

外壁面での気生藻類による汚れの発生と評価指標についての研究

—吸放湿性状を考慮した増殖予測モデル作成と人の汚れ感覚の調査—

主査 中嶋 麻起子^{*1}

委員 高田 暁^{*2}

外壁汚れの主原因である気生藻類の発生を予測し、評価指標を確立することを目的とし、実態調査、藻類の平衡含水率測定、増殖予測モデルの改良、汚れの評価実験を行った。その結果、降雨の当たる外壁面では降雨の当たらない外壁面に比べ、降雨による水分供給と藻類自身の吸放湿性状により、藻類個体数が大きく増加することを明らかにした。さらに、汚れに対する人の感覚は汚れの面積比・色差の2つと強い相関を持ち、これらが増加すると人は汚れの程度が大きいと評価することが示し、汚れの物理指標により汚れ感覚を定量的に示すことが可能であることを明らかにした。

キーワード：1) 気生藻類, 2) 外壁汚れ, 3) 平衡含水率, 4) 予測モデル, 5) 熱水分性状解析,
6) 感覚評価, 7) 表色系

STUDY ON THE OCCURRENCE AND EVALUATION INDEX OF SOILING CAUSED BY AIRBORNE ALGAE ON EXTERIOR WALLS

- Creation of growth prediction model considering moisture absorption and desorption
and investigation of sensing index of soiling -

Ch. Makiko Nakajima

Mem. Satoru Takada

To predict the occurrence of airborne algae, which is the main cause of soiling on exterior walls, and to establish a sensing index, measuring the equilibrium moisture content of the algae, improvement the growth prediction model, research the soiling evaluation experiment were conducted. As a result, it was clarified that the algae population on exterior walls exposed to rainfall increases significantly compared to exterior walls that are not exposed to rainfall, due to the moisture supply from rainfall and the algal moisture absorption and desorption properties. Furthermore, it was shown that the human perception of soiling is strongly correlated with the area ratio and the color difference of the soiling, and that when these two factors increase, people evaluate the degree of soiling to be large, making it possible to quantitatively indicate the perception using physical indicators of soiling.

1. 研究の背景と目的

大気中で生育可能な藻類である気生藻類は、屋外壁面に付着・生育し、黒～緑の変色を生じる（写真 1-1、1-

2）。一部の歴史的建造物においては、これらの変色は「歴史を積み重ねた美しさ」として認識されることがあるが、一般の建物では汚れと見なされ敬遠される。この変色現



写真 1-1 外壁面での藻類の発生の様子



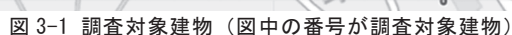
写真 1-2 外壁面での藻類の発生の様子

^{*1}広島工業大学 助教 博士（工学）^{*2}神戸大学 教授 博士（工学）

また、本研究の目指す発生予測モデルにおいては、藻類の個体数が汚れ状態を示すと仮定している。汚れとは人が知覚することで初めて汚れとして評価される。藻類の発生量を予測することで、汚れの発生程度を評価するためには人の汚れに対する感覚量を定量的に評価する手法が必要とされる。橘高らは系列範ちゅう法を用いた汚れ程度の評価を行ない、汚れの感覚尺度と汚れの色差との間には有意な相関があるが、色差のみで感覚量を説明することは困難であることを示した文⁷⁾。外壁汚れに対する人の感覚量の指標については未だ十分に確立されておらず、汚れの物理指標と人の感覚量との関係を定量的に示す必要がある。建物外壁面の汚れに対して、何を指標として汚れと判断するか、汚れの判断基準は何によるものか、どの程度までの汚れを許容できるかを明確にすることを本研究の第2の目的とする。

気生藻類の温度に対する反応は普通の生物の場合と同様で、最適温度に達するまでは温度上昇に伴って増殖速度が増加し、それ以上になると急落して0になってし

汚れの濃さは高度、中度、低度、無しの4段階で評価を行なった。高度とは、下地の色が全く見えず下地の色と全く異なる色が発生しており、遠くから見てはつきりと汚れが認識できる状態とする。中度とは、下地の色がかすかに分かり、近づいて観察すると汚れが判別できる状態とする。低度とは、間近でよく見なければ汚れていると分からない状態とする。



3.1.2. 降雨の当たり方の評価方法

降雨の当たり方は「当たる」「部分的に当たる」「当たらない」の3段階で評価し、外壁面の全体に降雨が当たる場合を「当たる」、外壁面の一部に降雨が当たる場合を「部分的に当たる」、降雨が当たらない場合を「当たらない」と定義した。

3.1.3. 日射の当たり方の評価方法

日射の当たり方は「当たりやすい」「当たらない」の2つの指標で評価を行なった。日中、外壁面に直達日射が当たる場合を「よく当たる」、直達日射はほとんど当たらず天空日射のみが当たる場合を「ほとんど当たらない」と定義した。

3.2. 調査結果

3.2.1. 外壁汚れの状態

調査結果の一例として、汚れの発生状況の写真および外壁の状態、周辺環境について写真3-1～3-3に示す。

3.2.2. 日射・降雨の当たり方と汚れの発生数との関係

日射・降雨の当たり方と汚れの発生数との関係を図3-2に示す。日射が当たりにくい外壁面では、日射が当たりやすい外壁面の約3倍の汚れが発生していた。降雨が当たりにくい壁面では汚れは発生していなかった。日射



写真3-1 建物⑬の北西壁面。

外壁上部に黒色の汚れが発生。汚れの濃さは高度。外壁材料はコンクリート、表面に樹脂系の白色塗料。屋根に当たった雨水が流れ落ちる部位。直達日射は当たりにくい。



写真3-2 建物①の北西壁面。

外壁下部に緑色のすじ状の汚れが発生。汚れの濃さは中度。外壁材料はコンクリート、表面に樹脂系の白色塗料。降雨が当たり、流下する部位。直達日射は当たりにくい。



写真3-3 建物⑤の南西壁面。

壁面全体が薄い黒色に変色。ひび割れ部分は後から補修剤を塗布しているため汚れが発生していない。汚れの濃さは低度。外壁材料はコンクリート、表面に樹脂系の白色塗料。周囲に建物はなく降雨水が当たる可能性あり。直達日射は当たりやすい。

が当たりやすい外壁面では、降雨が当たりやすい外壁面でのみ汚れが発生していたが、日射が当たりにくい壁面では降雨が部分的に当たる外壁面でも汚れが発生していた。日射が当たりやすく高温になりやすい壁面においても、十分な水分供給がある場合、藻類は生育可能であると思われる。よって、外壁面での藻類の発生は降雨による影響を強く受けると考えられる。

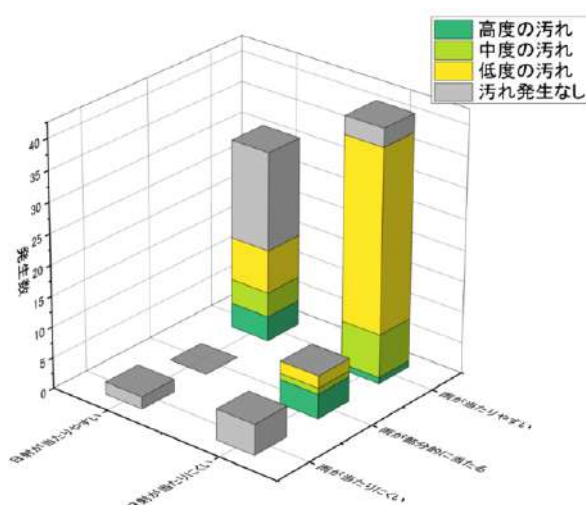


図3-2 日射・降雨の当たり方と外壁汚れの発生数との関係

3.2.3. 日射・降雨の当たり方と汚れの色との関係

日射・降雨の当たり方と汚れの色との関係を図3-3に示す。

降雨が当たりやすい外壁面では、日射の当たり方に関係なく黒色の汚れが多く発生していた。降雨が部分的に当たり、日射が当たりにくい外壁面では緑色の汚れが多く発生していた。黒色の汚れの原因である藍藻類は生育に多くの液水を必要とするが、緑色の汚れの原因となる緑藻類は比較的乾燥している部位でも生育可能であるためと考えられる。

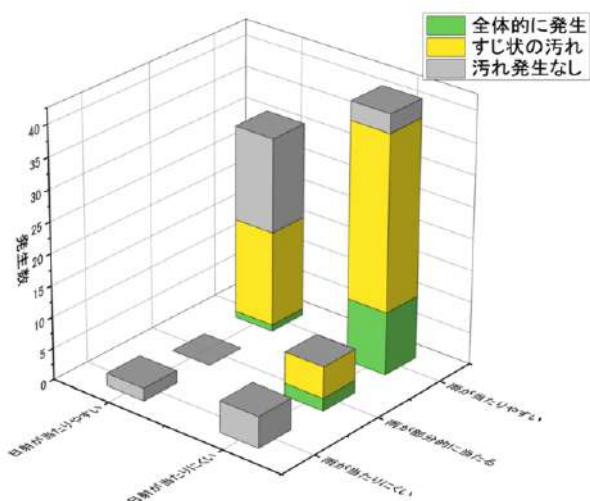


図 3-3 日射・降雨の当たり方と汚れ形状との関係

3.2.4. 日射・降雨の当たり方と汚れ形状との関係

日射・降雨の当たり方と汚れ形状との関係を図 3-4 に示す。

縦に伸びるすじ状の形状の汚れの発生数が最も多かったが、日射が当たりにくく降雨が当たりやすい部位では、外壁面全体が一樣に汚れている形状の発生数が多かった。これは降雨が当たりやすいことで液水が十分に供給され、日射が当たりにくいことで壁面全体が一樣に高含水状態に保持されやすいことが原因と考えられる。

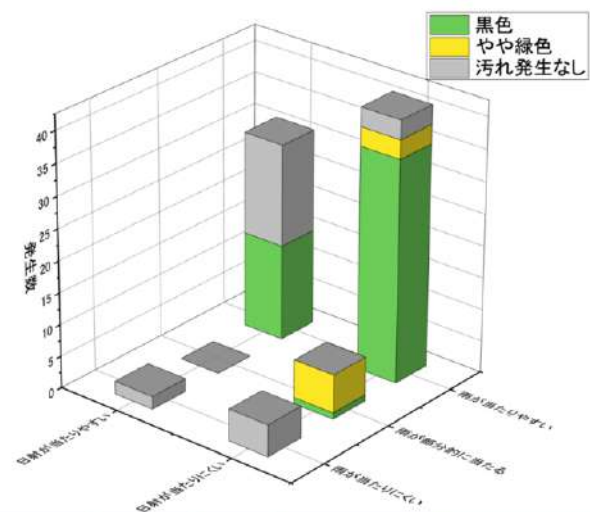


図 3-4 日射・降雨の当たり方と外壁汚れの色との関係

3.3. 外壁表面の温湿度性状と藻類の増殖予測モデル

3.3.1. 藻類の平衡含水率測定

藻類の吸放湿性状を考慮した解析を行う上で必要とされる藻類の平衡含水率の測定を行った。

測定方法は JIS A1475 : 2019 建築材料の平衡含水率測定方法に従った。外壁面から藻類を採取し、温度 65±2℃で 72 時間乾燥させたのち、表 3-1 に示す塩飽和水溶液とともに密閉瓶に入れ、温度 23℃に保ったインキュベーター

タ内に静置した (写真 3-4)。その後、1 日に 1 回質量を測定し、質量変化率が 3 回連続して 0.1%以下となった時点で平衡に達したと判定した。

平衡含水率の測定結果を図 3-5 に示す。これを次節の藻類個体数予測モデルに用いる。

表 3-1 平衡含水率測定に用いた塩飽和水溶液の種類とそれに平衡する相対湿度

塩飽和水溶液の種類	温度 23℃において平衡する相対湿度
塩化リチウム	11.30 %
塩化マグネシウム 6 水和物	32.90 %
臭化ナトリウム	58.20 %
塩化ナトリウム	75.36 %
塩化カリウム	84.65 %
硝酸カリウム	94.00 %



写真 3-4 平衡含水率測定実験の様子

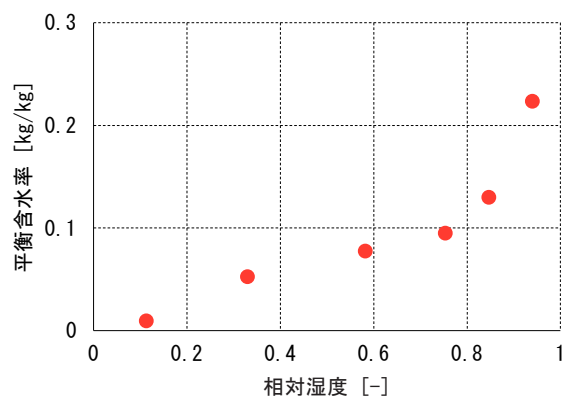


図 3-5 藻類の平衡含水率

3.3.2. 降雨の当たり方の異なる外壁面での藻類個体数変化の予測

(1) 解析概要

前節で述べたように外壁面での藻類の発生には日射、降雨の当たり方が大きく影響している。そのため、本章では降雨の有無による外壁表面温湿度と藻類個体数の違いについて、熱水分性状解析を用いて検討を行う。解析対象は厚さ 100mm の南向きコンクリート外壁とし、広島市の 2020 年度の温湿度・降雨量を用いた。

(2) 藻類個体数の予測モデル

藻類個体数の予測モデルを式(3-1)に示す。これは生物の個体数予測に用いられる指数モデルに環境要因による増殖率(死滅率)の変化を取り入れたモデルである(図3-6) 文 17)。環境要因によって総合環境指数(G)が変化し、増殖率(G_{r0})が負～正の値を取ることで、環境要因による藻類の増殖率(負の値を取る場合は死滅率)の変化を表す。

藻類の増殖・死滅に影響する環境要因として日射量・藻類の温度・藻類の相対湿度を用いる。それぞれの環境要因から、日射量・温度・湿度に対応する環境指数(g_s, g_{Th})を求め、その組み合わせにより総合環境指数が決定される。それぞれの環境指数を図3-7、3-8に示す

$$\frac{dN}{dt} = G_{r0}N \quad (5-1)$$

$$\begin{cases} G = g_{Th}(T_a, h_a) & (T_a < 0, 45 < T_a) \\ G = g_s(S_a) * g_{Th}(T_a, h_a) & (0 \leq T_a \leq 45) \end{cases}$$

N : 藻類個体数[個/㎡], t : 時間 [sec], G : 総合環境指数 [-], r_0 : 最適増殖率 [1/sec], g_s : 日射量に対応する環境指数 [-], g_{Th} : 温度・相対湿度に対応する環境指数 [-], S_a : 日射量 [W/㎡], T_a : 藻類の温度 [°C], h_a : 藻類の相対湿度 [%]

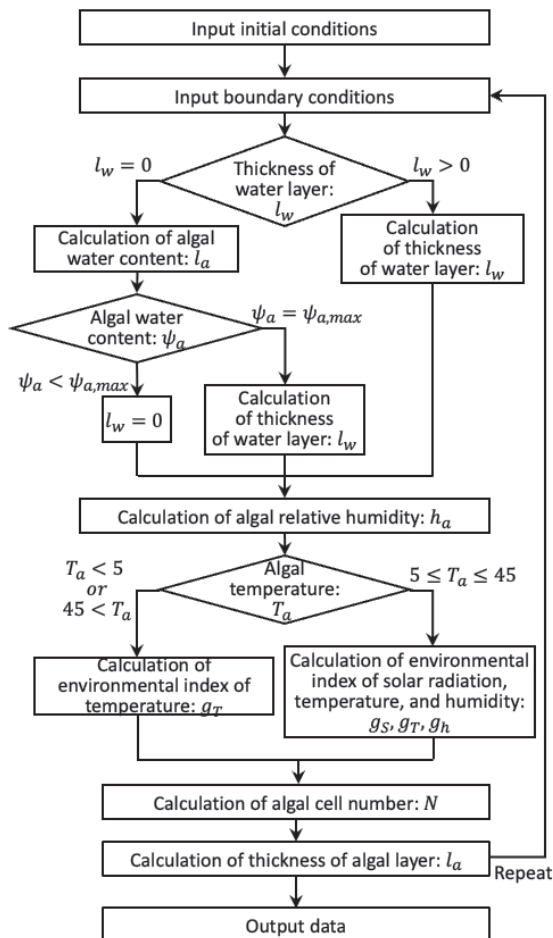


図3-6 藻類個体予測モデルの概要

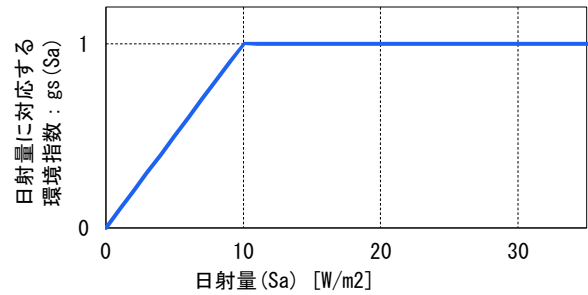


図3-7 日射量に対応する環境指数

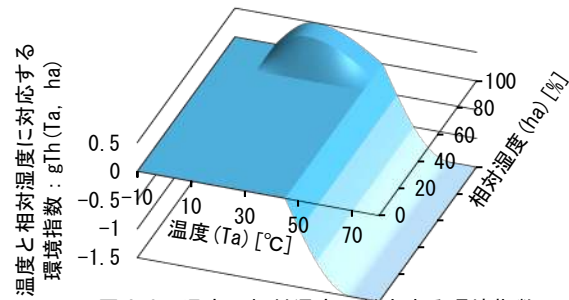


図3-8 温度・相対湿度に対応する環境指数

(3) 熱水分性状解析の基礎式

藻類の個体数予測モデルには、藻類へ入射する日射量、藻類の温度、相対湿度が必要となる。藻類の温度・相対湿度の計算には、式(5-2)、(5-3)に示す建築材料の熱水分性状解析の基礎式を用いる 文 18)。

$$\left(1 - C' \rho' \frac{\partial g}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial t} + C' \rho' \frac{\partial g}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t}\right) = -\nabla J \quad (5-2)$$

$$LC' \rho' \frac{\partial g}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial t} + \left(c \rho + LC' \rho' \frac{\partial g}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t}\right) = -\nabla q - L \nabla J_g \quad (5-3)$$

C' : 材料の空隙率 [m³/m³], ρ' : 空気密度 [kg/m³], $X = g(w, \theta)$: 絶対湿度 [kg/kgDA], w : 含水率 [kg/m³], t : 時間 [sec], θ : 温度 [°C], J : 水分流(液水, 水蒸気) [kg/m²s], $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$, L : 蒸発潜熱 [J/kg], c : 材料の比熱 [J/kgK], ρ : 材料の密度 [kg/m³], q : 熱流 [W/m²], J_g : 水蒸気流 [kg/m²s]

(4) 藻類への日射量

全天日射量測定値を直散分離して直達日射量と天空日射量を求め、それらから南向き鉛直面に入射する日射量を求めた。

(5) 藻類の温度

外壁面に形成される藻類層の厚みは非常に薄いので、藻類の温度は外壁表面温度と等しいと仮定した。

(6) 藻類の相対湿度(含水率)

材料表面に吸湿性を持つ藻類層が発生すると仮定し、藻類の水分収支を考慮したモデルを作成する。ただし、

藻類の含水率が飽和ではない場合（a. 表面に水膜が形成されていない場合）と、藻類の含水率が飽和である場合（b. 表面に水膜が形成されている場合）の2つに分けモデルを作成した（図3-9）。

a. 表面に水膜が形成されていない場合（図3-9 左）

降雨や湿気伝達により藻類層に水分が供給されるとし、藻類層の水分収支式を以下のように定めた。

$$\rho_w l_a \frac{\partial \psi_a}{\partial t} = \alpha' (X_o - X_a) + Rain - J_{out} \quad (5-4)$$

ρ_w ：液水の密度 [kg/m³]， l_a ：藻類層の厚み [m]，
 ψ_a ：藻類の含水率 [m³/m³]，
 α' ：湿気伝達率 [kg/m²s (kg/kgDA)]， X_o ：外気の絶対湿度 [kg/kgDA]， X_a ：藻類の絶対湿度 [kg/kgDA]， $Rain$ ：降雨量 [kg/m²]， J_{out} ：藻類層から外装材料へ流れる水分流 [kg/m²s]

b. 表面に水膜が形成されている場合（図3-9 右）

藻類の含水率は飽和状態（相対湿度 100%）であるとし、表面の水膜に対する水分収支式を以下のように定めた。水膜は一定厚さ以上となると流れ落ちるとした。

$$\rho_w \frac{\partial l_w}{\partial t} = \alpha' (X_o - X_w) + Rain - J_{out} \quad (5-5)$$

l_w ：水膜の厚み [m]， X_w ：水膜の絶対湿度 [kg/kgDA]

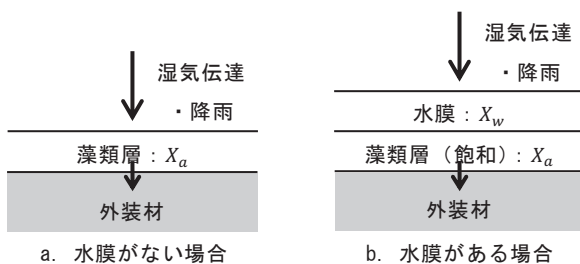


図3-9 藻類の含水率計算モデル

3.3.3. 解析結果

(1) 外壁表面温湿度

外壁表面温度と相対湿度の1年間の発生頻度を図3-10、3-11に示す。降雨の有無による外壁表面温度の違いは非常に小さいが、相対湿度は大きく異なっている。降雨の際、外壁表面に浸透した雨水により材料表面が高湿度となるためと考えられる。本解析においては外壁表面に発生した藻類自身の含水も考慮しているため、降雨により高湿度となった外壁に藻類が発生した場合、藻類自身の含水により高湿度状態がさらに長時間維持されることで、藻類の増殖が加速する可能性が考えられる。

(2) 藻類個体数の変化

外壁表面での藻類個体数の変化を図3-12に示す。基準化個体数とは、予測開始時の藻類個体数を1とした場

合の個体数の変化を示す。

解析開始より3000日後から5000日後まで個体数は大きく増加した。これは5月～7月に相当する期間であり、外壁表面において藻類の増殖に適した15～25℃の温度が多く発生すること、梅雨の時期であることから高湿度が多く発生することが原因であると考えられる。個体数の増加量は降雨の有無により大きく異なっている。降雨有りの場合、降雨なしに比べて1年後の個体数は約4.3倍となった。3.4.2節で示したように、降雨により外壁表面が高湿度となり藻類は増殖しやすい。さらに、藻類自身の含水により増殖が加速する。そのため、降雨による水分供給は外壁面での藻類の発生に大きく影響することが明らかとなった。

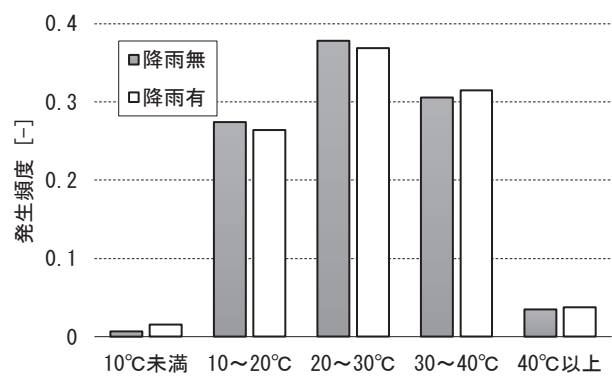


図3-10 外壁表面温度の発生頻度

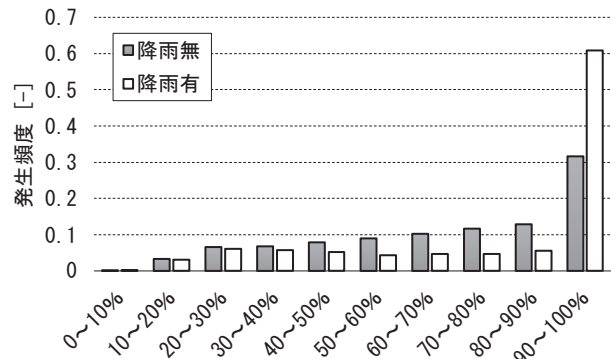


図3-11 外壁表面相対湿度の発生頻度

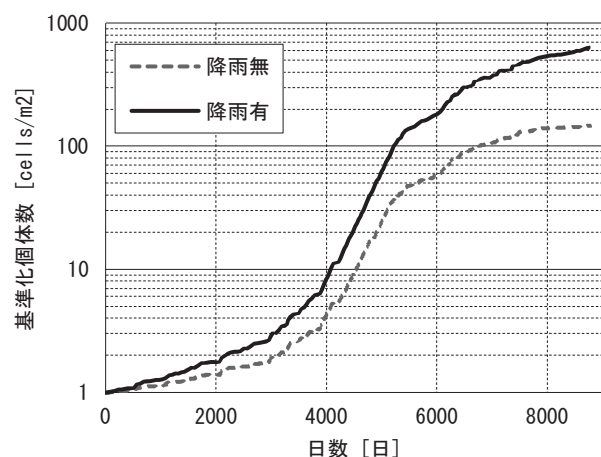


図3-12 藻類の基準化個体数の変化

4. 外壁面の汚れの感覚量についての調査

建物外壁面の汚れに対して、何を指標として汚れと判断するか、汚れの判断基準は何によるものか、どの程度までの汚れを許容できるかを明確にすることを目的とし、外壁表面の測色値、汚れの発生面積比と、汚れに対する人の感覚量についてのアンケート調査を実施した。

4.1. 調査概要

広島工業大学に所属する大学生 20 名を対象とし、外壁面を撮影した 10 枚の写真試料を用いたアンケート調査を実施した。外壁面の写真試料は、外壁材料、汚れの形状、汚れの色の異なる写真を用意した（写真 4-1）。写真資料は曇天～晴天時に対象壁面をデジタルカメラで撮影し、A4 サイズの光沢紙に印刷した。撮影時、カメラの絞り条件は適正露出と±1 の 3 条件とし、印刷された写真のうち、実際の明るさに最も近いものを実験試料とした^{※7)}。アンケートの実施手順は以下の通りである。

- ① 10 枚の写真を被験者へ提示
- ② 被験者が汚れていると感じている順に写真を並べてもらい、その順序を記録する。
- ③ 手順②において、順序を決定した際の理由についてインタビューし記録する。
- ④ 手順②において順序を決定した際に、被験者が外壁面において汚れていると感じた部位（汚れ部位）、汚れていないと感じた部位（非汚れ部位）を質問し記録する。

4.2. 調査結果

表 4-1 に各被験者の汚れ順位と総合順位を示す。汚れ順位とは各写真を汚れていない順に並べたものであり、数値が大きいほど汚れていると評価されている。総合順位とは各被験者の順位を合計したものであり、数値が大きいほど、その写真は汚れていると評価されている。これらの調査結果に対して、フリードマンの順位検定を行った結果、 $p < 0.05$ となり、本実験における汚れ順位は有意であると評価された。

汚れ順位の大きい（汚れていると評価された）総合順位 8～10 位の写真 d, e, f と、汚れ順位の小さい（汚れていると評価されなかった）総合順位 1～3 位の写真 c, h, j に対するコメントを表 4-2 に示す。

汚れ順位を評価する際の理由は大きく 3 つに分けられた。汚れている面積に対する評価、壁の地の色と汚れの色との違いに対する評価、汚れ自体の色に対する評価である。写真 d, e, f のように汚れている面積が広く、壁の地の色と汚れの色の違いが大きい場合、その外壁は汚れていると評価された。また、写真 e, f のように黒色の汚れが発生している場合、汚れに対して否定的な評価がなされている。しかし、写真 d のように木材の表面に緑色～黄色の汚れが発生している場合、「汚れていると思わない」「木材なので味がある」など汚れに対して肯定的な評価が一部見られた。外壁材料の素材、汚れ自体の色が汚れの評価に一部影響を及ぼしていると考えられる。

4.3. 汚れ順位に影響を及ぼす物理指標についての検討

インタビュー調査において、汚れの順位を判断の際、汚れている面積、壁の地の色と汚れの色との違い、汚れ自体の色の 3 つの指標を用いて評価されていた。よって、実験手順(3)において各被験者が示した外壁面の「汚れ部位」「汚非汚れ部位」の面積、測色値を指標として汚れ順位との比較を行う。

4.3.1. 汚れ部位と非汚れ部の面積比・色差の算出

3mm 間隔のメッシュを印刷した透明シートを用意し、写真に重ね、汚れ部位と非汚れ部位の占めるメッシュ数を計数し、式(4-1)によって汚れの面積比と算出した。

色差は、汚れ部位と非汚れ部位においてそれぞれ 5 点を選択し、各 3 回ずつ計 15 回の測色値を求め、式(4-2)により算出した。

$$\Delta S = \frac{\text{外壁の汚れている部位の面積}}{\text{外壁の汚れていない部位の面積}} \quad (4-1)$$

ΔS : 汚れの面積比

表 4-1 各被験者の汚れ順位と総合順位

		被験者																				総合 順位
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
写 真	a	4	2	9	9	8	6	8	9	5	8	9	6	7	7	6	7	7	5	10	2	134
	b	7	4	5	5	4	4	4	5	6	4	5	5	5	5	3	2	5	6	4	6	94
	c	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	25
	d	8	9	7	4	7	9	7	7	8	7	7	10	6	9	2	8	3	8	6	10	142
	e	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10	4	9	9	10	8	9	188
	f	9	7	8	8	9	8	9	6	9	9	8	8	9	8	9	10	10	9	9	8	170
	g	6	6	3	6	5	3	5	4	2	5	4	4	8	3	10	3	6	4	5	5	97
	h	3	5	4	3	3	5	3	3	3	3	2	2	4	2	5	5	4	3	3	1	66
	i	5	8	6	7	6	7	6	8	7	6	6	7	2	6	8	6	8	7	7	7	130
	j	2	3	2	2	1	2	1	2	4	2	3	3	3	4	7	4	2	2	2	3	54

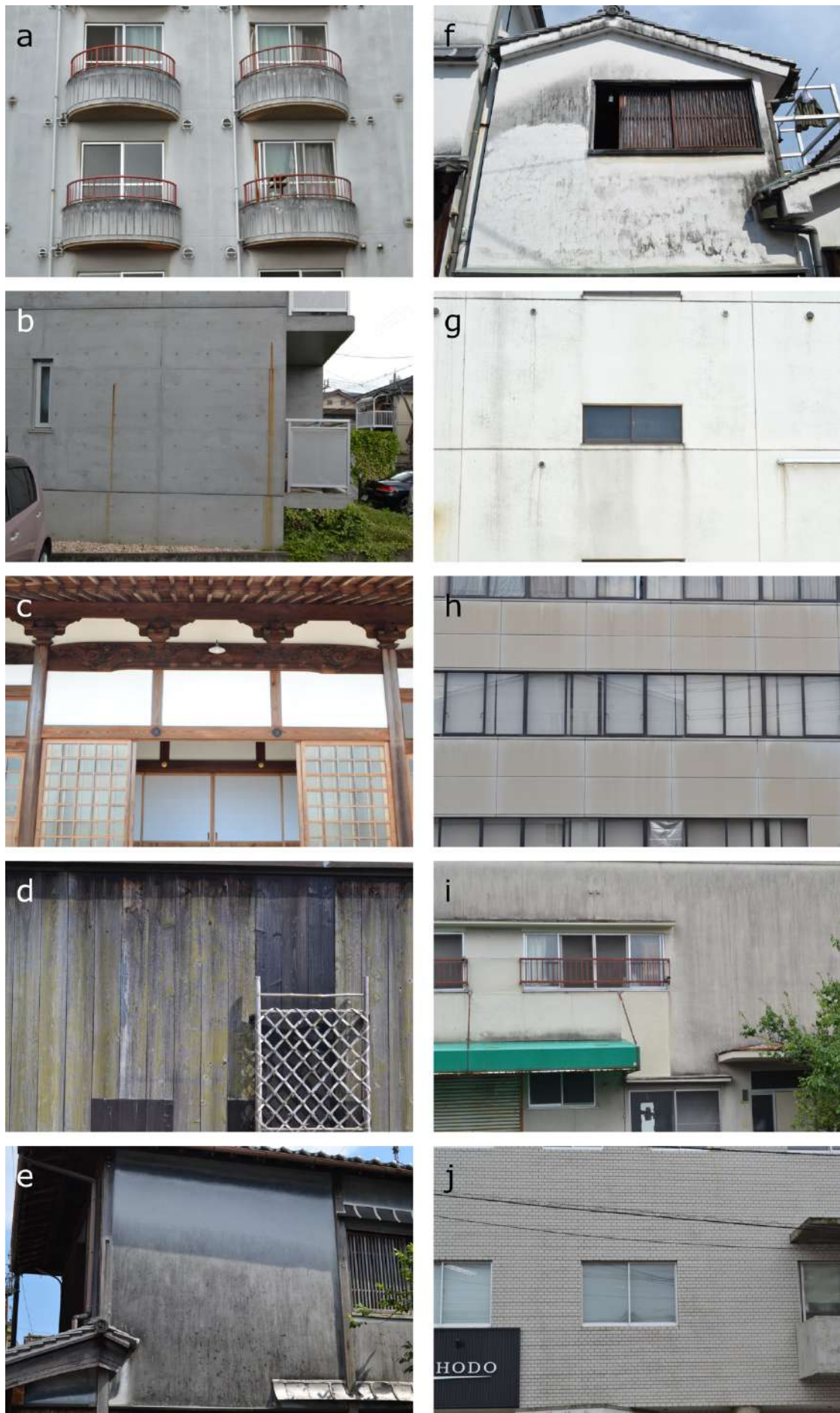


写真 4-1 汚れ評価実験に用いられた写真

表 4-2 汚れ順位を決定した際の理由

	汚れの面積についてのコメント	壁の地の色と汚れの色の違いについてのコメント	汚れの色についてのコメント	その他
写真 e 総合順位 1 位	汚れの範囲が広い 汚れの面積が大きい 全体的に汚れている 汚れの割合が多い	目に見えて汚い 壁面が白く黒い汚れが目立つ 汚れの色が濃い 壁と汚れの色の差が大きい 差が一番大きく、目立つ	黒い汚れが発生 全体的に黒い 一番黒ずんでいる 黒ずみがひどい 色が黒くて目立つ	遠くから見ても汚れている と感じる
写真 f 総合順位 2 位	汚い範囲が広い 全体的に汚れている 写真 e より汚れの範囲が狭い	白い壁に黒い汚れが目立つ 汚れの度合いが大きい 濃い汚れ 一部がすごく汚い	黒い	触りたくない 景観を損ねている
写真 d 総合順位 3 位	黄色の汚れが全体に発生 全体的に汚れている	変色が目立つ 目立つ汚れが発生 色々な汚れが発生	黄色の汚れが発生 黄ばんでいる 地の木の色がない	苔が発生している 木材なので味がある 汚れていると思わない
写真 c 総合順位 10 位	(コメントなし)	(コメントなし)	木の部分 (柱の部分) に黒い 汚れが発生	汚れていない きれい
写真 j 総合順位 9 位	白い部分の面積が広い 汚れは一部だけ 全体的に薄い汚れが発生	黒い汚れが目立たない 全体的に色が変わっている タイルで汚れが目立ちにくい	黒い汚れが発生 黒ずみが少ない	きれい 色褪せなので汚いとは思わない
写真 h 総合順位 8 位	部分的な汚れである	汚れの色が薄い	(コメントなし)	汚いとは思わない あまり汚れていない 色褪せである

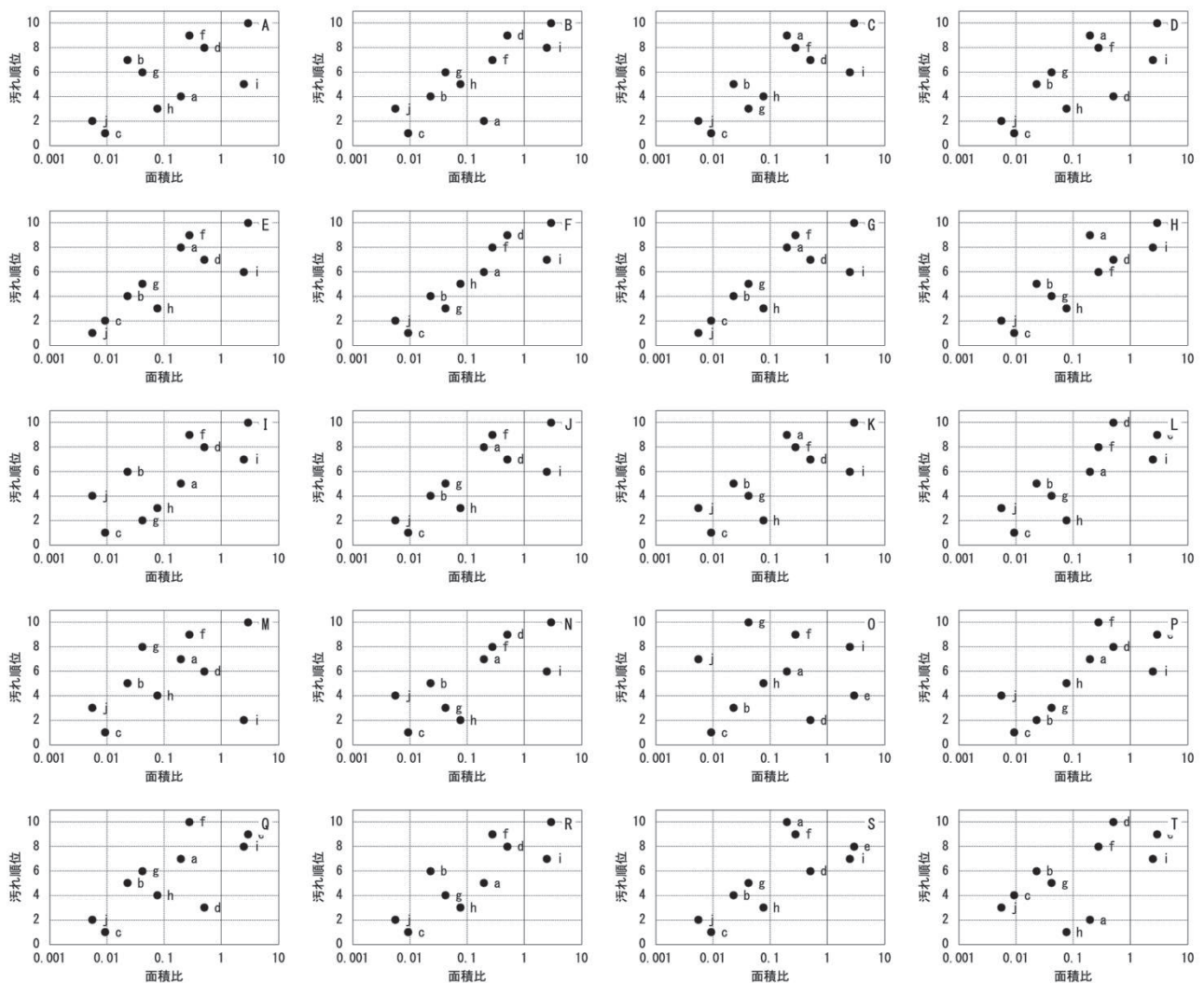


図 4-1 各被験者の汚れ順位と汚れの面積比との関係

(グラフ右上のアルファベットは被験者番号, グラフ内の小文字アルファベットは写真番号)

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^*{}^2 + \Delta a^*{}^2 + \Delta b^*{}^2} \quad (4-2)$$

ΔE : 汚れの色差, $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$: $L^*a^*b^*$ 表色系での汚れ部位と非汚れ部位の各測色値の差

4.3.2. 汚れ順位と面積比・色差との関係

各被験者の汚れ順位と面積比との関係, 色差との関係を図4-1, 4-2に示す。

各被験者の調査結果はばらつきがあるものの, 被験者0を除くと, 汚れの面積比の増加にともない汚れ順位も増加し, 外壁面において汚れていない部位に対して汚れている部位の面積が増加するにつれ, 人は汚れの程度が大きいと評価することがわかる。また, 色差についても被験者0を除けば, 汚れている部位と汚れていない部位の色差が増加するにつれ汚れ順位も増加し, 汚れの程度が大きいと評価されている。

調査によって得られた各写真の順位の和を総合順位として, 総合順位と汚れ面積比との関係, 色差との関係

を図4-3, 4-4に示す。汚れの総合順位は汚れの面積比の対数に比例し増加した。その相関係数は $r=0.85$ である。また, 汚れの総合順位は汚れ色差に比例し増加した。その相関係数は $r=0.83$ である。

ウェーバー・フェヒナーの法則において, 人の感覚量は受ける刺激の強さの対数に比例するとされている。汚れの評価においてもこの法則が適用され, 汚れの面積比が受ける刺激の強さであるとみなすと, その対数に比例して汚れの評価尺度が決まると考えられる。

色差とは等色色空間において定められる心理物理量の1つであり, 刺激の強さ(色の違い)に対する感覚量が等間隔となるようにあらかじめ定められている。そのため, 本実験においては汚れの総合順位は色差に比例したと考えられる。

したがって, 人の汚れに対する感覚量は汚れている部位と汚れていない部位の面積比・色差と強い相関を持ち, これらが増加するにつれ, 汚れているという評価がなされることが明らかとなった。

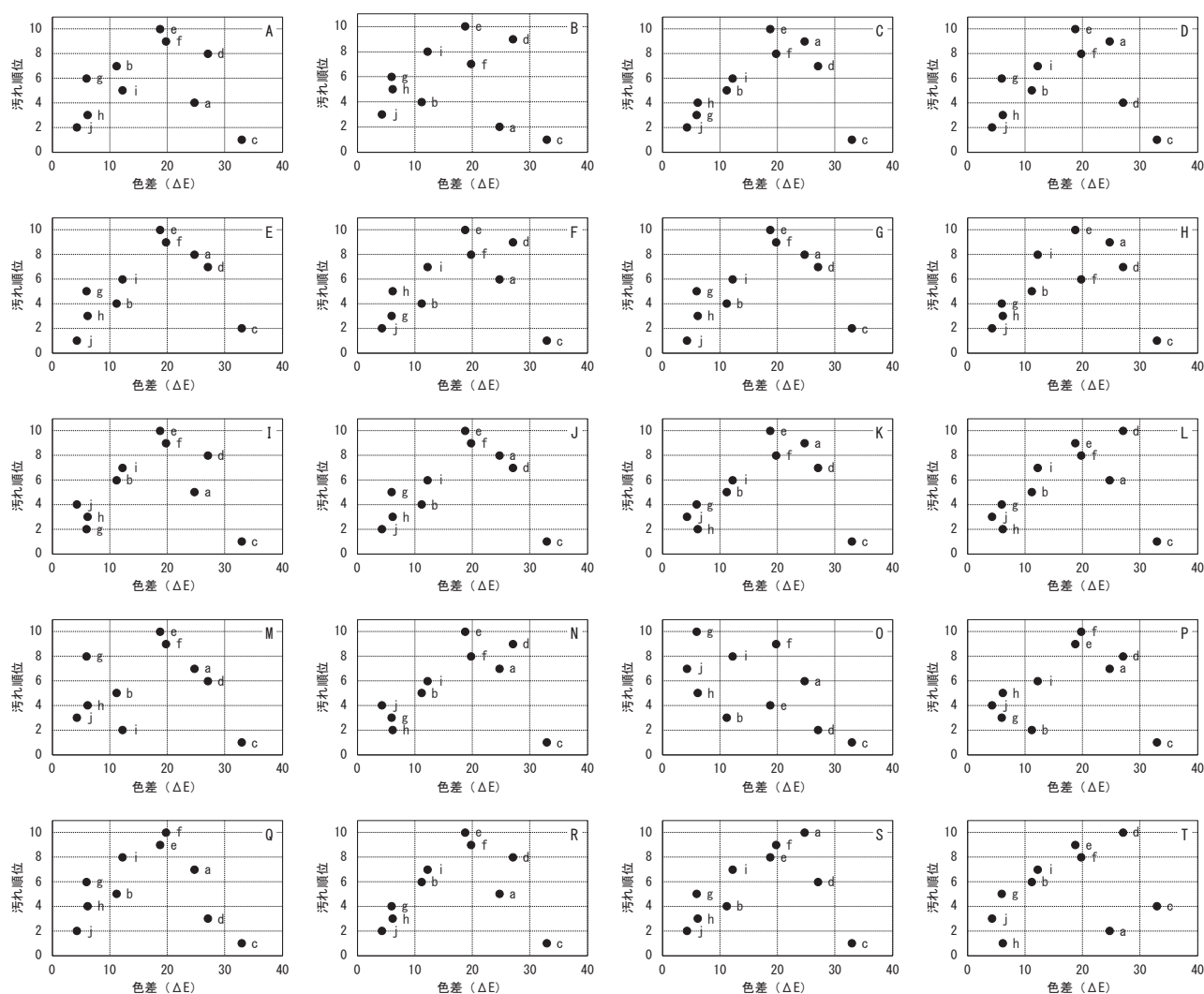


図4-2 各被験者の汚れ順位と汚れ色差との関係

(グラフ右上のアルファベットは被験者番号, グラフ内の小文字アルファベットは写真番号)

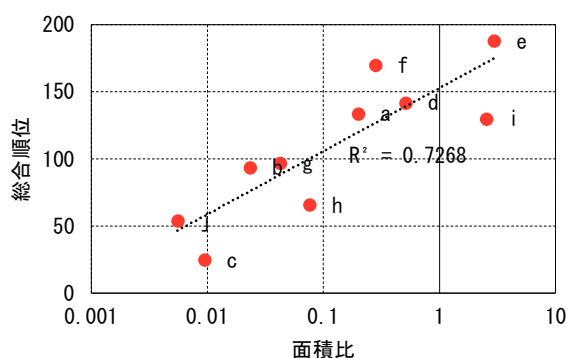


図 4-3 汚れ総合順位と面積比との関係

(グラフ内の小文字アルファベットは写真番号)

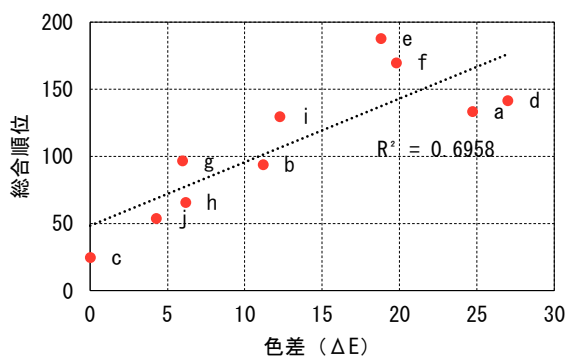


図 4-4 汚れ総合順位と色差との関係

(グラフ内の小文字アルファベットは写真番号)

5. まとめ

本研究では、屋外壁面での藻類の発生・増殖に影響する要因を明らかにし、藻類の吸放湿性状を考慮した増殖予測モデル作成すること、汚れの物理指標と人の感覚量との関係を定量的に示すことを目的とし、外壁面の汚れ調査、藻類の平衡含水率測定、増殖予測モデルの改良、汚れ評価実験を行なった。これらにより以下のことが明らかとなった。

- (1) 降雨が当たりにくい壁面では汚れは発生しておらず、日射が当たりやすく高温になりやすい壁面においても、十分な水分供給がある場合、藻類は生育可能であると思われる。よって、外壁面での藻類の発生は降雨による影響を強く受けると考えられる。
- (2) 降雨が当たりやすい外壁面では、生育のために液水を必要とする藍藻類が多く発生し、降雨が部分的に当たる外壁面では、わずかな水分でも生育可能である緑藻類が多く発生していた。
- (3) 藻類個体数の増加は、降雨の有無により大きく異なり、降雨有りの場合、降雨なしに比べて1年後の個体数は約4.3倍となった。降雨により外壁表面が高湿度となること、藻類自身の吸湿により高湿度が維持されることで増殖が加速する。
- (4) 人が汚れの程度を評価する際の理由は、汚れている面積に対する評価、壁の地の色と汚れの色との違いに対する評価、汚れ自体の色に対する評価の3種類に分けら

れる。

(5) 汚れの評価は、汚れの面積比の対数に比例し、また、汚れ色差に比例する。

(6) 人の汚れに対する感覚量は、汚れている部位と汚れていない部位の面積比・色差と強い相関を持ち、これらが増加するにつれ、汚れているという評価がなされる。

<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) A. Z. Miller, P. Sanmartín, L. Pereira-Pardo, A. Dionísio, C. Saiz-Jimenez, M.F. Macedo, et al., Bioreceptivity of building stones: A review, Sci. Total Environ. 426 (2012) 1-12. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.03.026.
- 4) N.A. Cutler, H.A. Viles, S. Ahmad, S. McCabe, B.J. Smith, Algal "greening" and the conservation of stone heritage structures, Sci. Total Environ. 442 (2013) 152-164. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.050.
- 5) P.M. Gaylarde, C.C. Gaylarde, Algae and cyanobacteria on painted buildings in Latin America, Int. Biodeterior. Biodegradation. 46 (2000) 93-97. doi:10.1016/S0964-8305(00)00074-3.
- 6) C. Gaylarde, M. Ribas Silva, T. Warscheid, Microbial impact on building materials: an overview, Mater. Struct. 36 (2003) 342-352. doi:10.1007/BF02480875.
- 7) 橘高義典: 建物外壁面の汚染の調査および基礎的考察 建築物外壁仕上材料の汚染の評価方法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第370号, pp. 11-18, 昭和61年12月
- 8) 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
- 9) S. C. Agrawal and V. Singh: 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
- 10) S. C. Agrawal and V. Singh: 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

- 11) S. C. Agrawal and V. Singh: 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
- 12) S. C. Agrawal and U. Pal: 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
- 13) S. Gupta and S. C. Agrawal: 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 (1) , pp. 37-40, 2004
- 14) S. Gupta and S. C. Agrawal: Survival of Blue-Green and Green Algae under Stress Conditions, *Folia Microbiol.*, 51 (2) , pp.121-128, 2006
- 15) S. Gupta and S. C. Agrawal: Vegetative Survival of Some Wall and Soil Algae under Stress Conditions, *Folia Microbiol.*, 53 (4) , pp. 343-350, 2008
- 16) N. Häubner, R. Schumann and U. Karsten: Aeroterrestrial microalgae growing in biofilms on facades - Response to temperature and water stress. *Microbial Ecology* 51(3), pp. 285-293, 2006
- 17) Makiko Nakajima, Daisuke Masueda, Shuichi Hokoi, Takayuki Matsushita: Airborne Algal Growth on Roofs of Membrane-structured Residences in Cold Area of Japan, *Journal of Building Physics*, 2020, doi: 10.1177/1744259120980034
- 18) 中村泰人, 松尾陽, 松本衛, 土屋喬雄, 橘秀樹, 宮田紀元: 新建築学体系 10 環境物理, 彰国社, pp.127-134, 1984

<研究協力者>

尾坂 翔馬 神戸大学工学部学生 (2020 年度)
 草間 海人 広島工業大学工学部学生 (2021 年度)
 広島工業大学工学部建築工学科 学生 20 名