

可視光応答型光触媒による室内空気質の改善効果に関する研究[†] —前橋市複合施設における長期実測調査の分析—

藤澤星*, 三田村輝章**

Field Survey for the Improvement Effect of Indoor Air Quality by Visible Light Responsive Photocatalyst[†] -Analysis of long-term Measurement Result in the Complex Facility-

Sei Fujisawa*, Teruaki Mitamura**

This study is field survey to make clear the improvement effect of Indoor Air Quality by Visible Light Responsive Photocatalyst in a real environment condition, which is in a lobby area of the complex operated by Maebashi City. Measurement of IAQ is basically to compare some indicators, for example concentration of VOC and fungi in the air, ATP check on the wall, between with VLRP in 9th floor and without it in the 8th floor. As a result, decreasing concentration of VOC and fungi in the air et al. by VLRP effect for a day was not confirmed. However, Mann-Whitney U test showed that concentration of formaldehyde and acetaldehyde between groups which are with VLRP and without it are statistically significant, and RLU data on the wall by ATP check as well. This shows that other factor, for example air ventilation and temperature, would more dominant IAQ than VLRP effect, but RLU data on the wall with VLPR is evidence about the improvement effect by VLRP effect. So this analytical finding suggests that an analysis in long term would be better than it in short term about improvement effect generated by VLRP.

Key words : Photocatalyst, Field Survey, VOC, ATP Check, Air Quality

1 はじめに

可視光応答型光触媒は、その酸化分解力による有機物分解効果が注目され、建築分野においても活用が進められている¹⁾²⁾。特に可視光応答型光触媒の「抗菌・抗ウイルス効果」は感染症リスク低減などへの適用・応用を目的とした研究、現場への適用が進められてきたが、性能や効果が判りにくいという問題は解消されていない。

そのような光触媒効果や性能の不明瞭さを背景に、光触媒工業会による「PIAJ 認証制度³⁾」によって様々な効果が数値化され、光触媒製品の性能を比較することができるようになった。しかし、その測定方法はあくまでも実験室での高濃度・高照度環境下における性能評価であり、それを低濃度・低照度である実環境に適用した場合の性能を保証する訳ではなく、更に実環境において光触媒効果を長期間に渡って実測調査した研究事例⁴⁾は少ない。

以上より、本研究は実空間における可視光応答型光触

媒による室内空気質の改善効果を定量化することを目的として、通年で不特定多数の利用者が滞在する前橋市内の複合施設において、約2年間(2014年度～2015年度)の長期的な定点測定を実施し、その結果を分析した。

2 実測調査の概要

2・1 複合施設と測定場所の概要

測定を実施した施設は、群馬県前橋市にある市営の複合施設である。建物は鉄筋鉄骨コンクリート構造及び鉄骨構造で、地上12階・地下1階建てである。1992年に開館して、建築後27年が経過しており、2015年には設備の老朽化を背景とした「ESCO (Energy Service Company) 事業」を開始し、空調熱源などの改修・高効率化が図られている。

筆者はこの市営複合施設の環境改善(主にタバコ臭)を目的として、2013年11月に9階ロビーの天井・壁面に可視光応答型光触媒⁵⁾を施工した。採用した光触媒は

[†] 原稿受理 平成31年2月28日 Received February 28, 2019

* 研究科環境・生命工学専攻 (Environment and Life Engineering)

** 建築学科 (Department of Architecture)

酸化チタンのみで構成されており、紫外線域に加えて蛍光灯やLEDからの可視光域（波長400nm～500nm）での反応が強化されているため、室内環境においても高い光触媒効果を発揮することができる。

Fig.1に、9階ロビーの平面図・光触媒施工場所などを示す。光触媒は西側と東側の壁面（西側：20.30m²、東側：19.65m²）および天井面（77.19m²）に施工している。宴会場・会議室がある8・9階ロビーは南面にガラス窓があり、天井高に違い（8階4m、9階3m）はあるものの、構造はほぼ似通っている。

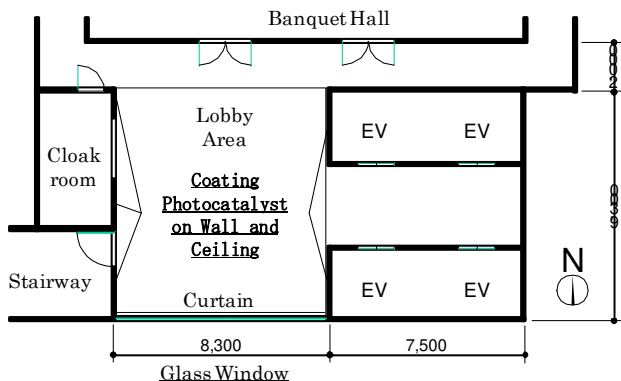


Fig.1 Floor Plan of 9th Floor in Municipal Complex.

2・2 各測定方法

2・2・1 測定概要

光触媒施工済の9階ロビーと光触媒未施工の8階ロビーの各測定データを比較・分析することによって、光触媒による空気室改善効果を定量化する。Table1に測定時期・条件を示す。なお、第6回（2015年3月30日）から第7回（2016年1月22日）の間に測定を実施していないのは、前述のESCO事業で8・9階ロビーにおいても工事が実施されており、測定結果への影響を考慮して測定を控えていたためである。

測定項目は、室内温湿度、壁面・天井面の照度・紫外線量、化学汚染物質濃度（カルボニル化合物、VOC）、浮遊真菌・総細菌濃度、ATP（Adenosine Triphosphate）拭き取り検査、パネルによる臭気測定である。

Table1 Measurement Date and Conditions.

	Date	Air Conditioning	Mesurement Timing	Sunshine hour*
1st	2014/8/29	ON	Morning Daytime Evening	1.7h
2nd	2014/9/8			1.6h
3rd	2014/10/25			9.6h
4th	2014/11/27	OFF	Morning Daytime	5.0h
5th	2015/2/20			7.3h
6th	2015/3/30			11.3h
7th	2016/1/22	ON		9.4h

*Japan Meteorological Agency

2・2・2 温湿度・照度測定

室内温湿度は、小型温湿度データロガー（T&D製、TR-72U）を床上1.0m付近と空調の吹出口に設置した。照度・紫外線量は、小型照度・紫外線量データロガー（T&D製、TR-74Ui）を窓面から2.0m付近における壁面（床高さ1.5m）と天井面に機器を設置して、いずれも15分間隔でデータを記録する。

2・2・3 各空気質測定

化学汚染物質濃度、浮遊真菌・細菌濃度の測定は、2014年8月～2015年3月の間に合計6回実施し、第1回～第3回では、朝（7時頃）、昼（11時頃）、夕（15時頃）の3～4時間間隔でそれぞれ3回、第4回以降では、朝（9～10時頃）、昼（13～14時頃）のそれぞれ2回実施した。1日の中で複数回測定したのは、時間の経過に伴い、朝から夕方に掛けて、光触媒効果によって空気質指標が改善するという仮説を検証するためである。

化学汚染物質濃度は、カルボニル化合物は捕集剤としてDNPHカートリッジ（ジエールサイエンス製、InertSep mini AERO）を、VOCは活性炭チューブ（柴田科学製、チャコールチューブ・スタンダード型）を用いて、ミニポンプ（柴田科学製、MP-Σ30）により流量0.5l/minで60分間空気の捕集を行い、捕集剤に吸着した化学物質濃度を分析する。浮遊真菌濃度はPDA培地を用い、エアサンプラー（Merck製、MAS-100Eco）により50l/minで1分間空気を培地に吹き付けた後、インキュベーターにて25℃の環境下で5日間培養後、コロニー数をカウントする。総細菌濃度はミニポンプ（柴田科学製、MP-Σ500N）によりポアサイズ0.45μmのメンブレンフィルタ（柴田科学製、マイクロチェックII）に流量4l/minで40分間空気をろ過させた後、液体培地（柴田科学製、総細菌用）を注入し、インキュベーターにて33℃の環境下で2日間培養後に、コロニー数をカウントする。

2・2・4 ATP拭き取り検査

光触媒は有機物であるATPを分解するため、壁面のATP量は光触媒の有無によって影響を受けると考えられる。ATP拭き取り検査は、ATPの発光量を示すRLU（Relative Light Unit）という単位でATP量を表すため、RLU値が大きいことは生物のエネルギー源となるATP量が多いことを示す。現在は感染症や食中毒予防として、食品加工工場や病院などでの洗浄や手洗い教育ツールとして応用されることが一般的であるが、建築分野においては清掃前後の表面汚染度調査研究⁶⁾にも利用されている。

2013年11月の施工直後から2018年12月まで、ルミテスターPD-20（キッコーマンバイオケミファ製）によるロビー壁面に対するATP拭き取り検査を定期的に行っている。9階ロビーは四隅（南東、南西、北東、北西）の合計4箇所、8階ロビーは南側ロビー四隅（南東、南西、北東、北西）と西側ロビー2点（南、北）の合計6箇所を測定ポイントとしているが、それぞれのポイントで拭き取る場所は毎回完全に一致していない。また、

全ての測定作業は筆者が実施している。

なお、2015年7月から2016年12月までは1回/月の頻度で測定を実施していたが、2016年以降は1回/2~3ヶ月に測定頻度を下げている。

2・2・5 パネルによる臭気測定

人間が感じる臭いを定量化するために、日本建築学会規準⁷⁾に基づく被験者（パネル）実験を、2016年2月16日に1回だけ行った。パネルは前橋工科大学の学生12名で、男女比は5:1である。なお、学会規準においてはパネルの基本要件を定めているが、あくまでも試験的な実施という位置付けのため、適切なパネル選定・訓練は行っていない。

評価方法は入室法とし、12人のパネルを2班に分け、午前（10時～）、午後（15時～）の2回、8階・9階ロビーをそれぞれ交互に訪れた。各ロビーへは、1階からエレベータを利用し、直接各階に入室した。評価尺度は「6段階臭気強度」と「9段階快・不快強度」の両方として、エレベータから入室後、ロビー中央にて回答用紙に記入し、記入が終わるとエレベータにて退室した。なお、連続して8・9階を訪問・回答するのではなく、1階ロビーにて10分間の休憩を挟むことで、バイアスを回避した。

ちなみに、「容認性」の回答も回収しているが、学会基準ではパネル人数60人以上、検査回数1回が推奨されており、本研究ではその基準を満たしていないため、あくまでも参考データとして取り扱う。

3 測定結果と考察

3・1 壁面・天井照度

Fig.2に、9階の東西壁面と天井の平均照度を示す。本項においては、10:00~17:45までの8時間分のデータを利用している。なお、光触媒工業会では、様々な部屋や空間の代表的な照度をガイドライン⁸⁾として設定している。このガイドラインでは、壁面や天井面などの間接的に証明が当たる場所として200lxが設定しており、より高性能で弱い光でも効果を発揮する光触媒製品のターゲット照度としている。

Fig.2より、平均値としては第2回の天井面以外は200lxを超えており、光触媒工業会のターゲット照度を満たしている。また、東西面と比較すると、天井面の照度が低いことが判る。なお、4回目の東面平均値が3,276lxと高くなっており、センサーに直射日光が当たっていた時間があつたのではないかと推測される。

また、Fig.3に各回の照度分布を示す。上段が東面・中段が西面、下段が天井面である。Fig.3より、2回目は曇っているために照度が低い時間が多いが、それ以外についてはガイドライン標準照度である1,000lxを超える時間帯が多く、光触媒反応に十分な照度が確保できていることが判る。

3・2 化学汚染物質濃度

Fig.4に化学汚染物質濃度（カルボニル化合物、VOC）の測定結果を示す。上段が8階（光触媒未施工）で、下

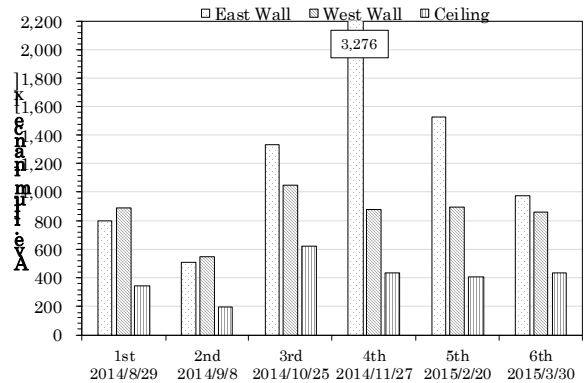


Fig.2 Average Illuminance in 9th Floor.

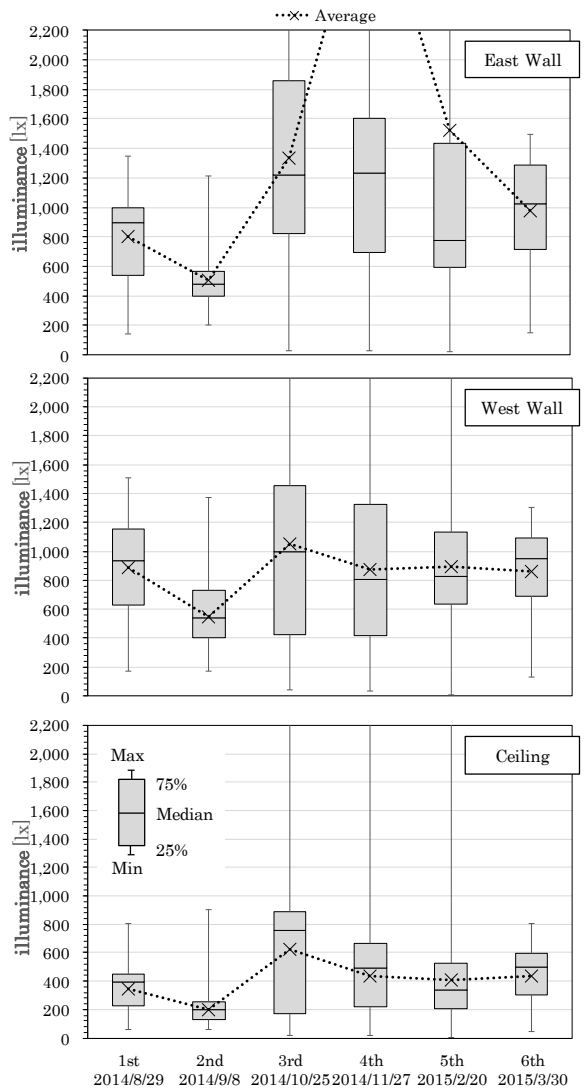


Fig.3 Inter-Quartile Range of Illuminance in 9th Floor.

段が9階（光触媒施工済）の結果である。Fig.4より、光触媒の有無によって、各物質の合計値においては、明確な濃度差や変化を確認することはできない。

このため、個別の化学汚染物質に着目し、厚生労働省による指針値が設けられ、比較的高い濃度が検出された

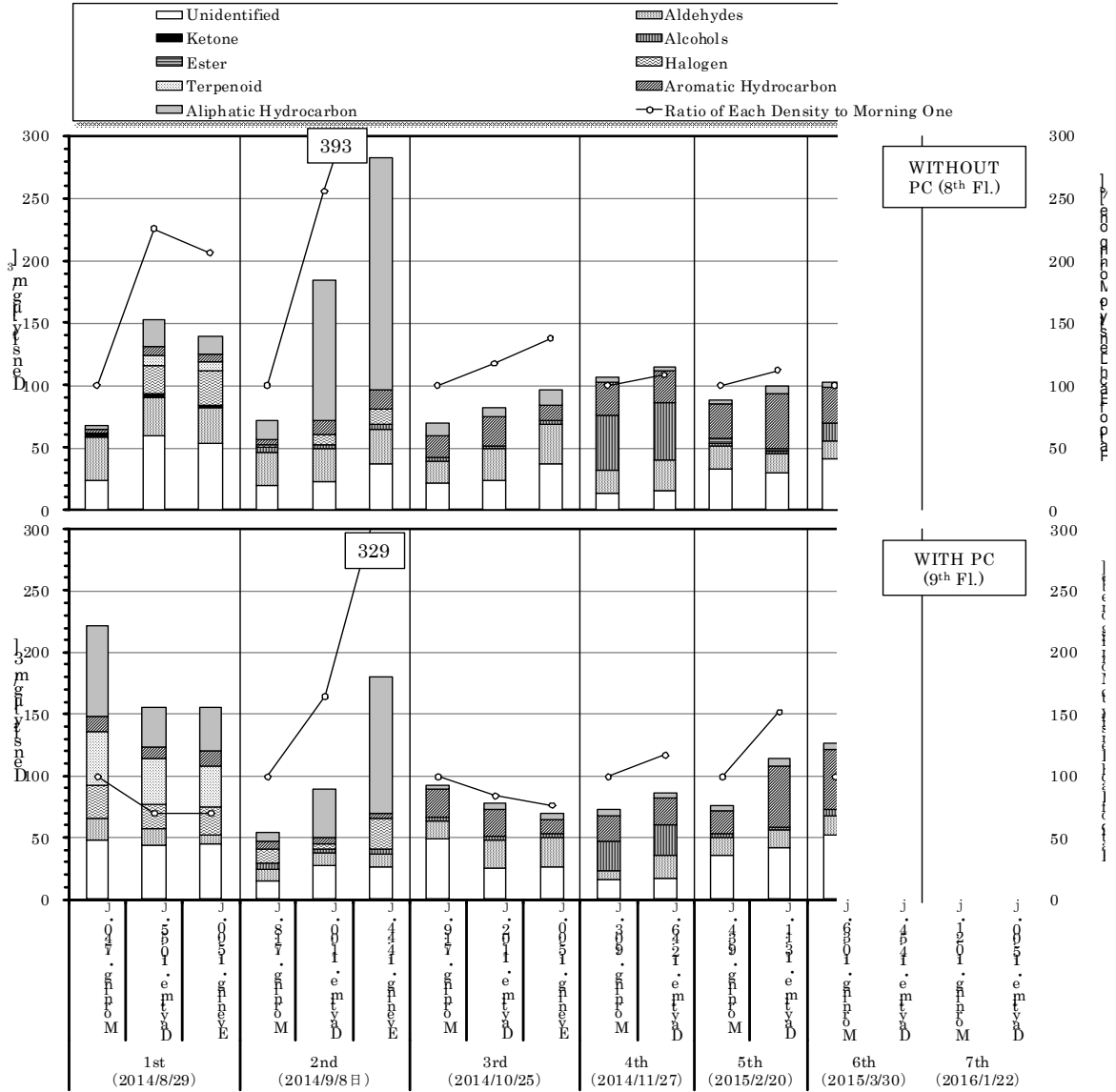


Fig.4 Density of Chemical Substances with and without Photocatalyst.

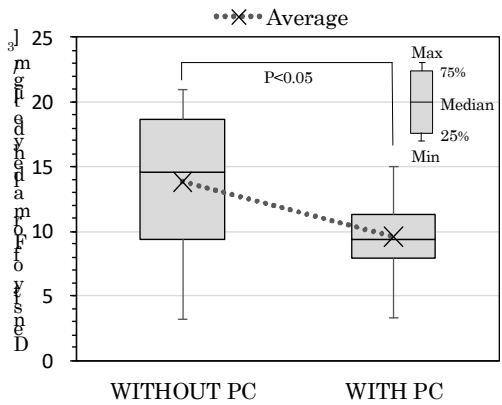


Fig.5 Inter-Quartile Range of Density of Formaldehyde with and without photocatalyst.

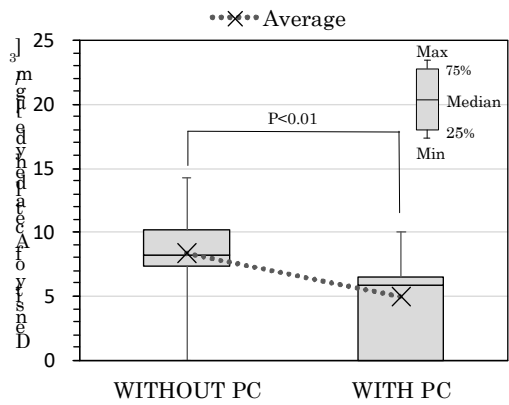


Fig.6 Inter-Quartile Range of Density of Acetaldehyde with and without Photocatalyst.

4種類の物質（ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、トルエン、キシレン）とTVOCの濃度を、統計学的検定によって分析することにした。各物質の全測定データを光触媒あり（9階ロビー）・なし（8階ロビー）に分けて、それぞれの測定値群の有意差をマン・ホイットニーのU検定によって検定した。その結果、ホルムアルデヒドは5%有意、アセトアルデヒドは1%有意であることが証明された。Fig.5にホルムアルデヒドのデータ分布図を、Fig.6にアセトアルデヒドのデータ分布図を示す。Fig.5とFig.6より、どちらも光触媒ありの方が光触媒なしよりも平均値が低いことが判る。つまり、光触媒有無によって濃度差が生じていると考えられる。

しかし、揮発性物質であるVOC濃度は気温依存性があるため、8・9階ロビーの気温との関係を確認する必要がある。気温と各濃度の相関係数を算出すると、ホルムアルデヒドは8階光触媒なし0.79 ($R^2=0.62$)、9階光触媒あり0.62 ($R^2=0.38$)であり、アセトアルデヒドは8階光触媒なし0.46 ($R^2=0.21$)、9階光触媒あり $\Delta 0.16$ ($R^2=0.03$)となり、ホルムアルデヒドの方が相関は高い。Fig.7に、ホルムアルデヒドの8・9階の気温と濃度の散布図を示す。Fig.7より、近似直線の傾きは8階光触媒

なしの方が大きく、特に25°C~27°Cの濃度分布に差が生じていることが判る。つまり、気温が高い状態において、光触媒によってホルムアルデヒド揮発量が抑えられている可能性が示唆された。

3・3 浮遊真菌・総細菌濃度

Fig.8に、浮遊真菌濃度の測定結果を示す。上段が8

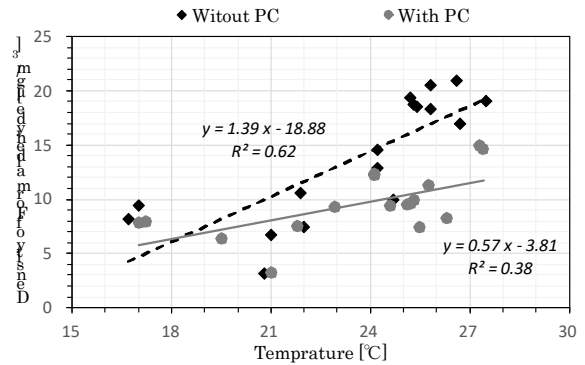


Fig.7 Scatter Graph of Density of Formaldehyde and Indoor Temperature with and without Photocatalyst.

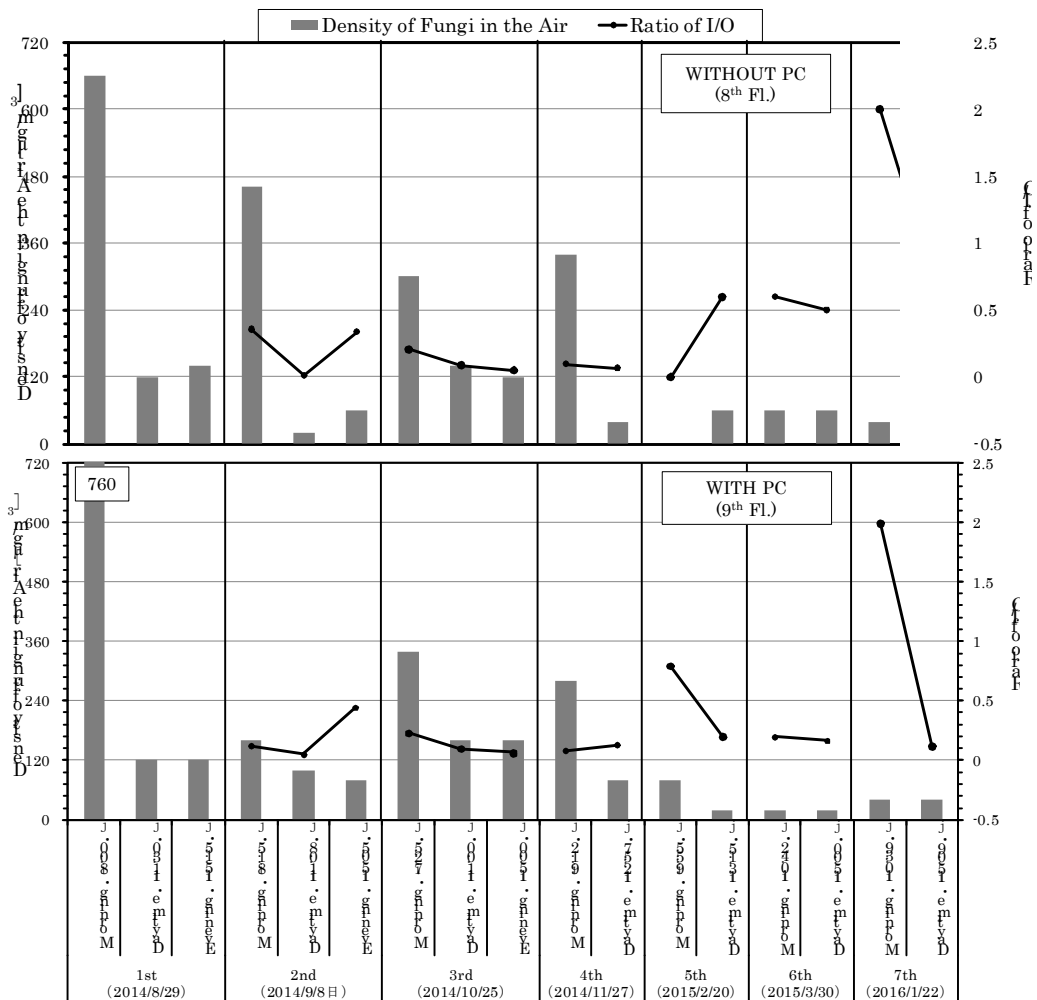


Fig.8 Density of Fungi in the Air with and without Photocatalyst.

階（光触媒未施工）で、下段が9階（光触媒施工済）の結果である。なお、I/O比は外気中の真菌濃度に対する比率であり、1.0が外気と等しいことを示す。Fig.8より、8・9階共に同様の濃度・I/O比変化となることが多く、光触媒有無によって明確な濃度差を確認することはできない。浮遊真菌濃度は外気導入や換気状況によって影響を受けると考えられるため、外気の浮遊真菌濃度との相関係数を算出してみたが、8階 $0.48 (R^2=0.23)$, 9階 $0.75 (R^2=0.56)$ と、光触媒施工済である9階の相関関係の方が強い結果が得られた。また、化学汚染物質と同様に、マン・ホイットニーのU検定によって検定したが、光触媒有無による有意差は確認できなかった。よって、浮遊真菌濃度は光触媒ではなく、換気回数などの他ファクターに依存していると考えられる。

Fig.9に、総バクテリア濃度の測定結果を示す。なお、第7回目は測定自体を実施しなかった。Fig.9より、総バクテリア濃度も浮遊真菌濃度と同様に光触媒有無に

よる差異は特に確認できず、U検定においても有意差は確認できなかった。平均濃度は9階ロビー（光触媒施工済）の方が大きくなっており、人間の滞在時間や人数に依存している可能性があるが、明確な分析を実施することはできなかった。

3・4 ATP拭き取り検査

Fig.10に、ATP拭き取り検査の測定結果を示す。上段が8階（光触媒未施工）で、下段が9階（光触媒施工済）の結果である。まず、9階は2013年11月～2015年6月までの測定結果であり、9階の起点となる2013年11月のデータは光触媒施工前で、1,500～2,300となっている。それが、約1ヶ月が経過した2014年1月には全ての測定ポイントにおいて500を下回っており、多少の上下はあるものの、2015年6月まで安定的に約500以下を示している。つまり、9階では光触媒によって壁面のATPが分解されて、その状態が長期間に渡って維持されていることが判る。

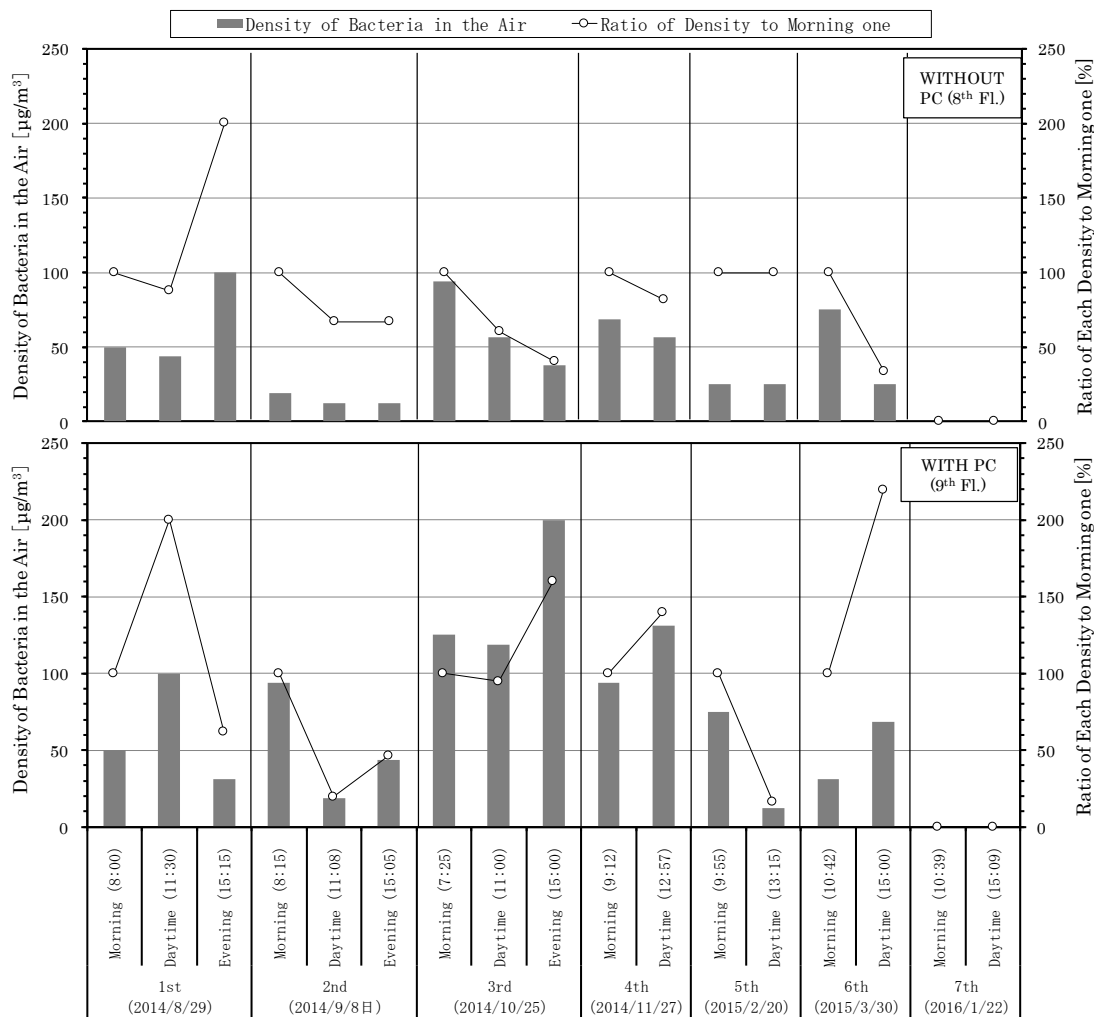


Fig.9 Density of Bacteria in the Air with and without Photocatalyst.

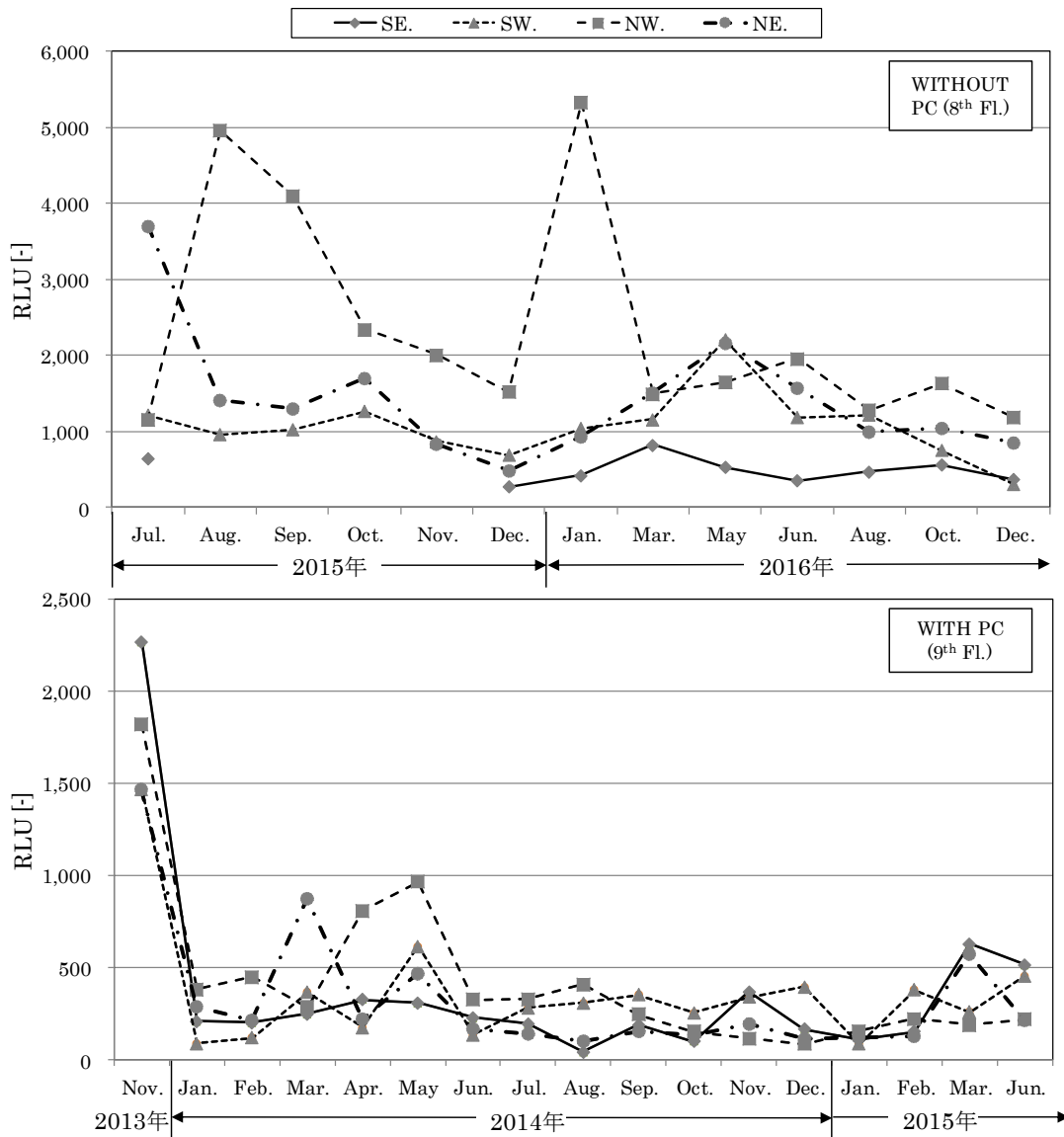


Fig.10. Measurement Result of ATP Check for about One-Half Year with and without Photocatalyst.

また、2015年7月以降は、光触媒施工済の9階だけでなく、光触媒未施工の8階においてもATP拭き取り検査を実施した。Fig.10に示している測定結果はこの2015年7月～2016年12月までのデータであるため、9階データとは時期が一致していない。8階は全体的にRLU値が高く、1,000～2,000で推移しつつ、2,000を超えるRLU値が測定されることもある。

化学汚染物質や浮遊真菌同様に、8階と9階を比較することによって、光触媒有無によるRLU値への影響を定量化する。2015年7月～2018年11月までの測定データを光触媒あり(9階ロビー)・なし(8階ロビー)に分けて、それぞれの測定値データの有意差を、マン・ホイットニーのU検定によって検定した。その結果、1%有意であることが証明され、壁面ATP量は光触媒有無によって明確な差があることが判った。Fig.11に、光触媒

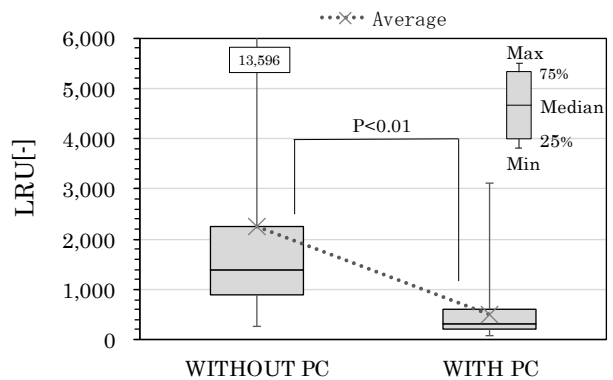


Fig.11 Inter-Quartile Range of ATP Check with and without Photocatalyst.

有無のRLU分布図を示す。Fig.11より、平均値で光触媒あり500、光触媒なし2,252となっており、光触媒によって約75%低下している。四分位数範囲においても、光触媒ありの方が範囲が狭く、安定的に光触媒効果が発揮されていることが判る。

3・5 臭いに関するパネル実験

Fig.12に、6段階臭気強度尺度の回答結果を示す。上段が8階（光触媒未施工）で、下段が9階（光触媒施工済）の結果である。数字が小さいほど臭いを感じていないということであり、「無臭（ゼロ）」の回答数が9階の方が多いが、「楽に感知できる臭い（3）」の回答数が8階よりも多いこともあり、回答のばらつきは大きい。

Fig.13に、各階の臭気強度平均値を示す。エラーバーは標準偏差である。Fig.13より、午前中は8階の方が臭気強度は高いが、午後には9階との差は無くなっている。しかし、標準偏差は午前・午後共に9階の方が大きく、9階の臭いに対する評価が別れていることが判る。

Fig.14に9段階快・不快強度尺度の回答結果を示す。数字が大きい方が快適さを示し、8・9階共に「快でも不快でもない（ゼロ）」の回答が多いが、「やや不快（-1）」の回答数は9階の方が多。Fig.15に、各階の快・不快強度指数の平均値を示す。エラーバーは標準偏差である。Fig.15より、9階の方が午前・午後共に平均値が小さく、標準偏差も大きいことが判る。つまり、快・不快強度は9階の方が、若干ではあるが、評価は悪い。

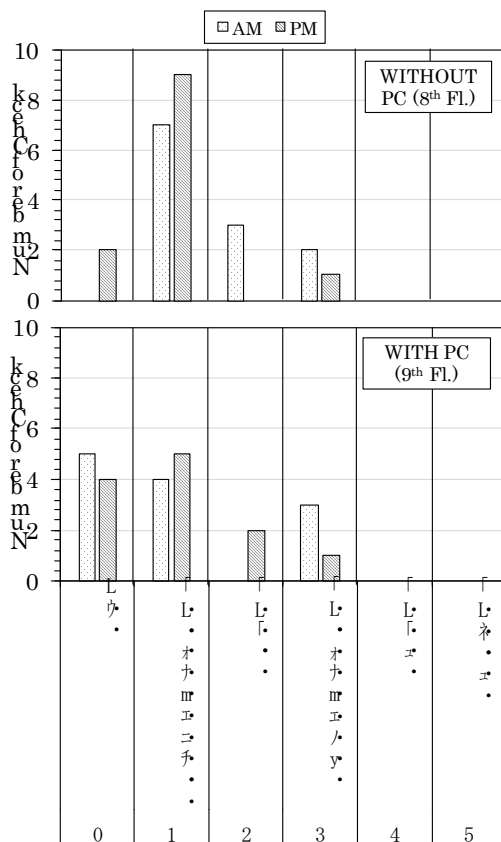


Fig.12 Result of Odor Intensity by Questionnaire.

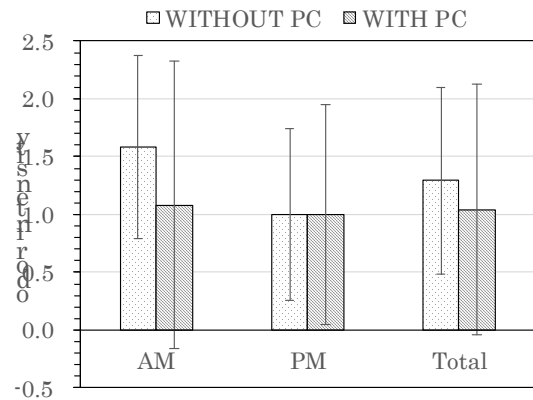


Fig.13. Average and SD of odor intensity

以上より、臭気に対する評価は個人差があり、同じ臭いに対しても感じ方や評価が分かれてしまっていると考えられる。誰もが危険を感じる様な臭い（例えば硫黄）や濃度の高い強烈な臭いであれば、評価は収斂するだろうが、今回の様な低濃度かつ様々な物質が混じり合った複雑な臭いの評価は難しく、評価が分かれてしまうと考えられる。

なお、「容認性」の回答については、全員が午前・午後共に「容認できる」と回答している。

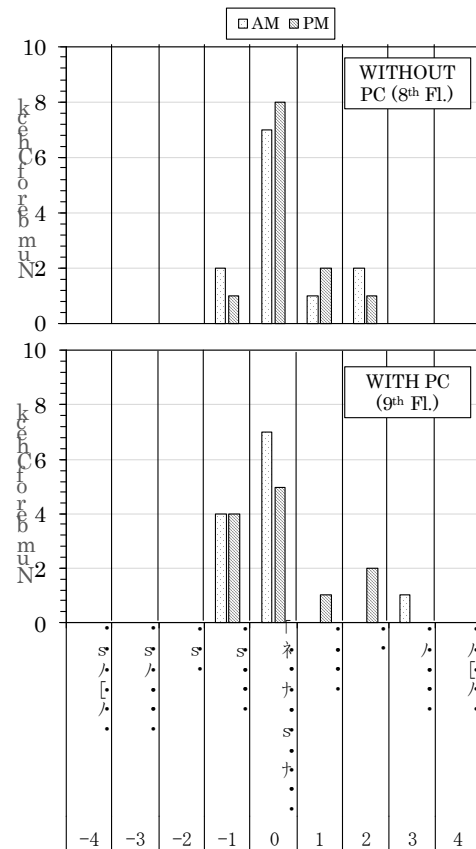


Fig.14. Result of Amenity Intensity by Questionnaire.

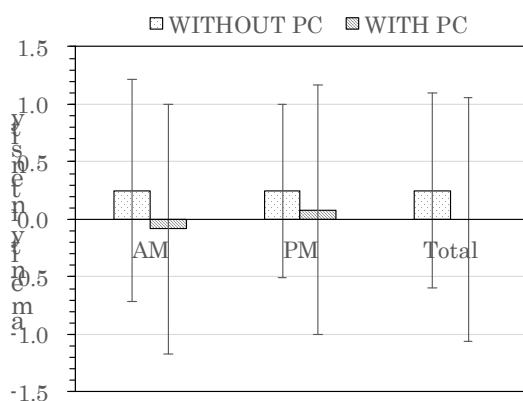


Fig.15. Average and SD of Amenity Intensity

4 まとめ

本研究では、実空間における光触媒効果による空気質改善効果を明らかにすることを目的に、前橋市内の複合施設において各種測定を実施し、その結果を分析した。分析を通じて、以下の示唆を得ることができた。

- ① 時間の経過に伴い空気質指標が改善する、という仮説については、朝に対する割合が上昇する測定日が多いこともあり、この仮説を証明することはできなかった。その理由として、揮発性物質である VOC は気温との相関が強いことや、換気などの影響が考えられるが、本研究の範囲内では明確な原因を特定することはできなかった。よって、現場調査では短時間の変化を捉えることは困難であり、より長期的な評価の方が適切である可能性が高い。
- ② 光触媒あり・なしの比較において、化学汚染物質のうちホルムアルデヒドとアセトアルデヒドの濃度差が、マン・ホイットニーの U 検定において 1%と 5% 有意差が証明された。しかし、浮遊真菌・総細菌・総細菌濃度においては明確な差を確認できなかった。長期的な調査によってサンプル数を増加させ、統計的分析を行うことで、光触媒効果と考えられる有意差を証明することができた。
- ③ 壁面表面の平均 RLU 値は、光触媒ありの方が $\Delta 75\%$ 以下の数値となっており、U 検定においても 1% 有意差が証明された。光触媒効果によって壁面の ATP 量が減少し、かつその状態が長期間継続していることを確認できた。
- ④ 本研究で照度の測定対象としている壁面・天井面は、光触媒工業会ガイドラインが壁面・天井面照度としている 200lx を大幅に超え、室内標準照度としている 1,000lx を平均値としてほぼ満たしていることが確認できた。
- ⑤ 臭いに関するパネル実験においては、9 階（光触媒あり）の方が臭気強度尺度、快・不快強度尺度共に、評価結果の標準偏差が大きくなっており、理由は明確ではないが、より評価の分かれる臭いであったこ

とが推測される。

今後は長期的評価を前提とした調査方法、評価基準などを確立し、より衛生面や臭いに対してより配慮する必要がある他施設において、光触媒効果の実測を行う予定である。また、可視光応答型光触媒は基本的には照度が低い屋内にて利用されることが前提であり、屋内光環境の分析を行うことで、光触媒効果が確実に発揮される室内設計などに応用することを目指し、研究開発を実施する予定である。

謝辞

本研究は、2014 年「地域活性化研究事業」、2015 年度「公募型共同研究事業」として実施された。また、前橋テルサにおける実測調査では、一般社団法人前橋市まちづくり公社まちづくり推進課の皆様にご多大なご協力を頂戴した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三木慎一郎ら、可視光応答型光触媒の室内環境想定条件下におけるホルムアルデヒド低減性能評価法の検討（化学物質濃度低減対策（2）,環境工学 II）,日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 955-956(2005).
- 2) 絹川謙作ら、可視光応答型光触媒による感染リスク低減の検討：第 2 報 付着含ファージ飛沫に対する可視光応答型光触媒の抗ファージ効果（感染リスク低減(2),環境工学 II,2012 年度大会(東海)学術講演会・建築デザイン発表会）,日本建築学会学術講演梗概集, 815-816 (2012).
- 3) 光触媒工業会、光触媒製品性能判定基準,
<http://www.piaj.gr.jp/roller/contents/entry/20090121>.
- 4) 三田村輝章ら、光触媒作用による室内空気質の改善効果に関する検証－複合施設を対象とした実測結果－,日本環境管理学会研究発表会, 13-16 (2015).
- 5) 株式会社鯉コーポレーション、製品ラインナップ,
<http://www.saga-kon.co.jp/sagancoatlineup.html>.
- 6) 緒方壮行ら、ATP 測定法による病室における清掃前後の環境表面汚染度実測調査,日本建築学会環境系論文集, 81(726), 723-729 (2016).
- 7) 日本建築学会、日本建築学会環境基準 AIJES-A007-2010 室内の臭気に関する臭覚測定法マニュアル(2010).
- 8) 光触媒工業会、可視光の照度に関するガイドライン(2017).

