殿)では4.1、北壁(西殿)では4.6のL*値の増加と個体数の減少はよく対応している。9月初

Fig. 13 Change of algal cell number and L* value on east wall

Fig. 14 Change of algal cell number and L* value on west wall

Fig. 15 Change of algal cell number and L* value on north wall

めに北壁(東殿)では 3.4、北壁(西殿)では 4.5、L*値が減少した際には、個体数はわずかに増加している。2013 年 10 月から 2014 年 6 月までは L*値は緩やかに増加し、同じく個体数も減少している。2014 年 7 月から 8 月にかけて北壁(東殿)では 0.3、北壁(西殿)では 1.2、L*値は増加し、その後ほぼ一定となる点も個体数の変化と対応している。

3.4.4. L*値と藻類個体数の変化との関係

東壁上部と下部(東殿)、西壁上部と下部(西殿)、北壁のすべての部位において、藻類の個体数と L*値の変化傾向はおおよそ対応している。特に 2013 年 8 月の壁表面温度が高い時期の藻類個体数の減少と、2013 年 11 月から 2014 年 7 月の緩やかな個体数の増加は、L*値の変化と対応している。ただし、2013 年 9 月初めに発生した L*値の減少量に対して、藻類の個体数の増加量は小さく、この点については更に検討が必要と思われる。

4. まとめ

仁和寺九所明神の壁表面における L*値(明るさ)測定より以下の結果が得られた。

- (1) L*値の変化には直前数日間の壁表面温湿度が大きく影響する。
 - 夏期のように 40℃以上の高温の発生頻度が高い時期には壁表面の L*値は増加する。これは藻類の死滅が原因と考えられる。
 - 高湿度が発生しても、日射により 40℃以上の高温の発生頻度が高い場合には、L*値は増加する。
 - 壁表面温度が 30℃以上にならず、高湿度の場合には、L*値は減少する。
- (2) 壁表面の温湿度と(藻類による壁表面の汚れ程度と相関の高い)L*値の変化との対応より、藻類の増殖・死滅と温湿度の間には強い相関があると考えられる。そのため、藻類の増殖率に影響を与える因子として、壁表面の温度と相対湿度、壁表面に入射する日射量に対応する環境指数を想定し、藻類の個体数増減について簡易なモデルを作成した。
- (3) 提案するモデルを用いて解析を行った。
 - 東壁・西壁の上部と下部、北壁について、2013 年と 2014 年夏期の L*値の増加と解析により求めた藻類の個体数の減少、および 2013 年と 2014 年の 9 月から 10 月における L*値の減少と個体数の増加はよく対応している。
 - L*値の変化量と個体数の変化量はまだ十分には対応していない場合もあり、さらなる検討が必要であるが、作成したモデルにおいて、壁表面での藻類の増殖・死滅の傾向について十分説明が可能である。

注

注 1) 仁和寺九所明神は、牡蠣、蛤、はたて等の貝殻から作られた白色絵具である胡粉を膠水と混ぜ塗装されている。そのため、本来の外壁面は白色であり、本論文においては、汚れの程度を明るさの指標である L*値を用いて評価した。

参考文献

- 1) 辻本吉寛, 大羽伸和, 須藤哲也: 外壁面に発生する藻類の同定および藻類汚染方法の検討 建築物の外壁面における藻類汚染に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 433 号, pp. 11-17, 1992. 3
- 2) 大羽伸和, 辻本吉寛: 外装材料の藻類汚染とその防止(第 1 報)汚染の状況と藻類の同定, 木材学会誌, Vol. 42, No. 6, pp. 589-595, 1996
- 3) 大羽伸和, 辻本吉寛: 外装材料の藻類汚染とその防止(第 2 報)屋内培養実験法の評価, 木材保存, Vol. 22-4, pp. 22-29, 1996
- 4) 北島洋二, 萩原清司, 越川義功, 柵瀬信夫: 微細藻類を用いた外壁の緑化研究, 鹿島技術研究所年報, 第 40 号, pp. 329-334, 1992. 10
- 5) 今村祐嗣: 木質系材料の藻類汚染と防止法(課題番号 07660221), 平成 7 年度～8 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書, 1997. 3
- 6) 半田信司: 気生藻類, 堀輝三, 大野正夫, 堀口健雄編「21 世紀初頭の藻学の現況」, 日本藻類学会, 山形, pp. 81-84, 2002
- 7) 中嶋麻起子, 鉾井修一, 小椋大輔: 建物外壁における藻類の生育状況に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 80, No. 710, pp. 331-337, 2015. 4
- 8) 中嶋麻起子, 鉾井修一, 小椋大輔: 仁和寺九所明神における藻類生育と周辺環境との関係, ハウスクリマ研究ノート, 第 39 号, pp. 23-30, 2013. 6
- 9) 中嶋麻起子, 鉾井修一, 小椋大輔: 仁和寺九所明神における外壁の変色状態と周辺環境との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学 II, pp. 87-88, 2014. 9
- 10) 福田敏朗著, 中尾正治編: 重要文化財仁和寺九所明神修理工事報告書, 京都府教育庁指導部文化財保護課, 2006. 3
- 11) 中嶋麻起子, 鉾井修一, 小椋大輔: 仁和寺九所明神における藻類生育と周辺環境との関係, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 713 号, pp. 575-581, 2015. 7
- 12) Gupta, S. and Agrawal, S. C.: Vegetative Survival and Reproduction under Submerged and Air-Exposed Conditions and Vegetative Survival as Affected by Salts, Pesticides, and Metals in Aerial Green Alga *Trentepohlia aurea*, Folia Microbiol., 49(2), pp. 37-40, 2004
- 13) Gupta, S. and Agrawal, A. C.: Survival of Blue-Green and Green Algae under Stress Conditions, Folia Microbiol., 51(2), pp. 121-128, 2006
- 14) Gupta, S. and Agrawal, S. C.: Vegetative Survival of Some Wall and Soil Algae under Stress Conditions, Folia Microbiol., 53(4), pp. 343-350, 2008
- 15) 有田正光編著: 生物圏の環境, pp. 21-24, 東京電機大学出版局, 2007
- 16) 宮内真紀子, 鉾井修一, 宇野朋子, 小椋大輔: 高温多湿気候下における遺跡への藻類による影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 623 号, pp. 9-15, 2008. 1
- 17) W. M. ダーリー: 基礎微生物学 9 藻類の生理生態学, pp. 29-36, 52-56, 培風館, 1987
- 18) Häubner, N., Schumann, R., and Karsten, U.: Aeroterrestrial Microalgae Growing in Biofilms on Façades – Response to Temperature and Water Stress, Microbial Ecology, Vol. 51(3), pp. 285-293, 2006. 4
- 19) Agrawal, S. C. and Singh, V.: Vegetative Survival, Akinete Formation and Germination in Three Blue-Green Algae and One Green Alga in Relation to Light Intensity, Temperature, Heat Shock and UV Exposure, Folia Microbiol., 45(5), pp. 439-446, 2000
- 20) Agrawal, S. C. and Singh, V.: Viability of dried cells, and survivability and reproduction under water stress, low light, heat, and UV exposure in *Chlorella vulgaris*, Israel Journal of Plant Sciences, Vol. 49, Issue 1, pp. 27-32, 2001
- 21) Agrawal, S. C. and Singh, V.: Viability of Dried Filaments, Survivability and Reproduction under Water Stress, and Survivability Following Heat and UV Exposure in *Lyngbya martensiana*, *Oscillatoria agardhii*, *Nostoc calcicola*, *Hormidium fluitans*, *Spirogyra* sp. and *Vaucheria geminata*, Folia Microbiol., 47(1), pp. 61-67, 2002
- 22) Agrawal, S. C. and Pal, U.: Viability of Dried Vegetative Cells or Filaments, Survivability and/or Reproduction under Water and Light Stress, and Following Heat and UV Exposure in Some Blue-Green and Green Algae, Folia Microbiol., 48(4), pp. 501-509, 2003

MODELING OF ALGAL GROWTH AND DEATH ON EXTERIOR WALLS OF BUILDINGS

Makiko NAKAJIMA *, *Shuichi HOKOI* **, *Daisuke OGURA* ***
and *Chiemi IBA* ****

* Grad. Stud., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Graduate School of Engineering, Kyoto University, M.Eng.

** Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

*** Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

**** Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

One of the main causes underlying the soiling of exterior walls is the presence of airborne algae. The present study aims to quantify the relationship between airborne algal growth and/or death on the exterior walls of the building and the associated environmental factors. Accordingly, the study proposes a prediction model of the algal growth, wherein the algal growth is evaluated as algal cell number. In particular, the proposed model was used to simulate the change in algal cell number.

According to our previous studies, soiling occurred not only on the parts that were directly exposed to the rainwater but also on the parts that rarely received the rainwater. However, algal cells were observed on both the parts, irrespective whether or not they were exposed to rainwater. The degree of the soiling could be quantitatively evaluated using the L^* value of the wall surface, which is a function of its brightness. On the parts where the high temperatures reach above 40°C, the algae could not grow and were liable to die. Consequently, the wall surfaces were barely discolored, contributing to larger L^* value, and vice versa.

Accordingly, the algal growth and death is presumed to proceed as follows. In general, the algae can adhere to every part of the exterior surface. However, they are prone to die and the soiling cannot be significant on the parts with high temperatures and low humidity due to the solar radiation. On the contrary, the algae can grow and the soiling proceeds on the parts without the high temperatures and low humidity.

On the basis of these results, regarding the relationship between the L^* value and temperature and humidity of the wall surface, the following can be concluded.

- (1) The change in environmental conditions significantly affected the L^* in the previous several days, that is,
 - when the surface temperatures frequently reached 40°C, there was an increase in the L^* value, probably due to the algae death,
 - when the surface temperatures rarely reached 40°C, together with high surface humidity, there was a decrease in L^* value,
 - when the surface temperature reached 40°C, there was an increase in L^* value, despite the high surface humidity due to the rainfall.
- (2) The abovementioned strong correlation between the environmental factors (surface temperature and humidity) and L^* value indicates that the algal growth/death is significantly influenced by the temperature and humidity during the past several days. Based on these, we proposed a simple algal growth/death model, taking into consideration the influence of the surface temperature, humidity, and incident solar radiation.
- (3) The following results were obtained based on the simulation performed using the proposed model. On the east, west, and north walls, the increase in the L^* values corresponded to the decrease in the algal cell number during summer of 2013 and 2014. From September to October of 2013 and 2014, the decrease in L^* values corresponded to the increase in the algal cell number.

(2015 年 4 月 24 日原稿受理, 2015 年 9 月 7 日採用決定)